



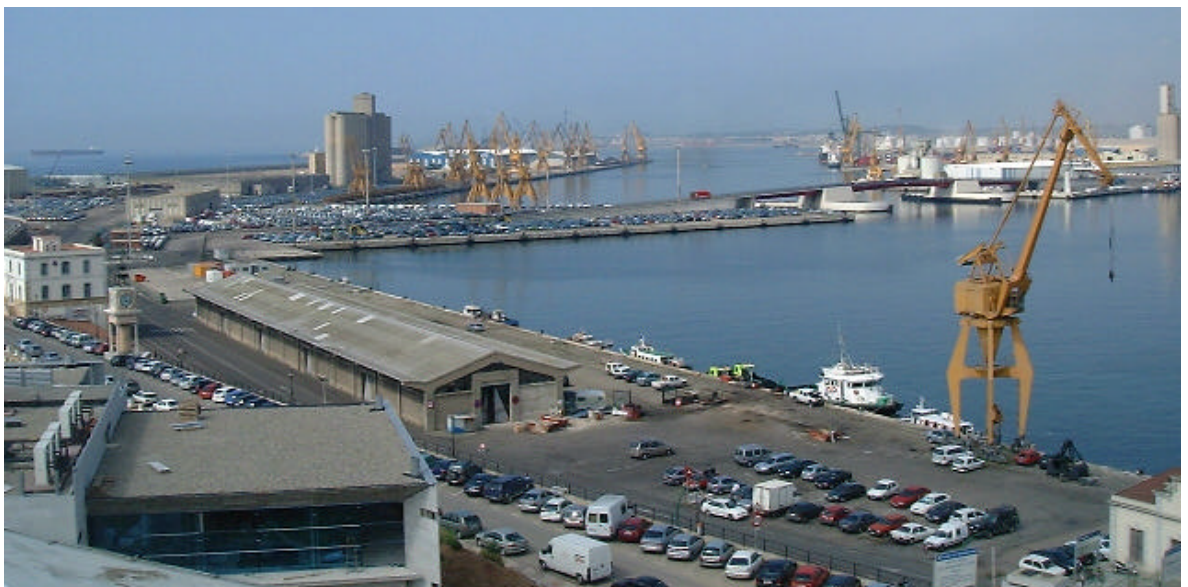
Proyecto HADA

Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental

Programa LIFE ENV/E/000274

INFORME FINAL

Caracterización experimental de niveles de concentración en aire de material particulado en el Puerto de Tarragona en actividades de carga/ descarga y transporte de graneles sólidos



Julio 2005

Proyecto HADA
Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental
Programa LIFE ENV/E/000274

INFORME FINAL

Caracterización experimental de niveles de concentración en aire de material particulado en el Puerto de Tarragona en actividades de carga/ descarga y transporte de graneles sólidos

AUTORES

CIEMAT:

Begoña ARTIÑANO, Francisco J. GOMEZ MORENO, Manuel PUJADAS, Esther COZ
Departamento de Medio Ambiente- Unidad de Contaminación Atmosférica
Avda. Complutense 22, 28040 Madrid

CSIC:

Andrés ALASTUEY, Natalia MORENO, Xavier QUEROL
Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera”-CSIC
C/ Luis Solé y Sabaris s/n , 008028 Barcelona

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. METODOLOGÍA	5
2.1 Zona de estudio: el área portuaria de Tarragona	6
2.2 Instrumentación y medida	7
2.3 Meteorología y origen de masas de aire	8
3. DISCUSION Y RESULTADOS	12
3.1 Condiciones atmosféricas	12
3.2 Niveles de material particulado en estaciones de calidad del aire	12
3.3 Caracterización experimental	14
3.4 Experiencia #0: Descarga de finos de silico-manganeso. Muelle Aragón	12
3.5 Experiencia #1: Descarga de finos de silico-manganeso. Muelle Castilla	16
3.6 Experiencia #2: Carga de alfalfa	17
3.7 Experiencia #3: Resuspensión de polvo de hulla por paso de camiones	22
3.8 Experiencia #4: Resuspensión de polvo de hulla por paso de camiones en suelo mojado	34
3.9 Experiencia #5: Descarga de tapioca en muelle Castilla	35
3.10 Experiencia #6: Carga de finos de silico-manganeso en camiones y tren	39
3.11 Experiencia #7: Intercomparación de equipos Grimm en APT-Tarragona y CIEMAT-Madrid	44
3.12 Experiencia #10: Descarga de mandioca en muelle Aragón	48
3.13 Experiencia #11: Descarga de clínker en muelle Navarra	49
3.14 Experiencia #14: Descarga de clínker y carga de camiones en muelle Navarra.	51
3.15 Experiencia #12 Intercomparación de equipos Grimm durante una descarga	54
3.16 Experiencia #15: Intercomparación de equipos en la APT	55
4. CONCLUSIONES	57
5. AGRADECIMIENTOS	59
ANEXO Análisis de materiales por microcopía electrónica	60

1. INTRODUCCION

Este informe se enmarca en el Acuerdo de colaboración entre el Ente Público Puertos del Estado (EPPE), el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (IJA-CSIC) y el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) para el Estudio y Caracterización del material particulado atmosférico en áreas portuarias.

Este Estudio forma parte de algunas de las Actividades que contempla el Proyecto HADA (Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental), financiado en el Programa Europeo LIFE (LIFE2 ENV/E/000274), y coordinado por Puertos del Estado. El contenido de este Informe corresponde a las actividades descritas en la Fase 3 del mencionado Acuerdo de colaboración y cuyo objetivo es la realización de distintas campañas de medida dirigidas a la caracterización del material particulado generado en diversas operaciones portuarias de carga/descarga y manipulación de graneles con un alto potencial de impacto en los niveles de material particulado atmosférico. Los resultados de estas campañas de medidas experimentales tienen además como objetivo servir de base para la parametrización de los factores de emisión de materia particulada asociados a estas actividades. Asimismo se pretende caracterizar no sólo el impacto ambiental de operaciones de carga/descarga sino de formas de almacenamiento de graneles sólidos, técnicas de manipulación de mercancías, propiedades de materiales trasegados y estado de los mismos, de cara a un tratamiento de los mismos como fuentes generadoras de contaminación de aerosol atmosférico.

Las campañas de medidas tuvieron lugar en los meses de Junio de los años 2003 y 2004 en el Puerto de Tarragona. Este puerto fue seleccionado para la realización de este estudio y el desarrollo de la fase experimental, por ser uno de los mayores puertos nacionales en tráfico y distribución de mercancías (cerca de 30,000 toneladas anuales, según fuentes de la Autoridad Portuaria de Tarragona-APT), y ser ampliamente representativo de la mayor parte de las actividades que se desarrollan en otros puertos nacionales. La mercancía que se mueve en este puerto comprende mayoritariamente productos petrolíferos (crudo y otros derivados) en torno al 50% en masa del total, graneles sólidos (cerca de un 30 %), y otros productos y carga diversa (vehículos, contenedores, piezas metálicas,..) que constituyen la mercancía restante. Los graneles sólidos abarcan una gran diversidad de productos destinados a los sectores metalúrgico, energético (carbones: hulla y coque), abonos, materiales de construcción, además de una extensa variedad relacionada con los sectores agroalimentario y ganadero. La carga/descarga de estos productos se realiza de manera muy diversa dependiendo de las características del producto y/o de la empresa estibadora, algunas de las cuales disponen de instalaciones y sistemas de manipulación dirigidos a la optimización de las tareas de carga/descarga, y en algunos casos reducir el impacto ambiental, principalmente en los niveles de material particulado en la atmósfera. Una gran parte de la mercancía manipulada en este puerto tiene como origen o destino alguno de los polígonos industriales próximos a la ciudad de Tarragona que acogen un gran complejo petroquímico, industria química y mecánica, e industria del automóvil.

La realización de campañas intensivas está dirigida específicamente a la caracterización del impacto de algunas de estas actividades de carga/descarga de graneles con mayor relevancia en los niveles de inmisión de partículas, y su caracterización granulométrica, química y morfológica, de cara a la obtención de factores de emisión asociados a las

mismas, que finalmente puedan ser utilizados como datos de entrada en los modelos de diagnóstico y previsión atmosféricos. Para el diseño de las medidas se tuvieron en cuenta estos factores, según se explica en el apartado de METODOLOGÍA.

2. METODOLOGÍA

Con objeto de caracterizar los materiales y actividades que mayor incidencia pudieran tener en los niveles de calidad del aire y concretamente en el material particulado en el área portuaria, se seleccionaron, conjuntamente con los responsables de Medio Ambiente de la Autoridad Portuaria de Tarragona (APT), una serie de graneles sólidos o materiales especialmente pulverulentos que a priori podrían ser caracterizados:

- Carbón de hulla
- Carbón de coque
- Cemento
- Clinker
- Fosfatos
- Nitratos y nitritos
- Mandioca
- Habas y harina de soja
- Maíz y derivados
- Ceniza
- Concentrado de cobre

Dado, por una parte, que la previsión de la situación de buques en el Puerto de Tarragona, y por tanto la información sobre los materiales que serán trasegados en el mismo, no puede obtenerse con una antelación superior a cinco días y, por otra parte, que el grado de incertidumbre asociado a la previsión meteorológica en este plazo a escala local es bastante alto, se seleccionaron los periodos más propicios para la realización de las campañas de medidas, teniendo en cuenta los objetivos de las mismas.

La primera campaña de medidas se realizó la primera semana de Junio de 2003, mientras que la segunda tuvo lugar en la tercera semana de ese mismo mes del año 2004.

El diseño experimental en detalle fue realizado “in situ” en función de la situación en tiempo real basado en varios factores determinantes: lugar de la descarga, actividad, material trasegado, y situación meteorológica, principalmente velocidad y dirección de viento. Ello propició que en algún caso hubiera de abortarse el experimento y rediseñar de nuevo el despliegue instrumental.

En estas campañas participaron equipos humanos e instrumentales del IJA-CSIC y CIEMAT, conjuntamente con el soporte del Departamento de Medio Ambiente de la APT, quien proporcionó la ayuda logística para la realización de las mismas.

2.1 Zona de estudio: el área portuaria de Tarragona

De cara a una interpretación de los resultados de las medidas obtenidas en esta campaña, se describen a continuación y brevemente las principales características de la zona de estudio.

El puerto de Tarragona se encuentra situado en la parte suroeste de la ciudad alineado con la costa que sigue en este punto una dirección según el eje Noreste-Suroeste. En general, la carga/descarga de mercancía se suele localizar en los diferentes muelles según sus características, lo que permite disponer de una infraestructura "ad hoc" para el trasiego y transporte en algunos de ellos.

De los 16 muelles o zonas de carga/descarga de mercancías (Figura 1), el muelle de Cataluña concentra las actividades relacionadas con el carbón, los muelles Alcudia, Navarra y Aragón, acogen las mercancías relacionadas con diversos materiales de construcción, cemento, clinker, aunque son multi-función, mientras que los graneles agroalimentarios, abonos etc. se trasiegan en los muelles Rioja y Castilla. La carga / descarga de hidrocarburos se realiza en un extremo del puerto (muelle de Inflamables) y pantalán de Repsol.



- | | |
|--|--|
| 1 - MUELLE DE CATALUNYA / CATALUNYA QUAY | 9 - MUELLE DE REUS / REUS QUAY |
| 2 - MUELLE DE ALCÚDIA / ALCÚDIA QUAY | 10 - MUELLE DE RIOJA / RIOJA QUAY |
| 3 - MUELLE DE NAVARRA / NAVARRA QUAY | 11 - MUELLE DE CASTILLA / CASTELLA QUAY |
| 4 - MUELLE DE ARAGÓN / ARAGÓ QUAY | 12 - MUELLE DE INFLAMABLES / INFLAMABLES QUAY |
| 5 - MUELLE DE LLEIDA / LLEIDA QUAY | 13 - EXPLAN. DE HIDROCARBUROS / HYDROCARBURE ESPL. |
| 6 - MUELLE DE LEVANTE / LLEVANT QUAY | 14 - PANTALÁN DE ASESА / ASESА JETTY |
| 7 - MUELLE DE COSTA / COSTA QUAY | 15 - MUELLE DE ANDALUCÍA / ANDALUSIA QUAY |
| 8 - MUELLE DE PESCADORS / PESCADORS QUAY | 16 - PANTALÁN DE REPSOL / REPSOL JETTY |
| 18 - EDIFICIO PORT CONTROL | 17 - BOYA |

Figura 1. Foto y ubicación de muelles del puerto de Tarragona. Se indica también la localización de las estaciones de calidad del aire de la red XVPCAT, en el Puerto y Universidad laboral, así como la estación meteorológica de Port Control.

2.2 Instrumentación y medida

Con objeto de documentar la distribución granulométrica y niveles de inmisión asociados a las distintas actividades y tipos de graneles, se utilizaron tres equipos espectrómetros láser (marca GRIMM, modelos 1107 y 1108), que midieron las fracciones de Material Particulado inferior a 10, 2.5 y 1 micras (PM10, PM2.5 y PM1, respectivamente) (el modelo 1108 también mide PST-Partículas Totales en Suspensión) con una frecuencia de archivo de datos de 6 segundos siempre que operan en modo on-line, tal como ha ocurrido en la presente campaña.

Los equipos se identificaron como G1 (modelo 1107, propiedad del CSIC), G2 (modelo 1108, propiedad del CIEMAT) y G3 (modelo 1107, propiedad del CIEMAT). El equipo G2 operó con un ligero calentamiento de la muestra (40 °C) para evitar efectos en el muestreo producidos por la elevada humedad ambiental. Los equipos G1 y G2, al ser del modelo 1107 evitan este efecto por dilución de la muestra con aire seco.

Tanto al inicio como al final de las campañas de medidas, como en cada una de las experiencias, se plantearon ejercicios de intercomparación de los tres equipos GRIMM, que posteriormente serían contrastados con los resultados obtenidos por gravimetría de un equipo muestreador de alto volumen (sólo para PM10) propiedad del CSIC. Previamente a la campaña de medida, los dos espectrómetros láser pertenecientes al CIEMAT fueron enviadas al fabricante (GRIMM, Alemania) para su calibración, obteniéndose los factores de calibración correspondientes.

Asimismo se utilizó, en los casos en los que el muestreo era representativo y el campo de concentraciones moderadamente estacionario, un impactador en cascada. Este instrumento permite separar partículas suspendidas en un gas, en clases según su tamaño aerodinámico. El aerosol se introduce a través de una tobera seguida por una superficie de impactación. Cada tobera y su superficie de impactación asociada constituye una etapa. El sistema más común es operar con varias etapas en serie, que es lo que se denomina impactador de cascada. Estas etapas están ordenadas en orden de tamaños de corte, decreciendo el tamaño de la tobera ó el número de toberas en cada etapa. Reduciendo el diámetro de tobera también se incrementa la velocidad del gas y ambos sirven para reducir el diámetro de partícula a clasificar. Cada etapa posee una superficie de impactación donde se quedan retenidas las partículas para su posterior determinación gravimétrica ó química. La última etapa está seguida de un filtro para capturar las partículas de tamaño inferior al diámetro de corte de la última etapa. El impactador de cascada utilizado en esta campaña ha sido un modelo Sierra 220 de la marca Andersen que consta de 8 etapas y un filtro final, diseñado para clasificar partículas de tamaños comprendidos entre 0.3 y 15 µm trabajando a un caudal de 10 pm. Algunas de las muestras obtenidas en el filtro final del impactador fueron analizadas por microcopia electrónica (SEM) mostrándose los resultados en el Anexo.

El análisis de los niveles de materia particulada en la atmósfera se complementó cuando esto fue posible con los datos de varias estaciones de la red de vigilancia de la contaminación atmosférica XVPCAT, que gestiona el Departamento de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. Estas estaciones situadas en la ciudad de Tarragona y sus proximidades, miden PM10 y PST por gravimetría en promedios diarios aunque no de manera continua, por lo que no se dispone de datos durante todos los días de la campaña

de medidas. Las dos estaciones más cercanas al área de estudio: Puerto y Universidad Laboral se muestran en la Figura 1. Estas estaciones miden asimismo en continuo y por el método de absorción beta valores en continuo de PST, no obstante estos datos no han sido validados por los responsables de la red, por lo que no han sido utilizados en este análisis.



Figura 2. Instrumentación meteorológica en la estación de Port Control.

La información meteorológica en el escenario de la campaña ha sido proporcionada por la APT, a partir de los datos que se registran en la estación meteorológica de Port Control (Figura 2), edificio situado en el extremo Sur del muelle de Cataluña. Esta estación registra valores de velocidad y dirección de viento (27 m s.n.m), temperatura y humedad relativa del aire (24 m s.n.m) , presión, radiación solar, y precipitación, con una resolución temporal de 10 minutos.

Finalmente como apoyo a la caracterización de las condiciones meteorológicas locales en el punto de muestreo, se utilizó una estación meteorológica portátil, modelo Weather Wizard III, de la marca Weather Link. Con esta estación de 3 metros de altura se obtuvo información sobre temperatura, dirección y velocidad de viento con carácter exclusivamente local en los puntos de muestreo.

2.3 Meteorología y origen de masas de aire

El análisis de la situación meteorológica a escala sinóptica durante los días de medida se ha basado en los mapas de análisis de presión en superficie y de altura geopotencial a 850, 700 y 500 hPa de que proporciona el Instituto Nacional de Meteorología para las 06,12, y 18 h UTC . En la Figura 3 se muestra un ejemplo de esta información durante dos días de la campaña de Junio de 2004.

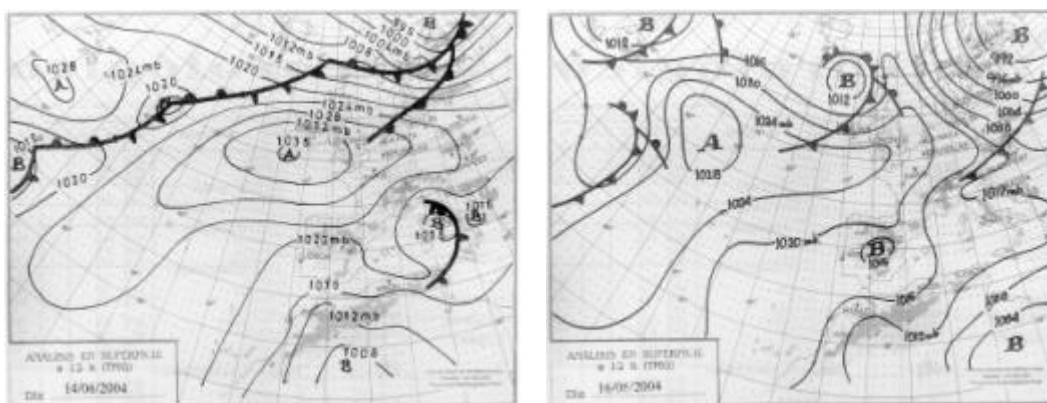
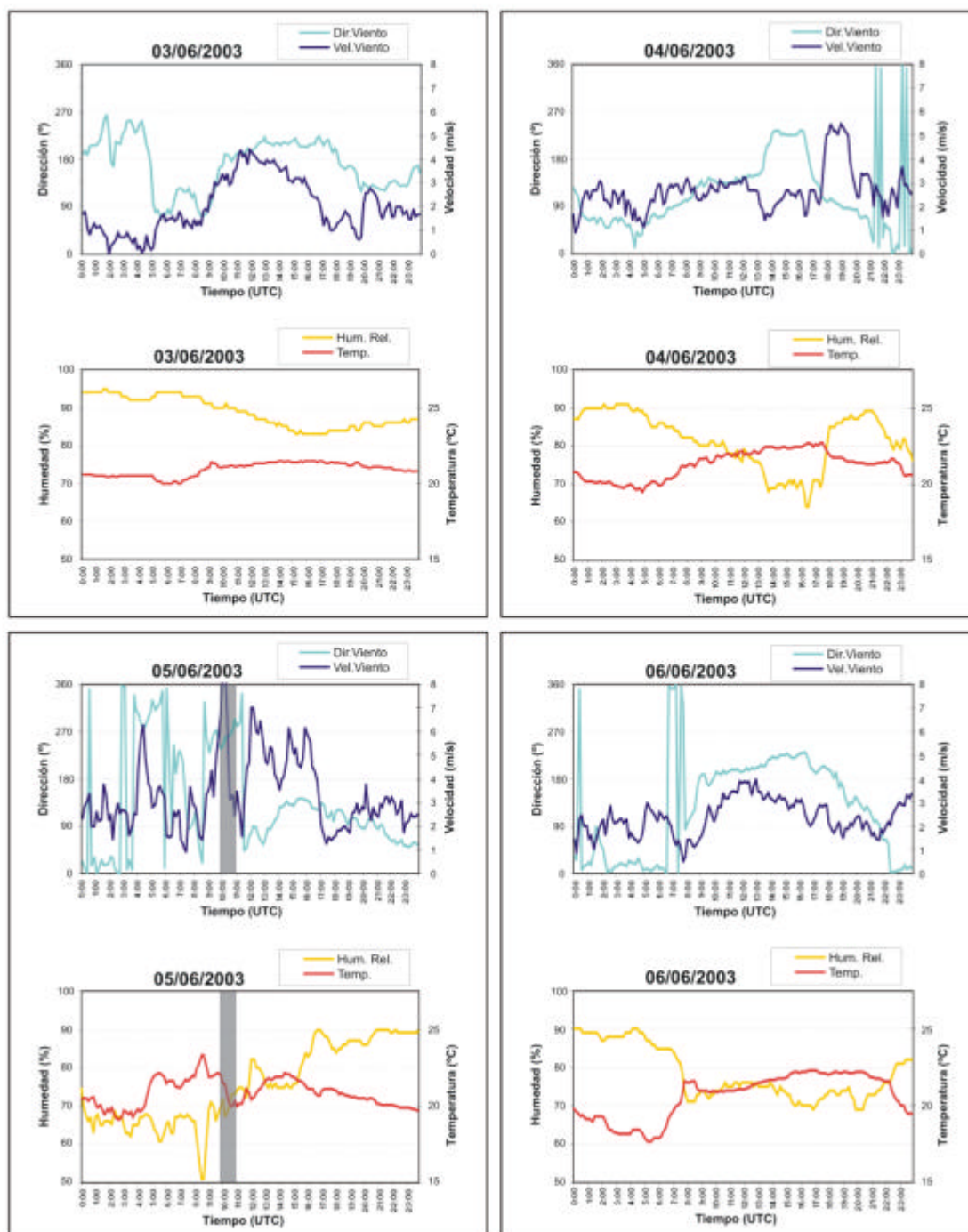


Figura 3. Mapas de análisis de presión en superficie de los días 14 y 16 de junio de 2004 . Se observa el potente anticiclón el día 14/06/04 y parte de la inestabilidad en el golfo de Génova que posteriormente afectaría al Noreste peninsular. El día 16 fue un día típico de verano con formación de ciclos locales y bajas presiones de origen térmico.

Las variables meteorológicas a escala local, representativas del área portuaria de Tarragona, fueron las proporcionadas por la estación meteorológica situada encima del edificio de Port Control. En la Figura 4 a) campaña de 2003 y b) campaña de 2004, se encuentra la evolución de las variables velocidad y dirección de viento, y temperatura y humedad relativa durante los días de medida, así como los episodios de precipitación.

a)



b)

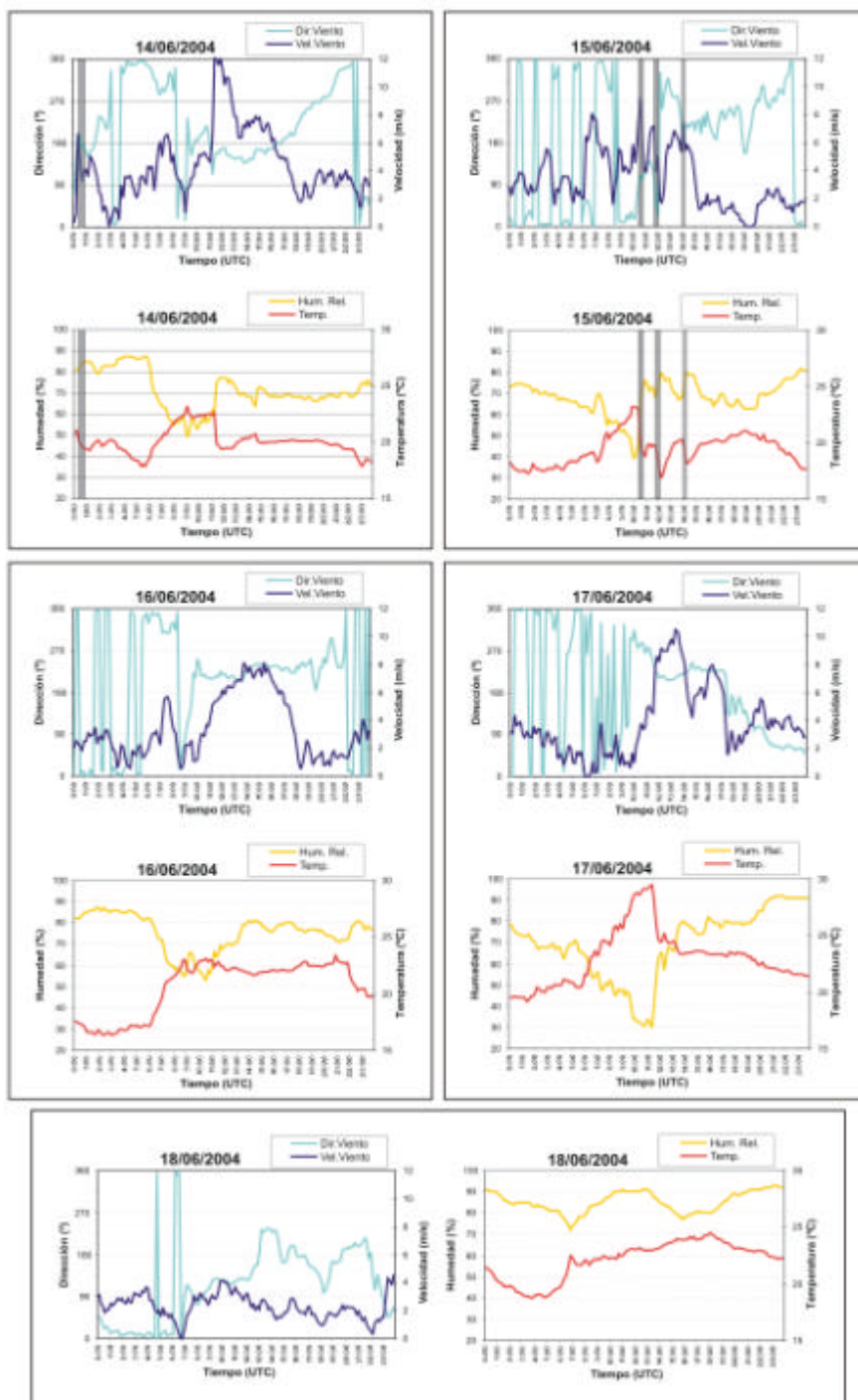


Figura 4. Variables meteorológicas durante la campaña de medidas tomadas en Port Control a) 3 a 6 de Junio de 2003 b) días 14 a 18 de junio de 2004. Las bandas sombreadas corresponden a los periodos en que se registraron precipitaciones .

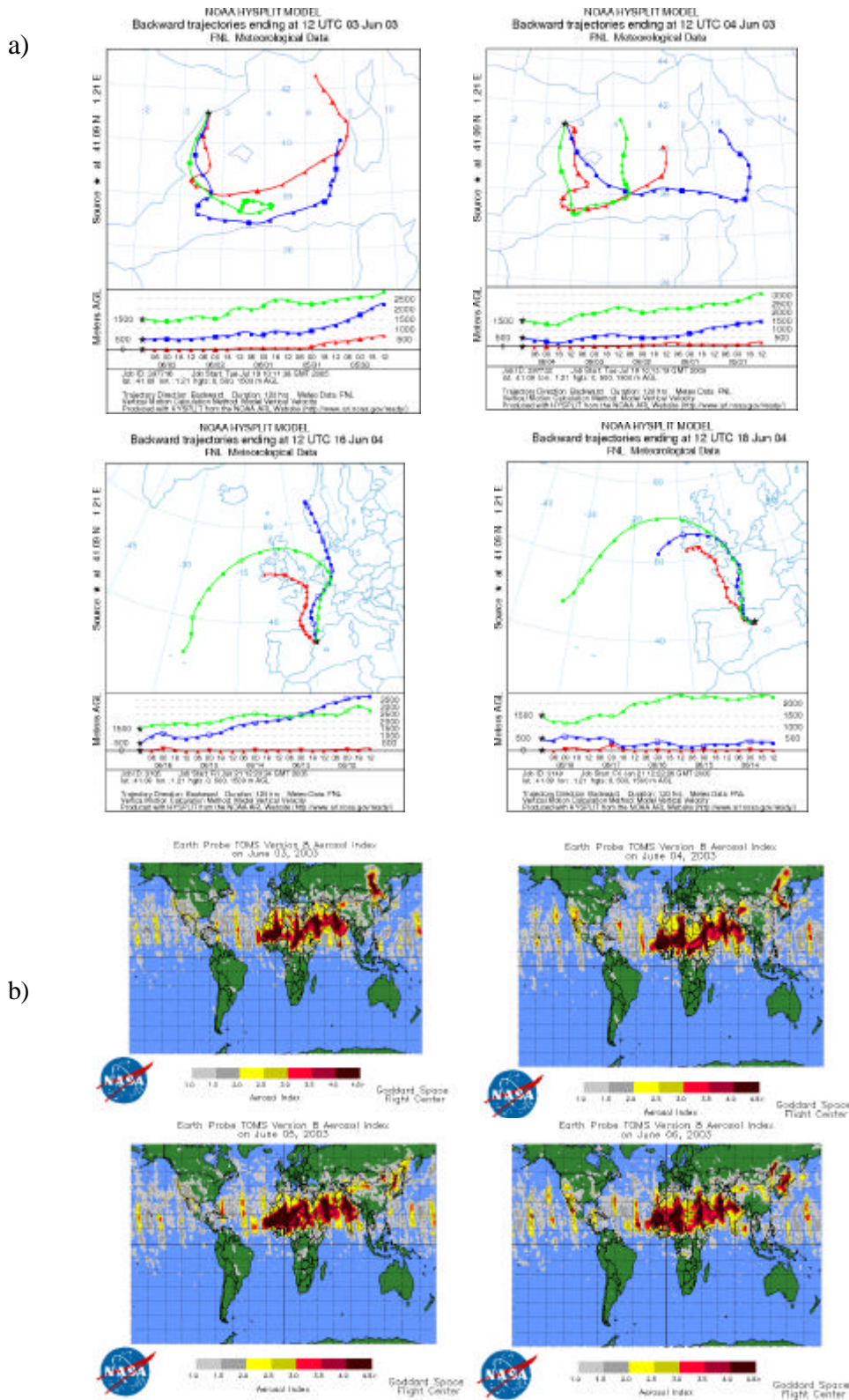


Figura 5 a). Retro trayectorias de masas de aire con inicio en Tarragona a las 12 UTC de los días de medida 3-4 de junio de 2003 y 16-18 de junio de 2004. b) Imagen proporcionada por el instrumento TOMS con el índice de aerosol sobre el área de estudio durante los días 4-6 de junio de 2003 mostrando la intrusión de polvo desde el Norte de África que afecta al Sur de la Península Ibérica y parte del Mediterráneo a

partir del día 5 de junio de 2003, coincidiendo con la procedencia de la masa de aire que indican las retrotrayectorias para esos días.

Finalmente, y con objeto de identificar posibles aportes externos de material particulado sobre el área de estudio durante los días de medida, debidos a procesos de transporte a larga distancia, se realizó un análisis de retro-trayectorias de masas de aire. Estas se calcularon con punto de partida sobre el puerto de Tarragona a las 12:00 h (UTC) y a tres alturas diferentes (0, 500 y 1500 m.s.n.s.), retrocediendo en el tiempo hasta tres días. Para ello se utilizó el modelo Hysplit del Air Resources Laboratory de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). Las gráficas correspondientes a dichas trayectorias se muestran en la Figura 5 a). Complementando esta información, y con objeto de estudiar los posibles aportes externos de materia particulada se utilizaron las imágenes de satélite sobre contenido de polvo o índice de aerosol tomadas con el instrumento TOMS de la NASA (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>) para los días de campaña (Figura 5 b).

3. DISCUSION Y RESULTADOS

3.1 Condiciones atmosféricas

Desde el punto de vista del estado de la atmósfera, las condiciones meteorológicas durante ambas campañas fueron favorables y representativas de las condiciones locales de la zona de estudio en las que dominan los periodos de brisa típica y entrada de aire marino hacia el interior, esto es, con posibilidad de impacto de emisiones portuarias en su entorno inmediato tierra adentro.

No obstante, las condiciones de la atmósfera durante el inicio de la campaña de junio de 2003 estuvieron caracterizadas por la presencia de masas de aire frío en altura lo que provocó una cierta inestabilidad en superficie. La situación de inestabilidad remitió hacia la tarde del día 5 de junio en la que tras un episodio de precipitación intensa (Figura 4 a) en la zona, la presencia de las altas presiones en el Mediterráneo permitió el desarrollo de las circulaciones locales durante el resto de los días de campaña con condiciones de brisa y entrada de aire marino procedente del Mediterráneo.

Por el contrario, durante la tercera semana de junio de 2004 la situación atmosférica durante la campaña de medidas estuvo dominada por la presencia de un fuerte anticiclón atlántico situado al Sur de las Islas Británicas que afectó a casi la totalidad de la península los días 13 y 14 de junio. Durante la tarde de éste y a lo largo del día 15 de junio se desplaza sobre la vertical de Baleares y Noreste peninsular una masa de aire frío en altura que provoca una fuerte inestabilidad atmosférica dando lugar a precipitaciones de corta duración y en ocasiones intensas (en forma de granizo) el día 15/06/04 sobre la zona de estudio. La atmósfera no llega a estabilizarse hasta el mediodía del día 16 y principalmente el día 17, en el que las condiciones estables favorecen la formación de circulaciones locales y el desarrollo de la brisa que se observa (Figura 4 b) estos días con un inicio a las 10 h UTC de componente SW y un aumento en la velocidad del viento durante un periodo de duración de 6-7 horas. El

máximo de intensidad se registra entre las 12:00 h y las 15:00 h (UTC) coincidiendo con esta dirección.

Desde el punto de vista de procesos de transporte a larga distancia, las trayectorias de las masas de aire que llegaron a Tarragona durante Junio de 2003 eran de claro origen mediterráneo marcadas por el giro anticiclónico de las mismas. La presencia, observada a partir de las imágenes TOMS, durante los días 3-4 de una masa de aire cargada de polvo sobre el Norte de Africa que acabará siendo transportada sobre el Mediterráneo afectando la zona de estudio el día 6 de Junio de 2003, permite confirmar el aporte de polvo de este continente sobre la zona de estudio. Ello podría repercutir sin duda en los niveles de fondo de material particulado que se registraron en el Puerto de Tarragona.

En Junio de 2004 las trayectorias de las masas de aire que llegaron a la zona de estudio estuvieron también marcadas por un movimiento anticiclónico, que en este caso transportó las masas de aire desde la vertiente atlántica en un gran arco con recorrido sobre Francia. En superficie, los ciclos locales y la entrada de la brisa se observan cuando remite la inestabilidad.

Los posibles aportes de material particulado sobre la zona que en el caso del año 2003 podían provenir del Mediterráneo e ir cargadas con polvo africano, en Junio de 2004 atraviesan el interior de Francia y en ambos casos se superpondrían al transporte debido a las circulaciones locales que podrían haber recorrido la franja costera en dirección Norte-Sur durante la madrugada y entrar con la brisa tierra adentro una vez que se estableciera ésta.

3.2 Niveles de material particulado en estaciones de calidad del aire en Tarragona

Los niveles de material particulado que se registraron durante la segunda campaña de medidas en las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire en Tarragona (XVPCAT) gestionadas por la Generalitat de Catalunya, indican valores que superan el valor límite diario de $50 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ establecido en el R.D. 1073/2002 que transpone la directiva 1999/30/CE en la estación del Puerto durante los días 15 y 17 de junio, y en Bonavista el día 18, (Tabla 1, señalados en negrita). Estos datos se refieren a la fracción PM_{10} de material particulado, mientras que en alguna de las estaciones que disponían de dicha medida se muestran también los valores de PST obtenidos igualmente por gravimetría.

Tabla 1. Niveles diarios de PM10 y PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenidos por muestreo manual y gravimetría en las estaciones de la Red de Vigilancia en Tarragona.

Estaciones Red XVPCAT						
Fecha	Puerto	Tarragona DARP		Bonavista		Universidad
	PM10	PM10	PST	PM10	PST	PM10
12/06/04						
13/06/04						
14/06/04	32					28
15/06/04	55					22
16/06/04		42	106			
17/06/04	55			39	102	38
18/06/04	43	40	68	50	87	

3.3. Caracterización Experimental

Todas las experiencias en las que se realizaron las medidas a lo largo de las campañas, fueron identificadas y numeradas, tal como aparecen en la Tabla 2. Los experimentos y despliegue instrumental fueron diseñados in situ, en función de condiciones meteorológicas, situaciones de buques y tipo de trabajos de manipulación.

Precisamente por esto algunas de las experiencias y despliegues hubieron de ser suspendidos por cambios en alguno de estos factores. Concretamente las numeradas como 8, 9 y 13, hubieron de ser interrumpidas debido a variación de las condiciones meteorológicas (cambios en la dirección del viento), por lo que los resultados correspondientes a las mismas no se incluyen al no ser representativos.

Las experiencias han sido numeradas de manera correlativa en el presente informe, según aparecen en la siguiente Tabla. No obstante en los informes individuales correspondientes a cada una de las dos campañas de medidas conservan la numeración original, asignada durante los experimentos durante los años 2003 y 2004.

Tabla 2. Listado de las experiencias realizadas durante la campaña del año 2004 desarrollada en el puerto de Tarragona.

Nº experiencia	Fecha	Descripción	Comentario
0	03/06/03	Descarga de finos de Si-Mn	Muelle Aragón
1	03/06/03	Descarga de finos de Si-Mn.	Muelle Castilla
2	03/06/03	Carga de alfalfa en barco	Muelle Castilla
3	04/06/03	Resuspensión de carbón de hulla por paso de camiones	
4	04/06/03	Resuspensión de carbón de hulla por paso de camiones	Igual a la experiencia anterior pero con suelo regado
5	04/06/03	Descarga de tapioca	Muelle Castilla
6	05/06/03	Carga de finos Si-Mn en camiones y tren	
7	5-6/06/03 16-19/06/03	Intercomparación de equipos GRIMM	Tarragona (APT) y Madrid (CIEMAT)
8	15/06/04	Carga de camiones con clinker por medio de pala	Variación en la dirección viento y tormenta de granizo. No se analizan medidas.
9	16/06/04	Carga de camiones con clinker por medio de pala	Variación en la dirección viento. Medidas no representativas.
10	16/06/04	Descarga de mandioca	Muelle Aragón
11	16/06/04	Descarga de clinker	Muelle Navarra
12	17/06/04	Intercomparación de equipos GRIMM durante descarga	Equipos entre muelle Aragón y Navarra, sin concentración homogénea
13	17/06/04	Descarga de clinker en muelle Navarra	Equipos en muelle Castilla, pero cambia la dirección del viento
14	17/06/04	Descarga de clinker y carga de camiones	Muelle Navarra
15	17 y 18/06/04	Intercomparación en la APT	

3.4 Experiencia #0: Descarga de finos de silico-manganeso. Muelle Aragón.

Este experimento se realizó en el muelle Aragón, el día 3/6/03, a las 11:00 h locales. Se trataba de una descarga de finos de silico-manganeso, desde el barco (de nombre "El Tango") a un altura de 7-8 metros hasta el muelle, para posteriormente ser cargados en camiones. La descarga del material se realizaba en graneles sobre el propio muelle y posteriormente se cargaba con pala en camiones. El tipo de material y lugar de descarga coincidieron con los de la experiencia #6.

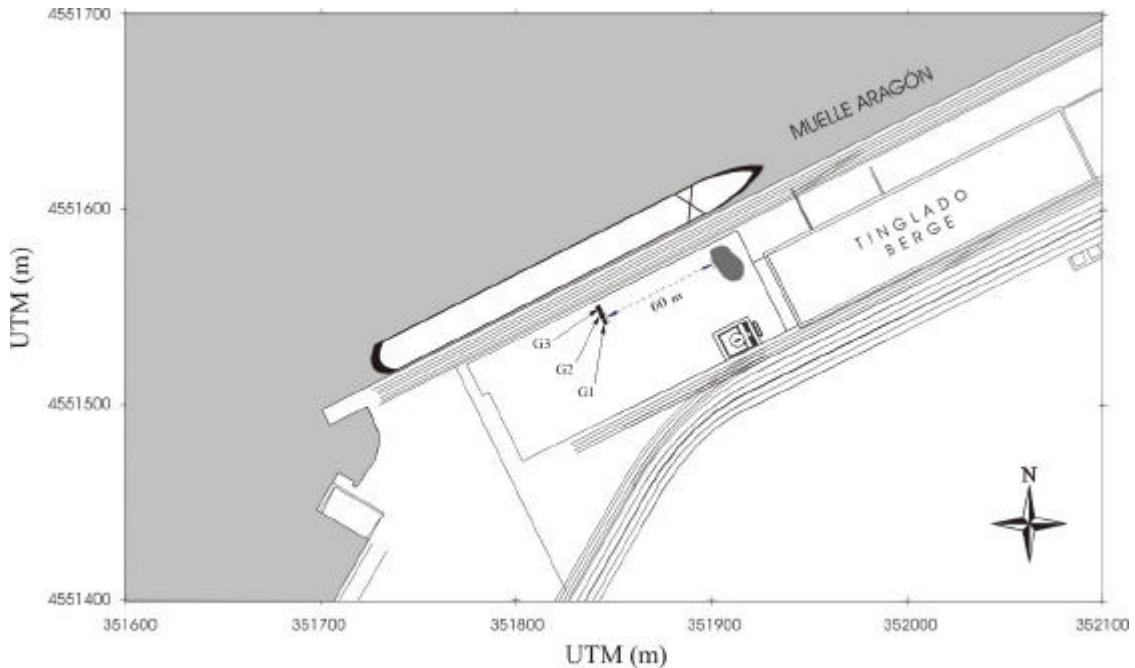


Figura 3. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia 0: descarga de finos de silico-manganeso en el muelle Aragón.



Foto 1. Descarga de finos de silico-manganeso en el muelle Aragón. En primer plano se aprecia el captador de alto volumen.

Las condiciones atmosféricas durante la experiencia fueron de velocidad de viento débil (2 m/s) y una dirección de viento del Este oscilando en torno a los 85 grados, registrados en el punto de muestreo. Los tres equipos G1, G2, y G3, fueron situados muy próximos entre sí y alineados en dirección perpendicular al muelle (Figura 3) y a sotavento de las parvas.

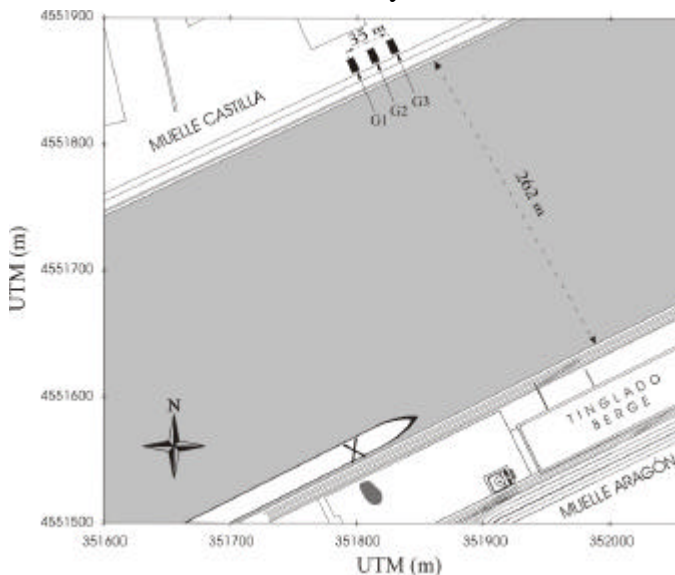
Se realizó al inicio del experimento una sincronización de los ordenadores portátiles. No obstante al ser el tiempo registrado en los ficheros de datos el correspondiente a los

relojes internos de los equipos GRIMM, y verificado este desfase en cada experimento, las series de datos fueron posteriormente corregidas para obtener series sincrónicas.

Tras finalizar el experimento el viento registró un leve giro en sentido anticiclónico para imponerse unas condiciones de brisa del Sur que transportaba el material hacia tierra pasando sobre la franja de agua que separa los muelles Aragón y Castilla e imposibilitando con ello la captación en el punto de emisión. Por este motivo, se planteó el traslado de los equipos lo que dio lugar a la siguiente experiencia que se desarrolló en el muelle Castilla.

3.5 Experiencia #1: Descarga de finos de silico-manganeso. Muelle Castilla.

Estas medidas se realizaron en el muelle Castilla, el día 3 de junio de 2003, a las 13:10 (h.l.) mientras se producía la descarga de finos de Si-Mn en el muelle Aragón. El barco y el tipo de material coinciden con los de la experiencia anterior. La descarga se produce mediante grúa, siendo ERSHIP la empresa estibadora. Se calculan unos 7-8 metros la altura de emisión, y unos 2'30" la frecuencia de descarga de la cuchara. La



dirección del viento es Sur (180°), y coincide con una brisa perfectamente definida de unos 4 m/s.

La instrumentación utilizada en este experimento consistió en los tres equipos GRIMM y la estación meteorológica portátil. La dirección de viento durante el experimento estuvo en torno a los 180° , la velocidad alcanzó su máximo diario de 4 m/s.

Figura 4. Disposición de la instrumentación durante la experiencia 1 medida de la descarga de finos desde el muelle Castilla

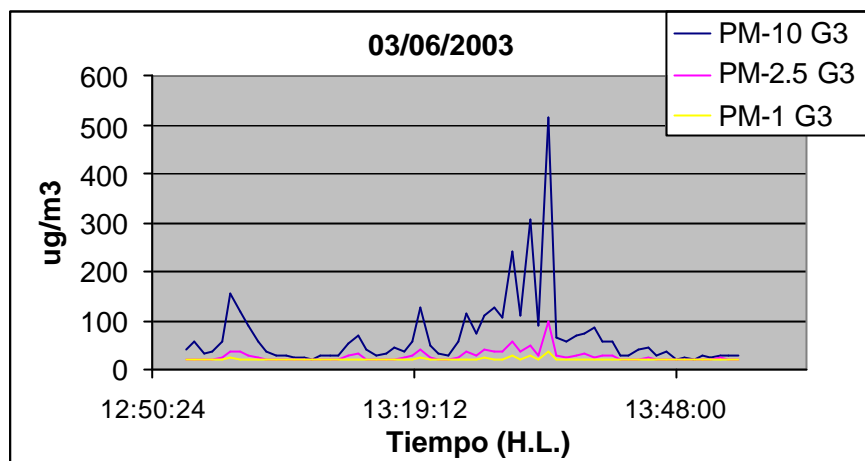


La disposición se muestra en la figura 4. La figura 5 muestra los resultados de esta experiencia. Debido a un fallo en la adquisición de datos on-line, el tiempo de muestreo del G3 fue de 1 minuto, mientras que en G2 y G1 fue de 6 segundos.

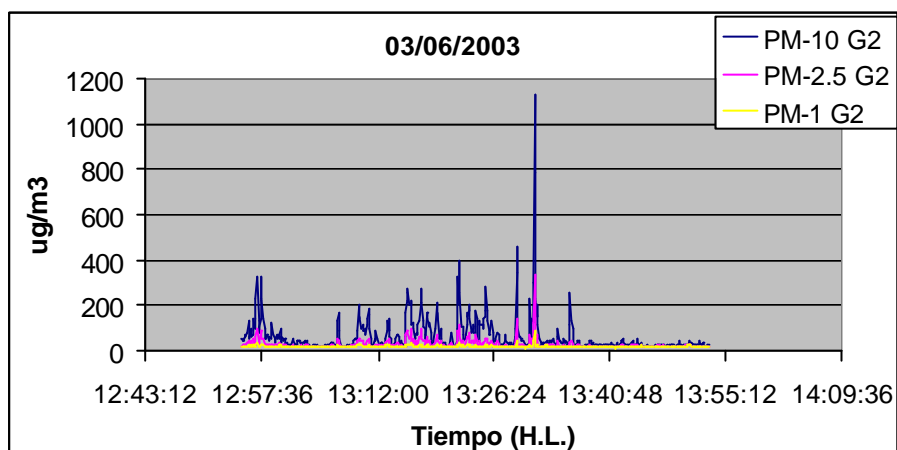
Foto 2. Vista de la descarga de finos desde el muelle Castilla. Un equipo Grimm aparece en la parte inferior derecha de la imagen. Se observa la nube de polvo transportada sobre el mar.

Los mayores impactos se registraron en el monitor G1, directamente a sotavento de la descarga, mientras que los otros dos monitores tan solo registraron impactos cuando la dirección de viento giró de manera progresiva transportando el material hacia las posiciones de G2 y G3 consecutivamente. Más del 90% del material transportado se encuentra en la fracción PM10, y tan solo con ocasión de impactos directos se detectan incrementos en las fracciones más finas.

(a)



(b)



(c)

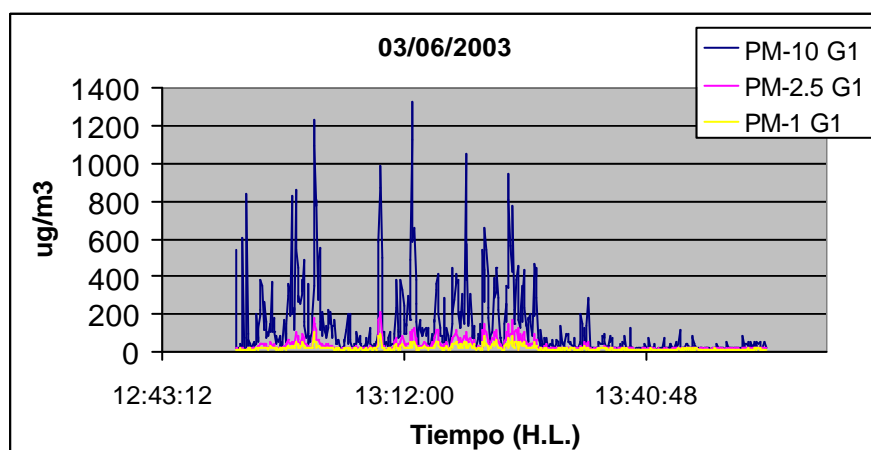


Figura 5. Resultados de la Experiencia 1. Finos de SilicoManganeso medidos en muelle Castilla, en los tres equipos GRIMM G3, G2 y G1.

3.6 Experiencia #2: Carga de alfalfa

Aunque este tipo de material agroalimentario no estaba considerado en un principio para su caracterización, se identificó como un material altamente pulverulento. La alfalfa viene prensada en “pellets” aunque durante el trasiego éstos se deshacen y desprenden gran cantidad de polvo. La operación en este caso se trata de una carga en las bodegas del barco (de nombre "CITY M"), con grúa provista de cuchara desde las parvas en la superficie del muelle (muelle Castilla). El material es llevado hasta allí por camiones, que descargan el material (se han contabilizado hasta tres camiones descargando simultáneamente). Una excavadora contribuye a apilar el material disperso por el suelo y alrededores. El máximo de concentración de material particulado en aire se registra cuando se llena la cuchara y ésta comienza a elevarse. La operación de carga de la cuchara y descarga en la bodega tarda 20 segundos. La frecuencia con la que se llena nuevamente la cuchara es de 2 minutos, entre cuchara y cuchara.

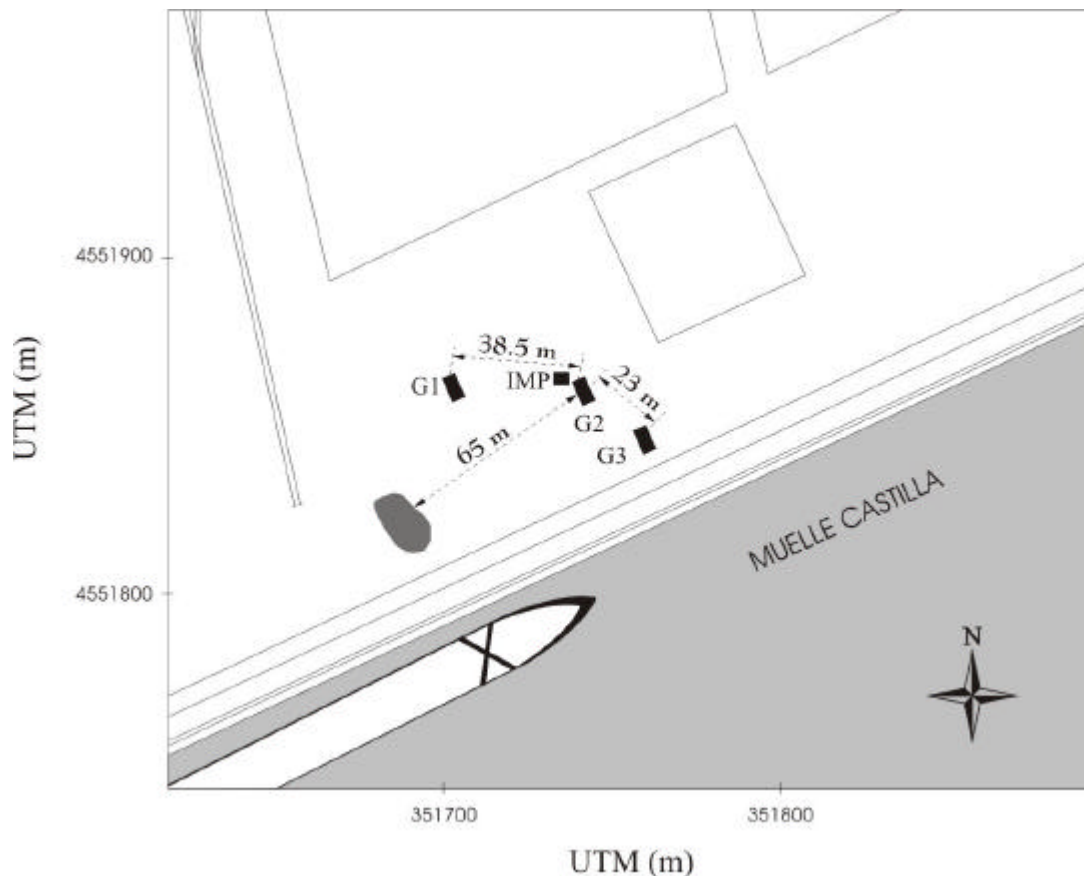


Figura 6. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia 2: carga de alfalfa en muelle Castilla.



Fotos 3 y 4. Carga con cuchara de alfalfa en el barco (izda.). Apilamiento con camiones y carga con cuchara. Un equipo Grimm marcado con un círculo y el impactador en cascada (en el rectángulo) se observan en esta foto (dcha.)

El experimento se realizó el día 3 de junio de 2003, a las 14:15 (h.l.), con unas condiciones medias de velocidad de viento de 4 m/s y dirección SW . Se utilizaron en este experimento los tres equipos Grimm, el impactador en cascada y el captador de alto volumen (IJA-CSIC), para la recogida de muestra, según la disposición que se muestra en la figura 6. Los resultados del impactador se muestran en la figura 7, donde se observa una mayor contribución en el tamaño por encima de 2.5 μm correspondiente a la alfalfa y algunas aportación en partículas por debajo de 0.3 μm correspondientes a las emisiones de los camiones y la excavadora, según confirmó el análisis SEM-EDX realizado sobre el filtro y que se recoge en el Anexo. Las medidas correspondientes a los GRIMM aparecen en la figura 8.

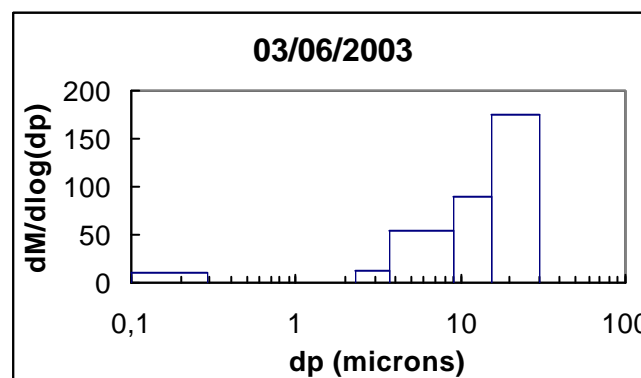


Figura 7. Resultados de la Experiencia 2. Impactador en cascada, medida realizada en la posición del Grimm 2.

Según se deduce de las medidas registradas en los tres equipos GRIMM, tan solo en condiciones de viento favorables y en determinados puntos los equipos registran altas concentraciones de material particulado. El equipo G3 apenas registra más que el fondo en la zona por quedar fuera de la nube de polvo, pese a estar muy próximo. También es posible algún efecto de apantallamiento local de alguna de las instalaciones o grúas en el área de estudio. Tal como se aprecia en la figura 8c) que muestra los niveles alcanzados por el muestreador G3, además de la operación de carga con cuchara, las operaciones de descarga de camiones, previas a la recogida con cuchara para llevar la

carga a la bodega incrementan los niveles de PM10 en un factor de 2 a 3, correspondiendo en este último caso a la actividad simultánea de tres camiones descargando material.

En cualquier caso, y en todos los muestreadores se comprueba que este tipo de material afecta mayoritariamente a los niveles ambientales de material particulado en la fracción gruesa o PM10.

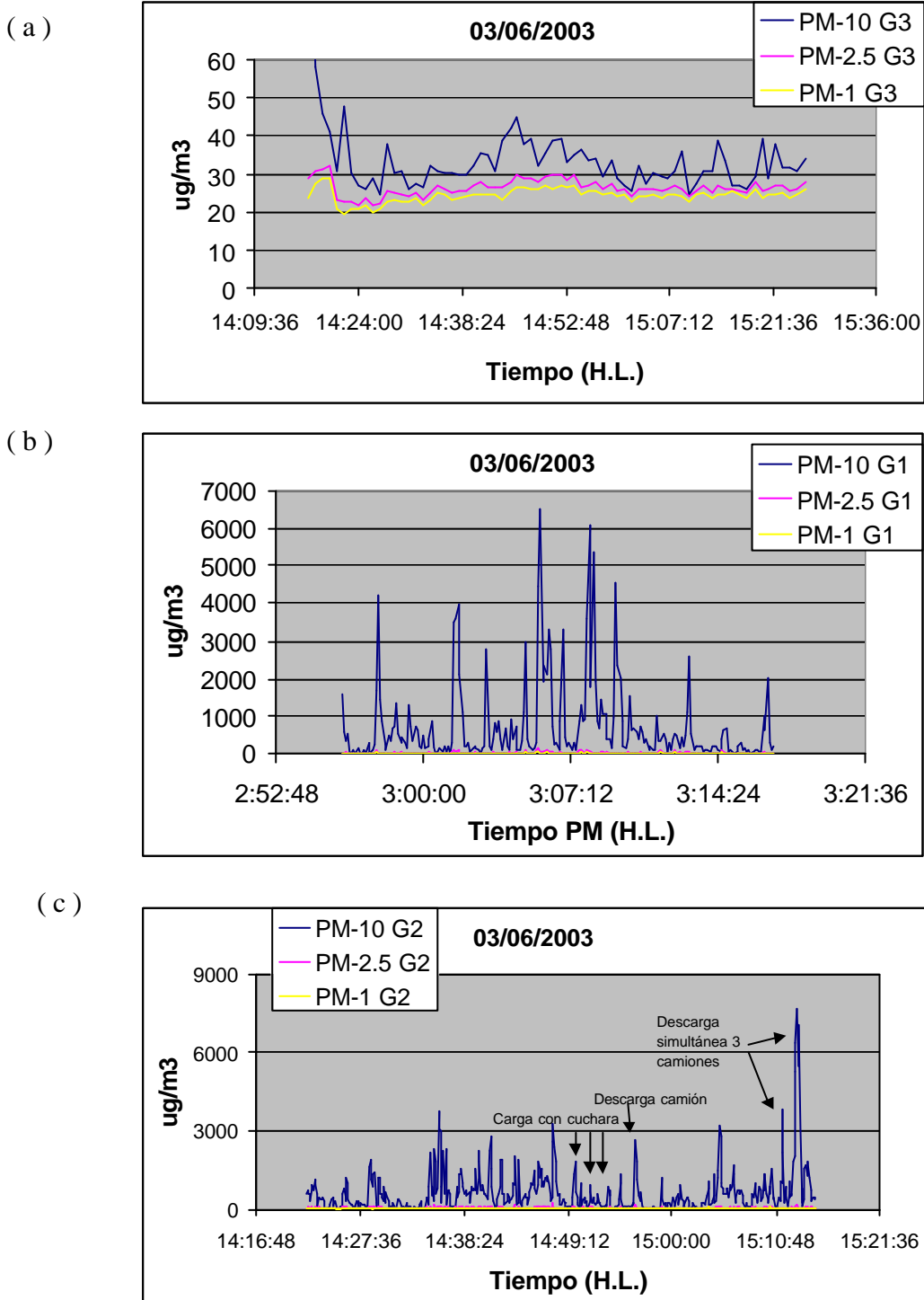


Figura 8. Resultados de la Experiencia 2. Alfalfa en muelle Castilla

3.7 Experiencia #3: Resuspensión de polvo de hulla por paso de camiones.

La carga/descarga de carbón (hulla o coque) se suele realizar en el muelle Alcudia o en el inmediato muelle de Cataluña. En este último la empresa estibadora (TPS) dispone de una infraestructura que consiste en un conjunto de grúas y un sistema de cintas transportadoras elevadas que han permitido optimizar notablemente la operación de carga/descarga del carbón a granel. Asimismo, y con un objetivo de minimización del impacto medioambiental, se ha dispuesto un sistema de riego programado que se realiza con objeto de disminuir la cantidad de material particulado en suspensión.

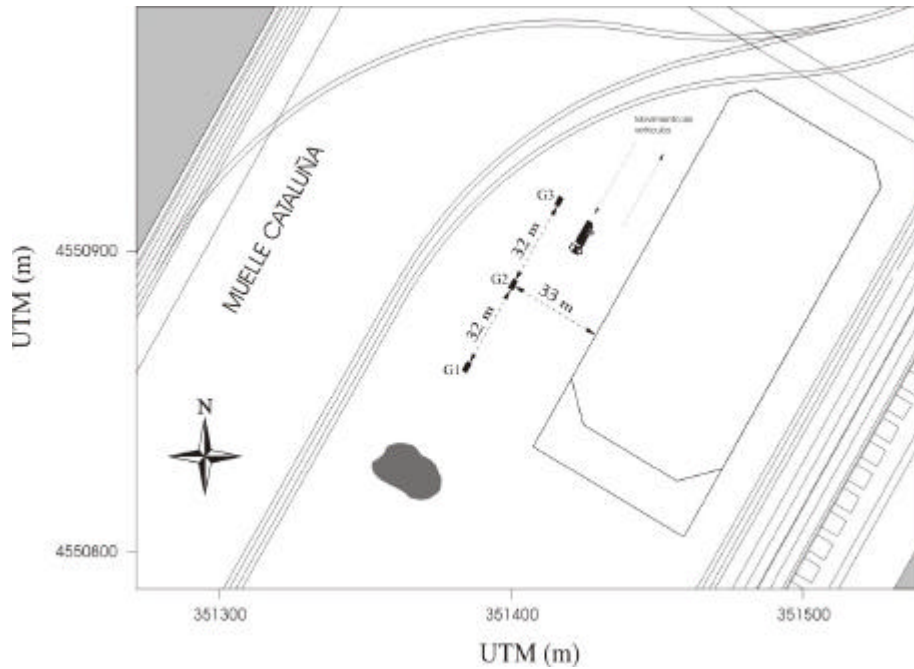


Figura 9. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia 3: resuspensión de polvo de hulla por paso de vehículos en muelle Cataluña



Fotos 5 y 6. Sistemas de transporte mecánico del carbón de hulla y paso de camiones cargados junto a las parvas. En la foto de la derecha se observa el paso de camiones y la disposición de los equipos alineados bajo la cinta transportadora y en paralelo a la dirección del paso de camiones.

El experimento se realizó a las 10:30 h.l. del día 4 de junio de 2003 en una disposición de los tres equipos GRIMM alineados en paralelo respecto al recorrido de los camiones

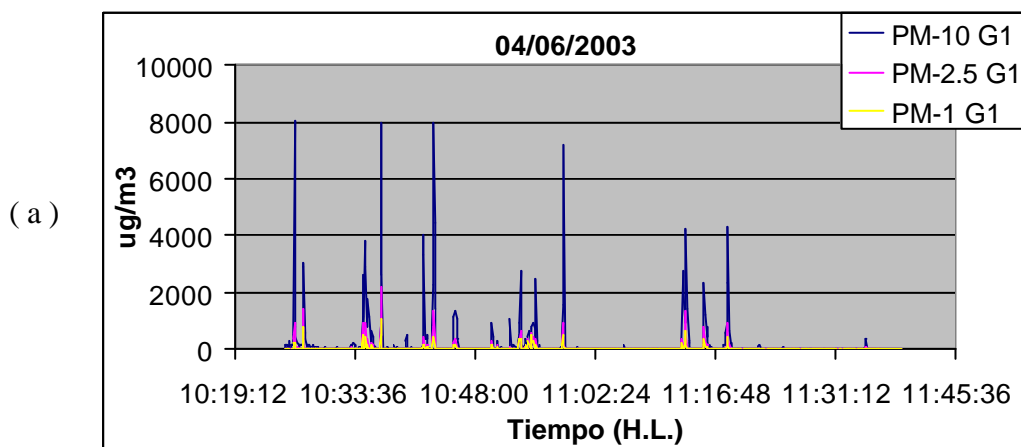
que pasan junto a la nave BERGÉ y bajo una de las cintas transportadoras, que no estaba en operación, tal como se observa en la figura 9 y en la foto 6. Las actividades de trasiego de material se redujeron al apilamiento de la hulla con máquina y pala y su carga en los camiones que previamente habían discurrido sin carga por el área experimental. Dicho área estaba completamente cubierta en su superficie por polvo de hulla que era resuspendido al paso de los camiones. La distancia entre ambas líneas de medidores y del paso de camiones estaba en torno a unos 10-15 metros. No se observó apenas diferencia visual por el hecho de que el camión circulara con o sin carga, siendo el mayor efecto el producido por la rodada sobre la superficie.

Ya que la empresa estibadora utiliza un sistema de regado en el lugar del experimento desde las cintas transportadoras, se realizaron medidas antes y después de que se produjera este hecho. Estas últimas constituyeron la denominada experiencia #4. Asimismo se realizaron experimentos con distintos vehículos, y a distintas velocidades y tipos de trayectos con relación a la disposición de los instrumentos.

Las condiciones atmosféricas durante estas medidas correspondieron a una brisa débil del Este (130 °) con velocidades locales de entre 1.5 y 3.5 m/s.

Los resultados obtenidos con los distintos GRIMM se muestran en la figura 10. La figura 10c corresponde a la misma secuencia de datos del GRIMM 2 que aparece en la figura 10b pero aumentado en este caso la resolución en la escala del eje vertical. Se observa en todas ellas el efecto del paso de camiones que corresponde con los máximos registrados progresivamente en los distintos puntos de muestreo. Al estar el GRIMM 1 más próximo al punto de carga de camiones y a la zona de maniobras en las que el camión empleaba más tiempo, los máximos son mayores en este punto. Al aumentar la velocidad del camión una vez iniciada la marcha, y disminuir por tanto el tiempo de permanencia de la nube de polvo generada, los máximos que se registran en el punto del GRIMM 3 son considerablemente inferiores.

Es interesante destacar que durante estas medidas se observan valores importantes de PM-2.5 y PM-1, que contrasta con los resultados de la alfalfa (experiencia anterior) en los que mayoritariamente la fracción afectada fue la correspondiente a PM10.



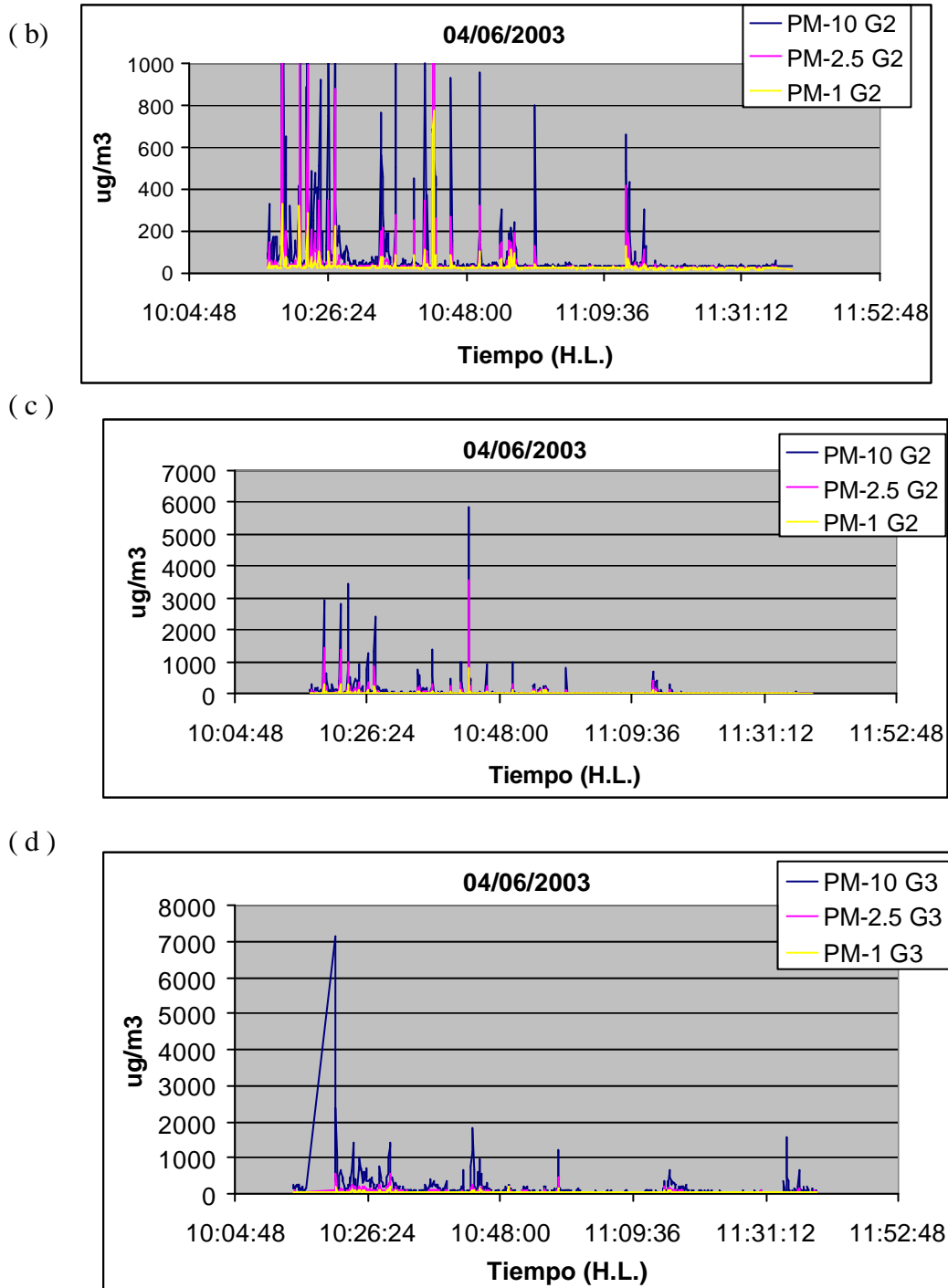


Figura 10. Experiencia 3: Carbón de hulla, suelo seco, paso de camiones de carga y descarga de graneles.

En la figura 11 se muestra la relación entre las concentraciones medidas por el equipo G1 respecto a los otros dos para cada una de las tres fracciones granulométricas. Como se puede observar, existen grandes diferencias en las relaciones entre el equipo G1 y el resto, que se acentúan cuando se produce el paso del camión en el punto más próximo a G1. El desfase temporal entre máximos viene a producirse en torno a los 12 segundos, y las mayores diferencias (valores más altos del ratio G1/G2 o G1/G2) se producen en la fracción PM10.

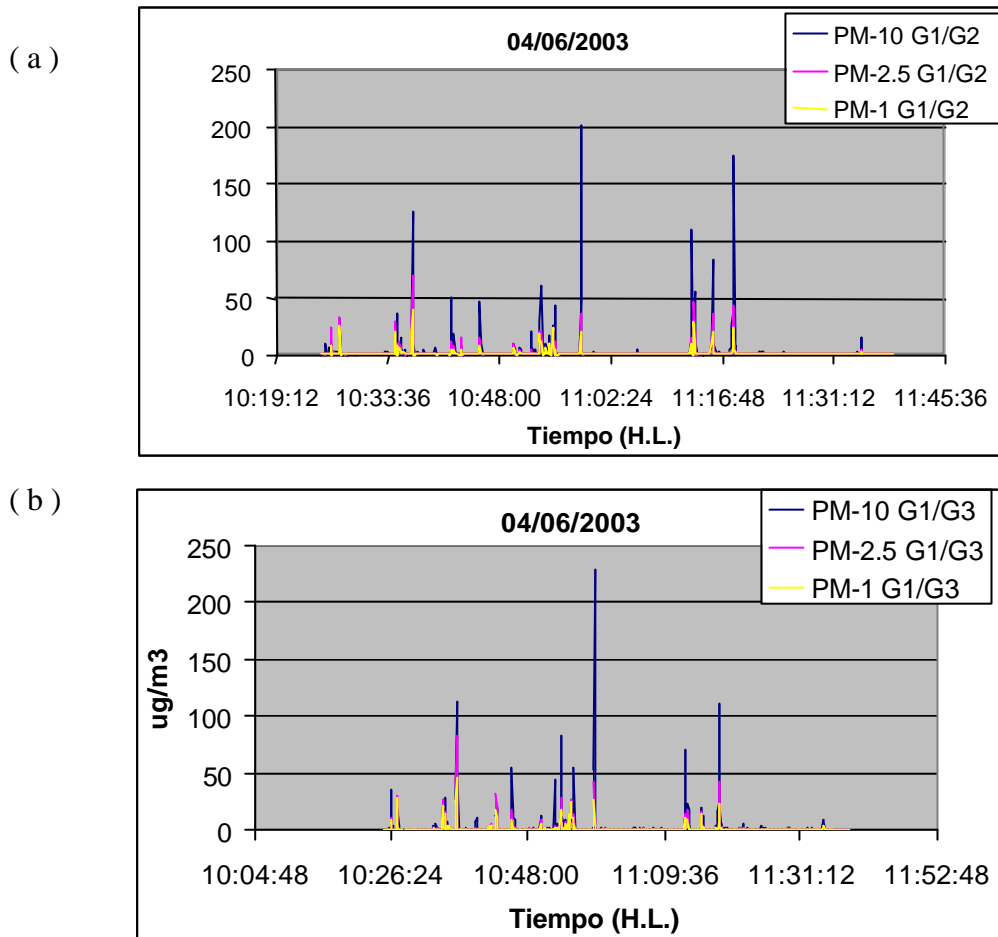


Figura 11. Experiencia 3: Carbón de hulla, suelo seco, paso de camiones. Relación entre las medidas del GRIMM 1 y las de los GRIMM 2 y 3.

En la figura 12 se muestran, los resultados del impacto en los distintos rangos granulométricos del paso de vehículos ligeros por la línea de camiones, como es el caso de una furgoneta pequeña (< 1 Tm de peso), y en la figura 13 la relación entre las medidas registradas por los tres equipos.

Como se puede observar los niveles registrados son sensiblemente inferiores a los que genera cualquiera de los camiones de transporte de hulla, en un factor que estaría en el rango de 1.5- 3.5 inferior.

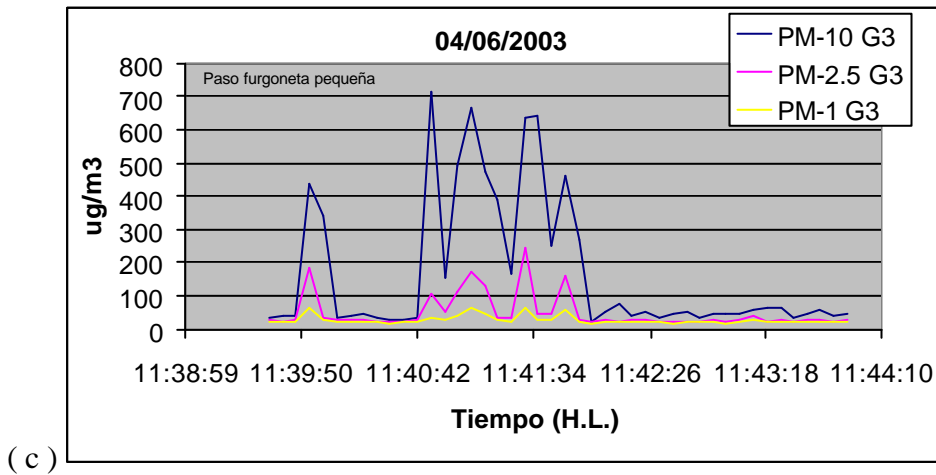
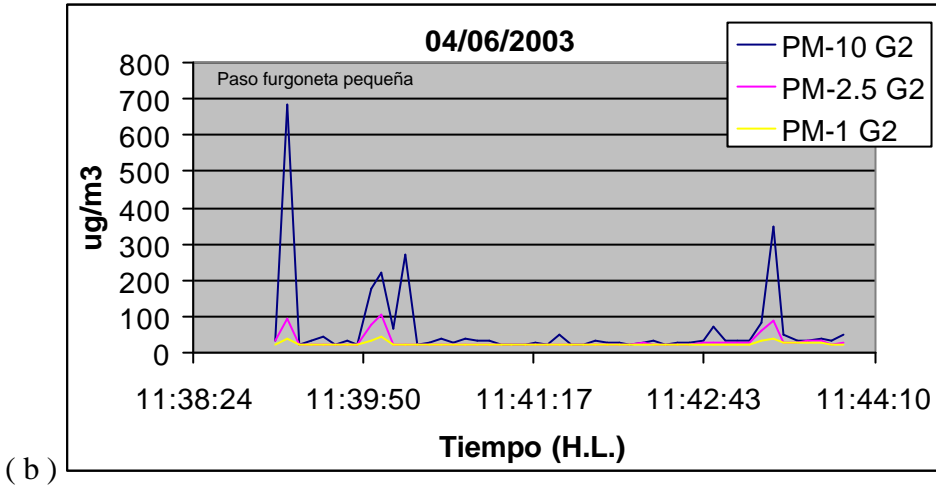
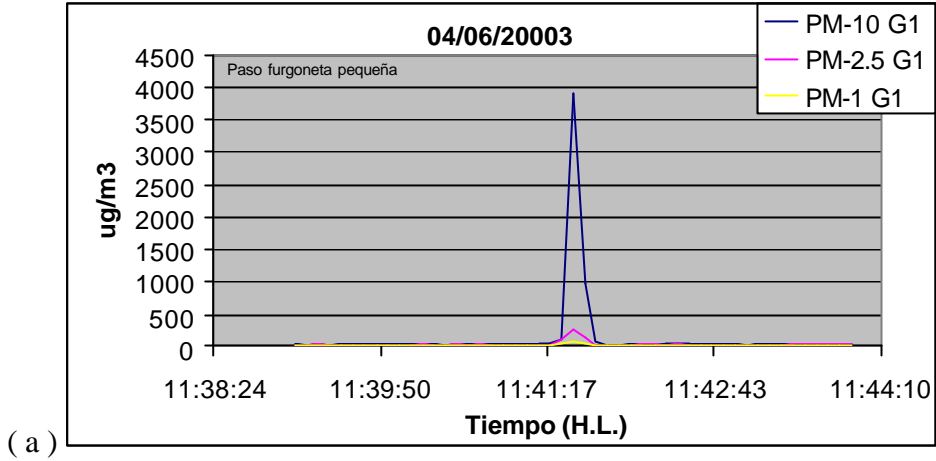
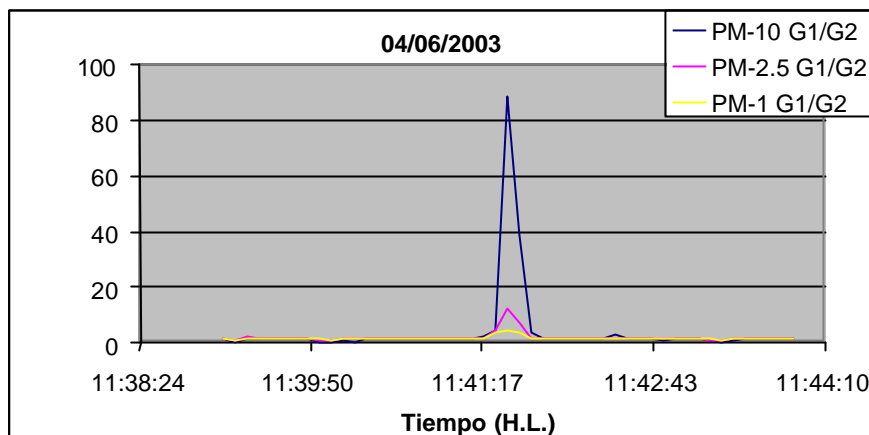


Figura 12. Medidas realizadas al paso de una furgoneta pequeña en trayectoria paralela a los Grimm y nave BERGE.

(a)



(b)

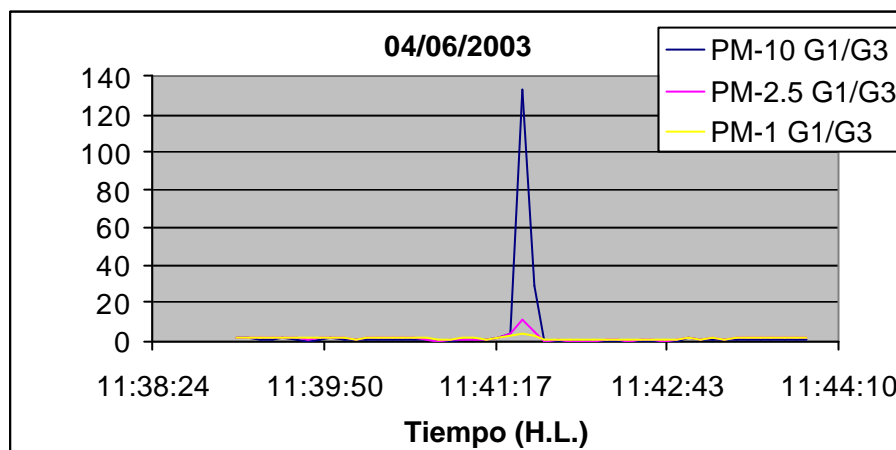


Figura 13. Relación entre concentraciones en los equipos al paso de la furgoneta pequeña.

Según se desprende el mayor impacto relativo se produjo en el equipo G1, quizás debido a las maniobras realizadas por el vehículo, giros, etc. realizadas en la proximidad de este punto, siendo los impactos de carácter exclusivamente local en la inmediata proximidad del monitor.

La figura 14 muestra los resultados del experimento al paso de una furgoneta mayor (vehículo Mercedes Sprinter, del CIEMAT), de unos 2.5 Tm de peso, con un recorrido paralelo a la línea de medida y a una distancia similar de la línea de medidores (unos 15 metros del punto G2). La figura 15 la relación entre las concentraciones medidas por los distintos equipos.

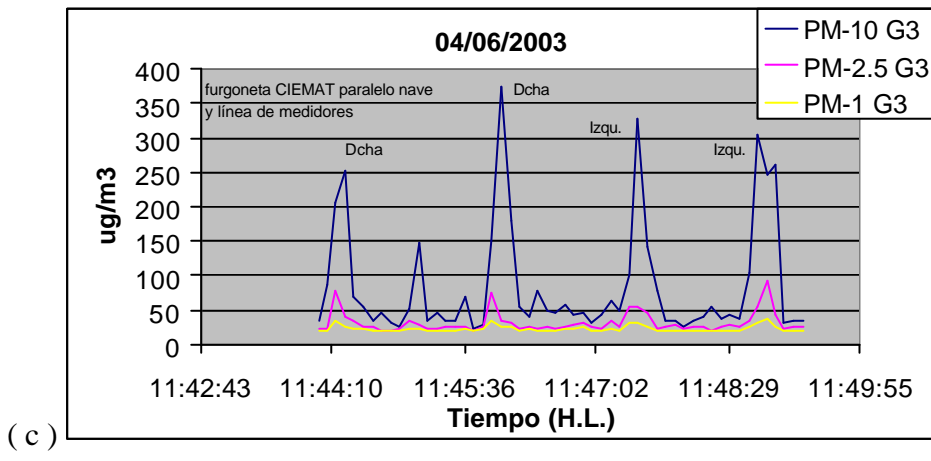
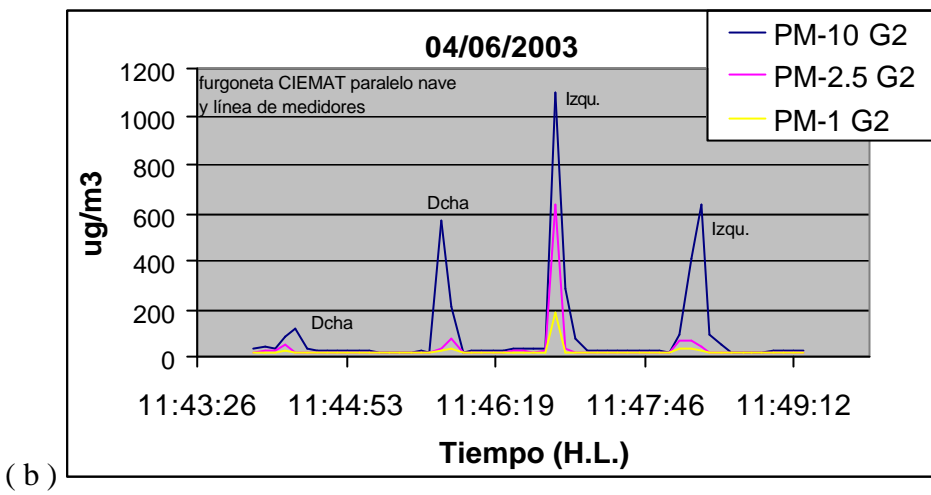
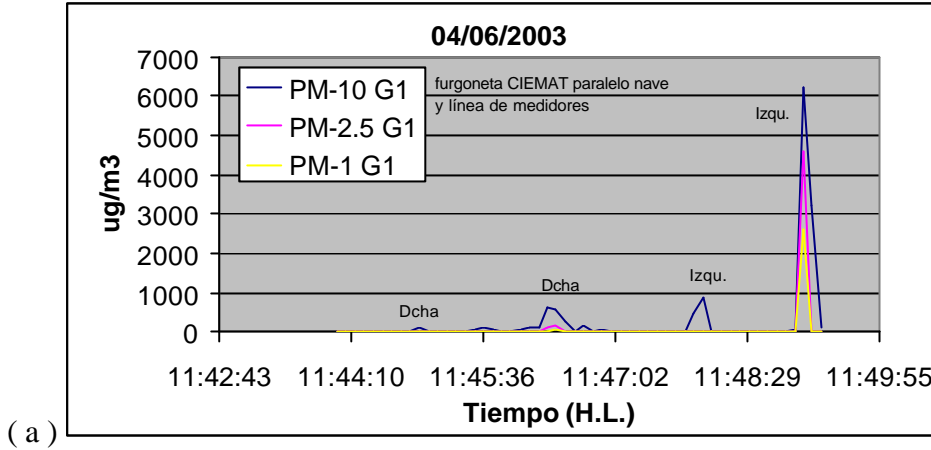
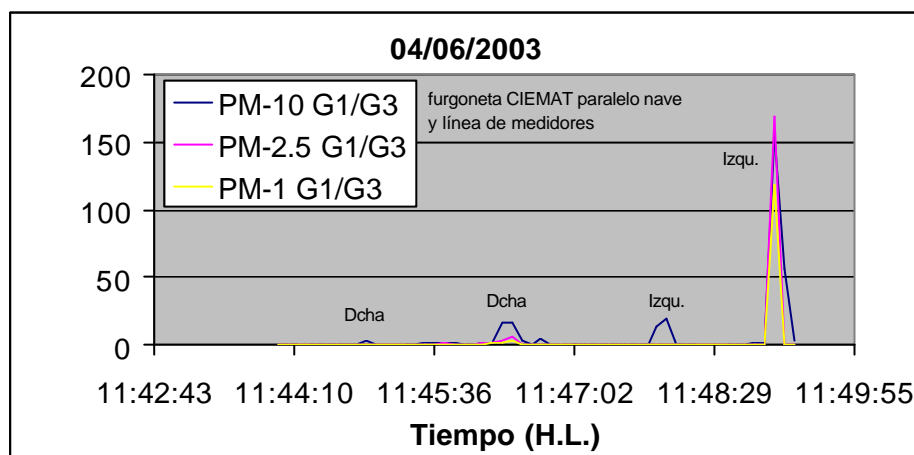
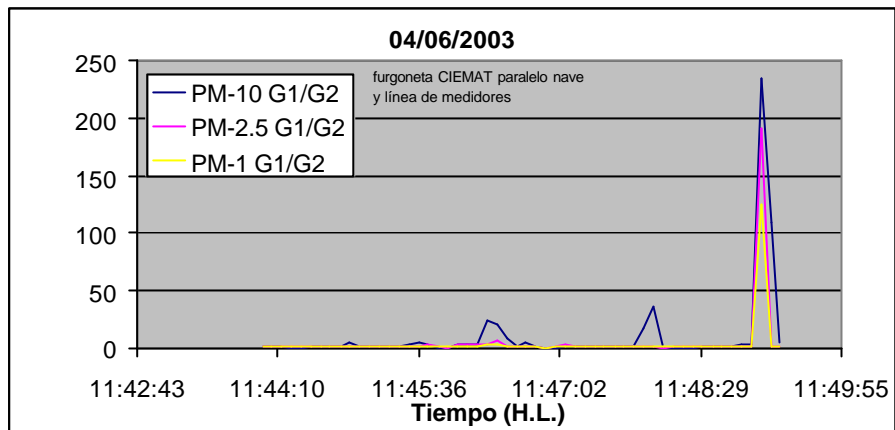


Figura 14. Medidas realizadas al paso de una furgoneta grande en trayectoria paralela a los Grimm y nave. Hay que destacar los altos valores de PM-2.5 y PM-1 medidos.



(b)

Figura 15. Relación entre concentraciones al paso de la furgoneta del CIEMAT en trayectoria paralela a los GRIMM y a la nave BERGE

Para un punto concreto se encontró que el impacto se produce de forma más acusada en el punto G1, donde además se registran incrementos significativos en las fracciones más finas PM2.5 y PM1, no siendo así en los otros dos puntos y afectando apenas a los niveles de PM1 en el punto G3, como viene ocurriendo independientemente del tipo de vehículo utilizado.

Posteriormente se realizó el mismo experimento con la furgoneta del CIEMAT pero con un recorrido perpendicular a la línea de medidores y a la nave próxima, tal como se muestra en la figura 16. Los principales resultados se encuentran en las figuras 17 y 18.

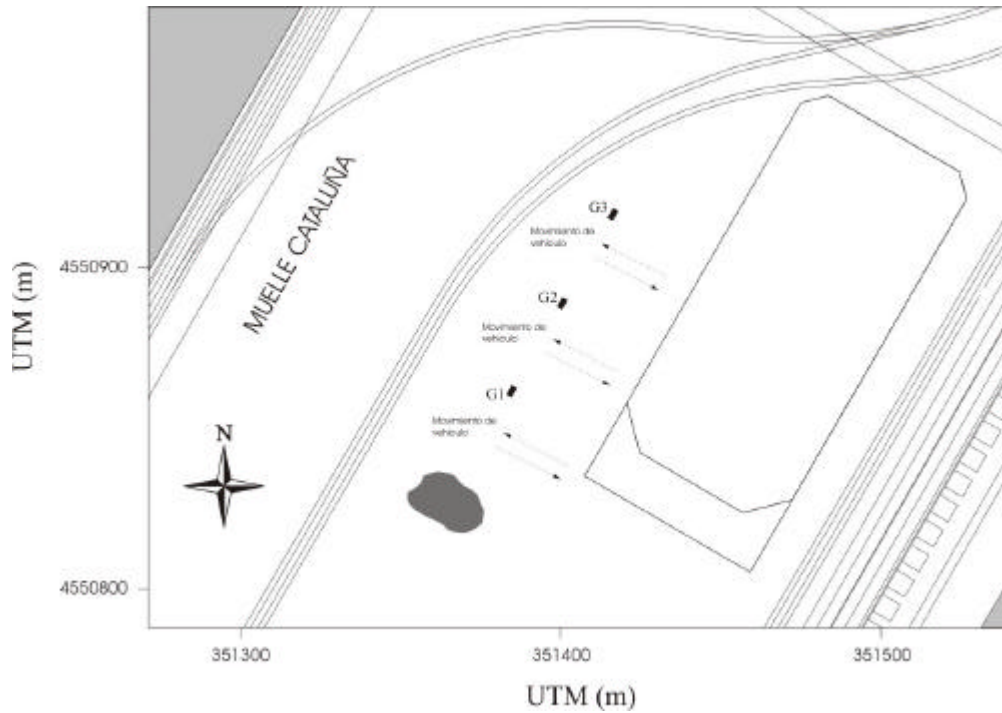
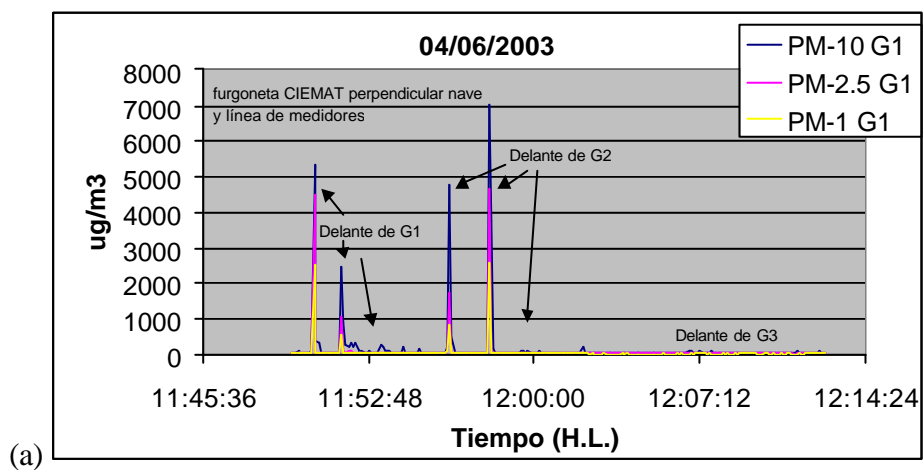


Figura 16. Trayectorias de la furgoneta del CIEMAT perpendiculares a la línea de los Grimm y de la nave. Las posiciones relativas de los tres monitores entre sí y respecto a la nave coinciden con las de la Figura 9.



(a)

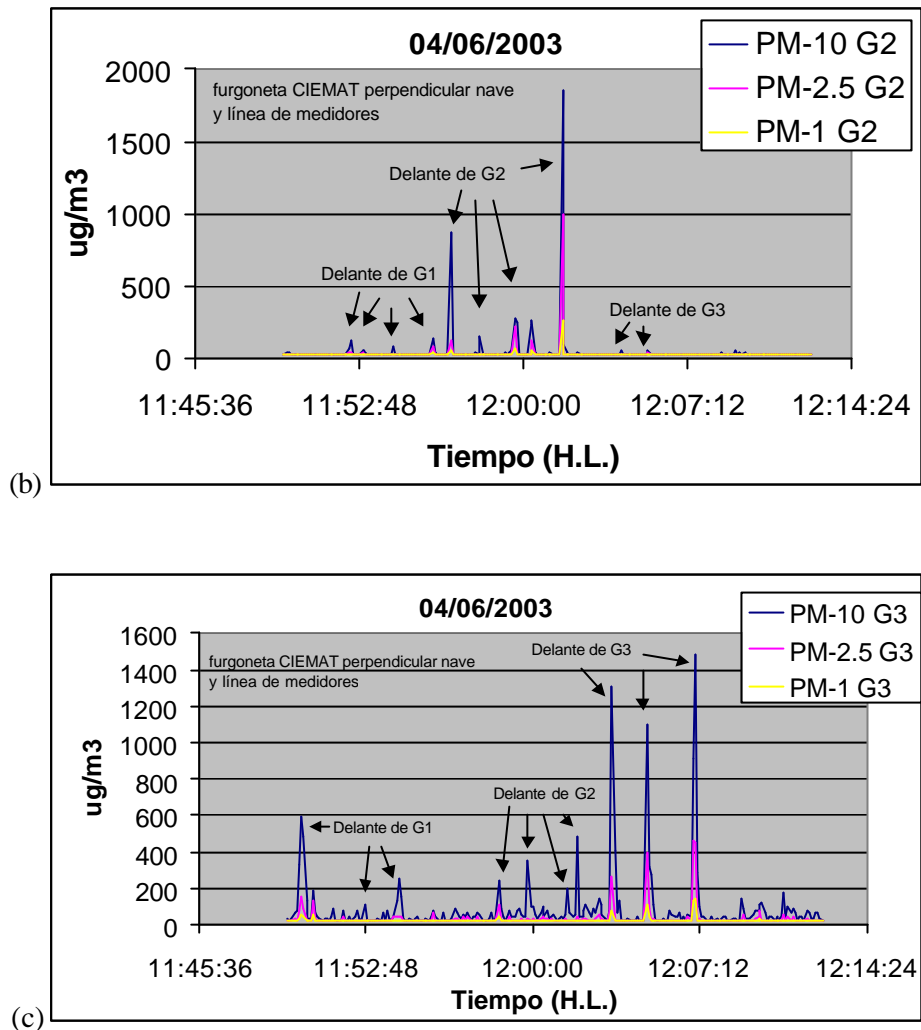
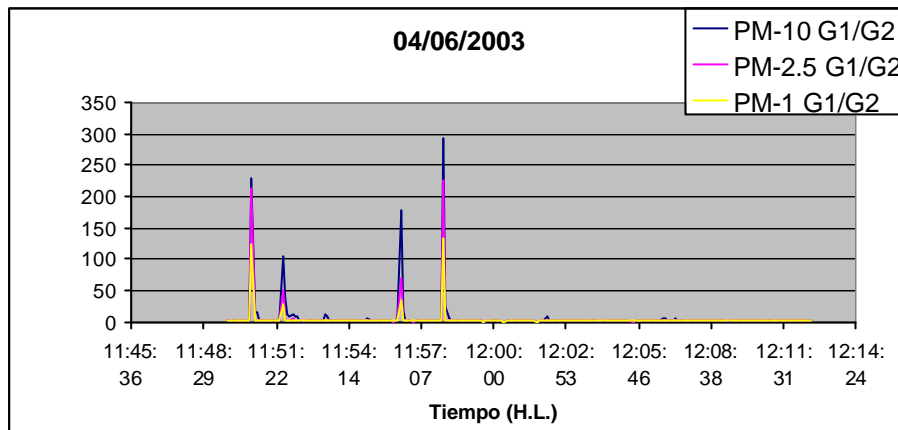


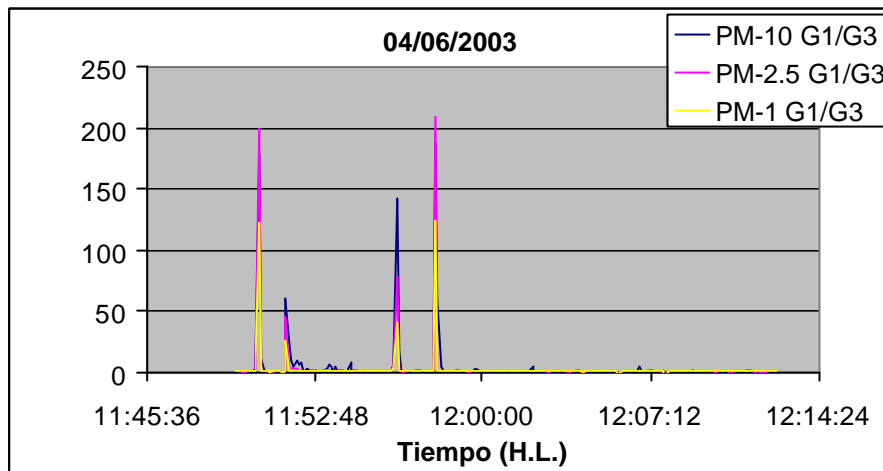
Figura 17. Medidas realizadas al paso de una furgoneta grande en trayectoria perpendicular a la línea de Grimm y de la nave.

Destacan en primer lugar los altos valores registrados al paso por las proximidades de G1 y G2, y los valores absolutos alcanzados en todas las fracciones granulométricas, incluidas las más finas.

Se observa de nuevo como en las proximidades de estos dos puntos y más acentuadamente en el punto más próximo a las pilas de carbón, el paso de camiones es capaz de resuspender mayor cantidad de partículas de la fracción PM1, que contrasta con los resultados obtenidos en ésta y anteriores experiencias en las proximidades del punto G3. Este fenómeno también se observa en los resultados de la figura 18.



(a)



(b)

Figura 18. Relación entre concentraciones al paso de la furgoneta del CIEMAT en trayectoria perpendicular a los GRIMM y a la nave.

Otro tipo de experimento se planteó con un único medidor y realizando recorridos a diferentes distancias, según el esquema de la figura 19. La figura 20 muestra los valores de esta experiencia, con paso del vehículo CIEMAT a diferentes distancias del GRIMM3.

Aunque los niveles de concentración en valor absoluto están influenciados lógicamente por una serie de factores entre los que se encuentra la distancia al punto de medida, como el de mayor peso, se observa por ejemplo cómo a una distancia de 60 metros los niveles de la fracción fina apenas son significativos. Asimismo factores, como velocidad o aceleración, que se modifican al realizar las maniobras para el paso de derecha o de izquierda, cuando éstas se producen muy próximas al punto de muestreo pueden resultar en variaciones de un factor de 2.5-3 en las concentraciones de material particulado.

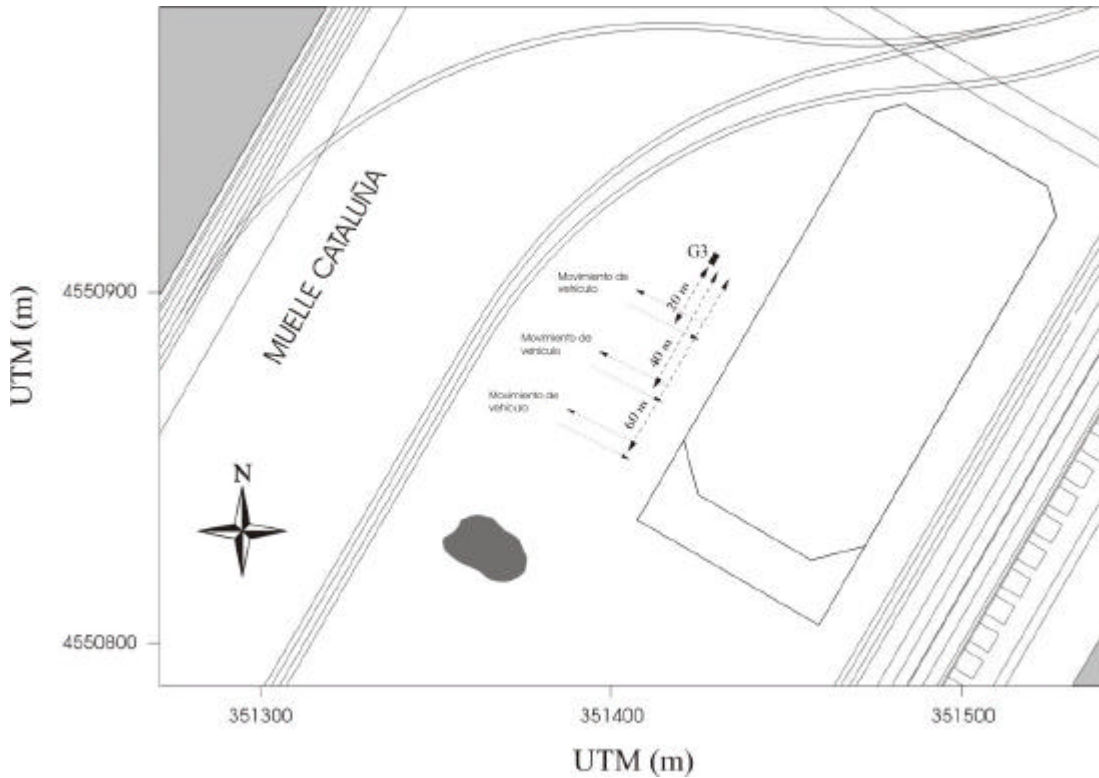


Figura 19. Trayectorias de la furgoneta del CIEMAT perpendiculares a la nave y a distintas distancias del Grimm 3.

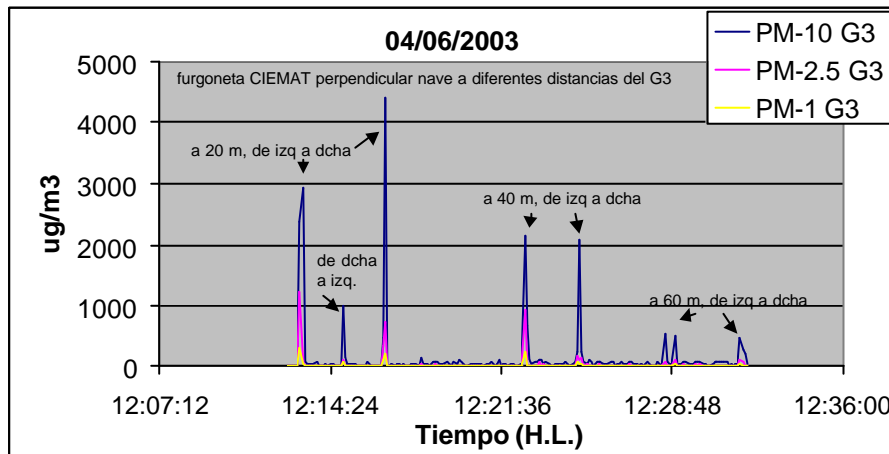


Figura 20. Medidas realizadas al paso de la furgoneta grande (CIEMAT) en trayectoria perpendicular a la nave y a distintas distancias del Grimm 3.

3.8 Experiencia #4: Resuspensión de polvo de hulla por paso de camiones en suelo mojado

El objetivo de este experimento que se realizó en el mismo escenario que el anterior salvo que el sistema de riego fue conectado a las 15:00 h.l. con una duración de 5 minutos, tras lo cual, a las 15:40 h.l. comenzaron las medidas. Las operaciones que se estaban realizando continuaron siendo las de paso de camiones frente a la nave BERGÉ y carga con pala del correspondiente camión. En este experimento sólo se utilizó un equipo de medida, a efectos de comparación con la situación anterior que fue situado en el punto 2 del experimento anterior, tal como se muestra en la figura 21. Se registraron diferentes situaciones del paso de camiones a unos 15-20 metros de la perpendicular sobre el equipo de medida por zonas secas y regadas.

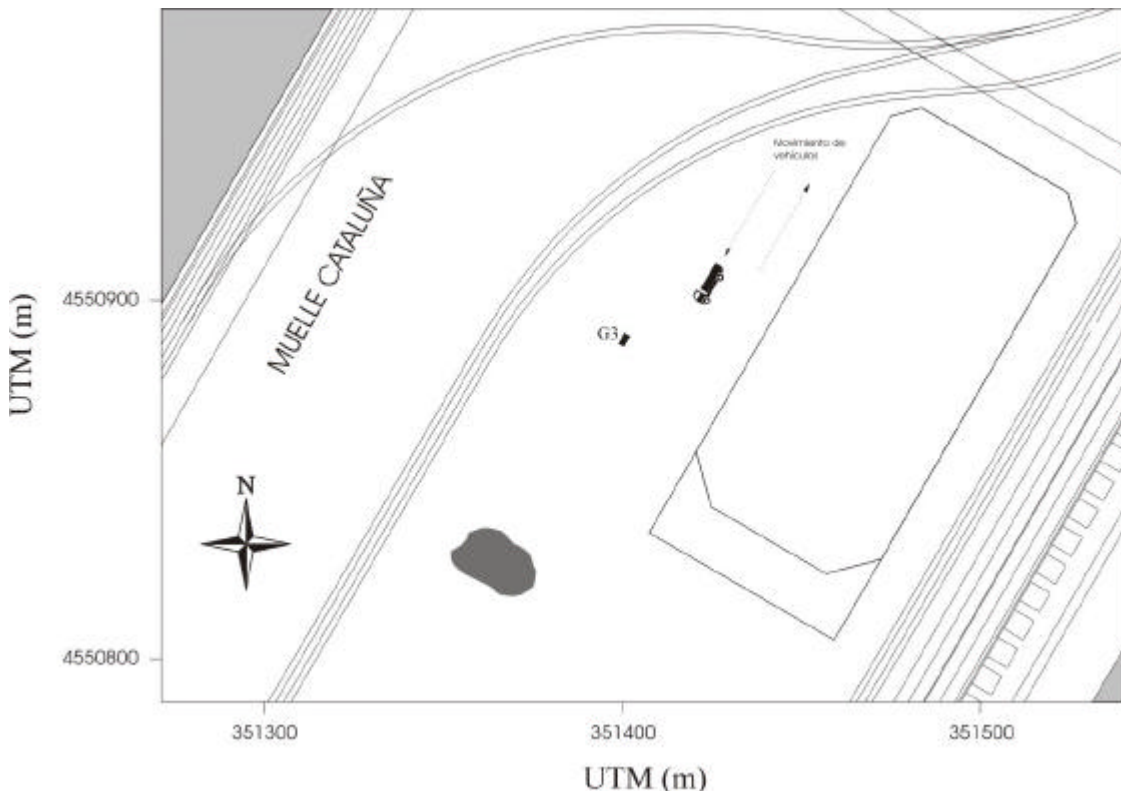


Figura 21. Medidas realizadas con el suelo húmedo y seco tomadas con el Grimm 3.

Las condiciones meteorológicas correspondientes al momento del experimento, esto es el día 4 de junio de 2003 a las 15:40h.l. fueron de viento débil (2 m/s) y dirección del SSW (225 °) que se mantuvo estacionaria durante tres horas. En este intervalo se registró un incremento de un grado en la temperatura con una disminución de un 10 % de la humedad relativa del aire (Figura 4)

La figura 22 muestra los resultados de este experimento en el que se registraron los eventos de paso sobre zonas húmedas o secas. Como se puede observar, el efecto del riego como medida reductora en los niveles de material particulado es altamente efectivo, ya que se disminuyen uno y hasta dos órdenes de magnitud las concentraciones de PM10, mientras que las de las fracciones finas son comparativamente inapreciables.

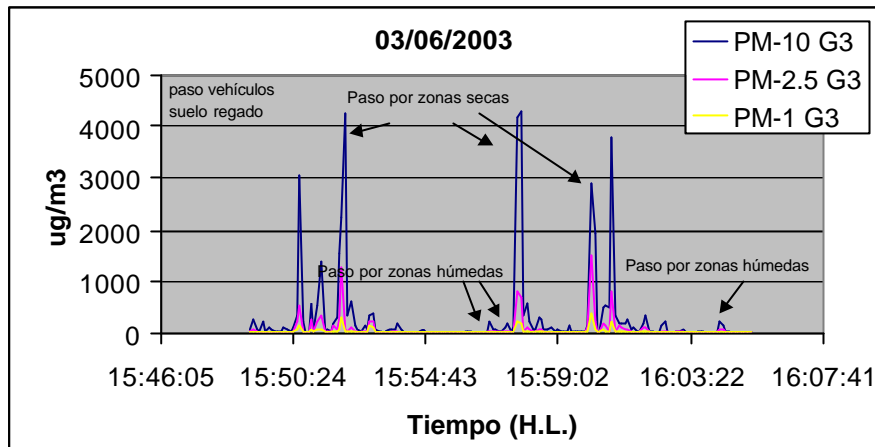


Figura 22. Experimentos en muelle de carbón con suelo regado.

3.9 Experiencia #5: Descarga de tapioca

Este experimento se realizó el día 4 de junio de 2003 en el periodo comprendido entre las 16:30 y las 18:10 h.l. El tipo de operación corresponde a una descarga de tapioca (pellets) del barco CLEAN SEAS atracado en el muelle Castilla Oeste. La descarga se realiza mediante cuchara que deja caer el material sobre una tolva de 9 metros de altura y que directamente descarga en camiones situados en su parte inferior. Las condiciones y modo de operación resultaron ser determinantes, ya que según se comprobó in situ dependiendo de la velocidad y principalmente de la altura sobre la tolva en la que se abría la cuchara los niveles de polvo alcanzados variaban notablemente (Fotos 6 y 7). En este tipo de operación es en el que se registraron las mayores concentraciones puntuales en ambiente.

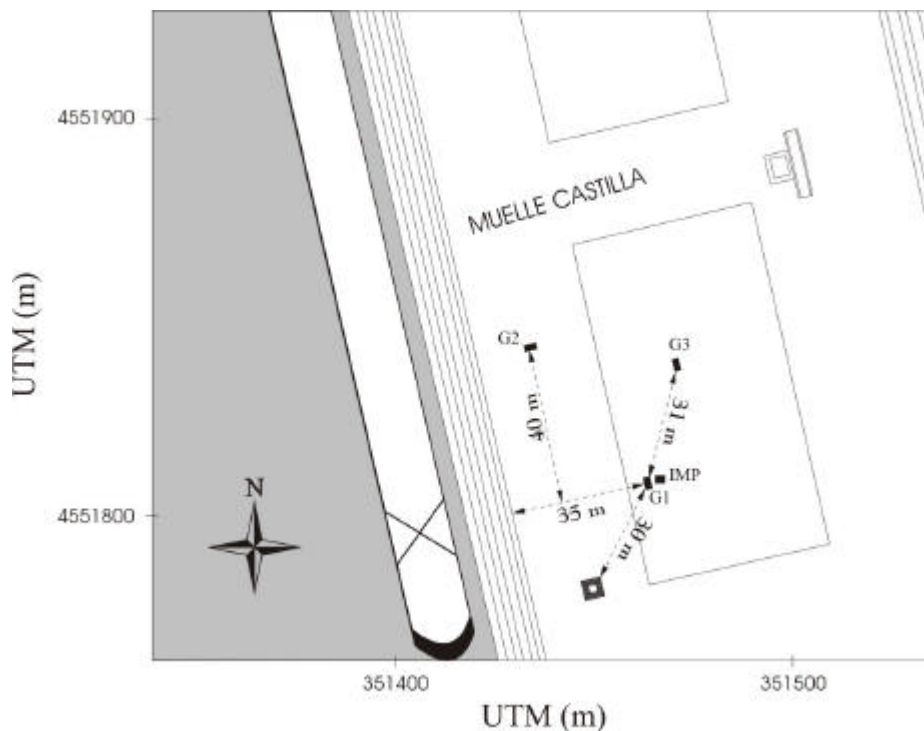


Figura 23. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia 5: descarga de tapioca en muelle Castilla.

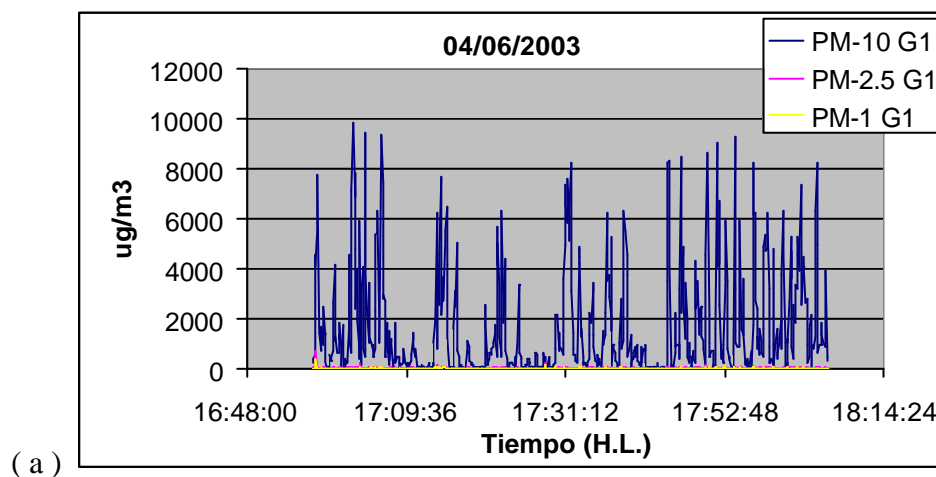
La instrumentación utilizada en este caso consistió en los tres equipos GRIMM, ubicados según muestra la figura 23, un captador de alto volumen para recoger la muestra, y un impactador en cascada, estos últimos situados al lado del GRIMM 1.

Las condiciones ambientales fueron de una temperatura de 22.5 °C, humedad en torno al 70 %, y una dirección de viento que se mantenía del SSW (225 °), no excediendo los 2.5 m/s durante el periodo de medida.



Fotos 6 y 7. Descarga de tapioca sobre tolva. Se observa el efecto de la altura de apertura de la cuchara y las buenas prácticas del operario (foto 7, derecha) en la realización de la descarga por parte del operario

La serie de gráficas de la figura 24 muestra los resultados de este experimento y la figura 25 la relación entre las medidas de los GRIMM. En la figura 26 se pueden encontrar los resultados obtenidos con el impactador de cascada.



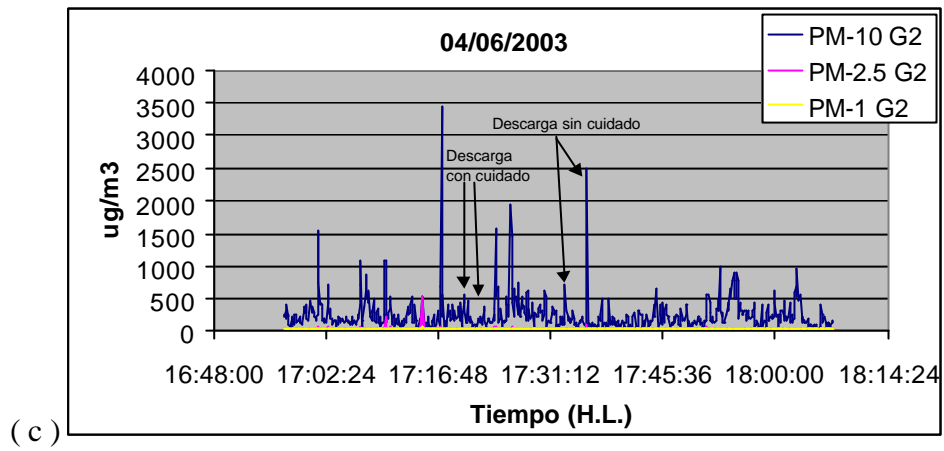
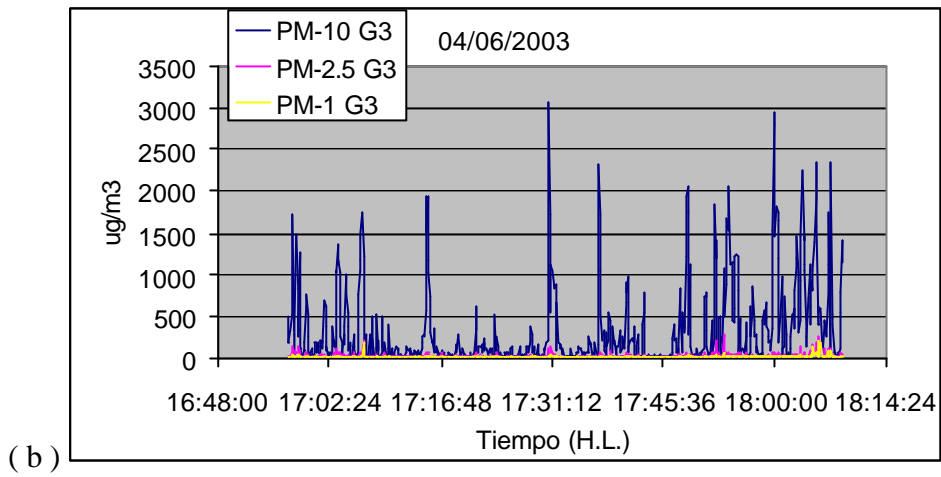
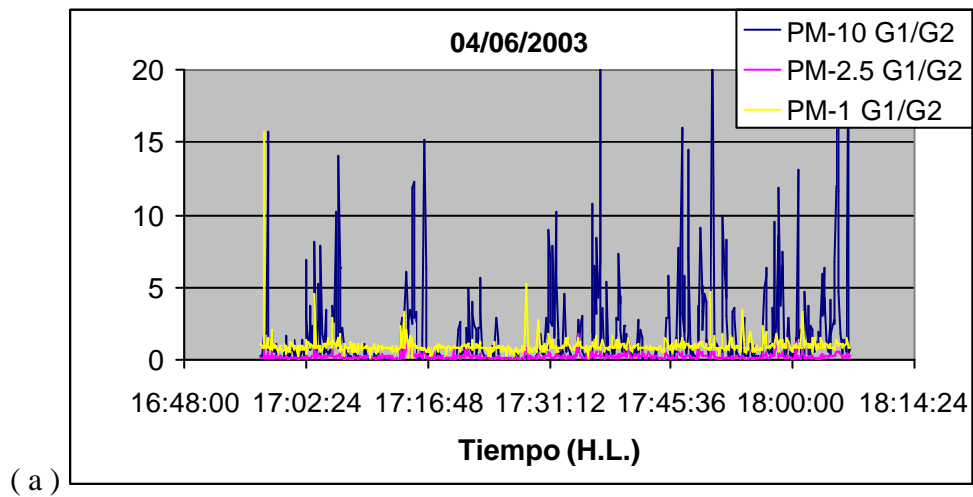


Figura 24. Descarga de tapioca en muelle Castilla Oeste



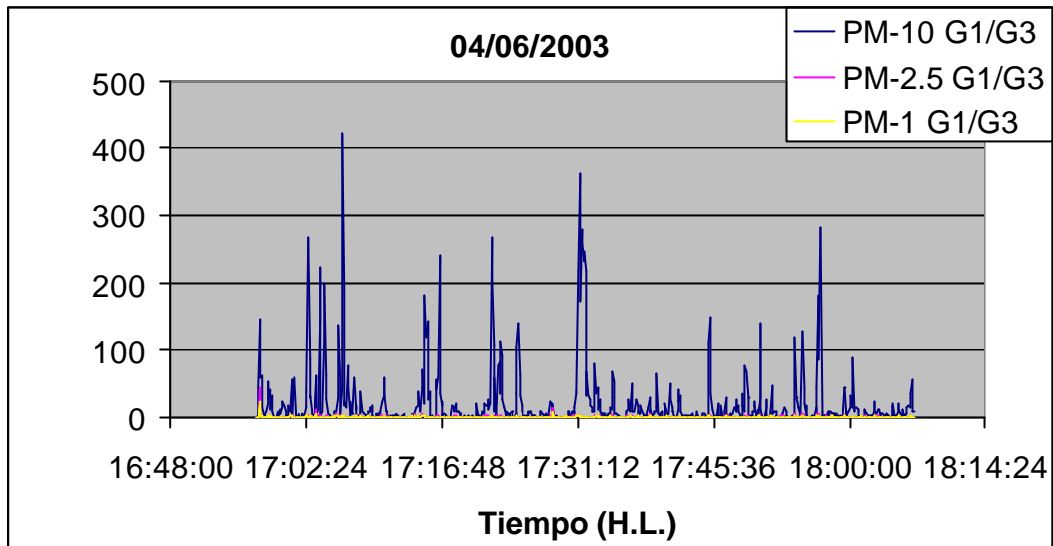


Figura 25. Relación entre las medidas de los GRIMM durante la descarga de tapioca en muelle Castilla Oeste

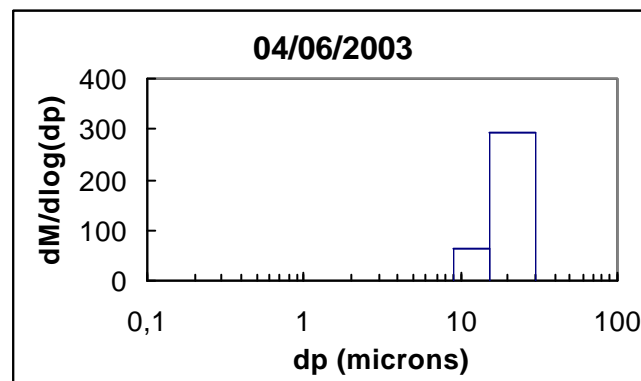


Figura 26. Resultados de la medida con el impactador en cascada durante la descarga de tapioca.

Como se puede observar los mayores impactos se registran en el punto de muestreo más próximo (G1), que son hasta tres y cuatro veces superiores que los registrados en los puntos G2 y G3. La granulometría del material presenta una acumulación en la fracción gruesa, por encima de las 10 μm , tanto en las proximidades como en los puntos de muestreo más alejados. En este experimento se pone en evidencia la importancia de las buenas prácticas en el manejo y modo de operación de la descarga, que puede incrementar un orden de magnitud los niveles de material particulado en ambiente según sea la altura de apertura de la cuchara sobre la tolva.

3.10 Experiencia #6: carga de finos de silico-manganeso en camiones y tren

Este experimento se realizó el día 5 de junio de 2003 a las 10:15 h.l. en el muelle Aragón junto a naves BERGÉ (Oeste) y ALGEPOSA. El material se trata de finos de silico-manganeso apilado sobre el muelle que es cargado en camiones o vagones de tren para ser trasladado. La operación se realiza con palas excavadoras. Las condiciones ambientales son de cielo cubierto con viento de 4-5 m/s y dirección variable. Se inicia el experimento con viento del Este lo que motiva un diseño inicial y ubicación de los instrumentos que a las 10:30 ha de ser modificada debido a un viento racheado que cambia de dirección pasando de los 18° a los 328°. La temperatura y la humedad relativa también sufren perturbaciones en su evolución diaria debido a la inestabilidad atmosférica que a las 12:00 h.l. dio lugar a precipitaciones en la zona.

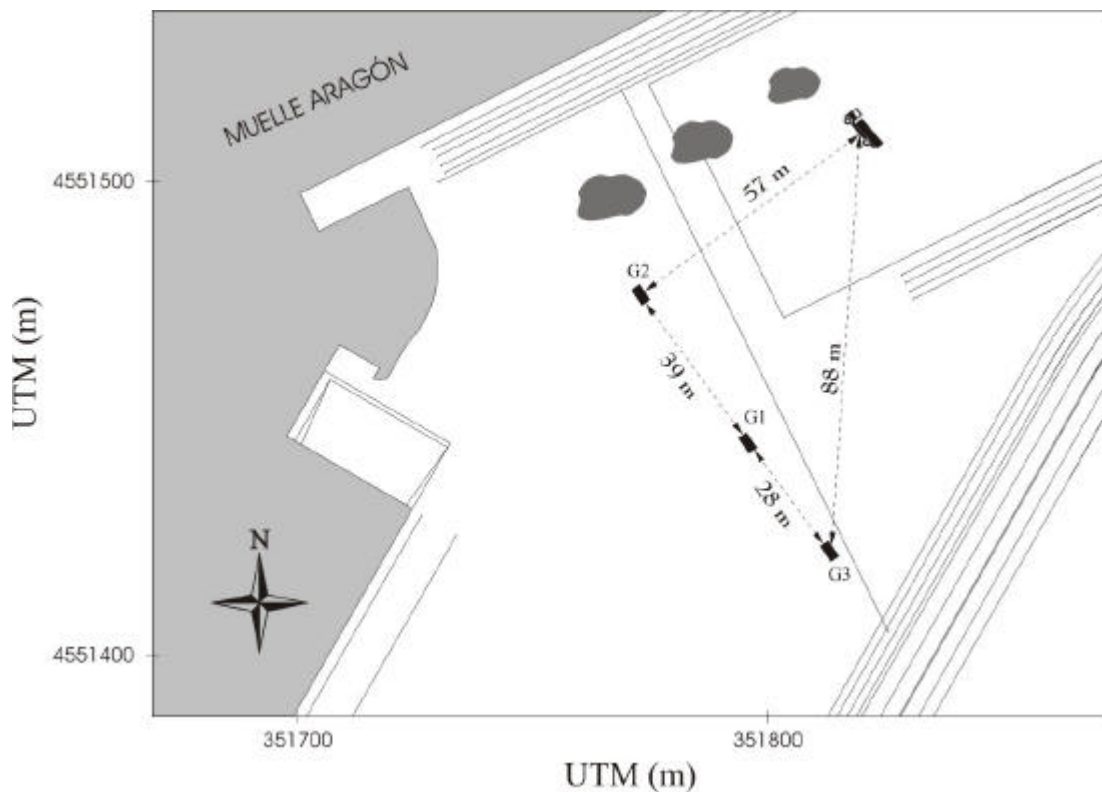
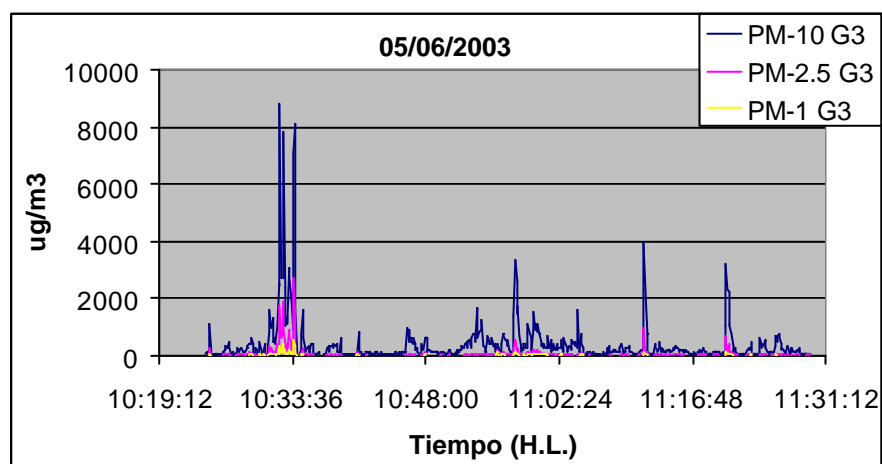


Figura 27. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia 6: carga de finos de silico-manganeso en camiones y tren en muelle Aragón.



Fotos 8 y 9. Carga de finos de Si-Mn desde el muelle en camiones para ser transportado.

En la figura 28 se pueden encontrar los principales resultados obtenidos durante las medidas, mientras en la figura 29 está la comparación entre las diversas medidas de los equipos. La figura 28b corresponde a los datos del GRIMM 3 aumentado la resolución en la escala del eje vertical para observar mejor el efecto del paso de camiones y descarga de la pala en el tren. Es interesante destacar que en estos experimentos se pudieron medir altas concentraciones de PM-2.5 y PM-1, es decir se trata de un material con una granulometría que aumenta en las fracción fina, pudiendo alcanzar los $2000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de PM2.5 cuando se reciben impactos directos. La fracción PM1 también registra altas concentraciones que alcanzaron hasta los $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Como se ha comentado la dirección de viento osciló durante el experimento y la posición del GRIMM3 recibió impactos directos tanto de la actividad de descarga en camiones, que dispersaba todo el material en su conjunto, como del paso de los mismos o del tren por la vía a escasos metros, según se comenta en la gráfica adjunta. En estos casos el material resuspendido es la fracción gruesa, ya que tan solo se detectan incrementos en esta fracción por este motivo.



(a)

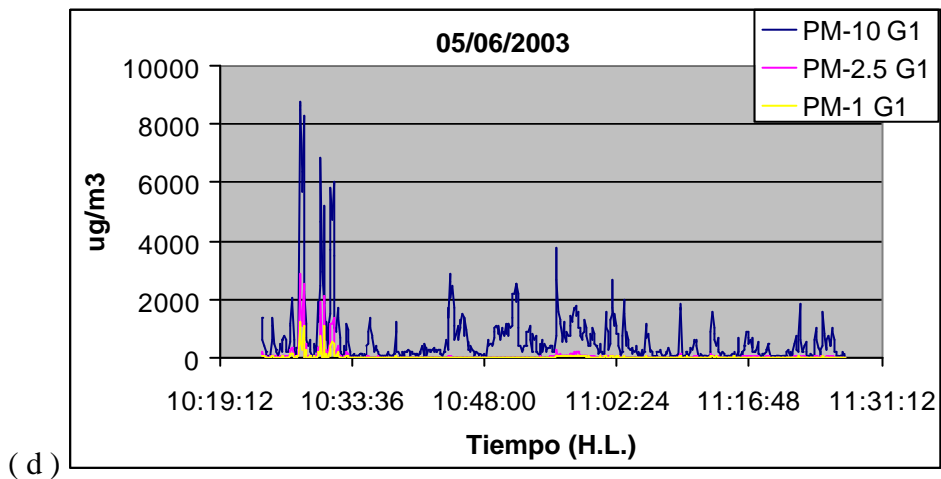
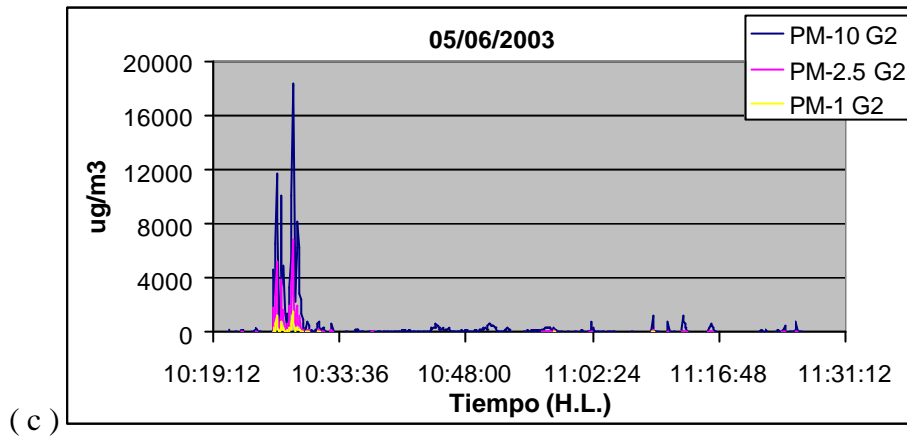
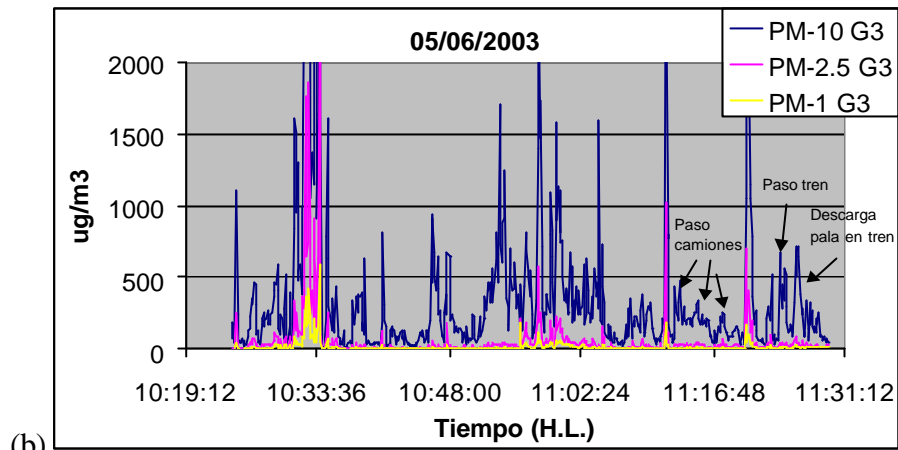
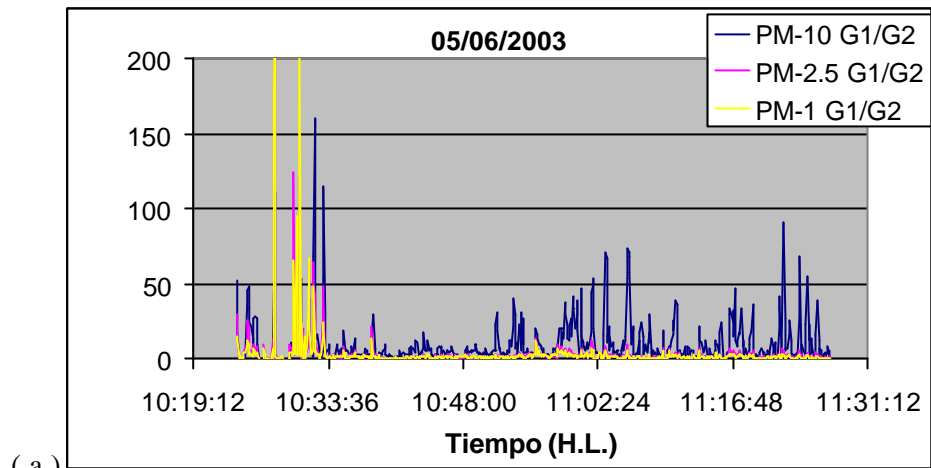
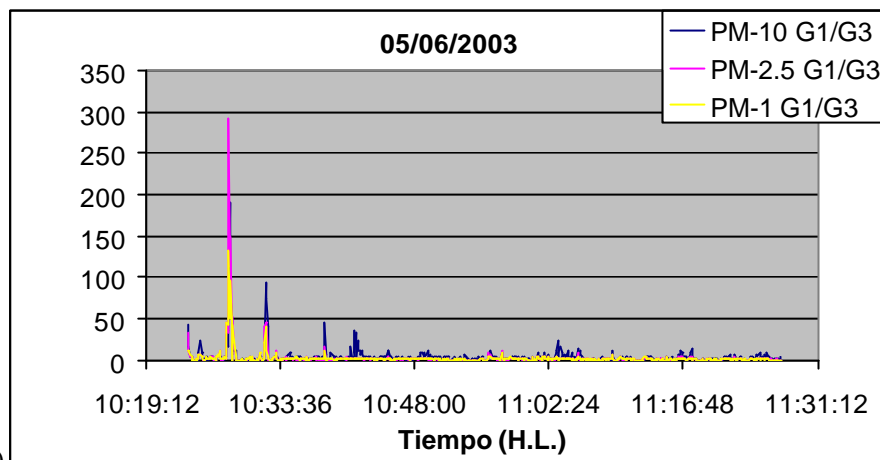


Figura 28. Medidas realizadas con los GRIMM durante la carga de finos de silico-manganeso.



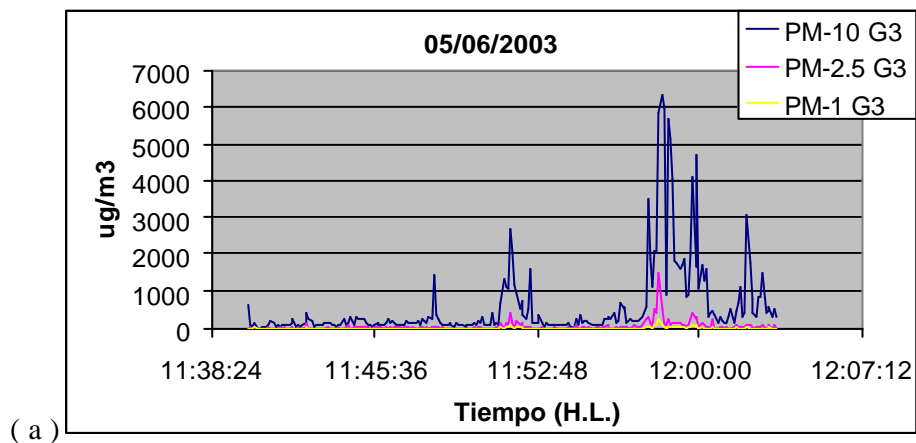
(a)



(b)

Figura 29. Relación entre las medidas de los GRIMM durante la carga de finos de silico-manganeso.

Al finalizar la experiencia 6, se realizó una intercomparación entre los tres equipos GRIMM, cuyos principales resultados se muestran en la figura 30. Hay que destacar la similitud en las medidas del G1 y G3, siendo los valores obtenidos con G2 ligeramente inferiores, tal como se observa en los últimos datos de la figura 30d. En la figura 31 se puede encontrar la relación entre las medidas.



(a)

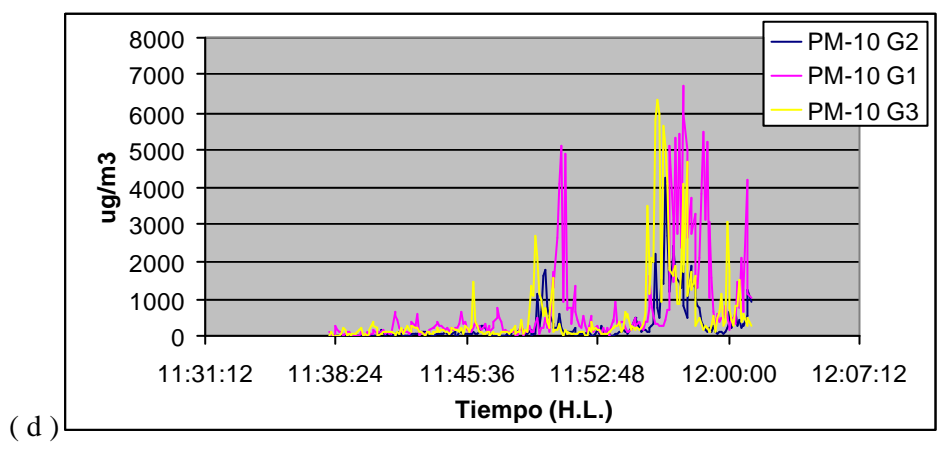
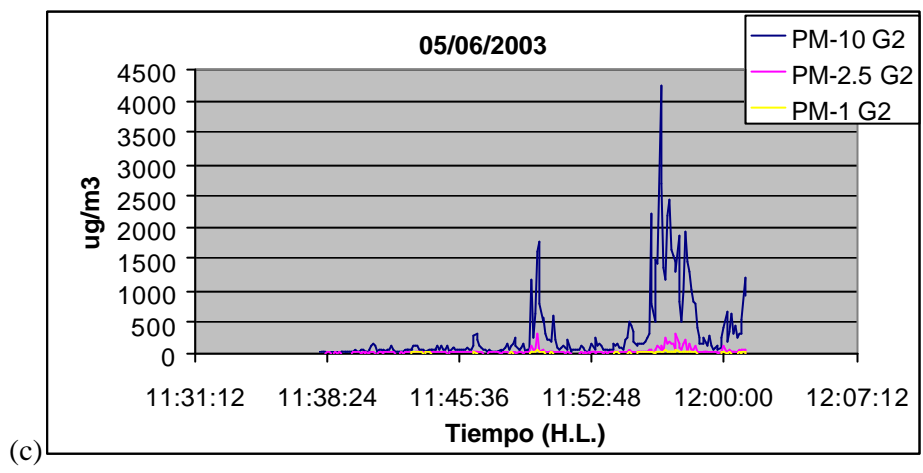
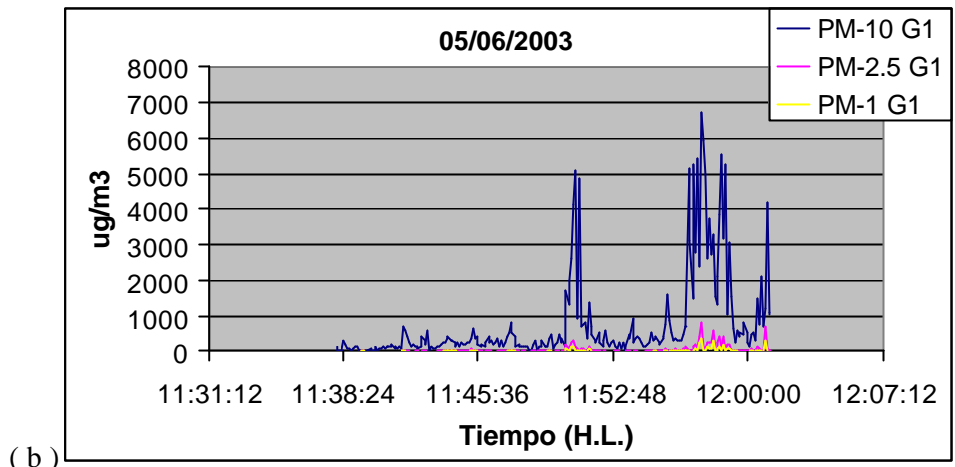
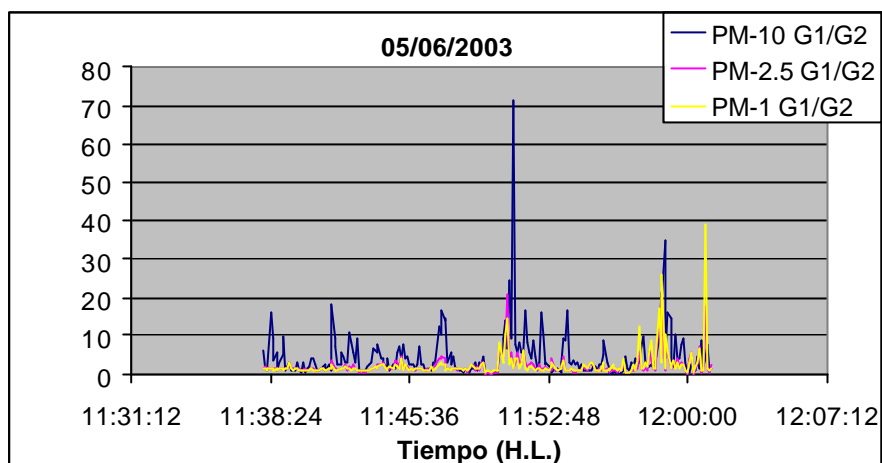
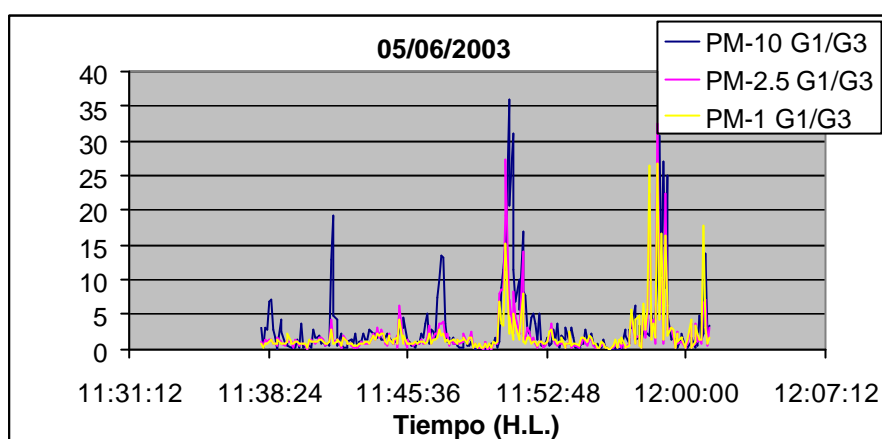


Figura 30. Intercomparación de los GRIMM durante la descarga de silico-manganeso.



(a)



(b)

Figura 31. Relación entre las medidas realizadas en la intercomparación de los GRIMM durante la descarga de silico-manganeso.

A pesar de la posición única en la que se ubicaron los tres equipos GRIMM, la magnitud de los ratios o relaciones registrados entre las concentraciones relativos a las tres fracciones, ponía en duda la representatividad de la intercomparación, ya que no siempre los impactos de la nube de material fueron registrados simultáneamente en los tres equipos. Este fue el motivo de se realizara un ejercicio específico de intercomparación en un emplazamiento que asegurara la homogeneidad de la masa de aire, según se describe en el siguiente experimento.

3.11 Experiencia #7: Intercomparación de equipos GRIMM en APT Tarragona y CIEMAT-Madrid

Aunque durante cada uno de los experimentos y ubicaciones se realizó una intercomparación de los equipos de medida GRIMM, en algunas ocasiones quedó de manifiesto que debido a la heterogeneidad espacial y perturbaciones de carácter puntual y local que afectaban al campo de concentraciones, las medidas con cada equipo podían no ser representativas de las misma masa de aire.

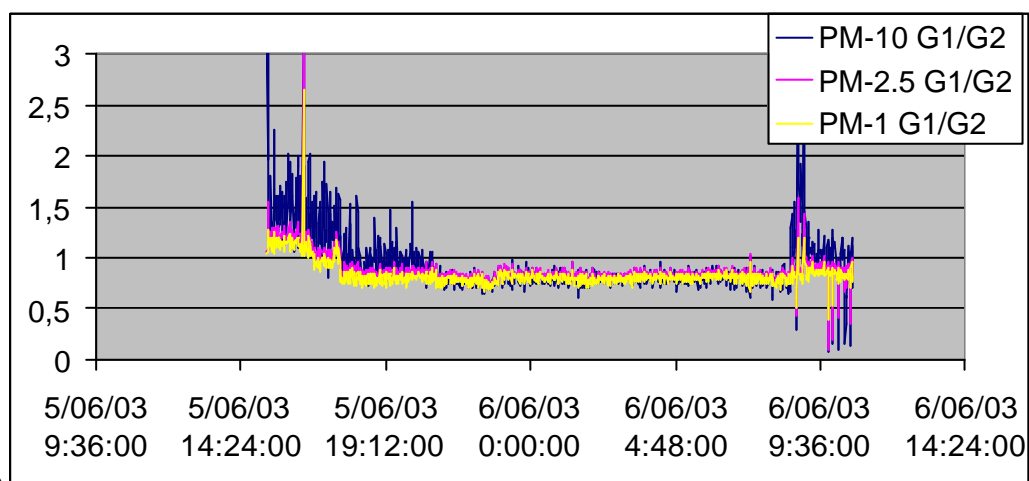
Por este motivo se buscó un emplazamiento donde existiera una mayor homogeneidad, libre de obstáculo o fuentes de emisión cercanas. El emplazamiento elegido en el que se realizó esta intercomparación fue la terraza del edificio de la Autoridad Portuaria (Foto 10). Las medidas se realizaron del día 5 al 6 de junio de 2003. La instrumentación utilizada consistió en los tres equipos GRIMM y un captador de alto volumen para la determinación gravimétrica de la concentración de PM10.



Foto 10. Intercomparación de equipos GRIMM en la terraza del edificio de la Autoridad Portuaria del Puerto de Tarragona.

Las condiciones ambientales al inicio del experimento (15:00 h.l.) fueron de viento del Este que se mantuvo con velocidades alrededor de los 6 m/s hasta las 19:00 h.l., por lo que la situación era de fuerte ventilación con masa aérea procedente del mar. Al inicio del día siguiente el viento amainó (2-3 m/s) y se mantuvo la dirección Norte hasta las 10 h.l. en que comenzó la rotación con el establecimiento de las condiciones de

brisa desde el Este con giro anticiclónico hasta el Sur. Debido a estas condiciones atmosféricas el rango de concentraciones en las que se desarrolló el ejercicio fue muy estrecho, cubriendo tan solo las condiciones de atmósfera casi limpia o fondo de la zona. En la figura 32 se puede encontrar la relación entre las medidas realizadas por los distintos GRIMM, aunque su validez está limitada a concentraciones muy bajas de partículas.



(a)

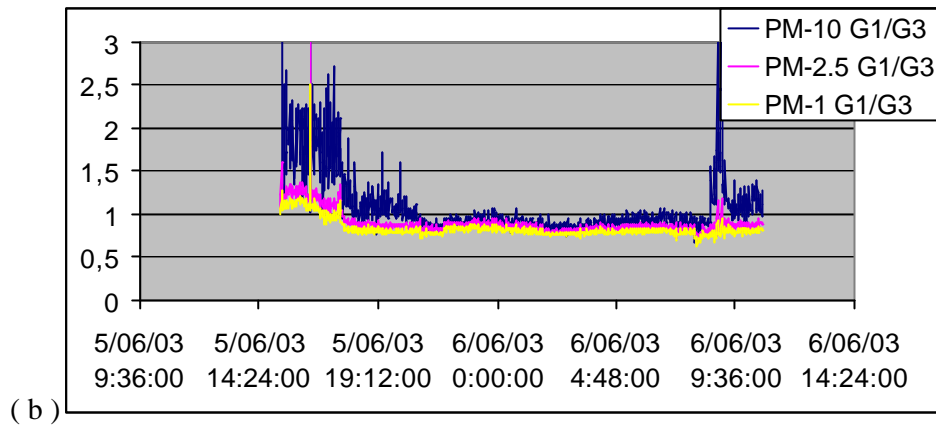


Figura 32. Relación entre las medidas realizadas en la intercomparación de los GRIMM en la terraza del edificio de la Autoridad Portuaria del Puerto de Tarragona.

Posteriormente al traslado de los equipos se realizó una intercomparación de los dos GRIMM 2 y 3 en el CIEMAT, tal como se observa en las figuras 33 y 34. De los ajustes lineales se puede obtener que el GRIMM 2 mide un 36.0 % menos que el GRIMM 3 para PM-10 ($r = 0.9739$), un 22.9 % menos para PM-2.5 ($r = 0.9474$) y un 12.3 % menos para PM-1 ($r = 0.9672$).

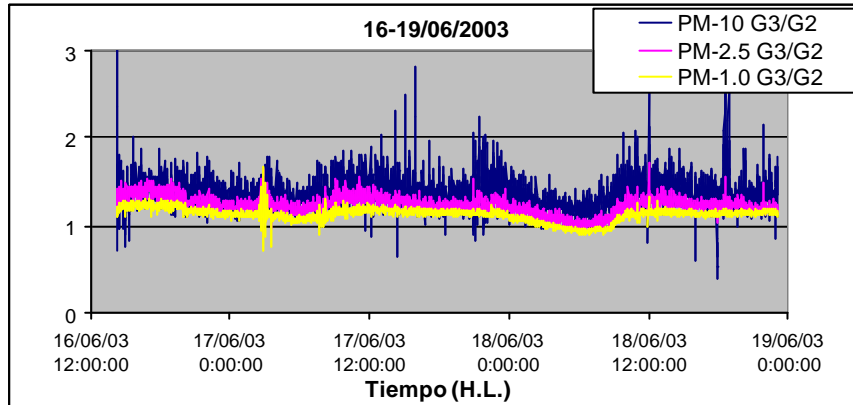
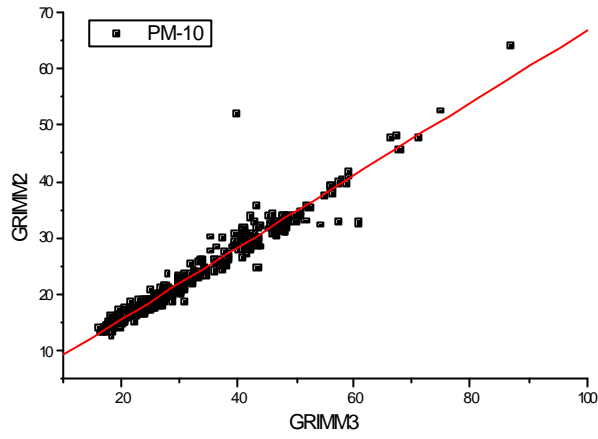
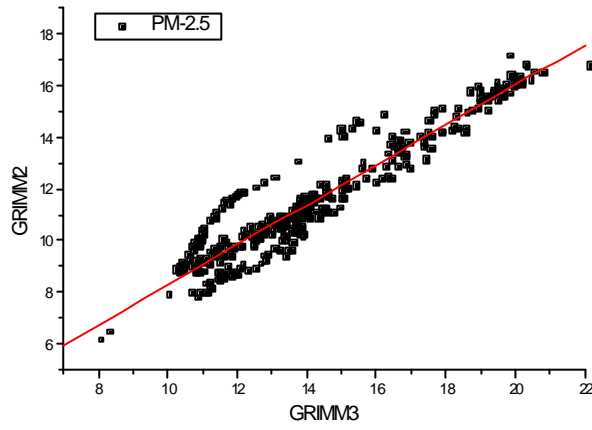


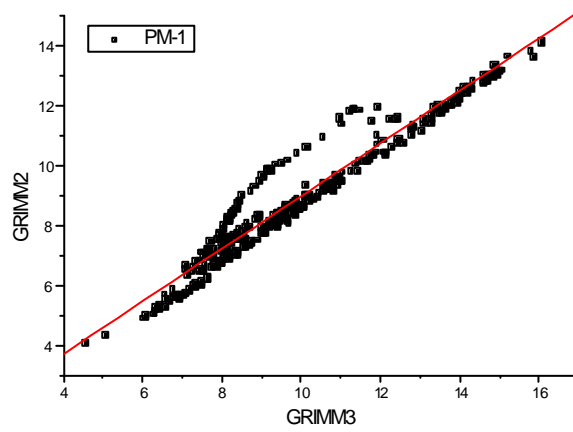
Figura 33. Comparación GRIMM3/GRIMM2 realizada en el CIEMAT durante los días del 16 al 19 de Junio de 2003.



(a)



(b)



(c)

Figura 34. Correlación de las medidas de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) realizadas por los Grimm 2 y 3 en el CIEMAT. Se han realizado promedios de 10 minutos.

3.12 Experiencia #10. Descarga de mandioca en el muelle Aragón

Este experimento se realizó el 16/06/04, estando situado el barco “Mighty Michelis” en el muelle Aragón y los equipos de medida en el muelle Castilla. Se trataba de una descarga de Mandioca desde barco a tolva y de tolva a camión por medio de una grúa con cucharón de 33-37 toneladas. Las condiciones atmosféricas locales eran de brisa de 5 m/s, de dirección Sur-Suroeste, y una temperatura de 26°C. La instrumentación utilizada en este experimento consistió en dos de los tres equipos GRIMM (G2 y G3) y la estación meteorológica portátil. Debido a la dirección del viento no fue posible realizar las medidas en el muelle Aragón y se instalaron en el muelle Castilla, tal como se muestran en la Figura 35.

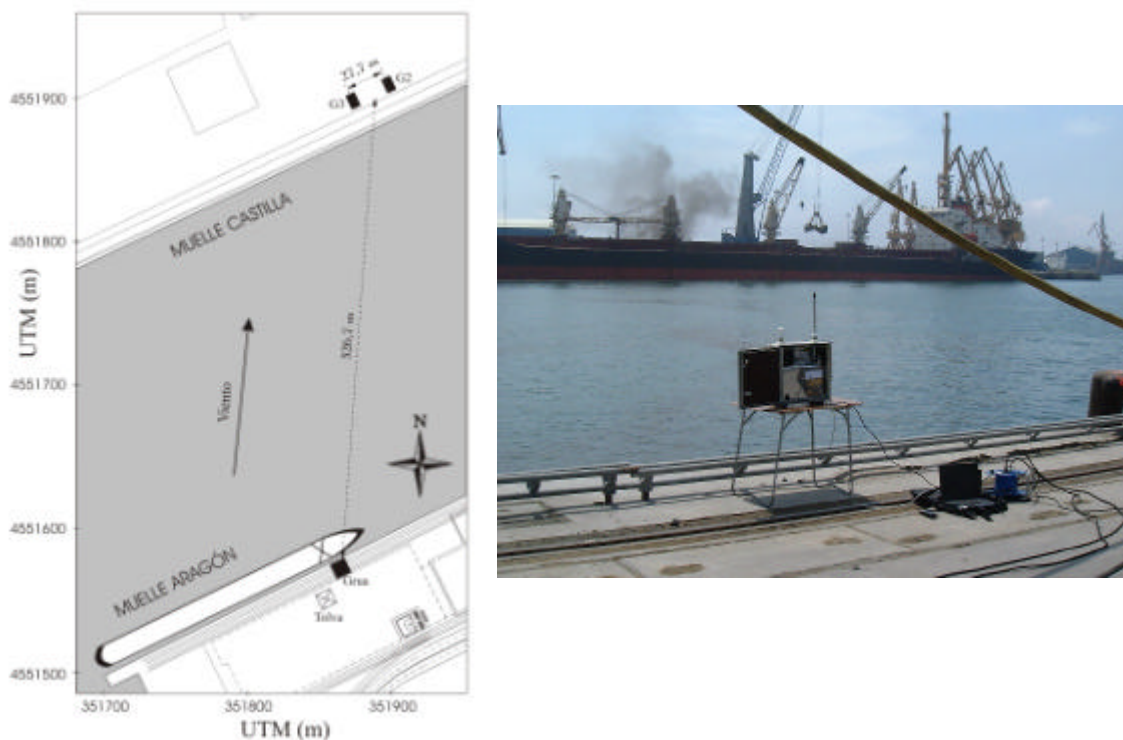


Figura 35. Disposición de la instrumentación durante la experiencia #10, medida de la descarga de mandioca desde el muelle Castilla (izquierda) y uno de los equipos GRIMM midiendo en el muelle Castilla mientras se descarga un barco por medio de grúa en el muelle Aragón (derecha).

La Figura 36 muestra los resultados de estas medidas. Se puede observar que casi todas las partículas están comprendidas entre 2.5 y 10 micrones. El tiempo medio entre descargas era entre 2 y 2.5 minutos. Las descargas iniciales tenían una altura de aproximadamente el doble de la altura de la cubierta. El penacho generado en la tolva sobre el camión se encontraba detrás del barco, por lo que no se veía directamente desde el punto de medida, sino que bordeaba el barco por la proa. Se realizaron medidas mientras la dirección del viento permitió realizar medidas en el muelle Castilla.

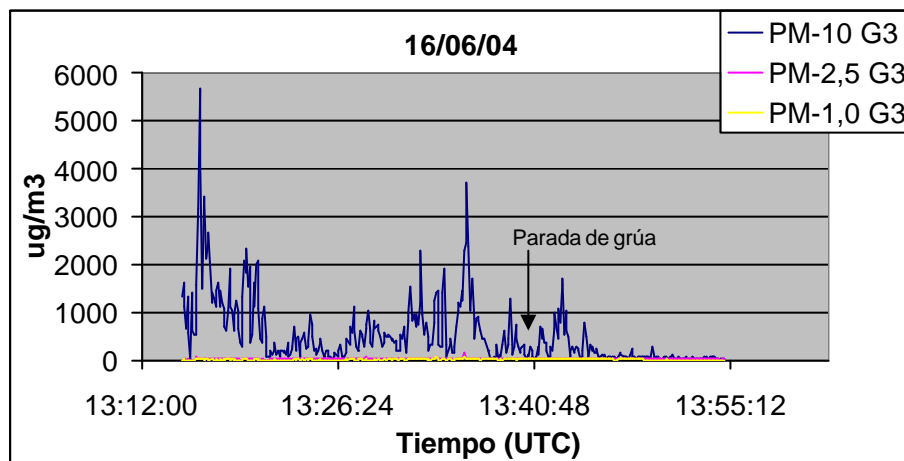
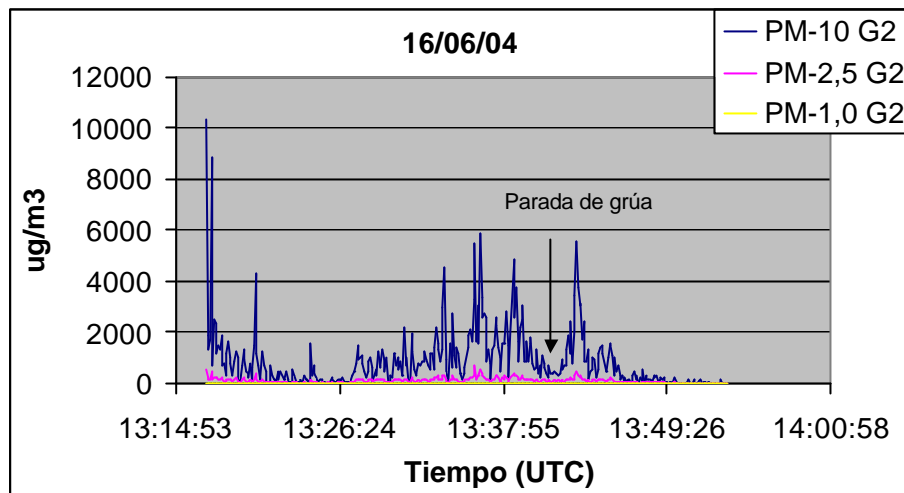


Figura 36. Experiencia #10, descarga de mandioca en el muelle Aragón y medida en el muelle Castilla (arriba: medidas GRIMM 2 y abajo: medidas GRIMM 3).

3.13 Experiencia #11. Descarga de clínker en el muelle Navarra

Este experimento se realizó el 16/06/04, estando situado el barco “General Vladimir Zaimov” en el muelle Navarra. La operación consistió en la descarga de clínker por medio de 2 grúas con cucharas de 33-37 toneladas y su depósito en dos parvas, separadas unos 40 m y de 7 m de altura, aproximadamente. Las condiciones atmosféricas locales eran de brisa de 5 m/s, de dirección Suroeste, y una temperatura de 25°C. La instrumentación utilizada en este experimento consistió en dos de los tres equipos GRIMM (G2 y G3) y la estación meteorológica portátil. La disposición de estos equipos durante las medidas se puede observar en la Figura 37.

La Figura 38 muestra los principales resultados obtenidos. Hay que destacar que al principio de las medidas, algunas nubes se elevaban mucho y no podían ser detectadas por los GRIMM. Por el contrario, algunas veces que las nubes iban bajas, el G3 llegó a saturarse al sobrepasar su límite máximo de medida. Cada grúa necesitaba

aproximadamente entre 2 y 2.5 minutos para realizar una operación completa de descarga y a veces la nube se formaba por la acción conjunta de ambas grúas.

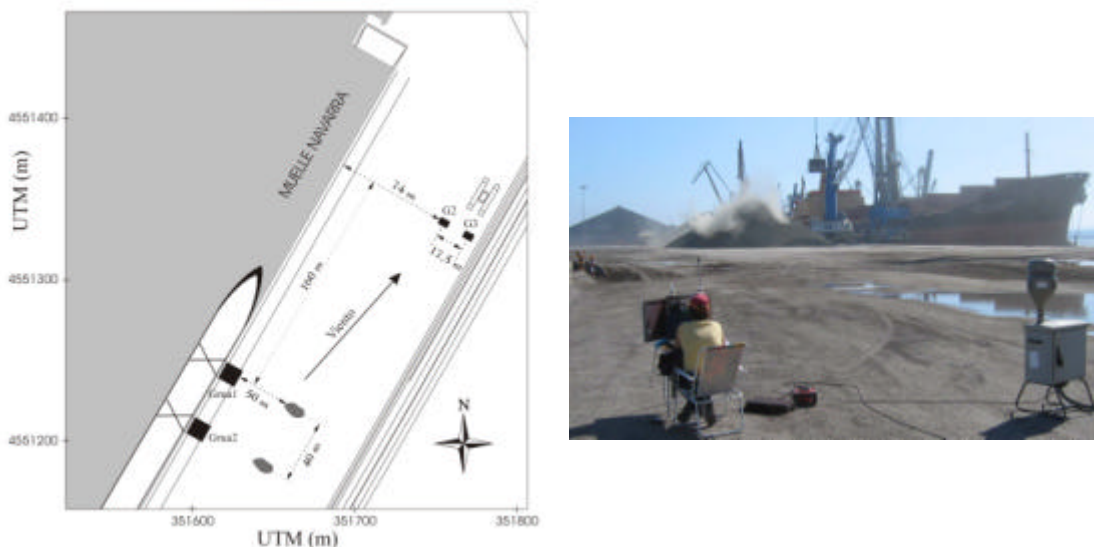
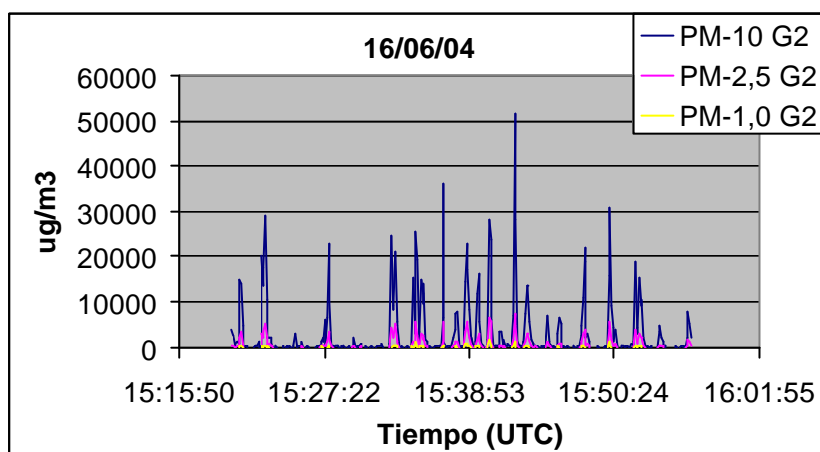
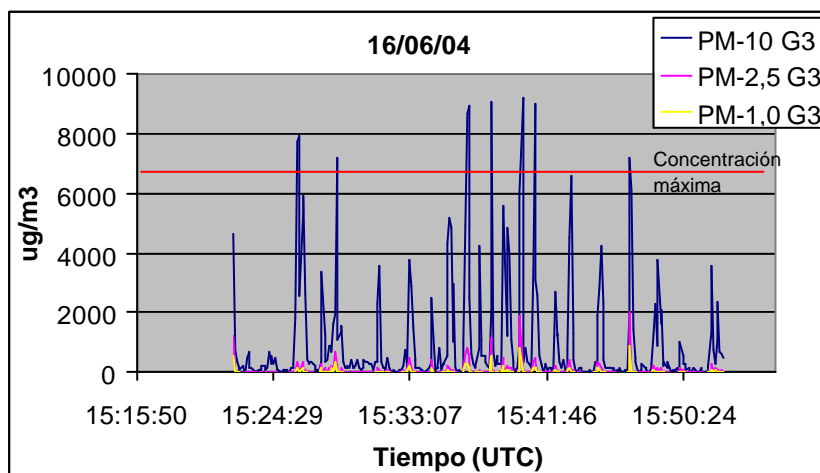


Figura 37. Disposición de la instrumentación durante la experiencia #11.



(a)



(b)

Figura 38. Experiencia #11, descarga de clinker en el muelle Navarra a) medidas del G2 y b) medidas del G3.

3.14 Experiencia #14. Descarga de clínker y carga de camiones en muelle Navarra.

Este experimento fue una ampliación de la experiencia anterior, la descarga de clínker desde el “General Vladimir Zaimov” en el muelle Navarra a dos parvas por medio de dos grúas. Para realizar esta experiencia se utilizó una instrumentación más completa, se utilizaron 3 GRIMMs en lugar de 2, se añadió un impactador de cascada y un captador PM10. Las condiciones atmosféricas locales eran de viento inicial de dirección Sur, cambiando a Suroeste al poco tiempo del inicio de las medidas, manteniéndose constante después por el resto del tiempo. Esto permitió la disposición de equipos que se muestra en la Figura 39.

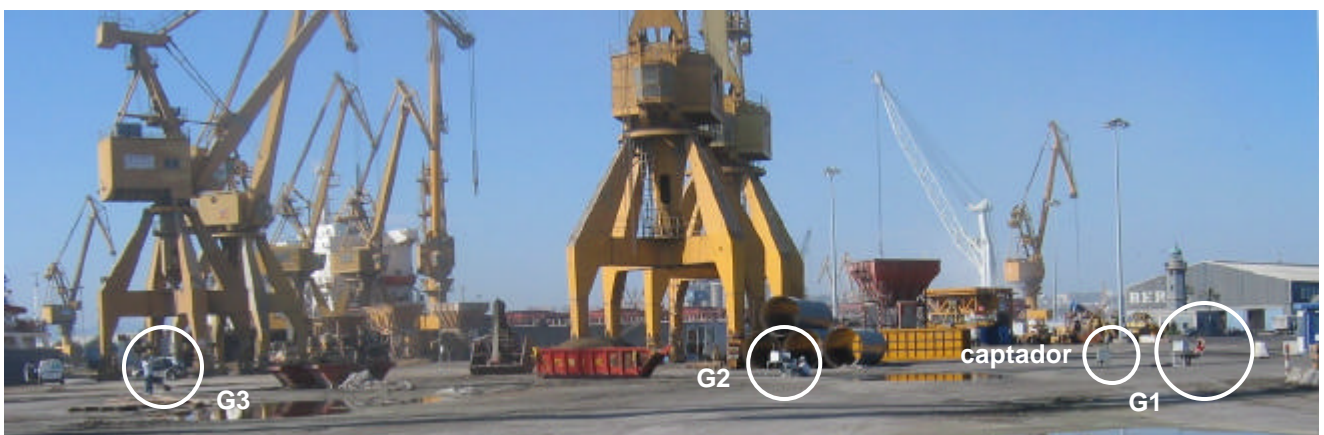
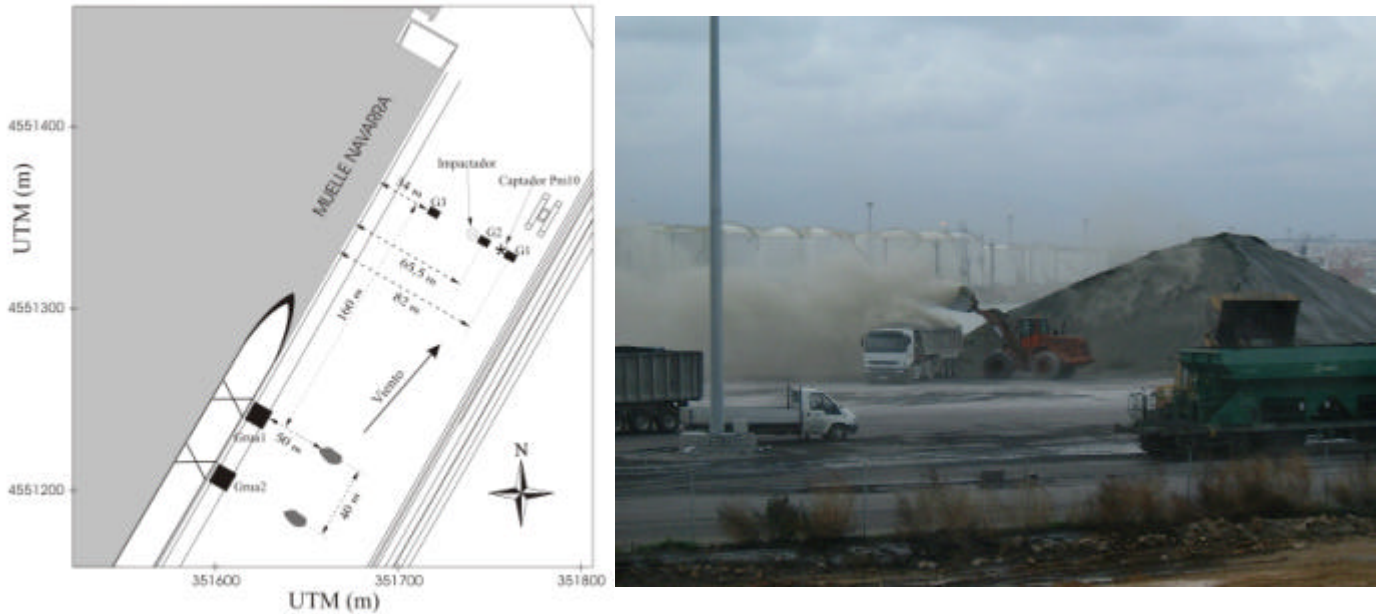
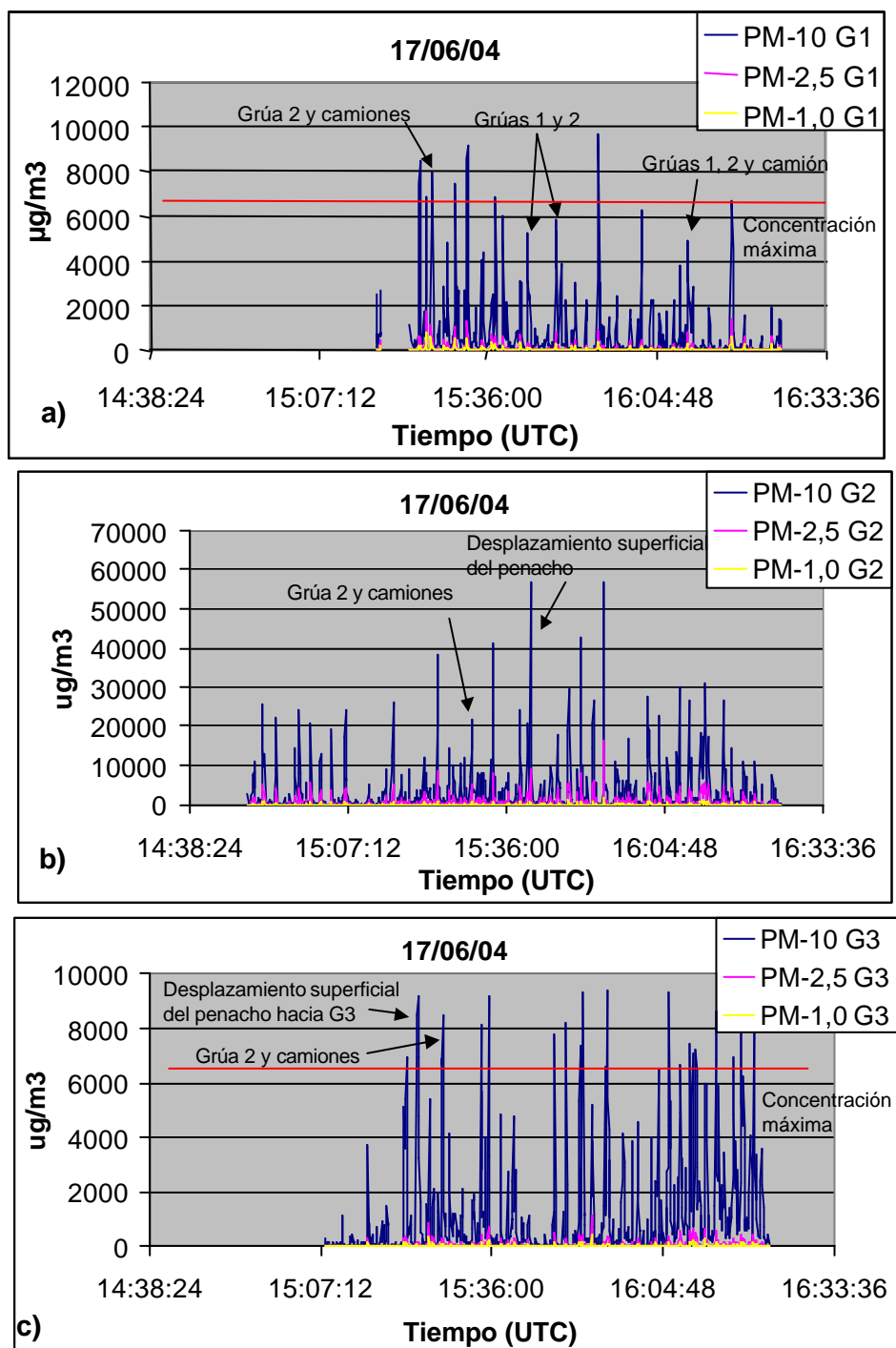


Figura 39. Disposición de los equipos de medida durante la experiencia #14, descarga de clínker y formación de dos parvas. En la foto de la derecha se observa la gran dispersión de material procedente de la pala y de la superficie del camión.

Los principales resultados obtenidos se pueden encontrar en la Figura 40. Adicionalmente a las actividades descritas en la experiencia 9, en este caso se daba simultáneamente la descarga de las grúas y la carga de camiones, manteniendo la frecuencia de las grúas (una descarga cada 2-2.5 minutos). El desplazamiento superficial del penacho hacía que a veces se saturaran los GRIMM G1 y G3, dando los valores máximos observados en G2 siendo este efecto más importante que la simultaneidad de las grúas y los camiones. En la Figura 39 a-c, la escala necesaria para representar PM10 hace que los valores de PM2.5 y PM1 parezcan pequeños, pero sus valores absolutos son altos, tal como se observa en la Figura 39 d-f. En la Figura 41 se puede observar la distribución de tamaños medida con el impactador de cascada, destacando una contribución importante de PM2.5 y PM1.



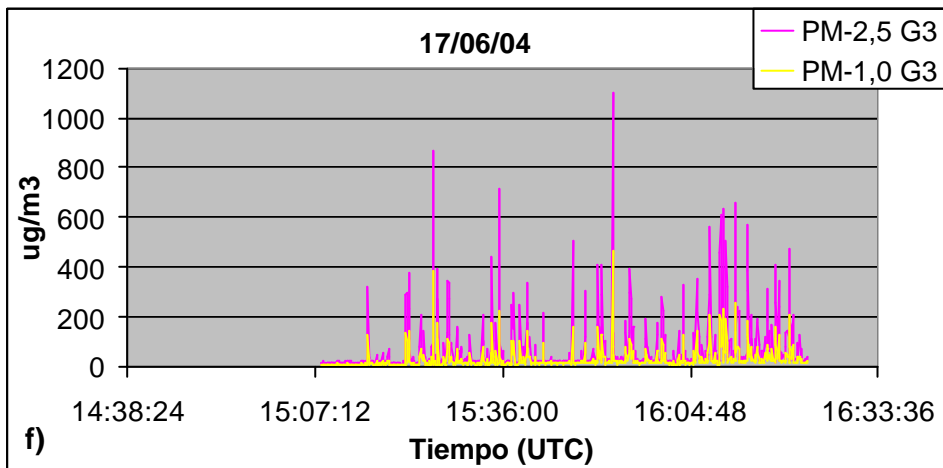
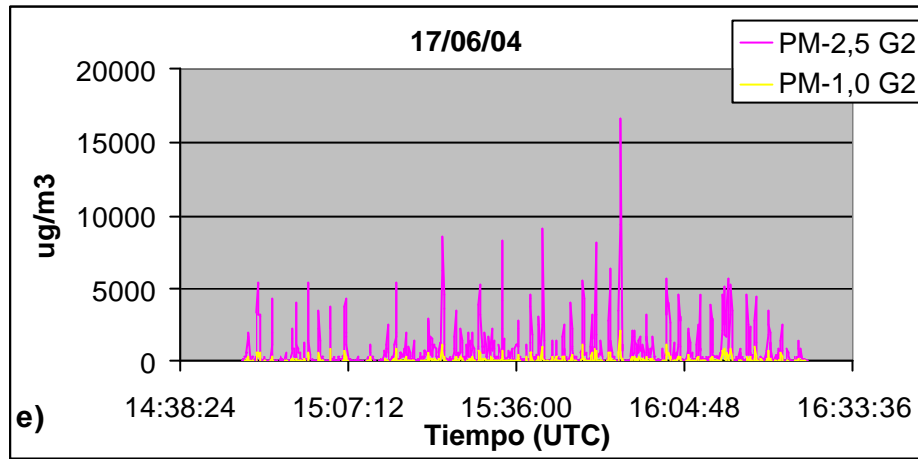
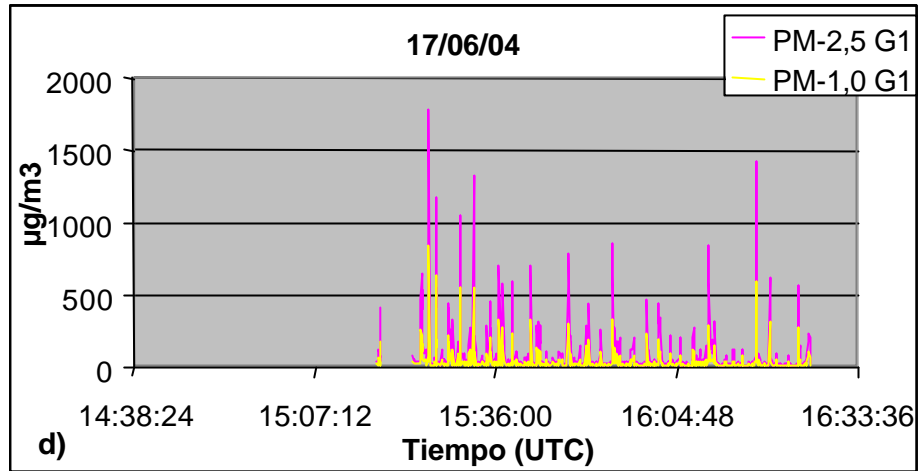


Figura 39. Experiencia #14, descarga de clinker en el muelle Navarra y carga en camiones. En las figuras d-f están representados PM2.5 y PM1 con mayor claridad.

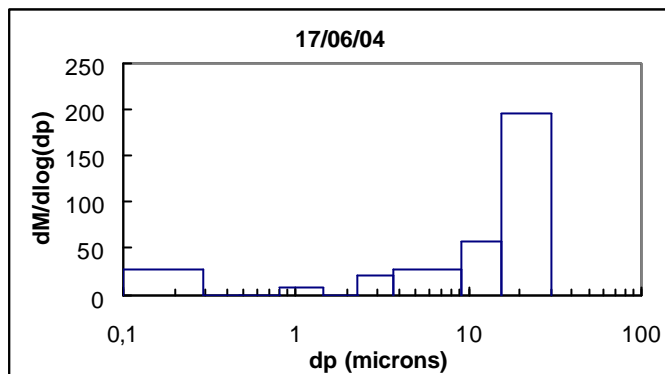


Figura 40. Distribución de partículas medida con el impactador de cascada durante la experiencia #14, descarga de clinker y carga de camiones (no se dispone de los datos de las etapas comprendidas entre 0.3-0.8 μm y 1.4-2.2 μm)

El filtro final del impactador correspondiente a la fracción $<0.3 \mu\text{m}$ fue analizado por microscopía electrónica con objeto de comprobar el tipo de partículas depositadas en el filtro. Los resultados de este análisis que se muestran en el Anexo, confirmaron que las partículas de clinker, que se observaron en esta fracción en gran cantidad, tenían una dimensión mayor, llegando incluso en ocasiones a las $10 \mu\text{m}$, por lo que su presencia en el filtro podía deberse a un problema de muestreo: variación en el caudal del impactador afectando por tanto al tamaño de corte, o bien a un artefacto debido a las características morfológicas específicas de estas partículas.

3.15 Experiencia #12: Intercomparación de equipos Grimm durante una descarga

Esta experiencia se realizó el 17/06/04 en una zona situada entre el muelle Navarra y el muelle Aragón entre las 10 y 12 horas locales. En el muelle Navarra se estaba procediendo a la descarga de clinker y en el muelle Aragón a la de mandioca. Se colocaron los tres GRIMM y un captador PM10 en una disposición circular con un diámetro de unos 3 metros (Figura 41), con el objetivo de comparar los resultados de los equipos.

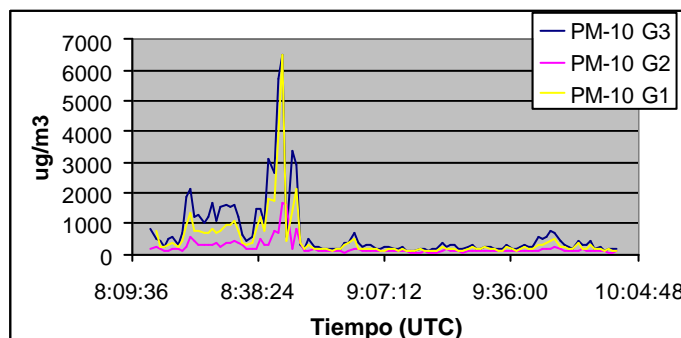
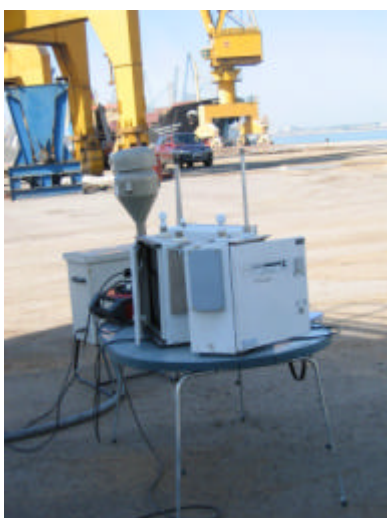


Figura 41. Foto de la disposición de los GRIMMs (G1, G2 y G3) y captador de PM10 para la intercomparación durante una descarga. A la derecha se muestran los valores de PM10 que registraron los tres equipos.

Como resultado de este experimento se pudo observar una cierta discrepancia entre las observaciones de los monitores que fue atribuida principalmente a la heterogeneidad espacial y perturbaciones de carácter puntual y local que afectaban al campo de concentraciones, por lo que las medidas en cada monitor no siempre eran representativas de la misma masa de aire. Además se consideraron otros posibles factores como el tiempo de respuesta propio de cada equipo, la influencia del tiempo de promedio, que en esta caso fue de un minuto, frente a la duración de las perturbaciones, y a un posible desfase temporal entre los relojes internos de cada monitor. Por este motivo se realizó posteriormente la intercomparación bajo condiciones de concentración y masa de aire más homogéneas, situando los monitores en un punto más alejado de las fuentes de emisión..

3.16 Experiencia #12. Intercomparación de equipos en la Autoridad Portuaria

Debido a las dificultades surgidas de la experiencia 12, debidas a la proximidad de la fuente emisora, se decidió repetir la intercomparación en un emplazamiento donde existiera una mayor homogeneidad, y estuviera libre de obstáculos o fuentes de emisión tan próximas. El emplazamiento elegido en el que se realizó esta intercomparación fue la terraza del edificio de la Autoridad Portuaria (Autoridad Portuaria de Tarragona) (Foto 10), de forma similar a como se realizó en la campaña de junio de 2003. Las medidas se realizaron del día 17 al 18 de junio de 2004. La instrumentación utilizada consistió en los tres equipos GRIMM y un captador de alto volumen para la determinación gravimétrica de la concentración de PM10.

En la Figura 42 se pueden observar las medidas realizadas por los GRIMMs. Se puede observar que G2 y G3 dan medidas muy parecidas tanto para PM10 como PM2.5 y PM1, tal como se espera al estar recién calibrados. El equipo G1 presentó una desviación de la línea de base durante el periodo nocturno lo que impidió su comparación con los otros dos equipos.

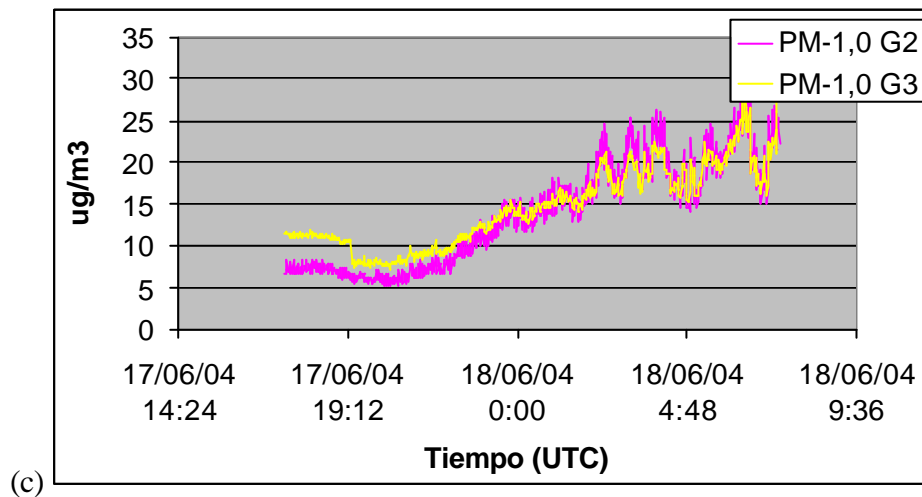
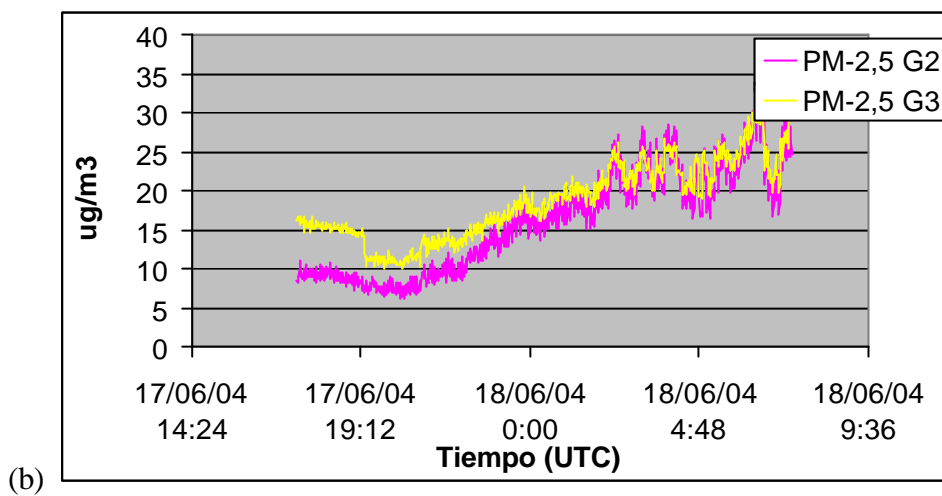
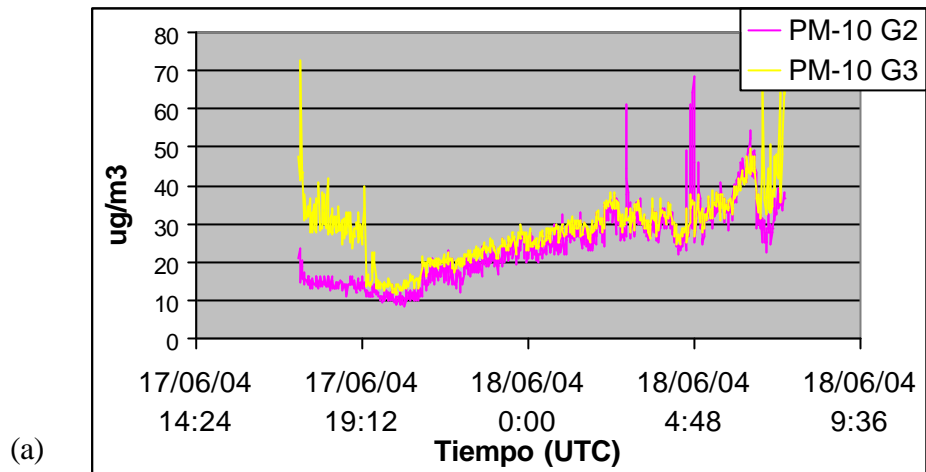


Figura 42. Intercomparación de los GRIMMs realizada en la terraza del edificio de la Autoridad Portuaria del Puerto de Tarragona.

4. CONCLUSIONES

En estas campañas se han caracterizado diversas actividades y materiales previstos y algunos no previstos en dicho marco de actuación. No obstante, el criterio del potencial impacto de materiales, actividades de carga y descarga, prácticas y eventos en los niveles de material particulado ha prevalecido para que se considerase su caracterización in situ.

Los resultados que aquí se presentan han dado lugar a las siguientes conclusiones:

- Se ha caracterizado experimentalmente el impacto en los niveles de inmisión de material particulado atmosférico asociado a distintas actividades de carga, descarga o manipulación de materiales trasegados en el Puerto de Tarragona durante distintos periodos de tiempo. Los materiales caracterizados de alto carácter pulverulento han sido: finos de silico-manganeso, alfalfa, tapioca, polvo de hulla, mandioca y clínker.
- Las operaciones de manipulación han sido muy diversas y han comprendido desde la descarga del barco con pala o cuchara sobre el muelle, en ocasiones sobre tolva, su carga y transporte en camiones, la descarga de camiones en muelle, la carga con pala y grúa en barco, el amontonamiento en parvas en el muelle, o el trasiego de camiones sobre suelo cubierto de polvo de carbón, entre otras. Todas estas operaciones, se han producido bien de manera individual en cada experimento, bien coincidiendo una o varias de ellas habiendo sido identificado su impacto individual en las medidas de los equipos.
- Las condiciones meteorológicas en las que se han realizado los distintos experimentos han sido las representativas del área de estudio, esto es, en condiciones de brisa, con rotación anticiclónica de la misma a lo largo del día. En algunos casos se han registrado precipitaciones de carácter local producidas por inestabilización de la masa aérea sobre la vertical del lugar.
- En alguna de las campañas de medida se han producido aportes externos de material particulado, concretamente durante las medidas realizadas en junio de 2003 se produjo aporte de masas de aire cargadas de polvo provenientes del Norte de Africa con recorrido por el Mediterráneo. En esos caso los niveles de material particulado atmosférico registrados estarían afectados por esos aportes.
- La dirección instantánea del viento ha sido el elemento condicionante fundamental para realizar el despliegue instrumental más adecuado en cada experiencia, ya que la ubicación de los monitores a sotavento de los términos fuente no siempre ha sido posible. En cualquier caso, y siempre que existía la posibilidad, el diseño se ha realizado para la caracterización del material particulado y su dispersión a escasa distancia de la fuente de emisión. En alguno de los casos y situaciones el transporte de material se producía hacia el mar. Por ejemplo, cuando se trabaja o manipulan graneles en los muelles Cataluña o Aragón y la entrada de la brisa se producía con componente Sur. En estas condiciones, las partículas generadas son transportadas en dirección tierra adentro, aunque su primer impacto se produce sobre la superficie del mar, en el

canal existente entre los muelles Aragón y Castilla y alcanzando posteriormente la superficie de este último muelle.

- Las fracciones granulométricas implicadas han variado según el tipo de material y también en función de distancia a la fuente. En el caso de la tapioca, el impacto afecta únicamente a la fracción PM10, mientras que para la alfalfa, los finos de Si-Mn, el polvo de carbón de hulla, y el clínker se generan partículas en todas las fracciones. En estos casos se observa que la proximidad del punto de muestreo a la fuente influye en la detección de niveles relativamente altos de PM2.5 y en el caso concreto de los finos de Si-Mn, se han registrado los niveles más altos de PM1. En el caso de la mandioca, casi todo el material particulado se encuentra en la fracción de tamaños comprendida entre 2.5 y 10 micrones.
- La manipulación clínker ha generado altos valores de concentración ambiental de material particulado en todos los rangos granulométricos. Se han alcanzado valores instantáneos de PM2.5 de 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (experiencia 10, G2) y de PM10 de 30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (experiencia 10, G2).
- Las medidas realizadas con el impactador de cascada han mostrado en el caso de clínker una proporción importante de partículas finas. Desde el punto de vista del efecto sobre la salud que tienen estos tamaños, sería interesante medir también su concentración en número (número partículas/ m^3). Estas altas concentraciones medidas durante las experiencias 9 y 10 indican que existen ciertas actividades durante las cuales se deben de utilizar equipos capaces de medir sin grandes errores estos rangos de concentraciones, mucho más típicos de emisiones que de inmisiones.
- Se ha encontrado que los modos de operación afectan igualmente a los niveles de material particulado que se resuspende o dispersa en la atmósfera. En el caso del polvo de hulla, el paso de camiones de gran carga y su peso, así como los modos de conducción, aceleraciones y maniobras en un suelo con gran depósito de polvo, son factores que influyen de manera notable en los niveles de material particulado que se registran en sus proximidades. Cuando se aplican las medidas correctoras disponibles en algunas zonas del puerto, como es el riego de la superficie del muelle, la práctica normal observada en la conducción de camiones es que el recorrido no se ajuste normalmente a la zona mojada, por lo que esta medida, de gran efectividad según se ha comprobado, resulta ineficaz si no va acompañada de cambios de actitud en los propios profesionales del transporte.
- De igual manera, la descarga de tapioca, que genera unos elevados niveles de PM10 debería ir acompañada de unas buenas prácticas en la técnica de descarga, de forma tal que el modo y altura desde las que se realizan las descargas sobre las tolvas fueran más controladas, lo que supondría una notable mejora en el impacto que genera esta actividad.
- En el caso de la alfalfa, la descarga directa de los camiones sobre el muelle produce un impacto igual o mayor al producido por la apertura de la cuchara durante el trasvase de material hacia la bodega del barco, al igual que la actividad de las grúas que operan y apilan el material en la parvas.

- Durante algunas experiencias se observó que no siempre el penacho se desplaza a nivel del suelo, si no que se eleva nada más generarse, por lo que no se pudo caracterizar adecuadamente con la disposición de la instrumentación utilizada. Este comportamiento no es sistemático, por lo que para la caracterización del plano vertical sería necesaria una nueva disposición mucho más compleja, a diferentes alturas, y con un número mayor de monitores al utilizado.
- Las intercomparaciones realizadas en los muelles Navarra y Aragón, durante la descarga de varios materiales, han demostrado que existen heterogeneidad espacial y perturbaciones de carácter puntual y local que afectan al campo de concentraciones. Por este motivo, las medidas con cada equipo no siempre eran representativas de las misma masa de aire y no se ha podido realizar una correcta intercomparación en los rangos de concentraciones másicas deseables, ya que las realizadas en la APT correspondieron a un rango de concentraciones mucho menor a de algunos experimentos

5. AGRADECIMIENTOS

Estas campañas de medidas han sido desarrolladas conjuntamente por el CIEMAT y el IJA-CSIC y llevadas a cabo en el marco del Proyecto HADA (Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental) financiado por el Programa LIFE de la Unión Europea y coordinado por Andrés Guerra del Ente Público Puertos del Estado

Las campañas se desarrollaron en el Puerto de Tarragona, y fueron llevadas a cabo gracias al interés y apoyo logístico prestados por su Autoridad Portuaria (APT). Tanto el CIEMAT como el CSIC agradecen la colaboración del Departamento de Medio Ambiente de la APT y en especial la de D. Juan Antonio Luaces y D. Joan María Basora así como la de Andrea Lorente por su valiosa ayuda en la gestión de información. Los datos de las estaciones de calidad del aire de la XVPCAT, fueron proporcionados por los técnicos de la Conselleria de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña.

ANEXO

Caracterización de algunos materiales por
microscopía electrónica

En dos de las experiencias descritas anteriormente se realizó un análisis mediante SEM y EDX del filtro final del impactador en cascada correspondiente a la fracción fina < 0.3 μm con objeto de discriminar el tipo y origen de las partículas que contribuían a la masa observada en el filtro correspondiente a dicha etapa.

El primero de ellos corresponde al experimento numerado como Experiencia #2: Carga de alfalfa. El segundo corresponde a la Experiencia #14 : descarga de clínker. A continuación se describen los resultados de dichos análisis:

Experiencia #2: Carga de alfalfa

El filtro no se encuentra saturado. En general, el tamaño de partícula es submicrométrico, mayoritariamente por debajo de los 300 nm aunque también se encuentran algunas partículas de tamaño mayor. La mayor parte de las partículas analizadas son aglomerados de combustión. Los elementos principales que se detectan en su composición son: C y O. El H no se puede detectar.

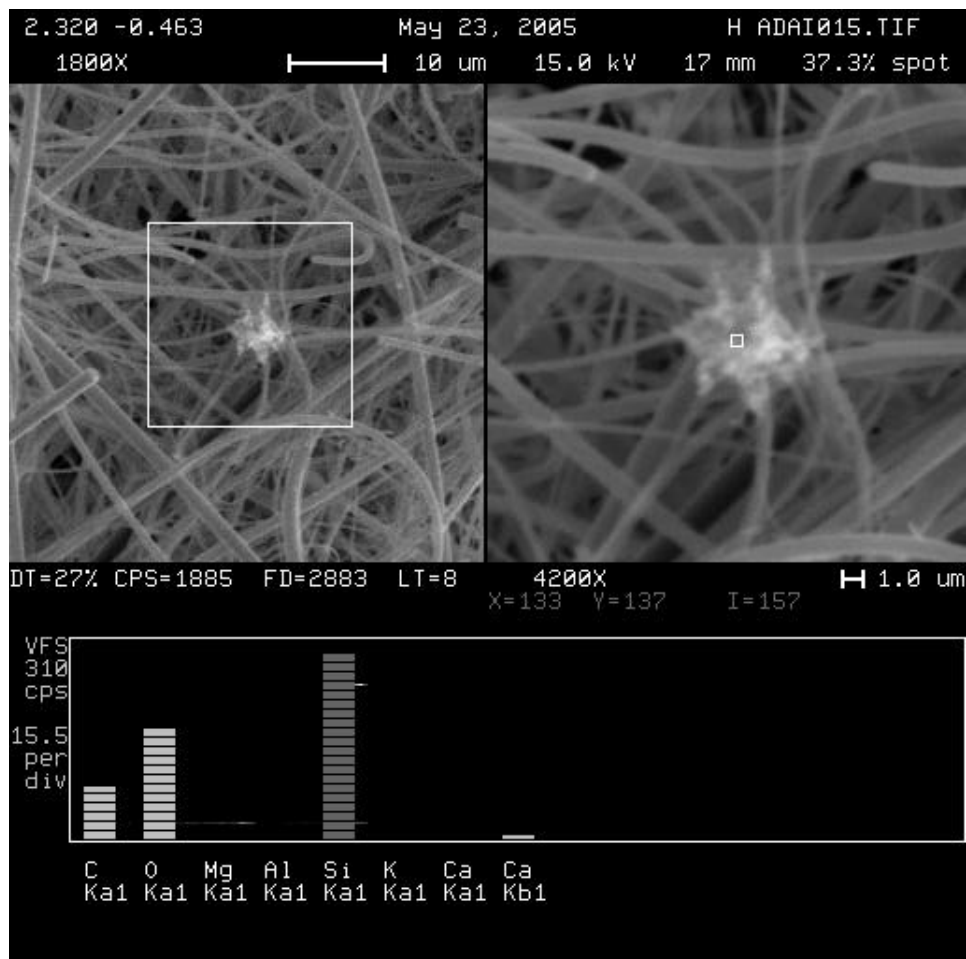


Figura 1. Imagen de una partícula de combustión, del filtro final del impactador durante la experiencia #2, compuesta básicamente de C (y probablemente H). El Si y parte del O se debe a las fibras del filtro.

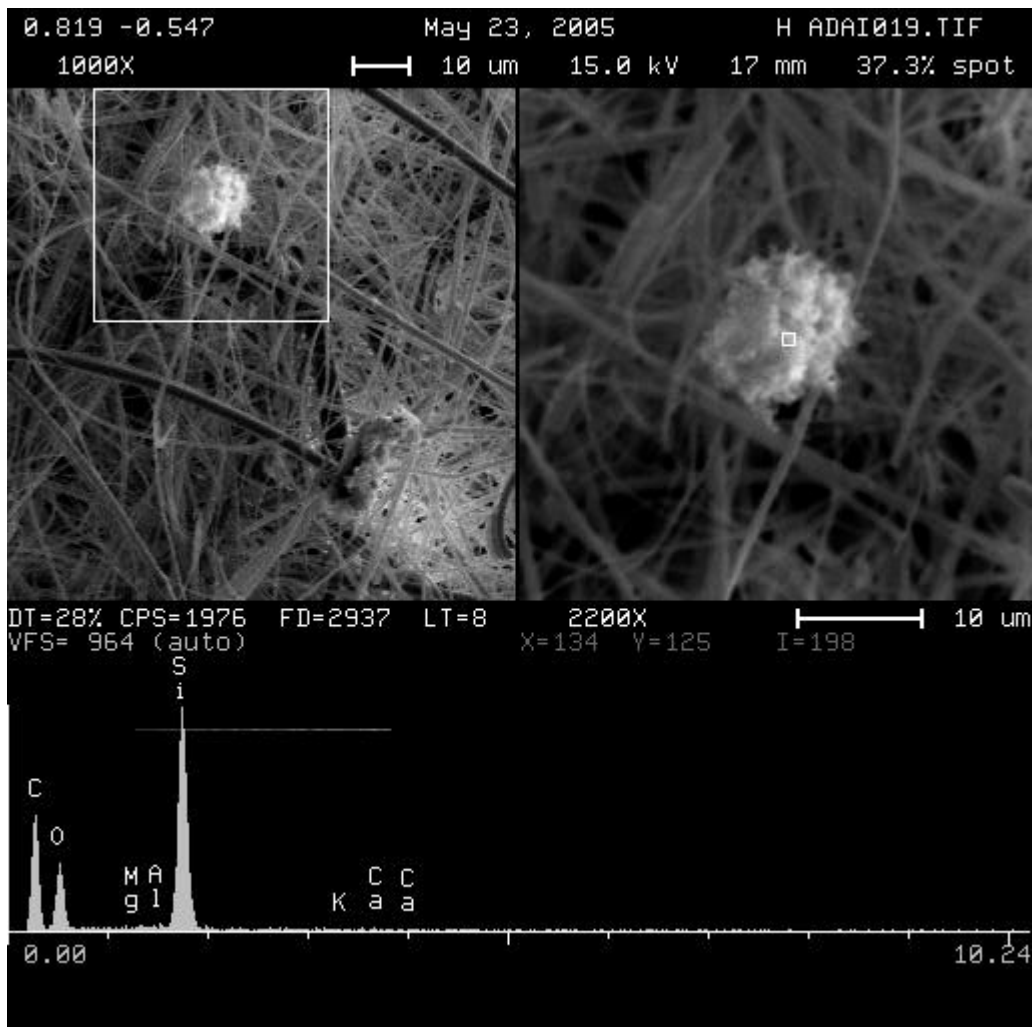


Figura 2.a. Imagen de una partícula combustión encontrada en el filtro final del impactador de la experiencia #2. Aunque aparezcan marcados los elementos Mg, Al, K y Ca no forman parte de la composición química de la partícula. El Si y el O son parte de la composición de las fibras del filtro.

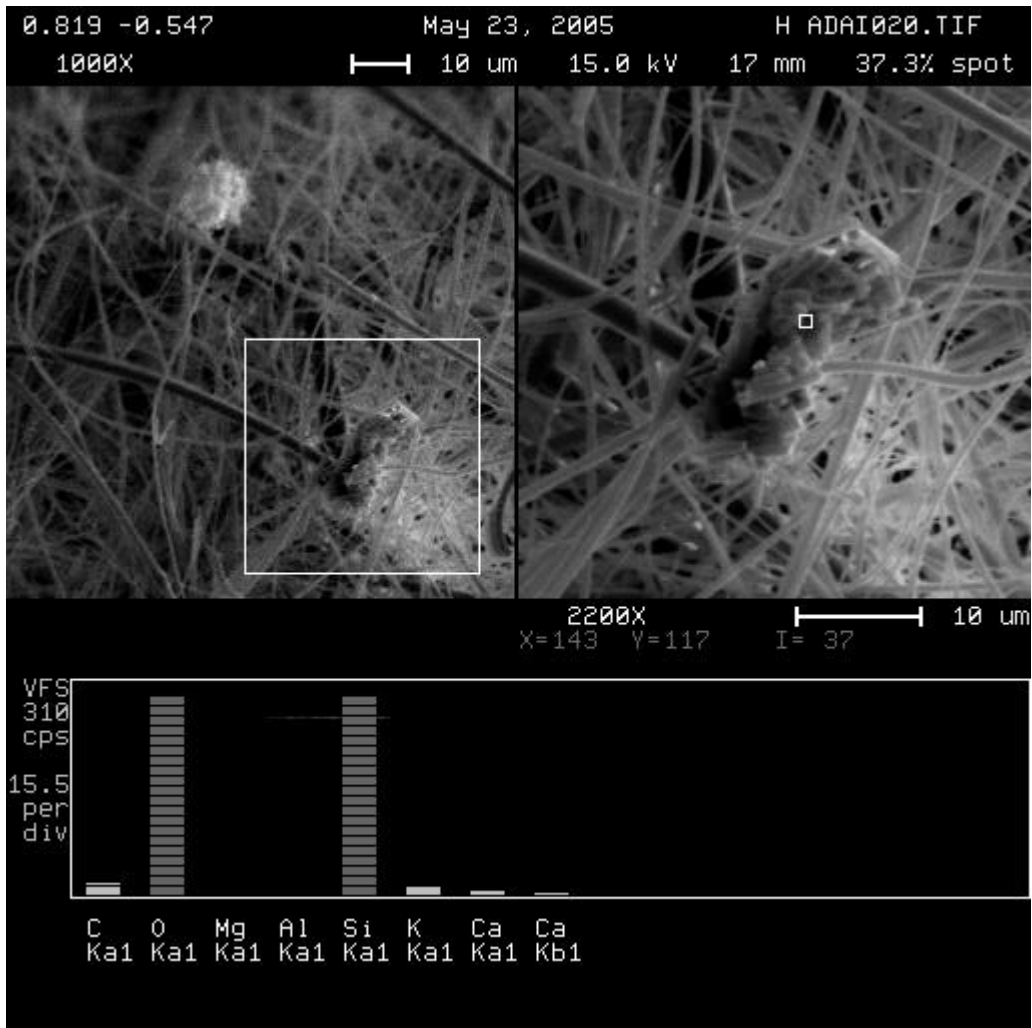
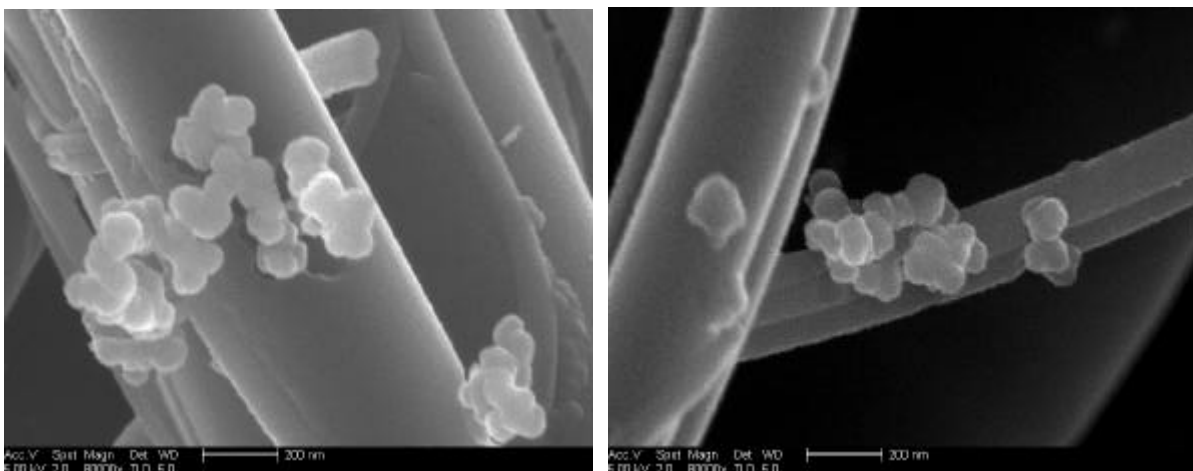
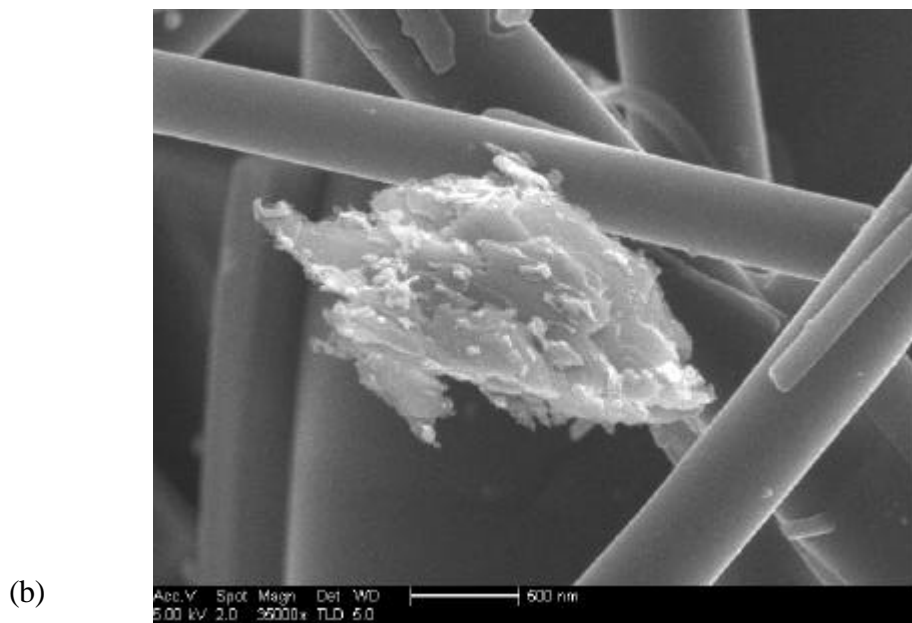
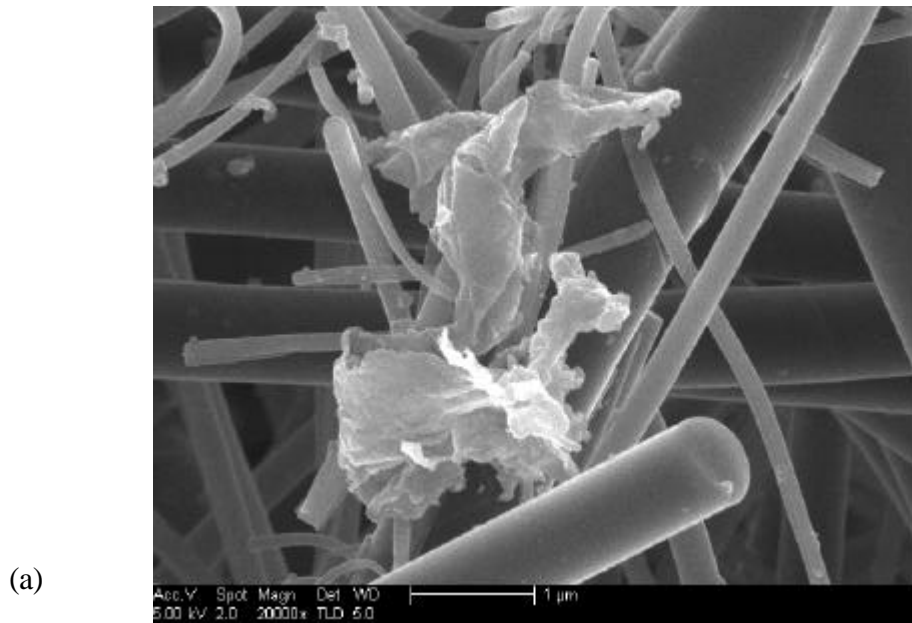


Figura 2.b. Imagen de una partícula alfalfa encontrada en el filtro final del experimento #2. Está compuesta principalmente por O, K, Ca y trazas de P y S.



Figuras 3. a y b. Ejemplos de partículas de combustión (“soot”) encontradas en el filtro de la experiencia #2



Figuras 4. a y b. Ejemplos de partículas de alfalfa encontradas en el filtro final de la experiencia #2.

Experiencia #14: Descarga de clínker y carga en camiones

Se aprecia mayor deposición en este filtro que en el analizado para el caso anterior probablemente debido a que el tamaño de partícula encontrado en la superficie del filtro para este experimento es grueso. Parece ser que las partículas de mayor tamaño pueden corresponder a Clinker (véase figuras) y las submicrométricas a combustión.

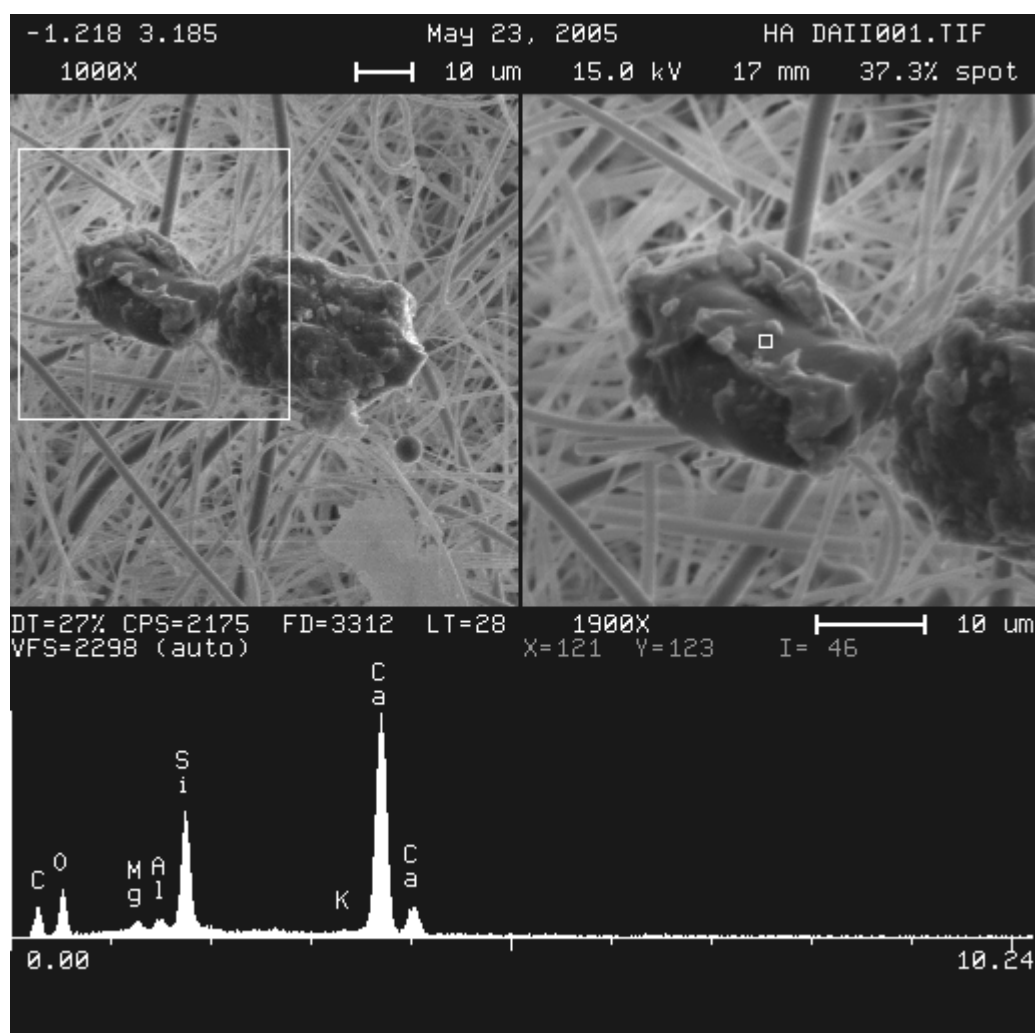


Figura 5. Partícula de Clinker de compuesta principalmente por O, Ca, y Si. Se aprecian trazas de Mg, Al y K.

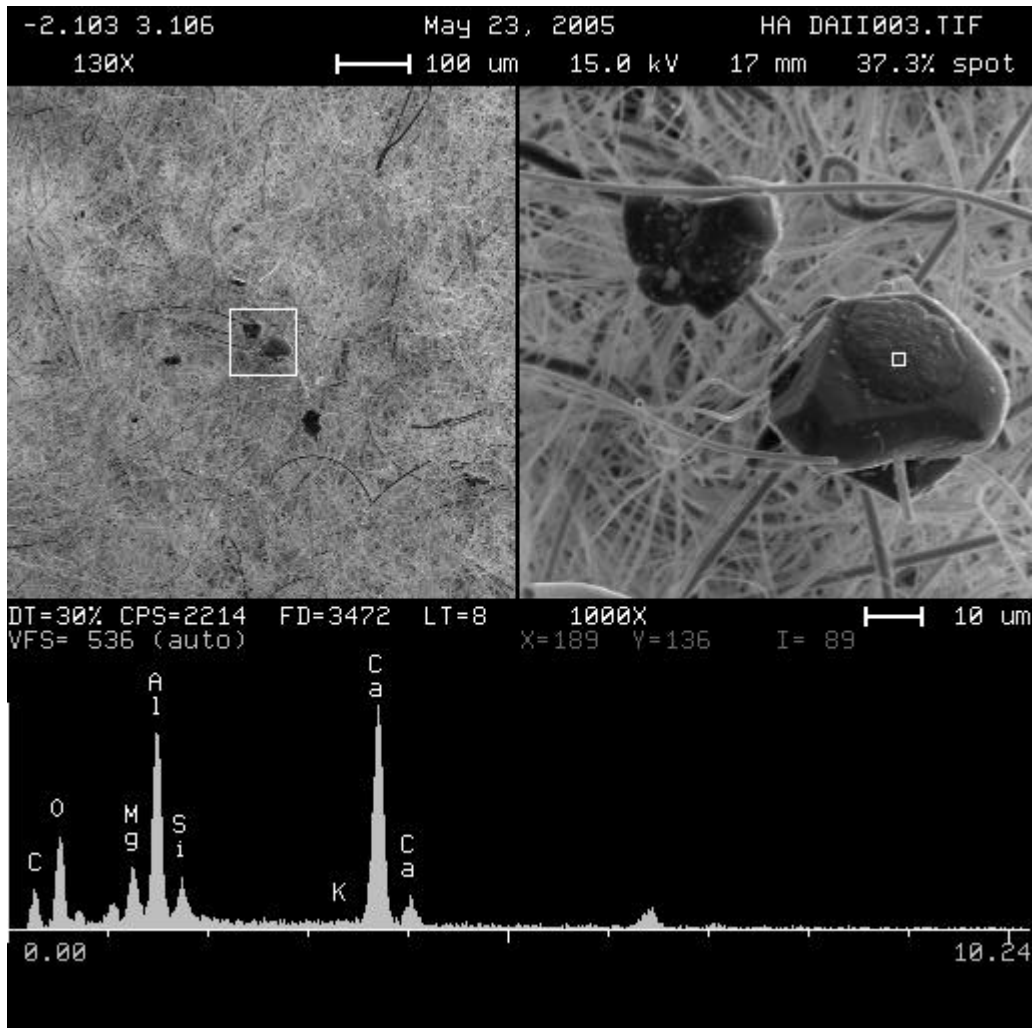


Figura 6. Otro ejemplo de partícula de Clinker compuesta por O, Ca, Mg, Al, Fe y K.

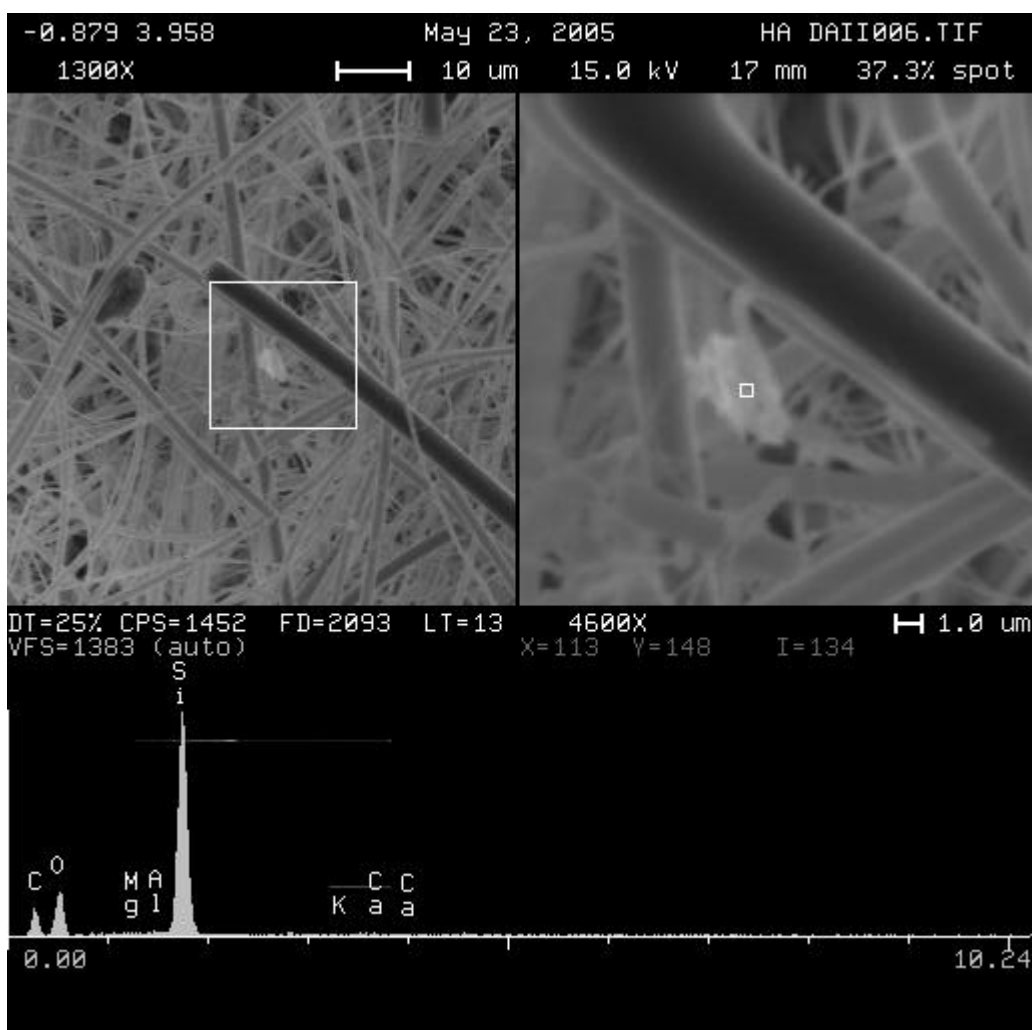


Figura 7. Partícula de combustión (“soot”) encontrada en el filtro final del experimento #14 compuesta por C (y posiblemente H).

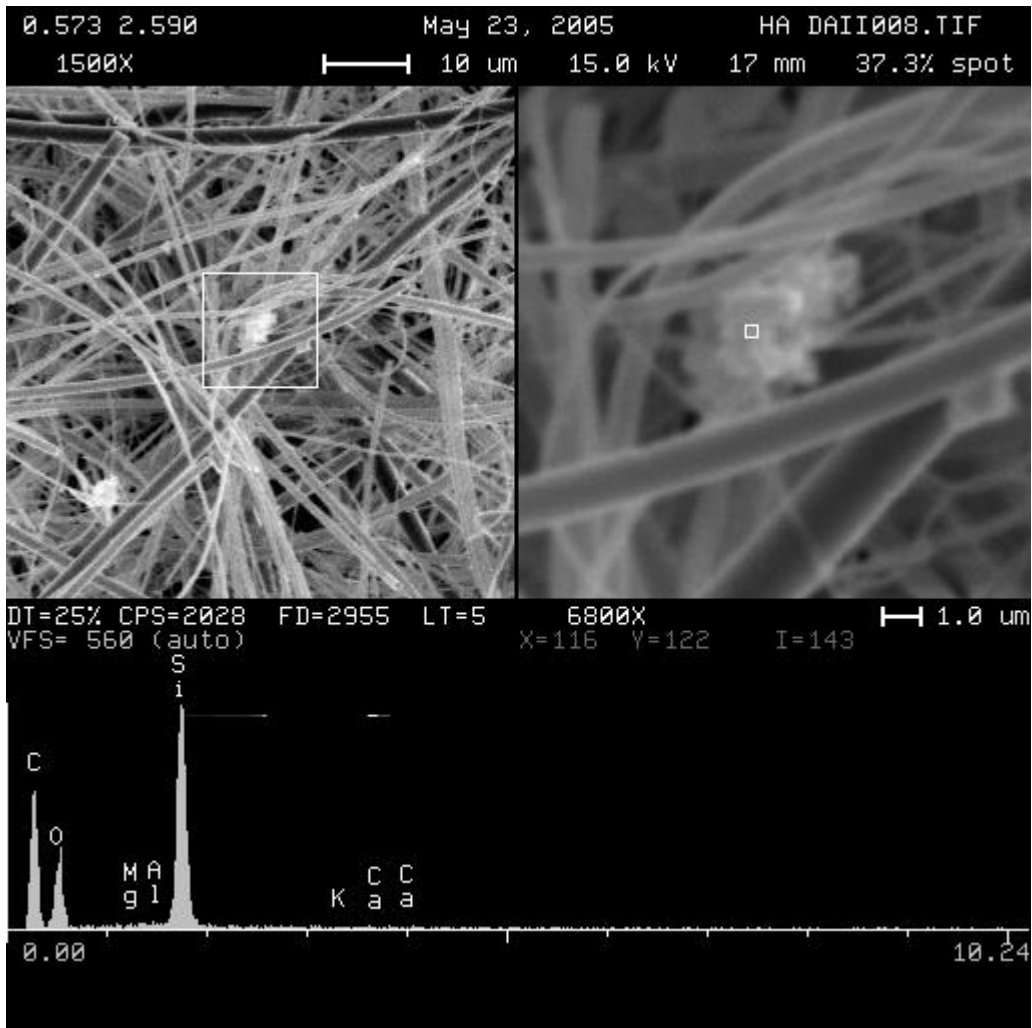
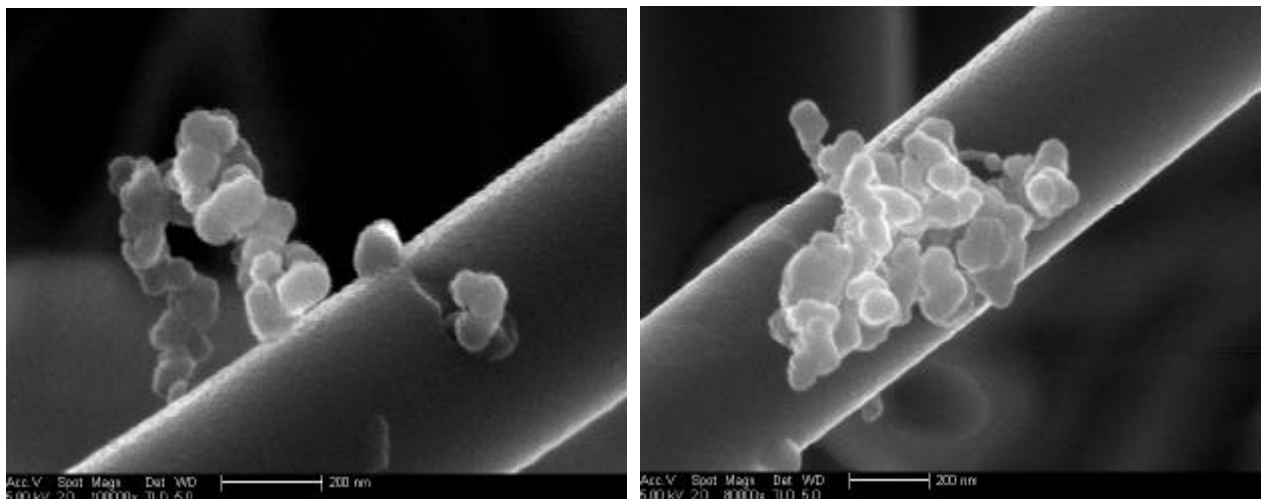
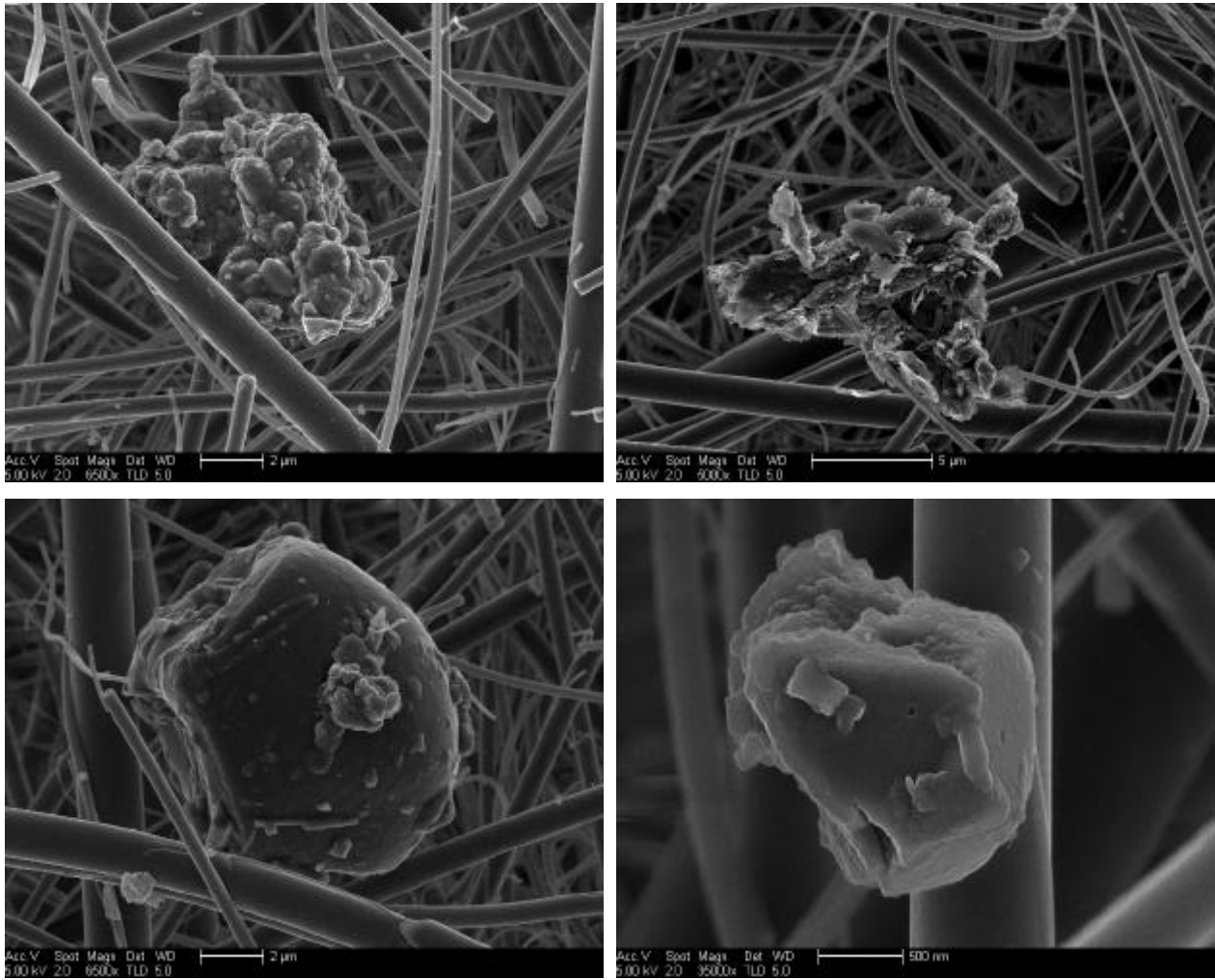


Figura 7. Partícula de combustión encontrada en el filtro final del experimento #14 compuesta principalmente por C (y posiblemente H).



Figuras 8. a (izda.) y b(dcha.). Ejemplos de partículas de combustión (“soot”) encontradas en el filtro final del experimento #14



Figuras 9. . Ejemplos de partículas de clínker encontradas en el filtro de la etapa final del experimento #14

