



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS – ESCUELA DE CIENCIAS
AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE
CARBONO NEGRO Y MATERIAL PARTICULADO 2,5 CON
MEDICIONES MÓVILES EN LA COMUNA DE QUINTERO”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental.

DANIELA PAZ GUTIÉRREZ DURÁN

Director del Seminario de Título: Dr. Carlos Manzano Dávila

Co - Directora: Dra. Zoë Louise Fleming

Diciembre 2022

Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la **Srta. Daniela Paz Gutiérrez Durán**.

“EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE CARBONO NEGRO Y MATERIAL PARTICULADO 2,5 CON MEDICIONES MÓVILES EN LA COMUNA DE QUINTERO”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental.

Dr. Carlos Manzano Dávila

Director Seminario de Título:

Dra. Zoë Louise Fleming

Co-Directora Seminario de Título:

Comisión Revisora y Evaluadora

Dr. Manuel Leiva Guzmán

Dr. Richard Toro Araya

Santiago de Chile, Junio 2023.

BIOGRAFÍA



Daniela Paz Gutiérrez Durán, el conchito de la familia. Nací en Santiago el 31 de Marzo de 1997. Vengo de una familia donde el amor y el cariño abundan, y frases como “vamos! queda poquito”, los viajes y las risas también...Me considero eterna amante de los animales y las plantas y creo que es ahí donde surge mi interés por el medio ambiente. Recuerdo perfecto el momento en que decidí que quería estudiar algo que sí o sí estuviese relacionado con el medio ambiente, siempre con la convicción inalcanzable de “querer salvar al planeta...y a las abejitas”.

El 2016 ingresé a estudiar Química Ambiental, algo que no muchos conocían, que cuando me preguntaban qué estudiaba ni yo era capaz de explicar en qué consistía la carrera o a qué me iba a dedicar después. En 2017 decidí retirarme de la carrera y fue en ese momento en el que me di cuenta de que lo que estaba estudiando realmente me apasionaba, y por lo mismo decidí retomar Química Ambiental el año 2019, esta vez, con la convicción de que era esta carrera la que me entregaría las herramientas para no solamente salvar a las abejitas como yo creía, sino que esta vez se le sumaba cada rincón hermoso que he podido conocer de Chile.

Definitivamente dedicado a mi mamá

La persona que se quedó infinitas noches acompañándome para que no me durmiera mientras estudiaba y que cada vez que ya no quería más, llegaba con un plato de comida y un chocolate a darme el ánimo que necesitaba...

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a quién me ayudó a terminar esta última etapa, el profe Carlos Manzano, porque más que un profesor fue un pilar fundamental para mí en este proceso. Por lo mismo, agradezco siempre sentirme escuchada, comprendida, pero por, sobre todo, impulsada a darlo todo hasta el último momento. De verdad muchísimas gracias.

Agradezco a la Dra. Zoë Fleming y su equipo de EnviroHealth UDD. Gracias Zoë por abrirme los brazos y ayudarme desde el primer día, por recibirme con el entusiasmo que te destaca, acompañarme durante todo este proceso y además entregarme oportunidades inimaginables.

Agradecer ENORMEMENTE a cada una de las personas que me ayudaron a realizar las caminatas en Quintero: Nico, Diego, Nicole, Javier, Kitty, Daniel, Kevin, Pancho, Popi, Consuelo, Caro, Felipe, Zoë, Darío, Trini, Alonso...Sinceramente sin su ayuda no habría podido realizar este trabajo. Gracias por la entrega.

Gracias a cada persona que conocí durante estos años en Juan Gómez Milla. Por cada viernes en el cenicero o calama, y por sufrir en conjunto antes de cada prueba y laboratorio. Me llevo eternos recuerdos de este lugar y de su gente.

Por otra parte, quiero agradecer a cada persona que me preguntó “¿Cómo vas con la tesis?”, solo decirles, ¡lo logré! A mis amigos que estuvieron ahí hasta en los días más grises en los que creía que no entregaría jamás este proyecto. Especialmente a mis amigos Consuelito, Popi, Javi y Javier, por cada vez que me escucharon, cada consejo y cada ayuda que siempre he recibido de ustedes. Por todas esos “juntémonos a tesiar”

que, entre risas y café, la verdad...me sirvieron muchísimo para hacer los días más amenos.

Gracias Tako, por siempre estar, por tu preocupación y entrega de cariño. Por tus convicciones, tus consejos y escucharme cada vez que lo he necesitado.

Importantísimo agradecer a mi mamá y papá, Angélica y Enrique, en primer lugar, por ser mis ejemplos a seguir, por enseñarme lo que es la perseverancia y a lograr mis metas. Mi más sincera admiración para ambos. Gracias por ayudarme y acompañarme en cada una de estas etapas. Por hacer que nunca me faltara nada, por siempre estar presentes, por ir conmigo codo a codo en cada uno de los desafíos, por la paciencia, la empatía y el eterno cariño.

Por último, quiero agradecer a la Municipalidad de Quintero, específicamente al Departamento de Medio Ambiente, por recibarnos y brindarnos apoyo para poder llevar a cabo este trabajo. Espero que las experiencias en conjunto continúen, y poder aportar con un granito de arena.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
RESUMEN.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Antecedentes Generales	2
1.1.1. Contaminación atmosférica	2
1.1.2. Material Particulado (MP)	3
1.1.3. Compuestos carbonosos.....	6
1.1.4. Carbono Negro (BC)	6
1.1.4.1. Importancia de estudiar el BC: Precursor del Cambio Climático.....	9
1.1.5. Monitoreos móviles de Calidad de Aire: Nuevos Desafíos.....	12
1.2. Antecedentes Específicos	14
1.2.1. Contexto Nacional: Monitoreo de calidad de aire en Chile.....	14
1.2.2. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)	15
1.2.3. Quintero: Zona de Sacrificio	16
1.3. Objetivo general.	18
1.4. Objetivos específicos.....	18
II. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1. Microetalmómetros.....	19
2.1.1. MicroAeth AE51	19
2.1.2. MicroAeth MA200	22
2.1.3. Corrección relación señal/ruido: Algoritmo de reducción de Ruido Optimizado (ONA)	23
2.2. Espectrómetro portátil de aerosol GRIMM®: modelo Dust Decoder 11 – D.	24
2.3. Caracterización del área de estudio	25
2.3.1. Contexto industrial de la zona.....	26
2.3.2. Régimen de vientos	27
2.3.3. Calidad del aire.....	29

2.4.	Diseño de las caminatas	29
2.5.	Intercomparación de los microetómetros AE51	31
2.5.1.	Intercomparación de los equipos en laboratorio.....	32
2.5.2.	Intercomparación de los equipos en condiciones de terreno.....	33
2.6.	Campaña de monitoreo.....	33
2.6.1.	Instalación de estación meteorológica: “Estación experimental”	34
2.6.2.	Determinación de la tasa de flujo y tiempo base <i>in situ</i> en el área de estudio	35
2.6.3.	Desarrollo de las caminatas.....	36
2.7.	Tratamiento de datos	38
2.7.1.	Relación BC/MP	40
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1.	Caracterización del área de estudio.....	41
3.2.	Intercomparación de los microetómetros AE51	45
3.2.1.	Intercomparación en laboratorio	45
3.2.2.	Intercomparación en condiciones de terreno	50
3.3.	Mapas de interpolaciones de concentraciones de BC.....	53
3.3.1.	Caminatas de la mañana.....	56
3.3.2.	Caminatas de la tarde.....	66
IV.	CONCLUSIONES.....	86
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	89
VI.	ANEXOS	98
	Anexo 1. Microetómetros Aethlabs: AE51 y MA200	98
	Anexo 2. GRIMM®: Dust Decoder 11 – D	104
	Anexo 3. Caracterización del área de estudio	106
	Anexo 4. Análisis para determinar tasa de flujo y tiempo base a utilizar <i>in situ</i> en la península de Quintero	112
	Anexo 5. Registro de las caminatas	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de la composición de las partículas ultrafinas, finas y gruesas (EPA, 2009; INE – SEMARNAT, 2011).....	5
Tabla 2. Ubicación “Estación experimental”.....	34
Tabla 3. Tasa de flujo que se utilizó para cada microetalmómetro AE51	36
Tabla 4. Configuraciones de los microetalmómetros para el desarrollo de las caminatas	36
Tabla 5. Características de estaciones de monitoreo ubicadas en el área de estudio (SINCA, 2022).	41
Tabla 6. Experimento durante la intercomparación en terreno.....	53
Tabla 7. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 2.....	60
Tabla 8. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 5.....	62
Tabla 9. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 7.....	66
Tabla 10. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 1.....	69
Tabla 11. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 3.....	72
Tabla 12. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 4.....	75
Tabla 13. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 6.....	78
Tabla 14. Resumen de valores de BC y BC/MP _{2,5} para distintas áreas de estudio.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de las fuentes de emisión de carbono negro, los procesos involucrados y efectos directos e indirectos del carbono negro en la atmósfera. (Modificación de Bond, T. y col., 2013).....	11
Figura 2. Microetalmómetro microAeth AE51 (Modificado de Aethlabs, 2016a).....	19
Figura 3. Microetalmómetro microAeth MA200. (Aethlabs, 2018).	22
Figura 4. Espectrómetro de aerosoles Modelo 11 – D	24
Figura 5. Principio de funcionamiento de espectrómetros de aerosol GRIMM® (GmbH & Co.KG., 2016; Carrasco-Carrasco, P., 2018).....	24
Figura 6. Contexto industrial de la comuna de Quintero.....	26
Figura 7. Diseño de rutas.....	31
Figura 8. Instalación estación meteorológica: "Estación Experimental"	35
Figura 9. Instrumentos en intercomparación durante el desarrollo de las caminatas...38	
Figura 10. Régimen de vientos en la península de Quintero (2019 - 2021).....	42
Figura 11. Régimen de vientos en la península de Quintero durante enero 2022.	43
Figura 12. Distribución horaria de MP en estaciones Quintero y Centro Quintero (2019 – 2021)	44
Figura 13. Correlación microetalmómetros AE51 sin corrección ONA.....	46
Figura 14. Correlación microetalmómetros AE51 con corrección ONA (factor de corrección: 0,01Δ)	47
Figura 15. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en laboratorio de microetalmómetros AE51 - sin corrección ONA	48
Figura 16. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en laboratorio de microetalmómetros AE51 - con corrección ONA.	49
Figura 17. Correlación microetalmómetros AE51 en terreno con corrección ONA	50
Figura 18. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en terreno de microetalmómetros AE51 - sin corrección ONA	51
Figura 19. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en terreno de microetalmómetros AE51 - con corrección ONA	52

Figura 20. Media de BC Total modelado. Izquierda: Dominio de 12 km total. Derecha: Ampliado a la zona central de Chile. (Mena-Carrasco, M. y col., 2014).	54
Figura 21. Mapa de lugares de Quintero (Elaboración propia).	55
Figura 22. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 2	58
Figura 23. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 2 Ruta 2 ...	59
Figura 24. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 5	61
Figura 25. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 5 Ruta 3 ...	62
Figura 26. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 7	64
Figura 27. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 7 Ruta 4 ...	65
Figura 28. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 1	67
Figura 29. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 1 Ruta 1 ...	68
Figura 30. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 3	70
Figura 31. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 3 Ruta 4 ...	71
Figura 32. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 4	73
Figura 33. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 4 Ruta 2 ...	74
Figura 34. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 6	76
Figura 35. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 6 Ruta 1 ...	77

LISTA DE ABREVIATURAS

AIDA: Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente.

BC: *Black Carbon* (Carbono Negro).

CCAC: *Climate & Clean Air Coalition (Coalición Clima y Aire Limpio)*.

CCVC: Contaminantes Climáticos de Vida Corta.

(CR)2: Center for Climate and Resilience Research.

DMC: Dirección Meteorológica de Chile.

D.S.: Decreto Supremo.

eBC: *equivalent Black Carbon* (Carbono Negro equivalente)

EC: *Elemental Carbon* (Carbono Elemental).

EPA: *Environmental Protection Agency* (Agencia de Protección Ambiental).

GAW/WMO: *Global Atmosphere Watch programme of the World Meteorological Organization*.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

IEDA: *Instituto de Energía e Meio Ambiente* (Instituto de Energía y Medio Ambiente).

IGSD: *Institute for Governance & Sustainable Development*-

INE-SEMARNAT: *Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.

INDH: Instituto Nacional de Derechos Humanos.

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).*

MINSAL: Ministerio de Salud de Chile.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente de Chile.

MP: Material Particulado.

MP₁: Material Particulado menor a 1 μm .

MP_{2.5}: Material Particulado menor a 2,5 μm .

MP₁₀: Material Particulado menor a 10 μm .

OC: *Organic Carbon (Carbono Orgánico).*

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

ONG: Organización No Gubernamental.

SINCA: Sistema de Información Nacional de la Calidad de Aire.

UNEP: *United Nations Environment Programme (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente).*

U.S. EPA: *United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).*

WHO: *World Health Organization (Organización Mundial de la Salud, OMS).*

RESUMEN

El carbono negro (BC) es un aerosol contaminante de la atmósfera que forma parte de la fracción carbonosa del material particulado 2,5 (MP_{2,5}). Posee un gran forzamiento radiativo positivo considerándose la segunda causa del calentamiento global después del CO₂. Se forma durante la combustión incompleta por fuentes tanto naturales y antropogénicas. Para enfrentar este tipo de contaminante con alta variabilidad en la atmósfera, se plantea el uso de mediciones móviles. A partir de esto, nace el desafío de plantear nuevas metodologías para el buen rendimiento de los equipos portátiles. En Chile, específicamente Quintero, considerada una zona de sacrificio dada la alta carga contaminante que rodea a esta comuna, se hace importante saber si las emisiones de BC aportan a dicha contaminación y si se pueden asociar a ciertas fuentes. Los objetivos de este trabajo son medir las concentraciones de BC y MP_{2,5} en la península de Quintero, a través de caminatas locales con instrumentos móviles; y comparar los datos obtenidos con aquellos de las estaciones de monitoreo de calidad de aire del SINCA. Se realizaron un total de siete caminatas a lo largo de la península para la medición de los contaminantes de interés. Para estas, se utilizaron 4 microetalmómetros y 1 GRIMM 11-D. Dichas caminatas se clasificaron según el horario, en muestreos de mañana y de tarde. Los resultados señalan que la concentración de BC presenta distribuciones muy distintas y que cada caminata es un microambiente a analizar por sí mismo. Sin embargo, se repitieron dos *hotspots*: los terminales de buses y el sector NE de la península. El primero se asoció al uso de diésel por parte de la flota de buses, mientras que el sector NE, se podría asociar al complejo industrial Ventanas que está próximo a esta zona. Las concentraciones de BC medidas en las caminatas de la mañana varían entre 0,40 – 1,31 µg/m³; y las de MP_{2,5} 22 – 23 µg/m³. En el caso del horario de tarde, las concentraciones

de BC están en el rango de 0,15 – 1,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para $\text{MP}_{2.5}$ 13 – 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar los resultados de $\text{MP}_{2.5}$ obtenidos, con aquellos de las estaciones del SINCA, se observó que las concentraciones obtenidas siempre son mayores. El uso del GRIMM 11-D fue clave al momento de identificar fuentes de combustión incompleta en el $\text{MP}_{2.5}$ y MP_1 . Con esto, se logró distinguir el momento exacto en el que la composición de MP presentó BC y determinar la cantidad (en %) de BC en las fracciones de MP. Los resultados muestran la necesidad de seguir fortaleciendo una metodología para este tipo de análisis, para así poder utilizar estos en la toma de decisiones y formulación de estrategias de mitigación de las emisiones de BC. Por último, el uso complementario del monitoreo móvil y estacionario, entrega posibilidades para nuevos enfoques en el desarrollo de redes y programas de monitoreo de la calidad del aire, en donde se considere el BC.

ABSTRACT

Black carbon (BC) is an atmospheric pollutant that is part of the atmospheric carbonaceous particulate matter 2.5 (PM_{2.5}), it has a high positive radiative forcing and is considered the second most important driver of global warming after CO₂. It is formed during the incomplete combustion in natural and anthropogenic processes. To approach this type of pollutant, which has high variability in the atmosphere, the use of mobile measurements is proposed. From this, the challenge of developing strategies to improve the overall performance of these instruments is also emerging. In Chile, specifically Quintero, considered a sacrifice zone, due to the high pollution load that surrounds this town, it is important to know if BC emissions contribute to this pollution and if they can be associated to some specific sources. The objectives of this work are to measure BC and PM_{2.5} concentrations in the Quintero peninsula, through local walks with mobile instruments and to compare the results with those from the SINCA air quality monitoring stations. A total of seven walks were performed along the peninsula to measure the pollutants of interest. For these, 4 microaethalometers and 1 GRIMM 11-D were used. These walks were classified into morning and afternoon samplings, according to the time of day. The results indicated that BC concentration has very different distributions and that each walk is a microenvironment to be analyzed by itself. However, two hotspots were repeated: the bus terminals and the NE sector of the peninsula. The former was associated with the use of diesel by the bus fleet, while the NE sector could be associated with the Ventanas industrial complex that is close to this area. The BC concentrations measured at morning walks varied between 0.40 - 1.31 µg/m³ and PM_{2.5} 22 - 23 µg/m³. During afternoon walks, BC concentrations were in the range of 0.15 - 1.30 µg/m³ and for MP_{2.5} 13 - 22 µg/m³. When comparing the results of MP_{2.5} obtained through the walks

with those of the SINCA stations, it was found that the resulting concentrations are always higher than those from SINCA stations. The use of GRIMM 11-D was crucial for identifying sources of incomplete combustion in $PM_{2.5}$ and PM_1 . Therefore, it was possible to recognize the exact moment when the PM composition exhibited BC, and to determine the amount (in %) of BC in PM fractions. The results showed the need to continue improving a methodology for this type of analysis, in order to be able to use them for decision making and formulation of BC emission mitigation strategies. Finally, the combined use of mobile and stationary monitoring, provides possibilities for new approaches in the development of air quality monitoring networks and programs, where BC is considered.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. Contaminación atmosférica

Actualmente, el cambio climático y el calentamiento global son temas de suma importancia, y el estudio de los factores que influyen en la ocurrencia de dichos fenómenos es imperativo para encontrar soluciones y frenar sus consecuencias. El calentamiento global y la contaminación atmosférica son problemas medioambientales críticos y estrechamente relacionados (Kinney, P.L., 2018).

La contaminación atmosférica se define como la presencia en la atmósfera de elementos contaminantes, compuestos o sustancias que alteran la composición natural de la atmósfera y en cierta concentración o periodo de tiempo, constituyen un riesgo para cualquier componente del ecosistema (Oyarzún, M. 2010). Los principales contaminantes atmosféricos son especies orgánicas e inorgánicas presentes en fase sólida, líquida y gaseosa (Brunekreef, B. & Holgate, S., 2002; Ahumada – Varela, S., 2020). Las fuentes de emisión de los contaminantes del aire pueden tener origen natural y/o antrópico (Tan, Z., 2014). Además, según su origen, los contaminantes se pueden clasificar en contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son emitidos directamente desde una fuente fija y/o móvil, como una chimenea industrial y tráfico vehicular, respectivamente. Por otra parte, los contaminantes secundarios no son emitidos directamente a la atmósfera, sino que se forman por procesos fotoquímicos y/o químicos a partir de los contaminantes primarios (Figueruelo, J.E. & Dávila, M.M., 2004; Ahumada – Varela, S., 2020).

Por otra parte, según su estado físico, los contaminantes se clasifican en gases (por ejemplo, SO_x, NO_x, CO, Hidrocarburos y O₃) o partículas como polvo y aerosoles, denominados Material Particulado (MP). Hasta hace poco se consideraba que estos contaminantes tenían principalmente impactos sobre la salud y el medioambiente a escala local. Sin embargo, cada vez hay más consenso científico en que algunas de estas especies pueden también influir en el sistema climático mundial al modificar el balance radiativo de la Tierra (Kandlikar, M. y col., 2018). Cambios en el balance radiativo de la Tierra pueden provocar que la temperatura global aumente o disminuya, forzando así, cambios en el clima por consecuencia de una serie de mecanismos naturales o de origen antropogénico que tienen el objetivo de restaurar el equilibrio radiativo (Tan, Z., 2014). El forzamiento radiativo (expresado en unidades de vatios por m²) es una métrica que permite cuantificar el cómo las actividades antropogénicas y procesos naturales perturban el flujo de energía que entra y sale del sistema climático (Ahumada-Varela, S., 2020).

Según estudios recientes, los efectos adversos derivados de la exposición a la contaminación atmosférica se observan en concentraciones de contaminantes cada vez menores (WHO, 2013a; 2013b; Brunekreef, B. y col., 2015). Es por esto que durante las últimas décadas se han realizado grandes esfuerzos a nivel mundial para enfrentar esta problemática. En particular, los científicos han centrado su atención en las partículas de aerosol que pueden tener efectos tanto de enfriamiento como de calentamiento, con la perspectiva de reducir la contaminación atmosférica.

1.1.2. Material Particulado (MP)

El material particulado (MP) o aerosol atmosférico se define como una mezcla compleja de partículas sólidas y/o gotas líquidas, las cuales, se encuentran presentes en suspensión en la atmósfera (Bibi, S. y col., 2017). Según su fuente, se clasifica como aerosol primario si es emitido directamente a la atmósfera desde su fuente, o secundario si se forma en la atmósfera a partir de reacciones químicas entre contaminantes dentro de la atmósfera, denominados precursores gaseosos. Tanto aerosoles primarios como secundarios pueden formarse como consecuencia de las actividades naturales o antrópicas. De las actividades naturales, las principales fuentes de emisión son de tipo marino, mineral, volcánico, biogénico y cósmico (Oberdörster y col., 2005; Marino, D., 2011). Por otra parte, las fuentes antrópicas, provienen de diversos procesos de combustión dominantes de fuentes fijas (industriales y calefacción doméstica) y móviles (tránsito vehicular) (Morawska & Zhang, 2002; Vouitsis y col., 2003; Fang y col., 2006).

En términos de calidad del aire, se clasifican según su diámetro aerodinámico, en una fracción gruesa, correspondiente a las partículas de diámetro menor a 10 μm , conocidas como MP_{10} , y en una fracción fina, correspondiente a aquellas partículas que tienen un diámetro menor a 2,5 μm , denominadas $\text{MP}_{2.5}$. Específicamente, la exposición a estas últimas es especialmente dañina para la salud humana, ya que son lo suficientemente pequeñas para penetrar en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y los alvéolos, y es por esto mismo que se encuentra entre los diez principales riesgos a los que se enfrenta el ser humano en la actualidad (WHO, 2016a; 2016b). A nivel mundial, la exposición a la contaminación del aire, principalmente al MP, provoca 3,3 millones de muertes prematuras al año (Lelieveld, J. y col., 2015; Saarikoski, S. y col., 2019).

Respecto a su origen, los aerosoles atmosféricos se pueden clasificar en naturales, compuestos principalmente por cenizas volcánicas, esporas, polen, sal marina, polvo terrestre y polvo desértico; y antropogénicos, derivados de la actividad humana, tales como humos de chimeneas, tránsito vehicular, partículas minerales surgidas de procesos industriales, entre otros. Así, debido a las diversas fuentes, estas partículas presentan composiciones químicas muy diversas que se forman de una fracción orgánica e inorgánica, dependiendo principalmente de la fuente emisora. Los compuestos mayoritarios de las partículas son sulfatos, nitratos, amonio, sodio, cloruro, una fracción carbonosa (carbón elemental y carbón orgánico), componentes minerales y agua, mientras que, en menor proporción, contienen elementos traza de la corteza terrestre y compuestos orgánicos traza (ver Tabla 1; INE – SEMARNAT, 2011). De ahí es que el MP es objeto de interés, debido a su alta complejidad como componente ambiental de la atmósfera. Puntualmente, la fracción carbonosa de los aerosoles consiste en dos partes: carbón elemental y carbono orgánico (EC y OC, por sus siglas en inglés respectivamente). Por una parte, los procesos de combustión incompleta y los incendios forestales son las principales fuentes de EC, emitidos directamente a la atmósfera. Por otra parte, el OC se origina a partir de procesos que involucran reacciones químicas de hidrocarburos o de la condensación atmosférica de gases orgánicos de baja volatilidad (Dockery, D.W. y col., 1993; Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N., 2016).

Tabla 1. Principales características de la composición de las partículas ultrafinas, finas y gruesas (EPA, 2009; INE – SEMARNAT, 2011).

	Tipo de Partículas		
	Ultrafinas ($PM_{0,1}$)	Finas ($\leq PM_{2,5}$)	Gruesas ($PM_{2,5} - PM_{10}$)
Composición	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato • Carbón elemental • Compuestos metálicos • Compuestos orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato, nitrato, amonio, iones de hidrógeno • Carbón elemental • Gran variedad de compuestos orgánicos • Metales: compuestos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. • Agua ligada a las partículas • Bacterias, virus 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos, cloruros, sulfatos de reacciones de HNO_3, HCl y SO_2, con partículas gruesas • Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe) • $CaCO_3$, $CaSO_4$, NaCl • Polen, bacterias, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales

El MP es eliminado de la atmósfera por dos mecanismos: la deposición en la superficie de la Tierra (deposición seca) y la incorporación a las gotas de nubes/lluvia durante la formación de precipitaciones (deposición húmeda). Debido a que la deposición húmeda y seca conlleva tiempos de residencia relativamente cortos en la tropósfera, y a que la distribución geográfica de las fuentes de MP es muy poco uniforme, los aerosoles troposféricos varían mucho en concentración y composición sobre la Tierra.

En los últimos años, las emisiones antropogénicas han incrementado exponencialmente las concentraciones de aerosoles, afectando no sólo a la salud humana (Dockery y col., 1993; Díaz – Hernández, C.G., 2016), pero también perturbando el balance radiativo de la Tierra, ya sea mediante un forzamiento radiativo negativo, reduciendo la cantidad de energía en el sistema climático (en el caso de los sulfatos y otras partículas reflectantes) o un forzamiento radiativo positivo, como se da en el caso de aerosoles carbonosos, y particularmente el BC, los cuales absorben la radiación solar incidente, provocando calentamiento (Kandlikar, M. y col., 2018).

La interacción entre el MP y el clima se ha convertido en una problemática de atención cada vez más importante por parte de la comunidad científica, especialmente para evaluar medidas de control de las emisiones, y así promover la mitigación del cambio climático a corto plazo. Un componente del MP de interés es el carbono negro (BC, por sus siglas en inglés).

1.1.3. Compuestos carbonosos

Los compuestos carbonosos son el principal componente del MP atmosférico, por lo general contribuyen entre un 20 a 45% del $MP_{2.5}$ y un 20 a 30% del MP_{10} (Hristova, E. y col., 2022). Como se mencionó antes, los principales componentes de las partículas carbonosas en el aerosol atmosférico son el carbono orgánico (OC) y el carbono elemental (EC) (Penner, J.E. & Novakov, T., 1996; Becerril-Valle, M. y col., 2017). El OC puede ser de origen primario, siendo sus principales fuentes la combustión de combustibles fósiles, la quema de biomasa y las emisiones biogénicas; o de origen secundario, formándose a partir de la oxidación de precursores gaseosos tanto de origen biogénico como antropogénico (Jiang y col., 2019; Gil-Martínez, D., 2021). El EC es exclusivamente de carácter primario, originándose a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa (Szidat, S. y col., 2009; Gil-Martínez, D., 2021).

1.1.4. Carbono Negro (BC)

Al EC se le conoce además como Carbono Negro (BC por sus siglas en inglés), a pesar de que existen diferencias entre ambos, pues el término EC hace referencia a los compuestos carbonosos determinados mediante el uso de métodos termo – ópticos para

su medición. Por el contrario, las concentraciones de BC se determinan por métodos ópticos (Watson, J.G. y col., 2005; Gil-Martínez, D., 2021). Así, el uso de términos como hollín, BC, EC, aerosoles absorbentes de luz ha causado una gran confusión para la comunidad en el monitoreo de la calidad del aire. Para evitarlo, el Grupo Asesor Científico de la Vigilancia Atmosférica Global (GAW, por sus siglas en inglés) recomendó que, al medir el BC mediante técnicas ópticas se utilice el término *carbono negro equivalente* (eBC) en lugar de BC para subrayar que la señal óptica determinada entrega una concentración de masa equivalente a la absorción medida (GAW/WMO, 2012; Petzold, A. y col., 2013; Becerril-Valle, M. y col., 2017).

Las fuentes móviles asociadas a la emisión de BC son principalmente los motores diésel. Por otra parte, respecto a las fuentes fijas, destacan los procesos de combustión en industrias, la generación de energía eléctrica, la quema residencial de biomasa y la quema de residuos agrícolas (Deng y col., 2020; Gil-Martínez, D., 2021).

El BC se conoce como un contaminante climático de vida corta (CCVC), pues su forzamiento radiativo atmosférico se detiene dentro del orden de semanas luego que cesan sus emisiones, desapareciendo por deposición húmeda y seca (Correa Lagos, S.C., 2013). Es considerado un contribuyente al calentamiento global y a la degradación de la calidad del aire, debido al forzamiento radiativo positivo que impone sobre el clima, ya que absorbe luz solar en una amplia gama de longitudes de onda (UV – IR) (IPCC, 2013; Molina, M.J. y col., 2015; Helin, A. y col., 2018; Timonen, H. y col., 2019).

Por otra parte, según la Coalición de Clima y Aire Limpio (CCAC, por sus siglas en inglés) (UNEP & CCAC, 2016), el BC es un aerosol contaminante de la atmósfera, perteneciente específicamente a la fracción del $MP_{2.5}$, que se forma durante la combustión incompleta en fuentes naturales y antropogénicas, destacando en estas últimas, la combustión

incompleta de los combustibles fósiles, la combustión incompleta por motores diésel y sus derivados, combustión de biomasa (e.g. incendios forestales, quemas rurales, chimeneas a leña, etc.), plantas termoeléctricas a carbón y otras fuentes que queman combustibles fósiles y absorbe todas las longitudes de onda de la radiación solar (Kouassi, A.A. y col., 2021; EPA, 2012). El BC se distingue de otros materiales carbonosos contenidos en el aerosol atmosférico ya que presenta las siguientes propiedades físicas que lo caracterizan:

- i) Absorbe fuertemente la luz visible,
- ii) Es refractorio, es decir, conserva su forma básica a altas temperaturas, con una temperatura de vaporización de $\sim 4000\text{ K}$,
- iii) Es insoluble en agua y en disolventes orgánicos y otros componentes presentes en los aerosoles, y,
- iv) Existe como agregado de pequeñas esférulas de carbono, lo que lo diferencia del grafito (Bond, T. y col., 2013; Correa Lagos, S.C., 2013).

En la atmósfera algunas de sus características son:

- i) Su reactividad química es muy baja
- ii) Su principal proceso de remoción es la deposición seca o húmeda.
- iii) Es absorbente y adsorbente, lo que permite una mezcla con otras especies en la atmósfera, siendo un transportador (Correa Lagos, S.C., 2013).

A nivel mundial, alrededor del 20% del BC se emite por la combustión de biocombustibles, el 40% por combustibles fósiles y el 40% por biomasa de combustión abierta. Por lo tanto, es esencial estudiar las características del carbono negro, para evaluar sus propiedades radiativas y cuantificar su contribución a la contaminación atmosférica en diferentes regiones (Kouassi, A.A. y col., 2021).

1.1.4.1. Importancia de estudiar el BC: Precursor del Cambio Climático

El interés por estudiar este contaminante recae en la característica de ser un precursor del cambio climático (Molina, L.T. y col., 2015; UNEP & CCAC; MMA 2018; Mazzeo, A. y col., 2018; (CR)2, 2019).

Respecto a los efectos en la salud humana, dado el tamaño tan pequeño de las partículas de BC (pertenecientes principalmente al $MP_{2.5}$), es capaz de adentrarse en la región alveolar de los pulmones donde puede ralentizar los mecanismos de limpieza y provocar sitios para la absorción de contaminantes tóxicos, provocando padecimientos respiratorios, cardiopulmonares y cardiovasculares (Park, S. y col., 2010; Li, Q. y col., 2013; Díaz – Hernández, C.G., 2016). La Organización Mundial de la Salud (OMS) concluyó que las partículas de BC pueden no ser un componente tóxico directo importante del MP fino, pero pueden operar como un portador universal de productos químicos de toxicidad variable para los pulmones, las principales células de defensa del cuerpo y (posiblemente) la circulación sanguínea sistémica (WHO, 2013; Villancura, L.J., 2021).

Por otra parte, en el medio ambiente, el BC reduce la visibilidad atmosférica y afecta una amplia variedad de procesos atmosféricos relacionados con el clima (Ahmed, T. y col., 2009; EPA, 2012; Díaz – Hernández, C.G., 2016). En primer lugar, destaca su alta capacidad de absorber radiación solar, ya que, si bien no es un gas de efecto invernadero, contribuye al calentamiento global con un impacto entre 460 y 1.500 veces mayor que el CO_2 (AIDA & IEMA, 2016), lo que altera el balance energético de la Tierra, ya que como absorbente de la radiación solar, el BC tiene un impacto directo sobre el clima al calentar la atmósfera (Bond, T. y col., 2013). A escala global, Bond, T. y col. (2013) indican que la mejor estimación del forzamiento climático del carbono negro es

de $+1,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. A modo de comparación, el forzamiento radiativo inducido por otros gases de efecto invernadero con tiempos de residencia mayores como el CO_2 y CH_4 son de $+1,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ y $+0,86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente. Es por esto que recientes estimaciones de la fuerza radiativa del BC confirman que es la segunda causa del calentamiento global después del CO_2 (IGSD, 2013; Correa Lagos, S.C., 2013). En segundo lugar, al tener la propiedad de absorber radiación solar, actúa como agente acelerador en el derretimiento de glaciares y nieve al depositarse sobre ellos, aumentando la temperatura de estas superficies y reduciendo su albedo (Rowe, P.M. y col., 2019, (CR)2, 2019). Además, esto puede tener un efecto también en los ciclos hídricos (Rowe, P.M. y col., 2019; Gramsch, E. y col., 2020). Por último, una tercera forma de interferir en el clima está definida por su interacción con las nubes, pues puede actuar como núcleo de condensación modificando los procesos de formación tanto de las nubes y el hielo en la atmósfera (Bond, T. y col., 2013; (CR)2, 2020).

A continuación, en la Figura 1 se presentan a modo de resumen las principales fuentes, procesos involucrados y efectos directos e indirectos del carbono negro en el sistema climático.

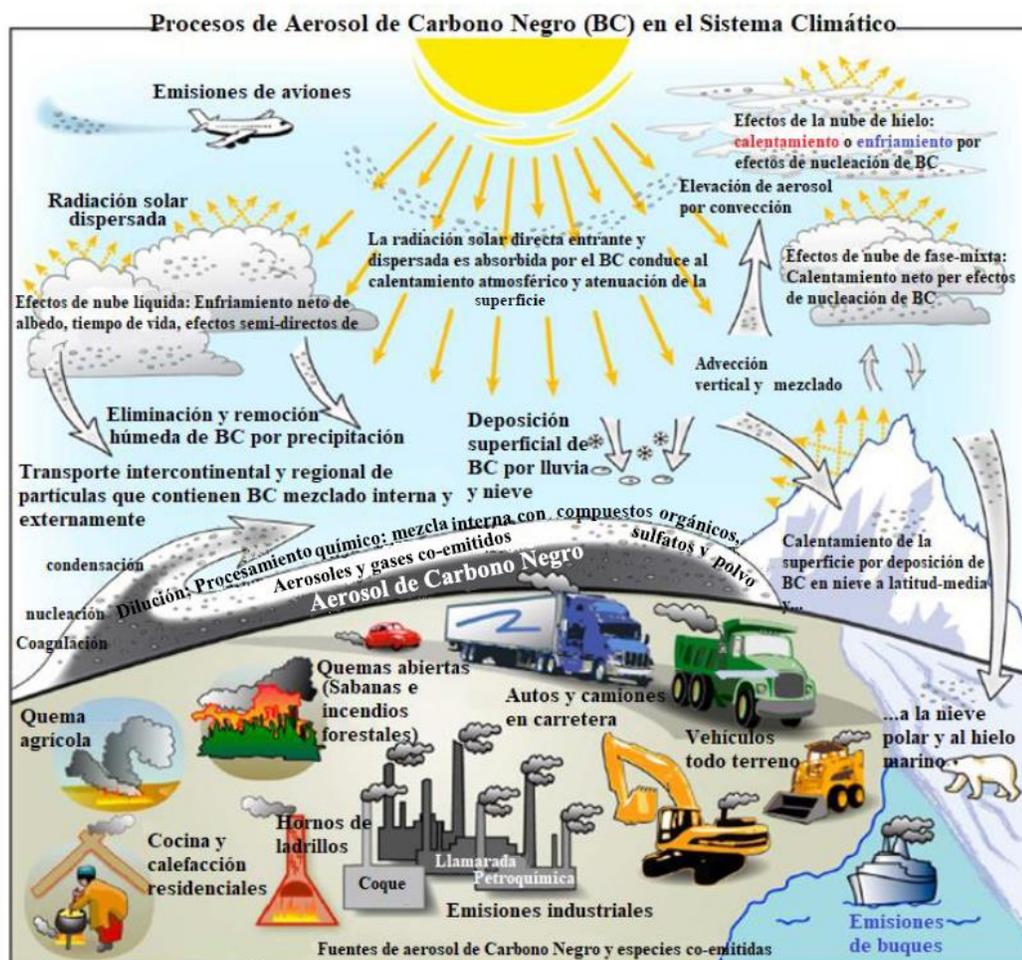


Figura 1. Descripción de las fuentes de emisión de carbono negro, los procesos involucrados y efectos directos e indirectos del carbono negro en la atmósfera. (Modificación de Bond, T. y col., 2013; Villacura, L., 2021).

Es por lo anterior que, pese a su corta vida en la atmósfera, en comparación con los gases de efecto invernadero (GEI), su efecto como precursor del cambio climático es importante y su mitigación tiene efectos en el corto plazo ((CR)2, 2020). Lo anterior sugiere, tal como menciona Bond, T. y col. (2013), que la reducción de las emisiones actuales de BC representa una posible estrategia de mitigación que podría reducir el forzamiento climático global derivado de las actividades y frenar el ritmo de cambio

climático que se tiene hoy en día. Sin embargo, es importante destacar que las reducciones de BC no pueden sustituir las reducciones de los GEI de larga vida, pues estas medidas deben ser complementarias.

1.1.5. Monitoreos móviles de Calidad de Aire: Nuevos Desafíos

La importancia de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y la necesidad de controlar dicha problemática ha impulsado el aumento de nuevas mediciones de las concentraciones (Ahumada – Varela, S., 2020) no solo de los principales contaminantes, o contaminantes criterios, sino también de aquellos contaminantes no tan estudiados como es el caso del BC. Según indican Álvarez-Narváez, V. y col. (2016), el monitoreo es la base fundamental para formular estándares de calidad de aire y planificar estrategias de control y nuevas políticas. Los objetivos del monitoreo de calidad de aire son:

- i) Evaluar el cumplimiento de las directrices de la legislación
- ii) identificar las fuentes emisoras
- iii) Evaluar la exposición de la población a contaminantes atmosféricos
- iv) Determinar pronósticos y alertas sobre niveles de contaminación
- v) Formular estrategias para prevenir, disminuir y controlar los impactos de la contaminación del aire sobre la salud de la población y el medioambiente; y evaluar la efectividad de dichas estrategias (Álvarez-Narváez, V. y col., 2016).

A partir de estos criterios, las redes de monitoreo basan su instrumentación en metodologías referenciales y equivalente que cuenten con la certificación de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (U.S. EPA) o de los países miembros de la Unión

Europea (Ahumada – Varela, S., 2020). Sin embargo, las tendencias actuales sugieren que la sofisticada tecnología de los instrumentos utilizados hoy en día para el monitoreo de calidad de aire no es económicamente sostenible como único enfoque y no puede seguir el ritmo de las necesidades actuales (Snyder, E.G. y col., 2013; EPA, 2013). Bajo esta premisa, hoy en día existe un rápido crecimiento en el uso de las mediciones móviles para monitorear la calidad del aire, mediante el uso de sensores de menor costo, donde las mediciones se realizan con diferentes plataformas, por ejemplo, peatones, bicicletas, tranvías y coches (Van den Bossche, J. y col., 2015). Las mediciones móviles se utilizan con distintos fines, por ejemplo, para evaluar la exposición personal equipando el objeto de estudio con un monitor portátil, evaluar la exposición en distintos medios de transporte, estudiar la variación espacial de la contaminación atmosférica, investigar la variación estacional y regional, estudiar la correlación espaciotemporal con el ruido o desarrollar y validar modelos de calidad del aire. Otros estudios abordan el potencial uso de las mediciones móviles para construir mapas de contaminación atmosférica con una alta resolución espacial (por ejemplo, Hagler, G. y col., 2010; Choi, W. y col., 2012; Peters, J. y col., 2014).

Además, las nuevas técnicas de monitoreo móvil presentan la oportunidad de integrar el concepto de “ciencia ciudadana” a través de monitoreos participativos, donde los voluntarios pueden recoger sistemáticamente conjuntos de datos específicos, o los datos se recogen de forma oportuna durante actividades cotidianas.

A partir de estos nuevos enfoques, nace el desafío de plantear nuevas metodologías para el buen el rendimiento de los monitores portátiles. De esta manera, la tecnología de los sensores de bajo costo es considerada como una innovadora herramienta para el monitoreo de calidad de aire en el futuro, ya que sus características permiten generar

redes de sensores, potenciar la ampliación de las redes de monitoreo actuales y mejorar el conocimiento sobre la contaminación del aire y la exposición personal en un área puntual (Jovašević – Stojanović, M. y col., 2015). Sin embargo, es importante considerar que, dada la alta variabilidad temporal de la calidad del aire y a la naturaleza móvil de las mediciones, el control de calidad en estas metodologías es un problema importante.

1.2. Antecedentes Específicos

1.2.1. Contexto Nacional: Monitoreo de calidad de aire en Chile

Chile es uno de los países con menor contribución a las emisiones de GEI a nivel mundial. Para el 2008, su aporte representaba solo un 0,26% de las emisiones totales (AIDA & IEMA, 2016). Sin embargo, de acuerdo al informe de evaluación ambiental de Chile 2016, elaborado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), las emisiones de la mayoría de los principales contaminantes atmosféricos han ido en aumento desde 2005 (MMA, 2016). En Chile, estas provienen principalmente de los sectores de energía y transporte, especialmente de los vehículos que funcionan a diésel.

Por otro lado, la contaminación atmosférica de varias de sus ciudades, incluyendo Santiago, ha sido por años un problema sin resolver. Si bien en Chile la situación de la Región Metropolitana representa el caso más emblemático de contaminación atmosférica, siendo clasificada según la OMS como una de las zonas más contaminadas del mundo, otras ciudades también presentan altos niveles de contaminación del aire (Oyarzún, M., 2010). Se han detectado altos niveles en ciudades cercanas a complejos mineros como Copiapó, complejos industriales como es el caso de Quintero y

Puchuncaví, y también en ciudades del sur de Chile como son Osorno, Temuco y Coyhaique. Según el MMA (2016), el 44% de las ciudades supera el límite anual de MP_{10} y un 67% supera el de $MP_{2.5}$.

1.2.2. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)

A partir del problema de contaminación atmosférica en Chile, actualmente existen redes de monitoreo de calidad del aire distribuidas a lo largo del país, asociadas al Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), con más de 200 estaciones ubicadas en diversas zonas. El SINCA, perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente, es el portal que contiene información de calidad del aire de todo el país, a través del cual se evalúa el estado de la calidad del aire y analizan los registros de las estaciones de monitoreo sujetas al cumplimiento del Reglamento de Instalación de Estaciones de Monitoreo para Contaminantes Atmosféricos (D.S. N°61/2008 MINSAL), reglamento que no considera los sensores de bajo costo. Este portal busca entregar información confiable respecto a la calidad del aire de todo el país en términos de las concentraciones ambientales de aquellos contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile (MP, Ozono, SO_2 , NO_x y CO). Los datos de monitoreo obtenidos por el SINCA corresponden a monitoreos de calidad del aire mediante estaciones de monitoreo fijas. Sobre esta variable, inciden factores como la presencia de contaminantes in situ, el transporte de los contaminantes, las condiciones de estabilidad atmosférica, los procesos de formación y destrucción de sustancias en la atmósfera, entre otros factores. Por lo tanto, las mediciones en cada estación de monitoreo reflejan no sólo el impacto de una fuente en particular, sino de

varias actividades. Actualmente, no existe un monitoreo por parte del SINCA de carbono negro.

Bajo esta premisa, la implementación de un monitoreo móvil a diferencia del monitoreo realizado por el SINCA, de carácter estático, entrega la ventaja de obtener datos múltiples y georreferenciados, determinar la presencia del contaminante *in situ* y orientar el estudio al levantamiento preliminar de información sobre la presencia de BC en la atmósfera del área de estudio: Quintero.

1.2.3. Quintero: Zona de Sacrificio

La comuna de Quintero, ubicada en la Región de Valparaíso, Chile., tiene una población aproximada de 100.000 habitantes (EuroChile, 2019) y se caracteriza por su clima mediterráneo costero y su turismo en las temporadas de verano. Es conocido porque en la zona se encuentran importantes actividades industriales que forman el Complejo Industrial Ventanas, ubicado en el borde costero entre las comunas de Quintero y Puchuncaví. Este complejo, de aproximadamente 500 hectáreas, ubicado al Este de la península de Quintero es uno de los más grandes de Chile. Fue inaugurado en febrero de 1961 como un sector de gran importancia económica y una fuente de trabajo para el sector. Actualmente cuenta con más de 17 empresas que desarrollan actividades económicas relacionadas principalmente con la fundición de cobre, elaboración de hormigón, asfalto y cemento; refinerías de petróleo e industrias químicas; generación de energía (centrales térmicas) y actividades portuarias (INDH, 2018).

Quintero se ha consolidado como una de las zonas industriales más importantes del país, desde el punto de vista de la capacidad industrial instalada y la actividad económica

generada. Su privilegiada ubicación geográfica en la zona central del país, sumado a su capacidad portuaria, energética, de infraestructura vial y cercanía con centros urbanos que la proveen de mano de obra y servicios asociados, han contribuido a esta consolidación (MMA, 2013). No obstante, tal desarrollo de las actividades industriales ha provocado que esta comuna haya sufrido cambios significativos a lo largo de los años en términos del tipo de actividades, encontrándose muy intervenida, dado que su funcionamiento conlleva la generación y liberación de sustancias al ambiente, a través de descargas puntuales de residuos líquidos al mar, emisiones atmosféricas, deposición de cenizas en el suelo, entre otras (MMA, 2013). Estas acciones han llevado a catalogar a Quintero como una Zona de Sacrificio.

El termino Zona de Sacrificio ha sido acuñado para reflejar aquellos lugares que concentran gran cantidad de industrias contaminantes, afectando así a las comunidades aledañas, las cuales generalmente se encuentran en situaciones de vulnerabilidad, pues no poseen las redes ni el capital para defenderse y frenar nuevas instalaciones (Oceana, 2016; Chahuán-Pérez, J., 2019). Adicionalmente, estas zonas hacen referencia a aquellos lugares en los que la carga contaminante es muy superior a la de otras localidades y se permite continuamente la instalación de nuevas industrias contaminantes, aun cuando el impacto sobre la salud de las personas y el medio ambiente ha sido estudiado. Según han reconocido el INDH y ONG's medioambientales como OCEANA y Terram, existen al menos cinco zonas de sacrificio en el país: Tocopilla, Mejillones y el Huasco en la zona norte, la bahía de Quintero-Puchuncaví en el centro y la localidad de Coronel en la zona centro sur (INDH, 2018; Muñoz-Araya, A., 2016).

Es en base a este concepto que surge el interés de determinar este lugar como área de estudio para este trabajo, pues, por una parte, el BC es un contaminante poco estudiado,

que aún no es contemplado en las estaciones de monitoreo del SINCA, ni en estudios de exposición personal. Por otra parte, la elevada carga contaminante que evidencia Quintero de manera histórica, catalogándola como una Zona de Sacrificio, brindan la motivación para estudiar la exposición personal de contaminantes y la posible influencia de sectores altamente contaminantes como lo son el Complejo Industrial Ventanas.

1.3. Objetivo general.

Caracterizar la variabilidad espaciotemporal de la concentración de carbono negro y $MP_{2,5}$ a nivel calle en la atmósfera de la península de Quintero.

1.4. Objetivos específicos.

1. Medir las concentraciones de BC y MP con diámetro menor a $2,5 \mu\text{m}$ en la atmósfera de la península de la comuna de Quintero, a través de caminatas locales con instrumentos móviles.
2. Comparar los datos obtenidos con los de las estaciones de monitoreo de calidad de aire proporcionados por el Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA)

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los equipos que se utilizaron durante la campaña de monitoreo para realizar las mediciones fueron 4 microetómetros de Aethlabs®: 3 microAeth AE51 y 1 microAeth MA200, y 1 espectrómetro portátil de aerosol GRIMM®: modelo Dust Decoder 11 – D.

2.1. Microetómetros

2.1.1. MicroAeth AE51

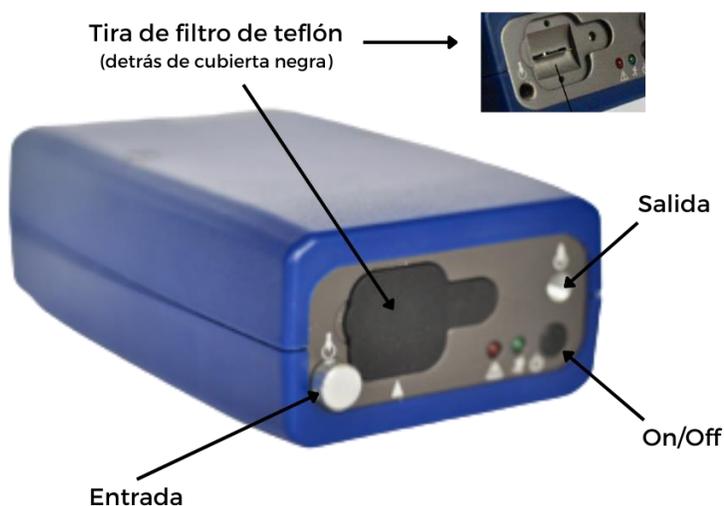


Figura 2. Microetómetro microAeth AE51 (Modificado de Aethlabs, 2016a).

El microetómetro AE51 es un instrumento portátil de alta sensibilidad. Posee la característica de ser pequeño y ligero (280 g), diseñado para la investigación de exposición personal a partículas de BC que se encuentran en el aire en tiempo real (Aethlabs, 2016b).

El principio de funcionamiento del instrumento es de carácter óptico, pues se basa en la atenuación de la luz absorbida por las partículas recogidas en un filtro (de fibra de vidrio de borosilicato recubierto de teflón T60), a partir de la absorción producida en la banda de 880 nm, por un haz de luz LED de 880 nm (Aethlabs, 2016a). Se utiliza esta longitud

de onda para determinar las concentraciones en masa de BC, ya que se considera el supuesto de que el BC es la única partícula que absorbe radiación en esa longitud de onda, por lo que se obtiene la concentración de BC en masa equivalente a la absorción medida (Smith, S.J. y col., 2020), haciendo referencia al término eBC (carbono negro equivalente, sin embargo, de aquí en adelante, por simplicidad se hablará de “BC”).

El equipo toma una corriente de aire mediante una manguera, en intervalos de tiempo y flujo predeterminados y los deposita en un filtro. A medida que la muestra de aerosol es arrastrada a través del medio filtrante por la bomba interna del instrumento, la muestra se va acumulando en el filtro para crear una mancha de 3 mm de diámetro. En el filtro cargado de partículas, el instrumento procede a medir la atenuación de la luz a 880 nm mediante un detector de fotodiodos (Aethlabs, 2016a). Así, el instrumento determina la tasa de cambio de luz transmitida por la deposición de partículas de carbono en el filtro (expresada como atenuación, ATN) y aquella porción adyacente que funciona como referencia, logrando medir el contenido de BC presente en la muestra, y convirtiéndolo en una concentración de masa de BC equivalente (Petzold, A. y col., 2013; Alas, H.D.C. y col., 2020). La acumulación gradual de partículas de BC en el filtro aumenta la densidad óptica de la mancha, lo que conduce a un aumento progresivo de la ATN durante el período de muestreo (Bibi, S., 2017).

Los parámetros de funcionamiento del instrumento, es decir tiempo base (en segundos) y tasa de flujo (en mL/min) se configuran mediante el Software *microAethCOM*, (ver Anexo 1). Durante el funcionamiento, el microprocesador del equipo realiza las mediciones ópticas correspondientes, estabiliza el flujo de aire y calcula la concentración de masa de BC, registrando los datos en la memoria interna del equipo. Dependiendo

de los ajustes operativos, el instrumento presenta la capacidad de funcionar entre 6 y 24 horas continuas (mayor detalle en Anexo 1) (Aethlabs, 2016b).

Dentro de los aspectos a tener en cuenta para el funcionamiento óptimo del instrumento y obtener los mejores datos durante una campaña de muestreo, está el que los diferentes escenarios de medición de BC requieren distintos ajustes de tasa de flujo y tiempo base para un mejor rendimiento y una mejor relación señal – ruido (Aethlabs, 2016a). El fabricante entrega recomendaciones de ajuste para determinar la tasa de flujo y tiempo. Dichos aspectos fueron tomados en cuenta para el diseño de las caminatas de monitoreo de BC que se llevaron a cabo en Quintero. Estas recomendaciones se detallan en el Anexo 1. Sin embargo, a continuación, se mencionan las principales:

- Para la tasa de flujo, se recomienda utilizar tasas de flujo bajas para zonas con altas concentraciones de BC, y, altas tasas de flujo para escenarios de bajas concentraciones de BC donde se requiera una mayor sensibilidad del instrumento.
- El tiempo base establece cada cuántos segundos se desea que el equipo determine la cantidad de BC presente en la muestra de aire tomada. El fabricante recomienda el ajuste de 30 – 60 segundos para la mayoría de los usos de “exposición humana” o “monitoreo ambiental”.
- Aquellas configuraciones con tiempos base más cortos entregan un mayor ruido en cada punto de medición.
- Se recomienda que el instrumento se caliente durante unos 10 – 15 minutos previo al uso, para que pueda equilibrarse con su entorno.

2.1.2. MicroAeth MA200



Figura 3. Microetalómetro microAeth MA200. (Aethlabs, 2018).

El microetalómetro microAeth MA200 es un instrumento de la serie de equipos microAeth MA diseñado para aplicaciones móviles, mediciones manuales y campañas de medición, que mide la concentración de masa de partículas carbonosas que absorben la luz en un aerosol muestreado (Aethlabs, 2018). Este equipo es una versión avanzada del microetalómetro AE51, ya que realiza un análisis de absorción en cinco longitudes de onda (880 nm, 625 nm, 528 nm, 470 nm, 375 nm) en tiempo real, midiendo la tasa de cambio de luz transmitida por la deposición de partículas en el filtro, manteniendo el principio de funcionamiento de los etalómetros. Por una parte, a 880 nm entrega datos sobre la concentración de BC, y, por otra parte, con las cuatro longitudes de onda adicionales, distingue las diferentes formas ópticas de diversas fuentes de combustión: quema de biomasa, humo de madera y tabaco (Aethlabs, 2018).

Comparado con el microAeth AE51, este equipo es de mayor tamaño y peso (420 g). Su sistema de filtro se presenta en forma de una cinta móvil de politetrafluoroetileno (PTFE) con 15 puntos de muestreo. Este equipo realiza un muestreo más detallado debido al GPS integrado, acelerómetro, altímetro/barómetro y sensores de humedad relativa y temperatura (Aethlabs, 2018) (mayor detalle en Anexo 1). Los parámetros de

funcionamiento y ajustes de funcionamiento del instrumento deben configurarse mediante el Software *microAeth Manager* (ver Anexo 1).

Respecto a las recomendaciones del fabricante para un buen funcionamiento del instrumento, según el escenario de estudio, el fabricante menciona los mismos factores que para el microAeth AE51 en términos de los aspectos a considerar al seleccionar la tasa de flujo y tiempo base (detallados en el Anexo 1). Sin embargo, en este caso recomienda un tiempo de 30 minutos para calentar el equipo previo a su uso.

2.1.3. Corrección relación señal/ruido: Algoritmo de reducción de Ruido Optimizado (ONA)

El microetalmómetro puede producir ruido cuando las muestras se recolectan con una frecuencia de tiempo alta o cuando la concentración de BC es baja, afectando la ATN, la cual debería aumentar gradualmente. No obstante, la generación de ruido óptico o electrónico puede dar lugar a períodos en los que los valores de ATN no se modifiquen o disminuyan, provocando valores erróneos de concentraciones o valores sin sentido fisicoquímico. En situaciones en las que las verdaderas concentraciones de BC son relativamente bajas en comparación a la magnitud del ruido, el instrumento entregará datos de concentraciones negativas (Hagler, G. y col., 2011).

Con el fin de resolver el ruido de los datos de los microetalmómetros, la EPA desarrolló un algoritmo para el posterior procesamiento de los datos. Este algoritmo, reduce significativamente el ruido y la aparición de valores negativos. Consiste en utilizar un promedio temporal variable, ajustado en función de la tasa de carga de las partículas en

el filtro, para reducir el ruido en los datos de BC y evitar los valores negativos o extremadamente positivos (Hagler, G. y col., 2011).

2.2. Espectrómetro portátil de aerosol GRIMM®: modelo Dust Decoder 11 – D

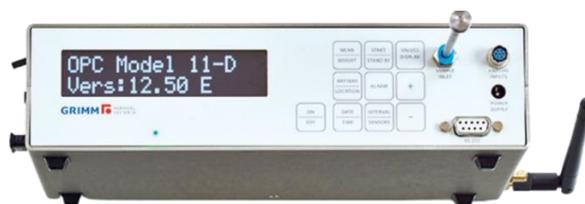


Figura 4. Espectrómetro de aerosoles Modelo 11 – D

El GRIMM 11-D es un espectrómetro de aerosoles de polvo portátil que permite monitorear, en tiempo real, el número de partículas, fracción de masa que ocupan y concentración de MP de una muestra de aire a un flujo constante de 1,2 mL/min en un intervalo de tiempo predeterminado por el usuario (GmbH & Co.KG, 2018). El principio de funcionamiento del instrumento se fundamenta en la dispersión producida por la presencia de partículas sobre un haz de luz láser de diodos al incidir sobre la muestra, tal como se describe en la Figura 5.

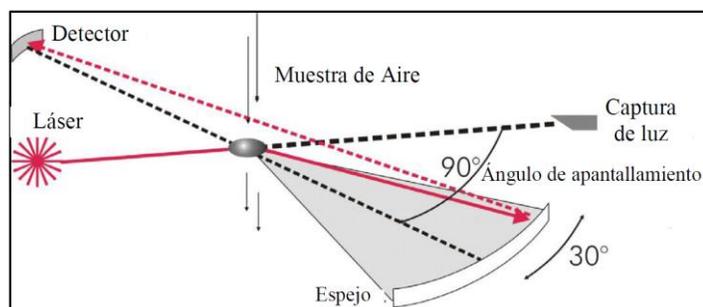


Figura 5. Principio de funcionamiento de espectrómetros de aerosol GRIMM® (GmbH & Co.KG., 2016; Carrasco-Carrasco, P., 2018)

La muestra de aire (que contiene un flujo de partículas) ingresa a la celda de medición y sobre ella incide perpendicularmente un haz de luz cuya fuente es un láser de diodo. La luz dispersada es reflejada por un espejo curvo cuyo ángulo de apertura genera una dispersión de 90°, desviando la luz hacia un diodo receptor dentro de la celda de medición. Posteriormente, el diodo detector clasifica la señal en diferentes canales de tamaño (el equipo dispone de 31 canales de tamaño), en un rango de 0,253 – 35,15 μm de diámetro de la partícula, ya que la intensidad de dispersión de la luz es proporcional a su tamaño. De este modo se puede medir la distribución del tamaño de las partículas. Finalmente, las partículas de la muestra de aire son colectadas en un filtro de PTFE de 47 mm, lo que permite realizar análisis gravimétricos posteriores a las mediciones ópticas en tiempo real (GmbH & Co. KG., 2016; Carrasco-Carrasco, P., 2018). Dentro de las ventajas que presenta este instrumento es en primer lugar, la capacidad de ser portátil, pues es un equipo ligero (1,93 kg con batería) y puede funcionar en base a una batería de litio (Li-Ion 10.8 V 6.8 Ah). En términos de almacenamiento de datos, este puede conectarse a un computador o usar una memoria externa. La información obtenida es posteriormente analizada a través del software GRIMM 1179 V2-07 proporcionado por el fabricante (detalles en Anexo 2) (GRIMM Aerosol Technik, 2018).

2.3. Caracterización del área de estudio

Para una mejor comprensión del área de estudio, se realizó una revisión bibliográfica de la zona, previo al trabajo en terreno. El objetivo de realizar esto recae en el esfuerzo de comprender el contexto tanto social como industrial de la zona, para así diseñar caminatas representativas y coherentes a las problemáticas actuales que existen en la

península de Quintero. En el diseño de las caminatas se consideraron los siguientes criterios:

- A. Contexto industrial de la zona
- B. Régimen de vientos
- C. Calidad del aire: Tendencia de concentraciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10}

Un análisis más detallado de las fuentes emisoras, vientos y las tendencias anuales de la calidad del aire, en términos de MP, se entrega en el Anexo 3.

2.3.1. Contexto industrial de la zona

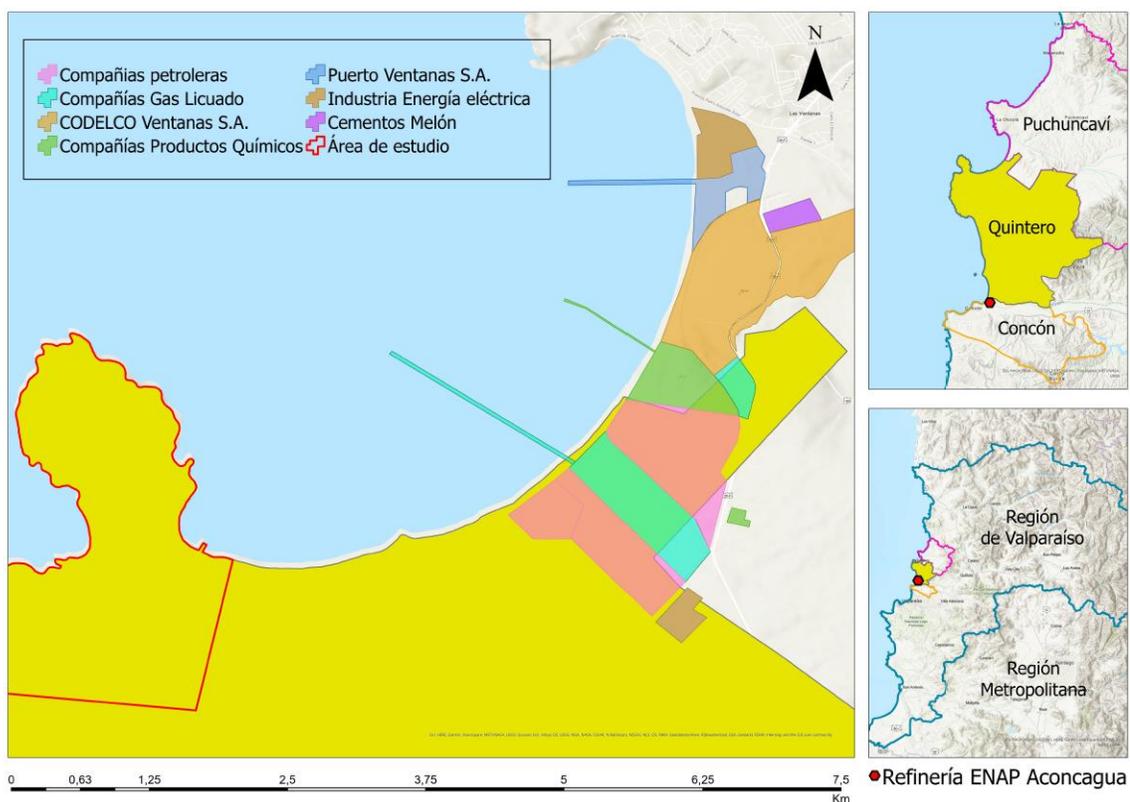


Figura 6. Contexto industrial de la comuna de Quintero

La comuna de Quintero se ubica en el sector costero de la Región de Valparaíso. Al sur se encuentra la comuna de Concón, mientras que al norte se ubica la comuna de Puchuncaví, con la cual componen el complejo industrial Ventanas situado en la bahía de Quintero-Puchuncaví, una de las zonas industriales más importantes del país. Este sector industrial basa sus actividades principalmente en las señaladas en la Figura 6 (mayor detalle en Anexo 3). Examinando lo anterior es que se procedió a establecer el área de estudio. Considerando, en primer lugar, que los instrumentos utilizados se enfocan en estudiar la exposición personal; en segundo lugar, que la zona residencial se concentra en el área peninsular, y por último, que al Este se ubica el complejo industrial Ventanas, se establece como área de estudio la península de la comuna de Quintero señalada en la Figura 6.

2.3.2. Régimen de vientos

El clima del área de estudio corresponde a templado cálido con precipitaciones en los meses de invierno y una estación seca prolongada de seis a ocho meses, comprendiendo las estaciones de primavera, verano y parte del otoño. Las oscilaciones térmicas diarias y estacionales están influenciadas por el dominio oceánico de la zona, dando lugar a temperaturas moderadas (Ahumada-Varela, S., 2016). La ubicación costera, cuenta con vientos predominantes del Oeste durante el día, en dirección “mar-continente”, debido a que el aire caliente en contacto con la superficie continental asciende generando una zona de baja presión, y el aire frío situado en la superficie del mar forma una zona de alta presión, que por diferencia de densidad se desplaza hacia el continente ocupando el espacio que dejó el aire que ascendió. Los vientos Oeste-Este

se desarrollan durante el día, reforzándose esta componente durante la tarde. Al terminar el día, la superficie continental pierde calor con una mayor velocidad que el mar, por lo que el desplazamiento es inverso, en dirección “continente-mar”, predominando los vientos Este durante la noche (Ahumada-Varela, S., 2016).

Una vez establecida el área de estudio, se identificaron las estaciones meteorológicas de la Red Concón-Quintero-Puchuncaví del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) existentes en la comuna de Quintero. Para seleccionar las estaciones para el análisis, se estableció como primer criterio que dichas estaciones se ubicaran dentro del área peninsular de Quintero. Luego, se evaluó el estado de las estaciones seleccionadas, en términos de disponibilidad y actualidad de los datos (específicamente de velocidad y dirección de vientos), para corroborar que estas tuvieran datos de vientos de al menos los últimos tres años. A partir de estos criterios, es que se descartaron las estaciones pertenecientes a la DMC (dada la escasez de datos actuales) y se seleccionaron solo aquellas estaciones del SINCA ubicadas dentro del área de estudio. Así, seleccionadas las estaciones a utilizar para descargar datos de vientos (velocidad y dirección del viento), mediante el uso de R-Studio y el software WRPLOT View™, se evaluó el régimen de vientos para los siguientes períodos:

- a. Dirección y velocidad de vientos horarios, para 3 años: 2019 – 2021.
- b. Dirección y velocidad de vientos para el mes de enero del año 2022 en las estaciones de estudio (incluyendo la “estación experimental” descrita más adelante).

2.3.3. Calidad del aire

Analizados el régimen de vientos y fuentes emisoras que influyen al área de estudio, se procedió a evaluar las tendencias de los contaminantes de interés para un período de 3 años consecutivos (2019 – 2021), esto con el fin de conocer la distribución horaria, mensual y por días de la semana, para así tener una idea de los comportamientos presentes al momento de ir a realizar las caminatas (para un mayor detalle de los resultados, ver Anexo 3). Con lo observado en el análisis de la distribución horaria de los contaminantes (ver Figura 12), fue posible definir el horario en el que se llevaron a cabo las caminatas.

2.4. Diseño de las caminatas

Una vez caracterizada el área de estudio, se procedió a diseñar las rutas a realizar en cada caminata. La decisión se basó en definir rutas representativas considerando la ubicación de las potenciales fuentes emisoras a nivel industrial, el régimen de vientos y la distribución del MP a lo largo de la península durante el período de 2019 – 2021. Otro factor determinante al momento de diseñar las rutas fue la cantidad de instrumentos disponibles. Al tener 4 microetómetros disponibles y 1 GRIMM 11-D, se debían diseñar como máximo 4 rutas, para así poder realizarlas de manera simultánea y que cada persona llevara un microetómetro al caminar. El GRIMM 11-D por su parte, se fue alternando en las distintas rutas, teniendo en cuenta el realizar mediciones en las 4 rutas al menos una vez.

En primer lugar, se seleccionó el punto de inicio y término. Para este se buscó un lugar céntrico y de fácil acceso. El lugar elegido fue la Plaza Ignacio Carrera Pinto (ubicación

descrita en Figura 21. Mapa de lugares de Quintero). Desde este punto, se comenzaron a trazar las rutas mediante el uso de la plataforma *MyMaps* de Google. Dentro de las consideraciones que se tuvieron al momento de dibujar las rutas, fue en primer lugar que estas pasaran por las estaciones del SINCA contempladas para este estudio. Por otra parte, se buscó que estas tuvieran una duración de aproximadamente 45 – 60 minutos. Finalmente, al momento de trazar las rutas, se decidió que estas abarcaran todas las componentes de viento, más allá de solo las predominantes, esto ya que al ser caminatas de 60 minutos se podían presentar episodios cortos de componentes de viento distintas a aquellas observadas en la Figura 10. A partir de lo anterior, se diseñaron 4 rutas con inicio y término en la plaza Ignacio Carrera Pinto. La Ruta 1 abarcó la zona SE de la península y pasó por la estación de monitoreo de calidad del aire del SINCA: Centro Quintero. La Ruta 2 comprendió el sector NE del área de estudio. La Ruta 3 por su parte, se diseñó con el objetivo de cubrir el área NO de la península, pasando además por la estación del SINCA: Quintero. Finalmente, la Ruta 4 contempló el sector SO. Esto se puede observar, con mayor detalle, a continuación, en la Figura 7.

2.5.1. Intercomparación de los equipos en laboratorio

Con el objetivo de asegurar mediciones congruentes de concentraciones al momento de desarrollarse las caminatas en terreno, el día 06 de enero de 2022 se llevó a cabo una primera intercomparación de los microetómetros AE51 durante 4 días en condiciones de laboratorio, dentro del laboratorio de química ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, utilizando un flujo de 50 mL/min con mediciones cada 30 segundos. La intercomparación de los microetómetros AE51 en condiciones de laboratorio se muestra a continuación:



Set fotográfico 1. Proceso de intercomparación de microetómetros AE51 en laboratorio.

2.5.2. Intercomparación de los equipos en condiciones de terreno

Una segunda intercomparación se llevó a cabo en el Campus Juan Gómez Milla de la Universidad de Chile, para evaluar el comportamiento de los instrumentos frente a condiciones de terreno. Para esta intercomparación las condiciones utilizadas fueron: flujo 100 mL/min y tiempo de medición cada 10 segundos. El cambio de ajuste en las condiciones se justifica en que esta intercomparación se realizó durante 3 horas, donde se estuvo en constante movimiento, por lo que era importante que para obtener mediciones correctamente, se tuviese un mayor flujo de entrada y la toma de muestra se realizara con mayor frecuencia, pero siempre manteniendo una buena relación señal/ruido. Específicamente durante esta intercomparación se hizo una prueba para determinar que los tres microetómetros AE51 estuviesen identificando fuentes de igual manera y en magnitudes similares. Para esto, se realizó el experimento de medir las concentraciones de BC provenientes de un cigarro. Por ende, se prendió un cigarro a las 13:58 hrs. y se cronometró el tiempo de combustión de este: 7 minutos y 10 segundos, lo cual se visualizó de manera gráfica, una vez finalizada la intercomparación, en el *Dashboard* disponible en el sitio web de Aethlabs.

2.6. Campaña de monitoreo

El trabajo en terreno se realizó en Quintero, a través de una Campaña de monitoreo organizada por la Universidad del Desarrollo, específicamente el proyecto “Envirohealth Data Observatory” de la Facultad de Ingeniería, junto a diversos investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile, el equipo (CR)2 y la Municipalidad de Quintero.

Se realizaron tres visitas de dos días cada durante el período del 6 al 27 de enero de 2022. La primera visita se enfocó en conocer el lugar de trabajo proporcionado por la Municipalidad de Quintero, el cual fue el Departamento de Medio Ambiente. Por otra parte, se instaló una estación meteorológica experimental. La segunda visita se enfocó en establecer la tasa de flujo y tiempo base que mejor se adaptaran a la situación en terreno y realizar las primeras caminatas. En la última visita se desarrollaron las caminatas finales.

2.6.1. Instalación de estación meteorológica: “Estación experimental”

La estación meteorológica se instaló el 11 de enero de 2022 y se mantuvo en funcionamiento hasta el 27 de enero de 2022. Se compuso de sensores para temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección de vientos, y precipitaciones. Su ubicación se indica en la Tabla 2. La información obtenida a partir de esta estación se utilizó para el estudio del régimen de vientos de Quintero, descrito previamente y, para el análisis de vientos en cada caminata.

Tabla 2. Ubicación “Estación experimental”

Estación Experimental		
	Este	Norte
Coordenadas UTM WGS84 Huso 19S	263.333	6.370.076
Elevación (m.s.n.m.)	11	



Figura 8. Instalación estación meteorológica: "Estación Experimental"

2.6.2. Determinación de la tasa de flujo y tiempo base *in situ* en el área de estudio

En la segunda visita a Quintero, con el fin de determinar el tiempo base y la tasa de flujo óptima para el estudio de la península de Quintero, se realizó una Caminata Experimental que tuvo una duración de aproximadamente 2 horas, y consistió en fijar la variable "tiempo base" en 10 segundos, e ir variando la tasa de flujo. Así, se caminó durante 2 horas con los 3 microetómetros AE51, donde cada uno se configuró con una tasa de flujo diferente (ver Tabla 3).

Tabla 3. Tasa de flujo que se utilizó para cada microetalmómetro AE51

Microetalmómetro AE51	Tiempo base (s)	Tasa de flujo (mL/min)
AE51-S3-422	10	50
AE51-S3-424	10	150
AE51-S4-603	10	100

Una vez realizada la Caminata Experimental, se compararon los valores de atenuación (ATN) y concentración de BC obtenidos por los 3 microetalmómetros (ver Anexo 4). En primer lugar, se compararon los valores de ATN para corroborar que esta presentara un aumento gradual de sus datos. Por otra parte, se compararon las concentraciones de BC obtenidas por cada equipo. El detalle se presenta en el Anexo 4. A partir del análisis, se establecieron los ajustes de tasa de flujo y tiempo base que mejor se adaptaron para llevar a cabo las caminatas en la península de Quintero.

Respecto al microetalmómetro MA200, considerando que las caminatas se realizaron de manera simultánea y tenían por objetivo determinar el mismo contaminante en cada ruta, se decidió utilizar el mismo ajuste de parámetros definidos para los microetalmómetros AE51.

Tabla 4. Configuraciones de los microetalmómetros para el desarrollo de las caminatas

Microetalmómetros	Tiempo base (s)	Tasa de flujo (mL/min)
AE51-S3-422	10	100
AE51-S3-424		
AE51-S4-603		
MA200		

2.6.3. Desarrollo de las caminatas

Las caminatas se desarrollaron los días 11, 12, 25, 26 y 27 de enero de 2022 en los horarios de 12:00 y 18:00 hrs., obteniendo un total de 7 caminatas. Cabe mencionar que previo al desarrollo, se sincronizó cada equipo con la hora local. Así, en cada una, se

hicieron las 4 rutas de manera simultánea con la ayuda de 8 personas para cada caso, utilizando los 4 microetómetros portátiles (1 microAeth MA200 y 3 microAeth AE51) y el GRIMM 11-D para monitorear de manera continua y en tiempo real las concentraciones de BC y MP, respectivamente. Tanto la selección del microetómetro y la ruta indicada para cada dupla fueron determinadas, de manera aleatoria, al momento de realizarse las caminatas (ver registro completo de las actividades en Anexo 5). Así, cada caminata se desarrolló de la siguiente manera:

1. El grupo se juntaba en el punto inicial (Plaza Ignacio Carrera Pinto).
2. Se ponían los instrumentos en un mismo punto y se encendían para realizar una intercomparación durante 15 minutos previo a las caminatas (ver Figura 9). Es importante destacar que antes de situar los instrumentos para la intercomparación, se cambiaba el filtro de los microetómetros AE51 previo a encender los equipos. Esto se realizó para cada caminata con el fin de evitar la acumulación de partículas en el filtro y así disminuir el sesgo de las señales de concentración de BC. Lo anterior ya que según indica Good, N. y col. (2016) una carga elevada del filtro disminuye el recorrido óptico efectivo y hace que la derivación de la concentración de BC no sea fiable.
3. Mientras tanto, se distribuían las 4 rutas y se le señalaba a cada dupla que escogiera un microetómetro (dejando registro de esto) y una ruta. Cabe destacar que, en el caso del GRIMM 11-D, la ruta a monitorear venía predeterminada, por lo indicado previamente.
4. Pasados los 15 minutos de intercomparación previa, cada dupla tomaba su instrumento y se iniciaban las caminatas al mismo tiempo. Las rutas se grabaron con los teléfonos móviles.

- Una vez que todos llegaban al punto final (mismo que punto inicial), se situaban los instrumentos en un mismo lugar y se dejaban midiendo 15 minutos más, lo que se denominó la intercomparación de equipos post-caminata (ver Figura 9)

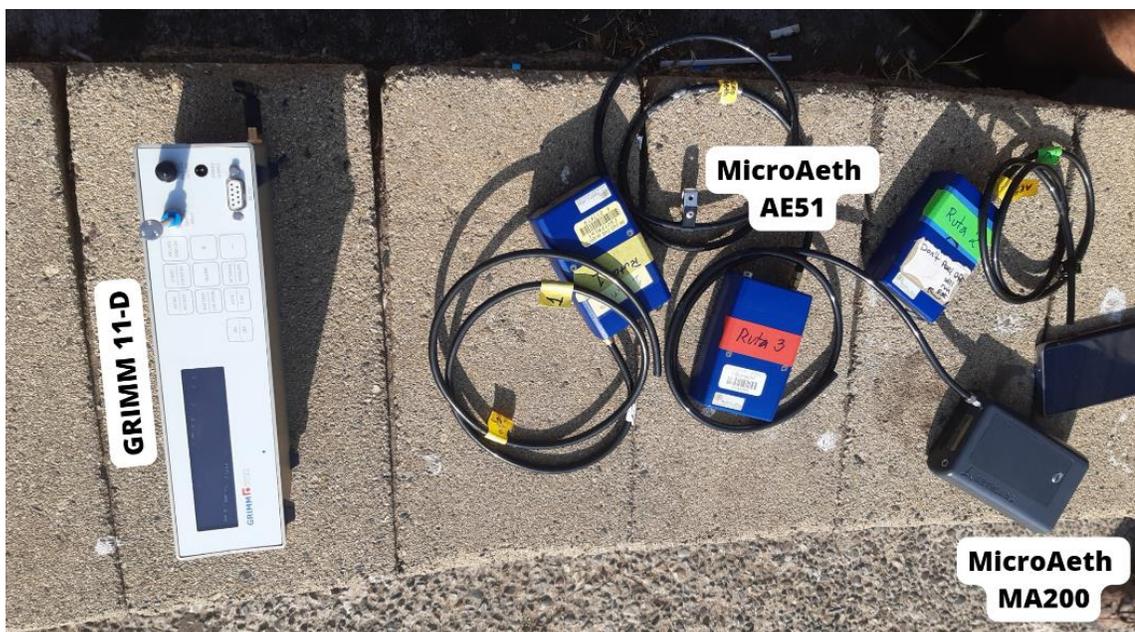


Figura 9. Instrumentos en proceso de intercomparación previo al desarrollo de las caminatas

2.7. Tratamiento de datos

Posterior a las caminatas, los datos obtenidos por ambos microetómetros fueron corregidos en base al ruido y la atenuación. En general, dada la naturaleza semicontinua de las mediciones, existen fluctuaciones a corto plazo en los datos que producen ruido (Hagler, G. y col., 2011). Por otra parte, la atenuación (ATN) es naturalmente creciente, debido a que las partículas se acumulan en el filtro. Sin embargo, cuando las muestras se toman a tasas muy altas o cuando la concentración de BC es muy baja, sucede que los valores de ATN pueden permanecer iguales o disminuir, lo que lleva a un error de

cálculo de BC, existiendo la posibilidad de obtener concentraciones negativas sin sentido fisicoquímico.

Considerando evitar lo anteriormente mencionada, con el fin de validar los datos obtenidos, en primer lugar, se utilizó el criterio de la ATN. Por lo tanto, previo a la corrección ONA, se analizaron los datos de ATN para cada caminata y se descartaron aquellos períodos de medición en los que se observó una disminución de la ATN, dado que esto era resultado de un problema instrumental y estaría reflejando valores inválidos de concentraciones de BC. En general, esta tendencia se observó al inicio de las caminatas, por lo que se asoció a una falta de ambientación con el entorno por parte de los microetómetros. En segundo lugar, con el fin de corregir el ruido de los datos previamente validados (en términos de ATN) y evitar valores de concentraciones de BC negativos o extremadamente positivos (Hagler, G. y col., 2011), se realizó un procesamiento posterior de los datos de concentraciones de BC en el *Dashboard* de la plataforma entregada por *Aethlabs* en su página web. Para la corrección, se utilizó como tipo de suavizado de datos, el Algoritmo de reducción de Ruido Optimizado (ONA) propuesto por la EPA, con un factor de suavizado de la atenuación de $\Delta ATN = 0,01$. Por último, se realizó una tercera revisión de las concentraciones de BC obtenidos, verificando que no existieran valores negativos. Este procedimiento se realizó para los resultados obtenidos por ambos modelos de microetómetros.

Una vez validados los datos, se llevó a cabo el análisis de estos a través de representaciones gráficas, comparaciones entre BC y MP, rosas de viento y mapas de interpolación. Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos y de la relación BC/MP de las concentraciones obtenidas. Para lo anterior, se utilizó Excel; el programa de análisis de datos IGOR Pro; R-Studio, específicamente, el paquete

“Openair” (Carslaw & Ropkins, 2012); Google Earth; WRPLOT View™ para la construcción de las rosas de viento; y, por último, para la elaboración de los mapas, se utilizó el programa ArcGIS Pro y su herramienta geoestadística “Geostatistical Wizard” para modelar los datos espaciales.

La ventaja que presenta el uso de herramientas geoestadísticas es que se utilizan para describir y modelar patrones espaciales, predecir valores en lugares no medidos y evaluar la incertidumbre asociada a un valor predicho en aquellos lugares no medidos. Esto es especialmente útil en el análisis de datos atmosféricos, la exploración petrolera y minera, el análisis medioambiental, la agricultura de precisión y los estudios de pesca y vida silvestre (ArcGIS Geostatistical Analyst, s.f.). La herramienta “Geostatistical Wizard” construye un modelo de interpolación de superficies óptimas a partir de datos de muestras, y evalúa el rendimiento de sus predicciones para desarrollar el modelo adecuado (ArcGIS Geostatistical Analyst, s.f.).

2.7.1. Relación BC/MP

Considerando que el BC es un subproducto de la combustión, que forma parte de la composición del MP (mayoritariamente el material particulado fino $MP_{2.5}$) emitido tanto por fuentes antropogénicas y naturales. La razón BC/MP, puede aportar información sobre la composición de cada fracción de MP, en relación a la cantidad de BC contenida en estas. Adicionalmente, puede entregar información sobre las fuentes y tendencias.

Así, tal como se mencionó, para cada una de las rutas acompañadas del equipo GRIMM, se obtuvo esta relación, con el fin de analizar la composición porcentual de BC en las fracciones de MP_1 y $MP_{2.5}$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del área de estudio

A partir de los criterios señalados para la selección del área de estudio y posterior diseño de las caminatas, una vez identificadas las industrias cercanas al área de estudio: península de la comuna de Quintero (detalladas en el Anexo 3), se seleccionaron las estaciones con parámetros meteorológicos de la Red Concón-Quintero-Puchuncaví del SINCA, junto con estaciones de la DMC para analizar el régimen de vientos de la zona. Las estaciones seleccionadas para el análisis fueron la Estación Quintero y Estación Centro Quintero, ambas pertenecientes al SINCA. Respecto a la estación de la DMC ubicada dentro del área: Estación Quintero (Estación Aeronáutica), registra datos hasta 1982, por lo que no cumple con el criterio de disponibilidad de datos actuales.

A continuación, en la Tabla 5, se detalla la ubicación de cada estación utilizada para el análisis, junto con la elevación y distancia entre sí.

Tabla 5. Características de estaciones de monitoreo ubicadas en el área de estudio (SINCA, 2022).

Estación	Coordenadas UTM WGS84 Huso 19S		Elevación (m.s.n.m.)	Distancia entre estaciones (Km)
	Este	Norte		
Quintero	262.853	6.369.407	71	1,7
Centro Quintero	262.528	6.371.109	38	

Considerando lo anterior, se tomaron los datos meteorológicos de las estaciones presentadas en la Tabla 5, específicamente el régimen de vientos, para analizar el comportamiento de los vientos predominantes en la península de Quintero, según los períodos seleccionados:

3.1.1. Datos de dirección y velocidad de vientos horarios para 2019 – 2021.

A partir de la Figura 10, se observa que dentro del área de estudio los vientos tienen comportamientos bastante similares a lo largo de toda la península, tanto en dirección como velocidad. En ambas estaciones, los vientos provienen en su mayoría del Sur y Oeste, con una mayor frecuencia de vientos SO y con menor predominancia de vientos NE, además, se observa la ausencia de vientos N. Por otra parte, la estación Quintero presenta una velocidad media de 2,23 m/s y la estación Centro Quintero 2,24 m/s.

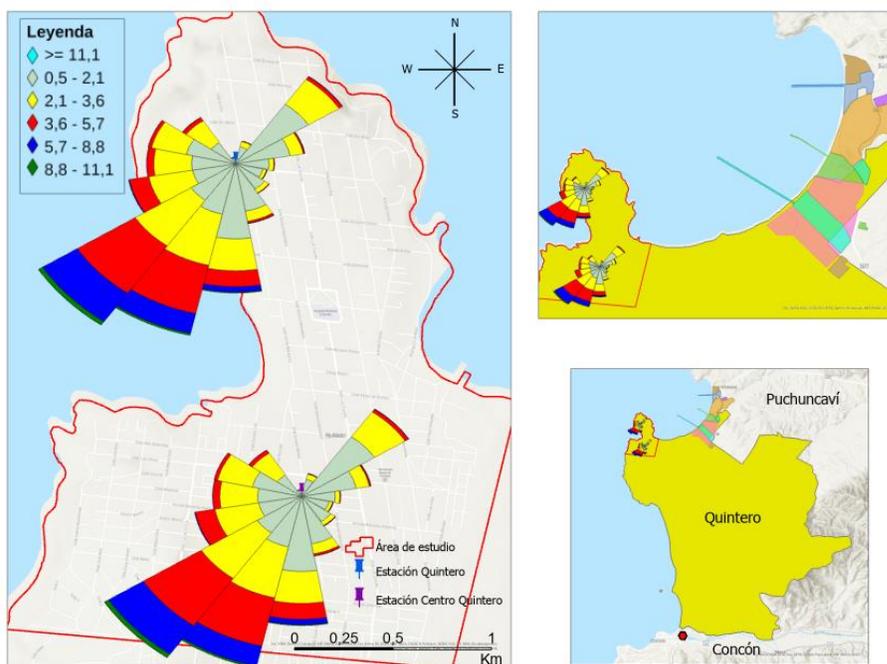


Figura 10. Régimen de vientos en la península de Quintero (2019 - 2021)

3.1.2. Datos de dirección y velocidad de vientos para el mes de enero del año 2022 en las estaciones de estudio.

Por otra parte, para el estudio específico del comportamiento de los vientos durante enero de 2022, mes en el que se desarrollaron las caminatas, se tiene la Figura 11.

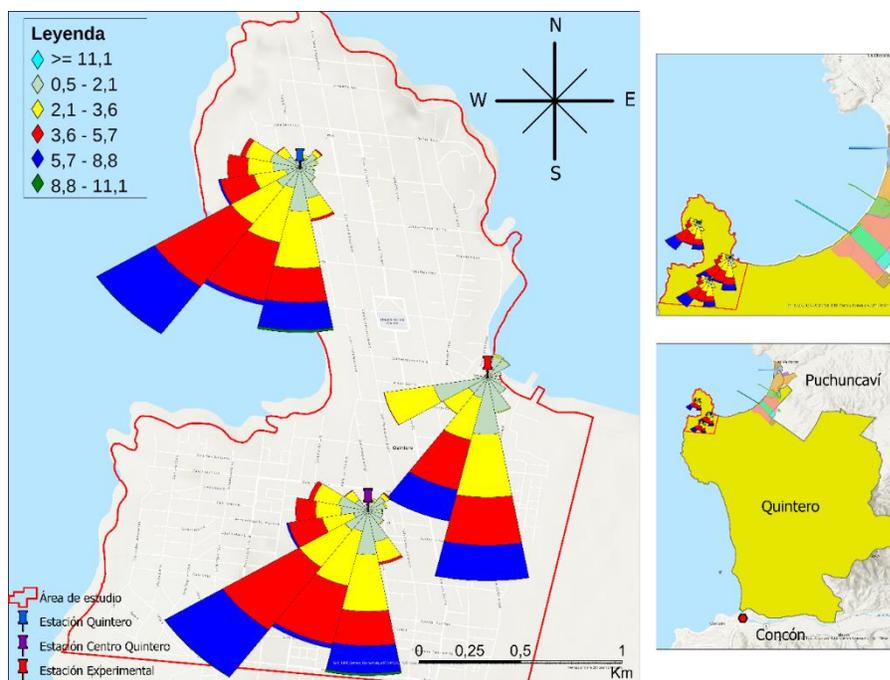


Figura 11. Régimen de vientos en la península de Quintero durante enero 2022.

La Figura 11 incluye, además, los datos de vientos registrados por la “Estación Experimental” para así comparar los vientos costeros y aquellos en altura registrados por las estaciones del SINCA. De esta figura, se desprende que la tendencia de vientos en las tres estaciones es bastante similar tanto en dirección y velocidad, predominando los vientos de las componentes S y O, y presentando velocidades medias de 3,0 m/s para la estación Quintero; 3,1 m/s la estación Centro Quintero y 2,4 m/s para el caso de la estación Experimental. Un mayor detalle de los vientos en el área de estudio se entrega en el Anexo 3. Caracterización del área de estudio. Conociendo el régimen de

vientos de la península, se procedió a comparar estos, de manera preliminar, con lo expuesto en la Figura 6. Del análisis de vientos, se desprende que aparentemente el impacto de la refinería de Concón podría ser menor, en comparación con aquel resultante del sector industrial próximo a la península de Quintero. Esto debido a la frecuencia de vientos provenientes de esa dirección y la distancia (15 km desde la estación más cercana, Centro Quintero, a la refinería). Por otra parte, en el caso del complejo industrial, este se considera como un foco de fuentes emisoras que afectan a la península de Quintero, pues desde la estación Quintero a la industria ubicada al sector Oeste del complejo hay 3,8 km de distancia, mientras que la estación experimental se ubica aproximadamente a 2,8 km.

Respecto al criterio de calidad del aire, en términos de MP_{10} y $MP_{2,5}$, considerado para tener una perspectiva del comportamiento de estos al momento de ir a realizar las caminatas, las tendencias de los contaminantes de interés en el período de 2019 – 2021, se presentan a continuación en la Figura 12.

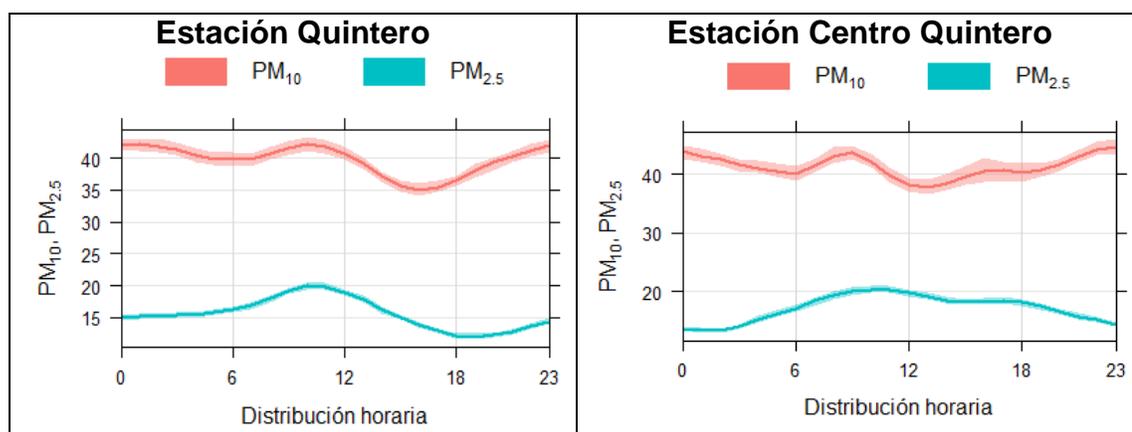


Figura 12. Distribución horaria de MP en estaciones Quintero y Centro Quintero (2019 – 2021)

En la Figura 12, se observa que el comportamiento de MP_{10} y $MP_{2,5}$ no es igual para ambas estaciones. Por una parte, las concentraciones de MP monitoreadas por la estación Quintero tienden a alcanzar un máximo entre las 9:00 y 12:00 hrs, tanto para MP_{10} y $MP_{2,5}$, y disminuyen a lo largo del día alcanzando un mínimo cercano a las 17:00 hrs. en el caso del MP_{10} y a las 18:00 hrs para el $MP_{2,5}$. En el caso de la estación Centro Quintero, se repite la tendencia de un máximo de concentración 9:00 – 12:00 hrs, sin embargo, las concentraciones no disminuyen hacia las 18:00 hrs, más bien, comienzan a disminuir durante la noche, y el mínimo se evidencia durante la madrugada.

3.2. Intercomparación de los microetómetros AE51

A continuación, se presentan los resultados de las intercomparaciones realizadas en laboratorio y en condiciones de terreno de los microetómetros AE51. Los datos se presentan sin el algoritmo de corrección de ruido ONA, y luego con corrección. Para el caso de los datos post-procesados con el algoritmo de reducción de ruido ONA descrito por Hagler, G. y col. (2011), se utilizó un factor de suavizado de ΔATN de 0,01.

3.2.1. Intercomparación en laboratorio

La Figura 13 muestra el coeficiente de correlación de Pearson, histogramas y dispersión de los datos crudos, es decir sin la corrección ONA, obtenidos durante la intercomparación de equipos realizada al interior del laboratorio de química ambiental de la Facultad de Ciencias utilizando los tres microetómetros AE51.

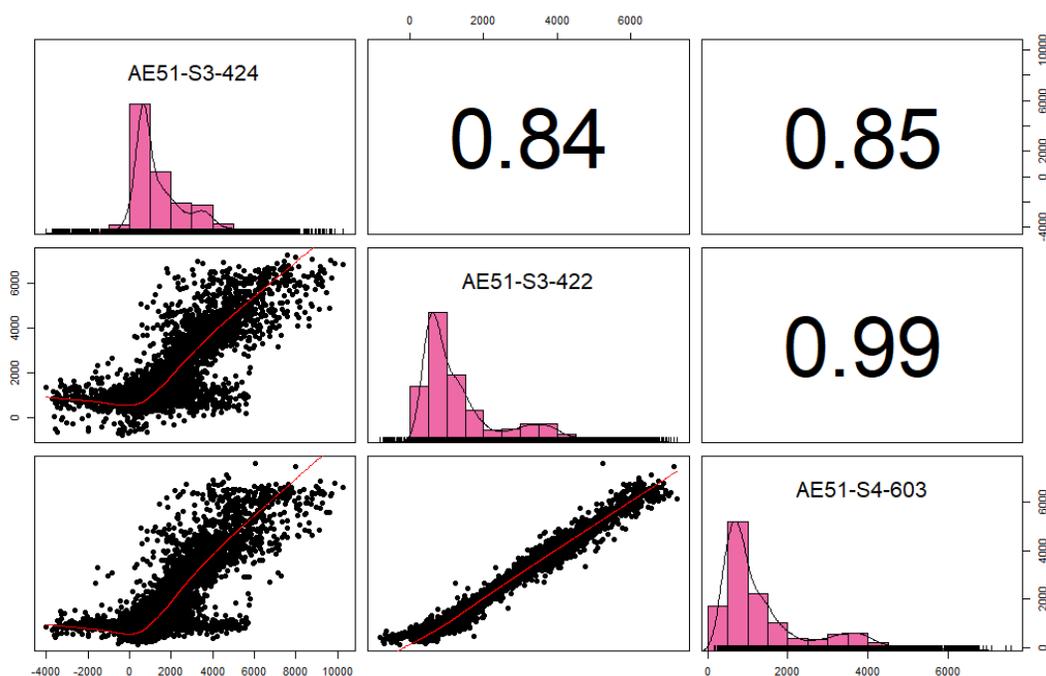


Figura 13. Correlación microetalómetros AE51 sin corrección ONA

A partir de la intercomparación, es posible observar una alta correlación de los datos entre los tres instrumentos con valores de r de Pearson en el rango de 0,84 – 0,99. Los microetalómetros AE51-S3-422 y AE51-S4-603 presentaron una mayor correlación ($r = 0,99$). Por otra parte, tanto la correlación del instrumento AE51-S3-422 y AE51-S4-603 con el etalómetro AE51-S3-424 presentan factores de correlación de Pearson más lejanos a 1. Es decir, existe una tendencia a factores de correlación menores al asociarse con el microetalómetro AE51-S3-424.

En la Figura 14, con el fin de mejorar la resolución temporal de los datos y disminuir el ruido, se presentan los datos con la corrección de ruido ONA, con un umbral de atenuación de 0,01 ($0,01 = \Delta ATN$), a los datos crudos de concentraciones de BC, obtenidos durante la intercomparación en laboratorio de los microetalómetros AE51.

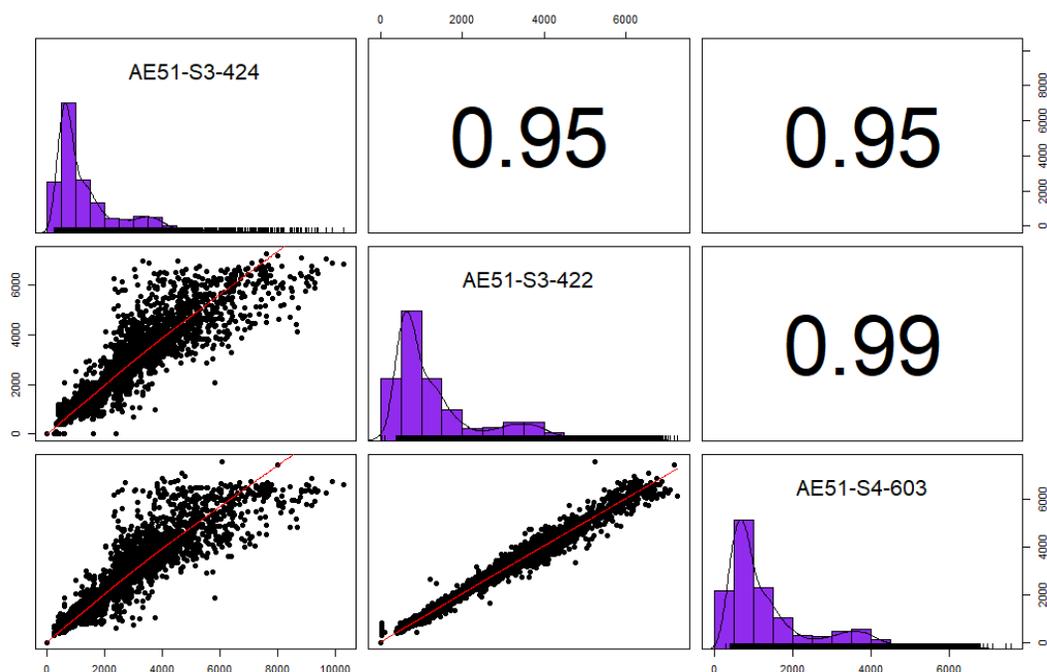


Figura 14. Correlación microetalómetros AE51 con corrección ONA (factor de corrección: 0,01Δ)

Comparando los factores de correlación de Pearson con aquellos de la Figura 13, es posible notar un aumento de 0,10 en dos de tres de los factores de correlación, justamente aquellos que relacionan las concentraciones del instrumento AE51-S3-424 con el AE51-S3-422 y AE51-S4-603, respectivamente. Por lo tanto, se evidencia que aplicando la corrección ONA a los datos entregados por los microetalómetros existe una mejoría en los valores entregados y una mayor correlación entre instrumentos. Esto es esperable, puesto que la corrección del algoritmo ONA ajusta los datos de concentraciones de BC mediante un promedio en tiempo variable de estos, que permite reducir el ruido en los datos y, por ende, mejorar la resolución temporal. Además, reduce la aparición de valores de concentraciones negativas (Hagler, G. y col., 2011).

La Figura 15 muestra la respuesta cruda de concentraciones de BC para el período de intercomparación en laboratorio de 3 días de los microetalmómetros AE51 en condiciones óptimas.

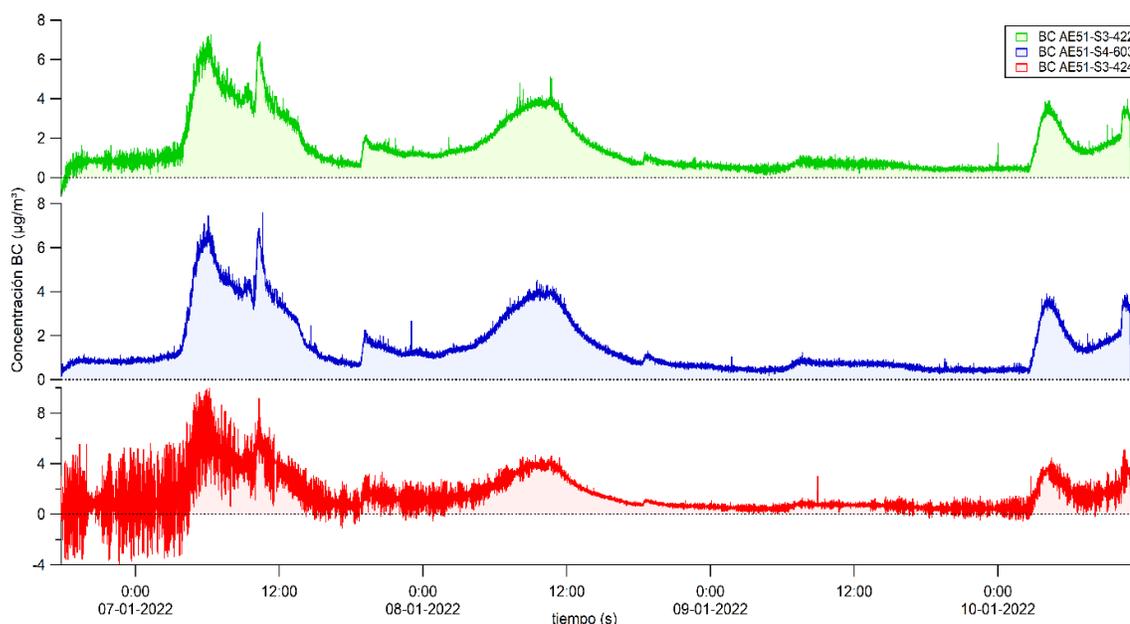


Figura 15. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en laboratorio de microetalmómetros AE51 - sin corrección ONA

Las concentraciones crudas de BC entregadas por los equipos presentaron valores negativos junto con una señal con un mayor ruido instrumental, a pesar de que las tres series presentaron un comportamiento similar frente al rango de concentraciones estimadas de carbono negro $[0 - 8] \mu\text{g}/\text{m}^3$. La serie del etalómetro AE51-S3-424 presenta una mayor proporción de ruido instrumental durante las primeras horas de mediciones, lo cual se relaciona con la Figura 13, explicando los menores valores de factor de correlación de Pearson en comparación a los de los otros microetalmómetros.

En la Figura 16 se aplica la corrección ONA a las concentraciones de carbono negro de la intercomparación en laboratorio de los microetalmómetros AE51.

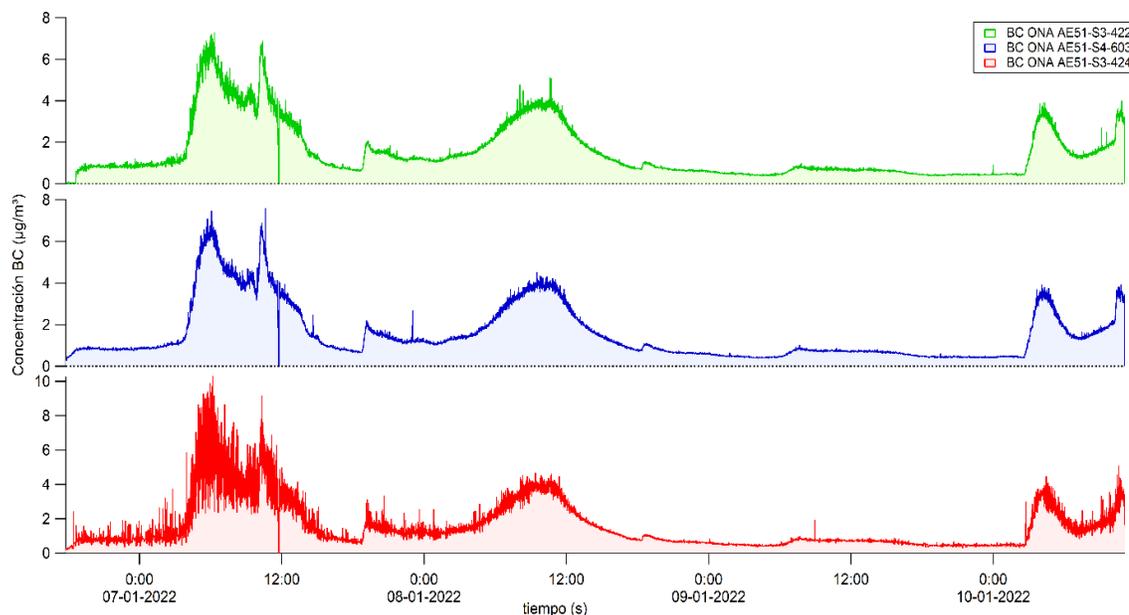


Figura 16. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en laboratorio de microetalmómetros AE51 - con corrección ONA.

Al aplicar la corrección ONA a los datos de concentraciones de BC determinadas por los microetalmómetros AE51, se observa que el método de corrección ONA de Hagler, G. y col. (2011) permite corregir los valores negativos de concentraciones. Junto a esto, se observa, en general, una disminución del ruido de las señales de los tres instrumentos. Además, específicamente el etalómetro AE51-S3-424, disminuye notoriamente las fluctuaciones observadas en las primeras horas de medición. Lo cual explica el aumento en los factores de correlación de Pearson de este equipo específicamente.

3.2.2. Intercomparación en condiciones de terreno

La Figura 17 describe la correlación de los datos ya corregidos de concentraciones de BC entre los tres microetalmómetros AE51.

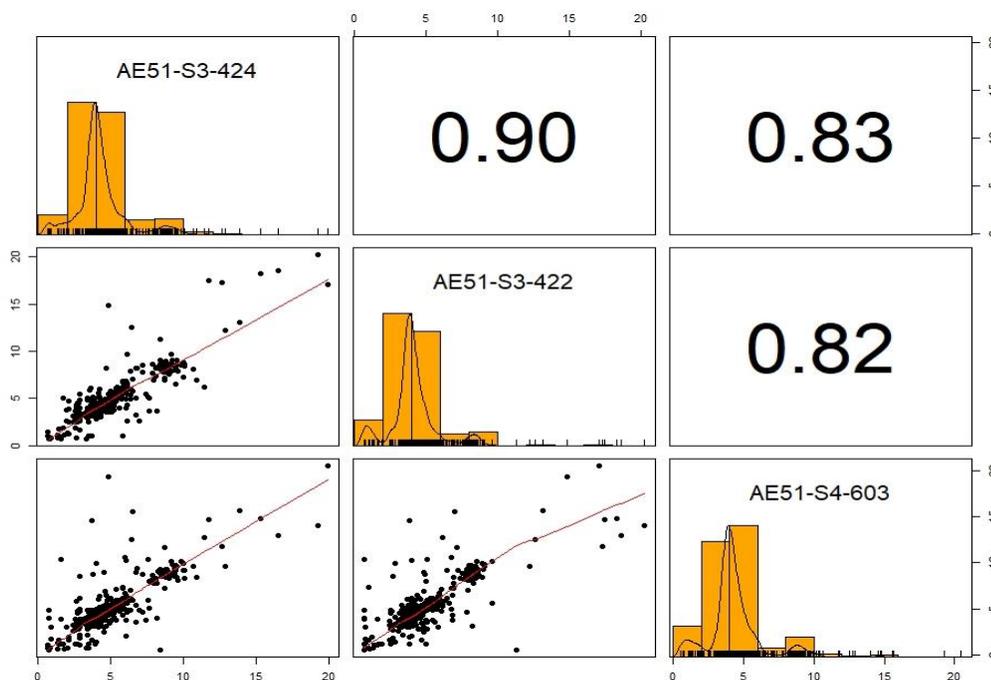


Figura 17. Correlación microetalmómetros AE51 en terreno con corrección ONA

En contraste con la intercomparación en laboratorio, para este caso se observa una menor, pero aun así alta, correlación de los datos entre los tres microetalmómetros, con un rango de 0,82 – 0,90 para el r de Pearson. Así, los microetalmómetros AE51-S3-424 y AE51-S3-422 presentan la mayor correlación, con un factor de correlación de Pearson de 0,90. Por otra parte, tanto la correlación entre el microetalmómetro AE51-S3-422 y AE51-S3-422 con el AE51-S4-603 presentan valores más alejados a 1. Otro aspecto interesante es la variación del rango, a diferencia de los valores obtenidos en la

intercomparación en laboratorio ([0,95 – 0,99]); en terreno los datos presentan una mayor dispersión, esto podría ser dado que, en este caso existen interferencias ambientales que pueden producir mayores variaciones en los datos. No obstante, cabe mencionar que, los datos se relacionan entre sí, por lo que son comparables. La Figura 18 muestra las series de tiempo de las concentraciones de BC asociadas a la intercomparación en terreno.

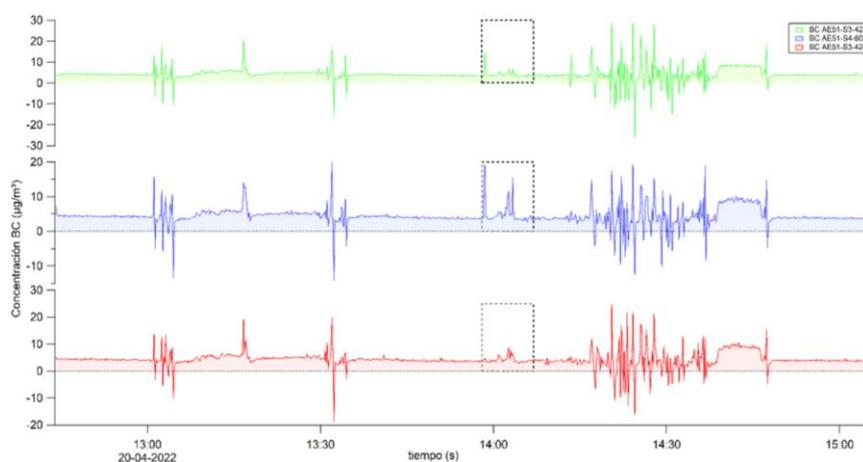


Figura 18. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en terreno de microetalómetros AE51 - sin corrección ONA

Se observa un aumento en el rango de concentraciones presentados por los microetalómetros. Sin embargo, se evidencia un menor ruido en las señales de los tres equipos, esto ya que se consideró un mayor tiempo para el proceso de intercomparación y ambientación de los instrumentos en contraste con la intercomparación en laboratorio. Por otra parte, en la Figura 19 se aplica la corrección ONA a los datos obtenidos en las series de tiempo de las calibraciones en terreno de los instrumentos.

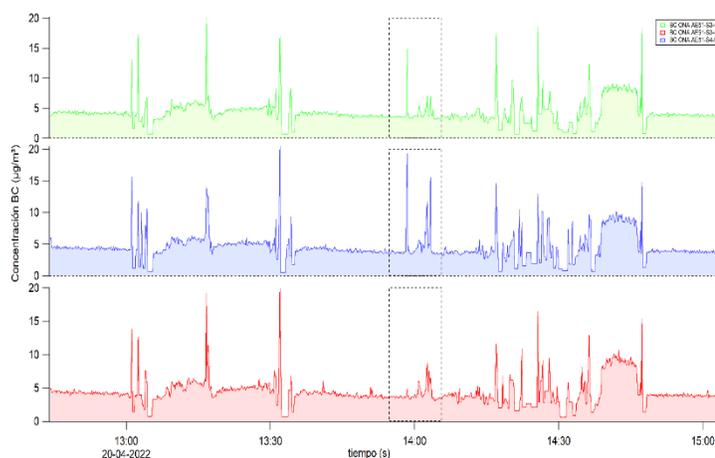


Figura 19. Concentraciones de carbono negro (BC) de la intercomparación en terreno de microetálómetros AE51 - con corrección ONA

Observando los rangos de concentraciones, una vez aplicada la corrección ONA, los tres instrumentos presentan concentraciones de BC $[0 - 20] \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se corrigen los valores de concentraciones negativas, por lo que se evidencia que el método de corrección ONA de Hagler, G. y col. (2011) muestra efectos significativos en el suavizado de valores. Sin embargo, es importante, observando los datos, distinguir que al corregir los datos se tiene una disminución en las concentraciones que podrían estar omitiendo información de cambios microambientales, consideración que se debe tener de aquí en adelante al analizar los valores obtenidos en cada caminata.

Al realizar mediciones en terreno, se evidencia además una mayor variación en las concentraciones a lo largo del tiempo en contraste con la intercomparación realizada en laboratorio. Cabe destacar que al comparar las tres series de tiempo, en general la tendencia es muy similar, a excepción del recuadro señalado en la Figura 19. Dicho recuadro representa un experimento dentro de la intercomparación, donde se prendió un cigarro y se cronometró el tiempo de combustión de este (ver Tabla 6).

Tabla 6. Experimento durante la intercomparación en terreno

Fuente de emisión	Hora	Duración
Cigarro	13:58	7 minutos 14 segundos

Es posible observar que el equipo AE51-S3-424 presenta menores valores de concentraciones de BC para el experimento del cigarro, seguido por AE51-S3-422 y AE-S4-603. Sin embargo, es importante destacar la posibilidad de que la manguera de cada uno de estos equipos no estuviese en la misma dirección, por lo que podría ser que el flujo de entrada del humo del cigarro en cada uno de los equipos no fuese el mismo.

3.3. Mapas de interpolaciones de concentraciones de BC

Para esta sección, se exponen las representaciones espaciotemporales de las concentraciones de BC, junto con los parámetros meteorológicos y valores estadísticos para cada caminata realizada. Mena-Carrasco, M. y col. (2014) ejecutaron el modelo WRF-Chem en Santiago, Chile para estimar el impacto antropogénico de los aerosoles en el balance radiativo y en los parámetros meteorológicos. En este, modelaron las emisiones de carbono negro y su transporte en el centro de Chile a nivel superficial. El modelo se presenta a continuación en la Figura 20.

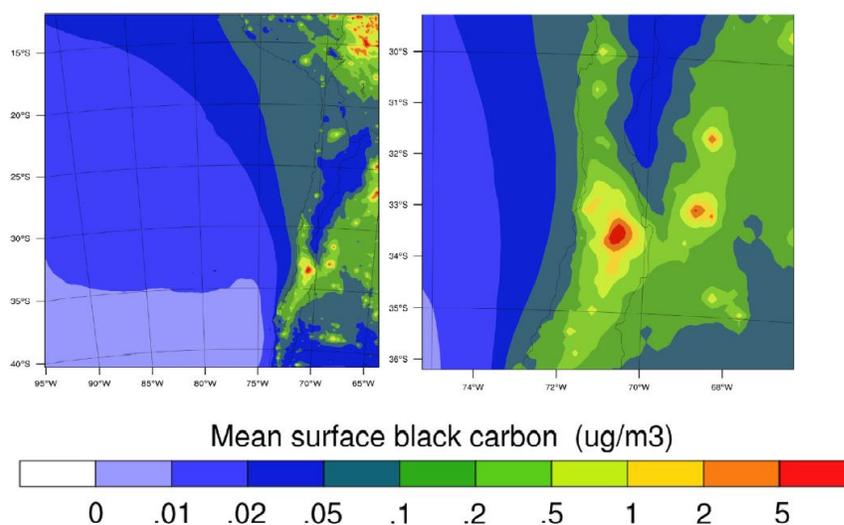


Figura 20. Media de BC Total modelado. Izquierda: Dominio de 12 km total. Derecha: Ampliado a la zona central de Chile. (Mena-Carrasco, M. y col., 2014).

A partir del rango de concentraciones promedio de BC a nivel superficial modeladas por Mena-Carrasco, M. y col. (2014), se establecieron los rangos de concentraciones de BC y los colores asociados, de verde a rojo, donde verde indica concentraciones bajas que no estarían generando un daño significativo frente a su exposición, y rojo son las concentraciones que superan los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo potencialmente dañinas. Estos rangos se utilizaron para el diseño de las interpolaciones de las concentraciones de BC de cada caminata realizados mediante el uso del software ArcGIS Pro.

Para un mejor análisis comparativo, las caminatas se clasificaron según el horario: mañana (entre las 12:00 y 13:00 horas) y tarde (entre las 18:00 y 19:00 horas). Adicionalmente, para una mejor comprensión de la distribución de las concentraciones de BC y MP, a continuación la Figura 21 entrega un mapa del área de estudio con lugares característicos de la península y potenciales fuentes de emisión de BC.

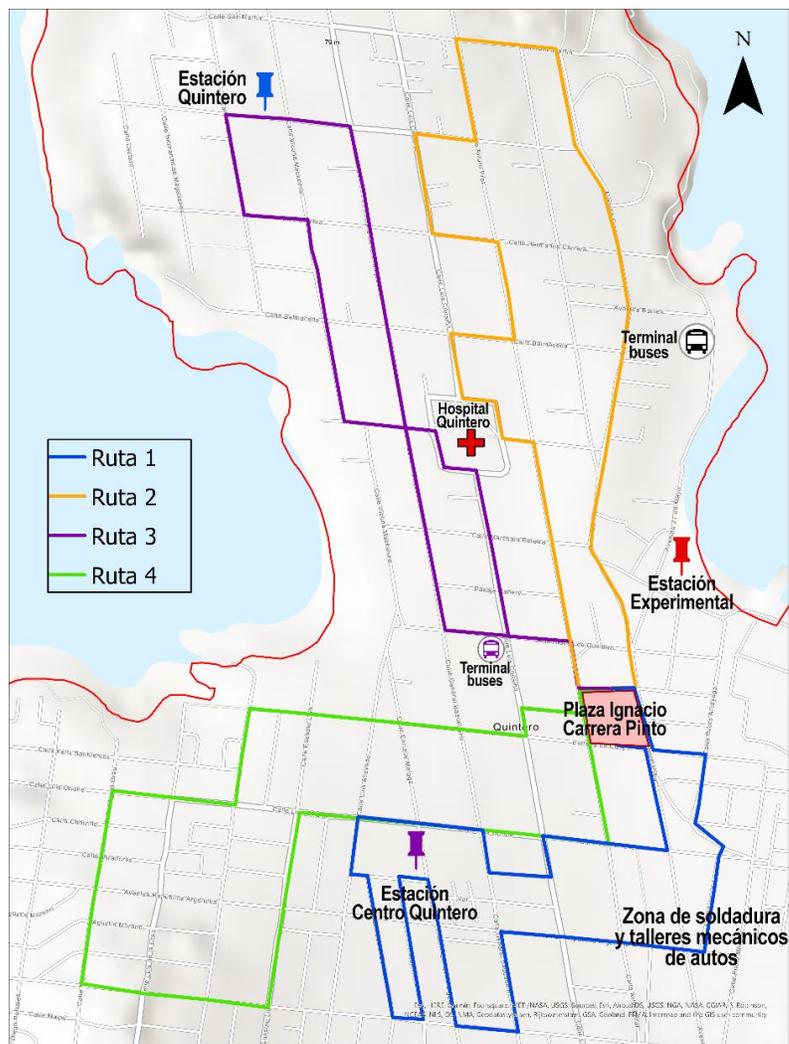


Figura 21. Mapa de lugares de Quintero (Elaboración propia).

Las figuras a continuación son una representación espaciotemporal de la distribución de los resultados de concentraciones de BC obtenidas durante cada caminata (sección (A)), en esta, se destacó con color la ruta específica en la que se llevó el GRIMM, y que por lo tanto estudió el material particulado (MP). La sección (B) exhibe rosas de vientos a partir de los datos disponibles en las estaciones del SINCA seleccionadas para el estudio y aquellos obtenidos en la estación experimental, describiendo los episodios puntuales del comportamiento de los vientos durante cada caminata. Por otra parte, en la sección

(C) de cada figura, se entrega una descripción de los parámetros meteorológicos (temperatura media, presión media climática a nivel de la estación, humedad relativa y precipitaciones) y las concentraciones de MP registradas por las estaciones del SINCA durante el horario de la caminata. A continuación de dicho análisis, para cada caminata se presentan series de tiempo que detallan las concentraciones de las distintas fracciones de MP de interés, junto con las de BC de aquella ruta en la que se incluyó el equipo GRIMM-11D (destacada con color en la sección (A)), esto con el fin de identificar fuentes en común entre las emisiones de BC y MP y además, analizar la contribución de BC en cada fracción. Finalmente, para cada caminata, se presenta una tabla con los valores estadísticos descriptivos de cada ruta y, para el caso de la ruta que incluyó el GRIMM 11-D, la proporción de BC contenido en las fracciones de $MP_{2.5}$ y MP_1 .

3.3.1. Caminatas de la mañana

3.3.1.1. Caminata 2

La Caminata 2 realizada entre las 12:30 y 13:30 hrs. descrita en la Figura 22 (A) muestra la distribución espaciotemporal de las concentraciones de BC. En general predominan las concentraciones del rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observan mayores concentraciones en el sector NE de la península, con un máximo de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ruta 2 (ver Tabla 7). Por otra parte, se observa un *hotspot* de concentraciones que coincide con en el sector de uno de los terminales de buses, según las ubicaciones indicadas en la Figura 21. En términos del régimen de vientos, Figura 22 (B), la estación Quintero presenta vientos provenientes del SSO con un promedio de 3,65 m/s. En cambio, las estaciones Centro Quintero y Experimental presentan vientos provenientes del OSO con velocidades

medias de 3,8 m/s y 1,9 m/s respectivamente. Adicionalmente, la estación Experimental presenta una componente de viento SO con velocidades predominantes entre 2 – 4 m/s. Estas direcciones de viento son congruentes con los perfiles de vientos descritos previamente (Figura 10 y Figura 11). Relacionando el régimen de vientos con las concentraciones de BC observadas, no se observa una tendencia común de la dirección de los vientos, sin embargo, se distingue una inclinación de las componentes O y S, las cuales son contrarias al área de la península donde se observan las mayores concentraciones de BC, pues estas se evidencian en el sector E, zona vecina al complejo industrial Ventanas. En términos de la información disponible en el SINCA durante el momento de la caminata, Figura 22 (C), se tiene una temperatura media de 17,7°C y una alta HR (80,9%). Además, las concentraciones de MP_{10} para ambas estaciones varían levemente, teniendo un rango de $[30 - 35] \mu\text{g}/\text{m}^3$, no así en el caso de $MP_{2,5}$, donde las mayores concentraciones se evidencian en la estación Quintero, con un máximo de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual se encuentra en el sector N de la península y a menor distancia de donde se obtuvieron las mayores concentraciones de BC ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

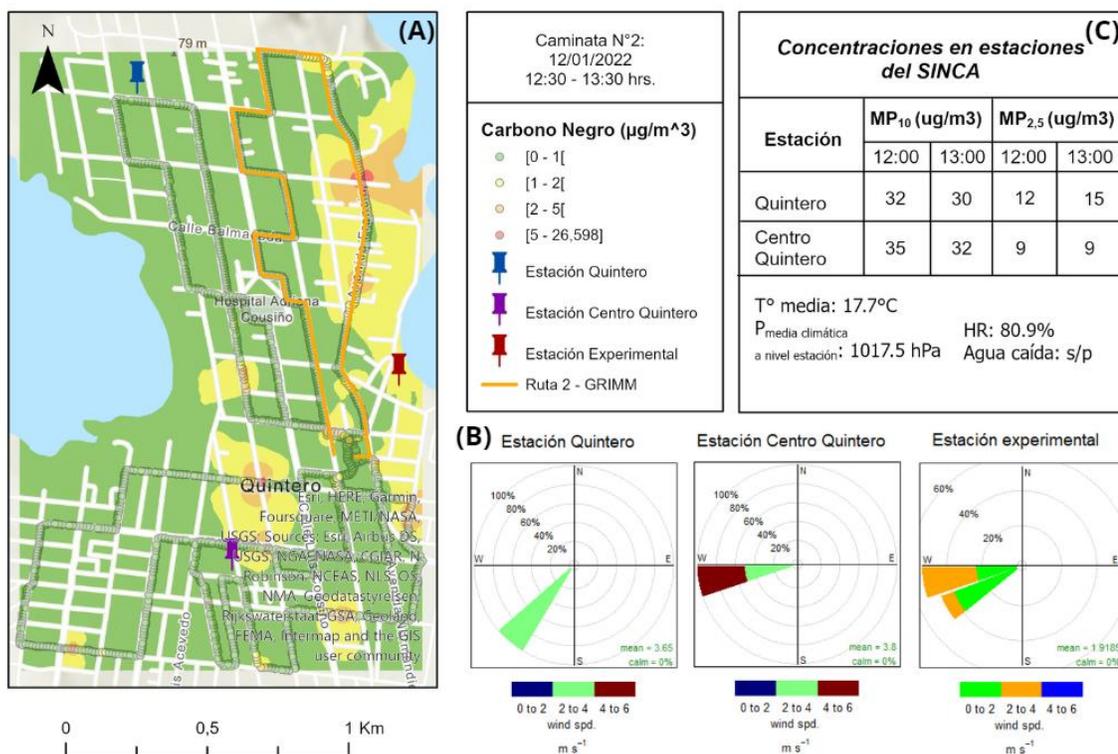


Figura 22. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 2

A continuación, las series de tiempo de la Figura 23 presentan las concentraciones de MP y BC determinadas durante la Ruta 2 de la caminata, sección donde según la Figura 22 (A) se obtuvieron las mayores concentraciones de BC. A partir de esto, se determina la posible distribución en las fracciones de MP del carbono negro. Específicamente el peak máximo de BC indicado como (1) en la Figura 23, coincide con los peaks de las fracciones de MP que se evidencian en el mismo momento. Esto se puede asociar a orígenes en común de las fuentes de emisión de estos contaminantes. Lo anterior se observa mayormente en la fracción de MP_1 , lo cual, coincide con lo descrito en la relación BC/MP_1 de la Tabla 7. Esto indica que las emisiones de MP entre las 12:45 y 12:50 se asocian, en mayor proporción, a fuentes de BC emitido recientemente, presentando una

mayor fracción carbonosa en su composición. No así los máximos de emisiones de MP que se observan después, los cuales no presentan aumentos en las concentraciones de BC coincidentes con los peaks de MP.

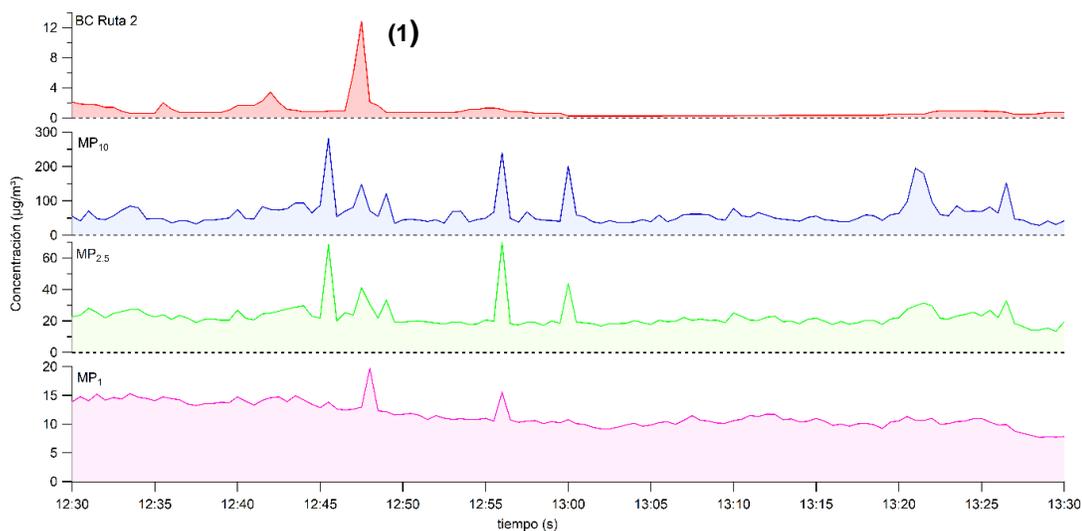


Figura 23. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 2 Ruta 2

En el caso de la Caminata 2, las rutas 3 y 4 presentan mínimos de concentración de BC igual a $0,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones medias de BC fluctúan en el rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un máximo de $0,91 \pm 1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondiente a la ruta 2, lo cual coincide con la distribución de concentraciones presentadas en la Figura 22 (A). Al comparar el valor medio de $MP_{2.5}$ obtenido durante la caminata ($23 \pm 7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con los del SINCA en la sección (C) de la Figura 22 de $[9 - 15] \mu\text{g}/\text{m}^3$, se tiene que dicho valor obtenido es mayor a aquellos registrados por la red SINCA.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 2

	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BC Ruta 1	0,15	22	0,84 \pm 1,6
BC Ruta 3	0,00	5,6	0,41 \pm 0,7
BC Ruta 4	0,00	17	0,44 \pm 1,2
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 2	0,25	27	0,91 \pm 1,6
MP _{2.5}	13	70	23 \pm 7,6
MP ₁	8	20	12 \pm 2,1
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ MP _{2.5}		4 \pm 4	
BC/ MP ₁		8 \pm 10	

3.3.1.2. Caminata 5

La Caminata 5 realizada entre las 12:00 y 13:00 hrs. descrita en la Figura 24 (A) entrega concentraciones en el rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una menor presencia de *hotspots* en comparación a la Caminata 2. El régimen de vientos descrito en la Figura 24 (B), presenta distintos comportamientos según el sector de la península tanto en dirección como en velocidad. Las tres estaciones presentan vientos con componentes S y O, velocidades medias de 3,6 m/s; 4,2 m/s y 1,7 m/s en las estaciones Quintero; Centro Quintero y Estación Experimental, respectivamente. Así, las emisiones presentes en el momento de la caminata se estarían asociando a fuentes provenientes de los sectores S y O. Respecto a las métricas del SINCA, las concentraciones de MP son bastante homogéneas en ambas estaciones.

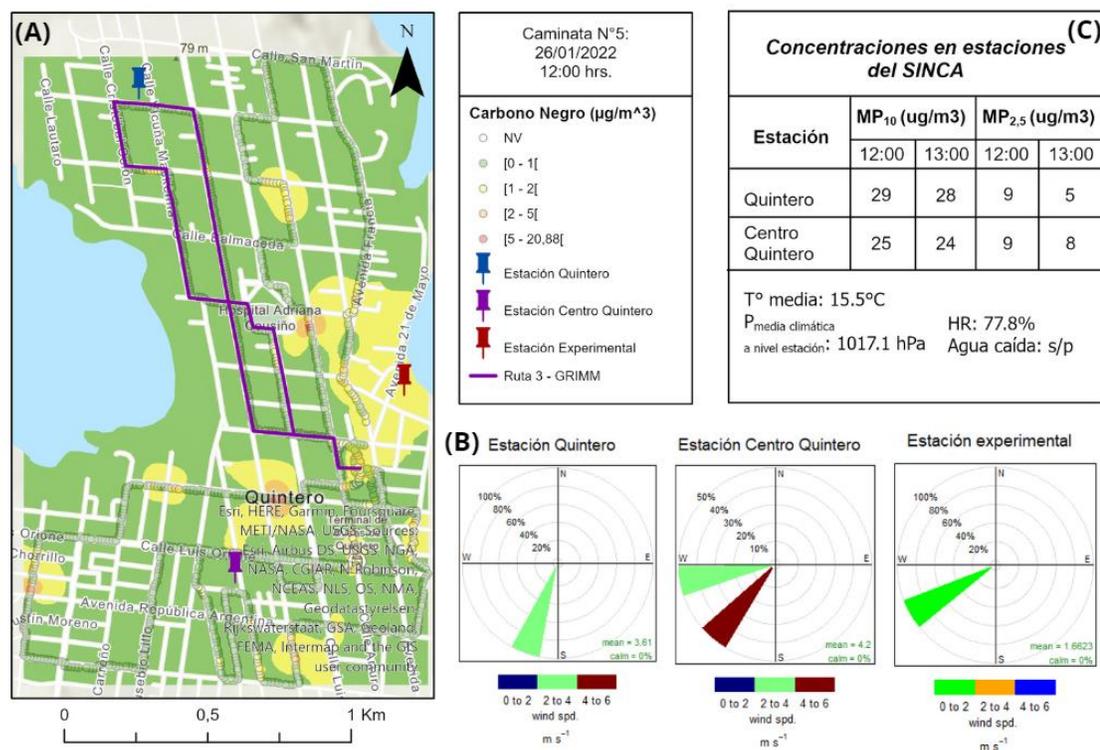


Figura 24. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 5

La Figura 25 describe la distribución de las fracciones de MP y BC de la ruta 3. Se observan comportamientos similares entre el MP₁₀ y MP_{2,5}, pero en distintas magnitudes. La fracción de MP₁, a pesar de repetir la tendencia de las otras fracciones de MP, destaca tres máximos que difieren de dicha tendencia. Al relacionar estos máximos con el comportamiento de las concentraciones de BC, el máximo (1) no presenta tendencias similares al BC; el (2) se podría relacionar con el leve aumento de las concentraciones de BC que se observan, y asimismo el máximo (3), el cual es el de mayor valor. Sin embargo, en este caso no se confirman fuentes de emisión análogas entre ambos contaminantes.

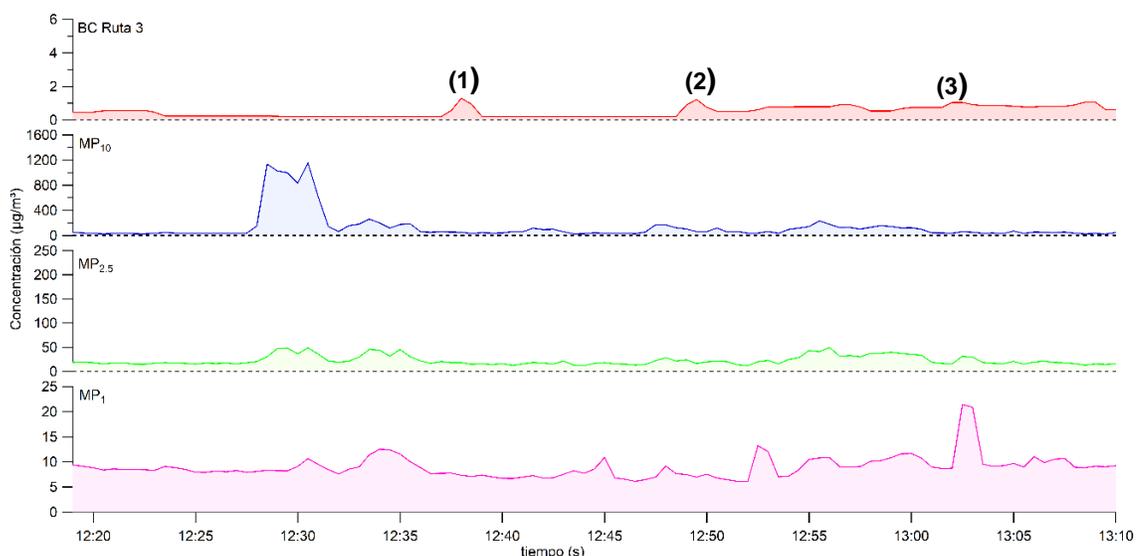


Figura 25. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 5 Ruta 3

Respecto a los estadísticos de esta caminata presentados en la Tabla 8, el valor mínimo detectado durante las rutas 2 y 4 corresponde a $0,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, las concentraciones medias de BC para todas las rutas se encuentran en el rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo la ruta 1 la de mayor concentración con un máximo de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, comparando la concentración media de $\text{MP}_{2.5}$ obtenida en la ruta 3 ($23 \pm 9,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con aquellas concentraciones entregadas por el SINCA [$5 - 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$] en la Figura 24 (C), se observa que esta es mayor a aquellas del SINCA.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos y Relación BC/ $\text{MP}_{2.5} - \text{MP}_1$, Caminata 5

	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BC Ruta 1	0,13	28	$0,88 \pm 1,9$
BC Ruta 2	0,00	21	$0,66 \pm 1,3$
BC Ruta 4	0,00	15	$0,80 \pm 1,4$
Ruta con Microetalmetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 3	0,19	1,3	$0,50 \pm 0,3$
$\text{MP}_{2.5}$	12	50	$23 \pm 9,8$
MP_1	6	21	$9 \pm 2,3$
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ $\text{MP}_{2.5}$			1 ± 2
BC/ MP_1			3 ± 1

3.3.1.3. Caminata 7

A diferencia de las otras caminatas de esta sección, la Caminata 7 fue llevada a cabo a las 9:00 hrs. La sección (A) de la Figura 26, distingue una distribución espaciotemporal de concentraciones de BC más elevadas que aquellas representadas en las caminatas 2 y 5, con predominancia del rango de concentraciones de $[1 - 2] \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este caso la presencia de *hotspots* se da tanto en el sector NE, SE y NO de la península con un máximo de concentración de BC de $40,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ruta 1 y $35,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ruta 3. Y con concentraciones medias de $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $0,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $0,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las rutas 1, 2, 3 y 4 respectivamente (ver Tabla 9). Además, se repiten aquellos focos de mayores concentraciones observados en las caminatas anteriores del sector NE de la península y el terminal de buses. Respecto a la sección (B) asociada al régimen de vientos, para la estación Quintero los vientos provienen del O, con una velocidad media de $1,8 \text{ m/s}$; del O y ONO con velocidad promedio de $1,9 \text{ m/s}$ para la estación Centro Quintero. En el caso de la estación Experimental se tiene un comportamiento que no se observa en las otras caminatas realizadas durante el horario de la mañana, donde la componente Norte se hace presente, observándose vientos provenientes del NO, NNO, N, NNE y NE, con un promedio de velocidad del viento de $2,0 \text{ m/s}$. Esta diferencia de los vientos, en comparación a las otras caminatas, podría justificar las mayores concentraciones evidenciadas, pues, favorece la detección de las emisiones provenientes del sector industrial Ventanas. Por último, de la sección (C) de la Figura 26 se desprende que el MP en este caso presenta mayores rangos de concentraciones: $MP_{10} [29 - 44] \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $MP_{2.5} [7 - 10] \mu\text{g}/\text{m}^3$.

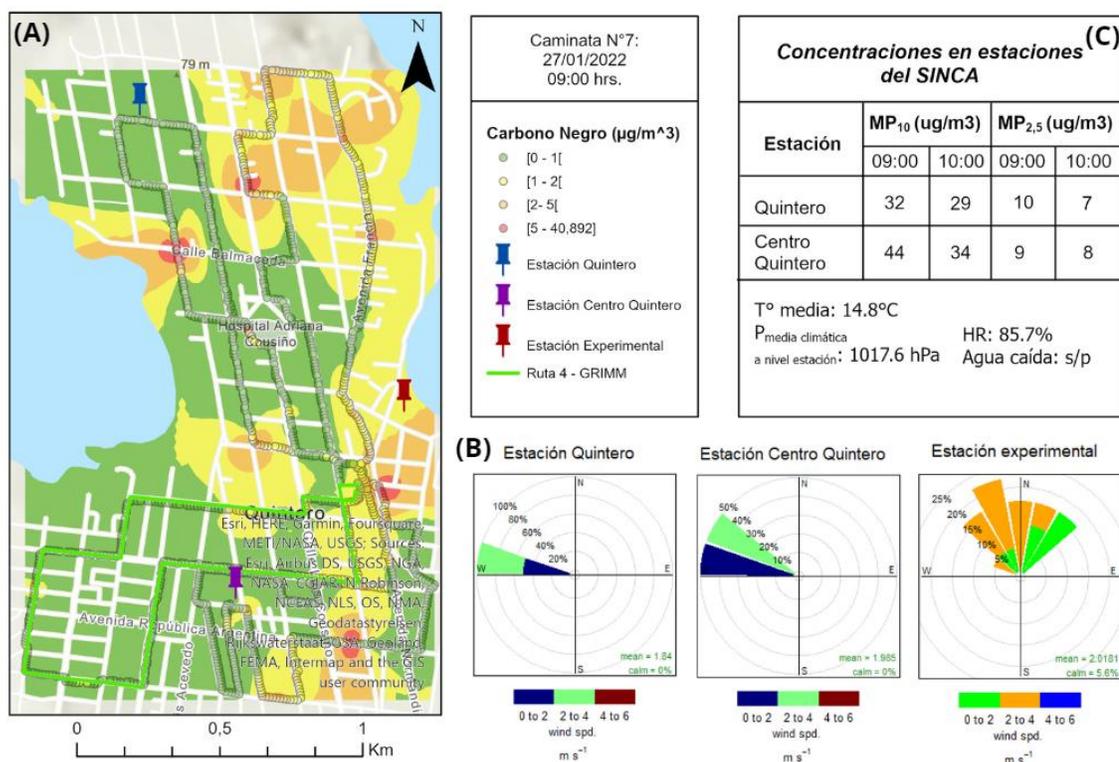


Figura 26. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 7

Las series de tiempo de la Figura 27 presentan las concentraciones de MP y BC determinadas durante la Ruta 4, sector donde se observan las menores concentraciones de BC. En este caso, se destacan cuatro máximos de concentraciones de BC a analizar. Para el máximo (1), a pesar de observarse un aumento en las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2.5}$, no se evidencia este comportamiento en las concentraciones de BC, por lo que se desprende que la fuente de emisión de este máximo de concentración no proviene de fuentes primarias de combustión incompleta vinculadas a emisiones de BC. El máximo (2) coincide con un aumento en las concentraciones de MP_1 , así, esta fracción de MP presenta una mayor proporción de BC en su composición, por lo que proviene de fuentes de combustión incompleta asociadas a fuentes de BC. Pero, además, al tratarse

principalmente de un aumento en las concentraciones de MP_1 , se desprende que son emisiones recientes de combustión incompleta o quema de biomasa, lo cual se reitera con la relación BC/MP_1 de la Tabla 9. Por otra parte, el máximo (3), coincide con las emisiones de $MP_{2.5}$ y MP_1 . Finalmente, el peak (4), se relaciona mayormente con aquellas emisiones de $MP_{2.5}$ detectadas por el GRIMM 11-D.

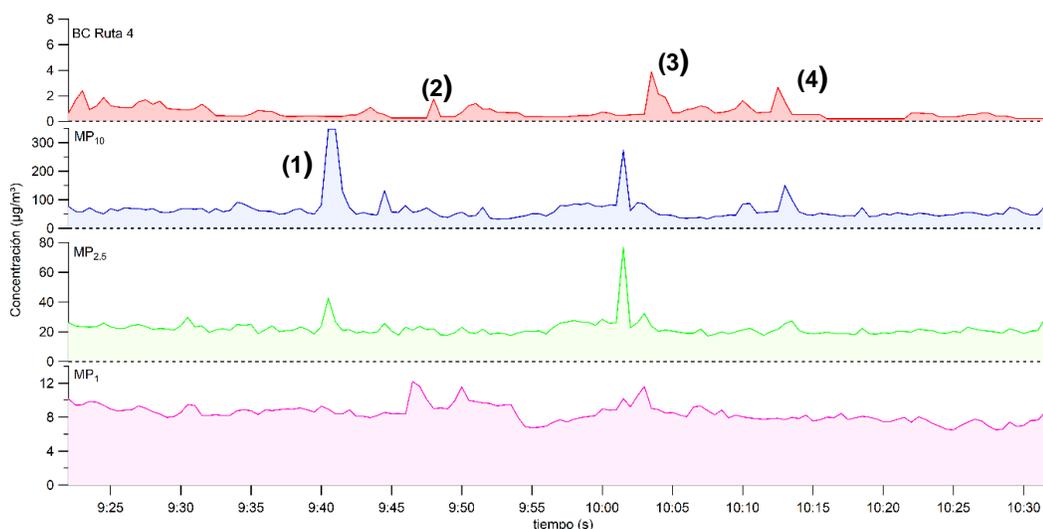


Figura 27. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 7 Ruta 4

De la Tabla 9 se desprende que las rutas 1 y 2 presentan concentraciones medias pertenecientes al rango de concentraciones de $[1 - 2] \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que explica la abundancia de concentraciones más altas según lo que se observa en la sección (A) de la Figura 26, en comparación a las otras caminatas realizadas durante la mañana. Por otra parte, el máximo observado en la ruta 1, coincide con la zona de soldaduras y talleres mecánicos. Respecto a la comparación de las concentraciones de $MP_{2.5}$ registradas por el SINCA y la concentración media obtenida durante las mediciones

móviles de $22 \pm 5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nuevamente se observa que ésta es mayor que aquellas del SINCA ($[7 - 10] \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 9. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 7

	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BC Ruta 1	0,04	41	$1,1 \pm 3,2$
BC Ruta 2	0,14	27	$1,3 \pm 1,8$
BC Ruta 3	0,06	36	$0,79 \pm 2,4$
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 4	0,20	5	$0,71 \pm 0,58$
MP _{2.5}	17	77	$22 \pm 5,8$
MP ₁	7	12	8 ± 1
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ MP _{2.5}		3 ± 2	
BC/ MP ₁		8 ± 6	

3.3.2. Caminatas de la tarde

3.3.2.1. Caminata 1

La Caminata 1 describe la primera caminata realizada en el horario de tarde (18:00 – 19:00 hrs.). Para este período de monitoreo se obtiene lo descrito en la Figura 28. En la sección (A), se observa una predominancia de las concentraciones del rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, existe una tendencia de mayores concentraciones en el sector Oeste de la península, las cuales se desplazan hacia el sector del terminal de buses que se indica en la Figura 21. Respecto a la sección (B), la estación Quintero presenta vientos SSO con una velocidad media de 3,5 m/s; Centro Quintero, vientos OSO con una velocidad media de 3,9 m/s; y por último, en la estación Experimental predominan los vientos SO con una velocidad promedio de 2,5 m/s. Con esto, es posible afirmar que el régimen de vientos en general tiene una predominancia SO, pero que varía según la elevación, asimismo su velocidad. Por último, de la sección (C) se destacan las

condiciones meteorológicas durante la caminata y las concentraciones de MP presentadas a esa hora, donde se observa que en la estación Centro Quintero las concentraciones son mayores tanto para MP_{10} y $MP_{2.5}$ en comparación a aquellas registradas en la estación Quintero.

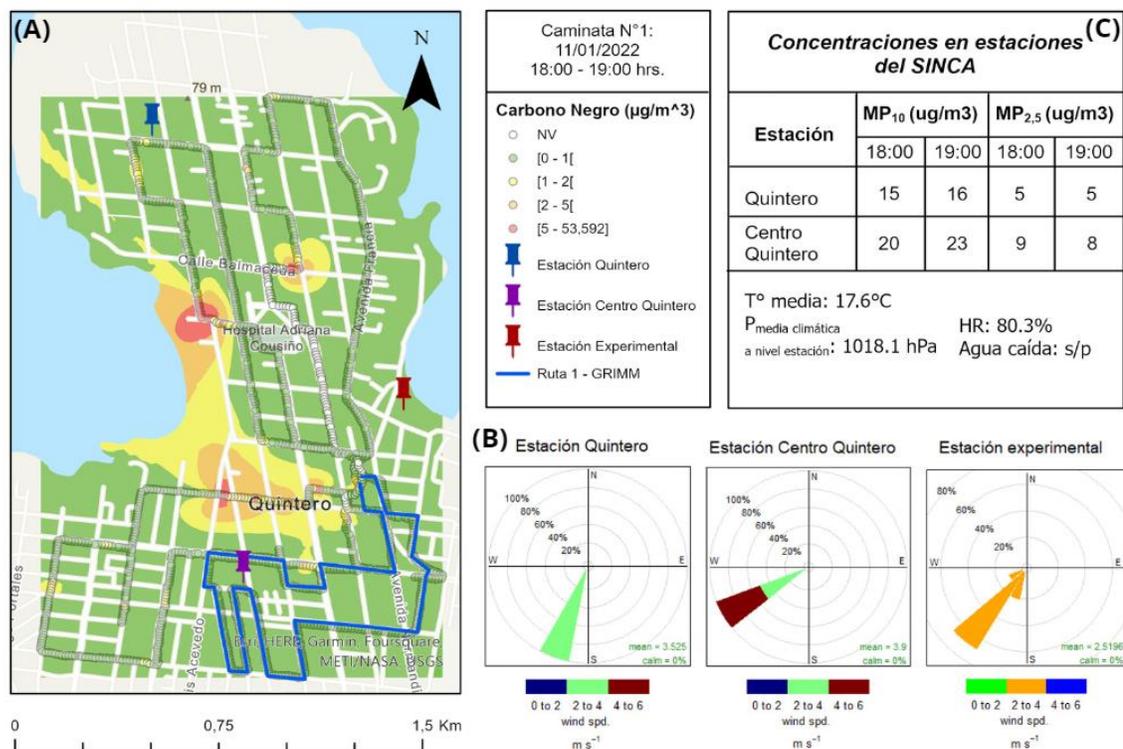


Figura 28. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 1

La Figura 29 presenta las series de tiempo del MP registrado en la Ruta 1, y su relación con las concentraciones de BC. En este caso se observa que las concentraciones de BC para esta ruta son en su mayoría nulas, a excepción del máximo (1), el cual se presenta al mismo tiempo que los máximos de las concentraciones de MP_{10} , $MP_{2.5}$ y MP_1 . Sigue siendo interesante destacar las altas concentraciones de MP al final de la caminata (después de las 19:00).

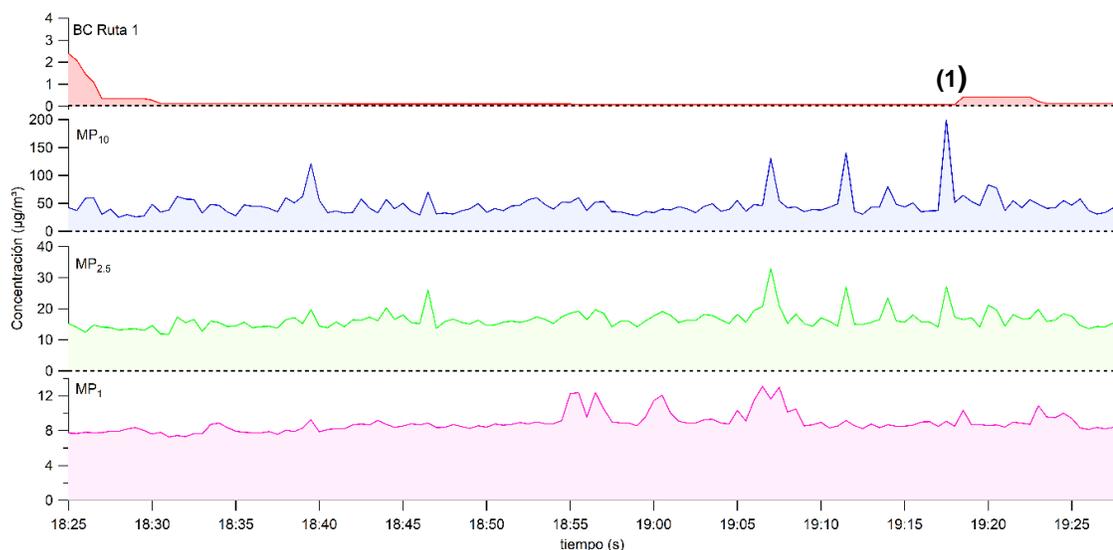


Figura 29. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 1 Ruta 1

La Tabla 10 describe los parámetros estadísticos de las rutas en la caminata 1. Cabe mencionar que, considerando lo previamente señalado en la Figura 29, respecto a la ruta 1, en este caso se contemplarán los datos obtenidos en las rutas 2, 3 y 4. Así, respecto a las concentraciones mínimas, se observa que la ruta 2 presenta un mínimo de concentración de $0,00 \mu g/m^3$. Por otra parte, cabe destacar el valor máximo de la ruta 3, que según la Figura 28 (A), se encuentra bastante cercano al Hospital Adriana

Cousiño. Por otra parte, la concentración máxima de la ruta 4 coincide con la ubicación del terminal de buses. Respecto a la comparación de la concentración media de $MP_{2.5}$ obtenida durante la Ruta 1 de $16 \pm 3,0 \mu g/m^3$, esta, es mayor que los valores registrados por el SINCA en las estaciones Quintero y Centro Quintero [$5 - 9 \mu g/m^3$].

Tabla 10. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 1

	Mínimo ($\mu g/m^3$)	Máximo ($\mu g/m^3$)	Media \pm SD ($\mu g/m^3$)
BC Ruta 2	0,00	23	0,54 \pm 2,2
BC Ruta 3	0,05	54	0,70 \pm 3,0
BC Ruta 4	0,18	44	0,91 \pm 2,7
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 1*	0,07	2,4	0,18 \pm 0,32
$MP_{2.5}$	12	33	16 \pm 3,0
MP_1	7	13	9 \pm 1,1
BC en MP \pm SD (%)			
	BC/ $MP_{2.5}$		1 \pm 2
	BC/ MP_1		2 \pm 4

3.3.2.2. Caminata 3

La Figura 30 describe la caminata 3. Para la sección (A) se destacan 5 hotspots, en los que se repiten el sector NE de la península observado en las caminatas de mañana y el foco de concentraciones cercano al terminal de buses. Por otra parte, se observa un nuevo foco de altas concentraciones de BC correspondiente a la ruta 1 (ver Tabla 11), ruta en la que se contempla una zona de soldaduras y talleres mecánicos de autos. Así, en general predominan las concentraciones del rango de $[0 - 1[\mu g/m^3$, con diversos focos en los que el rango de concentraciones de $[1 - 2[\mu g/m^3$ se hacen presentes. De la sección (B), el régimen de vientos presenta nuevamente vientos provenientes de las componentes S y O, congruentes con lo expuesto en las Figura 10 y Figura 11, con una velocidad media de 3,8 m/s; 3,5 m/s y 2,1 m/s para las estaciones Quintero, Centro Quintero y Experimental, respectivamente. Para la información entregada por las

estaciones del SINCA, descrito en la sección (C), se tiene una temperatura media de 17,7°C, con una HR de 80,9%, condición meteorológica bastante similar a la Caminata 1. Además, tanto las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ varían levemente entre ambas estaciones.

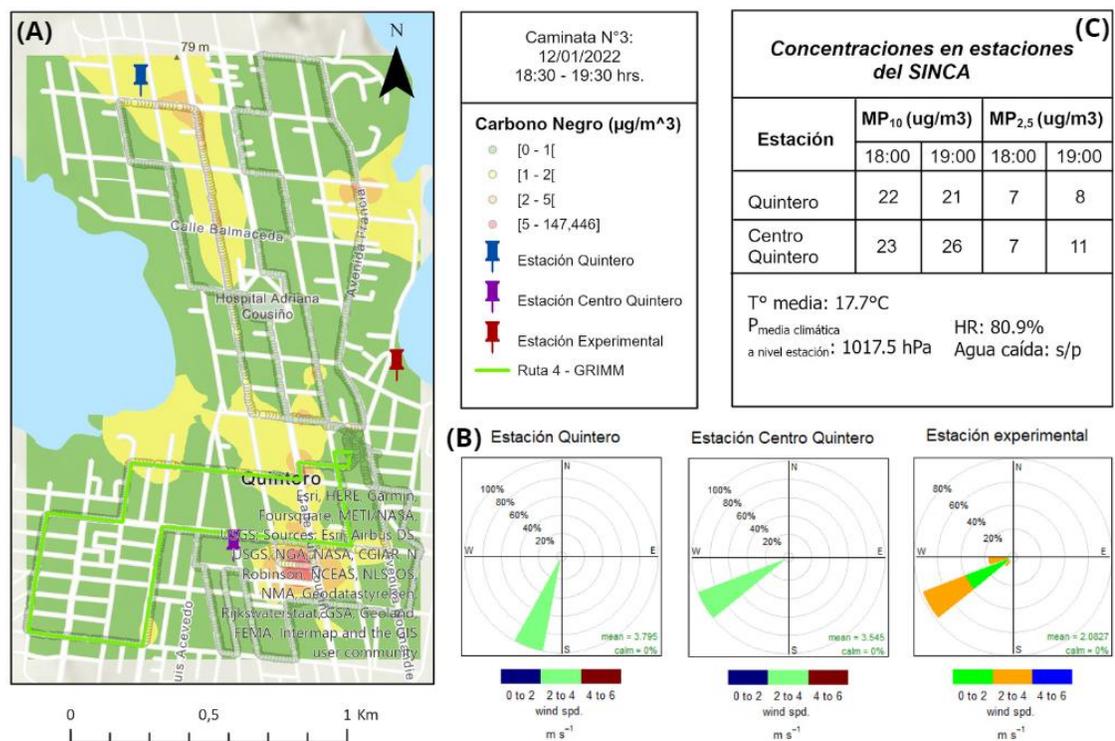
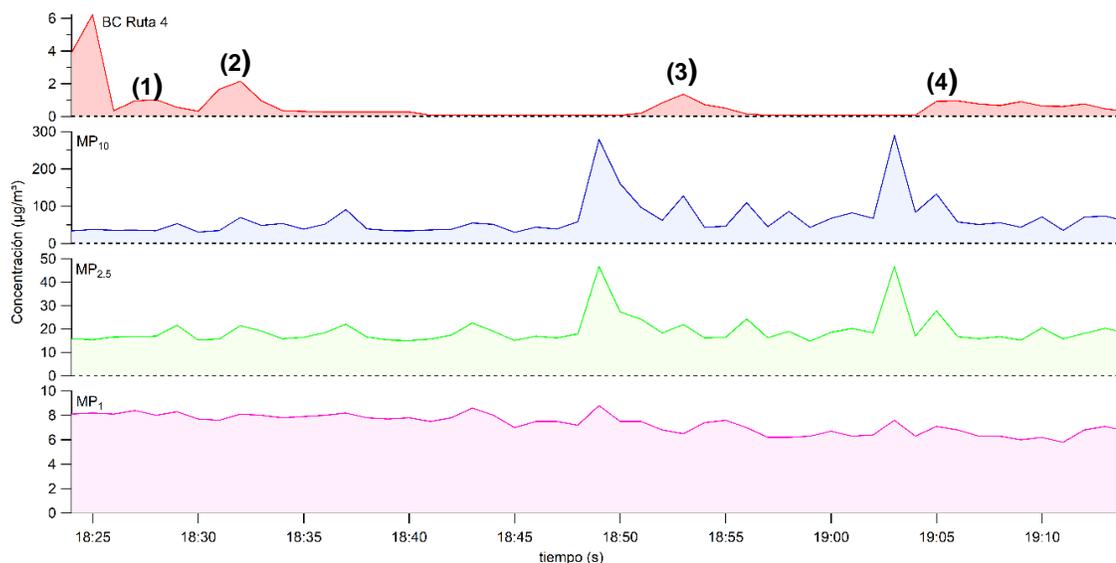


Figura 30. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 3

Para las series de tiempo de las concentraciones de BC y MP presentadas a continuación en la Figura 31, se distinguen cuatro peaks de BC a partir de los cuales se pueden relacionar las fuentes de emisión del MP con fuentes de combustión incompleta en la que el BC se hace presente. Para los peaks (1) y (2), a pesar de que se evidencia un leve desfase con aquellos peaks similares observados en las fracciones de MP, se observa una similitud en el comportamiento de estos para las tres fracciones analizadas.

Por otra parte, el peak (3) coincide con un aumento en las concentraciones de $MP_{2.5}$ y MP_{10} , y el peak (4) con un aumento en las tres fracciones de MP.



***Observación:** La serie de tiempo de esta caminata presenta mediciones cada 1 minuto, a diferencia de las otras mediciones que se realizaron cada 30 segundos.

Figura 31. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 3 Ruta 4

A partir de la Tabla 11, y relacionándola con la Figura 30, se observa que la media de concentración de BC en las cuatro rutas corresponde al rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que es congruente con la sección (A), donde se aprecia que la península casi en su totalidad presenta estas concentraciones. Respecto al valor máximo, cabe destacar el valor medido en la Ruta 1 ($147 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pues a pesar de que su concentración media es baja, su máximo es bastante elevado y coincide con la ubicación de la zona de soldadura y talleres mecánicos de autos. Por otra parte, en términos de las concentraciones de $MP_{2.5}$

entregadas por el SINCA ($[7 - 11] \mu\text{g}/\text{m}^3$), la concentración media obtenida durante la caminata ($19 \pm 6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sobrepasa este rango.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 3

	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BC Ruta 1	0,02	147	$0,91 \pm 8,6$
BC Ruta 2	0,12	14	$0,52 \pm 1,1$
BC Ruta 3	0,09	3,5	$0,91 \pm 0,91$
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 4	0,08	15	$0,58 \pm 1,2$
MP _{2.5}	15	47	$19 \pm 6,4$
MP ₁	6	9	$7 \pm 0,77$
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ MP _{2.5}		4 ± 7	
BC/ MP ₁		8 ± 13	

3.3.2.3. Caminata 4

En este caso, la Figura 32 describe los resultados obtenidos durante la Caminata 4. Para la sección (A), se observa que a diferencia de las otras caminatas, en esta predominan las concentraciones en el rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$ casi sin la presencia de *hotspots*. No obstante, nuevamente se observa un foco de concentraciones superiores a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el sector NE de la península, sector próximo al complejo industrial Ventanas, y donde existe un terminal de buses. Para la sección (B), en primer lugar cabe mencionar que para esta fecha no se registraron datos meteorológicos en la estación Experimental por fallos en los instrumentos. Respecto a la estación Centro Quintero, se tienen vientos provenientes del SSO y ONO, esta última componente no se ha observado en otras caminatas para esta estación. En el caso de la estación Quintero registra vientos de las direcciones S y SO. Las velocidades medias son de 2,6 m/s y 3,1 m/s respectivamente. Respecto a la información de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de material particulado entregadas por el SINCA, se observa una similitud respecto a las

otras caminatas en términos de temperatura media y HR. Además, se observa que las concentraciones de MP son bastante homogéneas entre sí.

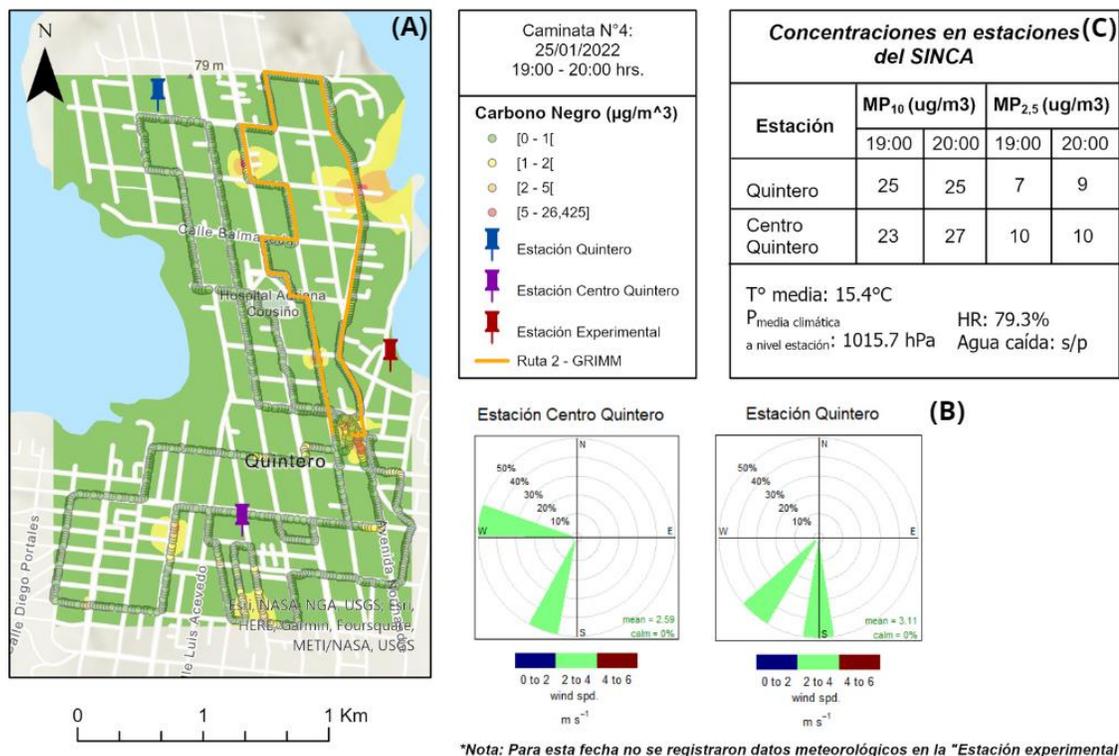


Figura 32. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 4

Respecto a las series de tiempo descriptivas de la Ruta 2 de esta caminata, se identifican cuatro peaks en las concentraciones de BC. En primer lugar, el peak (1) destaca por su gran similitud con el comportamiento de las concentraciones de $MP_{2.5}$ y MP_1 , pero sobre todo resalta la gran relación que se observa entre las concentraciones de BC y la fracción de MP_1 , lo cual coincide, además, con la elevada relación BC/MP_1 que se entrega en la Tabla 12, evidenciando que la fuente de estas emisiones coincide y que se trata de emisiones recientes de combustión incompleta. Por otra parte, los peaks (2), (3) y (4) a pesar de que también presentan una relación entre el comportamiento de las

concentraciones de BC y las fracciones de $MP_{2.5}$ y MP_1 , en este caso no se evidencia el mismo fenómeno en la fracción de MP_1 descrito previamente. El peak (5) por su parte, se destaca para resaltar la diversidad de composiciones químicas que se da en el MP, pues por una parte se tiene que los peaks (1), (2), (3) y (4) demuestran la correspondencia que se da entre el BC y las fracciones de MP y aquellas emisiones provenientes de fuentes asociadas a procesos de combustión incompleta, y por otra parte, el peak (5) ejemplifica aquellas emisiones de MP asociadas a otro tipo de fuentes de emisión en las que no existen procesos de combustión.

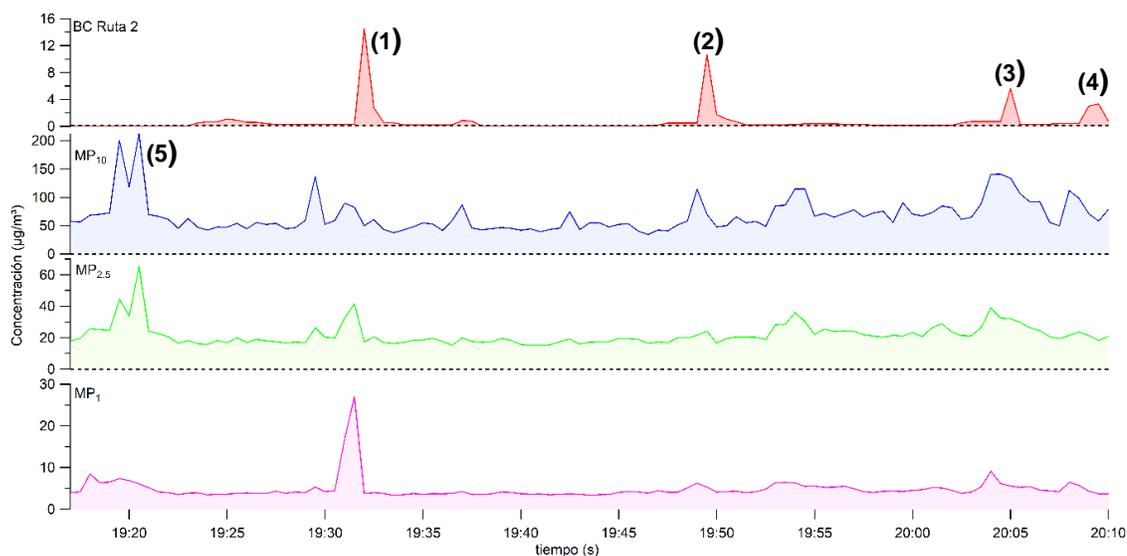


Figura 33. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 4 Ruta 2

Respecto a los parámetros estadísticos descriptivos de la caminata 4, destaca el valor máximo de la ruta 4 al ser un valor bastante elevado en comparación a las concentraciones medias de BC obtenidas en las cuatro rutas. Respecto al rango de concentraciones de $MP_{2.5}$ registradas por el SINCA en la sección (C) de la Figura 32

[7 – 10] $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la concentración media obtenida en la ruta 2 sobrepasa este rango $22 \pm 7,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, cabe destacar la diferencia entre la relación $BC/MP_{2,5}$ y BC/MP_1 , pues esta última es tres veces mayor, desprendiéndose que de la cantidad de BC determinada, una mayor proporción está asociada al MP_1 .

Tabla 12. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 4

	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BC Ruta 1	0,08	12	$0,83 \pm 1,3$
BC Ruta 3	0,03	0,79	$0,15 \pm 0,21$
BC Ruta 4	0,13	53	$1,3 \pm 4,5$
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 2	0,07	26	$0,67 \pm 2,4$
$MP_{2,5}$	15	65	$22 \pm 7,0$
MP_1	3	27	$5 \pm 2,7$
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ $MP_{2,5}$		3 ± 9	
BC/ MP_1		9 ± 14	

3.3.2.4. Caminata 6

La Caminata 6 representa la última caminata llevada a cabo en el horario de tarde. La Figura 34 entrega los resultados espaciotemporales obtenidos. De la sección (A) se desprende que al igual que la Caminata 4 predominan las concentraciones en el rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$ casi sin la presencia de *hotspots*. Sin embargo, destaca el sector SE de la península como un foco de altas concentraciones, el cual destaca por ser una zona de trabajos de soldadura y talleres mecánicos de autos. En este se evidencia una concentración máxima en la ruta 1 de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según se indica en la Tabla 13. De la sección (B), se observa en primer lugar que las estaciones Quintero y Experimental, ubicadas al Norte de la península, presentan tendencias de vientos similares, provenientes del SO, con velocidades de 3,7 m/s y 2,7 m/s, respectivamente. Por otra parte, la estación Centro Quintero registra vientos con velocidades promedio de 3,1 m/s

provenientes del ONO y OSO. Finalmente, de la sección (C), nuevamente se observa una temperatura media de 15,5°C y una HR de 77,8%, condiciones similares a las otras caminatas. Y en relación a las concentraciones de MP registradas por las estaciones del SINCA, se evidencia una tendencia de homogeneidad en las concentraciones de ambas fracciones del MP con rangos bastante acotados de variación en las concentraciones.

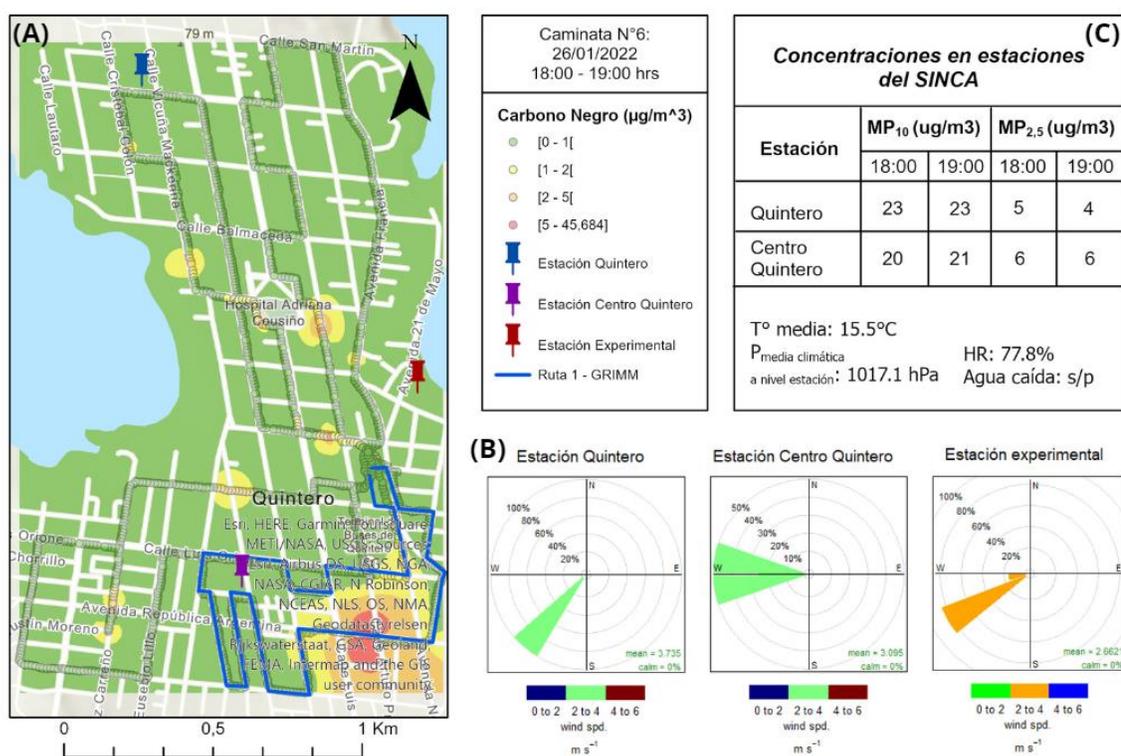


Figura 34. Distribución Geoespacial de las concentraciones de BC en la Caminata 6

De las series de tiempo de la Ruta 1, se distinguen tres peaks de BC, donde al igual que ocurre en la Caminata 4, los peaks (1), (2) y (3) destacan por su gran relación tanto con el $MP_{2,5}$ y MP_{1} . No obstante, el peak (2) destaca por la gran concordancia que presenta con la fracción de MP_{1} , evidenciando un origen en común en las fuentes de emisión de estas partículas, lo que se complementa además con la relación BC/MP_{1} presente en la

Tabla 13 para esta ruta, la cual indica que dentro de la composición de MP_1 , un 21% corresponde a BC. Por otra parte, el peak (4), al igual que en la Caminata 4, demuestra un ejemplo de emisiones de MP que no se asocian a emisiones de combustión incompleta, sino más bien a otro tipo de fuentes.

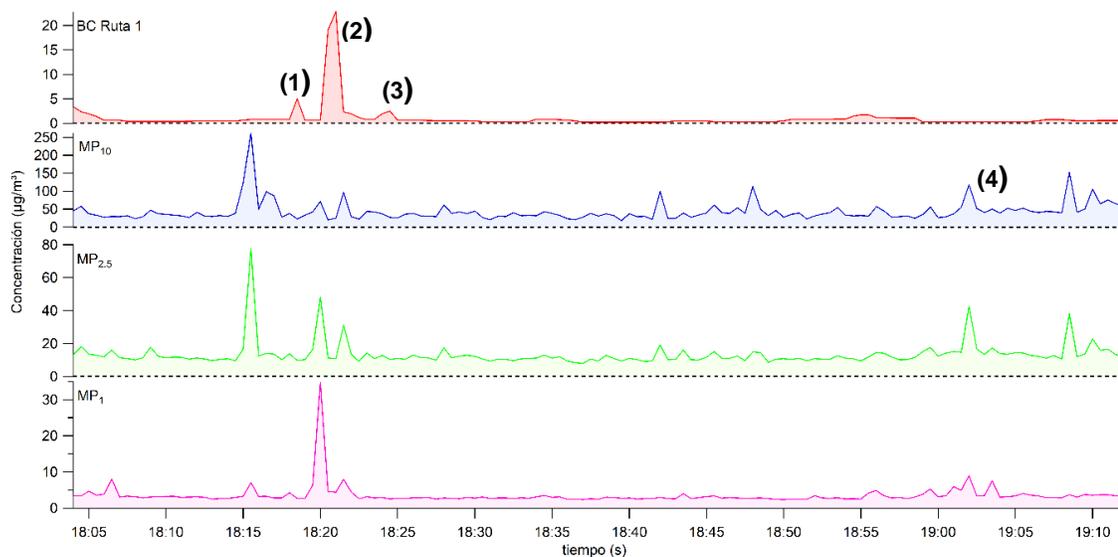


Figura 35. Concentraciones de BC y fracciones de MP durante la Caminata 6 Ruta 1

De la Tabla 13, destacan la concentración máxima y media de la Ruta 1, la cual es precisamente aquella que describe el foco de mayores concentraciones descrito en la Figura 34 (A). Por otra parte, es interesante en este caso, observar la gran diferencia que se da entre las relaciones de $BC/MP_{2.5}$ y BC/MP_1 , donde la cantidad de BC presente en la fracción de MP_1 es mucho mayor que aquella contenida en el $MP_{2.5}$, lo que estaría indicando que dentro de las concentraciones de BC, predominan las emisiones instantáneas o recientes. Finalmente, respecto a la comparación del rango de concentraciones indicadas por el SINCA de $MP_{2.5}$ ($[4 - 6] \mu g/m^3$), la concentración

media de $MP_{2.5}$ determinada durante la Caminata 6 de $13 \pm 7,8 \mu g/m^3$, supera las concentraciones de las estaciones del SINCA.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos y Relación BC/MP2.5 – MP1, Caminata 6

	Mínimo ($\mu g/m^3$)	Máximo ($\mu g/m^3$)	Media \pm SD ($\mu g/m^3$)
BC Ruta 2	0,08	7,2	$0,44 \pm 0,79$
BC Ruta 3	0,07	39	$0,92 \pm 2,5$
BC Ruta 4	0,06	4,3	$0,36 \pm 0,64$
Ruta con Microetalmómetro y GRIMM 11-D			
BC Ruta 1	0,22	46	$1,0 \pm 3,4$
$MP_{2.5}$	8	77	$13 \pm 7,8$
MP_1	2	35	$3,5 \pm 3,0$
BC en MP \pm SD (%)			
BC/ $MP_{2.5}$		8 ± 23	
BC/ MP_1		21 ± 16	

La metodología permite obtener resultados con una alta resolución espaciotemporal, en donde los instrumentos utilizados, en general, presentan una buena adaptación a las condiciones ambientales y a los microambientes correspondientes a cada ruta. Adicionalmente, la selección del método de corrección ONA como tipo de suavizado de los datos de concentraciones de BC, con un factor de suavizado de la ATN de 0,01 ($\Delta ATN = 0,01$), logra suavizar los datos de concentraciones negativas obtenidos. Sin embargo, dentro de la selección de datos, previo a la corrección ONA, se evidenciaron muchos valores de concentraciones con atenuaciones alteradas que tuvieron que ser eliminados del análisis, afectando la completitud de los datos, por lo que se sugiere que una posible modificación para futuras mediciones es reevaluar la tasa de flujo seleccionada. No así el tiempo de medición, pues el método ONA permitió disminuir el ruido de las señales.

Las caminatas realizadas logran representar espaciotemporalmente las concentraciones de BC observadas durante cada monitoreo. Esta representación de los resultados sugiere que existen sectores que presentan mayores concentraciones de exposición a este contaminante. En el caso de las caminatas de la mañana se observaron una mayor cantidad de *hotspots*, mientras que en general, aquellas caminatas realizadas durante la tarde mostraron resultados más homogéneos en términos de concentraciones, dentro del rango de $[0 - 1] \mu\text{g}/\text{m}^3$. De los *hotspots* descritos en cada caminata, se observan tendencias, como es el caso de mayores concentraciones de BC en el sector NE de la península, zona que se encuentra próxima al Complejo Industrial Ventanas, por lo que sus emisiones se podrían asociar a fuentes de combustión incompleta provenientes del complejo. No obstante, esto requiere de un mejor estudio de la dirección de los vientos, pues en general la tendencia de los vientos en la península es de la componente SO. Sin embargo, este tipo de comportamientos se podrían justificar con episodios concretos en los que el viento viniese del sector NE.

Por otra parte, el segundo foco de altas concentraciones que se observó en varias de las caminatas son los terminales de buses. Gordon Gamble, J. y col. (2013) indica que el carbono negro es un producto de la combustión de combustibles fósiles que está altamente correlacionado con la combustión de diésel; y según Bond, T. y col. (2004), el MP proveniente de los vehículos a diésel es en su mayoría BC (50 – 80%). En general, los vehículos pesados y flota de buses opera con motores de combustión diésel (Gálvez, A.D. y col., 2021), por lo que esto estaría explicando los focos de altas concentraciones en dichos puntos de la península de Quintero. A partir de este resultado, se distingue la importancia en las emisiones de fuentes móviles y su relación con la dispersión de contaminantes (Gálvez, A.D. y col., 2021). Además, destaca la relación de BC/MP_{2.5} y

BC/ MP_1 calculada para cada caminata, donde se obtuvo que, en todas las caminatas, el porcentaje de BC presente en la fracción de MP_1 es mayor que en la fracción de $MP_{2.5}$, indicando que las fuentes de emisión corresponden a emisiones recientes donde las partículas evidencian un menor diámetro aerodinámico. Adicionalmente, en las caminatas 5 y 6 se observa que la proporción de BC en el MP_1 es el triple de aquel presente en el $MP_{2.5}$, lo cual se distingue de las otras caminatas, donde la tendencia es que la proporción de BC es el doble en el MP_1 . Lo anterior, quiere decir que, en estos casos, la fracción de MP_1 presenta una mayor fracción de partículas carbonosas, específicamente BC, en comparación a la fracción fina ($MP_{2.5}$) en la atmósfera de Quintero. Esto indica además que en su mayoría se trata de fuentes de combustión incompleta de origen antropogénico, pues estas presentan una mayor abundancia de material particulado fino en su composición, en comparación a fuentes de erosión natural.

Continuando con lo mencionado, la Tabla 14, presenta valores de BC y $BC/MP_{2.5}$ para distintas localidades. Cabe mencionar que todos los valores presentados corresponden a mediciones realizadas en verano, al igual que las de este monitoreo. Comparando estos con los valores de BC medidos en este estudio, las concentraciones son menores a las obtenidas en áreas urbanas, aproximándose a los valores del área suburbana de Helsinki, Finlandia. Las diferencias de valor entre las concentraciones de Quintero obtenidas en este estudio y las otras localidades son concordantes, y se justifican por los siguientes motivos:

1. Quintero es una pequeña localidad ubicada en la zona costera del país, que posee una menor población que las urbes de la Tabla 14.

2. El clima mediterráneo costero de Quintero está fuertemente afectado por las interacciones de viento tierra – mar y su entorno, presentando frecuentes inversiones térmicas y una estabilidad de la atmosférica que cambia durante el día, permitiendo una mejor dispersión de los contaminantes que muchas zonas urbanas.
3. Las altas temperaturas que existen en verano implican que las emisiones por quema de leña para calefacción del hogar son inexistentes.
4. En verano Quintero aumenta su turismo y por ende la frecuencia de buses en la zona, aumentando las emisiones de BC por motores diésel.

Por lo tanto, es coherente que las concentraciones de BC en Quintero sean menores en comparación a las localidades expuestas en la Tabla 14, pues a diferencia de las zonas urbanas, las fuentes de emisión en este caso son menores. Así, se confirma que la principal fuente de emisión de BC en Quintero son las emisiones de los motores diésel correspondientes a la flota de buses.

Tabla 14. Resumen de valores de BC y BC/MP_{2,5} para distintas áreas de estudio.

Área de estudio	eBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC/MP _{2,5} (%)	Referencia
Sofía, Bulgaria (urbano)	2,4	17 – 29	<i>Hristova, E. y col., 2022</i>
Burgas, Bulgaria (urbano – costero)	1,6	1 – 17	<i>Hristova, E. y col., 2022</i>
Helsinki, Finlandia (urbano)	1,7	25	<i>Helin, A. y col., 2018</i>
Helsinki, Finlandia (suburbano)	0,88	9	<i>Helin, A. y col., 2018</i>
Caminatas de mañana: Caminata 2 Ruta 2 Caminata 5 Ruta 3 Caminata 7 Ruta 4	0,91 ± 1,6 0,50 ± 0,3 0,71 ± 0,58	4 ± 4 1 ± 2 3 ± 2	Este estudio

Caminatas de tarde:			
Caminata 1	0,18 ± 0,32	1 ± 2	Este estudio
Caminata 3	0,58 ± 1,2	4 ± 7	
Caminata 4	0,67 ± 2,4	3 ± 9	
Caminata 6	1,0 ± 3,4	8 ± 23	

Otro punto importante son las condiciones meteorológicas. Según Bibi, S. y col. (2017), existe una relación inversa entre las concentraciones observadas de BC y las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitaciones) por lo tanto, cuanto más bajos son los valores de estas variables, se tienen mayores concentraciones de BC. Esta tendencia ha sido confirmada por numerosos autores (Tripathi, S. y col., 2005; Baxla, S. y col., 2009; Aruna, K. y col., 2013). Así, el principal factor de la variación del BC en la atmósfera son las condiciones meteorológicas y las actividades humanas que se realizan en el lugar de estudio, motivo por el cual las concentraciones pueden tener una alta variabilidad incluso en un mismo día, lo cual fue posible observar a través de la comparación de caminatas realizadas en un mismo día, pero en diferentes horarios. A partir de esto y los resultados obtenidos, es que se logra comprender el motivo de obtener episodios puntuales de altas concentraciones, como se dio en la Caminata 7, pero bajas concentraciones de BC en general, pues Quintero, al ser una península, presenta una capa de dispersión elevada, por lo que a pesar de las diversas fuentes tanto móviles y fijas que existen en las cercanías, la dispersión de contaminantes puede ocurrir durante todo el día. Más aun considerando que las caminatas se llevaron a cabo en el período de verano, donde la altura de la capa de mezcla es aún mayor, y por ende la dispersión y transporte de contaminantes también lo es.

Respecto a las concentraciones, específicamente de $MP_{2.5}$ obtenidas, en comparación a aquellas registradas por las estaciones del SINCA, las concentraciones a nivel de exposición personal registraron, en todas las caminatas, mayores concentraciones que aquellas de las estaciones del SINCA. Esto se debe a la diferencia de alturas y escalas en las que se realizaron cada una de las mediciones. Por una parte, las mediciones del SINCA corresponden a monitoreos estacionarios, los cuales no son adecuados para estudiar la exposición personal frente a los contaminantes, pues los resultados pueden variar en gran medida dependiendo de la ubicación en la que se coloque la estación de calidad de aire (Kaur, S. y col., 2007; Van de Bossche, J. y col., 2015). Mientras que, por otra parte, los monitoreos móviles son un método enfocado en estudiar la calidad del aire con una alta resolución espaciotemporal, proporcionando un enfoque de evaluación de la exposición personal y variabilidad espacial de los resultados que el monitoreo fijo no entrega. Sin embargo, según Van de Bossche, J. y col. (2015), para validar las mediciones móviles se deben comparar con las estacionarias, pues como las mediciones no se realizan exactamente en el mismo lugar y con la misma resolución temporal, la medición presenta limitaciones. Pero si se asume el supuesto de que el monitoreo estacionario es representativo del área circundante, la comparación de las mediciones móviles y fijas puede entregar valiosa información de la representatividad.

Las concentraciones de BC en los microambientes, como se demostró a partir de las caminatas, poseen una gran variabilidad espaciotemporal debido a la dependencia que este contaminante presenta a las condiciones meteorológicas, la topología del área, la proximidad a otras fuentes, las actividades humanas de la zona, etc.; características que se basan en que este contaminante es un contaminante climático de vida corta (CCVC),

por lo que su dispersión ocurre en una escala temporal acotada. A partir de esto, es importante mencionar que los monitores estacionarios no son la estrategia adecuada para enfrentar este tipo de estudios, ya que el resultado puede variar notoriamente según el horario y la ubicación. Por lo tanto, el monitoreo móvil mediante el uso de sensores de bajo costo presenta la ventaja de entregar nuevas oportunidades que el monitoreo fijo no posee, pues entrega cartografías de alta resolución de la calidad del aire a escala local, las cuales, según indica Van de Bossche, J. y col. (2015), pueden usarse para detectar *hotspots*; derivar la exposición a la contaminación atmosférica en función de las actividades que realice una persona; validar modelos de alta resolución; entre otras aplicaciones. Sin embargo, existen también limitaciones importantes al utilizar este tipo de metodologías. En primer lugar, los datos móviles son representativos solamente del periodo de tiempo en el que se recogieron. En segundo lugar, su representatividad depende del tipo de plataforma móvil, esto quiere decir que en este caso que se realizaron mediciones caminando, los resultados son representativos de la exposición de los peatones, pero no necesariamente de los ciclistas, por ejemplo. Finalmente, este tipo de mediciones ofrece imágenes representativas de las concentraciones locales en el momento exacto en el que se realizó dicho monitoreo, esto quiere decir, que la representatividad de los datos es de ese instante, por lo que la representatividad de los datos para estos casos es algo que requiere de mayores investigaciones a futuro.

A partir de lo mencionado y comprendiendo las ventajas y limitaciones que el monitoreo móvil representa, este llega como un nuevo desafío a explorar. Donde la combinación de un monitoreo estacionario con monitoreos móviles se puede presentar como una herramienta para optimizar las redes de monitoreo en general.

Puntualmente, en el contexto nacional, Chile ya ha desarrollado varias iniciativas que permitirían realizar un seguimiento específico a las medidas de mitigación de GEI (impuesto verde, acciones de mitigación al sector de energía, entre otros), las que debieran extenderse al carbono negro ((CR)2, 2020). Se sugiere, además, que complementario al seguimiento de contaminantes traza como el carbono negro mediante actos administrativos, construcción y mantenimiento de inventarios de emisiones; se amplíe el alcance de las mediciones de las concentraciones, propiedades ópticas y flujos de emisión de este contaminante (Anenberg, S.C. y col., 2019; Hutyra, L.R. y col., 2014; Mitchell, L.E. y col., 2018; Nangini, C. y col., 2019). Por ende, se debería contar con monitores ópticos de carbono negro en, al menos, una estación de cada red de monitoreo urbana ((CR)2, 2020).

IV. CONCLUSIONES

1. De la metodología implementada, se concluye que a pesar del uso de dos modelos de microetómetros diferentes (MA200 y AE51), estos resultan ser instrumentos que se adaptan fácilmente a este tipo de monitoreos. Sin embargo, es clave comprender el rendimiento y aspectos técnicos de estos equipos para obtener resultados confiables. Pues, a parte de validar y corregir los datos, en términos de ATN y el método ONA, las configuraciones del equipo, previo al funcionamiento son determinantes al momento de obtener resultados. Lo anterior, en base a la selección adecuada de la tasa de flujo y tiempo de medición, para evitar obtener ATN no válidas del equipo y por consecuencia concentraciones negativas sin sentido fisicoquímico.
2. Con respecto a las mediciones de las concentraciones de BC y $MP_{2.5}$ en la península de Quintero, se llevaron a cabo 7 caminatas en diferentes horarios las cuales permitieron realizar un monitoreo móvil personal con una alta resolución espaciotemporal. Para el horario de la mañana se tuvieron concentraciones de BC en el rango de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 1,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $MP_{2.5}$ de $22 - 23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de las caminatas realizadas durante la tarde, el rango de concentraciones obtenido fue de $0,40 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 1,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el BC; y para el $MP_{2.5}$ $13 - 22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En general las concentraciones de BC fueron bajas. Por otra parte, las de $MP_{2.5}$ registradas en las caminatas fueron siempre mayores a aquellas registradas por las estaciones del SINCA (Caminatas de mañana $[9 - 15] \mu\text{g}/\text{m}^3$ y caminatas de tarde $[5 - 11] \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los resultados presentados muestran la necesidad de seguir fortaleciendo una metodología para este tipo de análisis, para así poder utilizar los resultados en la toma de decisiones y formulación de estrategias de mitigación de las emisiones de

3. BC. Pues de los resultados obtenidos, se concluye que la principal fuente de BC se asoció al uso de combustible diésel por parte de la flota de buses, presentando focos de concentración en casi todas las caminatas realizadas, y por otra parte, la posible influencia de las emisiones provenientes del Complejo Industrial Ventanas, dado el *hotspot* observado en el sector NE de la península en varias de las caminatas.
4. Comprender la composición de las fracciones de MP es clave al momento de identificar fuentes de emisión. Fue posible observar esto mediante el uso complementario del GRIMM 11-D junto con los microetómetros. Ya que, por una parte, el uso de este equipo permitió la validación de los datos obtenidos, en comparación a aquellos entregados por el SINCA, y por otra parte, permitió distinguir momentos exactos en los que las fuentes de emisión de MP se asociaban o no a fuentes de combustiones incompletas (asociadas directamente al BC). Adicionalmente, con los datos complementarios del GRIMM 11-D, se pudo obtener la relación $BC/MP_{2.5}$ y BC/MP_1 para cada caminata, de los cuales se desprende que la relación BC/MP_1 siempre es mayor, y que en ocasiones puntuales como las Caminatas 5 y 6, esta relación fue casi el triple del valor de $BC/MP_{2.5}$. Lo anterior es un indicio para confirmar que las fuentes son de tipo antropogénico en estos casos, pues la combustión antropogénica presenta una mayor cantidad de material fino en su composición.
5. Hasta el momento, las cartografías de la calidad del aire en términos de las concentraciones de BC representan “fotografías instantáneas” del momento exacto en el que se realizaron las mediciones. La representatividad de los datos obtenidos es una de las limitaciones que tiene este tipo de monitoreo. Por lo tanto, para poder obtener conclusiones del comportamiento de las emisiones de BC en la atmósfera de Quintero, se requiere realizar una mayor cantidad de repeticiones del monitoreo

llevado a cabo en este trabajo. Sin embargo, el hecho de poder realizar monitoreos móviles proporciona una perspectiva espaciotemporal que no es posible realizar con monitoreos estacionarios en estaciones como las del SINCA.

6. El uso complementario de un monitoreo móvil como el que se llevó a cabo y el monitoreo estacionario correspondiente en este caso a las estaciones del SINCA, entregan un abanico de posibilidades para evaluar la exposición personal a contaminantes y además, establecer adecuadamente la ubicación de futuras estaciones de calidad de aire, pues una de las problemáticas que presenta la red de estaciones en Quintero es tener un elevado número de estaciones de calidad de aire en la zona, pero no realizar un monitoreo adecuado. Por lo tanto, es necesario desarrollar una red y programa de monitoreo en el que se incluyan nuevas mediciones de parámetros, como, por ejemplo, el BC.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez – Narvaez, V., Quiñones – Bolaño, E., Huertas – Bolaño, M.E., Arciniegas – Suárez, C., Berdugo – Arrieta, J., Ramírez – Rivas, D. (2016). Methodology for selecting atmospheric monitoring sites in urban areas affected by emissions from mobile sources. *UIS Ingenierías*, 15 (2), 73 – 84. <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016006>.
- Aethlabs. (2016a). Operating Manual – microAeth© AE51. <https://aethlabs.com/>
- Aethlabs. (2016b). Quick Start Guide – microAeth© AE51. <https://aethlabs.com/>
- Aethlabs. (2018). Operating Manual – microAeth© MA Series MA200, MA300, MA350. <https://aethlabs.com/>
- Ahumada – Varela, S. (2020). Evaluación del desempeño de los sensores electroquímicos de SO_2 y NO_2 utilizando instrumentos de monitoreo regulatorio. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Santiago, Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177006>.
- Ahmed, T., Dutkiewicz, V. a., Shareef, A., Tuncel, G., Tuncel, S., y Husain, L. (2009). Measurement of black carbon (BC) by an optical method and a thermal-optical method: Intercomparison for four sites. *Atmospheric Environment*, 43 (40), 6305 – 6311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.031>.
- AIDA & IEMA. (2016). Controlando los Contaminantes Climáticos de Vida Corta: Una oportunidad para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático. El caso de Brasil, Chile y México. Primera edición. <https://aida-americas.org/>
- Alas, H.D.C., Müller, T., Weinhold, K., Pfeifer, S., Glojek, K., Gregoric, A., Mocnik, G., Drinovec, L., Costabile, F., Ristorini, M., Weidensohler, A. (2020). Performance of microAethalometers: real world field intercomparisons from multiple mobile measurement campaigns in different atmospheric environments. *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (12), 2640 – 2653. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.03.0113>.
- Anenberg, S. C., Achakulwisut, P., Brauer, M., Moran, D., Apte, J. S. y Henze, D. K. (2019). Particulate matter-attributable mortality and relationships with carbon dioxide in 250 urban areas worldwide. *Scientific Reports*, 9 (1), 11552. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48057-9>.
- Aruna, K., Lakshmi – Kumar, T.V., Narayana – Rao, D., Krishna – Murthy, B.V., Suresh – Babu, S., Krishna – Moorthy, K. (2013). Black carbon aerosols in a tropical semi-urban coastal environment: Effects of boundary layer dynamics and long-range transport. *Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics*. 104 (1), 116 – 125. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.020>.
- ArcGIS Geostatistical Analyst. (s.f.). Model Spatial Data & Uncertainty. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview>.
- Arnott, W.P., Hamasha, K., Moosmüller, H., Sheridan, P.J., Ogren, J.A. (2005). Towards aerosol light – absorption measurements with a 7–wavelength Aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and 3–wavelength Nephelometer. *Aerosol Science and Technology*, 39 (1), 17 – 29. <https://doi.org/10.1080/027868290901972>

- Baxla, S.P., Roy, A.A., Gupta, T., Tripathi, S.N., Bandyopadhyaya, R. (2009). Analysis of diurnal and seasonal variation of submicron outdoor aerosol mass and size distribution in a northern Indian city and its correlation to black carbon. *Aerosol Air Quality Research*, 9 (4), 458 – 469. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2009.03.0017>.
- Becerril-Valle, M., Coz, E., Prévôt, G., Mocnik, G., Pandis, S.N., Sánchez de la Campa, A.M., Alastuey, A., Díaz, E., Pérez, R.M., Artíñano, B. (2017). Characterization of atmospheric black carbon and co-pollutants in urban and rural areas of Spain. *Atmospheric Environment*, 169 (2017), 36 – 53. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.014>.
- Bibi, S., Alam, K., Chishtie, F., Bibi, H., Rahman, S. (2017). Temporal variation of Black Carbon concentration using Aethalometer observations and its relationship with meteorological variables in Karachi, Pakistan. *Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics*, 157 – 158, 67 – 77. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.017>.
- Bond, T.C., Streets, D.G., Yarber, K.F., Nelson, S.M., Woo, J., Klimont, Z. (2004). A technology – based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109 (D14203). <https://doi.org/10.1029/2003JD003697>.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. and Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (11), 5380 – 5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>.
- Brunekreef, B., Künzli, N., Pekkanen, J., Annesi – Maesano, I., Forsberg, B., Sigsgaard, T., Keuken, M., Forastiere, F., Barry, M., Querol, X., Harrison, R.M. (2015). Clean air in Europe: beyond the horizon? *European Respiratory Journal*, 45 (861), 7 – 10. <https://doi.org/10.1183/09031936.50186114>.
- Brunekreef, B., & Holgate, S.T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360 (9341); 1233 – 1242. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(02)11274-8).
- Carlaw, D.C. & Ropkins, K. (2012). Openair – An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, 27 – 28, 52 – 61. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.014>.
- Carrasco – Carrasco, P. (2018). Efecto de la estratificación atmosférica en la distribución vertical de aerosoles segregados por tamaño en la atmósfera de Santiago. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Santiago, Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152528>
- (CR)2. (2019). *¿Por qué debemos preocuparnos del carbono negro u hollín?* Equipo Cápsula Climática. <https://www.cr2.cl/por-que-debemos-preocuparnos-del-carbono-negro-u-hollin/>
- (CR)2. Gallardo, L., Basoa, K., Tolvet, S., Osses, M., Huneus, N., Bustos, S., Barraza, J., Ogaz, G. (editores). (2020). Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Informe extendido y anexos. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia para el Ministerio del Medio Ambiente a través de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la iniciativa *Supporting National Action*

and Planning on Short-Lived Climate Pollutants (SNAP), 116 pp.
<http://www.cr2.cl/carbononegro/>

- Collaud – Coen, M., Weingartner, E., Apituley, A., Ceburnis, D., Fierz – Schmidhauser, R., Flentje, H., Henzing, J.S., Jennings, S.G., Moerman, M., Petzold, A., Schmid, O., Baltensperger, U. (2010). Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: Evaluation of five correction algorithms. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3 (2), 457 – 474. <https://doi.org/10.5194/amt-3-457-2010>.
- Correa – Lagos, S. (2013). Propuesta de diseño de red de monitoreo de carbono negro para la macro – zona central de Chile. [Tesis de Pregrado, Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ciencias – Departamento de Física, Santiago, Chile]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3904.1767>.
- Chahuán – Pérez, J. (2019). Zonas de Sacrificio: Experiencias cotidianas en territorios contaminados, la Bahía de Quintero – Puchuncaví. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago, Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176533>.
- Choi, W., He, M., Barbesant, V., Kozawa, K.H., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E. (2012). Prevalence of wide area impacts downwind of freeways under pre – sunrise stable atmospheric conditions. *Atmospheric Environment*, 62, 318 – 327. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.084>.
- Díaz – Hernández, C.G. (2016). Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos. [Tesis de Magíster, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), México]. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2244>.
- Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr., Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 329 (24), 1753 – 1759. <https://doi.org/10.1056/nejm199312093292401>.
- EuroChile. (2019). Proyecto: Mejoramiento de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire en las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. EuroChile, Fundación Empresarial. Informe de Avance 1 – 4. https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/07/Estudio-Eurochile-FMI_Informe-de-Avance-14.pdf
- Fang, G., Wu, Y., Chang, C., Ho, T. (2006). RETRACTED: A study of polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations and source identifications by methods of diagnostic ratio and principal component analysis at Taichung chemical Harbor near Taiwan Strait. *Chemosphere*, 64 (7), 1233 – 1242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.031>.
- Fiallos, G. (2021). La Correlación de Pearson y el proceso de regresión por el método de mínimos cuadrados. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5 (3), 2491. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.466
- Figueruelo, J. E., & Dávila, M. M. (2004). Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales. *Reverté*, S.A. ISBN: 978-84-291-9311-4.
- Fruin, S., Urman, R., Lurmann, F., McConnell, R., Gauderman, J., Rappaport, E., Franklin, M., Gilliland, F.D., Shafer, M., Gorski, P., Avol, E. (2014). Spatial variation in particulate matter components over a large urban area. *Atmospheric Environment*, 83, 211 – 219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.063>.

- Gálvez – Serna, A.D., González – Duque, C.M., Franco – Ramírez, J.F., Morales – Betancourt, R., Rincón – Riveros, J.M., Aristizábal – Zuluaga, B.H. (2021). Monitoring of fine particulate matter and black carbon, in micro-environments of Manizales Andean City: Pilot Study. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 20 (39), 129 – 146. <https://doi.org/10.22395/rium.v20n39a8>.
- GAW/WMO. (2012). 13th Annual Meeting of the EMEP Task Force on Measurements and Modeling (TFMM), Gozo, Malta (Posición del GAW Scientific Advisory Group (SAG) en el uso de la terminología del Black Carbon). <https://unece.org/info/events/event/18665>.
- Gil – Martínez, D. (2021). Medidas de la concentración de black carbon utilizando un etalómetro portátil. [Tesis de Pregrado, Universitas Miguel Hernández, Facultad de Ciencias Experimentales – Departamento de Física Aplicada. Elche, España]. <http://hdl.handle.net/11000/8691>.
- Good, N., Mölter, A., Peel, J.L., Volckens, J. (2016). An accurate filter loading correction is essential for assessing personal exposure to black carbon using an Aethalometer. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 27, 409 – 416. <https://doi.org/10.1038/jes.2016.71>.
- Gordon-Gamble, J. (2013). Spatial measurements of traffic related air pollutants in San Ysidro, California, using CitiSense: A novel mobile air quality sensing system. [Tesis de Magíster, Universidad Estatal de San Diego, California, Estados Unidos]. <http://hdl.handle.net/20.500.11929/sdsu:3204>.
- Gramsch, E., Muñoz, A., Langner, J., Morales – Salinas, L., Espinoza – Soto, C., Pérez, P., Rubio – Campo, M.A. (2020). Black carbon transport between Santiago de Chile and glaciers in the Andes Mountains. *Atmospheric Environment*, 232, 117546. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117546>.
- GRIMM Aerosol Technik (2018). The all-purpose 11-D: Decode your dust. <https://www.grimm-aerosol.com/products-en/dust-monitors/the-dust-decoder/11-d/>
- GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2018). Datasheet Dust Decoder 11-D. <https://www.durag.com/mediafiles/>
- GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2016). Manual portable laser aerosol Spectrometer and Dust Monitor Model 1.108/1.109. <https://cires.colorado.edu/>
- Hagler, G.S., Thoma, E.D., Baldauf, R.W. (2010). High-resolution mobile monitoring of carbon monoxide and ultrafine particle concentrations in a near-road environment. *Journal Air & Waste Management Association*, 60 (3), 328 – 336. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.3.328>
- Hagler, G., Yelverton, T., Vedantham, R., Hansen, A., Turner, J. (2011). Post-processing method to reduce noise while preserving high time resolution in Aethalometer real-time black carbon data. *Aerosol and Air Quality Research*, 11 (5), 539 – 546. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.05.0055>.
- Helin, A., Niemi, J. V., Virkkula, A., Pirjola, L., Teinilä, K., Backman, J., Aurela, M., Saarikoski, S., Rönkkö, T., Asmi, E., Timonen, H. (2018). Characteristics and source apportionment of black carbon in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Atmospheric Environment*, 190, 87 – 98. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.022>.

- Hutyra, L. R., Duren, R., Gurney, K. R., Grimm, N., Kort, E. A., Larson, E. y Shrestha, G. (2014). Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective. *Earth's Future*, 2(10), 473–495. <https://doi.org/10.1002/2014EF000255>.
- Hristova, E., Georgieva, E., Veleva, B., Neykova, N., Naydenova, S., Gonsalvesh-Musakova, L., Neykova, R., Petrov, A. (2022). Black Carbon in Bulgaria: Observed and modelled concentrations in two cities for two months. *Atmosphere*, 13 (2), 213. <https://doi.org/10.3390/atmos13020213>.
- INE – SEMARNAT. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. Instituto Nacional de Ecología, México, pp. 13 – 17. <http://www.semarnat.gob.mx/gobmx/biblioteca/>
- IGSD. (2013). Primer on Short – Lived Climate Pollutants. Climate & Clean Air Coalition. <https://www.igsd.org>
- INDH. (2018). Informe Misión de Observación Zona de Quintero y Puchuncaví. Informe aprobado por el Consejo del Instituto Nacional de Derechos Humanos en sesión ordinaria N°446/2018. <https://www.minrel.gob.cl/>
- IPCC. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (editores). (2013). Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/>
- Jiang, J., Aksoyoglu, S., El-Haddad, I., Ciarelli, G., Denier van der Gon, H.A.C., Canonaco, F., Gilardoni, S., Paglione, M., Minguillón, M.C., Favez, O., Zhang, Y., Marchand, N., Hao, L., Virtanen, A., Florou, K., O'Dowd, C., Ovadnevaite, J., Baltensperger, U., Prévôt, A.S.H. (2019). Sources of organic aerosols in Europe: a modeling study using CAMx with modified volatility basis set scheme. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19 (24), 15247 – 15270. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-19-15247-2019>.
- Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Topalović, D., Lazović, I., Pokrić, B., & Ristovski, Z. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Environmental Pollution*, 206, 696 – 704. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>.
- Li, Q., Shang, J., y Zhu, T. (2013). Physicochemical characteristics and toxic effects of ozone – d oxidized black carbon particles. *Atmospheric Environment*, 81, 68 – 75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.043>.
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525 (7569), 367 – 371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>.
- Kandlikar, M., Reynolds, C.C.O., Grieshop, A.P. (2018). A Perspective Paper on Black Carbon mitigation as a Response to Climate Change. Copenhagen Consensus Center. Frederiksberg, Dinamarca. <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:25435034800041>.
- Kinney, P.L. (2018). Interactions of climate change, air pollution, and human health. *Current Environmental Health Reports*, 5, 179 – 186. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0188-x>.
- Kouassi, A.A., Doumbia, M., Silue, S., Yao, E., Dajuma, A., Adon, M., Touré, N., Yoboue, V. (2021). Measurement of Atmospheric Black Carbon Concentration in Rural and Urban

Environments: Cases of Lamto and Abidjan. *Journal of Environmental Protection*, 12 (11), 855 – 872. <https://doi.org/10.4236/jep.2021.1211050>

Marino, D. (2011). Estudio teórico experimental sobre respuestas biológicas a compuestos orgánicos de relevancia ambiental. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Buenos Aires, Argentina]. <https://doi.org/10.35537/10915/2744>.

Mazzeo, A., Huneus, N., Ordoñez, C., Orfanos – Cheuquelaf, A., Menut, L., Mailler, S. Valari, M., Deniero van der Gon, H., Gallardo, L., Muñoz, R., Donoso, R., Galleguillos, M., Osses, M., Tolvett, S. (2018). Impact of residential combustion and transport emissions on air pollution in Santiago during winter. *Atmospheric Environment*, 190, 195 – 208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.043>.

Mena – Carrasco, M., Saide, P., Delgado, R., Hernández, P., Spak, S., Molina, L., Carmichael, G., Jiang, X. (2014). Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology. *Urban Climate*, 10 (5), 771 – 781. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.006>.

Mitchell, L.E., Lin, J.C., Bowling, D.R., Pataki, D.E., Strong, C., Schauer, A.J., Bares, R., Bush, S.E., Stephens, B.B., Mendoza, D., Mallia, D., Holland, L., Gurney, K.R. y Ehleringer, J.R. (2018). Long – term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth. *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, 115 (12), 2912 – 2917. <https://doi.org/10.1073/pnas.1702393115>.

MMA. (2013). Análisis de riesgo ecológico por sustancias potencialmente contaminantes en el aire, suelo y agua, en las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví - Noviembre, 2013. Informe Final, Centro de Ecología Aplicada. <https://sqi.mma.gob.cl/>

MMA. (2016). Guía de Calidad del Aire y Educación Ambiental. División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana. <https://mma.gob.cl/>

MMA. (2018). Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre el Cambio Climático. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. <https://mma.gob.cl/>

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor – Córdova, M., Bórquez, R., Casassa, G., Cereceda – Balic F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneus, N., Lambert, F., McCarty, J.L., Mc Phee, J., Mena – Carrasco, M., Raga, G.B, Schmitt, C., Schwarz, J.P. (2015). Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere. *Earth's Future*, 3 (12), 345 – 369. <https://doi.org/10.1002/2015EF000311>.

Morawska, L. & Zhang, J. (2002). Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signature. *Chemosphere*, 49 (9), 1045 – 1058. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00241-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00241-2).

Muñoz-Araya, A. (2016). Transporte atmosférico de material particulado fino y carbono negro desde Santiago a un sector cordillerano. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Santiago, Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188047>.

Nangini, C., Peregon, A., Ciais, P., Weddige, U., Vogel, F., Wang, J., Bréon, F.M., Bachra, S., Wang, Y., Gurney, K., Yamagata, Y., Appleby, K., Telahoun, S., Canadell, J.G., Grüber, A., Dhakal, S. y Creutzig, F. (2019). A global dataset of CO2 emissions and ancillary data related to emissions for 343 cities. *Scientific Data*, 6, 180 – 280. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.280>.

- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113 (7), 823 – 839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>.
- Oceana. (2017). Zonas de sacrificio en áreas prioritarias para la conservación. Protegiendo los Océanos del Mundo.
- Park, S.S., Hansen, A.D.A., Cho, S.Y. (2010). Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. *Atmospheric Environment*, 44 (11), 1449 – 1455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.025>.
- Penner, J.E. & Novakov, T. (1996). Carbonaceous particles in the atmosphere: A historical perspective to the Fifth International Conference on Carbonaceous Particles in the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101 (D14), 19373 – 19378. <https://doi.org/10.1029/96JD01175>.
- Peters, J., Theunis, J., Van Poppel, M., Berghmans, P. (2013). Monitoring PM10 and ultrafine particles in urban environments using mobile measurements. *Aerosol and Air Quality Research*, 13 (2), 509 – 522. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.06.0152>.
- Petzold, A., Ogren, J.A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S.M., Baltensperger, U., Holzer – Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X.-Y. (2013). Recommendations for reporting “black carbon” measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (16), 8365 – 8379. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013>.
- Rowe, P.M., Cordero, R.R., Warren, S.G., Stewart, E., Doherty, S.J., Pankow, A., Schrempf, M., Casassa, G., Carrasco, J., Pizarro, J., MacDonell, S., Damiani, A., Lambert, F., Rondanelli, R., Huneeus, N., Fernandez, F., Neshyba, S. (2019). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Scientific Reports*, 9, 4008. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39312-0>.
- Saarikoski, S., Reyes, F., Vásquez, Y., Tagle, M., Timonen, H., Aurela, M., Carbone, S., Worsnop, D.R., Hillamo, R., Oyola, P. (2019). Characterization of submicron aerosol chemical composition and sources in the coastal area of Central Chile. *Atmospheric Environment*, 199, 391 – 401. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.040>.
- Sedlacek, A.J. (2016). *Aethalometer™ Instrument Handbook*. Department of Energy’s (DOE) Office of Science Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program (United States), pp. 1 – 6. <https://doi.org/10.2172/1251391>.
- Schmid, O., Artaxo, P., Arnott, W.P., Chand, D., Gatti, L.V., Frank, G.P., Hoffer, A., Schnaiter, M., Andreae, M.O. (2006). Spectral Light Absorption by Ambient Aerosols Influenced by Biomass Burning in the Amazon Basin – I. Comparison and Field Calibration of Absorption Measurement Techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5 (5), 9355 – 9404. <http://dx.doi.org/10.5194/acpd-5-9355-2005>.
- Snyder, E.G., Watkins, T.H., Solomon, P.A., Thoma, E.D., Williams, R.W., Hagler, G.S.W., Shelow, D., Hindin, D.A., Kilaru, V.J., Preuss, P.W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47 (20), 11369 – 11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>.
- Szidat, S., Ruff, M., Perron, N., Wacker, L., Synal, H.A., Hallquist, M., Shannigrahi, A.S., Yttri, K.E., Dye, C., Simson, D. (2009). Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and

- elemental carbon (EC) in Göteborg, Sweden. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9 (5), 1521 – 1535. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-9-1521-2009>.
- Tan, Z. (2014). Air pollution and greenhouse gases: from basic concepts to engineering applications for air emission control. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-212-8>.
- Timonen H., Karjalainen, P., Aalto, P., Saarikoski, S., Mylläri, F., Karvosenoja, N., Jalava, P., Asmi, E., Aakko-Saksa, P., Saukkonen, N., Laine, T., Saarnio, K., Niemelä, N., Enroth, J., Väkevä, M., Oyola, P., Pagels, J., Ntziachristos, L., Cordero, R., Kuittinen, N., Niemi, J.V., Rönkkö, T. (2019). Adaptation of black carbon footprint concept would accelerate mitigation of global warming. *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12153 – 12155. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05586>.
- Tripathi, S.N., Dey, S., Tare, V., Satheesh, S.K. (2005). Aerosol black carbon radiative forcing at an industrial city in Northern India. *Geophysical Research Letters*, 32 (8). <https://doi.org/10.1029/2005GL022515>.
- UNEP and CCAC (2016). Integrated Assessment of short – lived climate pollutants in Latin America and the Caribbean – Improving air quality while mitigating climate change: Summary for decision makers. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8972>.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency). (2009). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter: Final Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. EPA/600/R-08/139F. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>.
- U.S. EPA. (2011). Report to Congress on Black Carbon External Peer Review Draft. Technical Report EPA-450/D-11-001. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100RPUX.txt>
- U.S. EPA. (2012). Report to Congress on Black Carbon. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100EIUR.txt>
- U.S. EPA. (2017). Criteria Air Pollutants. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants#self>.
- Van den Bossche, J., Peters, J., Verwaeren, J., Botteldooren, D., Theunis, J., De Baets, B. (2015). Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105, 148 – 161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>.
- Villacura, L.J. (2021). Caracterización de perfiles verticales de carbono negro mediante un vehículo aéreo no tripulado. [Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. Santiago, Chile].
- Vouitsis, E., Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2003). Particulate mass measurements for low emitting diesel powered vehicles: what is next? *Progress in energy and Combustion Science*, 29 (6), 635 – 672. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.08.002>.
- Virkkula, A., Mäkelä, T., Hillamo, R., Yli-Tuomi, T., Hirsikko, A., Hämeri, K. and Koponen, I.K. (2007). A simple procedure for correcting loading effects of Aethalometer data. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57 (10), 1214 – 1222. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.10.1214>.

- Watson, J.G., Chow, J.C., Chen, L.W.A. (2005). Summary of organic and elemental Carbon/Black Carbon analysis methods and intercomparisons. *Aerosol and Air Quality Research*, 5 (1), 65 – 102. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2005.06.0006>.
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., Baltensperger, U. (2003). Absorption of light by soot particles: Determination of the absorption coefficient by means of Aethalometers. *Journal of Aerosol Science*, 34 (10), 1445 – 1463. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00359-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00359-8).
- WHO. (2013a). Health Risks of Air Pollution in Europe – HRAPIE Project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. WHO Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692>
- WHO. (2013b). Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution: REVIHAAP Project. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK361805/>
- WHO. (2016a). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. Retrieved from Geneva, Switzerland. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- WHO. (2016b). WHO releases country estimates on air pollution exposure and health impact. WHO News. <http://www.who.int/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>.

VI. ANEXOS

Anexo 1. Microetalómetros Aethlabs: AE51 y MA200

1. Teoría de funcionamiento de los etalómetros

El principio de los etalómetros consiste en medir la atenuación de un haz de luz transmitido a través de un filtro, mientras el filtro recoge continuamente una muestra de aerosol. Esta medición se realiza en intervalos de tiempo y flujo, predeterminados. Mediante el valor de atenuación específica para esa combinación de ajustes del equipo, es posible determinar el contenido de carbono negro en el depósito de aerosol en cada momento de la medición. El aumento de la atenuación óptica de un período a otro se debe al incremento de carbono negro acumulado. Dividiendo este aumento, por el volumen de aire muestreado en ese intervalo de tiempo, entrega la concentración media de BC en la corriente de aire muestreada.

La Figura A entrega una perspectiva de las componentes instrumentales asociadas al funcionamiento de los microetalómetros a partir del funcionamiento de los etalómetros en general.

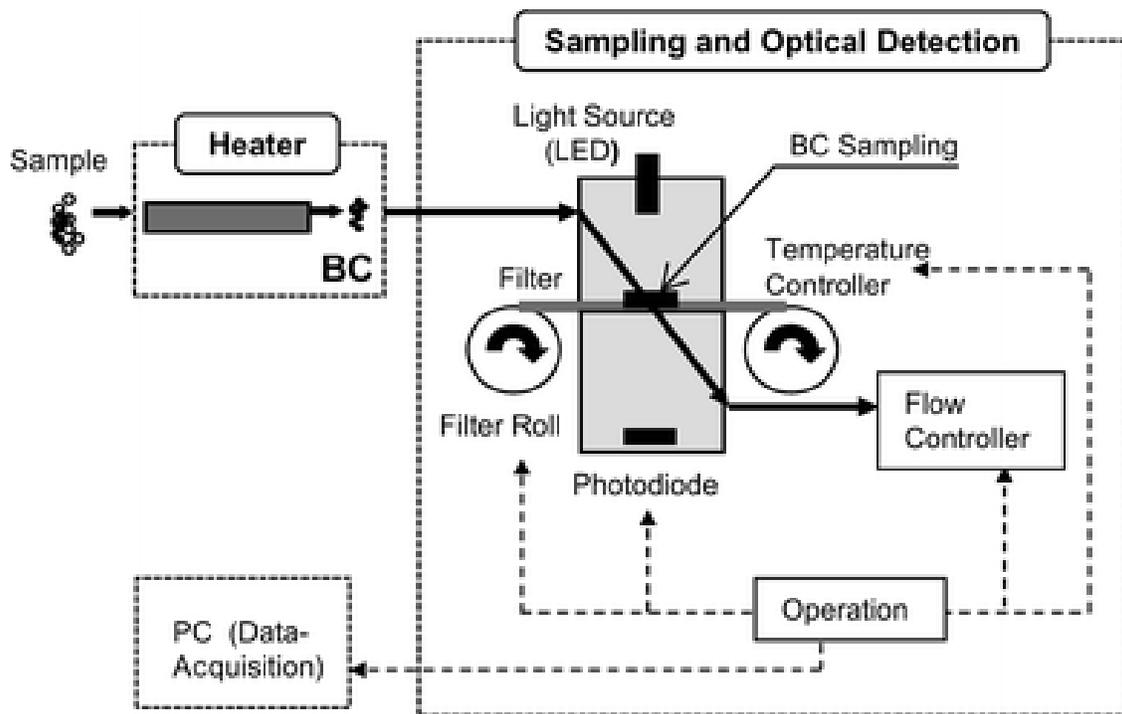


Figura. A. Diagrama de flujo de la operación de los etalómetros (Sedlacek, A.J., 2016)

2. Método óptico de atenuación

El método óptico utilizado en los etalómetros consiste en medir la atenuación de un haz de luz transmitido a través de la muestra, al momento de recogerse en un filtro.

Mediante la siguiente expresión, se observa que la atenuación de la luz transmitida es linealmente proporcional a la cantidad de BC depositada en el filtro:

$$ATN = 100 * \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

Donde:

I_0 = Intensidad de la luz transmitida a través del filtro original o a través de una porción en blanco del filtro.

I = Intensidad de la luz transmitida a través de la porción del filtro en la que se recoge la deposición del aerosol.

Así, la atenuación óptica (ATN) se define como sigue:

$$ATN(\lambda) = \sigma\left(\frac{1}{\lambda}\right) * [BC] \quad (2)$$

Donde:

[BC] = Masa de carbono negro

$\sigma\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ = Absorción óptica de la sección transversal, la cual es dependiente de la longitud de onda (λ)

σ = Atenuación específica

3. Especificaciones técnicas de los microetalómetros

Tabla. A. Especificaciones de las mediciones

Aspecto	microAeth AE51	microAeth MA200
Rango de medición ($mg\ BC/m^3$)	0 – 1	0 – 1
Resolución ($\mu g\ BC/m^3$)	0,001	0,001
Precisión ($\mu g\ BC/m^3$)	$\pm 0,1\ \mu g\ BC/m^3$ En condiciones de: Tiempo de base = 1 minuto Tasa de flujo = 150 mL/min	N/A
Límite de Detección ($ng\ BC/m^3$)	N/A	30 En condiciones de: Tiempo de base = 5 minutos Tasa de flujo = 150 mL/min SingleSpot™
Tiempo de base* (s)	1, 10, 30, 60 o 300	1, 5, 10, 30, 60 o 300
Tasa de flujo* (mL/min)	50, 100, 150 o 200	50, 75, 100, 125 o 150

*Aspectos técnicos a definir por el usuario.

4. Recomendaciones y efectos a considerar en la configuración de los parámetros de operación del microAeth AE51 según el escenario de estudio

La facilidad de utilizar este equipo de manera portátil permite utilizarlo para diferentes escenarios. La optimización del rendimiento en cada aplicación requiere una comprensión de los ajustes operativos, precauciones y los procedimientos de mantenimiento.

4.1. Determinación de la tasa de flujo

La selección de la tasa de flujo permite al usuario seleccionar un flujo para cada situación. Se recomienda utilizar tasas de flujo menores en zonas con altas concentraciones de BC, y altas tasas de flujo, cuando se requiera la máxima sensibilidad del instrumento, para escenarios de baja concentración de BC. También, se recomienda seleccionar una tasa de flujo baja cuando se utilice un tiempo base más largo y se desee un funcionamiento más prolongado de la batería.

4.2. Tiempo base

El tiempo base de toma de muestra permite al usuario establecer el periodo de análisis, es decir, cada cuántos segundos se desea que el equipo tome una muestra de aire y determine su concentración de BC. El fabricante recomienda el ajuste de 30 o 60 segundos para la mayoría de los usos de “exposición humana” o “monitoreo ambiental”.

Cabe destacar que aquellas configuraciones con tiempos base más cortos (1 o 10 segundos) entregarán un mayor ruido en cada punto de medición, y que se usan para la supervisión directa de la fuente (análisis del tubo de escape) o para otras aplicaciones que requieren datos rápidos. Específicamente el tiempo base de 1 segundo sólo debe usarse en ocasiones especiales en las que se acepte un ruido instrumental mayor y, por ende, una menor relación señal/ruido. Por otra parte, el uso de un tiempo base de 300 segundos se recomienda para los casos en los que se quiera alargar la vida de la batería y el tiempo de funcionamiento del equipo.

Por otra parte, el fabricante recomienda encarecidamente que el instrumento se caliente durante 10 – 15 minutos para que pueda equilibrarse con el entorno. Por lo tanto, al seleccionar las configuraciones de la tasa de flujo y tiempo base, se deben considerar los siguientes aspectos detallados por el fabricante a continuación:

A. Rendimiento de la batería

La vida de la batería dependerá de los ajustes de tasa de flujo y tiempo base de medición.

Tabla. B. Rendimiento de la batería (Aethlabs, 2016a).

	50 mL/min	100 mL/min	150 mL/min	200 mL/min
1 segundo	> 21 horas	> 18 horas	> 14 horas	> 12 horas
10 segundos	> 21 horas	> 19 horas	> 15 horas	> 12 horas
30 segundos	> 23 horas	> 19 horas	> 15 horas	> 13 horas
60 segundos	> 28 horas	> 24 horas	> 20 horas	> 15 horas
300 segundos	> 30 horas	> 24 horas	> 21 horas	> 15 horas

B. Ruido de los datos

Otro factor es el ruido presente en las señales individuales de cada punto de los datos muestreados por el microetalmetro, el cual dependerá de los ajustes del instrumento. A 150 mL/min, los datos se ven afectados principalmente por el ajuste en el tiempo base más que en por el flujo. La relación entregada por el fabricante de ruido en los datos es la siguiente:

Tabla. C. Ruido de los puntos individuales del set de datos (Aethlabs, 2016a)

1 segundo	60 segundos	300 segundos
$< 5 \mu g/m^3$	$< 0,1 \mu g/m^3$	$< 0,01 \mu g/m^3$

C. Efectos de contaminación, vibración e impacto

Esta se ve principalmente asociada al ajuste en el tiempo base de medición. El fabricante señala lo siguiente:

Tabla. D. Efectos de contaminación, vibración e impacto en el equipo según el tiempo de base de medición ajustado para el equipo (Aethlabs, 2016a)

1 segundo	10 segundos	30 segundos	60 segundos	300 segundos
Muy grande	Grande	Moderada	Moderada	Menos efecto

D. Ajustes recomendados para el microetalmetro AE51 para distintos escenarios de estudio

Los diferentes escenarios de medición de BC requieren distintos ajustes de tasa de flujo y tiempo base para un mejor rendimiento y una mejor relación señal – ruido. Esto se detalla por el fabricante en la siguiente figura:

	Vida útil Filtro ← Más larga ————— Más corta →			
	50 mL/min	100 mL/min	150 mL/min	200 mL/min
1 s	Modo "Adquisición de datos" para emisiones inmediatas e impactos a altas [BC].	Modo "Adquisición de datos" para emisiones e impactos en zonas urbanas y entornos con tráfico.	Modo "Adquisición de datos" para mayores tiempos con mejor resolución a bajas [BC].	Modo "Adquisición de datos" para mayores tiempos con mejor resolución a bajas [BC] o muestreos de corta duración.
10 s	Para impactos de tráfico y transporte en altas [BC].	Para impactos de tráfico y transporte.	Para impactos de tráfico y transporte a bajas [BC].	Para impactos de tráfico y transporte a bajas [BC].
30 s	Monitoreo de exposición personal en altas [BC]. Exposición Ocupacional.	Recomendado para aplicaciones en general. Monitoreo de exposición personal. Impacto por tráfico. Monitoreo ambiental.	Monitoreo de exposición personal. Monitoreo ambiental.	Monitoreo de exposición personal. Impacto por tráfico. Sensibilidad para bajas [BC].
60 s	Monitoreo de exposición personal. Exposición Ocupacional. Sensibilidad para altas [BC].	Monitoreo de exposición personal. Monitoreo calidad de aire en interiores.	Monitoreo de exposición personal. Monitoreo calidad de aire en interiores. Sensibilidad para bajas [BC].	Monitoreo de exposición personal. Sensibilidad para bajas [BC].
300 s	Epidemiología. Monitoreo de área. Monitoreo calidad de aire en interiores. Sensibilidad para altas [BC].	Epidemiología. Monitoreo de área. Monitoreo calidad de aire en interiores.	Epidemiología. Monitoreo de área. Monitoreo calidad de aire en interiores. Sensibilidad para bajas [BC].	Epidemiología. Monitoreo de área. Monitoreo calidad de aire en interiores. Sensibilidad para muy bajas [BC]. Ruido de datos más bajos.

Figura. B. Ajustes recomendados para el microAeth AE51 para distintos escenarios (Modificado de Aethlabs, 2016b)

5. Software *microAethCOM*: microetalmómetro AE51

El software mostrado en la Figura C proporciona la interfaz necesaria para la configuración de los ajustes del instrumento previo a su uso, las rutinas de intercomparación, descarga de datos y carga de firmware al instrumento, y permite observar los datos de concentración de masa de BC, tanto en tiempo real o posterior a las mediciones.

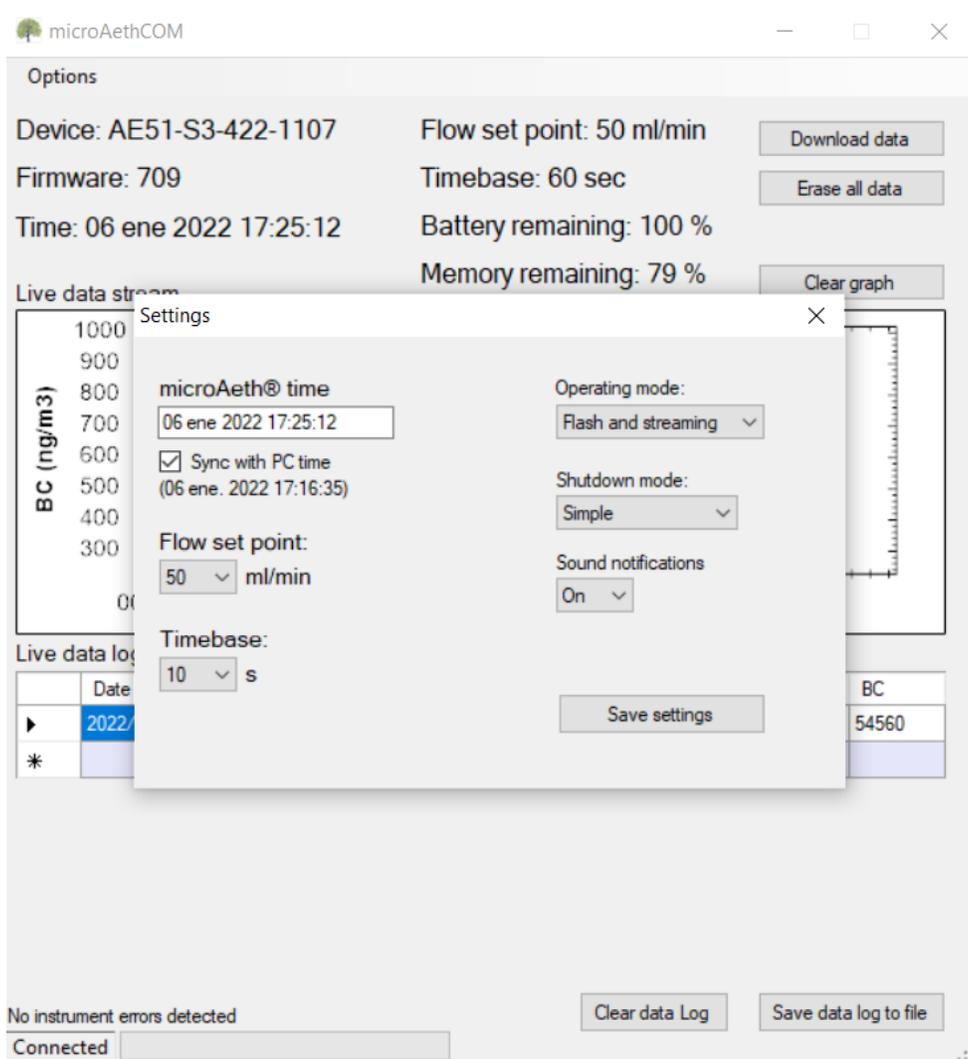


Figura. C. Software microAethCOM

En la Figura. C, se observa el software microAethCOM que muestra un flujo de 50 mL/min, tiempo de intervalo de cada dato medido de 10 segundos, la fecha y hora de medición, la batería y la memoria interna restante.

6. Software *microAeth Manager*: microetalmetro MA200

The screenshot displays the **microAeth Manager** interface. At the top left is the logo, and at the top right is a **Manage application** button. A notification bar indicates: "Notifications: The device: MA200-0009 was successfully loaded." with a timestamp of 10:24am and a **View all notifications** link.

The main section is titled **Local devices** and shows a card for **MA Device (MA200-0009)**. Below this card, a message states: "There are 10,943 points of new data available to download." with a **Download now** button.

The interface is divided into several configuration panels:

- VITAL SIGNS**: Includes BATTERY (99%), MEMORY (100% unused), STATUS (Idle), FIRMWARE (1.08), and DATE/TIME (Dec 13, 2018 10:26:06am -08:00). A **Manage data** button is located below this panel.
- MEASUREMENT SETTINGS**: Includes FLOW SET POINT (100 ml/min), TIMEBASE (10 seconds), WAVELENGTHS (5 wavelengths), and SAMPLING MODE (SingleSpot™).
- COMMUNICATIONS**: Includes a toggle for GPS (turned on), Serial settings (Baud rate: 1000000, Data mode: Streaming, Data format: Verbose), and TAPE ADVANCE TRIGGERS (ATN threshold: 100).
- OPERATIONAL SETTINGS**: Includes AutoSample (Off).

Figura. D. Software *microAeth Manager*

La Figura. D muestra el software *microAeth Manager* utilizado para configurar el microetalmetro *MicroAeth MA200*. En la figura, se observan las diversas opciones que se pueden ajustar previo al uso del instrumento.

Anexo 2. GRIMM®: Dust Decoder 11 – D

1. Especificaciones técnicas del instrumento

Tabla. E. Especificaciones técnicas del espectrómetro de aerosol Dust Decoder 11-D (GRIMM Aerosol Technik, 2018)

Aspecto	Valor
Tamaño de partículas que miden canales (31 canales)	0.25 - 0.28 - 0.3 - 0.35 - 0.4 - 0.45 - 0.5 - 0.58 - 0.65 - 0.7 - 0.8 - 1 - 1.3 - 1.6 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4 - 5 - 6.5 - 7.5 - 8.5 - 10 - 12.5 - 15 - 17.5 - 20 - 25 - 30 - 32 μm
Rango del tamaño de partículas	0,253 – 35,15 μm
Rango del número de partículas	0 – 5.300.000 partículas/litro
Masa de partículas	0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 100 mg/m^3
Reproducibilidad	98,2% para 0,3 μm 99,5% para 0,5 μm 91,8% para 1,0 μm 91,0% para 5 μm
Flujo de muestreo	1,2 ml/min \pm 3% regulada automáticamente
Sistema de colección	Filtro de 47 mm de PTFE
Condiciones de operación	0° C – 40°C; HR < 95% no con gases no condensantes, no corrosivos o explosivos
Condiciones de transporte almacenamiento	-20°C – 50°C; HR < 95%

2. Software GRIMM 1179 V2-07



Figura. E. Software GRIMM-Spectrometer

Anexo 3. Caracterización del área de estudio

1. Descripción de fuentes emisoras en la comuna de Quintero

Dentro de los criterios para sustentar la selección del área de estudio y diseño de las caminatas están el contexto industrial que presenta la comuna de Quintero y la calidad de aire con respecto a MP. A continuación, se analizan las principales fuentes de emisión de la zona, y, además, se recopila información sobre la calidad de aire con respecto al MP en el período de 2019 - 2021, a partir de las estaciones de monitoreo de calidad de aire ubicadas dentro del área de estudio.

El complejo industrial Ventanas, ubicado al Este de la península de Quintero, fue inaugurado en febrero de 1961 como un polo de desarrollo económico importante y una fuente de trabajo para el sector. Actualmente existen más de 17 empresas que desarrollan actividades económicas relacionadas principalmente con industrias para la fundición de cobre, elaboración de hormigón, asfalto y cemento; refinerías de petróleo e industrias químicas; generación de energía (instalación y operación de centrales térmicas) y actividades portuarias (INDH, 2018). Entre las empresas que allí operan, se encuentran:

1. **AES GENER S.A.:** Central termoeléctrica con cuatro unidades generadoras de energía a carbón con una potencia eléctrica total de 884 MW.
2. **Puerto Ventanas S.A.:** Terminal marítimo para la exportación de concentrados de cobre, acopios de concentrados, abastecimiento de carbón, transferencia a buques de hidrocarburos.
3. **Cementos Melón:** Acopio de carbón y petcoke, planta de molienda de cemento, almacenamiento y transferencia.
4. **CODELCO – División Ventanas:** Dedicada a la refinería y fundición de cobre, oro y plata.
5. **OXIQUM S.A.:** Terminal de gas de descarga
6. **GASMAR:** Central de abastecimiento de gas licuado.
7. **ENAP Quintero:** Almacenamiento de crudo de petróleo para combustible. Dentro de sus instalaciones se encuentran las plantas de lubricantes de COPEC y SHELL.
8. **GNL Quintero:** Terminal marítimo, planta de regasificación y almacenamiento de gas natural licuado (GNL) (EuroChile, 2019).

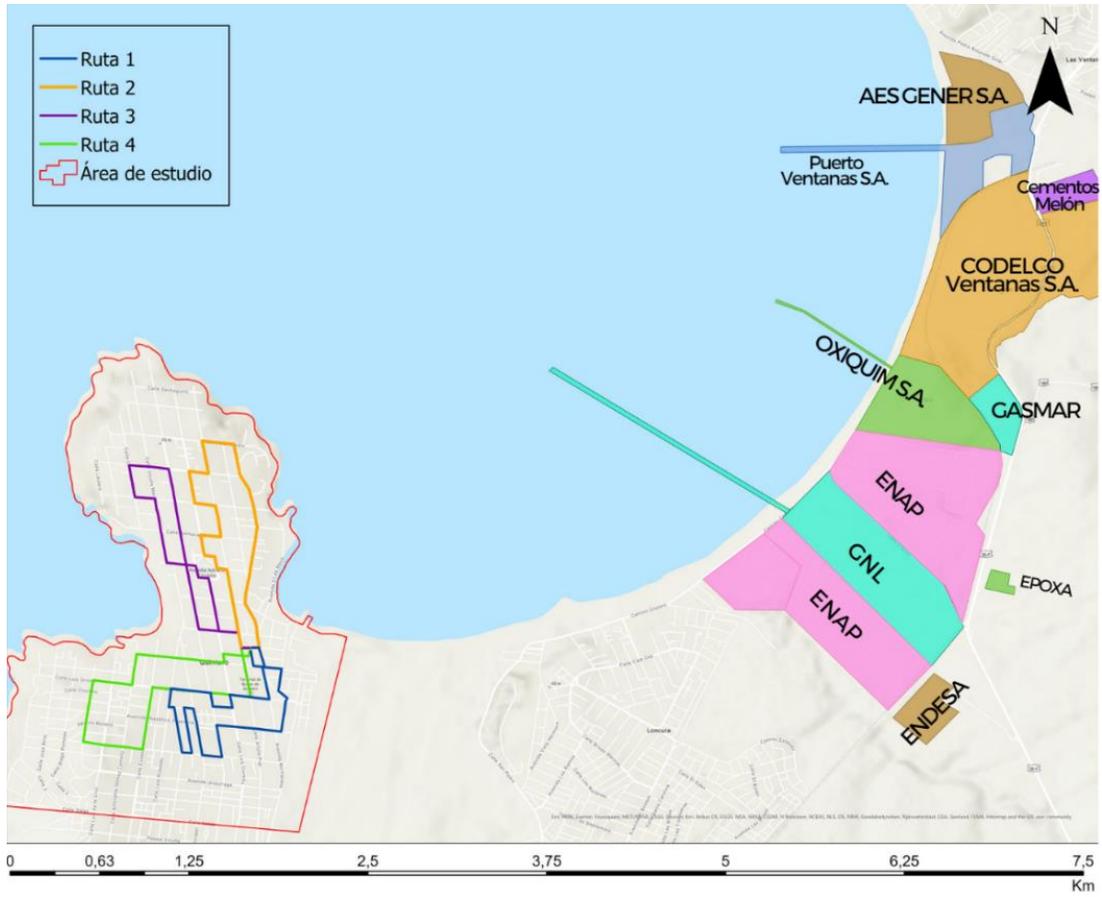
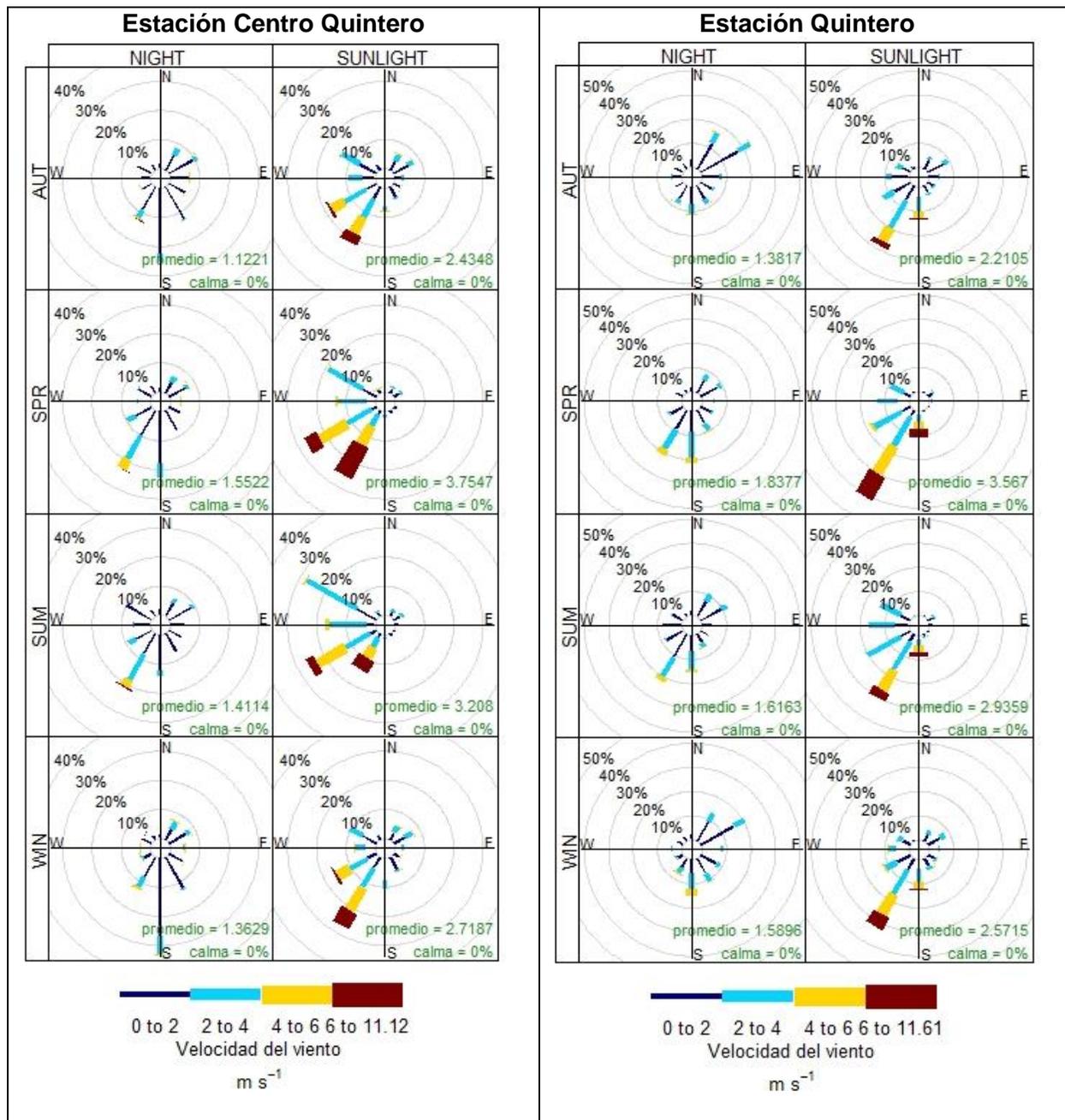


Figura. F. Mapa descriptivo de Complejo Industrial Ventanas

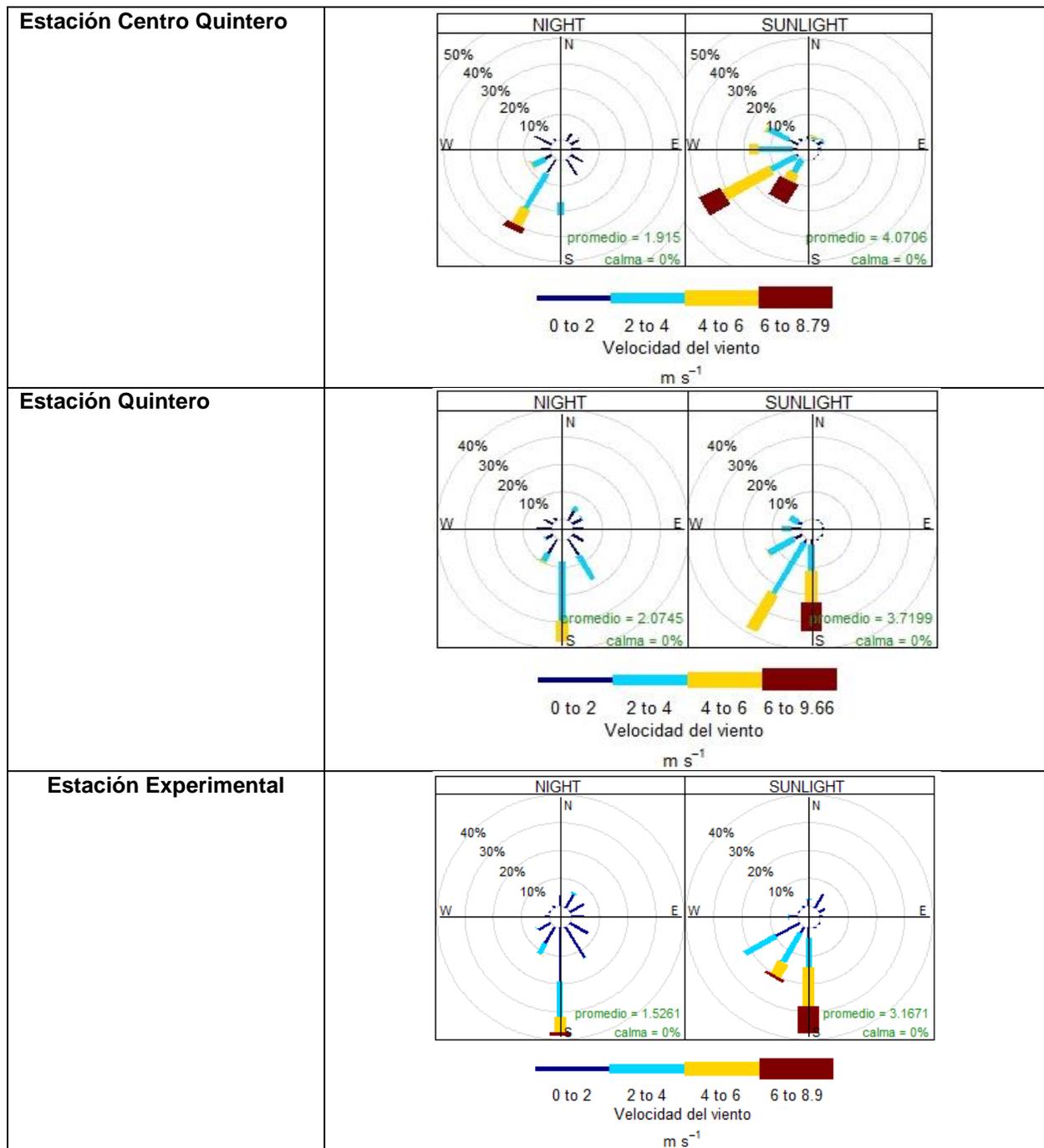
2. Régimen de vientos

2.1. Datos de dirección y velocidad de vientos horarios, para tres años consecutivos: 2019 – 2021.



Set Fotográfico. A. Régimen de vientos en estaciones del SINCA para el período de 2019 - 2021

2.2. Datos de dirección y velocidad de vientos para el mes de enero del año 2022 en las estaciones de estudio.



Set Fotográfico. B. Régimen de vientos del área de estudio para el período de enero 2022

3. Calidad del aire en términos de MP

En la Comuna de Quintero existen 6 estaciones de monitoreo de calidad de aire:

1. Centro Quintero
2. Loncura
3. Central Quintero
4. Quintero
5. Sur
6. Valle Alegre

La instalación de estas estaciones, junto con aquellas instaladas en las comunas de Concón y Puchuncaví (11 en total), permiten tener una importante cobertura de monitoreo en estas comunas para dar seguimiento a los impactos de las fuentes industriales y evitar la superación de las normas de calidad ambiental, con el fin de cumplir con las exigencias del Plan de Descontaminación del Complejo Industrial y el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

A partir de la definición del área de estudio de interés, se contempla evaluar los niveles ambientales de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a través del uso de las estaciones Centro Quintero y Quintero para el período de 2019 – 2021, estos se presentan a continuación:

A. Estación Centro Quintero

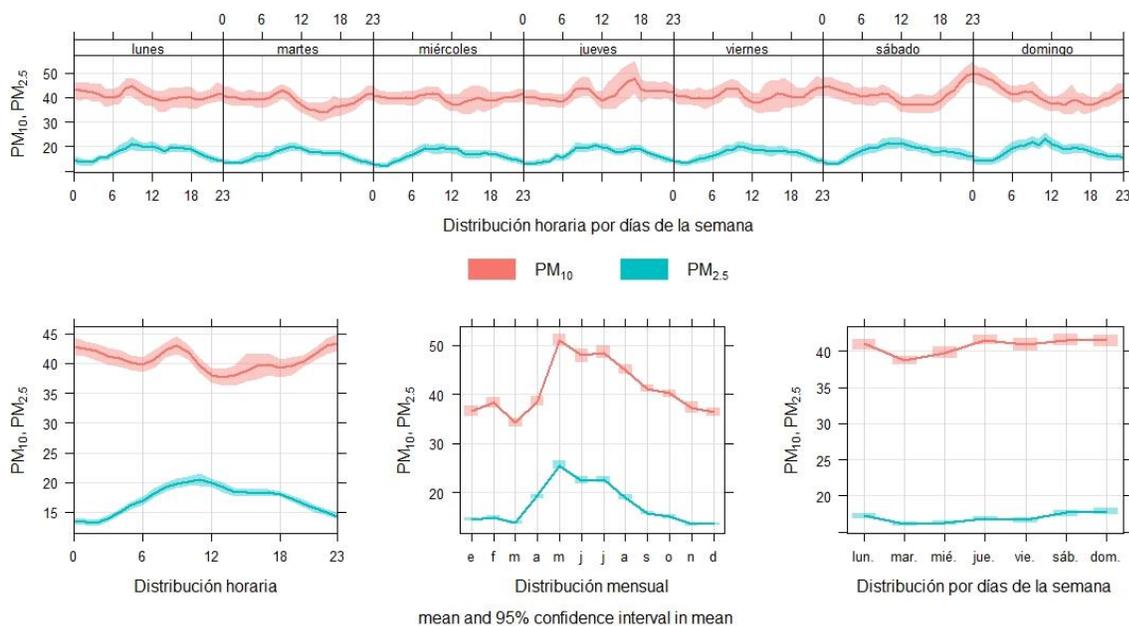


Figura. G. Niveles ambientales de MP_{10} y $MP_{2,5}$ según evolución horaria, semanal y mensual, para la estación Centro Quintero.

B. Estación Quintero

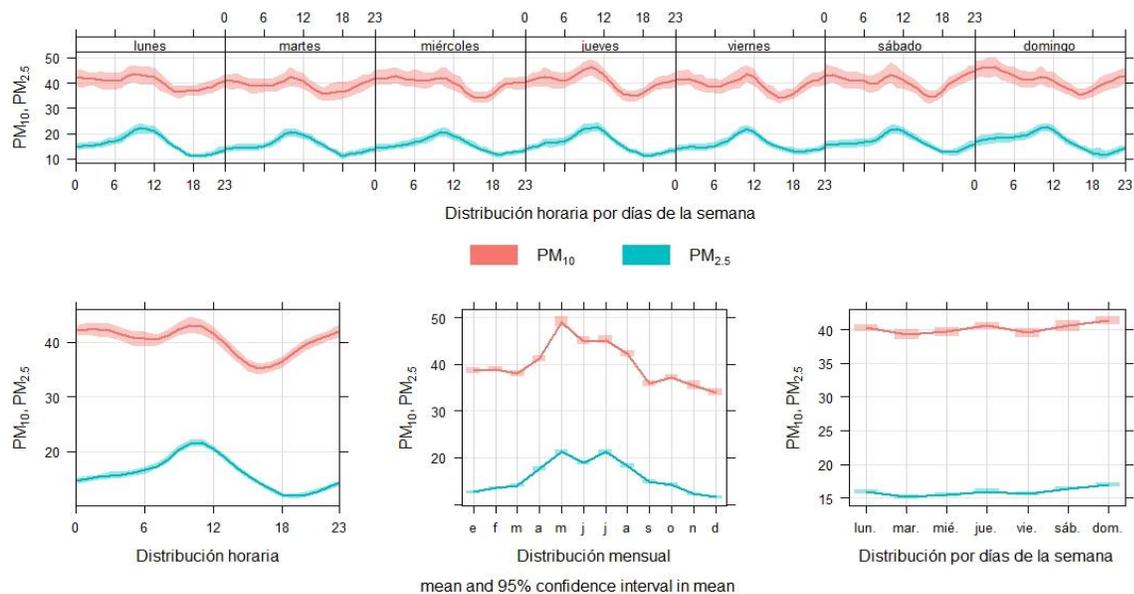


Figura. H. Niveles ambientales de MP_{10} y $MP_{2.5}$ según evolución horaria, semanal y mensual, para la estación Quintero.

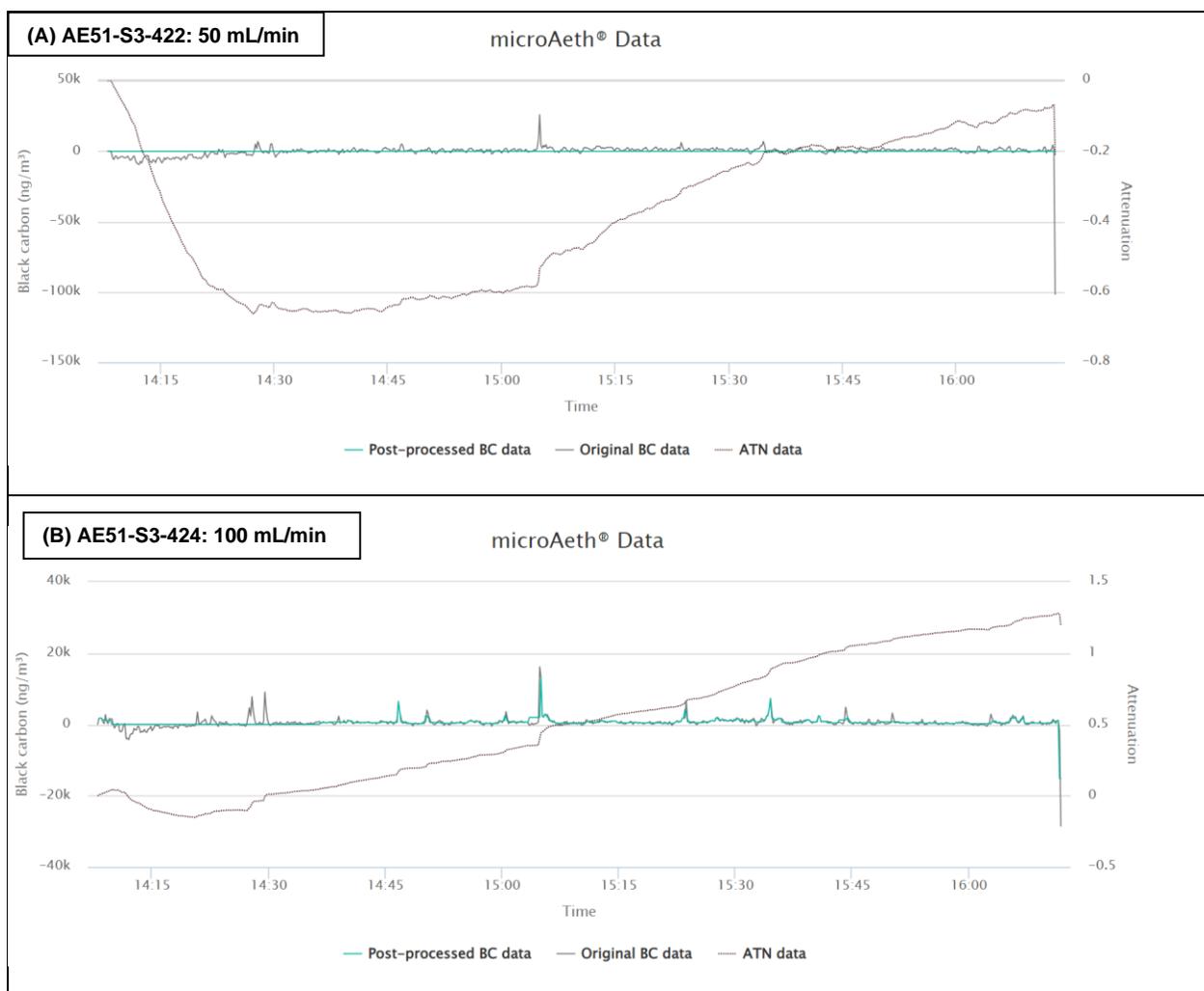
Anexo 4. Análisis para determinar tasa de flujo y tiempo base a utilizar in situ en la península de Quintero

Para determinar la tasa de flujo óptima, en primer lugar, se decide fijar el tiempo base de 10 segundos para los tres equipos, y se establecen las siguientes tasas de flujo de prueba:

Tabla. F. Tasa de flujo que se utilizó para cada microetalmómetro AE51

Microetalmómetro AE51	Tiempo base (s)	Tasa de flujo (mL/min)
AE51-S3-422	10	50
AE51-S3-424	10	150
AE51-S4-603	10	100

Establecidas las condiciones de trabajo, se llevó a cabo una caminata (Caminata Experimental) en la península de Quintero, durante dos horas. Los resultados, extraídos del análisis de datos de la plataforma *Dashboard* de Aethlabs, son los que se muestran a continuación:



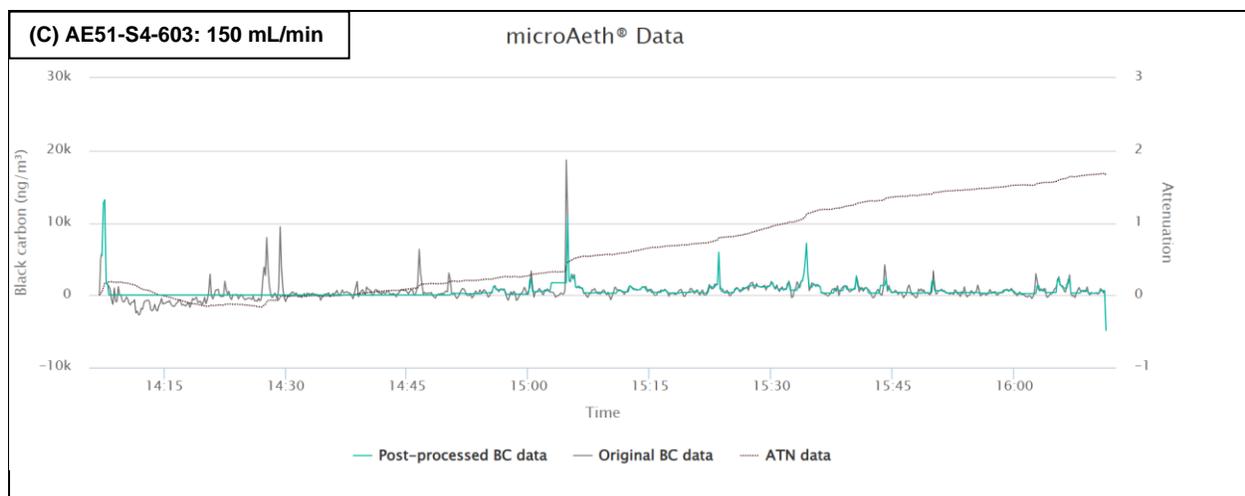


Figura. I. Comparación de resultados obtenidos para definir la tasa de flujo para las caminatas

Tabla. G. Cuadro comparativo de resultados obtenidos para definir la tasa de flujo para las caminatas

Equipo	(A) AE51-S3-422	(B) AE51-S3-424	(C) AE51-S4-603
Tasa de flujo de prueba	50 mL/min	100 mL/min	150 mL/min
Tasa de flujo media	49,4 ± 0,938 mL/min	99 ± 0,132 mL/min	149,7 ± 0,471 mL/min
Valor de ATN inicial	-11,796 atenuación	-9,27 atenuación	-18,653 atenuación
Valor de ATN final	-12,007 atenuación	-8,079 atenuación	-16,991 atenuación
Acumulación en el filtro	-0,212 atenuación	1,191 atenuación	1,661 atenuación
Concentración media de BC	-196 ± 582 ng/m ³	552 ± 291 ng/m ³	507 ± 266 ng/m ³

A partir de los resultados, se observa que al realizar mediciones con un flujo de 50 mL/min, el instrumento demora más en estabilizarse, pues la atenuación presenta un descenso gradual y una acumulación en el filtro negativa, por lo que se descarta el uso de esta tasa de flujo. Por otra parte, al comparar los flujos de 100 mL/min (B) y 150 mL/min (C), sus atenuaciones tienen un comportamiento bastante similar de aumentar paulatinamente en el tiempo, por lo que, en este sentido, ambas opciones son útiles. Sin embargo, al utilizar 100 mL/min, el rango de ATN presenta una menor variación. Al comparar la acumulación en el filtro y la concentración media de BC entregada por el equipo en cada caso, los valores son similares.

Por lo tanto, a partir de lo observado, se decide utilizar la siguiente configuración para los microetómetros AE51:

- Tiempo base: 10 segundos
- Tasa de flujo: 100 mL/min

Esto para obtener una estabilidad y validez en los datos obtenidos al realizar las caminatas, junto con una mejor relación señal/ruido en el tiempo.

Al momento de evaluar estos parámetros en el microetómetro MA200, se decide que, dado que para los otros tres equipos las condiciones serán las mencionadas, por consecuencia se deberán usar las mismas para este modelo. Esto, considerando que el objetivo es realizar 4 caminatas de manera simultánea que se encuentren en las mismas condiciones de funcionamiento para poder obtener datos comparables entre sí.

Anexo 5. Registro de las caminatas

1. Lista de Chequeo

Tabla. H. Registro del trabajo en terreno: Desarrollo de las caminatas

		Caminata 1	Caminata 2	Caminata 3	Caminata 4	Caminata 5	Caminata 6	Caminata 7
		Martes	Miércoles	Miércoles	Martes	Miércoles	Miércoles	Jueves
		11	12	12	25	26	26	27
		18:00	12:00	18:00	18:00	12:00	18:00	12:00
Hora inicio – Hora término		18:12 – 19:45	12:23 – 13:39	17:58 – 19:26	19:01 – 20:21	12:00 – 13:16	17:52 – 19:17	9:15 – 10:37
Insertar filtro nuevo (blanco hacia arriba (AE51); el instrumento DEBE estar apagado al cambiar el filtro)	S3 – 422	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	S3 – 424	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	S4 – 603	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	MA200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Intercomparación previa 15 min.		✓	✓	Intercomparación 10 min.	Intercomparación 10 min.	✓	✓	Intercomparación 10 min.
Anotar microetaleómetro y quién lo lleva	R ₁	MA200 – Darío	S3-424 – Yo	S3-424 – Darío	S3-422 – Daniel	S3-422 – Javier	MA200 – Yo	S3-422 – Nicole
	R ₂	S3-422 – Javier	MA200 – Darío	S-603 – Javier	S4-603 – Javier	S3-424 – Cristina	S4-603 – Javier	MA200 – Yo
	R ₃	S4-603 – Zoë	S3-422 – Javier	MA200 – Yo	MA200 – Yo	MA200 – Nicole	S3-424 – Daniel	S3-424 – Daniel
	R ₄	S3-424 – Yo	S4-603 – Zoë	S3-422 – Nicole	S3-424 – Darío	S4-603 – Yo	S3-422 – Nicole	S4-603 – Javier
Ruta para el GRIMM 11-D		R ₁	R ₂	R ₄	R ₂	R ₃	R ₁	R ₄
GRIMM 11-D programado en 6 segundos		✓	✓	* Instrumento midió cada 1 min.	✓	✓	✓	✓
Intercomparación posterior 15 min.		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
¿Están descargados los datos de cada ruta (en .csv y .KML) antes de empezar la siguiente caminata?	R ₁	✓	*	*	*	✓	✓	✓
	R ₂	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	R ₃	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓
	R ₄	*	✓	✓	✓	✓	✓	*
Notas: Tasa de flujo: 100 mL/min Tiempo base: 10 segundos								