ESTUDIO DE LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA EN BILBAO

SOLICITUD DEL PRESENTE ESTUDIO

En abril de 2026, la ASOCIACIÓN DE VECINOS EL CANAL / KANALA AUZO ELKARTEA solicita la elaboración de un estudio exploratorio sobre los niveles y composición de aerosoles depositados en varias zonas de Bilbao. Proponen cuatro ubicaciones de interés situadas a varias distancias y en varias orientaciones de posibles focos de contaminación atmosférica.

Autor del informe: Jorge Pey Betrán

Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACION ATMOSFÉRICA

El crecimiento económico sin precedentes de los últimos decenios, asociado al desarrollo de las nuevas tecnologías, ha contribuido a mejorar el nivel de vida, pero a su vez ha provocado un grave impacto sobre el medio ambiente. Este hecho ha despertado una preocupación global por la protección y restauración del medio ambiente (resultando en acuerdos globales como p.ej. el Protocolo de Kioto de 1997). Muchos de los problemas medioambientales tienen su origen en el aumento de la demanda de energía y la transformación de los recursos naturales, que conllevan un incremento en las emisiones y residuos. Un ejemplo son los sistemas de producción de energía a partir de combustibles fósiles que presentan numerosos problemas de contaminación en forma de emisión de gases nocivos y aerosoles a la atmósfera.

La nueva Directiva Europea de Calidad del Aire 2024/2881/EC reduce de manera significativa los valores límite para todos los contaminantes atmosféricos regulados en la Directiva anterior (2008/50/EC), y promueve la medida y control de nuevas métricas, como las partículas ultrafinas (menores de 0,1 micras), el hollín, el amoníaco, y la deposición atmosférica. Este último parámetro es fundamental para comprender qué es lo que están recibiendo los suelos, las masas de agua, o los diferentes ecosistemas, desde la atmósfera, a la vez que es un parámetro de control integral de aquello que ha estado en suspensión en la atmósfera. Las fracciones PM_{10} o $PM_{2.5}$ son fundamentales para monitorizar aquello que respiramos, y los estudios encaminados a desentrañar la composición química de estas fracciones son esenciales para poder comprender mejor los impactos, además del origen de las partículas atmosféricas. Sin embargo, no todo lo que se emite a la atmósfera es de tamaño inferior a 10 o 2.5 micras, sino que hay procesos industriales y otras fuentes de contaminación que emiten partículas de mucho mayor tamaño que acaban dispersadas en el entorno más inmediato de los focos emisores, antes de depositarse sobre las superficies. Por ello, el estudio de la deposición atmosférica garantiza la captura de todas las partículas que se depositan desde la atmósfera, independientemente de su tamaño. Es de prever que en zonas con emisiones intensas de partículas “gruesas” y/o con alta densidad, la deposición atmosférica se vea incrementada con respecto a zonas regionalmente próximas, pero más alejadas de los focos.

FUENTES DE CONTAMINACION ATMOSFÉRICA EN EL AREA METROPOLITANA DE BILBAO

El área metropolitana de Bilbao, integrada en la aglomeración atmosférica del Bajo Nervión, presenta una combinación de fuentes urbanas, industriales y portuarias de contaminación atmosférica. En los núcleos urbanos, el tráfico rodado constituye actualmente una de las fuentes principales, especialmente de óxidos de nitrógeno, como NO y NO_2, y de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. A las emisiones generadas por la combustión en los motores se suman las partículas procedentes del desgaste de frenos y neumáticos y de la resuspensión del polvo depositado en las calzadas. La congestión viaria, la elevada densidad urbana y la presencia de calles con ventilación limitada pueden favorecer localmente la acumulación de estos contaminantes, sobre todo durante situaciones meteorológicas estables.

A escala metropolitana siguen siendo relevantes las emisiones procedentes de las actividades industriales y energéticas localizadas a lo largo de la ría del Nervión y en municipios como Barakaldo, Sestao, Erandio, Santurtzi, Zierbena y Muskiz. Entre ellas se incluyen instalaciones metalúrgicas, plantas de combustión, refino y

almacenamiento de productos petrolíferos, así como otras actividades industriales capaces de emitir partículas, NO_x, SO_2, compuestos orgánicos volátiles y determinados metales. También deben considerarse las actividades del Puerto de Bilbao, asociadas al tráfico marítimo, la maquinaria portuaria, el transporte pesado y la manipulación de materiales a granel. Por último, las calefacciones residenciales y comerciales, las obras y demoliciones y, ocasionalmente, los aportes naturales o regionales, como el aerosol marino y el transporte de polvo sahariano, contribuyen a los niveles de fondo. Aunque la reconversión industrial y las mejoras tecnológicas han reducido sustancialmente las emisiones respecto a décadas anteriores, la diversidad y proximidad de estas fuentes justifican el seguimiento continuo de la calidad del aire en toda la aglomeración.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en Bilbao (Vizcaya), y comprende cuatro ubicaciones (Figura 1) seleccionadas por la parte contratante, que abarcan un gradiente desde uno de los focos emisores de contaminantes atmosféricos que causan preocupación entre los habitantes, hasta una zona céntrica en la ciudad de Bilbao.



Figura 1. Ubicación de los cuatro puntos de muestreo. Imagen superior, vista regionalizada de Bilbao y su área metropolitana; imagen inferior, vista con mayor detalle espacial sobre el entorno de Bilbao.

MÉTODOS: CAPTACIÓN DE AEROSOLES Y ANÁLISIS QUÍMICOS

Desde el IPE-CSIC se propuso a la parte contratante la fabricación de colectores de deposición y su ubicación en espacios en los que la deposición atmosférica total (seca+húmeda) se registrase completamente. Los captadores pasivos fueron del tipo embudo-contenedor (Figura 2), y acumularon los aerosoles depositados en periodos de dos semanas. Los embudos tuvieron un diámetro de 20 cm, lo que equivale a una superficie de captación de 314 cm^2, es decir, 0.0314 m^2.

Las vecinas y vecinos involucrados en el estudio se ocuparon de realizar el muestreo siguiendo las indicaciones trasladadas a la parte contratante. En total se obtuvieron 4 muestras válidas en cada una de las 4 ubicaciones seleccionadas. El muestreo comenzó el 30 de abril y terminó el 25 de junio de 2026, sumando en total 56 días de exposición divididos en cuatro periodos: 30 abril-14 mayo; 14 al 28 mayo; 28 mayo-11 junio; 11 al 25 de junio.



Figura 2. Fotografías de los captadores instalados en las cuatro ubicaciones seleccionadas.

Una vez completados los cuatro muestreos previstos, las muestras se trasladaron a los laboratorios del IPE-CSIC donde se procesaron siguiendo los protocolos establecidos, de los cuales se obtuvieron distintas submuestras que se derivaron a diferentes técnicas. En particular, las alícuotas se destinaron a determinar la fracción soluble del aerosol y la técnica utilizada fue la Cromatografía iónica, de la que se obtuvieron las concentraciones de los principales aniones y cationes. Las muestras sólidas (filtros) se destinaron a analizar el contenido en elementos insolubles, incluyendo metales

pesados. Para ello, ½ de cada filtro obtenido fue digerido en medio ácido (HNO_3:HF:$HClO_4$), y el resultado del proceso fue derivado a dos Espectrómetros, uno de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) para elementos mayoritarios; otro de Masas de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS). En total, las tres técnicas utilizadas han permitido determinar las concentraciones de hasta 12 componentes solubles y 57 insolubles.

Para cuantificar la carga depositada en cada uno de los emplazamientos se han tenido en cuenta varias informaciones, incluyendo 1) la superficie de exposición (diámetro de los embudos); 2) el volumen de agua acumulado en cada muestra, considerando también la cantidad de agua destilada usada en cada muestreo; 3) el tiempo de exposición de cada uno de los muestreos; y 4) el tiempo total de exposición de cada muestra. Los resultados que aparecen en este informe se expresan en unidades de masa (g/mg/μg/ng) por unidad de superficie (m^2), tanto en cada periodo de exposición (masa/m^2) como en flujo medio diario (masa/m^2 día).

RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE MONITORIZACIÓN

A continuación, se muestran en las Tablas 1 (especies solubles) y Tabla 2 (especies insolubles) los valores de concentración de cada una de las especies químicas analizadas. Los valores de concentración se presentan de dos maneras complementarias: 1) concentración acumulada durante los 4 periodos de muestreo (56 días en total); 2) flujo medio diario de cada una de las especies, que permite comparar con los flujos medios diarios de otras zonas urbanas de España.

En general, predominan las especies solubles frente a las insolubles. De hecho, la fase soluble analizada supone entre el 72 y el 91% del total de la deposición atmosférica obtenida. La menor proporción de material soluble aparece en San Inazio (71%, 2185 mg/m^2 acumulados) mientras que el porcentaje más elevado se registró en Bilbao (91%, 3061 mg/m^2). Los valores de aerosoles solubles depositados (Tabla 1) más elevados se obtuvieron en el punto Ribera Deusto, seguidos de Bilbao, y valores más bajos y similares entre sí en San Inazio y Zorrotza.

Dentro de la fracción soluble (Tabla 1), las concentraciones más elevadas corresponden a Ca^{2+}, seguidas de SO_4^{2-}, Cl^- y Na^+, y en mucha menor medida otras especies solubles. Las concentraciones de Ca^{2+} se relacionan con fuentes minerales tanto naturales como antrópicas, cuyo origen puede ser tan diverso como aportes industriales, obras, resuspensión de polvo de carretera, emisiones agrícolas, etc. Las concentraciones de SO_4^{2-} pueden tener un origen dual, relacionándose en parte como aerosoles marinos, pero también con fuentes industriales. El K^+ suele asociarse con emisiones de quema de biomasa o carbón, aunque no puede descartarse otro origen en este caso. Del mismo modo, las concentraciones de NO_3^- se relacionan con procesos de combustión, aunque también pueden explicarse por aportes de otras fuentes incluyendo emisiones agrícolas. Ca^{2+}, SO_4^{2-}, NO_3^- y K^+ presentan los valores más elevados en Ribera Deusto, mientras que las concentraciones más bajas se observaron en San Inazio y Zorrotza, con valores intermedios en Bilbao. Las concentraciones de Cl^-, Mg^{2+} y Na^+ se asocian con aerosoles marinos en general. Ribera Deusto fue el punto con mayores concentraciones, mientras que los valores en los otros tres emplazamientos fueron muy similares.

Tabla 1. Valores de concentración de especies solubles depositadas (mg/m^2) entre el 30 de abril y el 25 de junio de 2026. Izquierda: acumulado en el periodo; derecha: flujo medio diario.

		Acumulado 30 abril a 25 junio 2026					Flujo medio diario 30 abril a 25 junio 2026			
		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao
Na^+	*mg/m²*	314,73	772,39	297,39	245,53	*mg/m²*	5,62	13,79	5,31	4,38
K^+	*mg/m²*	99,55	403,52	87,00	183,68	*mg/m²*	1,78	7,21	1,55	3,28
Ca^{2+}	*mg/m²*	756,65	1794,83	842,12	1003,10	*mg/m²*	13,51	32,05	15,04	17,91
Mg^{2+}	*mg/m²*	64,70	182,74	63,61	78,72	*mg/m²*	1,16	3,26	1,14	1,41
Cl^-	*mg/m²*	452,73	1201,83	460,25	417,11	*mg/m²*	8,08	21,46	8,22	7,45
SO_4^{2-}	*mg/m²*	319,09	1160,42	274,89	907,34	*mg/m²*	5,70	20,72	4,91	16,20
NO_3^-	*mg/m²*	93,74	335,16	110,35	206,71	*mg/m²*	1,67	5,98	1,97	3,69
NO_2^-	*mg/m²*	3,24	7,24	1,91	4,67	*mg/m²*	0,058	0,13	0,034	0,083
NH_4^+	*mg/m²*	18,16	13,73	38,78	9,14	*mg/m²*	0,32	0,25	0,69	0,16
PO_4^{3-}	*mg/m²*	< LD	< LD	5,24	< LD	*mg/m²*	< LD	< LD	0,09	< LD
F^-	*mg/m²*	4,38	10,93	3,35	4,72	*mg/m²*	0,078	0,20	0,060	0,084
Br^-	*mg/m²*	< LD	< LD	< LD	< LD	*mg/m²*	< LD	< LD	< LD	< LD
Total	*mg/m²*	2127	5883	2185	3061	*mg/m²*	37,98	105,05	39,02	54,66

Con respecto a las especies mayoritarias en fase insoluble (Tabla 2a), las más abundantes fueron Fe, Ca y Al, obteniéndose mayores concentraciones en Ribera Deusto, seguidas de San Inazio, Zorrotza y Bilbao. La fuerte presencia de Fe con respecto a Ca y Al, que son mucho más abundantes en la corteza terrestre y por consiguiente en la materia mineral, sugiere la presencia de fuentes antrópicas que emiten Fe a la atmósfera, posiblemente fuentes industriales. El patrón que siguen el resto de elementos mayoritarios insolubles es similar al descrito para estos tres. En general, el flujo medio diario de aerosoles insolubles osciló entre los 5,5 mg/m^2 en Bilbao y los 27,7 mg/m^2 en Ribera Deusto. Una parte significativa de estas contribuciones insolubles son de naturaleza orgánica (no determinadas en este trabajo), puesto que la suma de elementos inorgánicos permite reconstruir aproximadamente el 30% de la masa depositada.

De entre los elementos traza en fase insoluble (Tabla 2b), las mayores concentraciones se obtuvieron para Zn, Ba, Cr, Mo, Pb y Cu, especialmente en Ribera Deusto, seguidas de San Inazio, Zorrotza y Bilbao.

Tabla 2a. Valores de concentración de elementos mayoritarios depositados en fracción insoluble entre el 30 de abril y el 25 de junio de 2026. Izquierda: acumulado en el periodo (mg/m^2); derecha: flujo medio diario (µg/m^2 para elementos, mg/m^2 para la suma de todos ellos).

	Acumulado 30 abril a 25 junio 2026					Flujo medio diario 30 abril a 25 junio 2026				
		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao
Al	*mg/m²*	18,51	48,03	33,96	7,07	*µg/m²*	330,51	857,62	606,51	126,22
Ca	*mg/m²*	18,64	57,83	19,09	6,02	*µg/m²*	332,78	1032,59	340,83	107,44
Fe	*mg/m²*	30,39	61,13	62,79	11,05	*µg/m²*	542,70	1091,54	1121,29	197,39
K	*mg/m²*	5,21	12,07	7,96	2,74	*µg/m²*	93,10	215,48	142,23	48,99
Mg	*mg/m²*	5,53	12,44	9,45	2,44	*µg/m²*	98,75	222,07	168,81	43,65
Mn	*mg/m²*	1,37	2,75	2,85	0,47	*µg/m²*	24,43	49,06	50,88	8,40
Na	*mg/m²*	1,69	11,00	4,04	7,92	*µg/m²*	30,23	196,37	72,23	141,40
P	*mg/m²*	2,89	5,73	3,09	1,18	*µg/m²*	51,61	102,33	55,20	21,01
S	*mg/m²*	5,31	7,28	5,06	3,35	*µg/m²*	94,89	129,93	90,40	59,85
Ti	*mg/m²*	1,80	3,57	2,79	1,02	*µg/m²*	32,20	63,71	49,74	18,29
Total	*mg/m²*	588,3	1548,7	868,1	306,7	*mg/m²*	10,51	27,65	15,50	5,48

Tabla 2b. Valores de concentración de elementos minoritarios y traza depositados en fracción insoluble entre el 30 de abril y el 25 de junio de 2026. Izquierda: acumulado en el periodo (µg/m^2); derecha: flujo medio diario (ng/m^2).

	Acumulado 30 abril a 25 junio 2026					Flujo medio diario 30 abril a 25 junio 2026				
		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao
Li	µg/m^2	14,98	39,85	28,89	8,09	ng/m^2	267,49	711,62	515,91	144,55
Be	µg/m^2	0,67	1,96	1,46	0,28	ng/m^2	12,04	34,93	26,08	5,03
Sc	µg/m^2	4,42	9,46	7,93	3,83	ng/m^2	79,00	169,02	141,55	68,37
V	µg/m^2	52,82	111,22	94,99	22,87	ng/m^2	943,15	1985,99	1696,21	408,45
Cr	µg/m^2	405,31	890,52	863,00	120,18	ng/m^2	7237,65	15902,09	15410,79	2146,01
Co	µg/m^2	11,01	43,03	21,13	7,88	ng/m^2	196,55	768,46	377,39	140,77
Ni	µg/m^2	82,29	134,33	148,77	29,61	ng/m^2	1469,41	2398,77	2656,59	528,84
Cu	µg/m^2	280,08	321,83	343,33	63,57	ng/m^2	5001,38	5746,96	6130,94	1135,13
Zn	µg/m^2	1457,03	4584,82	3094,69	936,15	ng/m^2	26018,43	81871,82	55262,38	16717,02
Ga	µg/m^2	6,16	15,05	11,07	2,80	ng/m^2	110,07	268,78	197,68	49,92
Ge	µg/m^2	2,87	4,74	5,03	1,66	ng/m^2	51,17	84,57	89,83	29,70
As	µg/m^2	6,66	12,11	11,31	2,82	ng/m^2	118,97	216,17	202,03	50,29
Se	µg/m^2	1,49	3,70	2,77	0,97	ng/m^2	26,53	66,11	49,51	17,28
Rb	µg/m^2	22,70	61,14	38,48	13,50	ng/m^2	405,31	1091,87	687,15	241,11
Sr	µg/m^2	79,82	206,79	117,85	42,94	ng/m^2	1425,37	3692,61	2104,39	766,83
Y	µg/m^2	7,84	21,87	13,93	3,52	ng/m^2	140,02	390,60	248,68	62,93
Zr	µg/m^2	107,91	169,75	249,23	227,66	ng/m^2	1926,88	3031,21	4450,48	4065,29
Nb	µg/m^2	10,08	51,99	23,97	4,31	ng/m^2	180,05	928,39	428,00	76,96
Mo	µg/m^2	380,73	363,05	408,36	575,27	ng/m^2	6798,75	6483,02	7292,14	10272,71
Cd	µg/m^2	2,79	5,01	5,55	0,79	ng/m^2	49,76	89,46	99,03	14,06
Sn	µg/m^2	45,05	72,98	65,12	24,26	ng/m^2	804,44	1303,27	1162,90	433,16
Sb	µg/m^2	18,82	28,41	35,88	10,57	ng/m^2	336,06	507,29	640,65	188,74
Cs	µg/m^2	1,48	4,49	2,55	1,75	ng/m^2	26,51	80,10	45,61	31,19
Ba	µg/m^2	4667,84	1202,07	880,44	182,46	ng/m^2	83354,35	21465,59	15722,16	3258,22
La	µg/m^2	20,70	46,46	41,90	7,85	ng/m^2	369,65	829,67	748,27	140,14
Ce	µg/m^2	23,71	54,78	42,44	9,85	ng/m^2	423,32	978,16	757,89	175,94
Pr	µg/m^2	2,64	6,17	4,58	1,15	ng/m^2	47,22	110,19	81,71	20,55
Nd	µg/m^2	10,16	23,38	17,85	4,39	ng/m^2	181,39	417,55	318,76	78,37
Sm	µg/m^2	1,99	4,58	3,11	0,95	ng/m^2	35,61	81,86	55,60	16,89
Eu	µg/m^2	0,58	0,96	0,69	0,19	ng/m^2	10,32	17,18	12,33	3,42
Gd	µg/m^2	1,91	4,35	3,09	0,90	ng/m^2	34,04	77,64	55,15	16,05
Tb	µg/m^2	0,26	0,60	0,43	0,13	ng/m^2	4,72	10,64	7,66	2,30
Dy	µg/m^2	1,42	3,28	2,35	0,68	ng/m^2	25,30	58,63	41,91	12,11
Ho	µg/m^2	0,29	0,66	0,44	0,13	ng/m^2	5,10	11,71	7,92	2,24
Er	µg/m^2	0,80	1,90	1,22	0,38	ng/m^2	14,35	34,02	21,75	6,85
Tm	µg/m^2	0,13	0,28	0,18	0,06	ng/m^2	2,28	4,97	3,20	1,03
Yb	µg/m^2	1,12	2,10	1,47	0,68	ng/m^2	20,02	37,48	26,33	12,07
Lu	µg/m^2	0,12	0,27	0,17	0,05	ng/m^2	2,20	4,79	3,11	0,93
Hf	µg/m^2	1,28	5,93	4,37	3,46	ng/m^2	22,84	105,82	77,97	61,75
Ta	µg/m^2	0,46	0,84	0,80	0,14	ng/m^2	8,14	14,94	14,36	2,46
W	µg/m^2	19,75	32,42	31,40	48,46	ng/m^2	352,75	578,89	560,75	865,30
Tl	µg/m^2	0,05	0,32	0,17	< LD	ng/m^2	0,84	5,66	3,05	0,00
Pb	µg/m^2	271,97	403,32	498,50	77,30	ng/m^2	4856,61	7202,10	8901,82	1380,35
Bi	µg/m^2	3,90	6,41	6,70	1,74	ng/m^2	69,71	114,50	119,61	31,14
Th	µg/m^2	2,58	6,46	4,20	1,23	ng/m^2	46,12	115,40	75,07	21,95
U	µg/m^2	2,53	6,29	2,92	4,08	ng/m^2	45,09	112,34	52,22	72,78

A continuación, se muestran algunas figuras que reflejan la variabilidad temporal de algunos de los elementos analizados (Figura 3). Como puede observarse en la figura, la variabilidad de las concentraciones no refleja un patrón espacial ni temporal claro. Algunos elementos maximizan durante el primer periodo de muestreo en algunas zonas

(Fe y Cd en Zorrotza; Fe, Ca y Pb en Bilbao), mientras que las mayores concentraciones se obtuvieron en el cuarto periodo de estudio en otras zonas (Fe, Ca, Zr, Cd y Pb en Ribera Deusto y San Inazio); y solamente Zr y Cd fueron más abundantes en Bilbao en el periodo 3. Por tanto, la variabilidad observada sugiere la presencia de fuentes de contaminación de origen muy local que afectan especialmente a los observatorios que registran mayores concentraciones (Ribera Deusto y San Inazio>Zorrotza>Bilbao).

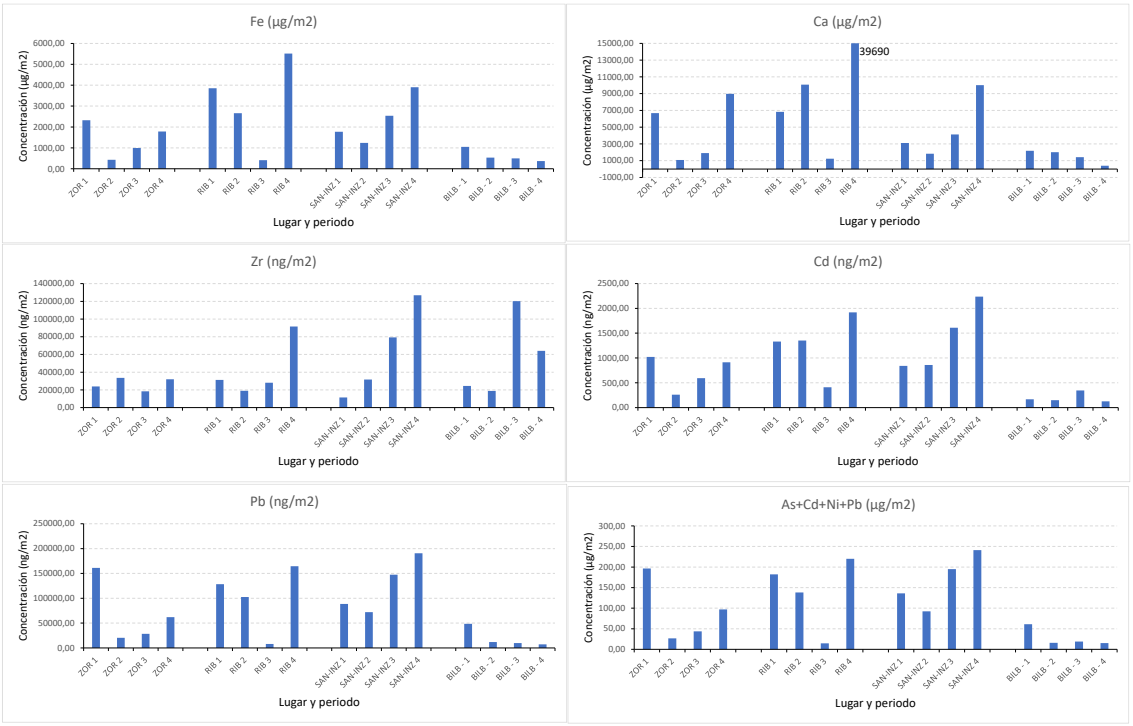


Figura 3. Variabilidad temporal de las concentraciones de algunos elementos en las cuatro ubicaciones de estudio. Unidades en µg/m^2 y ng/m^2.

COMPARACIÓN CON OTRAS ZONAS URBANAS DE ESPAÑA

Las Tablas 3 y 4 muestran los valores promedio de flujo diario en cada emplazamiento con respecto al rango de flujos observado en zonas urbanas de España representado por el valor mínimo y el valor máximo de flujo.

Como puede observarse en dichas Tablas, hay una serie de elementos y compuestos mayoritarios (Tabla 3) con valores de flujo más elevados en algunos de los puntos de observación que en otras zonas urbanas de España. Algunos de estos componentes del aerosol tienen un origen natural en gran medida (Na^+, Cl^-, Mg^{2+}, y parcialmente el SO_4^{2}). Sin embargo, muchos otros compontes se relacionan con procesos antrópicos, como K^+, Ca^{2+}, S y SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, Fe, Mn o Na. De entre todos estos elementos y compuestos, Ca^{2+}, S y SO_4^{2-}, Na y Mn son los que están en valores > x2 veces los observados en el rango máximo urbano, indicando fuentes de emisión próximas, posiblemente procesos industriales, emisiones pulverulentas diversas, y combustión/procesado de fuel-oil.

Tabla 3. Flujos medios diarios de elementos mayoritarios depositados en fracción soluble (mg/m^2) e insoluble ($\mu g/m^2$) en las 4 ubicaciones, y rango urbano en zonas de España entre la mínima y la máxima concentración diaria. Se señalan en negrita aquellos elementos que superan el rango máximo en zonas urbanas de España.

		Flujo medio diario 2026				Flujo medio 2016-2025	
		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao	Urb. Min	Urb. Max
Na^+	mg/m^2	**5,62**	**13,79**	**5,31**	**4,38**	0,68	3,31
K^+	mg/m^2	**1,78**	**7,21**	**1,55**	**3,28**	0,47	1,30
Ca^{2+}	mg/m^2	**13,51**	**32,05**	**15,04**	**17,91**	2,91	12,17
Mg^{2+}	mg/m^2	1,16	**3,26**	1,14	1,41	0,65	2,05
Cl^-	mg/m^2	**8,08**	**21,46**	**8,22**	**7,45**	1,25	5,12
SO_4^{2-}	mg/m^2	**5,70**	**20,72**	**4,91**	**16,20**	1,63	3,49
NO_3^-	mg/m^2	1,67	**5,98**	1,97	3,69	1,82	3,66
NO_2^-	mg/m^2	0,058	0,13	0,034	0,083	0,08	4,52
NH_4^+	mg/m^2	0,32	0,25	**0,69**	0,16	0,49	0,62
PO_4^{3-}	mg/m^2	< LD	< LD	0,09	< LD	0,13	0,67
F^-	mg/m^2	**0,078**	**0,20**	**0,060**	**0,084**	< LD	0,025
Br^-	mg/m^2	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,005
Al	$\mu g/m^2$	331	858	607	1[2]6	516	140[2]
Ca	$\mu g/m^2$	333	1033	341	107	129	1388
Fe	$\mu g/m^2$	543	**1092**	**1121**	197	369	955
K	$\mu g/m^2$	93	215	142	49	136	410
Mg	$\mu g/m^2$	99	222	169	44	120	412
Mn	$\mu g/m^2$	**24**	**49**	**51**	8	6	18
Na	$\mu g/m^2$	30	**196**	72	**141**	31	95
P	$\mu g/m^2$	52	**102**	55	21	36	61
S	$\mu g/m^2$	**95**	**130**	**90**	**60**	0	26
Ti	$\mu g/m^2$	32	64	50	18	26	84

Con respecto a los elementos traza, destacan una serie de elementos que muestran concentraciones, en uno o varios de los emplazamientos, superiores a las observadas en zonas urbanas de España. Dichos elementos son Cr, Co, Cu, Zn, Sr, Ge, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Hf, Pb, Bi, U. Estos elementos minoritarios y traza son marcadores de fuentes de contaminación antrópica, y señalan principalmente a: 1) procesos industriales, incluyendo emisiones canalizadas y difusas (Cr, Cu, Zn, Sn, Pb, Bi); 2) combustión de fuel-oil (Cr, Co, Ge, La, Hf), no descartando su uso en procesos industriales o en refinado de petróleo; y 3) tráfico rodado (Cu, Ba, Zn, Zr, Mo, U), indicando tanto emisiones de tubos de escape como fuentes pulverulentas de polvo de carretera. En Zorrotza superan el rango Cu, Zn, Mo, Sn, Sb, Ba y Pb, cuya presencia sugiere el aporte destacado de fuentes industriales, pero también de tráfico rodado. En Ribera Deusto y San Inazio las superaciones del rango máximo urbano se obtienen para Cr, Co, Cu, Zn, Ge, Sr, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Hf, Pb, Bi, U, cuyo origen se relaciona con emisiones industriales, tráfico rodado y procesos de combustión de fuel-oil. La En Bilbao superan el rango Zr, Mo, Hf, U, todos ellos relacionados con el tráfico rodado.

Tabla 4. Flujos medios diarios de elementos traza depositados, incluyendo metales pesados, en fracción insoluble (ng/m^2) en las 4 ubicaciones, y rango urbano en zonas de España entre la mínima y la máxima concentración diaria. Se señalan en negrita aquellos elementos que superan el rango máximo en zonas urbanas de España.

		Flujo medio diario 2026				Flujo medio 2016-2025	
		Zorrotza	R. Deusto	San Inazio	Bilbao	Urb. Min	Urb. Max
Li	ng/m^2	267	712	516	145	668	804
Be	ng/m^2	12	35	26	5	14	44
Sc	ng/m^2	79	169	142	68	188	224
V	ng/m^2	943	1986	1696	408	880	2113
Cr	ng/m^2	7238	**15902**	**15411**	2146	1248	7518
Co	ng/m^2	197	**768**	**377**	141	129	361
Ni	ng/m^2	1469	2399	2657	529	849	3095
Cu	ng/m^2	**5001**	**5747**	**6131**	1135	2550	4815
Zn	ng/m^2	**26018**	**81872**	**55262**	16717	8933	22034
Ga	ng/m^2	110	269	198	50	297	364
Ge	ng/m^2	51	**85**	**90**	30	71	73
As	ng/m^2	119	216	202	50	93	281
Se	ng/m^2	27	66	50	17	75	81
Rb	ng/m^2	405	1092	687	241	1283	1586
Sr	ng/m^2	1425	**3693**	2104	767	1076	3603
Y	ng/m^2	140	391	249	63	329	409
Zr	ng/m^2	1927	**3031**	**4450**	**4065**	2049	2078
Nb	ng/m^2	180	**928**	**428**	77	262	280
Mo	ng/m^2	**6799**	**6483**	**7292**	**10273**	365	479
Cd	ng/m^2	50	89	99	14	42	315
Sn	ng/m^2	**804**	**1303**	**1163**	433	166	587
Sb	ng/m^2	**336**	**507**	**641**	189	166	306
Cs	ng/m^2	27	80	46	31	73	99
Ba	ng/m^2	**83354**	**21466**	**15722**	3258	4407	10235
La	ng/m^2	370	**830**	**748**	140	535	648
Ce	ng/m^2	423	978	758	176	1084	1299
Pr	ng/m^2	47	110	82	21	119	147
Nd	ng/m^2	181	418	319	78	452	561
Sm	ng/m^2	36	82	56	17	87	108
Eu	ng/m^2	10	17	12	3	15	22
Gd	ng/m^2	34	78	55	16	84	105
Tb	ng/m^2	5	11	8	2	9	14
Dy	ng/m^2	25	59	42	12	61	77
Ho	ng/m^2	5	12	8	2	10	15
Er	ng/m^2	14	34	22	7	33	43
Tm	ng/m^2	2	5	3	1	3	6
Yb	ng/m^2	20	37	26	12	31	39
Lu	ng/m^2	2	5	3	1	3	5
Hf	ng/m^2	23	**106**	**78**	**62**	53	56
Ta	ng/m^2	8	15	14	2	15	24
W	ng/m^2	353	579	561	865	0,0	0,0
Tl	ng/m^2	1	6	3	0	2	10
Pb	ng/m^2	**4857**	**7202**	**8902**	1380	1120	2200
Bi	ng/m^2	70	**115**	**120**	31	44	77
Th	ng/m^2	46	115	75	22	70	226
U	ng/m^2	45	**112**	52	**73**	18	66

CONCLUSIONES

La campaña de monitorización de la deposición atmosférica realizada durante 56 días en cuatro emplazamientos del área de Bilbao ha puesto de manifiesto una marcada variabilidad espacial en la cantidad y composición química del material depositado. En términos generales, la deposición estuvo dominada por la fracción soluble, que representó entre el 72 y el 91 % de la masa total, aunque se observaron diferencias importantes entre los puntos de muestreo. Ribera Deusto presentó las mayores concentraciones de especies solubles y los mayores flujos de material insoluble, mientras que Bilbao registró, en general, los valores más bajos para la fracción insoluble. San Inazio y Zorrotza mostraron valores intermedios, si bien San Inazio presentó una contribución relativamente elevada de material insoluble.

La composición de la fracción soluble estuvo dominada por Ca^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^- y Na^+. La presencia de Cl^-, Na^+ y Mg^{2+} refleja la influencia esperable del aerosol marino en el área de estudio. No obstante, los elevados flujos de Ca^{2+}, SO_4^{2-}, NO_3^- y K^+, especialmente en Ribera Deusto, indican que sobre el fondo natural y regional se superponen contribuciones antrópicas. Estas podrían estar asociadas con emisiones industriales, procesos de combustión, manipulación de materiales pulverulentos, obras y resuspensión de polvo viario. El origen de algunas especies, en particular del sulfato, es probablemente mixto, por lo que no puede atribuirse exclusivamente a una única fuente.

En la fracción insoluble predominaron Fe, Ca y Al. La elevada abundancia relativa de Fe, especialmente en Ribera Deusto, resulta difícil de explicar únicamente por el aporte de material mineral de origen natural y sugiere la existencia de contribuciones antrópicas, posiblemente relacionadas con actividades industriales o con la manipulación y resuspensión de materiales ricos en hierro. El flujo medio diario de material insoluble osciló entre 5,5 mg/m²/día en Bilbao y 27,7 mg/m²/día en Ribera Deusto, lo que evidencia una diferencia espacial considerable entre los emplazamientos. Además, los elementos inorgánicos analizados explicaron aproximadamente el 30 % de la masa insoluble depositada, por lo que una parte relevante de esta fracción podría corresponder a materia orgánica u otros componentes no determinados en el estudio.

Los elementos minoritarios y traza más abundantes en la fracción insoluble fueron Zn, Ba, Cr, Mo, Pb y Cu. Las concentraciones más elevadas se registraron principalmente en Ribera Deusto, seguido de San Inazio, Zorrotza y Bilbao. La comparación con los rangos descritos para otras zonas urbanas de España muestra que diversos elementos y compuestos superaron los valores máximos de referencia en uno o varios emplazamientos. Entre los componentes mayoritarios destacan Ca^{2+}, S, SO_4^{2-}, Na y Mn, cuyos flujos llegaron a ser más de dos veces superiores al máximo del rango urbano utilizado en la comparación. Este resultado indica la presencia de aportes locales o próximos que no parecen explicarse exclusivamente por el fondo urbano regional.

Las concentraciones elevadas de Cr, Co, Cu, Zn, Ge, Sr, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Hf, Pb, Bi y U aportan evidencias adicionales de la influencia de fuentes antrópicas. La asociación habitual de estos elementos con determinadas actividades sugiere una combinación de emisiones industriales canalizadas y difusas, procesos de combustión de fuel-oil,

actividades relacionadas con el procesado de productos petrolíferos y emisiones derivadas del tráfico rodado. Dentro de estas últimas se incluirían tanto las emisiones de combustión como las partículas generadas por el desgaste de frenos y neumáticos y por la resuspensión del polvo acumulado en las carreteras. Estas asociaciones deben interpretarse como indicativas y no como una identificación inequívoca de fuentes concretas.

Ribera Deusto aparece como el emplazamiento más afectado por la deposición atmosférica durante el periodo estudiado, al presentar los mayores valores para numerosas especies solubles, elementos mayoritarios insolubles y elementos traza. San Inazio también mostró una influencia significativa de fuentes locales, especialmente en la fracción insoluble y en varios elementos asociados con actividades industriales, combustión y tráfico. En Zorrotza, las superaciones observadas para Cu, Zn, Mo, Sn, Sb, Ba y Pb apuntan igualmente a una combinación de aportes industriales y viarios. En el punto de Bilbao, aunque los flujos fueron generalmente inferiores, las concentraciones elevadas de Zr, Mo, Hf y U respecto al rango urbano de comparación sugieren una mayor influencia relativa del tráfico rodado.

La variabilidad entre los cuatro periodos de muestreo no mostró un patrón temporal común para todos los elementos y emplazamientos. Los máximos se produjeron en periodos diferentes según el elemento y la ubicación, lo que sugiere la influencia de emisiones discontinuas, condiciones meteorológicas variables y fuentes de carácter local. En conjunto, el gradiente espacial observado puede resumirse, de forma general, como Ribera Deusto y San Inazio > Zorrotza > Bilbao, aunque la posición relativa de los emplazamientos varía según la especie química considerada.

Los resultados confirman la utilidad de la deposición atmosférica como complemento de la monitorización convencional de PM_{10} y $PM_{2.5}$, ya que permite recoger partículas gruesas que tienden a depositarse cerca de los focos emisores y que pueden no quedar adecuadamente representadas mediante el control exclusivo de las fracciones finas. Este aspecto resulta especialmente relevante en entornos urbanos próximos a actividades industriales, portuarias, logísticas y a vías con tráfico intenso.

En resumen, esta campaña exploratoria evidencia que la deposición atmosférica en la zona de estudio responde a una mezcla compleja de aportes naturales, urbanos e industriales. Sobre el fondo marino (y mineral en menor medida) característico del entorno se identifica una señal antrópica clara, especialmente intensa en Ribera Deusto y San Inazio. No obstante, la duración limitada de la campaña, la ausencia de información meteorológica integrada en la interpretación y la posible variabilidad de las actividades emisoras aconsejan considerar estos resultados como una caracterización del periodo estudiado, y no necesariamente como representativos de las condiciones medias anuales.

La monitorización durante un periodo más prolongado y en diferentes estaciones del año, incorporando en el estudio información meteorológica y complementando con otras técnicas analíticas, incluyendo por ejemplo microscopía electrónica, y estadísticas, como los modelos de contribución de fuentes, permitirían confirmar las asociaciones propuestas, cuantificar la contribución relativa de cada tipo de fuente y determinar con mayor precisión el origen de los episodios de deposición elevada.