

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**PROPUESTA DE DISEÑO DE RED DE MONITOREO DE
CARBONO NEGRO PARA LA MACRO-ZONA CENTRAL DE
CHILE**

**Estudio de fase screening para evaluación de localización de estación de
monitoreo de Carbono Negro.**

SERGIO CRISTIAN CORREA LEGISOS

Profesor Guía: Dr. Pedro Oyola

**Tesis para optar al Título de Ingeniero
Físico**

Santiago – Chile
2013

© Sergio Cristian Correa Legisos

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

**PROPUESTA DE DISEÑO DE RED DE MONITOREO DE
CARBONO NEGRO PARA LA MACRO-ZONA CENTRAL DE
CHILE**

**Estudio de fase screening para evaluación de localización de estación de
monitoreo de Carbono Negro.**

SERGIO CRISTIAN CORREA LEGISOS

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía
Dr. Pedro Oyola T. Director del Centro Premio Nobel Mario Molina Chile y ha
sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora

Dr. Ernesto Gramsch _____

Dr. Eduardo Lissi _____

Dr. Rainer Schmitz _____

Dra. Yolanda Vargas _____

Dr. Pedro Oyola

Profesor Guía

Dra. Yolanda Vargas

Directora del Departamento de Física

Dedicatoria

A mi madre y a mi hermano Felipe, por salir siempre adelante en un mundo de cambios drásticos y amenazas...

“Mide lo que es medible y haz medible lo que no lo es.”

- Galileo, (al investigar la Física en el gran juego de PC: *Civilization V*)

Agradecimientos

- Al Centro Premio Nobel Mario Molina Chile para Estudios Estratégicos de Energía y Medioambiente (CMMCh) por financiamiento y a su equipo por la cooperación.
- A Pedro Oyola del CMMCh por la guía, financiamiento y facilitación datos meteorología.
- A Marcelo Corral, Marcelo Fernandez, Roberto Martinez del Ministerio Medioambiente, facilitación datos meteorología, y por el interés mostrado en este estudio.
- A Ernesto Gramsch de la Universidad de Santiago, por facilitar laboratorio e instrumentos de medición de carbono negro SIMCA para calibración del pequeño etalómetro, y por sus consejos.
- A Douglas MacAyeal de la Universidad de Chicago por financiamiento de visita a Universidad de Michigan con el grupo de expertos en modelación del CN de Mark Flanner
- A Mark Flanner de la Universidad de Michigan por su ayuda con material de modelos de deposición de carbono negro y vanguardia global.
- A Roberto Rondanelli, Cecilia Farias, y Rainer Schmitz de Geofísica de la Universidad de Chile por facilitarme los datos del globo cautivo y por sus consejos.
- A Pablo Rojas, mi padrastro, por transportarme a cambiar filtros en el proceso de calibración y ayudarme en las mediciones de San José de Maipo.
- A Marta Caballero, mi pareja, por su apoyo incondicional, tanto en lo sentimental como en lo técnico de este estudio.
- A mi familia porque de no ser por ellos, no hubiese llegado hasta acá.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Tabla de Contenidos	iii
Índice de Tablas	vi
Índice de Ilustraciones	vii
Resumen	1
1 Introducción	2
1.1 Objetivo general	4
1.1.1 Objetivos específicos	4
1.2 Metodología	4
1.3 Delimitación del Trabajo	5
1.4 Organización del Trabajo	5
Antecedentes	6
2 El Carbono negro	6
2.1 Propiedades y Características	7
2.2 Fuentes y Efectos	9
3 Situación histórica sobre mediciones y estudios del Carbono Negro en Chile	13
4 Macro Zona Central de Chile	19
4.1 Clima y Topografía	19
4.2 Fuentes	20
4.3 Chile como lugar para medir Carbono Negro de fondo en el contexto global.	22
4.4 Descripción de estaciones Globales GAW	24

4.4.1	Estación Mauna Loa (HI), Estados Unidos.	24
4.4.2	Zugspitze-Gipfel, Alemania	25
4.4.3	Izaña, España	25
4.4.4	Jungfrauoch, Suiza	25
4.5	Geografía y Clima	26
4.5.1	Dispersión y Mezcla de Monóxido de Carbono	26
4.5.1.1	Glaciares Susceptibles	31
Desarrollo		32
5	Introducción	32
6	Fase A – Screening	35
6.1	Instrumentos	36
6.2	Sectores monitoreados	41
6.3	Resultados	43
6.4	Comparación 1: Experimento con globo cautivo.	50
6.5	Comparación 2: Carbono Negro en los Himalayas.	55
6.6	Comparación 3: Carbono Negro en Europa Occidental y Nórdica.	57
6.7	Comparación 4: Modelación Perfil Vertical de Monóxido de Carbono en Santiago	61
7	Análisis datos y estaciones meteorológicas, y recomendaciones de evaluación de ubicación de una estación de CN	63
8	Modelos	79
9	Conclusión de la Fase A: Recomendación de localización a evaluar	84
10	Fase B – Campañas de monitoreos episódicos y continuos	87
10.1	Monitoreo Continuo	87
10.2	Monitoreo Episódico	88
Conclusiones y Recomendaciones		91

Bibliografía	93
Anexo	97
11 Calibración Etalómetro.	97
12 Otros resultados de Screening	98
13 Dirección y Velocidad del Viento, Otras Estaciones	120

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Nombres sugeridos por (Bond, et al., 2013) para diferenciar concepto según método de medición.	8
Tabla 4-1 Resumen oficial de Inventario de emisiones anual 2005 en la Región Metropolitana.	21
Tabla 5-1 Detalles generales de rutas monitoreadas en los sectores previamente mencionados	42
Tabla 5-2 Detalles de estaciones meteorológicas disponibles. 5 estaciones de la DMC y 11 de la red MACAM.	63
Tabla 5-3 Concentraciones de elementos trazadores antropogénicos medidos en muestras de nieve recolectadas durante campañas de muestreo en Cerro Colorado comparados con valores de referencia en los Nevados de Chillán. Las fuentes trazadas: Trafico (1), fundiciones (2), quema de biomasa y carbón (3), incineración de residuos (4). (Cereceda-Balic, et al., 2012)	72
Tabla 5-4 Lista de ubicaciones propuesta para evaluación de instalación de estación de monitoreo de Carbono Negro	84
Tabla 5-5 Costos de inversiones en dólares estadounidenses de instrumentos necesarios en etapa de monitoreo continuo y episódico	89
Tabla 5-6 Costos de operaciones en dólares estadounidenses para monitoreo continuo y episódico	90

Índice de Ilustraciones

Figura 1-1 La Gran Niebla del 52. Episodio de contaminación urbana extrema ocurrido en Diciembre de 1952 en Londres, Inglaterra. Mató a 12.000 personas. Fue causado principalmente por emisiones de quema incompleta de carbón junto con un tiempo frío y la presencia de condiciones de anticiclón.	2
Figura 2-1 Fuentes y procesos del CNR en el sistema climático. Fuente: Bond et. al. 2013	6
Figura 2-2 Imagen aérea de la superficie del manto de hielo de Groenlandia donde las manchas negras manifestaría la presencia de carbono negro que se transporta a nivel inter-hemisférico depositándose en el hielo y la nieve. Fuente: Proyecto Extreme Ice Survey.	9
Figura 2-3 Emisiones de Carbono Negro por región y fuente, año 2000. (Bond, et al., 2013).	10
Figura 2-4 Diferencia del albedo en función de la longitud de onda en granos de nieve de 50 y 1000 micrones con y sin presencia de 200ng de CN por g de nieve. (Flanner, 2013)	11
Figura 4-1 Panorámica Noreste a Noroeste desde cerro Provincia 02/06/2013 - 14:00. Se puede observar el transporte de partículas por el valle del Mapocho hacia la Cordillera de los Andes. (Fuente propia).	19
Figura 4-2 Mapa topográfico de la Macro-Zona Central de Chile. Las áreas rojas corresponden a zonas pobladas. (Fuente propia).	20
Figura 4-3 Emisiones globales de CN el año 2000 en Gigagramos. Fuente: epa.gov	22
Figura 4-4 Tráfico de barcos en el mundo (Kedzieski, 2013).	23

Figura 4-5 Datos de modelo IMPACT-AM3 de promedio anual de deposición de CN (Flanner, 2013).	24
Figura 4-6 Mapa de pistas de centro de ski cercano a la estación Zugspitze. La construcción de la estación puede aprovechar las instalaciones del centro de ski para el acceso del personal.	25
Figura 4-7 Gráfico de dispersión de CO y rBC obtenido de mediciones en el Océano Índico (INDOEX) de Dickerson y otros, 2002. Mace Head y FME indican mediciones realizadas en Irlanda y en Maryland, EEUU respectivamente. En todos los casos se observa una correlación entre el CN y el CO.	27
Figura 4-8 Vientos de superficie y concentraciones de CN en $\mu\text{m m}^{-3}$. Las líneas sólidas indican la topografía. El tiempo se muestra en hora local. Fuente: Schmitz, 2005.	29
Figura 4-9 Vientos de superficie y concentraciones de CN en $\mu\text{m m}^{-3}$. Las líneas sólidas indican la topografía. El tiempo se muestra en hora local. Fuente: Schmitz, 2005.	30
Figura 4-10 Glaciares de la Macro-Zona Central (en área celeste). Fuente: Inventario Nacional de Glaciares de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.	31
Figura 5-1 Esquema de tipos y sub-tipos de estaciones de monitoreo de calidad del aire según la Eol	32
Figura 5-2 Etalómetro portátil.	36
Figura 5-3 Monitor de Aerosoles DustTrack.	38
Figura 5-4 GPS de mano GARMIN eTrex 30.	40
Figura 5-5 Imagen satelital de sectores de monitoreo. Las líneas azules corresponden a los recorridos realizados con GPS. (Google Earth).	41
Figura 5-6 Registro fotográfico desde el centro de ski La Parva hacia Santiago, donde se evidencia el transporte valle arriba de	

supuestos aerosoles absorbentes de luz por el valle del Mapocho. Las horas de las fotografías son 11:56, 14:38 y 16:20 de izquierda a derecha.	43
Figura 5-7 Perfiles verticales de ascenso (a la izquierda) y descenso (a la derecha) de Carbono Negro equivalente en las distintas rutas	44
Figura 5-8 Perfiles verticales en ascenso (izquierda) y descenso (derecha) de concentración de MP2,5 en las rutas de cerro Pochoco y centro de ski La Parva.	46
Figura 5-9 Diámetro promedio de masa de carbono negro para todos los vuelos. Los puntos de datos individuales se muestran en gris; los promedios se muestran en círculos negros.	48
Figura 5-10 Perfiles verticales de(izquierda a derecha) temperatura potencial virtual, razón de mezcla, concentraciones de Carbono Negro equivalente y velocidad del viento dividida en componentes, en ascenso de globo cautivo en Parque O'Higgins. (Datos cortesía del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile).	51
Figura 5-11 Perfiles verticales de(izquierda a derecha) temperatura potencial virtual, razón de mezcla, concentraciones de Carbono Negro equivalente y velocidad del viento dividida en componentes, en ascenso de globo cautivo en Parque O'Higgins. (Datos cortesía del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile).	53
Figura 5-12 Variación temporal de concentraciones máxicas de CNe medidas en Dehradun, Kullu, Nainital, Hanle, y NCO-P en función de la altitud de la estación. (Nair, et al., 2013)	55
Figura 5-13 Perfiles de Carbono Negro refractario en escala logarítmica y lineal. (McMeeking, et al., 2010)	57

Figura 5-14 Correlación entre concentraciones de CNe (BC) medido con el etalómetro y CNr medido con el SP2 en los lugares mencionados en la leyenda. (Wang, et al., 2012).	58
Figura 5-15 Perfiles verticales de ascenso (a la izquierda) y descenso (a la derecha) de Carbono Negro refractario en las distintas rutas obtenido a partir del ajuste lineal entre CNe y CNr encontrado por Wang, et. al., 2013.	59
Figura 5-16 Dispersión vertical de modelación de CO en la sección transversal del paralelo 33,45°. Las líneas sólidas representan la temperatura potencial en K.	61
Figura 5-17 Ubicación de estaciones meteorológicas disponibles. Los círculos azules corresponden a las estaciones de la red MACAM del Ministerio de Medio Ambiente, y los círculos rojos corresponden a las estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile.	64
Figura 5-18 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación los Libertadores de la DMC.	66
Figura 5-19 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación los Libertadores de la DMC.	67
Figura 5-20 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica Los Libertadores, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.	68
Figura 5-21 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos	

(izquierda) y fríos (derecha) para la estación El Colorado de la DMC.	69
Figura 5-22 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica El Colorado, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.	70
Figura 5-23 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación los Libertadores de la DMC.	71
Figura 5-24 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación Las Condes de la red MACAM.	73
Figura 5-25 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación Las Condes de la red MACAM.	74
Figura 5-26 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica Guayacán, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.	75
Figura 5-27 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación Guayacán de la DMC.	75
Figura 5-28 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a	

la izquierda y tarde a la derecha, para la estación Guayacán de la DMC.	76
Figura 5-29 Campos de viento resultantes a partir de los datos de estaciones meteorológicas disponibles, separados por período del día am y pm, y temporada fría y cálida.	78
Figura 5-30 Resultados de modelo de trayectorias retrospectivo, donde cada punto representa la ubicación de una partícula de prueba cada 10 minutos. (CONAMA, 1999)	79
Figura 5-31 Ejemplo de resultados de modelación de análisis de trayectoria retrospectiva de HYSPLIT. Cortesía del NOAA	80
Figura 5-32 Ejemplo de resultados de modelación de análisis de trayectoria retrospectiva de HYSPLIT para partículas con 3 altitudes originales distintas hace 10 días que llegan a glaciares de Chile Central. Cortesía del NOAA	82
Figura 6-1 Calibración de micro-etalómetro (línea azul y roja) con el instrumento SIMCA de la Universidad de Santiago como referencia (línea negra).	97
Figura 7-1 Perfil de elevación, <i>San Cristobal 11/05/13</i>	98
Figura 7-2 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, San Cristobal 11/05/13</i>	98
Figura 7-3 Puntos georeferenciados de concentración de carbono negro, <i>San Cristobal 11/05/13</i>	99
Figura 7-4 Sondeo ruta A. La banda de colores representa la concentración de Carbono Negro equivalente en la posición correspondiente. 26/05/13	100
Figura 7-5 Perfil vertical de las concentraciones de Carbono Negro equivalente en la ruta A. 26/05/13	101
Figura 7-6 Perfil de elevación, <i>02/06/13</i>	102

Figura 7-7 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, 02/06/13</i>	102
Figura 7-8 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta descenso, 02/06/13	103
Figura 7-9 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta de ascenso, 02/06/13	103
Figura 7-10 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, 08/06/13</i>	104
Figura 7-11 Perfil de elevación, 08/06/13	104
Figura 7-12 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, zoom en cerro, ascenso, 08/06/13	105
Figura 7-13 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta total, 08/06/13	105
Figura 7-14 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, zoom en cerro, descenso, 08/06/13	106
Figura 7-15 Perfil de elevación, ascenso, 10/07/13	107
Figura 7-16 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 10/07/13</i>	107
Figura 7-17 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ascenso, 10/07/13	109
Figura 7-18 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ruta descenso, 10/07/13</i>	109
Figura 7-19 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, descenso, 10/07/13	110
Figura 7-20 perfil de elevación, descenso, , 10/07/13	110
Figura 7-21 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, ascenso, 11/07/13	111
Figura 7-22 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 11/07/13	111

Figura 7-23 Proporción de carbono negro equivalente con mp2,5, ruta ascenso, 11/07/13	112
Figura 7-24 Perfil de elevación, ascenso, 11/07/13	112
Figura 7-25 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ascenso, 11/07/13	113
Figura 7-26 <i>Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ruta descenso, 11/07/13</i>	113
Figura 7-27 Proporción de carbono negro equivalente con mp2,5, ruta ascenso, 11/07/13	114
Figura 7-28 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, descenso, 11/07/13	114
Figura 7-29 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, descenso, 11/07/13	115
Figura 7-30 Perfil de elevación, descenso, 11/07/13	115
Figura 7-31 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, 28/07/13	116
Figura 7-32 Perfil de elevación, 28/07/13	116
Figura 7-33 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, 28/07/13	117
Figura 7-34 Perfil de elevación, ascenso, 16/08/13	118
Figura 7-35 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 16/08/13	118
Figura 7-36 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, 16/08/13	119
Figura 8-1 Dirección y velocidad del viento, El Paico	120
Figura 8-2 Dirección y Velocidad del Viento, Lo Prado	121
Figura 8-3 Dirección y Velocidad del Viento, estación F	121
Figura 8-4 Dirección y Velocidad del Viento, estación L	121
Figura 8-5 Dirección y Velocidad del Viento, estación N	121

Figura 8-6 Dirección y Velocidad del Viento, estación O	121
Figura 8-7 Dirección y Velocidad del Viento, estación P	121
Figura 8-8 Dirección y Velocidad del Viento, estación Q	121
Figura 8-9 Dirección y Velocidad del Viento, estación R	121
Figura 8-10 Dirección y Velocidad del Viento, estación S	121
Figura 8-11 Dirección y Velocidad del Viento, estación T	121
Figura 8-12 Dirección y Velocidad del Viento, estación V	121

Resumen

La creciente preocupación por el cambio climático ha llevado a la coalición de clima y aire limpio a definir recientemente 4 contaminantes climáticos de corta vida con el objetivo de reducir en poco tiempo sus emisiones. Entre ellos ha cobrado importancia el carbono negro, sobretudo el impacto negativo en nieve y glaciares.

La macro zona central de Chile, es decir, las regiones V, VI y XIII, no cuentan con una red de monitoreo continuo de carbono negro, siendo que cuenta con importantes fuentes de este contaminante cerca de glaciares, los que son un importante fuente de agua dulce.

En este estudio se realizan mediciones exploratorias en la pre-cordillera de los Andes, a través de los valles del Mapocho y el Maipo para evidenciar la presencia de carbono negro en el aire entre los 800 y 3500 metros sobre el nivel del mar, encontrándose concentraciones similares a las medidas en los Himalayas donde la deposición de carbono negro en esta cordillera ha sido considerada un problema real. Por otra parte se analizan datos de estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana y la V Región, que en conjunto con modelos de análisis de trayectorias se evidencia un persistente transporte de masas de aire hacia la cordillera desde Santiago y desde la costa.

Finalmente, con el análisis anterior, junto con criterios técnicos y prácticos, se identifican algunos lugares estratégicos, donde se deja propuesta y evaluada económicamente la siguiente etapa de monitoreo para definir la localización de una o más estaciones de monitoreo de carbono negro.

1 INTRODUCCIÓN

La contaminación urbana ha sido un problema durante cientos de años, principalmente a partir de la Revolución Industrial. Desde inicios del siglo XX se comienza a usar el concepto de “negrura” o absorción de luz como indicador de la contaminación, siendo en 1961 cuando el Reino Unido crea la primera red de monitoreo de humo negro en la historia, 9 años después del catastrófico episodio de contaminación del año 52 en Londres. El Carbono Negro (CN) fue aislado de la contaminación atmosférica cuando en 1978 y en 1981 se encuentra que partículas gráficas refractarias eran las responsables de la absorción de la luz, y luego en 1967 podrían influenciar el clima y que la absorción radiativa de los aerosoles causa más calentamiento que enfriamiento. En 1972-1980 se supo que estas partículas podían viajar grandes distancias



Figura 5-1 La Gran Niebla del 52. Episodio de contaminación urbana extrema ocurrido en Diciembre de 1952 en Londres, Inglaterra. Mató a 12.000 personas. Fue causado principalmente por emisiones de quema incompleta de carbón junto con un tiempo frío y la presencia de condiciones de anticiclón.

llegando incluso hasta el Ártico y luego, en los años 90 se hicieron varios experimentos para examinar la salida de aerosoles desde continentes, lo que

permitió confirmar que los aerosoles que se observaban frecuentemente en algunas regiones eran un componente importante en el balance de radiación. La información coincidente de la importancia atmosférica y la propuesta de políticas de mitigación en la actualidad genera cada vez más debate. (Bond, et al., 2013).

En los últimos años, la oportunidad de reducir el CN ha recibido una profunda atención política de alto nivel. La declaración del G8 en Italia - 2009, además de prometer reducciones de gases de efecto invernadero, se comprometieron a tomar acciones rápidas para abordar otros agentes forzadores del clima, como el CN. El Consejo Ártico, reconociendo que las reducciones de emisiones tienen el potencial para frenar la tasa de derretimiento de nieve, hielo marino y capa de hielo ártica en el corto plazo, estableció un grupo de trabajo en Noruega - 2009 para ofrecer recomendaciones de mitigación, y animó a los 8 estados asociados a implementar ciertas medidas de reducción de CN en Groenlandia - 2011. Estados Unidos, por otra parte, ha complementado su interés internacional con la aprobación de un proyecto de ley (H.R. 2996) requiriendo un estudio de las fuentes, impactos del clima y la salud, y opciones de mitigación del CN tanto doméstica como internacional. Publicado en el UNECE el 2011, una propuesta de revisión del Protocolo de Gotemburgo afirma que las partes “deberían, en la implementación de medidas para alcanzar sus objetivos nacionales de material particulado, dar prioridad, mientras se vaya considerando oportuno, a las medidas de reducción de emisiones que también reduzcan CN en forma significativa”. En Febrero del 2012 se forma la Coalición de Clima y Aire Limpio - CCAC con el objetivo de reducir el calentamiento del clima y contaminantes aéreos a través de acciones sobre los contaminantes del clima de corta vida - CCCV, en particular CN, metano e hidrofluorurocarbonos. Chile actualmente es socio de esta coalición, lo que implica un compromiso de mitigar los CCCV en el país. Esto se refleja en una licitación pública para la actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en

la región metropolitana, donde se menciona explícitamente el *Black Carbon* o carbono negro. En respuesta a la licitación anterior, el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos de Energía y Medioambiente requiere el diseño de una red de monitoreo de CN orientada a monitorear en sectores donde exista presencia de glaciares y que se minimicen los gastos viales y de construcción.

1.1 Objetivo general

Proponer localización preliminar de una estación de monitoreo regional de carbono negro en la macro zona central de Chile.

1.1.1 Objetivos específicos

Evidenciar la presencia y transporte de carbono negro por los valles del Mapocho y del Maipo.

1.2 Metodología

- Mediciones exploratorias de Carbono Negro equivalente (CNe) con un Etalómetro portátil, un Monitor de Aerosoles y un GPS en distintos puntos del valle del Mapocho para determinar posibles zonas de instalación de la estación.
- Diseño de programas en MATLAB destinados a procesar los datos (e.g., lectura, validación, sincronización, georeferenciación)
- Modelos de análisis de trayectorias simples y dispersión para determinar zonas de influencia de fuentes importantes de CN.
- Análisis de meteorología regional.

1.3 Delimitación del Trabajo

Esta propuesta pretende ser una fase preliminar que sería de utilidad para los futuros encargados de realizar campañas de análisis de fuentes y de poner el proyecto en marcha, por lo que no se planea medir ni simular en forma exhaustiva, sino realizar mediciones en terreno para cuantificar las concentraciones de carbono negro hacia la cordillera de los Andes Central y presentar una metodología que permita acotar la localización de una futura estación de monitoreo de carbono negro.

1.4 Organización del Trabajo

La presente propuesta se divide en 3 fases, la que comienza con realizar mediciones en terreno con instrumentos portátiles.

La fase siguiente se refiere a analizar datos de meteorología para tener una mejor idea sobre el transporte de masas de aire valle-montaña, lo que se compara con simulaciones de escala local e inter-hemisférica.

Finalmente se describen etapas posteriores de monitoreos continuos y episódicos y se evalúa los costos de inversión y de operación para esta etapa, cuya realización antecede a la fase de consolidación de una estación de monitoreo.

Antecedentes

2 EL CARBONO NEGRO

Según la Agencia de Protección Medioambiental - EPA el CN es el material negro hollinoso emitido, debido a 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

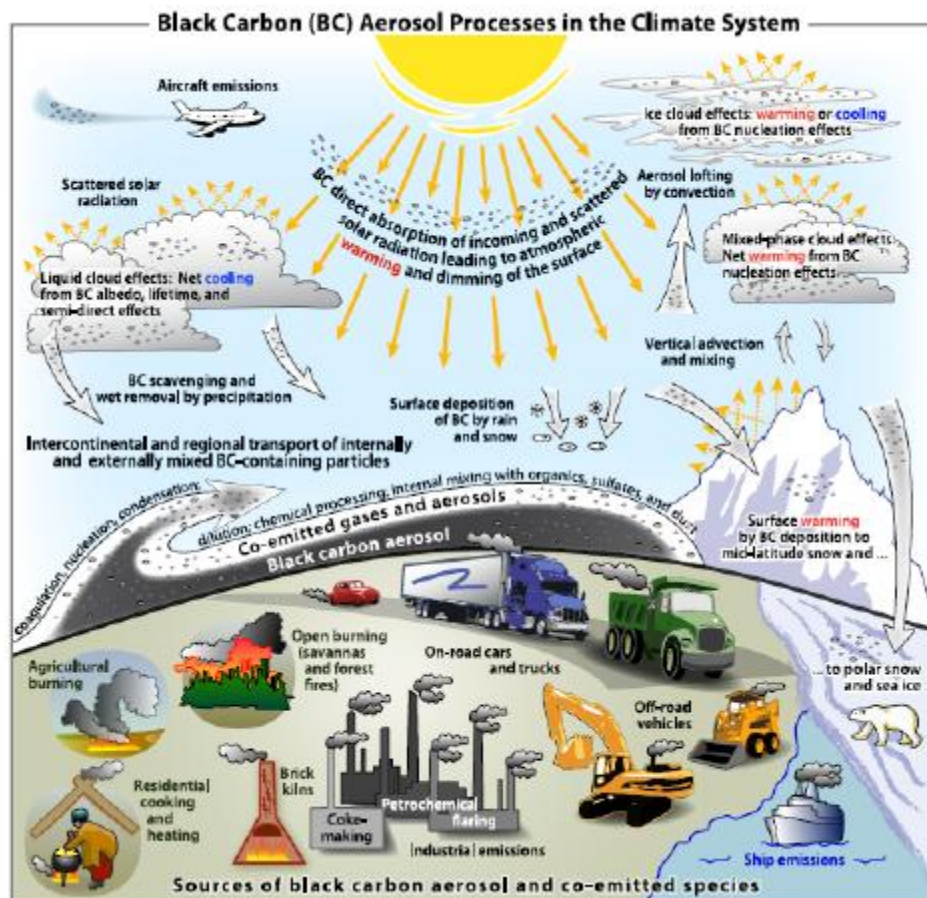


Figura 5-2 Fuentes y procesos del CNR en el sistema climático. Fuente: Bond et. al. 2013

fuentes que queman combustibles fósiles. Es una parte importante del material

particulado - MP, el que es un contaminante del aire (EPA, 2011), y más significativo aún en la fracción fina en partículas de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrómetros ($MP_{2,5}$). En la Figura 5-2 se presenta un resumen de las típicas fuentes de CN, sus procesos de transporte y formas de impactar el clima.

Se debe distinguir entre el CN, carbono orgánico, carbono elemental, carbón gráfico, carbono café, etc. Todos los anteriores son términos descriptivos originalmente definidos a partir de métodos analíticos usados para caracterizar un material heterogéneo y no un indicador de la existencia de especies moleculares discretas. (Jeffrey & Marley, 2006).

2.1 Propiedades y Características

La fuerte absorción de la luz en todo el espectro visible es su principal característica. No existe otra sustancia presente en la atmósfera con tal absorción de luz visible por unidad de masa. Debido al desarrollo de nuevas tecnologías de medición el Carbono Negro, se sugiere ser llamado Carbono Negro Refractario (CNR) por Bond et al, 2013 (ver Tabla 5-1), éste se distingue de los demás tipos de partículas carbonáceas por su única combinación de las siguientes propiedades:

- ❖ Fuerte **absorción de luz visible** con una sección transversal de absorción de masa de al menos $5 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ a una longitud de onda de 550 *nm*.
- ❖ Es **refractario**, lo que significa que mantiene su forma básica a altas temperaturas. Se vaporiza cerca de los 4000 *K*.
- ❖ Es **indisoluble en agua**, en solventes orgánicos incluyendo metanol y acetona y en otros componentes de aerosoles atmosféricos.
- ❖ Existe como un **agregado** de pequeñas esférulas consistentes en capas de grafito arrugadas en forma de cascarón. (Esta es una diferencia respecto al carbón gráfico, el que es plano).

El CNr es considerado un contaminante climático de vida corta, esto es debido a que su forzamiento radiativo atmosférico se detiene dentro del orden de semanas luego que cesan sus emisiones, desapareciendo por deposición húmeda y seca.

Tabla 5-1 Nombres sugeridos por (Bond, et al., 2013) para diferenciar concepto según método de medición.

Técnica	Nombre Común	Nombre Sugerido	Instrumentos Comunes	Fuente de Incertidumbre	Dirección de Incertidumbre
Absorción Óptica con detección in-situ	BC	Equivalente BC (BC + otro material absorbente)	Foto acústico	Cambio en MAC (sección transversal de absorción de masa) envejecimiento del aerosol. Presencia de otro absorbentes (Polvo, Cabrón Orgánico)	+,- +
Absorción Óptica por colección sobre filtros	BC	Equivalente BC	Etalómetro; Fotómetro de absorción de partículas de hollín (PSAP); Fotómetro de absorción multi-ángulo.	Las mismas que las de absorción óptica, más: Interacciones ópticas entre partículas y matriz del filtro. Modificación de morfología de partículas por carbono orgánico.	+ +
Absorción óptica con admisión calentada	BC	Equivalente BC	Sistema de monitoreo continuo de hollín	Carbonizado de especies orgánicas de baja volatilidad.	+
Termo-Calentamiento y absorción óptica	Carbón Elemental (EC)	Carbón elemental aparente (ECa)	Reflectancia Termo-óptica (TOR); Transmitancia Termo-óptica (TOT)	Falla al corregir precisamente el carbón orgánico carbonizado; Oxidación catalítica de BC en presencia de metales u óxido de metales; Absorción de materiales carbonizados afecta la separación de OC y EC. Detección de OC menos volátil.	+ - +
Incandescencia inducida por láser	BC o rBC	rBC	Fotómetro de hollín de partículas individuales (SP2)	Carencia de detección para partículas pequeñas	-

En la atmósfera algunas de sus características son:

- ❖ Su **reactividad química** es muy baja.
- ❖ Su principal **proceso de remoción** es la deposición seca o húmeda a la superficie (ver Figura 5-3) .

- ❖ El CNr es **absorbente** y **adsorbente**. Esto permite una mezcla tanto dentro de la partícula y en su superficie con otros gases y partículas presentes en la atmósfera, adquiriendo un rol de tipo transportador.
- ❖ Lo mencionado previamente permite un fenómeno de la acumulación de masa soluble después de la emisión. Esto se conoce como **envejecimiento**, e incrementa su tamaño, modifica su **higroscopicidad** y sus propiedades radiativas, además de convertirse en núcleo de condensación de nubes.

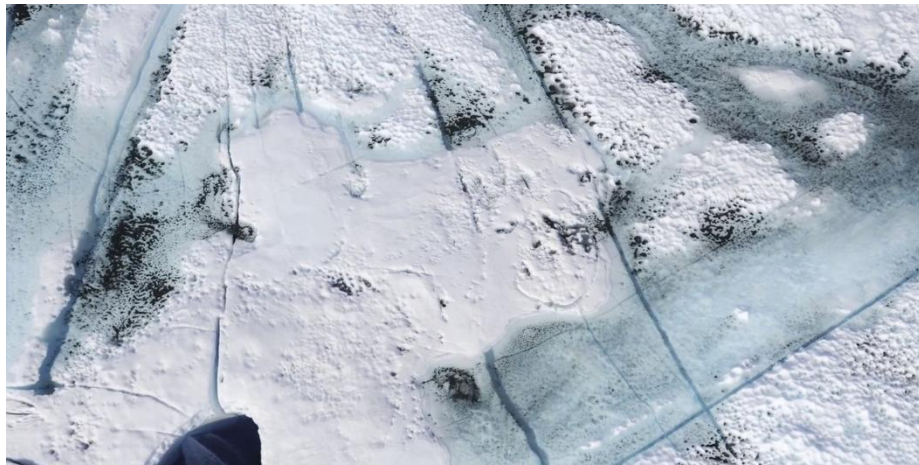


Figura 5-3 Imagen aérea de la superficie del manto de hielo de Groenlandia donde las manchas negras manifestaría la presencia de carbono negro que se transporta a nivel inter-hemisférico depositándose en el hielo y la nieve. Fuente: Proyecto Extreme Ice Survey.

2.2 Fuentes y Efectos

La importancia de las fuentes de carbono negro en distintas partes del mundo varía fuertemente (ver Figura 5-4) siendo la más importante en África las quemas de pastizales e incendios forestales, y por otro lado en el Este de Asia es la industria de carbón.

Las principales fuentes globales de CNr son:

- ❖ Incendios forestales y de la sabana
- ❖ Quema de combustibles fósiles para cocinar y calentarse

- ❖ Motores diésel dentro y fuera de ruta (e.g., camiones, maquinaria de construcción, equipos halógenos, etc).

La actividad industrial también es una fuente importante, mientras que las emisiones de la aviación y embarcaciones representan contribuciones menores a escala global. Sin embargo, la dificultad en cuantificar las emisiones de las diversas fuentes contribuye a la incerteza en evaluar el rol climático del CNr (Bond, et al., 2013).

El impacto climático mejor cuantificado del CNr es su **forzamiento radiativo directo**, esto significa:

- ❖ Cambiar el balance radiativo de la Tierra al retener energía solar en la

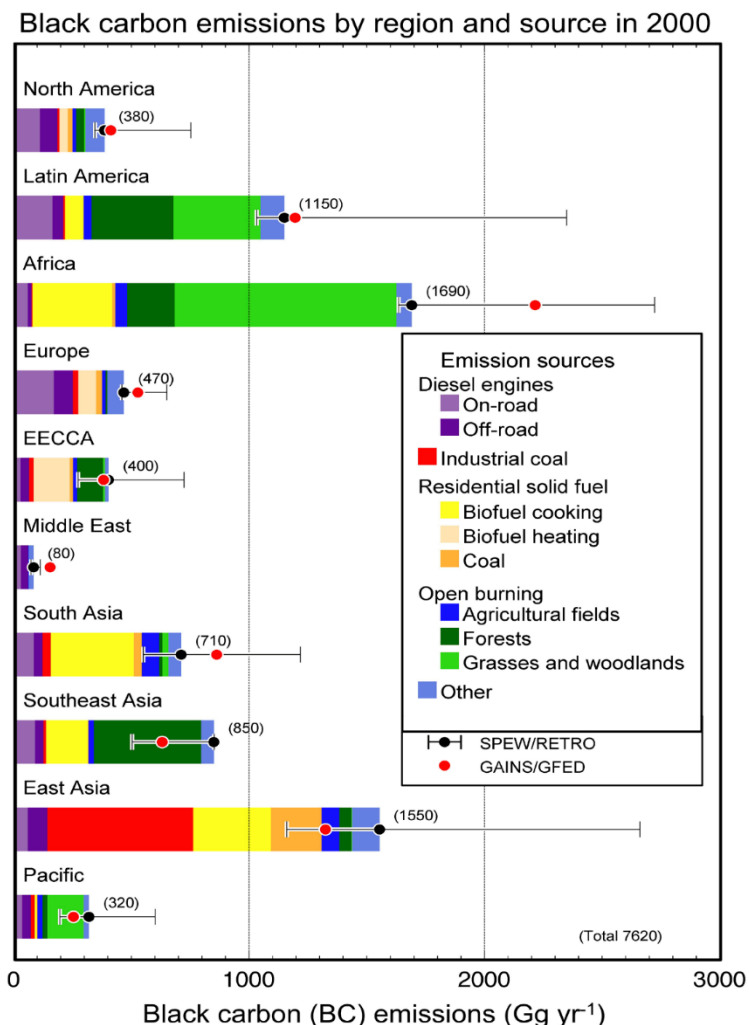


Figura 5-4 Emisiones de Carbono Negro por región y fuente, año 2000. (Bond, et al., 2013).

atmósfera.

- ❖ Alterar el ciclo hidrológico a través de cambios en el calor latente, convección y patrones de circulación a gran escala.
- ❖ Cambiar las propiedades radiativas y de formación de las nubes.
- ❖ Calentar y aumentar derretimiento del hielo o la nieve al disminuir la reflectancia de su superficie y permitir absorber más radiación solar cuando el CNr se depone sobre la superficie. (EPA, 2011)

Recientes estimaciones de la fuerza radiativa del CNr confirman que es la segunda causa del calentamiento global después del CO₂ (IGSD, 2013).

En el caso del impacto del CN en el albedo de la nieve se ha encontrado que la deposición del aerosol cambia el albedo según el tamaño de los granos de nieve, evidenciando un mayor impacto en los granos de mayor radio (Figura 5-5). Además el impacto sólo se evidencia en el espectro visible, donde la nieve

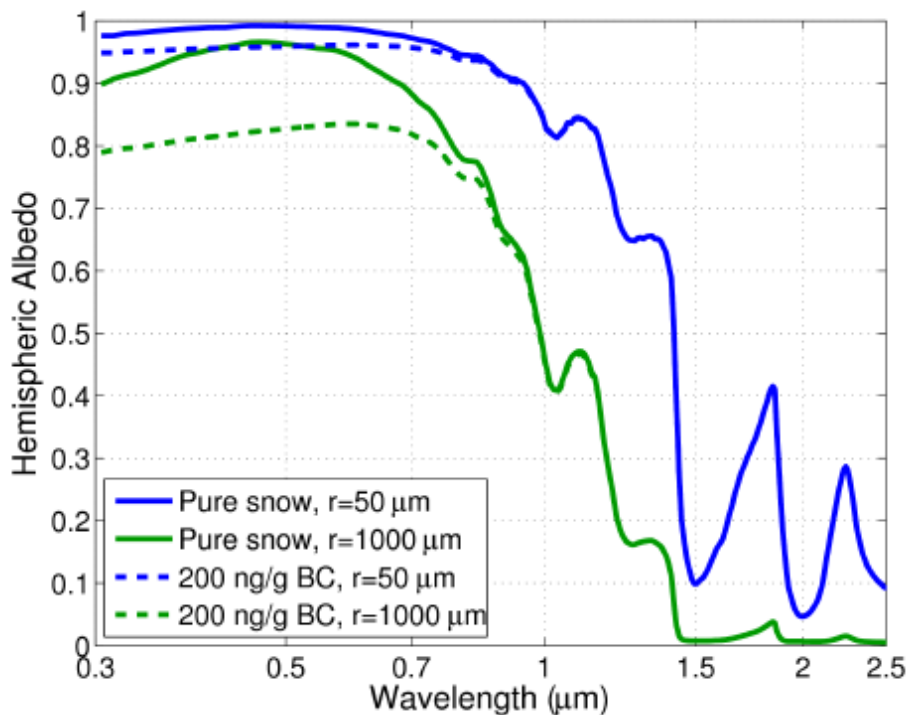


Figura 5-5 Diferencia del albedo en función de la longitud de onda en granos de nieve de 50 y 1000 micrones con y sin presencia de 200ng de CN por g de nieve. (Flanner, 2013)

tiene la mayor capacidad reflectiva. (Flanner, 2013)

El impacto del carbono negro en la nieve podría tener un efecto más significativo en el calentamiento del clima terrestre que su impacto en la atmósfera. (Warren & Warren, 1980). Este efecto en el cambio de albedo, aunque sea de un 10% tiene fuertes consecuencias en el balance energético y en consecuencia en el balance de masa de los glaciares (Dumont, et al., 2012).

3 SITUACIÓN HISTÓRICA SOBRE MEDICIONES Y ESTUDIOS DEL CARBONO NEGRO EN CHILE

Hasta ahora los estudios del CN en la Macro-Zona Central y el resto de Chile se han reducido a estudios locales y temporales sobre emisiones y propiedades de CN de vehículos y chimeneas, enfocando su importancia en el impacto a la salud de la población y no al clima.

La red oficial de monitoreo de la calidad del aire – Red MACAM del Ministerio de Medio Ambiente cuenta con 11 estaciones distribuidas en la Región Metropolitana. Estas miden partículas de radio aerodinámico menor a 10 micrones y menor a 2,5 micrones, y gases SO₂, NO₂, CO y O₃. La estación “Las Condes” cuenta con un Etalómetro automático, que mide CN equivalente. A modo de ilustración, en la siguiente lista se enumeran cronológicamente y se resumen en pocas palabras variados estudios realizados en Chile sobre calidad de aire, donde se mencionan los conceptos de Carbon Elemental (CE), CN y hollín (Soot):

1990 – Rojas et al. – *Aerosols in Santiago de Chile: A study using receptor modelling with x-ray fluorescence and single particle analysis*. En 1 punto de Santiago durante un mes se recolectan datos de aerosol grueso usando un medidor dicotómico. Luego el análisis usando variadas técnicas sugiere, entre otras cosas, que la **abundancia de partículas ricas en carbón** probablemente se deba a la combustión de combustibles fósiles. Se determinó además las principales fuentes de MP fino y grueso: Sulfatos, combustión de leña, emisiones vehiculares, combustión de derivados del petróleo, polvo de la

industria metalúrgica y polvo de combustión de leña. Además se encuentra evidencia de brisa marina transformada y enriquecida con azufre en Santiago.

1997 – Horvath et al. – *A study of the aerosol of Santiago de Chile III: Light absorption measurements*. Se utiliza un método experimental para **calcular la masa de carbono elemental** midiendo el coeficiente de absorción de luz.

1997 – Toro y Cortés – *Assessment of the chemical characteristics and sources of airborne particulate matter in Santiago, Chile*. Usando variadas técnicas analíticas nucleares y no-nucleares, se caracterizó químicamente el material particulado en suspensión. Entre otras cosas se encontró una **correlación entre las concentraciones de masa fina y de carbono negro**. Se advierte la posibilidad de riesgo a la salud de la población. Las principales fuentes de la fracción fina del MP son los automóviles y transporte público, combustión de biomasa y posibles fundiciones de cobre.

1998 – Artaxo – *Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1998*. Midiendo en 5 sitios de la Región Metropolitana, usando variadas técnicas, entre ellas se **usa absorción óptica para medir CN**, se concluye que las concentraciones de CN en el centro de Santiago son altas, en niveles que se aproximaban a los estándares de CN europeos. Además las principales fuentes detectadas en el estudio fueron: polvo en suspensión, emisiones vehiculares, combustión de derivados del petróleo, emisiones industriales, emisiones de fundiciones de cobre

1999 – Artaxo et al. – *Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile*. Estudiando la composición de aerosoles en 2 puntos durante 2 meses en Santiago, **se midió masa de variados componentes, entre ellos el CN**. Las principales fuentes: polvo en suspensión, transporte y sulfatos.

2000 – Gramsch et al. – *Traffic and seasonal dependence of the light absorption coefficient in Santiago de Chile*. **Se diseña y construye un Sistema automatizado de bajo costo para medir la cantidad de CN** en la atmósfera mediante el coeficiente de absorción óptica (CAO) del aire. Se mide en un lugar

central de Santiago y durante el año se observan 2 peaks relacionados al alto tráfico, de los cuales se concluye que el CN en la atmósfera se genera en su mayoría por el tráfico.

2002 – Gramsch et al. – *Monitoring of the light absorption coefficient in Santiago de Chile and comparison with aerosol and elemental carbon mass*. Usando el mismo Sistema del estudio anterior, y en el mismo lugar de Santiago, se observa una alta **relación entre el carbón que absorbe luz y el carbón elemental**. Además se calculó el factor de proporción entre el CAL y MP10, MP2,5 y CE.

2004 – Gramsch et al. – *Use of Light Absorption Coefficient to Monitor Elemental Carbon and PM2.5 – Example of Santiago de Chile*. Se mide en 1 punto de Santiago el LAC y MP2,5 y sus coeficientes de absorción de masa específicos del lugar y estación del año. Se encuentran altas relaciones entre el CAO, CE y MP2,5. Se sugiere que el incremento de las concentraciones del CE en la noche se debe a calentamiento y transporte de masas de aire contaminado de otras partes de la ciudad.

2006 – Celis et al. – *Analysis of Aerosol Particles and Coarse Particulate Matter Concentrations in Chillán, Chile, 2001-2003*. Se mide MP10 con filtros de teflón en 6 lugares de la ciudad de Chillán en un lapso de 2 años. Los niveles anuales superan la norma de la Unión Europea. El 8% fue CE, éste último determinado por un método termográfico. Las sustancias carbonáceas son los componentes predominantes del MP10 en Chillán y la atmósfera respirable es un problema de origen antropogénico en otoño e invierno.

2006 – Gramsch et al. – *Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM10 and Ozone data*. Usando un método estadístico se encuentran similitudes en las distribuciones de MP10 y O3 en 4 sectores de Santiago y se relaciona con condiciones meteorológicas y topográficas. Se usan los datos de las 8 estaciones de la red Macam, donde algunas miden CE.

2008 – Gramsch et al. – *Impact of the use of segregated streets in the elemental carbon concentrations in Santiago de Chile*. Durante el invierno del 2001 se determinaron concentraciones de CE en 5 estaciones cerca de calles de la ciudad para medir el impacto de la segregación de vías. Los resultados, sin embargo, no son concluyentes. Aunque si permiten trazar áreas de mayor concentración de CE.

2008 – Olivares et al. – *Estimates of Black Carbon and Size-Resolved Particle Number Emission Factors from Residential Wood Burning Based on Ambient Monitoring and Model Simulations*. Se mide en 2 sitios de Temuco durante 2 meses de otoño en el 2005 y se modela para encontrar los factores de emisión de MP10, NOx y CN y la distribución del tamaño de partículas. Se encontró una alta incerteza en los factores de emisión. Los tamaños de partículas para la combustión de leña se concentran alrededor de los 80nm, y en el caso de las emisiones vehiculares, en los 50nm y 100nm.

2009 – Cakmak et al. – *Components of particulate air pollution and emergency department visits in Chile*. Se encuentra que el componente del material particulado que presenta mayor efecto es el CE. Un aumento de concentraciones de CE se relaciona con el aumento de riesgos relativos en casos de emergencias totales y respiratorias. Y sobre las fuentes: las partículas relacionadas con la combustión en vehículos tienen la asociación más fuerte con los casos de emergencia.

2009 – Cakmak et al. – *Components of particulate air pollution and mortality in Chile*. Se busca determinar la asociación de varios elementos del MP2,5 y la mortalidad de un grupo general de población. El efecto individual más fuerte fue el del CE, así como la fuente de mayor efecto fue la que genera emisiones de vehículos motorizados.

2009 – Gramsch et al. – *Predominance of soot-mode ultrafine particles in Santiago de Chile: Possible sources*. Se mide por primera vez la distribución de partículas ultra-finas en Santiago durante meses de invierno de 2003 y 2006 en

3 estaciones. Para emisiones de tráfico: 60-100nm de diámetro principalmente, predomina el tipo de partículas de hollín sobre las de tipo núcleo. Las partículas tipo núcleo (20-30nm) se observan muy cerca de las emisiones y en condiciones especiales, ya que son removidas rápidamente. Se observan variaciones en tamaño de partículas debido a condiciones meteorológicas de mezcla, coagulación, condensación y deposición seca. Se observa un movimiento de partículas envejecidas.

2009 – Seguel et al. – *Estimations of primary and secondary organic carbon formation in PM2.5 aerosols of Santiago City, Chile*. Se mide durante 3 años en 3 estaciones el carbón total, CO y CE para determinar por primera vez la composición de los aerosoles orgánicos primarios (AOP) y secundarios (AOS) como fracción de la masa total de MP2,5 en la atmósfera urbana de Santiago y para conocer las contribuciones antropogénicas de la formación del AOS. El CO representó el 80% del Carbón Total en los 3 puntos y alrededor de la cuarta parte de la masa del MP2,5.

2010 – Jorquera y Castro – *Analysis of urban pollution episodes by inverse modelling*. Usando el inventario de emisiones de la red Macam se usa un modelo inverso para entender si los episodios de contaminación en Santiago se derivan de la meteorología, aumento de emisiones o ambas, y si las medidas de mitigación son efectivas. Los trazadores usados fueron CO, CE y polvo en suspensión en calles. Se concluye que el CE había sido subestimado en el inventario del año 2005. La prohibición vehicular como medida mitigatoria fue efectiva a corto plazo.

2010 – Ruiz et al. – *Effect of Gas and Kerosene Space Heaters on Indoor Air Quality: A Study in Homes of Santiago, Chile*. Se midió componentes de MP2,5 en 16 casas con distintos sistemas de calefacción. Se encontró que en las casas con calefacción basadas en kerosene habían concentraciones mayores de NO₂ y partículas ultra-finas en comparación con sistemas eléctricos y a gas. Además las partículas del exterior entraban al interior de las casas.

2011 – Cakmak et al. – *The risk of dying on days of higher air pollution among the socially disadvantaged elderly*. Se busca determinar la influencia de distintas características de la población en el riesgo de mortalidad debido a la contaminación ambiental aérea. Se analizaron datos de 10 años de 7 centros urbanos. Se encontró que la población marginada, especialmente ancianos tenían mayor riesgo de morir en días de mayor contaminación ambiental aérea.

2013 – Gramsch et al. – *Influence of large changes in public transportation (Transantiago) on the black carbon pollution near streets*. Midiendo CN en 4 calles durante 2 años (antes y después de la implementación del nuevo transporte público) se encontró que en varios puntos aumentó el número total de vehículos y las concentraciones no variaron en gran medida.

2013 – Jorquera y Barraza – *Source apportionment of PM10 y PM2.5 in a desert region in northern Chile*. Usando impactadores de Harvard y variadas técnicas de análisis se determinaron distintas contribuciones al MP10 y 2,5 en Antofagasta durante 1 año. Las principales fuentes provenían de aerosoles marinos, fundiciones de cobre, polvo, planta de cemento, entre otras.

En conclusión, existe una carencia de estudios sobre carbono negro y clima en Chile, no existiendo además evidencia alguna de este CCCV en la cordillera de los Andes.

4 MACRO ZONA CENTRAL DE CHILE

4.1 Clima y Topografía

La geografía y clima de la cuenca de Santiago son en general desfavorables a la dispersión de contaminantes atmosféricos, especialmente durante el semestre invernal. Ésta se encuentra a unos 100km de la costa separada por la Cordillera de la Costa por el Oeste, donde los cerros sobrepasan los 1.200msnm. y la Cordillera de los Andes encerrándola por el Este donde la altura promedio sobrepasa los 4.500msnm (ver Figura 5-7). Hacia ésta se pueden encontrar 2 valles importantes que se internan hacia el Este: el valle del Mapocho, hacia el Nor-Este y el valle del Maipo hacia el Sur-Este, donde nacen los principales ríos con los mismos nombres que alimentan la cuenca de Santiago y las ciudades costeras cercanas, y además sirven como canales de ventilación de la contaminación de la metrópolis. Por otra parte, la región Central de Chile es influenciada la mayor parte del año por el anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, lo que resulta en una inversión térmica de



Figura 5-6 Panorámica Noreste a Noroeste desde cerro Provincia 02/06/2013 - 14:00. Se puede observar el transporte de partículas por el valle del Mapocho hacia la Cordillera de los Andes. (Fuente propia).

subsistencia y un clima semiárido.

La combinación que produce una metrópolis con una atmósfera generalmente estable, con escasa condición geográfica de ventilación, hacen de Santiago una de las ciudades más contaminadas del continente por partículas en suspensión y gases durante el semestre invernal (Mayo-Septiembre). Además, Santiago es

la mayor fuente de contaminación atmosférica cercana a la Cordillera de los Andes en este sector. (Morales, 2006) (ver Figura 5-6).

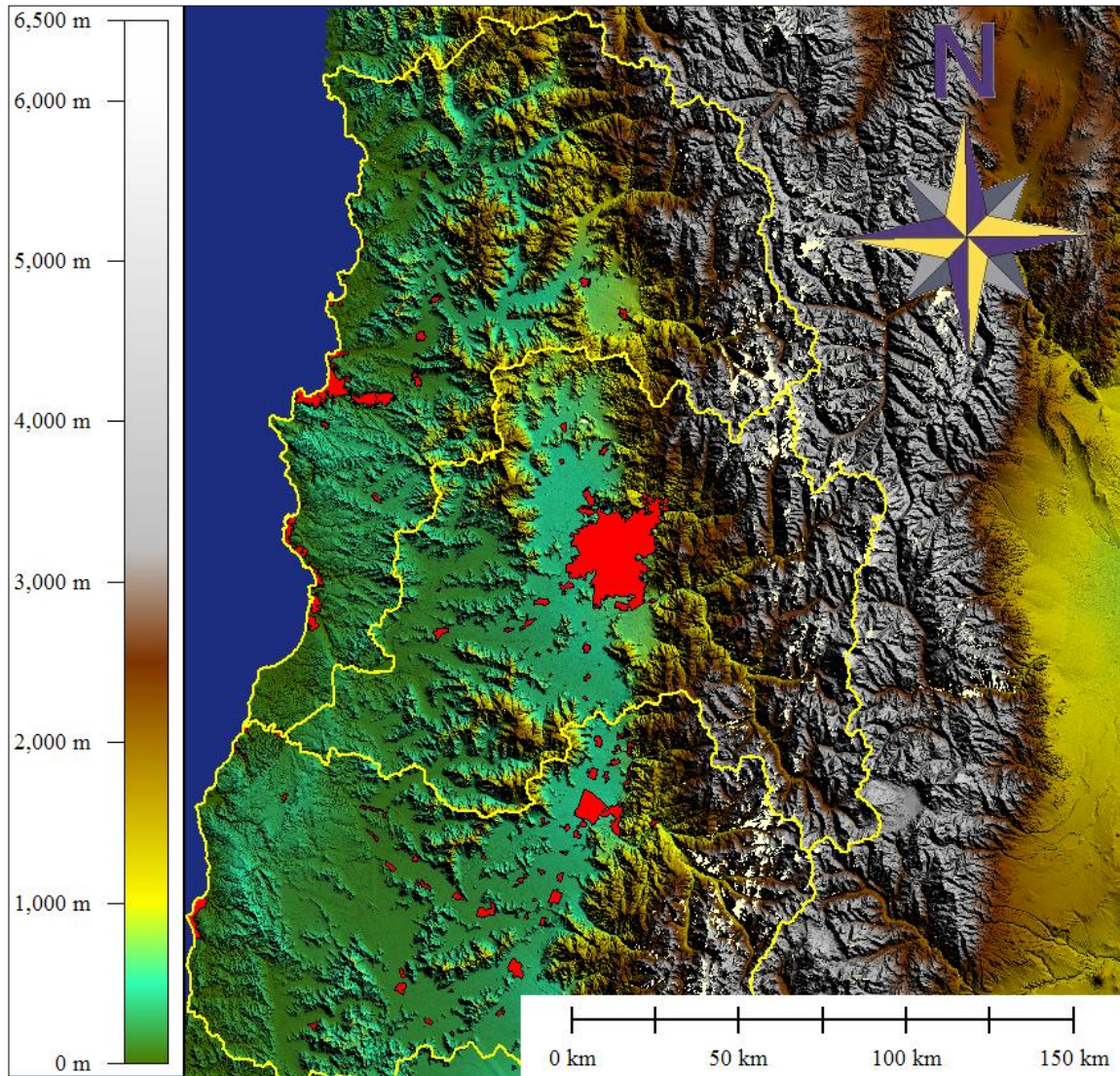


Figura 5-7 Mapa topográfico de la Macro-Zona Central de Chile. Las áreas rojas corresponden a zonas pobladas. (Fuente propia).

4.2 Fuentes

La actividad económica de la MZC se centra principalmente en los siguientes sectores significativos del punto de vista de las emisiones de CN: Minería, Sector Silvoagropecuario, Industria, Transporte y almacenamiento (INE, 2011), aunque en la actualidad no existe un inventario adecuado de CN que permita cuantificar ni predecir las emisiones y/o el transporte de este CCCV en la MZC. Sin embargo, existen contaminantes asociados al CN, como el CO o el MP2,5 que se pueden usar para estimar las concentraciones de CN. En la Tabla 5-2 se muestra el último inventario de emisiones en la Región Metropolitana donde se puede observar que el CN no se encuentra actualmente inventariado y que es

Tabla 5-2 Resumen oficial de Inventario de emisiones anual 2005 en la Región Metropolitana.

INVENTARIO DE EMISIONES ANUAL, ESCENARIO 2005 REAL, REGIÓN METROPOLITANA							
FUENTES ESTACIONARIAS Y MÓVILES ESCENARIO 2005 REAL							
Categoría de Fuente	PM10 ton/año	PM2,5 ton/año	CO ton/año	NOx ton/año	COV ton/año	SOx ton/año	NH3 ton/año
Industria	1266,9	994,0	7744,5	12332,1	7541,6	12829,3	217,4
Combustión de Leña Residencial	693,1	673,6	8235,0	84,8	7465,6	11,8	71,0
Otras residenciales	78,9	69,6	338,3	1160,9	41241,6	294,2	3800,4
Comerciales	0,0	0,0	0,0	0,0	7910,6	0,0	0,0
Quemas Agrícola	246,54	234,75	2139,19	101,55	171,40	11,73	11,54
Otras Areales	651,5	465,8	5249,0	135,9	18608,7	0,0	27724,9
Total Estacionarias	2937,1	2437,7	23706,0	13815,2	82939,6	13146,9	31825,2
Buses licitados	221,4	196,0	1436,6	5866,7	714,6	21,6	1,9
Otros buses	94,9	82,1	515,1	2507,3	235,2	9,2	1,2
Camiones	763,2	670,6	3514,8	11179,5	2199,3	43,5	6,5
Veh Livianos cat*	189,9	0,0	59110,5	4850,2	4394,6	50,8	1002,3
Veh Livianos no cat*	40,1	0,0	142544,0	11524,2	11631,3	11,8	6,0
Veh Livianos diesel	282,8	248,9	1071,2	903,9	145,7	7,0	0,9
Veh Livianos gas*	1,7	0,0	654,2	46,9	40,5	0,0	NE
Motos*	1,8	0,0	3971,4	24,6	706,5	0,4	0,3
Fuera de ruta	154,5	142,0	2215,2	973,3	320,3	45,5	31,6
Total Móviles	1750,3	1339,7	215032,9	37876,4	20388,0	189,8	1050,7
TOTAL MOVILES Y ESTACIONARIAS	4687,4	3777,4	238738,9	51691,5	103327,6	13336,7	32875,9

Fuente: CONAMA-DICTUC S.A. (2006)

Notas:

NE = No Estimado

común que usen el PM2,5 o el Co para estimar las concentraciones de CN, debido que en algunos lugares, su proporción respecto a los contaminantes mencionados es conocida, y las fuentes más significativas son principalmente

vehículos diésel, cuyo porcentaje en la macro-zona central representa el 47% de los vehículos diésel en circulación del país (INE, 2011). Tampoco se encuentran inventariados los equipos halógenos, los que podrían ser también una fuente importante de CN, sobretodo en el área de la construcción.

4.3 Chile como lugar para medir Carbono Negro de fondo en el contexto global.

En el hemisferio sur hay notablemente menos cantidad de emisiones inventariadas y modeladas de CN, así como también menos deposición modelada de CN. En la siguiente figura se muestran los resultados de un inventario de emisiones global de CN realizado por Tami Bond y otros el 2004, donde se puede notar que los lugares de mayores emisiones de CN en el mundo se encuentran al este de China, India e Indonesia en Asia; Europa Central, y el este de EE.UU.

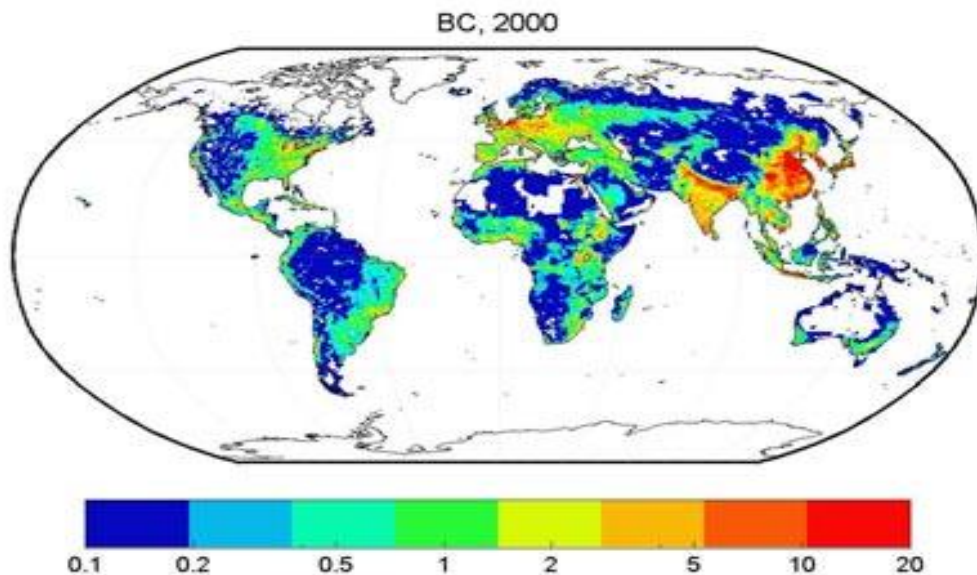
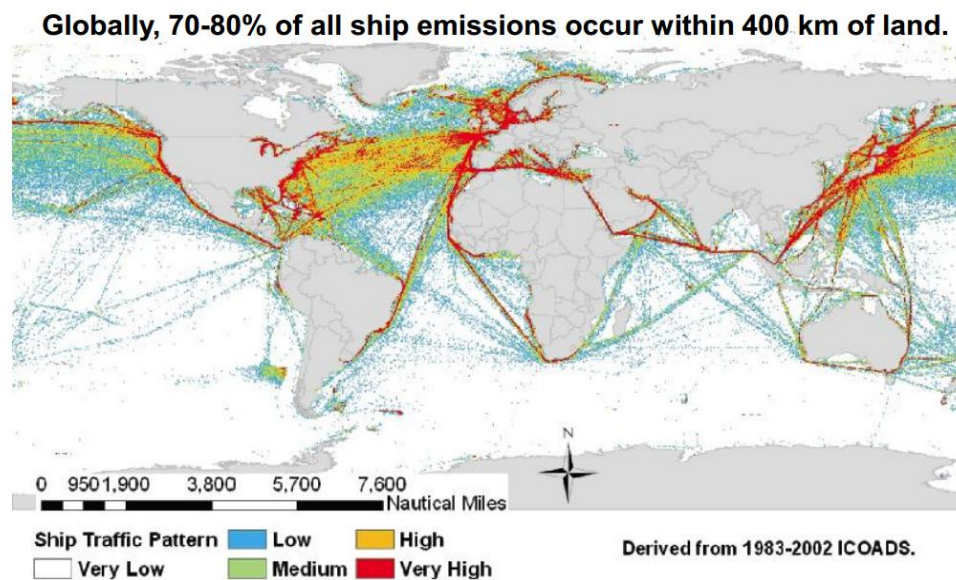


Figura 5-8 Emisiones globales de CN el año 2000 en Gigagramos. Fuente: epa.gov

La posición geográfica de Chile, oculta tras los Andes sugiere entonces que la mayor fuente de este contaminante en el país sería de carácter local, con la

posibilidad de que la corriente de chorro (jet-stream) pueda transportar CN desde el sudeste asiático u Oceanía.

Por otra parte, los barcos son una fuente importante de CN en el mar, emitiendo 1,8 g/kg de petróleo quemado (Bond, et al., 2004), son responsables del 2% de las emisiones globales de CN (IMO, 2013) y la mayor parte de sus rutas están cerca de las costas continentales del hemisferio norte (Figura 5-9).



90% of ship emissions in the North Sea occur within 90 km of the shore

Figura 5-9 Tráfico de barcos en el mundo (Kedzieski, 2013).

Se cuenta además con los resultados del modelo global de la deposición de CN desarrollado en la Universidad de Michigan, que sugiere una pequeña fracción podría caer en la zona central de Chile, aunque en comparación con lugares como en Asia oriental por ejemplo esta cantidad es unas 300 veces menor (Figura 5-10).

IMPACT-AM3 annual-mean BC deposition

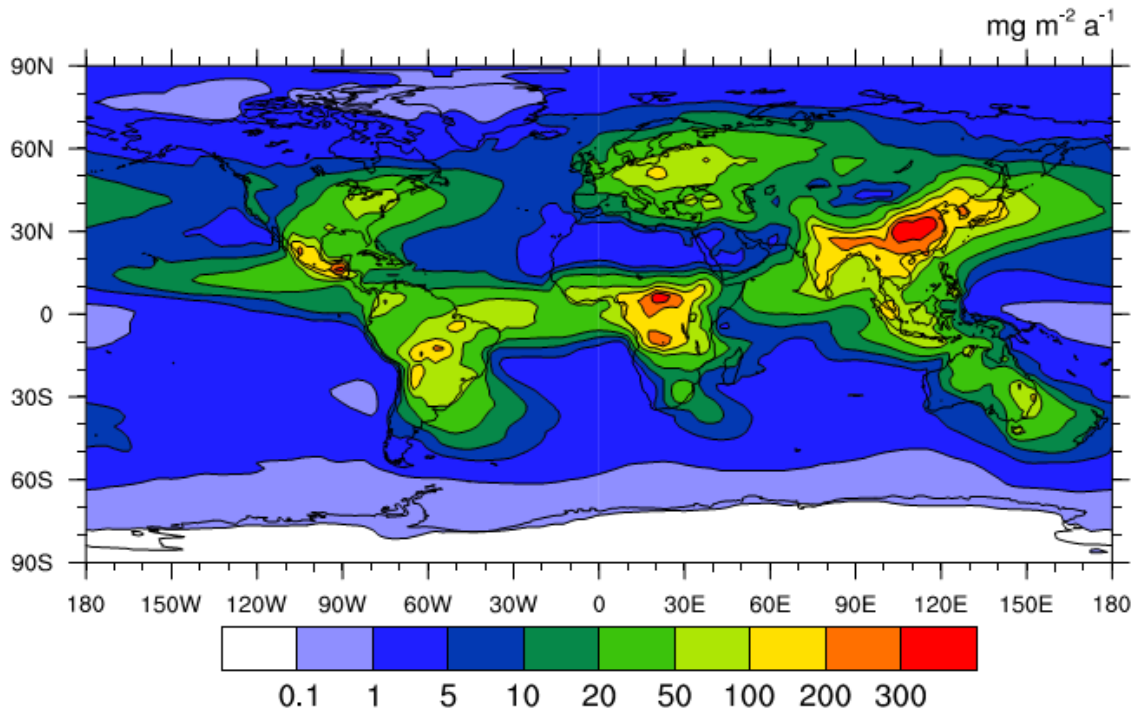


Figura 5-10 Datos de modelo IMPACT-AM3 de promedio anual de deposición de CN (Flanner, 2013).

4.4 Descripción de estaciones Globales GAW

Para entender la situación de estaciones de cambio climático de representatividad global, se describen brevemente algunas estaciones de la GAW.

4.4.1 Estación Mauna Loa (HI), Estados Unidos.

Establecida en 1957, está ubicada en la isla de Hawaii a una elevación de 3397m al norte del volcán Mauna Loa. Se instala como un complejo de estaciones anexas a un observatorio para monitorear concentraciones globales de dióxido de carbono. Entre 250 parámetros atmosféricos medidos, está el coeficiente de absorción de luz para distintos tamaños usando un Etalómetro.

4.4.2 Zugspitze-Gipfel, Alemania

Establecida el 1995, se encuentra en la montaña más alta de los Alpes alemanes (2962 msnm). Monitorea la contaminación aérea. (Figura 5-11)

4.4.3 Izaña, España

Establecida en 1984, se encuentra en la Isla de Tenerife a 300km al oeste de la costa africana y situada en una meseta a 15km al noreste del volcán Teide de 3718msnm y uno de los volcanes activos más altos del mundo desde el lecho oceánico, que además emite fumarolas regularmente desde su cráter. Los vientos predominantes son nor-poniente. Entre los variados parámetros atmosféricos, mide coeficiente de absorción de luz con método de fotometría de absorción multi-angular, con lo que se puede calcular concentraciones de CN.



Figura 5-11 Mapa de pistas de centro de ski cercano a la estación Zugspitze. La construcción de la estación puede aprovechar las instalaciones del centro de ski para el acceso del personal.

4.4.4 Jungfraujoch, Suiza

Se sitúa a 3580msnm entre dos montañas Jungfrau (4158msnm) y Mönch (4099msnm), y al encontrarse en el centro de Europa está rodeada de regiones altamente industrializadas a altitudes bastante menores. Estas condiciones

geográficas ofrecen la oportunidad de monitorear concentraciones de fondo pero también el transporte de contaminantes antropogénicos desde la capa límite a la tropósfera libre.

4.5 Geografía y Clima

4.5.1 Dispersión y Mezcla de Monóxido de Carbono

En un estudio realizado por Schmitz, 2005, se usó un modelo de transporte químico (CADM) para el monóxido de carbono – CO en la RM. Ya que el CO al igual que el CN se produce por combustión incompleta de combustibles fósiles, se suelen relacionar. En efecto, en varios estudios realizados en distintas partes del mundo, se observa que el CO está directamente relacionado con el CN (Figura 5-12) (Dickerson, et al., 2002; Wang, et al., 2012), los resultados obtenidos del modelo podrían ser usados para entender el transporte del CN en esta región. En la Figura 5-13 y Figura 5-14 se muestra el campo de vientos

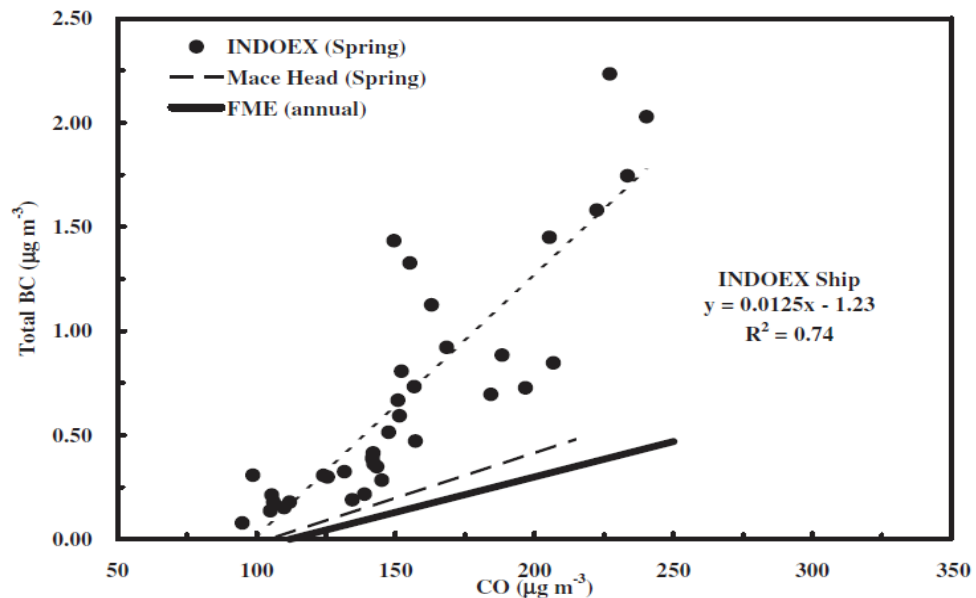


Figura 5-12 Gráfico de dispersión de CO y rBC obtenido de mediciones en el Océano Índico (INDOEX) de Dickerson y otros, 2002. Mace Head y FME indican mediciones realizadas en Irlanda y en Maryland, EEUU respectivamente. En todos los casos se observa una correlación entre el CN y el CO.

superficiales promedio y concentraciones de CO sobre la topografía de la RM, en las que se observa el comienzo de la actividad vehicular entre las 5:00 y las 6:00 hrs, momento en que el viento es muy suave y la atmósfera es estadísticamente estable cerca de la superficie, aunque se puede notar una leve tendencia del viento hacia el suroeste (ver patrón de vientos de las 6hrs), la tendencia predominante son los vientos en dirección al valle del Mapocho lo

que provoca que el penacho de concentración apunte hacia este lugar (ver concentraciones de las 12, 15 y 18hrs). Luego de que llega el régimen nocturno de vientos al atardecer, en las montañas de los Andes los vientos que apuntaban valle-arriba y cuesta-arriba ahora lo hacen valle-abajo y cuesta-abajo. Adicionalmente, la topografía controla la dispersión del CO y aparentemente la recirculación de los vientos de Los Andes junto con el movimiento de la masas de aire desde el sur, dispersan el CO hacia el norte (ver dispersión de las 9hrs).

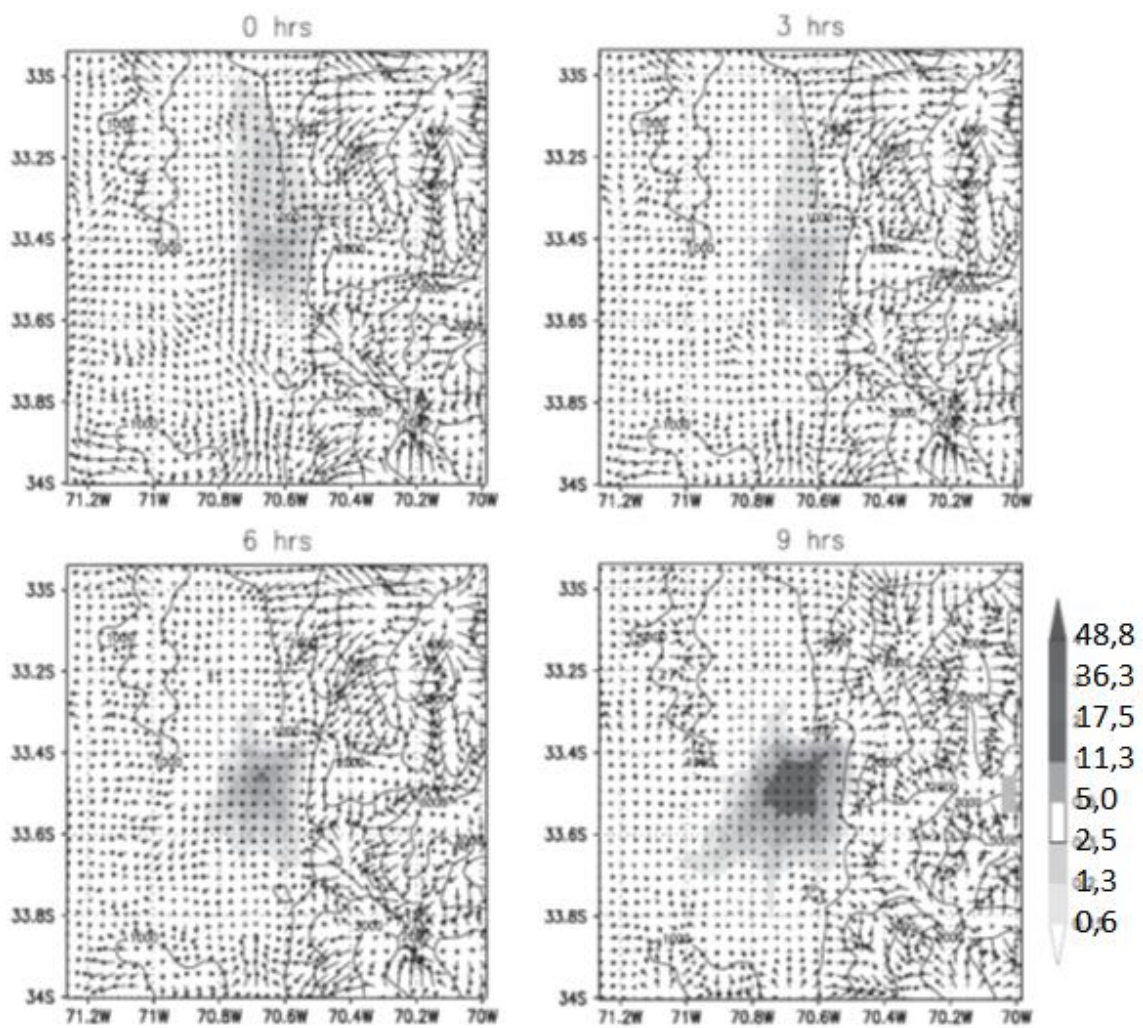


Figura 5-13 Vientos de superficie y concentraciones de CN en $\mu\text{m m}^{-3}$. Las líneas sólidas indican la topografía. El tiempo se muestra en hora local. Fuente: Schmitz, 2005.

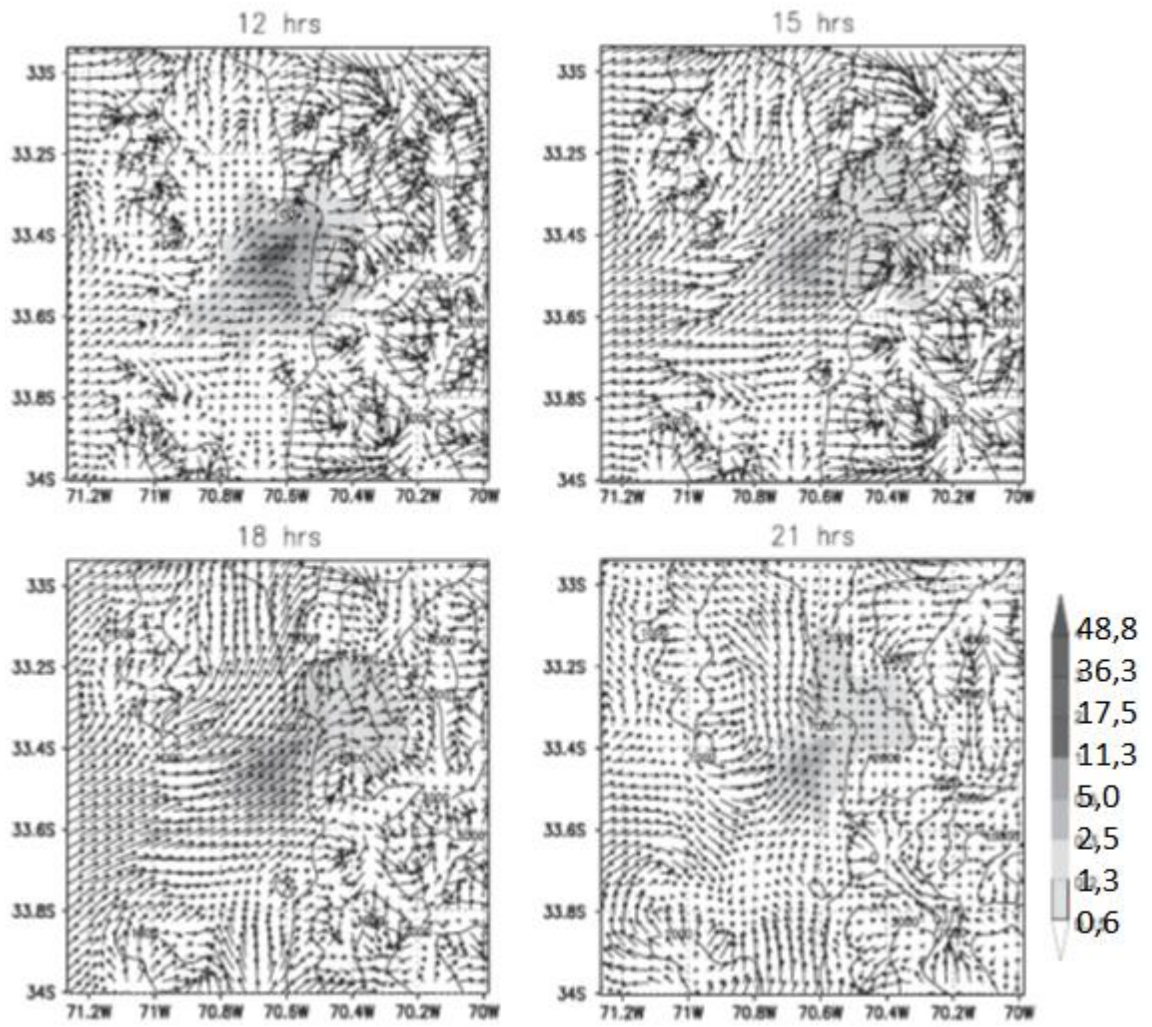


Figura 5-14 Vientos de superficie y concentraciones de CN en μm^{-3} . Las líneas sólidas indican la topografía. El tiempo se muestra en hora local. Fuente: Schmitz, 2005.

4.5.1.1 Glaciares Susceptibles

El área total de los glaciares de la MZC representa, exceptuando los campos de hielo patagónicos, el 46% del área de glaciares inventariados de Chile (Rivera,

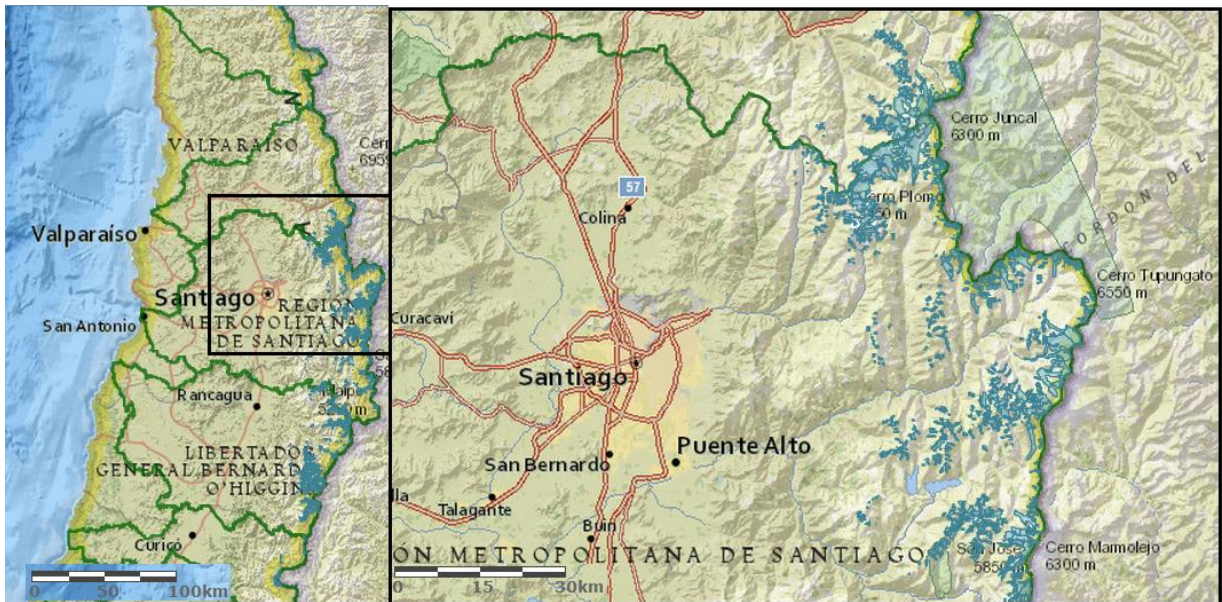


Figura 5-15 Glaciares de la Macro-Zona Central (en área celeste). Fuente: Inventario Nacional de Glaciares de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.

2010).

En sus cuencas, el régimen hidrológico es principalmente y con tendencia creciente de escorrentía por derretimiento de nieves y deshielo (i.e. régimen nivo-pluvial) (RHMA, 2010; DGF, 2006; Corripio, et al., 2007; García, 2010; Bown, et al., 2008). En la Figura 5-15 se puede observar en áreas celestes los glaciares inventariados desde los años 70 hasta la fecha, y qué tan cerca se encuentran de Santiago.

Desarrollo

5 INTRODUCCIÓN

En la MZC se busca entender variados impactos del rBC a nivel inter-regional, principalmente el transporte de CN hacia el sector de la cordillera. Las 3 regiones que componen la MZC abarcan un área estimada de ~50.000 km², gruesamente la mitad del área que abarca la red de monitoreo de CN del Reino Unido.

El Intercambio de Información Europea – *Exchange of Information* – Eol define 3 tipos de estaciones de monitoreo: de tráfico, industrial y de fondo. Las de fondo se dividen en urbana, sub-urbana y rural (Figura 5-1). La estación rural se divide en de fondo cercana a ciudades, regional y remota. La subclase regional se define por estar ubicada a una distancia de entre 10-50 km de áreas construidas y otras fuentes significativas, y su área de representatividad se extiende entre radios de 25-150 km. Se aplica entonces una clasificación de tipo

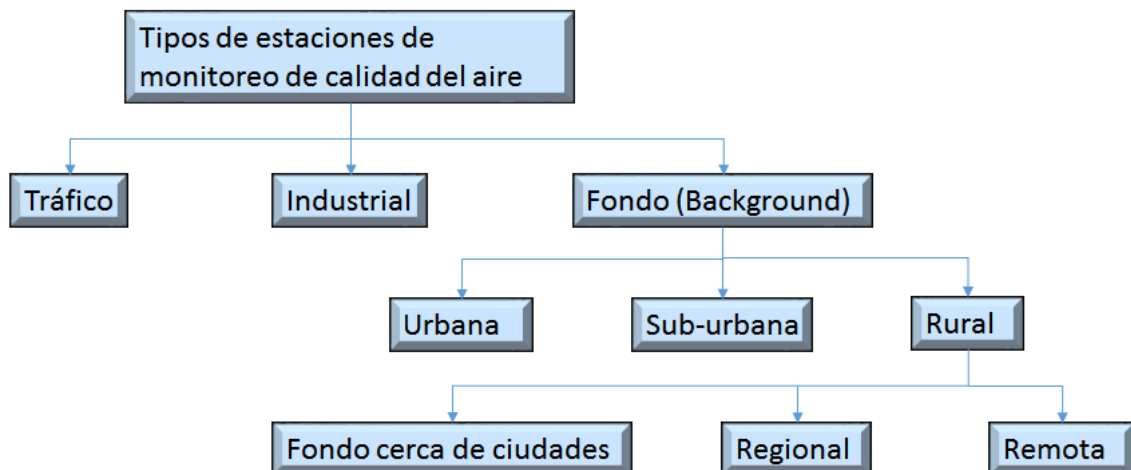


Figura 5-1 Esquema de tipos y sub-tipos de estaciones de monitoreo de calidad del aire según la Eol

regional para la red de monitoreo propuesta. La Agencia Medioambiental Europea – *European Environmental Agency* – EEA define como tipo de fondo regional una estación localizada en un área rural con una distancia de entre 10 y 50 km de áreas construidas y otras fuentes importantes.

Para una estación de representatividad regional, la GAW define 10 características esenciales (WMO Global Atmospheric Watch, 2007):

1. La localización de la estación sea elegida tal que, para las variables medidas, sea regionalmente representativa y esté libre de influencia de fuentes de contaminación locales.
2. Exista alimentación eléctrica adecuada, aire acondicionado, comunicación y construcción que permitan observaciones a largo plazo con una toma de datos mayor al 90% (i.e. <10% de pérdida de datos).
3. El soporte técnico provisto esté capacitado para la operación de los equipos.
4. Exista un compromiso de la agencia responsable para las observaciones a largo plazo de al menos una de las variables de la GAW en las áreas prioritarias de la GAW.
5. Las observaciones realizadas sean de calidad basadas en el Estándar Primario de la GAW.
6. Los datos y los metadatos asociados sean enviados a uno de los Centros de Datos Mundiales – WDC de la GAW a más tardar un año luego de realizar la observación. Los cambios en los metadatos incluyendo la instrumentación, trazabilidad, procedimientos de observación, sean reportados al WDC responsable en un tiempo oportuno.
7. Si es requerido, los datos sean enviados a un sistema de distribución de datos designado en tiempo-casi-real.
8. Las observaciones meteorológicas *in-situ* estándar, necesarias para la exacta determinación e interpretación de las variables de la GAW, sean realizadas con una exactitud y precisión conocidas.

9. Las características de la estación y el programa de observaciones sea actualizado de forma regular en el Sistema de Información de Estaciones de la GAW (GAWSIS).
10. En la estación debe haber un cuaderno de bitácora (i.e. un registro de las observaciones y actividades realizadas que puedan afectar las observaciones) que sea mantenido y sea usado en el proceso de validación de datos.

6 FASE A – SCREENING

Una etapa de Screening se refiere a realizar mediciones simples y de bajo costo, junto con correr y/o analizar modelos de dispersión simples. Lo anterior entregará información de los niveles de contaminación esperados, áreas altamente impactadas y la contaminación atmosférica de fondo en el área.

En este trabajo se realizaron mediciones mayoritariamente a pie en distintos lugares con un etalómetro portátil y un dispositivo GPS para georeferenciar los datos. En otras ocasiones se añadió un medidor de material particulado portátil. Se diseñó asimismo el conjunto de programas en MATLAB destinados a leer, validar, sincronizar y georeferenciar los datos.

Se realiza un análisis de vientos de una red de estaciones de meteorología de la Región Metropolitana y se ejecuta el modelo HYSPLIT.

A continuación se describirán los instrumentos usados en las mediciones:

6.1 Instrumentos

Etalómetro® microAeth® modelo AE51



Figura 6-1 Etalómetro portátil.

Fabricante: MAGEE SCIENTIFIC

Principio de medición: colección de muestras a tiempo real y análisis de concentración de masa del Aerosol Carbono Negro en el aire con el método de absorción óptica del Etalómetro.

Fuente óptica: LED de 880 nm de longitud de onda (IR)

Rango de medición: 0-1 mg CN/m³ por 15 minutos a 50mL/min

Sensibilidad: 0,001 µg CN/m³

Precisión: ± 0,100 µg CN/m³ en promedio de 1 minuto a un flujo de 150mL/min

Tiempo Base de Medición: 1 seg, o 1 min o 5 min

Tasa de flujo: 50 a 225 mL/min

Capacidad de almacenamiento de datos: 3 meses (a 1 min de tiempo base)

Comunicaciones: Conectividad USB a PC-Windows.

Salida de Datos: Lectura en continuo vía USB. Recuento de datos vía protocolo de comando de control.

Insumos: un filtro por evento.

Filtro: fibra de vidrio cubierto de teflón.

Diámetro de lugar de colección: 3 mm

Bomba de vacío: Interna con control de flujo de masa integrada.

Dimensiones: 117mm de Largo x 66 de Ancho x 38 de Alto.

Peso: 250g

Energía: Batería de Li-ión interna recargable.

Adaptador de Energía: 100-240VAC (50/60 Hz) de entrada, 3,5 VDC de salida variable (500mA).

Tiempo de Carga: 4 horas a máxima carga (Usando adaptador A/C y apagado).

Tiempo de descarga: 24 horas a tiempo base de 5 min con 150mL/m³ de flujo.

Ambiente de Operación: 0 a 45C, sin condensación.

Monitor de Aerosoles DustTrack Modelo 8520



Figura 6-2 Monitor de Aerosoles DustTrack.

Fabricante: TSI

Tipo de Sensor: Dispersión de luz en 90°

Rango: 0,001 a 100 mg/m³ (Calibrado a ISO 12103-1, Prueba de polvo A1)

Resolución: $\pm 0,1\%$ de la lectura o $\pm 0,001$ mg/m³ cual sea mayor.

Estabilidad en Cero: $\pm 0,001$ mg/m³ sobre 24 horas usando constante de tiempo de 10 segundos.

Rango de Tamaño de Partículas: 0,1 a aproximadamente 10 micrometros.

Tasa de Flujo: Ajustable de 1,4 a 2,4 L/min (1,7 nominalmente).

Coeficiente de Temperatura: +0,001 mg/m³ por °C (por variaciones de temperatura a la cual el DustTrack es dejado en cero).

Temperatura de Operación: 0°C a 50°C

Temperatura de Almacenamiento: -20°C a 60°C

Humedad de Operación: 0 a 95% de humedad relativa (sin condensación)

Constante de Tiempo: Ajustable de 1 a 60 seg

Registro de Datos: 31.000 puntos de datos (21 días de

Intervalo de registro: Ajustable de 1 segundo a 1 hora.

Dimensiones Físicas Externas: 221mm x 150mm x 87mm

Peso del Instrumento: 1,5Kg

Interface Serial: RS-232 1200 baud

Energía:

AC: Adaptador AC

Batería: 4 baterías alcalinas tipo-C (Incluidas)

Duración Batería: 16 horas (Alcalinas)

Impedancia de Salida: 0,01 ohm

Máxima Corriente de Salida: 15mA

GPS de mano modelo eTrex® 30



Figura 6-3 GPS de mano GARMIN eTrex 30.

Fabricante: GARMIN

Sensores:

Altímetro: Barómetro

Orientación: Brújula electrónica de 3 ejes con inclinación compensada.

Track log: 10.000 puntos, 200 tracks

Interfaz: USB

6.2 Sectores monitoreados

Para poder medir sobre la capa de mezcla, fue necesario ascender generalmente sobre los 1.000 msnm y en la mañana. En la Figura 6-4 se muestran los distintos recorridos usando el etalómetro portátil y el GPS de mano, y en algunas ocasiones el medidor de aerosoles (MP2,5). La enumeración corresponde a los siguientes sectores:

1. Cerro San Cristobal: Pio Nono – Pedro de Valdivia.
2. Cerro Provincia: Variados circuitos.
3. Cerro Pochoco
4. Centro de Ski La Parva
5. San José de Maipo

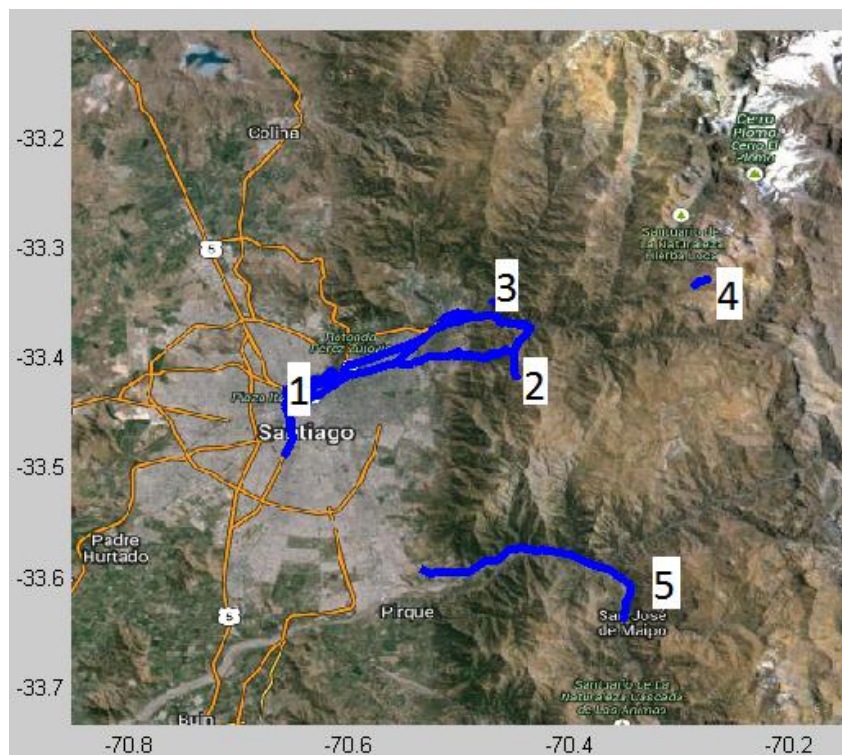


Figura 6-4 Imagen satelital de sectores de monitoreo. Las líneas azules corresponden a los recorridos realizados con GPS. (Google Earth).

Todas las rutas fueron tomadas en la Región Metropolitana durante Otoño e Invierno, temporadas cuya meteorología permite la formación de una fuerte inversión térmica de subsidencia y un volumen de mezcla relativamente comprimido en relación a las estaciones cálidas. Sumado a la escasa ventilación, lo anterior permitiría medir un *background regional* con una menor presencia de contaminantes provenientes de la capital.

Tabla 6-1 Detalles generales de rutas monitoreadas en los sectores previamente mencionados

Sectores monitoreados	Fecha	Hora Inicio	Hora Fin	Distancia total recorrida (km)	Altura mín	Altura máx
Cerro San Cristobal	11-05-2013	13:58	17:09	7,9	588,0	871,5
Cerro Alto del Naranjo A	26-05-2013	10:17	15:34	17,6	708,6	1867,5
Cerro Provincia	02-06-2013	10:12	19:31	31,3	684,6	2307,3
Cerro Alto del Naranjo B	08-06-2013	7:45	15:33	70,4	537,5	1927,6
Cerro Alto del Naranjo C	10-07-2013	10:38	13:12	6,0	1001,9	1671,9
Cerro Pochoco	11-07-2013	11:25	14:37	5,4	1011,4	1798,5
Centro ski La Parva	28-07-2013	10:55	16:30	9,6	2648,1	3268,1
San Jose Maipo	16-08-2013	11:49	13:32	50,5	684,6	976,8

Todas las rutas fueron tomadas en la Región Metropolitana durante Otoño e Invierno, temporadas cuya meteorología permite la formación de una fuerte inversión térmica de subsidencia y un volumen de mezcla relativamente comprimido en relación a las estaciones cálidas. Sumado a la escasa ventilación, lo anterior permitiría medir un *background regional* con una menor presencia de contaminantes provenientes de la capital.

6.3 Resultados

En todas las ocasiones, a excepción de la ruta del cerro San Cristobal, se observó a ojo desnudo que la capa de mezcla ascendía y se internaba hacia el valle del Mapocho. Lo anterior se puede ver reflejado en las concentraciones de CNe en la ruta del cerro Provincia, Cerro Alto del Naranja A y C, y Cerro Pochoco (Figura 6-6). En el caso del centro de ski La Parva no se obtuvo evidencia de absorción de luz pero si se pudo obtener evidencia fotográfica

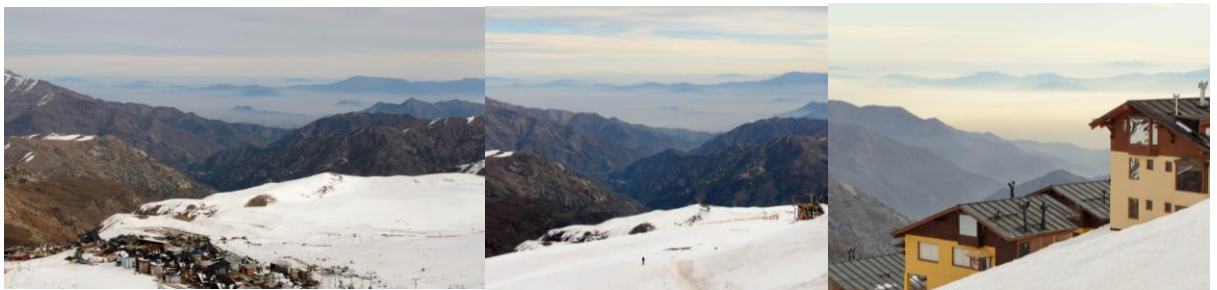


Figura 6-5 Registro fotográfico desde el centro de ski La Parva hacia Santiago, donde se evidencia el transporte valle arriba de supuestos aerosoles absorbentes de luz por el valle del Mapocho. Las horas de las fotografías son 11:56, 14:38 y 16:20 de izquierda a derecha.

donde se observa el transporte de supuestos aerosoles absorbentes de luz por el valle del Mapocho hacia arriba (Figura 6-5).

En el caso del cerro San Cristobal (así como en otras ocasiones) no se siguió la misma ruta de ascenso y descenso (ver Anexo), sin embargo, el comportamiento del perfil es similar, es decir, presenta una drástica disminución al alejarse de las calles cercanas a Plaza Italia y luego comienza a aumentar hasta llegar hasta los 750-800m.s.n.m. para luego disminuir abruptamente. El descenso fue hacia la entrada por Pedro de Valdivia (cara Sur-Oriente), en esta ocasión se encontraron concentraciones algo menores pero se repite la presencia de 2 puntos de inflexión también en esta ocasión menos abruptos (ver Figura 6-6).

En la primera ruta del cerro Alto del Naranjo la que comienza desde el Norte en puente Ñilhue, camino a Farellones y termina en estadio San Carlos de Apoquindo, más cerca de las calles de Santiago por el Este. Se observa en el ascenso una concentración de CNe constante entre los 900 y los 1300 m.s.n.m.

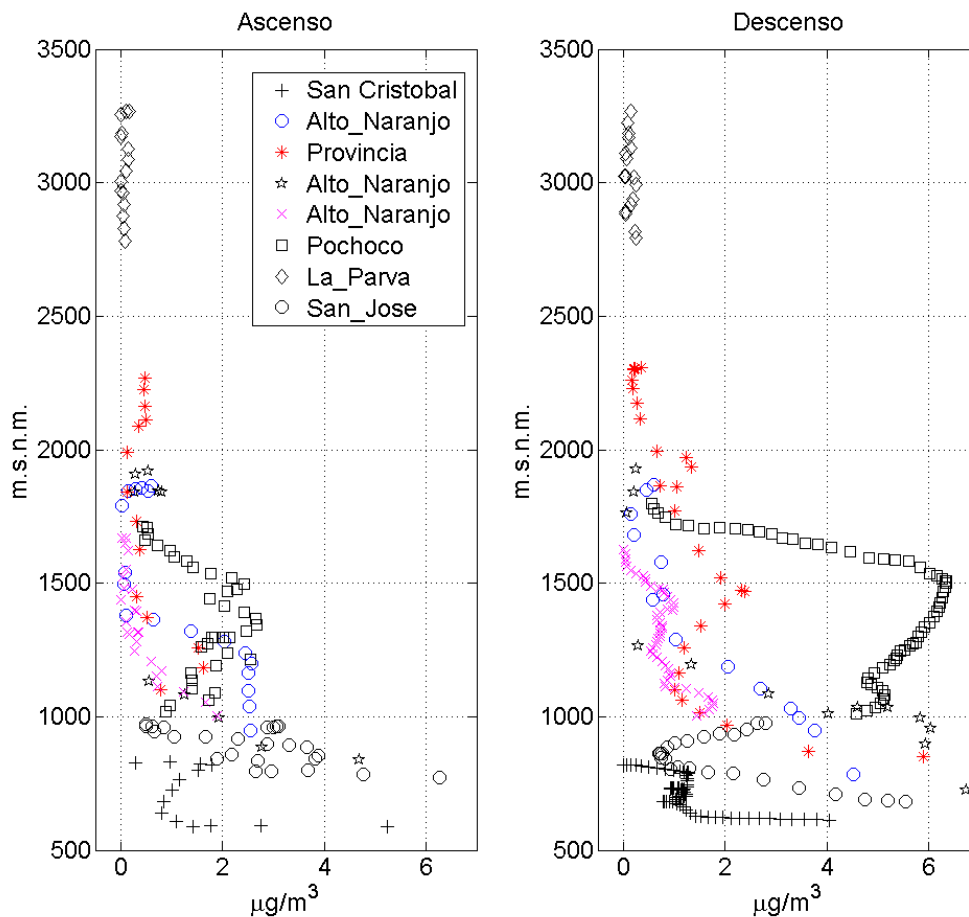


Figura 6-6 Perfiles verticales de ascenso (a la izquierda) y descenso (a la derecha) de Carbono Negro equivalente en las distintas rutas

para luego sobre esta altura sufrir una abrupta disminución, y aunque la ruta de descenso no fue la misma, es en los 1300 m.s.n.m. cuando se observa un gradiente importante en las concentraciones de CNe, sin embargo, se ha de notar que desde los 1600 m.s.n.m. había aumentado ligeramente este valor.

La ruta hacia el cerro Provincia (que es en su mayoría la misma ruta que la del cerro Alto del Naranjo) muestra un comportamiento en el ascenso similar a la ruta anterior, con la diferencia que en un principio existe un pico de concentraciones nuevamente en alrededor de los 1300 m.s.n.m. para luego mantenerse en valores bajos (i.e., unas cuantas décimas de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre 0). Entre los 2.000 y 2.300 m.s.n.m. aparece un ligero aumento en las concentraciones, es posible que esto haya sido evidencia de transporte de larga distancia y no de Santiago. En el descenso a pesar de que ya no se observa el incremento anterior, si se observa la presencia de un pequeño pico a unos 300 metros más abajo, cercano a la cumbre del cerro Alto del Naranjo, y luego otro alrededor de los 1500 m.s.n.m. lo que sugiere que el pico de los 1300 m del ascenso pudo haberse desplazado hacia arriba, nótese la diferencia horaria de alrededor de 9 horas (Tabla 6-1) entre el ascenso y el descenso. El drástico aumento al final llegando a los 1.000 m.s.n.m. es cuando se comienza a volver al punto de partida, y bajo los 1.000 m.s.n.m., se debe al abordar un taxi e ir midiendo hacia afuera camino a Santiago.

Se decide monitorear nuevamente la ruta del cerro Alto del Naranjo para tener un 3er contraste. En esta ocasión, a modo de comparación, se mide desde el centro de Santiago pasando por el túnel de la autopista Costanera Norte donde se observaron concentraciones sobre los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comenzar el ascenso, las concentraciones comienzan a disminuir casi constantemente hasta llegar a 0 y en varias ocasiones bajo cero (como los valores bajo cero fueron eliminados, no se muestran en el gráfico), esto podría explicarse debido a que se pasó por zonas de altas concentraciones y el filtro no se cambió, lo que junto a un bajo bombeo (50mL/s) pudo haber significado un error de alrededor de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según el fabricante. Lo que se puede destacar de esta medición, es que en el descenso nuevamente el aumento de concentraciones ocurre más arriba que en el ascenso, lo que confirma el desplazamiento de este contaminante hacia

arriba durante el período antes y después de las 12 (perfiles horarios en Anexo).

En las siguientes rutas se hizo un ajuste en la configuración del Etalómetro portátil: se aumenta la tasa de adquisición de datos de $1/60 \text{ s}^{-1}$ a 1 s^{-1} y además se aumenta el flujo de aire entrante de 50 mL/s a 150 mL/s . Esto permitió una mayor proporción ruido/señal y por lo tanto, mediciones más confiables en ambientes de baja concentración de CN ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de error según fabricante). Entonces se mide nuevamente en la ruta de Alto del Naranja, en cuyo ascenso

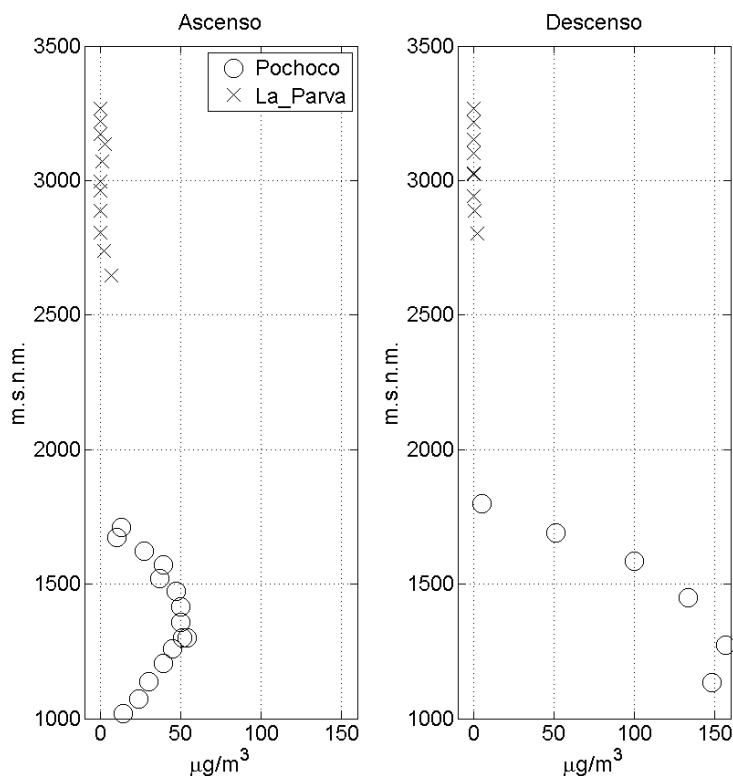


Figura 6-7 Perfiles verticales en ascenso (izquierda) y descenso (derecha) de concentración de MP2,5 en las rutas de cerro Pochoco y centro de ski La Parva.

se observa una disminución casi constante de las concentraciones de CNe entre los 1.000 y 1.300 m.s.n.m. para estabilizarse en valores bajos hasta los 1.700 m.s.n.m. En el descenso, sin embargo, se observó un incremento alrededor de los 1.500 m.s.n.m. el que tiene un valle en los 1.300 m.s.n.m. para

luego volver a aumentar al acercarse a los 1.000 m.s.n.m., esto nuevamente fue una ruta de ida y vuelta por el mismo camino.

En la ruta del cerro Pochoco se usa el medidor de $MP_{2,5}$ o material particulado menor a 2,5 micrones de radio aerodinámico para tener un contraste en el comportamiento de las concentraciones de CN y además observar la proporción CN/ $MP_{2,5}$. En esta ruta se encontró que las concentraciones, tanto de CNe como de $MP_{2,5}$ (Figura 6-7) fueron aumentando llegando a un máximo de $\sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CNe y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ en los 1.300 m.s.n.m. para luego ir disminuyendo suavemente hasta estabilizarse en alrededor de los $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CNe en los 1.700 m.s.n.m. En el descenso se puede observar un fenómeno interesante en el que a pesar de que el CNe aumenta de forma considerablemente mayor en comparación al ascenso, llegando a valores de hasta $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los 1.500 m.s.n.m. y terminando en los $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 1.000 m.s.n.m. en la base, el comportamiento y valores del $MP_{2,5}$ aumentaron en mayor proporción CNe/ $PM_{2,5}$ (Figura 10-24). Lo anterior entonces sugiere que existiría una remoción del material particulado restante del carbono negro, teniendo este último una proporción mayor sobre el $PM_{2,5}$. El CN se encuentra distribuido en el rango de diámetros menores a $1\mu\text{m}$ y mayores a 100nm . A mayores alturas se espera encontrar un rango más fino de partículas de CN debido a su menor masa lo que explicaría en gran medida la diferencia. Un estudio publicado el 2010 en la Atmospheric Chemistry and Physics Discussions donde se midió CN en la capa límite sobre Europa, se encuentra que a mayor altura efectivamente se encuentra un rango menor en el diámetro de estas partículas (Figura 6-8).

La siguiente ruta se encuentra 1km más arriba que las anteriores, en una zona más transitada por vehículos y en temporada alta de ski, con presencia de refugios con calefacción por biomasa lo que permitiría entender cómo ésta actividad se vería reflejada en el aire de la zona. Se comienza el ascenso en el



Figura 6-8 Diámetro promedio de masa de carbono negro para todos los vuelos. Los puntos puntos de datos individuales se muestran en gris; los promedios se muestran en círculos negros.

estacionamiento del centro, donde se encuentra que las concentraciones tanto de CNe como de MP_{2,5} son extremadamente bajas, llegando a ser indetectables con estos instrumentos en el camino al punto más alto alcanzado. En los 3.100 m.s.n.m. en el ascenso se observa un tímido aumento en el CNe explicado por

el acercamiento a un refugio donde se quema biomasa, esto apenas se nota en la serie de datos del $MP_{2,5}$. En el descenso se toma una ruta más amplia (ver Anexo) pero en lo que respecta a concentraciones de CNe y $MP_{2,5}$ no se encuentran valores significativos. Lo anterior es de interés del punto de vista de un monitoreo continuo, ya que si se encuentra BC en esta altura, cuando se sabría que no existiría transporte desde la capital, entonces este sería un evento que se puede estudiar para analizar el origen de la fuente.

Finalmente se realiza un recorrido en automóvil hacia San José de Maipo. En el ascenso el comportamiento no es regular debido a que en el camino se encontraron vehículos a diésel pesados que a ojo desnudo emitían humo negro, estos vehículos en varias ocasiones iban delante del observador y durante varios minutos no se les pudo sobrepasar, por lo que en la serie de tiempo (ver Anexo) se observan picos pronunciados al igual que en descenso.

6.4 Comparación 1: Experimento con globo cautivo.

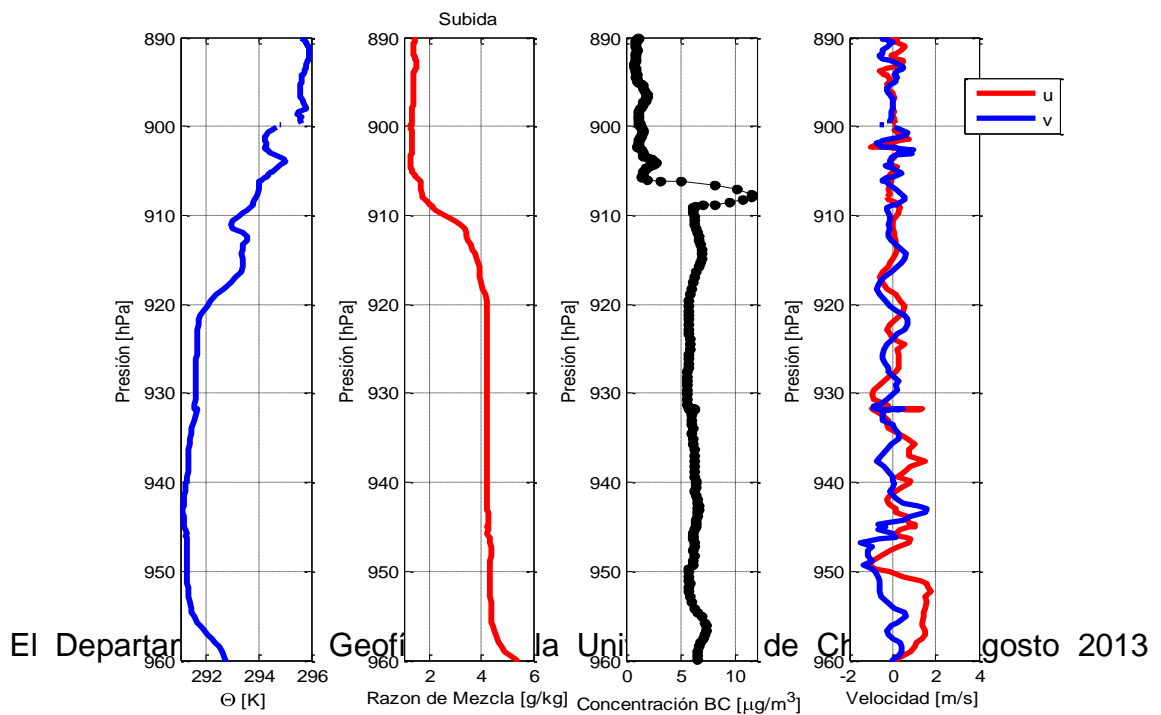


Figura 6-9 Perfiles verticales de (izquierda a derecha) temperatura potencial virtual, razón de mezcla, concentraciones de Carbono Negro equivalente y velocidad del viento dividida en componentes, en ascenso de globo cautivo en Parque O'Higgins. (Datos cortesía del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile).

realizó una medición en vertical usando un Etalómetro portátil en un globo

cautivo en Parque O'Higgins. En la Figura 6-9; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el fuerte gradiente de CNe al

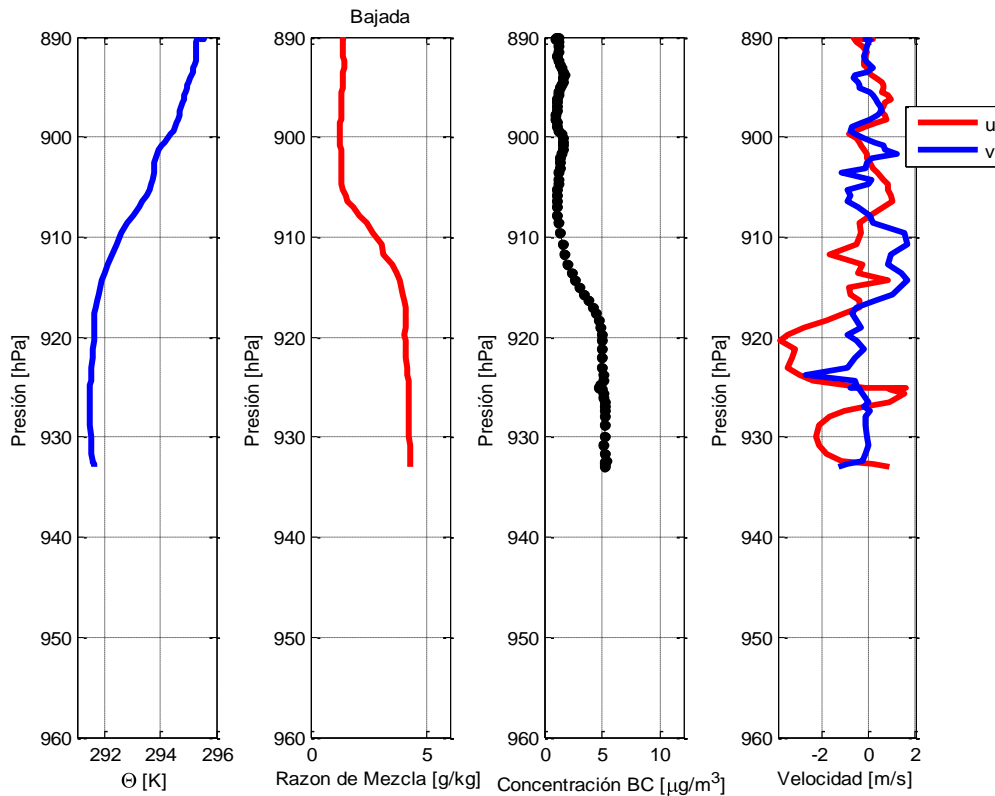


Figura 6-10 Perfiles verticales de(izquierda a derecha) temperatura potencial virtual, razón de mezcla, concentraciones de Carbono Negro equivalente y velocidad del viento dividida en componentes, en ascenso de globo cautivo en Parque O'Higgins. (Datos cortesía del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile).

acercarse a los 950 m.s.n.m (905hPA), esto es unos 500 metros sobre el nivel del suelo, en esta altura la sonda sale de la capa de mezcla, esto se puede ver en el gráfico de la razón de mezcla. La sonda fue enviada el 10 de Agosto del 2013 a las 13:14, la máxima altura se alcanza a las 13:46 y se deja de tomar datos a las 13:56. Existe una notable diferencia en la altura donde ocurre la transición en el ascenso y el descenso (ver Figura 6-10), aunque esto no corresponde a la misma transición de la inversión térmica, o razón de mezcla, donde la temperatura y la humedad relativa cambian bruscamente en la misma

altitud tanto en el ascenso como el descenso. Sin embargo, nuevamente pudo haber ocurrido el problema de que al haber salido de una zona de mayor concentración a una de menor concentración, el Etalómetro pudo haber cambiado de escala y generar ese pulso, sin embargo, el hecho de subir y bajar pasando 2 o más veces por la misma altura ayuda a corregir los datos.

6.5 Comparación 2: Carbono Negro en los Himalayas.

Publicado en Agosto del presente año, un estudio del Laboratorio de Física del Espacio, India; Centro de Aplicaciones Espaciales, India; CNR-ISAC-Instituto de Ciencias Atmosféricas y Clima, Italia; y el comité EV-K2-CNR estudia la implicancia del oscurecimiento de la nieve de los Himalayas usando datos de estaciones a distintas alturas sobre los Himalayas y obteniendo muestras en la nieve, entre otras metodologías.

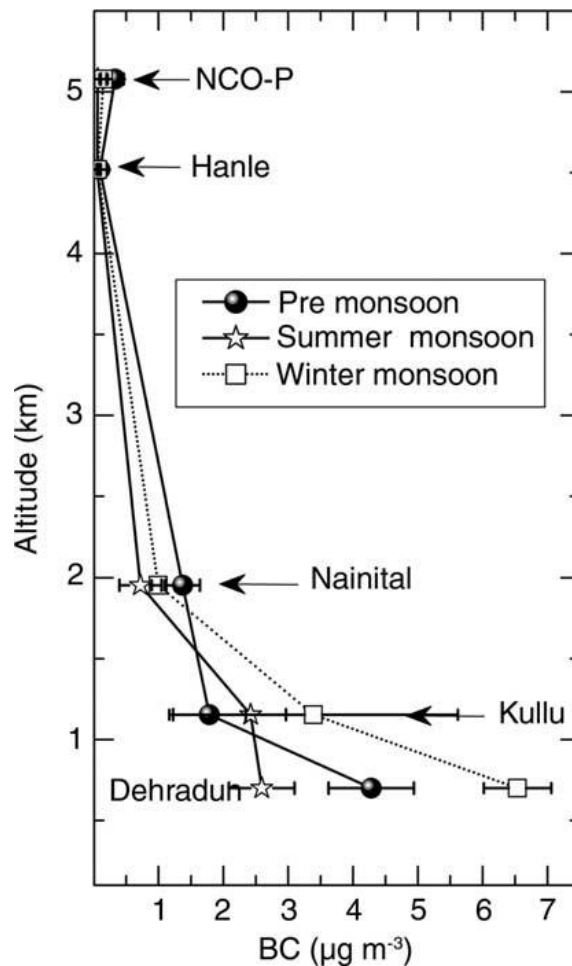


Figura 6-11 Variación temporal de concentraciones máxicas de CNe medidas en Dehradun, Kullu, Nainital, Hanle, y NCO-P en función de la altitud de la estación. (Nair, et al., 2013)

Dentro de los resultados obtenidos se encuentra un perfil vertical de CNe medido con etalómetros intercomparados y fotómetros de absorción multi angulares, separados en 3 temporadas meteorológicas distintas para 5 distintas estaciones que miden CN.

Si bien no se realizará en este estudio un detalle la situación de las estaciones de los Himalayas, ni de las conclusiones del impacto climático que implica el oscurecimiento de las nieves, sí cabe resaltar que las concentraciones medidas en el trabajo actual (Figura 6-6) son comparables (i.e., dentro del rango) a los obtenidos en el estudio Indio, siendo que en los Himalayas se considera un problema real el oscurecimiento de las nieves y hielos, lo que agregaría importancia entonces considerar el monitoreo continuo en los glaciares de los Andes Centrales.

6.6 Comparación 3: Carbono Negro en Europa Occidental y Nórdica.

El año 2010 se publica un estudio a partir de mediciones de CNr con un SP2 en la vertical sobre Europa entre las latitudes 50 y 60° N y entre 15° W a 30° E entre Abril y Septiembre 2008.

Los resultados difieren bastante de los obtenidos en este estudio, del globo cautivo y de los medidos en los Himalayas, ya que las concentraciones máxicas de CNr observadas varían entre 300 ng m⁻³ cerca de áreas urbanas a aproximadamente 50 ng m⁻³ en regiones remotas continentales

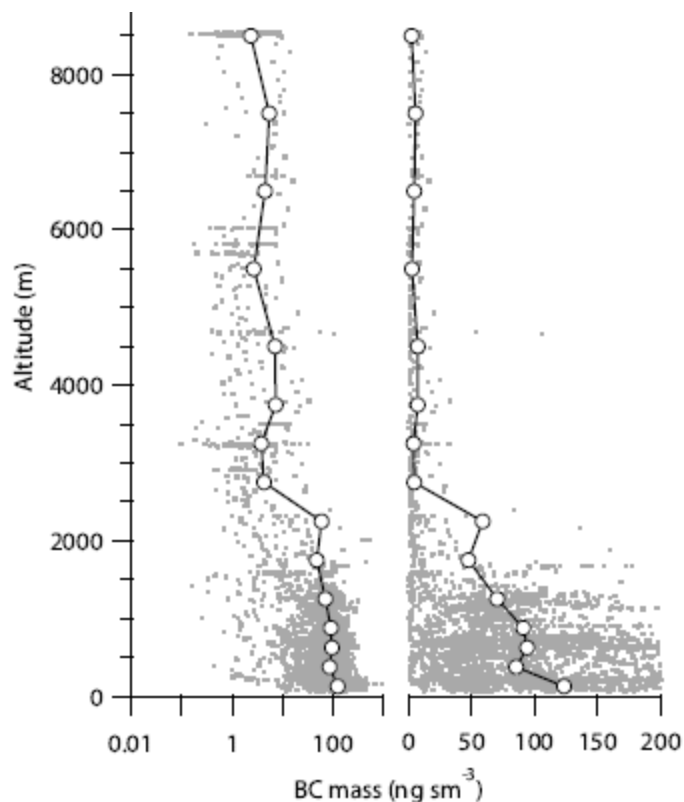


Figura 6-12 Perfiles de Carbono Negro refractario en escala logarítmica y lineal. (McMeeking, et al., 2010)

Aunque posiblemente las concentraciones medidas con un SP2 sean menores que las medidas con un Etalómetro, debido a que el etalómetro mide partículas

negras que no necesariamente puedan tener la propiedad refractaria del carbono negro, éstas no deberían ser mucho menores. Suponiendo esto, entonces estas mediciones reflejan que realmente son altas las concentraciones de Carbono Negro observadas en la Región Metropolitana, y sugiere entonces realizar mediciones continuas y más exhaustivas a distintas alturas de la cordillera de los Andes, especialmente en la zona Central.

El supuesto anterior lo comprueba el estudio de (Wang, et al., 2012) donde se sugiere que las especies no pertenecientes al CN afectan fuertemente en las mediciones del etalómetro, y que éstas no son confiables para determinar el CNr sin correcciones de artefactos.

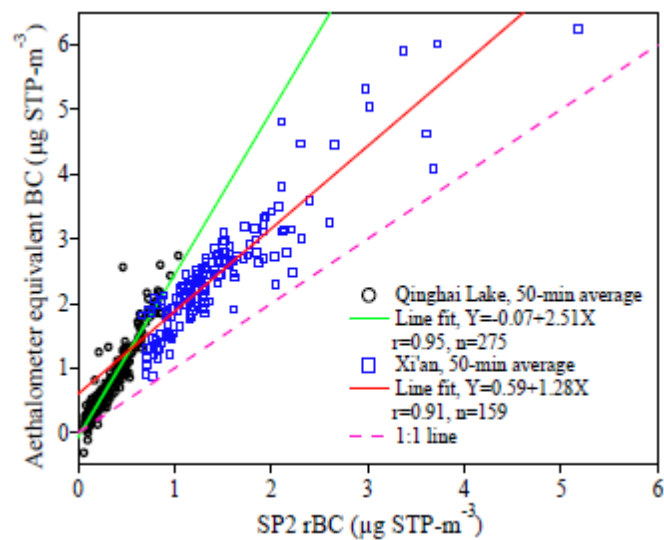


Figura 6-13 Correlación entre concentraciones de CNe (BC) medido con el etalómetro y CNr medido con el SP2 en los lugares mencionados en la leyenda. (Wang, et al., 2012).

En el caso más extremo, el ajuste lineal de pendiente 2,51 en el Lago Qinghai (Figura 6-13) permitiría decir que en el estudio de McMeeking, las mayores concentraciones serían del orden de los 750 ng m^{-3} de CNe cerca de zonas urbanas, lo que de todas formas serían valores bajos en comparación con lo registrado en la Región Metropolitana, incluso sobre la capa límite.

Si usásemos el ajuste lineal inverso (Wang, et al., 2012) para convertir de Carbono Negro equivalente medido con el micro-etalómetro a Carbono Negro refractario entonces se obtendrían máximos valores de entre $2,4$ a $4,2 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$

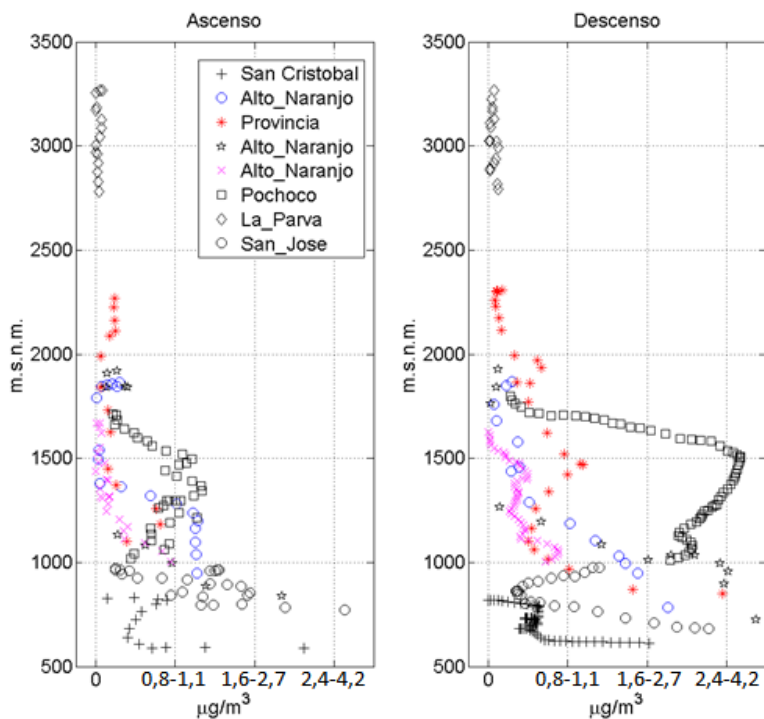


Figura 6-14 Perfiles verticales de ascenso (a la izquierda) y descenso (a la derecha) de Carbono Negro refractario en las distintas rutas obtenido a partir del ajuste lineal entre CNe y CNr encontrado por Wang, et. al., 2013.

cerca de Santiago y menores a $0,8 - 1,1$ en zonas de mayor altura y más alejadas de Santiago, lo que en comparación al estudio europeo es alrededor de 15 veces mayor.

6.7 Comparación 4: Modelación Perfil Vertical de Monóxido de Carbono en Santiago

El monóxido de carbono – CO, se considera un compuesto químicamente estable, así como el CNr. Ambos han correlacionado en distintos lugares y alturas en el mundo. Podemos utilizar entonces una modelación realizada para el transporte vertical del CO en Santiago como un subrogado del CN utilizando el ajuste lineal (Figura 5-12) de Dickerson et. al., 2002 para los valores obtenidos en el estudio de Schmitz, 2005.

Se observa que podría existir un transporte significativo de carbono negro hasta los 3500 m.s.n.m., (Figura 6-15) y aunque el valor de entre 1,3 y 2,5 $\mu\text{g m}^{-3}$ es

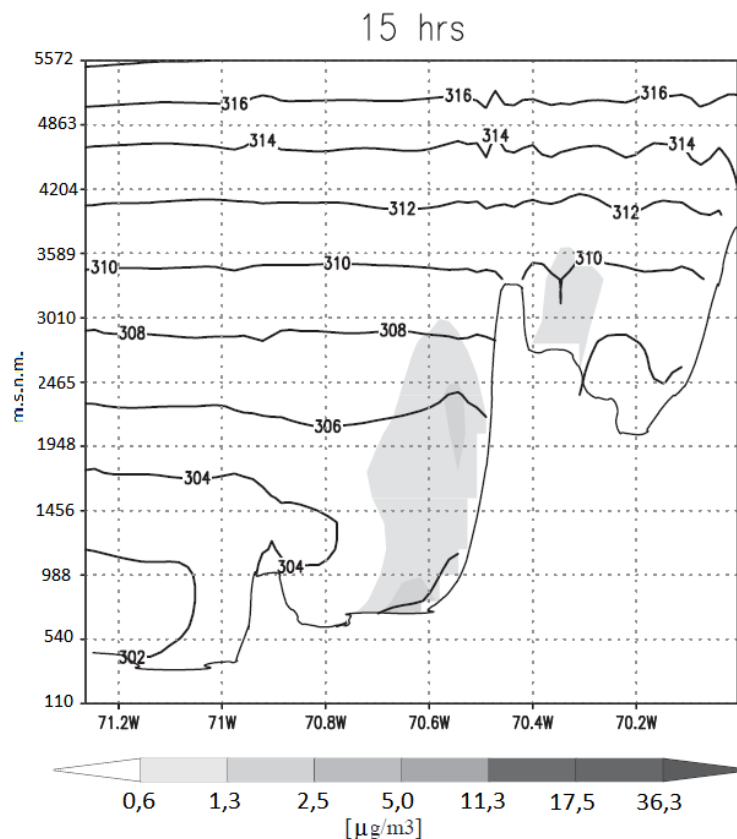


Figura 6-15 Dispersión vertical de modelación de CO en la sección transversal del paralelo 33,45°. Las líneas sólidas representan la temperatura potencial en K.

mucho mayor que lo medido, se debe considerar que estas simulaciones fueron realizadas para el mes de Enero, cuando deja de existir el fenómeno de la inversión térmica sobre Santiago y los contaminantes atmosféricos tienen un mejor ventilación en la vertical. Para comprobar estos supuestos, se sugiere entonces medir en estaciones cálidas.

7 ANÁLISIS DATOS Y ESTACIONES

METEOROLÓGICAS, Y

RECOMENDACIONES DE EVALUACIÓN DE

UBICACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CN

Para el análisis del transporte de contaminantes y posibles localizaciones para la evaluación de una estación de CN, se muestran datos de las siguientes estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile – DMC y de las estaciones meteorológicas de la red MACAM del Ministerio del Medio Ambiente.

Tabla 6-2 Detalles de estaciones meteorológicas disponibles. 5 estaciones de la DMC y 11 de la red

Estaciones DMC	Latitud	Longitud	Altura	Inicio datos viento	Fin datos viento
Los Libertadores	32° 50' 44" S	70° 7' 9" W	2955Mts.	27-Ago-2012	30-Abr-2013
El Colorado	33° 21' 0" S	70° 17' 37" W	2750Mts.	27-Ago-2012	15-Jun-2013
San José Guayacán	33° 36' 55" S	70° 21' 2" W	928Mts.	07-Dic-2012	05-Ago-2013
El Paico	33° 42' 23" S	71° 0' 29" W	275Mts.	25-Mar-2013	05-Ago-2013
Lo Prado Cerro San Francisco	33° 27' 29" S	70° 56' 55" W	1068Mts.	07-Dic-2012	05-Ago-2013
Estaciones Red MACAM					
F – La Paz	33.4189 S	70.6489 W	540 Mts.	1-Ene-1996	30-Sep-2012
L – La Florida	33.5133 S	70.5859 W	600 Mts.	2-Jun-1997	30-Sep-2012
M – Las Condes	33.3734 S	70.5209 W	810 Mts.	1-Ene-1996	30-Sep-2012
N – Parque O'Higgins	33.4608 S	70.6585 W	510 Mts.	1-Ene-1996	30-Sep-2012
O – Pudahuel	33.4345 S	70.7478 W	480 Mts.	2-Jun-1997	30-Sep-2012
P – Cerrillos	33.4896 S	70.7170 W	510 Mts.	30-Nov-1997	30-Sep-2012
Q – El Bosque	33.5439 S	70.6638 W	570 Mts.	30-Nov-1997	30-Sep-2012
R – Cerro Navia	33.4297 S	70.7298 W	510 Mts.	13-Dic-2002	30-Sep-2012
S – Puente Alto	33.4648 S	70.6710 W	s/d	14-Oct-2009	30-Sep-2012
T – Talagante	33.4684 S	70.6754 W	s/d	21-Oct-2009	30-Sep-2012
V – Quilicura	33.3659 S	70.7482 W	s/d	30-May-2008	30-Sep-2012

Se realiza un análisis de distribución diaria promedio de la velocidad y dirección del viento para cada estación meteorológica. El total de datos históricos se divide en temporada cálida y fría, que corresponde a períodos de Septiembre a

Marzo y de Abril a Agosto, respectivamente. Luego se subdivide en períodos del día de 00:00 a 12:00 horas (corresponde a madrugada-mañana, pero le llamaremos madrugada) y de 12:00 a 00:00 horas (corresponde a tarde-noche, pero le llamaremos tarde). La razón de estas divisiones se basa en la variación temporal de los vectores vientos, cuya magnitud generalmente incrementa en períodos cálidos y cuya dirección cambia drásticamente antes y luego de mediodía.

Para analizar la información, esta se despliega en forma de rosas de viento para analizar el comportamiento del viento en los 4 sub-períodos, la rosa de

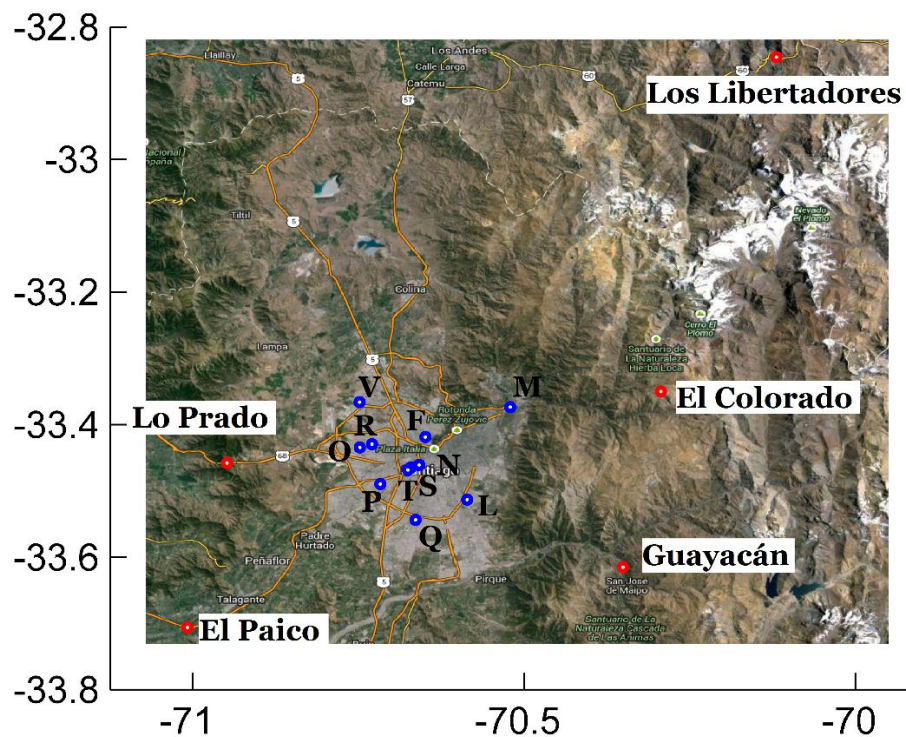


Figura 6-16 Ubicación de estaciones meteorológicas disponibles. Los círculos azules corresponden a las estaciones de la red MACAM del Ministerio de Medio Ambiente, y los círculos rojos corresponden a las estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile.

viento muestra la proporción de puntos pertenecientes a un mismo rango de dirección de viento en un histograma polar, y dentro de ese rango se subdivide en diferentes rangos de velocidad del viento. Se usa el diagrama de cajas para

ver la estadística de una distribución diaria con resolución horaria, es decir en este diagrama se muestra como línea central roja la mediana, los bordes de la caja representan el límite inferior del 2^{do} cuartil y el superior del 3^{er} cuartil, las líneas punteadas o bigotes consideran puntos extremos no considerados atípicos y fuera de esta se grafican los datos atípicos, es decir, datos fuera del 99,3% del intervalo de confianza, como cruces rojas en forma individual.

Los Libertadores

Es la estación a mayor altura de las que se cuentan en este análisis, y se encuentra a 1,5 km del centro de ski Portillos. Además está a la salida de un cajón de menos de 1km de ancho que baja desde el Este, aunque debido a la suave pendiente que sube hacia el Norte desde laguna del Inca, podrían haber vientos desde esa zona.

En las estaciones cálidas se observan velocidades de viento de entre 2 y 3 m/s en la madrugada con direcciones predominantes hacia el SEE, siendo las 12pm el tiempo en el que comienzan a aumentar desde 2 hasta llegar a 6m/s desde las 4pm a las 8pm y cambiando las direcciones de viento radicalmente hacia el SOO.

En las estaciones frías se observan velocidades de viento ligeramente mayores en la madrugada habiendo menor dispersión en las direcciones, las que se dirigen también hacia el SEE, cambiando de manera similar su sentido hacia el SOO con velocidades ligeramente menores en la tarde (Figura 6-17).

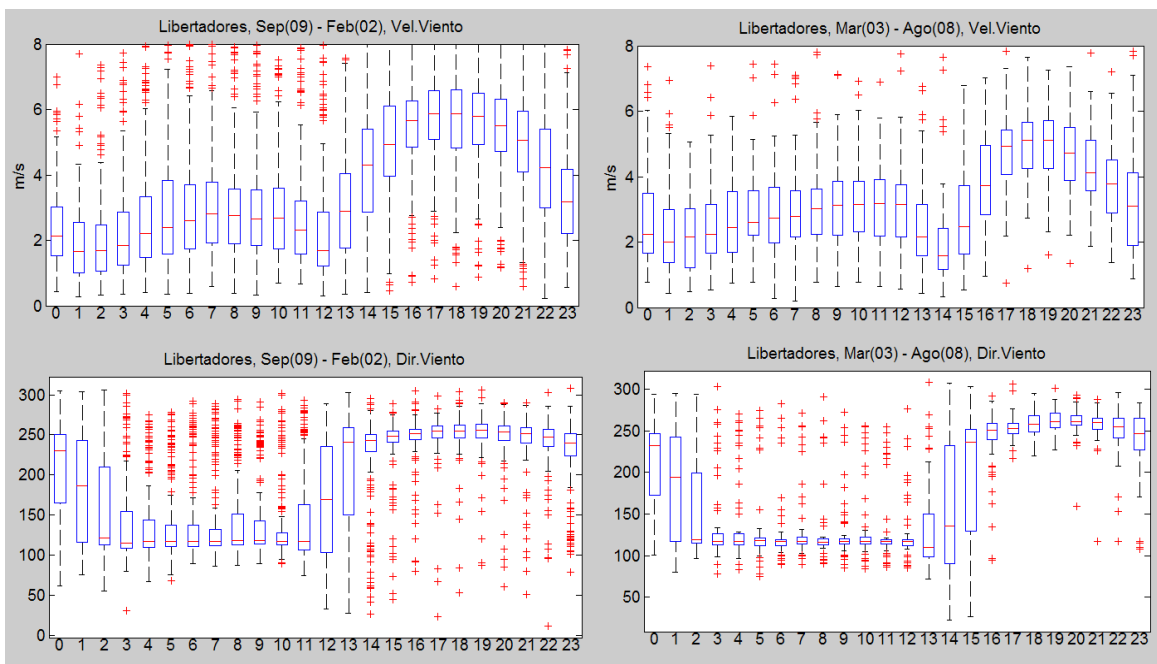


Figura 6-17 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación los Libertadores de la DMC.

La distribución de velocidades y direcciones del viento se puede observar en una rosa de vientos (Figura 6-18) donde claramente se puede notar la fuerte tendencia de vientos catabáticos (i.e., desde la cordillera) desde mediodía hasta medianoche (más del 60% en períodos fríos y cálidos), y anabáticos (i.e., hacia la cordillera) desde medianoche hasta mediodía (más del 60% en períodos fríos

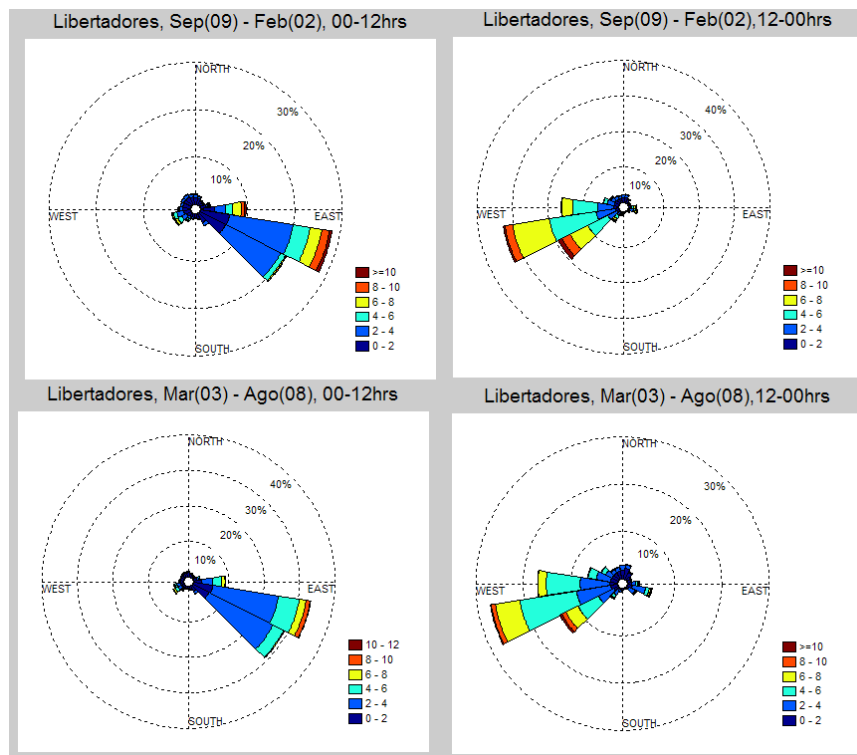


Figura 6-18 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación los Libertadores de la DMC.

y cálidos).

El paso los Libertadores, a unos 5km al NE de la estación es un importante paso fronterizo, el que conlleva alto tráfico de vehículos pesados a diésel en el camino. Un monitoreo en esta zona debería reflejar entonces las emisiones aisladas que tendrían principalmente este tipo de camiones en esta zona, aunque se espera entonces que este impacto local, a pesar de las buenas condiciones de ventilación serían una constante influencia en las mediciones de CN. Es importante resaltar que en el paso los Libertadores, los vehículos deben

detenerse por algunos minutos y hacer cola por asuntos aduaneros, lo que aumentaría las concentraciones locales de CN. El viento de la tarde facilitaría la dispersión y el transporte del CN hacia el centro de ski Portillos, otro lugar donde se podría evaluar la localización de una estación de monitoreo. De todas

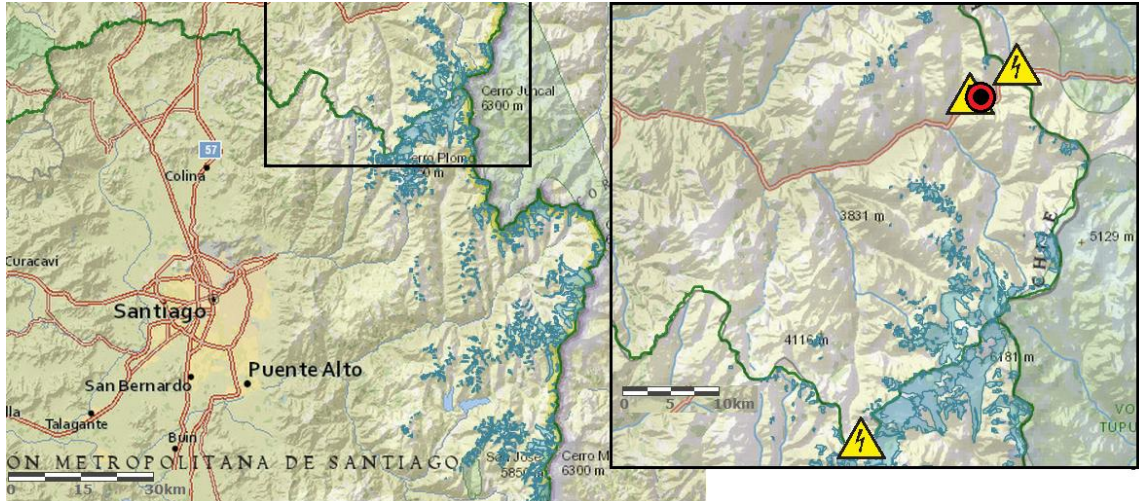


Figura 6-19 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica Los Libertadores, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.

formas, se sugiere medir el carbono negro en esta zona para evidenciar lo anterior, ya que el centro de eventos Portillos se considera como potencial para la evaluación de localización de una estación de carbono negro al estar activo durante la mayor parte del año.

El Colorado

La estación El Colorado se encuentra dentro de las instalaciones del centro de ski El Colorado, a unos 40km de Santiago. Se localiza en el Oeste de la falda del cerro Colorado y a 1,5km al sur del centro de ski La Parva.

Las velocidades del viento registradas son bajas y mayoritariamente planas a lo largo del día, fluctuando entre 1 y 2,5 m/s tanto en estaciones cálidas como frías, presentando al igual que en Los Libertadores, vientos catabáticos en la tarde con componentes predominantes SOO, dirección donde se encuentra el valle del Mapocho hacia Santiago, y anabáticos en la madrugada dirección NEE desde el valle del Mapocho y Santiago (Figura 6-20 y Figura 6-22).

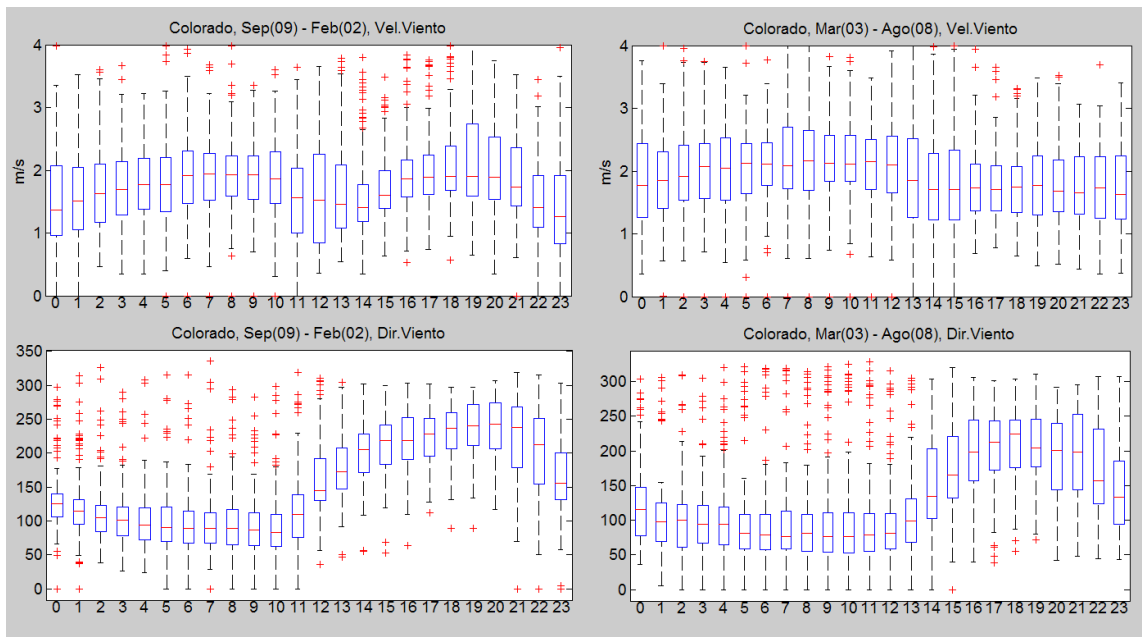


Figura 6-20 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación El Colorado de la DMC.

La zona de los centros de ski El Colorado, Farellones y La Parva es altamente transitada en la temporada de ski, que corresponde principalmente a los meses más fríos, Junio – Octubre el 2013, y camino a Farellones hasta la bifurcación hacia la mina Los Bronces, es constantemente transitado por vehículos pesados de la industria minera durante todo el año, con restricción horaria hasta las primeras horas del día para no calzar con horarios de subida y bajada de los esquiadores. Sin embargo, es en la madrugada, de 00 a 12hrs en que se presentan en su mayoría vientos anabáticos, pudiendo entonces transportar las emisiones de estos vehículos pesados hacia estas zonas de ski.

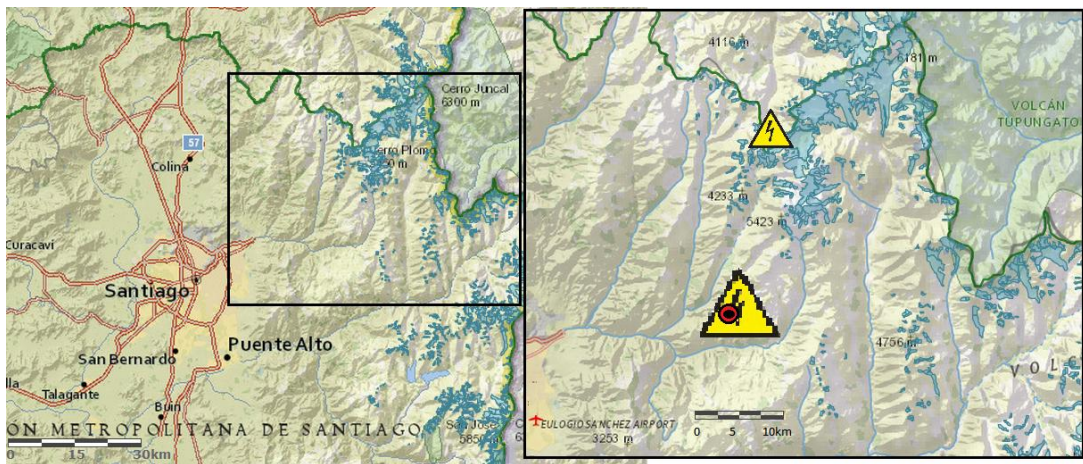


Figura 6-21 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica El Colorado, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.

nas,

se cita un estudio publicado el año 2012 sobre el impacto de la contaminación urbana de Santiago sobre la precipitación de la nieve en cerro Colorado,

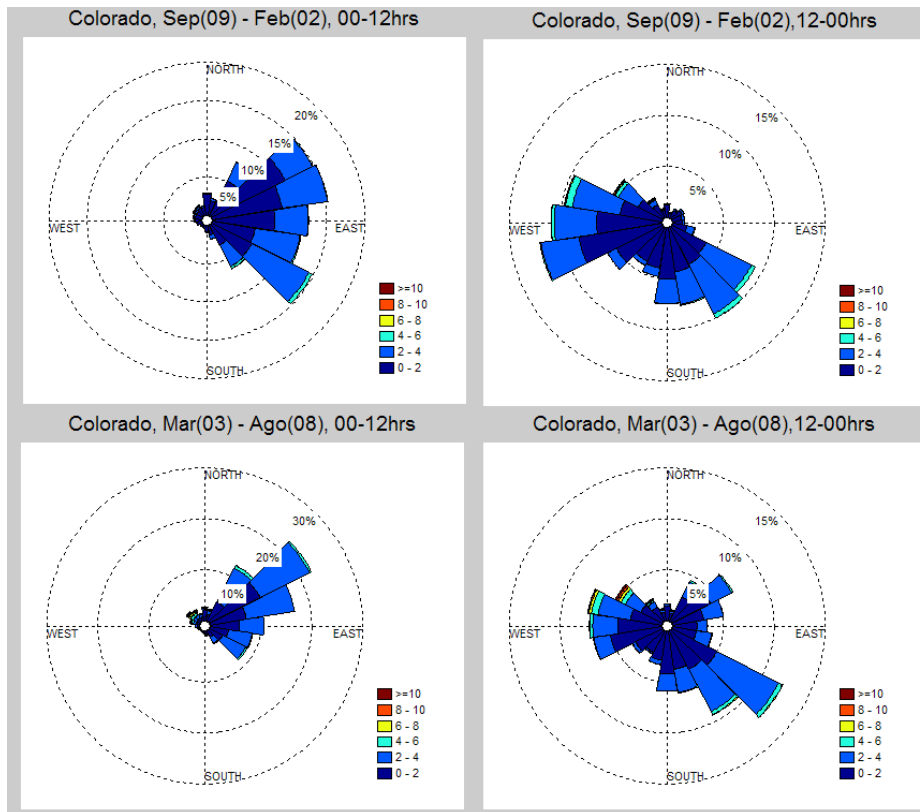


Figura 6-22 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación los Libertadores de la DMC.

realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Extremadura, España, que reveló altas concentraciones de elementos trazadores de contaminación antropogénica en muestras de nieve recolectadas en el cerro Colorado, principalmente emisiones provenientes del tráfico, fundiciones, quema de biomasa y carbón e incineración de residuos. Las muestras se compararon con muestras obtenidas de nieves en altitudes similares 500km al Sur en los nevados de Chillán (Tabla 6-3), concluyendo que se demuestra la evidencia de emisiones atmosféricas urbanas en las nieves 40km al NE de Santiago.

Sin embargo, en las mediciones realizadas en este trabajo de tesis en el centro de ski La Parva, no se encontró presencia de CN ni de MP2,5 durante la exploración. Por otro lado, se observó a ojo desnudo el constante ascenso de

Tabla 6-3 Concentraciones de elementos trazadores antropogénicos medidos en muestras de nieve recolectadas durante campañas de muestreo en Cerro Colorado comparados con valores de referencia en los Nevados de Chillán. Las fuentes trazadas: Tráfico (1), fundiciones (2), quema de biomasa y carbón (3), incineración de residuos (4). (Cereceda-Balic, et al., 2012)

Element	Sources traced	Cerro Colorado mean ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Nevados de Chillán mean ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Conc. ratio CC/NCH
As	2, 3	1.50	0.04	37.5
Pb	1, 2, 4	28.66	8.21	3.5
Cd	1, 2	0.74	0.33	2.2
Ni	2	1.92	0.26	7.3
V	1, 2, 3	1.36	0.01	108.1
Cr	1, 2	1.36	<LOD	
Mn	1, 2	46.06	0.52	88.4
Co	2	1.35	0.18	7.6
Ba	1	27.36	0.68	40.0
Cu	1, 2, 3, 4	105.51	6.24	16.9
Zn	1, 2, 3, 4	51.07	15.05	3.4
Mo	1, 2, 3	0.71	0.09	7.8
Sb	1, 2, 3, 4	0.11	0.04	3.1

supuestos contaminantes absorbentes de luz a lo largo del valle del Mapocho (Figura 6-5) en el segmento horario 11:00 – 17:00, lo que según la distribución de vientos correspondería al fin de los vientos anabáticos y al comienzo de vientos catabáticos. Esto podría ser una contradicción, a menos que el ascenso de los contaminantes pueda no solamente deberse al transporte por vientos, sino también a una expansión térmica de la capa de mezcla. Lo anterior sugiere al menos realizar campañas de mayor periodicidad de medición de CN en este sector para estudiar con más detalle estos posibles fenómenos.

Estación M - Las Condes, red MACAM

Se considera importante realizar un quiebre en la descripción de las estaciones de la DMC para analizar los registros de vientos en la estación de Las Condes

de la red MACAM, ya que ésta se encuentra localizada a la entrada del valle del Mapocho desde Santiago.

En concordancia con las estaciones previamente descritas, la estación Las Condes también deja visible la evidencia de los cambios de la dirección del

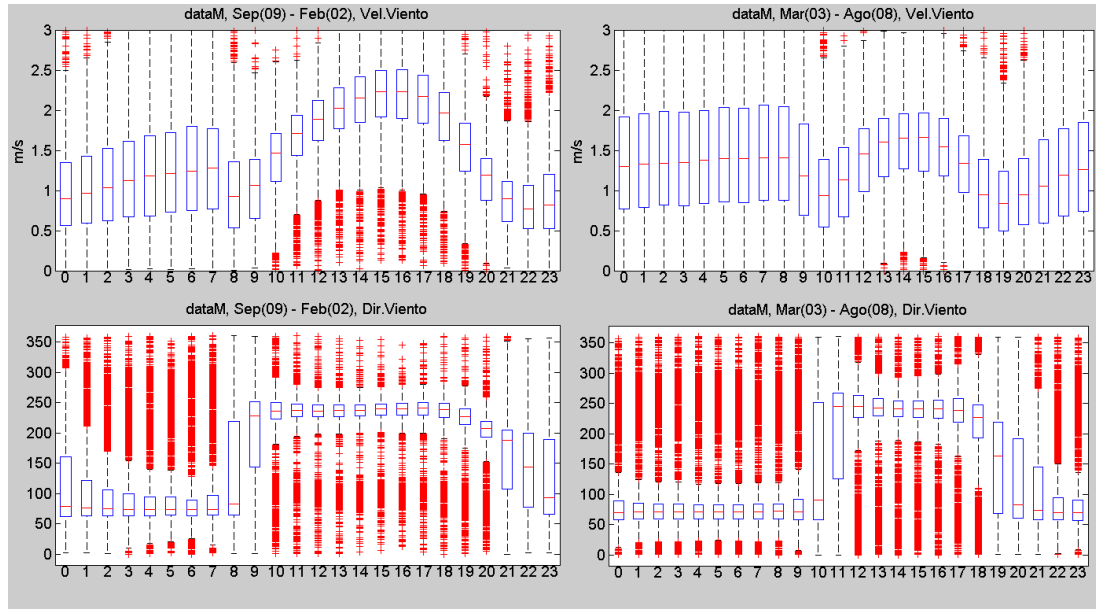


Figura 6-23 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación Las Condes de la red MACAM.

viento entre la madrugada y la tarde (Figura 6-24) siendo las 8am la hora crítica del cambio de la dirección del viento en los meses cálidos, y las 10am en meses fríos. La velocidad del viento en los meses cálidos varía entre 0,5 y 1,5 m/s en la noche cuando la dirección es predominantemente NEE, es decir subiendo por el valle del Mapocho (de 21 a 8 hrs), aumentando desde 1,5 a 2,5 m/s durante el día (9 a 20 hrs) en dirección SO bajando del valle del Mapocho. En los meses fríos, sin embargo, los vientos de subida son generalmente mayores cuando suben por el valle, con un descenso al momento de la transición en la dirección para aumentar ligeramente, llegando a un máximo promedio de 1,5 m/s (Figura 6-23). Lo anterior sugiere que los vientos de subida en general son mayores en épocas frías y los de bajada son mayores en épocas cálidas. Esto podría influir en que exista un transporte generalizado

hacia el valle del Mapocho en épocas frías y desde el valle del Mapocho en épocas cálidas.

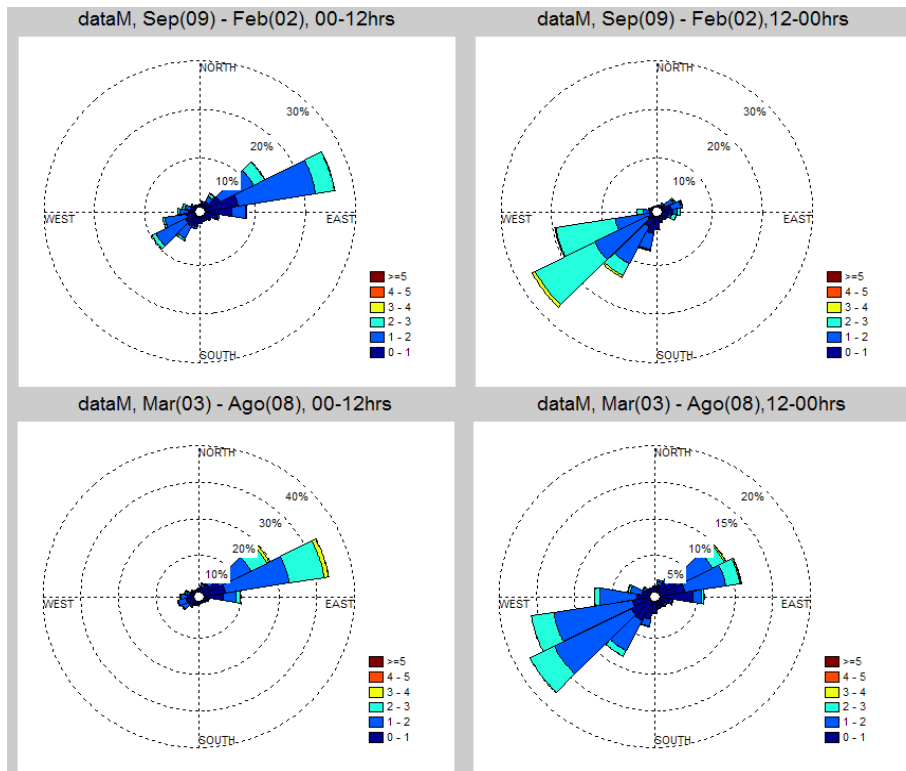


Figura 6-24 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación Las Condes de la red MACAM.

San José de Guayacán

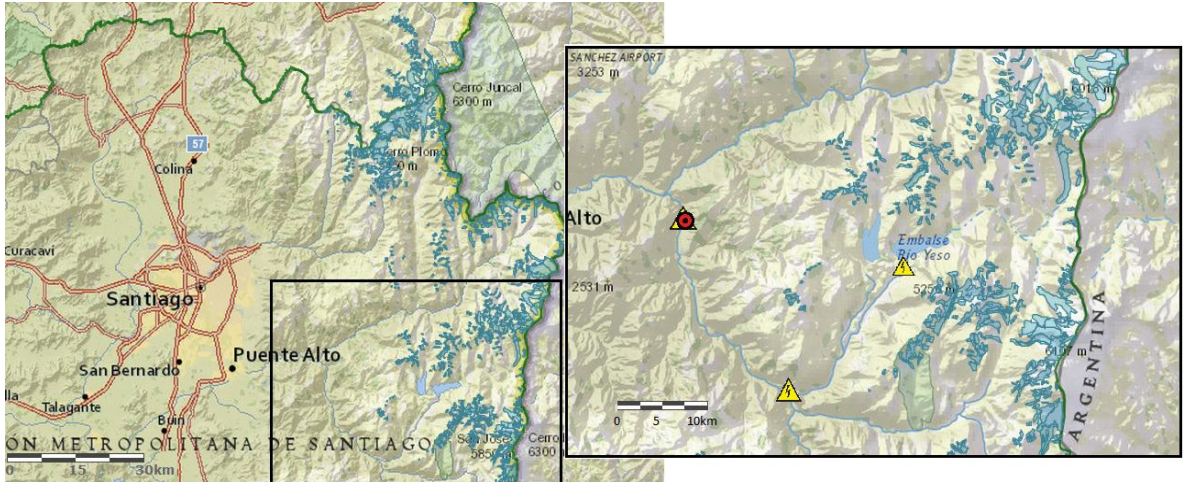


Figura 6-25 Glaciares cercanos (área celeste) a estación meteorológica Guayacán, DMC (derecha, círculo rojo). Los triángulos amarillos representan las zonas cercanas a la estación que cuentan con electricidad.

La estación San José de Guayacán se encuentra en el pueblo de San José de Maipo, confinada en un valle con dirección Norte-Sur. La zona de alta elevación cercana que cuenta con electricidad y acceso vial corresponde al Embalse del

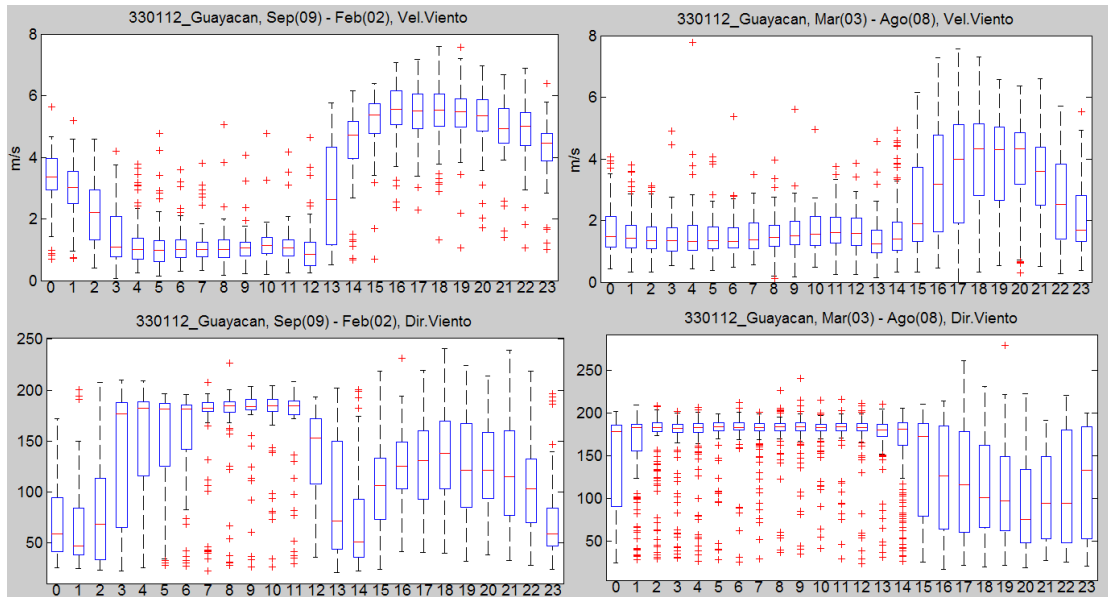


Figura 6-26 Diagramas de caja de distribuciones diarias de velocidad de viento (arriba) y dirección (abajo) para períodos cálidos (izquierda) y fríos (derecha) para la estación Guayacán de la DMC.

Yeso (2.600 m.s.n.m.), cuyo camino se encuentra cerrado o es de difícil acceso en Invierno, por lo que no se pudo visitar.

Los vientos siguen la dirección del valle del Maipo hacia arriba (Sur) en la madrugada mayormente a bajas velocidades de 1m/s llegando a velocidades promedio de 6m/s entre las 15 y 20 hrs en períodos cálidos valle abajo (Norte), así mismo en períodos fríos el comportamiento es similar, con velocidades

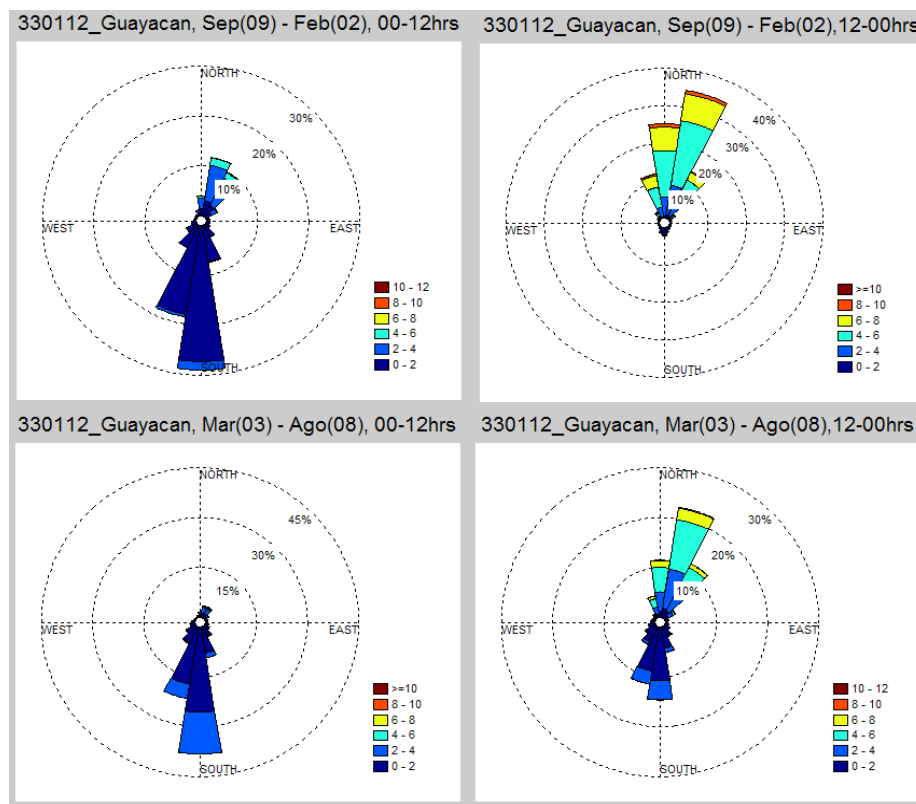


Figura 6-27 Rosas de viento para períodos cálidos (arriba) y fríos (abajo) separados en período del día, donde madrugada se muestra a la izquierda y tarde a la derecha, para la estación Guayacán de la DMC.

ligeramente mayores en la madrugada y llegando hasta 4 m/s en la tarde (17 y 20 hrs). En este caso, en contraste con el valle del Mapocho, se esperaría un menor transporte de contaminantes a lo largo del valle hacia arriba, siendo el retorno más relevante. Sin embargo, debido a la cercanía de variados glaciares en la zona, el acceso y la alimentación eléctrica, se sugiere considerar el embalse del yeso como una opción en los puntos de evaluación para estudiar la

instalación de una estación de monitoreo de CN con una menor potencial de presencia de transporte de contaminantes atmosféricos desde Santiago.

CAMPOS DE VIENTOS

Para crear un campo de vientos a partir de una serie de datos de velocidades y direcciones de viento, se necesita calcular el Vector Resultante de Vientos. Sus componentes en el plano cartesiano lo calculamos como un promedio aritmético de las componentes de cada velocidad del viento registrada. Lo anterior se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$U = \frac{\sum_i v_i \sin(\theta_i + \pi/2)}{N}$$
$$V = \frac{\sum_i v_i \cos(\theta_i - \pi/2)}{N}$$
$$VR = [U, V]$$

Donde U y V son las componentes del vector de viento resultante VR, v_i es cada valor de velocidad del viento y θ_i es cada valor de la dirección del viento. N es el total de pares de valores de velocidad y dirección del viento.

En la siguiente figura se muestra un mapeo del comportamiento general de los vientos en cada estación, donde se usa el vector resultante para representar la dirección y magnitud del viento. Es de notar que la escala en cada período es distinta, pues la diferencia entre las velocidades del viento en estaciones frías y cálidas, y en madrugada y tarde, es importante.

En el período de madrugada en las épocas cálidas, se observa un movimiento de masas de aire generalizado hacia la cordillera, y particularmente subiendo por el valle del Mapocho (Figura 6-28). La estación lo Prado indica que el viento sobre la ciudad de Santiago es mucho mayor que en su superficie e incluso con direcciones contrarias, esto se puede observar en los datos del experimento del globo cautivo, cuando las direcciones del viento cambiaron drásticamente al aproximarse a la capa límite (Figura 6-10).

El análisis detallado de los datos procesados de las estaciones meteorológicas restantes se omite por considerarse superfluo, considerándose suficiente la

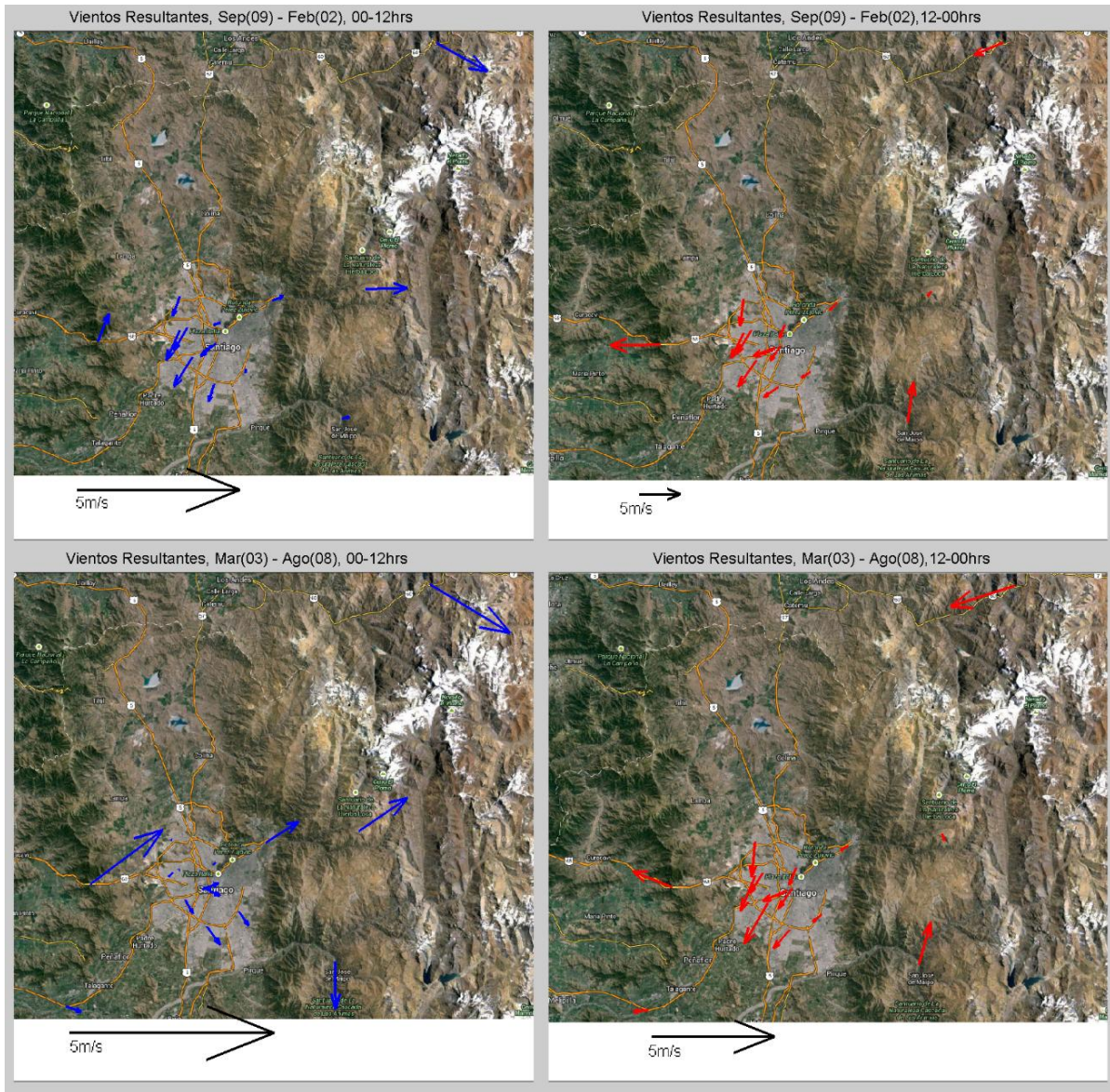


Figura 6-28 Campos de viento resultantes a partir de los datos de estaciones meteorológicas disponibles, separados por período del día am y pm, y temporada fría y cálida.

presentación de sus vectores resultantes en los campos de vientos georeferenciados. Los resultados, sin embargo, son presentados en el Anexo.

8 MODELOS

En el estudio “Antecedentes para la declaración de zona saturada de la Región Metropolitana” realizado por la CONAMA el año 1996, se presenta un modelo de análisis de trayectorias realizado por el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología – SMHI en la Región Metropolitana, el que en conclusión se llega a que el modelo usado funciona correctamente de acuerdo a los datos de las estaciones meteorológicas de referencia, y dice que las masas de aire

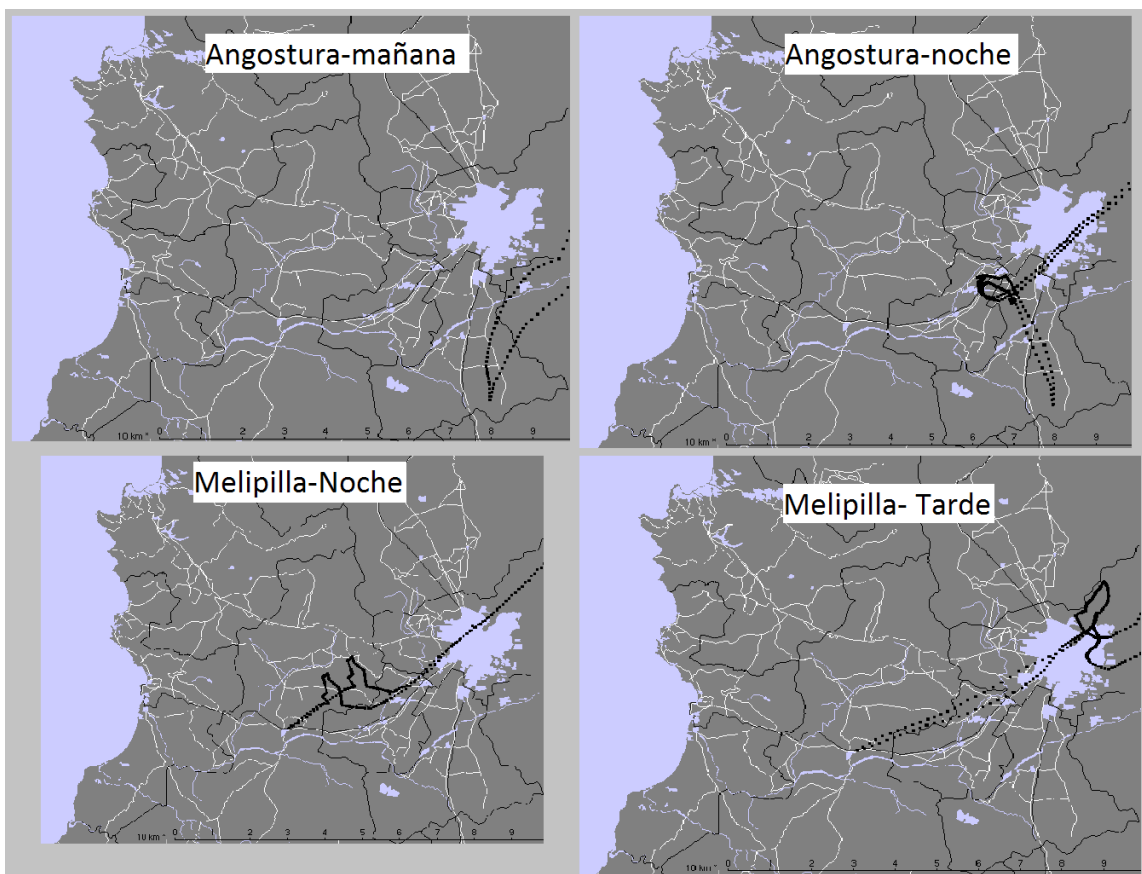


Figura 8-1 Resultados de modelo de trayectorias retrospectivo, donde cada punto representa la ubicación de una partícula de prueba cada 10 minutos. (CONAMA, 1999)

provenientes del valle de Melipilla se dirigen en su mayoría hacia el valle de

Santiago y luego por el valle del Mapocho, y desde el sur de Santiago en Angostura las masas de aire se transportan hacia el Norte, pasando por el sur de Santiago y retirándose hacia la cordillera por el valle del Maipo en la madrugada y mañana, aunque en la noche pasan por el centro de Santiago y se retiran por el valle del Mapocho. Por otro lado, se modelan las trayectorias de masas de aire provenientes del centro de Santiago que, en general, se retiran por el valle del Mapocho y por diferentes quebradas del cerro Ramón.

El mismo tipo de modelo tipo análisis de trayectorias se ofrece en línea por la administración oceánica y atmosférica nacional de los Estados Unidos – NOAA que permite correr modelos de trayectoria y dispersión de contaminantes. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la base de datos meteorológica para el área de interés presenta una resolución pobre (de 0,5 a 1°), pero podría servir para entender el comportamiento de escala sinóptica de las masas de aire. Este

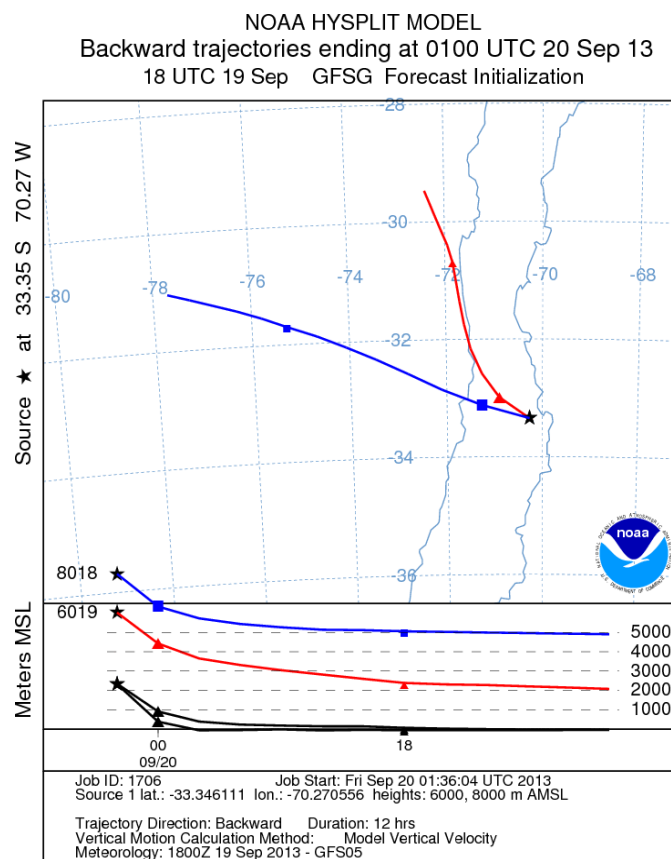


Figura 8-2 Ejemplo de resultados de modelación de análisis de trayectoria retrospectiva de HYSPLIT. Cortesía del NOAA

modelo llamado modelo híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única – HYSPLIT permite utilizar bases de datos de meteorología global para reconstruir o predecir el comportamiento de una partícula de aire a una determinada altura, ubicación en el globo y tiempo. Al no contar con una resolución apropiada para resolver topografía altamente compleja como la que supone la cordillera de los Andes, en este trabajo se usa a modo de ejemplo una corrida del HYSPLIT para ilustrar lo que se puede lograr, simulando a mayores alturas y en el orden de días. En este caso (Figura 8-2) se observa una modelación de trayectorias de 12 horas que llegan a la zona de los glaciares de Chile Central el 19 de Septiembre a las 21:37hrs. Se usan 2 trayectorias, que terminan a 6.000 m.s.n.m. y 8.000 m.s.n.m. Se puede observar que ambas masas de aire ascienden, y vienen desde el Oeste. Otras numerosas simulaciones sugieren que la única entrada de aire a escala sinóptica que tiene esta zona de Chile es por el Oeste, lo que descarta que exista contaminación por CN desde países como Argentina, Brasil, o de los colosales incendios forestales de Africa, siendo más probable un transporte desde Oceanía, lo que sería difícil de detectar estando en las cercanías de la ciudad de Santiago.

Otra simulación en un caso más extremo sería considerar la vida promedio del CN en la atmósfera, esto es alrededor de 10 días, y por otro lado es en los meses más fríos cuando la inversión térmica sobre Santiago mantiene las partículas enclaustradas en el valle. Simulando entonces el origen de 3 partículas que terminen a 3, 5 y 7 km de altura en la zona de los glaciares de Chile Central (Figura 8-3). Lo que se observa en el caso de las partículas que terminan a 7 km s.n.m. es que comienzan a 4,5 km s.n.m. al Sud-Este de Asia para luego atravesar Australia de Nor-Oeste a Sud-Este ascendiendo sobre los 7,5 km por sobre el mar y siguiendo muy probablemente los vientos de la corriente a chorro del hemisferio Sur, descendiendo e internándose en el continente a la altura de la Región del Maule, a 5km de altitud, durante las 12

últimas horas de la simulación luego de haber transcurrido 9,5 días para terminar a 7.013 m.s.n.m. El segundo caso es menos importante debido a que no se origina en ningún lugar donde existan fuentes significativas de CN (ver

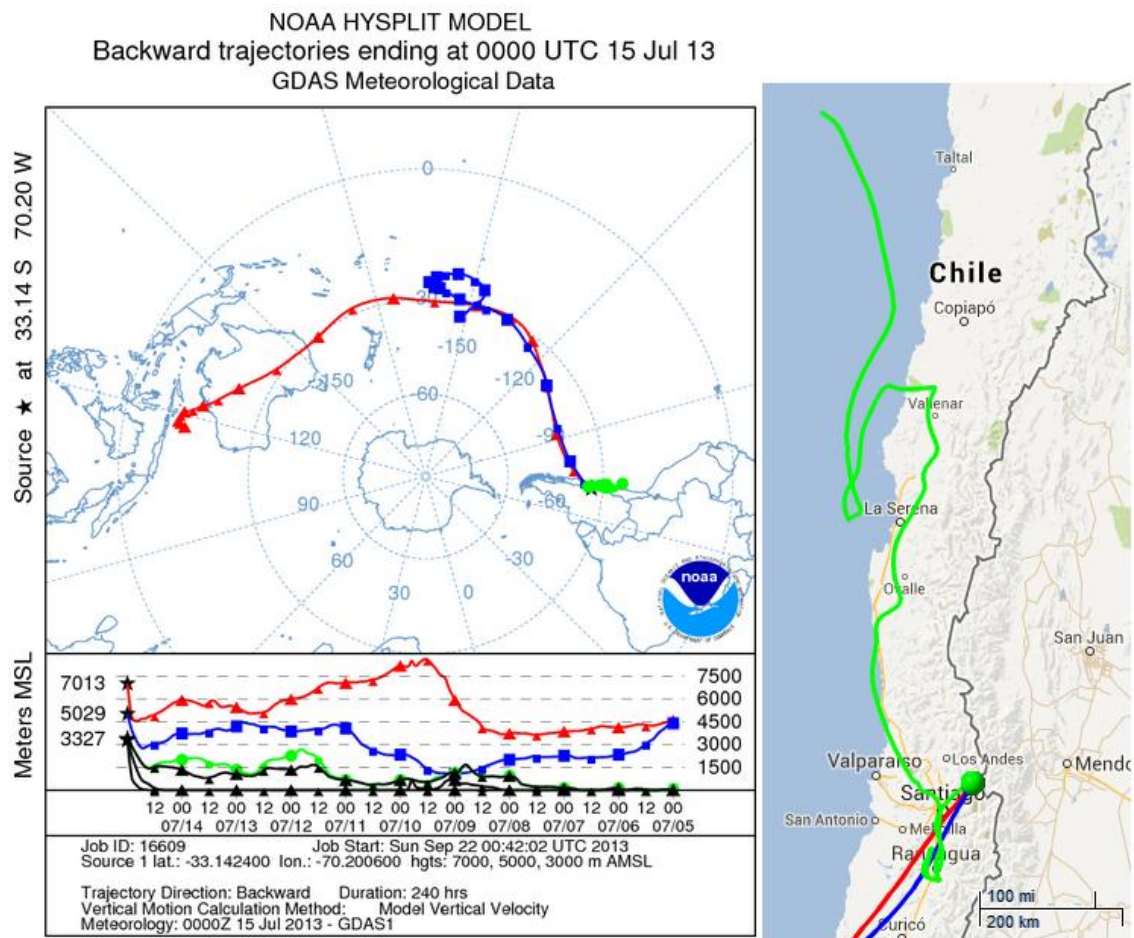


Figura 8-3 Ejemplo de resultados de modelación de análisis de trayectoria retrospectiva de HYSPLIT para partículas con 3 altitudes originales distintas hace 10 días que llegan a glaciares de Chile Central. Cortesía del NOAA

Figura 5-8, Figura 5-9) a diferencia de la primera trayectoria. Sin embargo este ejemplo destaca por evidenciar que a 2km de diferencia en altitud se pueden esperar orígenes de masas de aire de 10.000 km de diferencia, además de que los glaciares a estas latitudes se encuentran a alrededor de 5km s.n.m.

En el tercer caso, es necesario acercarse a escala del país (cientos de km) para observar la trayectoria de una partícula que termina en este caso a nivel del suelo a 3327 m.s.n.m. La trayectoria viene del Norte a bajas velocidades

comparadas con las anteriores, transportada por vientos costeros a nivel del mar y luego a nivel de suelo al entrar al continente, entrando en forma definitiva unos 60km al Norte de Valparaíso para llegar a Santiago por el Noroeste el 11/Jul a las 11 UTC a 2.000 m.s.n.m., demorándose alrededor de 5 horas en cruzar Santiago de Norte a Sur para dirigirse a la 6ta Región, luego volver a Santiago 3 días después y finalmente internarse hacia los Andes Centrales. Esta última trayectoria, sin embargo es poco representativa ya que la base de datos GDAS usada en esta modelación tiene una resolución de 1x1°.

En resumen se podría decir que la Macro Zona Central de Chile tiene pocas posibilidades de ser contaminada desde países externos, atribuyéndose en primera instancia fuentes locales o regionales.

9 CONCLUSIÓN DE LA FASE A:

RECOMENDACIÓN DE LOCALIZACIÓN A EVALUAR

El conjunto de análisis previamente descrito correspondiente a la fase de screening en el diseño de una red de monitoreo, la que se resume un monitoreo básico a distintas alturas y lugares cercanos a los canales de ventilación en dirección a glaciares cercanos de la Región Metropolitana; un análisis de datos general de los vientos del último año en estaciones de la DMC en los alrededores de la Región Metropolitana y en estaciones de la red MACAM, incluyendo sugerencias basadas en el reconocimiento de zonas con acceso a electricidad e infraestructura vial; modelaciones previas de trayectorias realizadas para la Región Metropolitana; y modelaciones actuales de trayectoria a escala sináptica e inter-hemisférica.

A continuación se enumeran distintas localizaciones donde se propone continuar el estudio de evaluación de la red de monitoreo.

Tabla 9-1 Lista de ubicaciones propuesta para evaluación de instalación de estación de monitoreo de Carbono Negro

Prioridad	Ubicación Propuesta	Latitud	Longitud	Altitud
1	Limite Oriente, mina Codelco, división Andina - Glaciar Olivares	33° 9'30.57"S	70°13'49.43"W	4580
1	Cerro Colorado	33°20'48.29"S	70°16'9.86"W	3330
1	Embalse el Yeso	33°39'58.82"S	70° 5'5.51"W	2550
1	Estacion las Condes	33°22'51.17"S	70°31'50.09"W	780
2	Central Maitenes	33°31'52.77"S	70°15'39.44"W	1200
2	Cerro San Cristobal	33°25'31.98"S	70°37'59.26"W	830
2	Cerro Lo Prado	33°27'32.60"S	70°56'58.21"W	1040

Se dividen las ubicaciones por prioridad, donde prioridad 1 representa las ubicaciones cercanas (<10km) a glaciares y 2 las que se encuentran en los valles o en entradas de masas de aire.

En primer lugar se propone el **límite hacia el Este de la división Andina de Codelco y el glaciar Olivares alfa** (ver Figura 6-21 a la derecha el símbolo de electricidad más pequeño) por ser el lugar con infraestructura vial y alimentación eléctrica más cercano a los glaciares de la Macro Zona Central y una altura sobre 4,5 km donde difícilmente puedan alcanzar las emisiones atmosféricas de Santiago, al menos en períodos fríos. Aunque se desconoce el inventario de emisiones de CN de esta división de Codelco o de la mina Los Bronces de Angloamerican, se exponen en los Estudios de Impacto Ambiental correspondiente las emisiones de monóxido de carbono en los vehículos y generadores a diésel y, en el caso de Los Bronces se espera un aumento en estas emisiones por aumento en la flota vehicular y flujo de camiones. Sin embargo esto más que ser un problema para observar el transporte regional de CN hacia los glaciares, podría ser una oportunidad para estudiar el transporte valle abajo hacia la Región Metropolitana desde la industria minera y el transporte local hacia los cuerpos de hielo y nieves.

El **Cerro Colorado** se propone como buen lugar estratégico ya que se ha evidenciado la presencia de contaminantes atmosféricos antropogénicos capturados en la nieve del sector (Cereceda-Balic, et al., 2012), pero en la exploración realizada en este trabajo en La Parva (2km de distancia) no se detectó la menor concentración de CN, ni siquiera de $MP_{2,5}$, por lo que este sector se considera interesante del punto de vista de transporte de contaminantes antropogénicos regionales a una zona de actividad deportiva y turística como lo son los numerosos centros de ski. Lo anterior supone una ventaja del punto de vista logístico, ya que existen caminos desde Santiago

donde se realiza constante control y mantenimiento, generación eléctrica y refugios en casos de emergencia.

El **Embalse del Yeso** es otro lugar con presencia de electricidad e infraestructura vial, localizado en una cuenca con escasos glaciares, sin embargo, con una cercanía de al menos 3 km del cuerpo de hielo más próximo. Siendo el valle del Maipo la ruta de acceso a este sector, estudiar la presencia de contaminantes en el Embalse del Yeso podría entregar la oportunidad de estudiar el transporte hacia este valle, sobre todo por encontrarse como ruta de ventilación de emisiones desde la fundición Caletones en la VI Región (Figura 8-1).

Central Maitenes se encuentra en Maitenes, una pequeña localidad en el valle del río Colorado a 20km de San José de Maipo. Se propone como localización de estudio para estudiar un posible transporte de contaminantes que podrían eventualmente no entrar hacia el sector del embalse del Yeso, sino desviarse hacia el río Colorado y ascender por el río Olivares hacia el sistema de glaciares Olivares.

Un estudio sobre el **Cerro San Cristobal** con un punto de contraste a nivel de la ciudad de Santiago podría permitir un mejor entendimiento del transporte vertical de CN.

Un monitoreo en el **cerro Lo Prado** podría permitir el estudio del transporte desde o hacia el Litoral Central de CN por sobre la Cordillera de la Costa.

10 FASE B – CAMPAÑAS DE MONITOREOS EPISÓDICOS Y CONTINUOS

La siguiente fase corresponde a realizar campañas de monitoreo en las áreas sugeridas divididas en un monitoreo continuo de alrededor de 1 año y uno episódico que variará de acuerdo a las condiciones de la calidad del aire de la zona.

Para lo anterior se realiza en conjunto con el Centro Mario Molina, una descripción de las actividades que se deben llevar a cabo en esta segunda fase, en conjunto con una evaluación de los costos asociados a compra de instrumentos, insumos y análisis de laboratorio, sumada a costos de mano de obra, y control de calidad y aseguramiento de datos (QAQC)

10.1 Monitoreo Continuo

La meteorología debe ser monitoreada durante al menos un año para observar la variabilidad estacional de la atmósfera. Se sugiere usar los datos de las estaciones meteorológicas que ya existirían en los lugares, que en el caso de los sectores en altura que cuentan con electricidad y acceso vehicular no es difícil de encontrar. En el caso del sector minero, por ejemplo, se cuenta con una red de monitoreo meteorológico descrita en los Estudios de Impacto Ambiental. Esta información se puede encontrar en forma fácil y gratuita en el Servicio de Evaluación Ambiental.

Como el carbono negro se encuentra en la fracción ultra-fina del material particulado, es decir menor a $1\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, se sugiere usar un medidor de concentración de masa de MP ultra-fino. El instrumento llamado

Impactador de Harvard permite medir esta variable, sin embargo, se debe realizar periódicamente cambios de filtros, donde este periodo depende de las concentraciones de material particulado ultra-fino del lugar, por lo que se habitúa pagar a mano de obra local no especializada para hacer este trabajo con previa capacitación. El filtro del Impactador de Harvard debe ser enviado a laboratorios externos (Universidad de Harvard) para su análisis y para su adquisición que incluye servicio de gravimetría.

Para el carbono negro se sugiere el uso de 2 métodos de medición: el de medición de absorción óptica continua en filtros (CNe), y fotometría de partículas individuales (CNr). El laboratorio de óptica y semiconductores de la Universidad de Santiago cuenta con el SIMCA, un instrumento diseñado para medir carbono negro en base al primer método mencionado; es de bajo costo en comparación al etalómetro de Maegge scientific y los resultados son similares.

Por otro lado se sugiere medir en forma continua el Ozono, ya que éste ayudaría a estudiar el origen del transporte de las masas de aire, una parte es de origen estratosférico que baja desde capas superiores de la atmósfera, y el antropogénico que se genera por emisiones de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógenos. Además el Ozono es una variable que permite conocer el tiempo de oxidación de los aerosoles primarios. Para medir el Ozono en forma continua se sugiere el uso de un monitor ultravioleta y se debe procurar especificar sus condiciones del uso.

10.2 Monitoreo Episódico

El Objetivo es la identificación de las fuentes de impacto más significativo, por lo que se miden trazadores de fuentes. El CN ni el MP ultra-fino no sirven como trazadores porque vienen de múltiples fuentes.

Un ejemplo de contaminación episódica es la quema de pastizales es en verano, o la quema de leña para calefacción en invierno, para diferenciar el tipo de biomasa se usan trazadores: monosacáridos, esta muestra queda en filtros y

Tabla 10-1 Costos de inversiones en dólares estadounidenses de instrumentos necesarios en etapa de monitoreo continuo y episódico

	Variable a medir	Instrumento	Inversión
Monitoreo Continuo	Meteorología (presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, radiación solar, temperatura, humedad relativa)		
	Ozono	Monitor UV	\$ 15,000.00
	CNr	SP2	\$155,000.00
	CNe	SIMCA	\$ 6,000.00
	Material Particulado Ultrafino	Impactador de Harvard	\$ 8,000.00
Monitoreo Episódico	Ozono	Tubos pasivos	n/r
	NOx		
	SO2		
	SO2, NO2, NH3, Nitrato y Sulfato de Amonio y HNO3	Filterpacks	\$ 153.50
*n/r no es relevante		Total Inversión	\$184,153.00

luego se mandan a analizar. Los *Filterpack* permiten medir aerosoles secundarios (productos oxidados de las emisiones primarias, SO_x, NO_x) esto nos dice que existe un tiempo conocido entre la emisión y la recepción. Otro instrumento sugerido para usar en esta campaña es el ACCM (nitrato, amonio, sulfato, cloruro, carbono organico, son aerosoles secundarios por lo que sirve para ver la edad de l aire), y carbono negro.

En el caso de los tubos pasivos se debe realizar una malla para estudiar la homogeneidad de los contaminantes, para eso se considera un minimo de 10 tubos por cada compuesto para el control de calidad y aseguramiento de los datos (QAQC), el precio es incluido al final de los costos y por experiencia se estima en alrededor del 20% del costo del estudio, esto entrega información sobre la homogeneidad en una cierta área y luego se usa solo 1 tubo pasivo representativo de esta área si es que tiene un comportamiento espacial homogéneo. La periodicidad en general es época húmeda y época seca,

necesitando alrededor de 20+20+20 tubos por campaña, se consideran en total unos 120 tubos en el caso del año completo.

Tabla 10-2 Costos de operaciones en dólares estadounidenses para monitoreo continuo y episódico

Costos de estudio en cada zona	Instrumento	Insumos	n	Total Insumos	Análisis	n	Total Análisis	Total
Monitoreo Continuo	Monitor UV	n/a						\$ -
	SP2	n/a						\$ -
	SIMCA	\$ 1.00	96	\$ 96.00	n/a		\$ 96.00	
	Impactador de Harvard	\$ 23.32	220	\$ 5,130.40	i/i		\$ 5,130.40	
Monitoreo Episódico	Tubos pasivos	\$ 75.99	40	\$ 3,039.60	i/i		\$ 3,039.60	
		\$ 105.16	40	\$ 4,206.40			\$ 4,206.40	
		\$ 61.41	40	\$ 2,456.40			\$ 2,456.40	
	Filterpacks	i/a			\$ 155.12	40	\$ 6,204.80	\$ 6,204.80
	*i/i	incluido en costo de insumo					R.H.	\$ 19,200.00
	*i/a	incluido en costo de análisis					QAQC	\$ 8,066.72
	*n/a	no aplica					TOTAL	\$ 48,400.32

En el caso de querer estudiar el impacto directo de carbono negro desde el sector minero sobre el sector de estudio, entonces se recomienda medir junto con carbono negro, emisiones primarias de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre con tubos pasivos y nitrato, sulfato con filterpack.

Por otro lado se recomienda invertir en los instrumentos destinados a la evaluación en vez de arrendarlos, ya que serían los mismos que se usarían en la estación.

Conclusiones

y

Recomendaciones

Este estudio se basa en un análisis bibliográfico de Chile y el Mundo actual acerca del Carbono Negro, sugiriendo la necesidad de evaluar la instalación de estaciones de monitoreo con prioridad de altura y cercanía a glaciares de la Macro Zona Central.

La prioridad de este estudio se enfoca en la primera fase para la evaluación de una futura red de monitoreo, realizándose mediciones con instrumentos bien calibrados, en los valles que permiten la ventilación de la ciudad de Santiago y obteniéndose perfiles verticales. Se evidencia una importante presencia de carbono negro entrando a la cordillera de los Andes central, comparándose con niveles de concentración detectados en alturas similares en los Himalayas, donde las emisiones anuales equivalen a 50 veces a las de la Región Metropolitana.

Las mediciones mencionadas sumado a un análisis de vientos tanto de datos recientes de estaciones meteorológicas y del modelo de análisis de trayectoria HYSPLIT de escala global, realizados en base a literatura especializada permiten evidenciar un transporte superficial de masas de aire desde el Oeste y el Sur de Santiago que se dirigen hacia el valle del Mapocho y del Maipo, lo que permite determinar la zona en la cual la estación monitora de CN puede ser instalada de acuerdo a la fase propuesta. Por otro lado la modelación HYSPLIT índice que el transporte inter-hemisférico de carbono negro sólo sería posible de fuentes provenientes de Oceanía o del sudeste asiático y no del resto de Latinoamérica. Los resultados de la fase de screening permiten avanzar a la segunda etapa de monitoreo continuo y episódico dejado como propuesta y evaluado económicamente para la consolidación de una estación permanente para el

estudio de cambio climático en la macro zona central de Chile con expectativas de representatividad hemisférica.

Bibliografía

Bond, T. C. y otros, 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

Bond, T. C. y otros, 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*.

Bown, F., Rivera, A. & Acuña, C., 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, Volumen 48, pp. 43-48.

Cereceda-Balic, F. y otros, 2012. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric Environment*, Volumen 47, pp. 51-57.

CONAMA, 1999. *Antecedentes para la declaración de zona saturada de la Región Metropolitana*, Santiago: s.n.

Corripio, J., Purves, R. & Rivera, A., 2007. Modeling climate-change impacts on mountain glaciers and water resources in the Central Dry Andes. *B. Orlove, E. Wiegandt and B. Luckman (eds), Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*, University of California Press, Berkeley, p. 126–135.

DGF, 2006. *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*, Santiago: CONAMA.

Dickerson, R. R. y otros, 2002. Analysis of black carbon and carbon monoxide observed over the Indian Ocean: Implications for emissions and photochemistry. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 107(doi:10.1029/2001JD000501).

Dumont, M. y otros, 2012. Linking glacier annual mass balance and glacier albedo from MODIS data. *Geophysical Research Abstracts*, Volumen 14.

- EPA, 2011. <http://www.epa.gov>. [En línea]
Available at: <http://www.epa.gov/ordntrnt/ORD/priorities/docs/black-carbon-fact-sheet.pdf>
- Flanner, M., 2013. *Applied Physics Colloquium*. Michigan, University of Michigan.
- Flanner, M., 2013. *Arctic Climate Impacts from Black Carbon*. Ann Arbor, s.n.
- García, P. C., 2010. *Memoria de Título: CUANTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA Y SU EFECTO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO..* Santiago: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Agronómicas.
- IGSD, 2013. <http://www.unep.org/ccac/Publications.aspx>. [En línea]
Available at: <http://igsd.org/documents/PrimeronShort-LivedClimatePollutantsFeb192013.pdf>
- IMO, 2013. *Inclusion of a black carbon regulation as part of the mandatory Code for ships operating in polar waters*, s.l.: International Maritime Organization.
- INE, 2011. *Informe Económico Regional*, Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.
- INE, 2011. *Parque de Vehículos*, Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.
- INE, 2012. *Censo 2012*. [En línea]
Available at: <http://www.censo.cl/>
- Jeffrey , G. S. & Marley, N. A., 2006. *A BRIEF HISTORY OF AEROSOL CARBON ANALYTICAL METHODS*, Atlanta: Conference on Atmospheric Chemistry.
- Kavouras, I. G., Koutrakis, P., Cereceda-Balic, F. & Oyola, P., 2001. Source Apportionment of PM10 and PM2.5 in Five Chilean Cities Using Factor Analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(1047-3289), pp. 451-464.
- Kedzierski, A., 2013. *Marine Vessels: Multi-NGO, Multi-Pollutant Campaign*. s.l., s.n.

McMeeking, G. R. y otros, 2010. Black Carbon measurements in the boundary layer over western and northern Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*.

MMA, 2010. *Cuenta Pública 2010 - Ministerio del Medio Ambiente*, Santiago: Gobierno de Chile.

Morales, R. G., 2006. *Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*. 1ª ed. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

Nair, V. S. y otros, 2013. Black carbon aerosols over the Himalayas: direct and surface albedo forcing. *International Institute in Stockholm*.

RHMA, 2010. *Análisis de vulnerabilidad de recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático para las cuencas de Cautín, Aconcagua, Teno e Illapel*, Santiago: CONAMA.

Rivera, A., 2010. *Inventario de Glaciares, glaciologia.cl*. [En línea] Available at: <http://www.glaciologia.cl/inventario-2007.html> [Último acceso: 16 April 2013].

SEIA, 2013. *SEIA*. [En línea] Available at: http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=7674601

[Último acceso: 20 05 2013].

Wang, Q. Y. y otros, 2012. Single particle characterization of black carbon aerosol in the Northeast Tibetan Plateau, China. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*.

Warren, S. G. & Warren, W. J., 1980. A model for the spectral albedo of snow. II: snow containing atmospheric aerosols. *Journal of the atmospheric sciences*, 37(12), pp. 2734-2745.

WMO Global Atmospheric Watch, 2007. *Strategic Plan: 2008-2015*, s.l.: WMO/GAW.

Anexo

11 CALIBRACIÓN ETALÓMETRO.

Para la calibración del micro-etalómetro se mide en sincronía con el equipo SIMCA (calibrado previamente con un equipo de principio termo-óptico, SUNSET) de la Universidad de Santiago durante 3 días. Se detecta que el

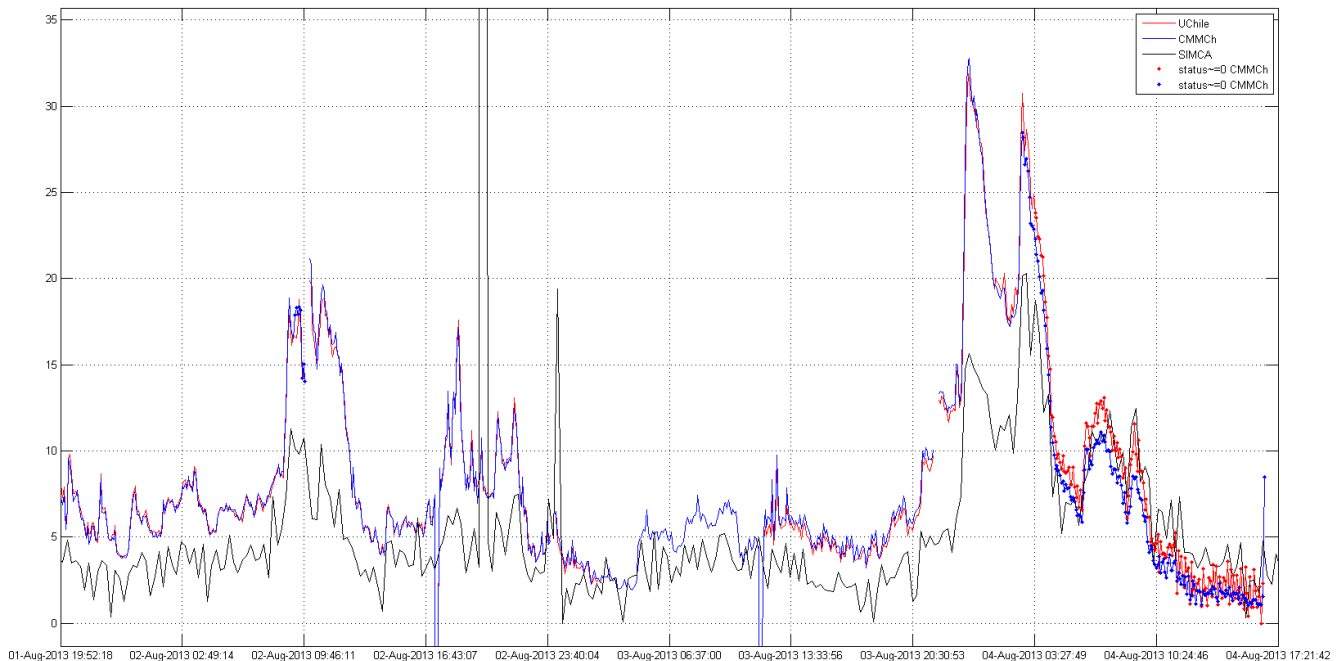


Figura 10-1 Calibración de micro-etalómetro (línea azul y roja) con el instrumento SIMCA de la Universidad de Santiago como referencia (línea negra).

micro-etalómetro se encontraba midiendo con un factor de sobre-estimación de alrededor de 2x (FIGURA), por lo que al encontrar este factor de ajuste se recalibran las mediciones anteriores.

12 OTROS RESULTADOS DE SCREENING

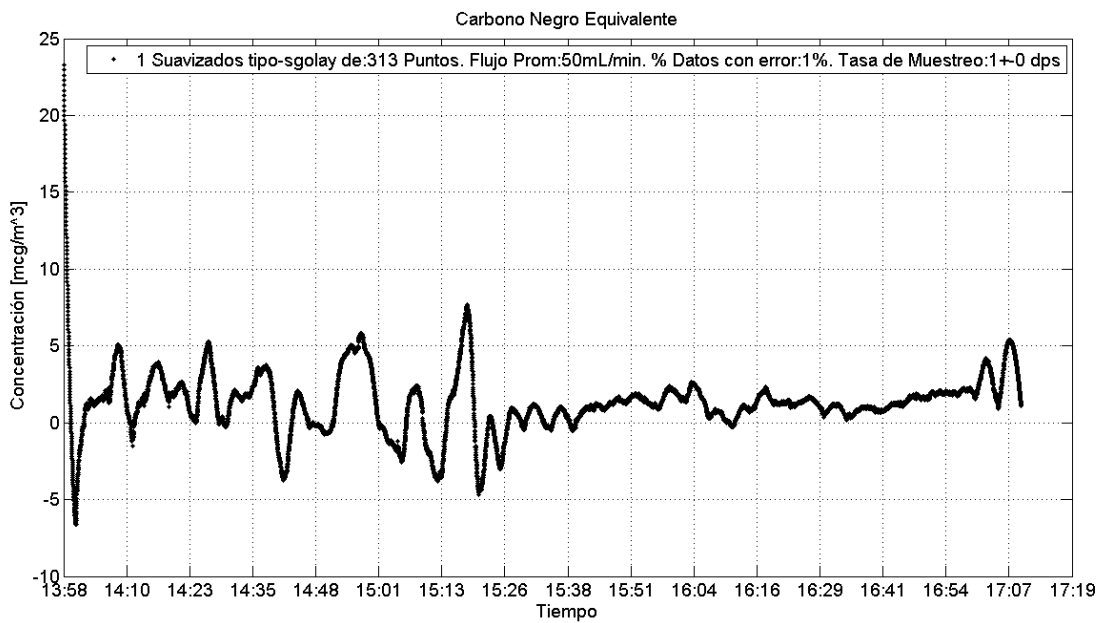


Figura 10-3 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, San Cristobal 11/05/13

1. San Cristobal (11/05/2013)

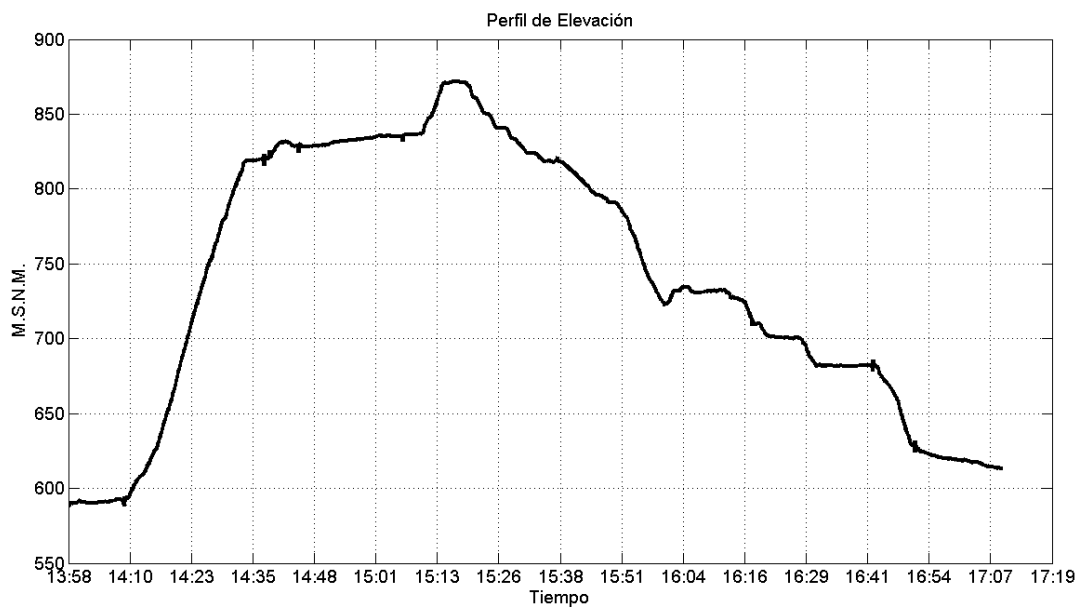


Figura 10-2 Perfil de elevación, San Cristobal 11/05/13

Concentraciones georeferenciadas de CN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

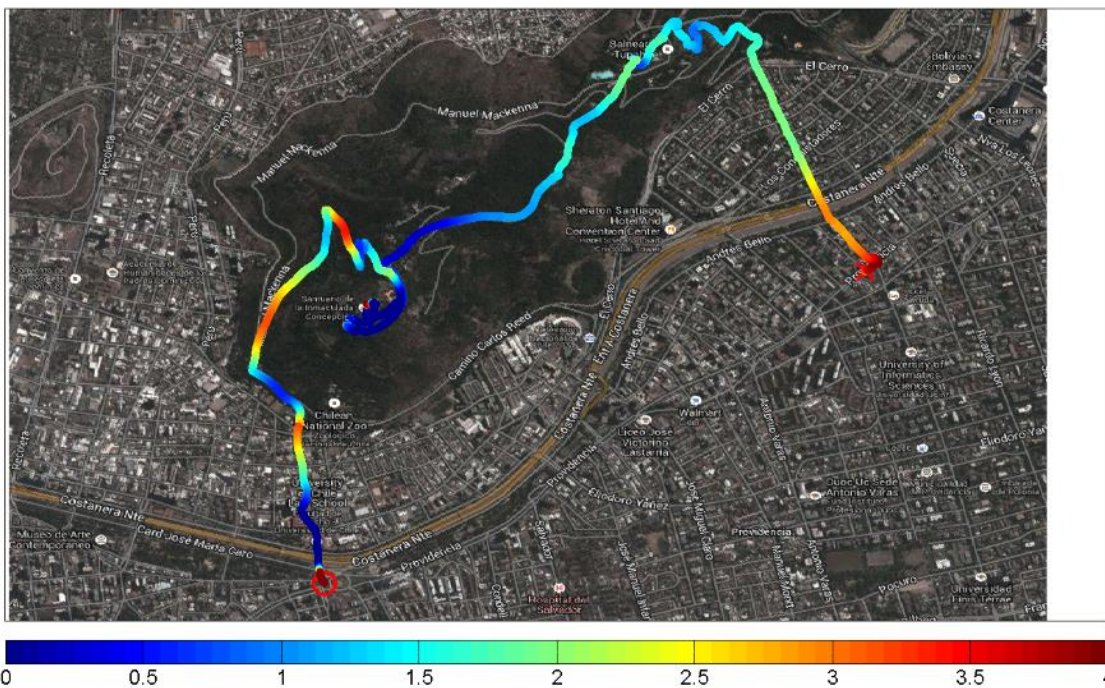


Figura 10-4 Puntos georeferenciados de concentración de carbono negro, *San Cristobal 11/05/13*

Cerro Provincia - Ruta A: Cerro Alto del Naranjo (26/05/2013).

Como se observa en la Figura 10-5, se comienza el ascenso por puente Ñilhue desde camino a Farellones a las 10:17am sobre los 950msnm, llegando a la cumbre del cerro Alto del Naranjo alrededor de las 12pm. A las 1pm se inicia el descenso por la bajada hacia el estadio San Carlos de Apoquindo terminando las mediciones en los 700msnm alrededor de las 3pm. En este caso el Etalómetro se configuró con una tasa de adquisición de 1 dato por minuto y flujo

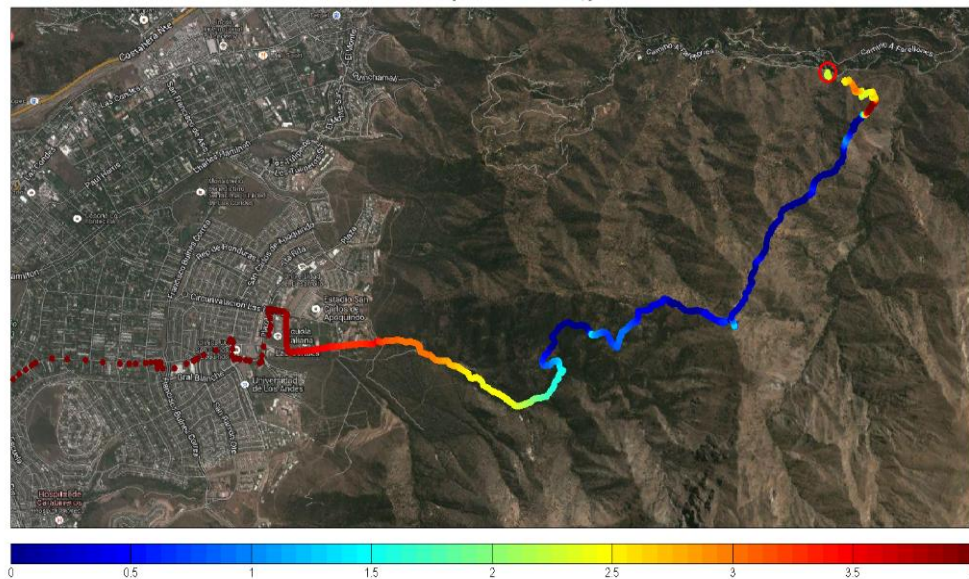


Figura 10-5 Sondeo ruta A. La banda de colores representa la concentración de Carbono Negro equivalente en la posición correspondiente. 26/05/13

de aire entrante de 50 mL/min, esto no fue ventajoso del punto de vista de la relación señal/ruido, aunque este tema se verá más adelante.

En la Figura 10-6 se muestra un perfil de concentraciones vertical para observar si existe algún gradiente relevante. En este caso se observa una fuerte transición entre los 800 y 1000 msnm, y sobre esta una constante disminución hasta llegar a valores que oscilan entre 0 y $1 \mu\text{m}^3$ de CNe.

Se observan variaciones repentinas tipo pulso de concentraciones de CNe al llegar a los 1300 metros, lo que se repite en otras 2 ocasiones. Esto se corrige al aumentar el flujo entrante de aire, aumentar el tiempo base de adquisición de datos a 1 dato por segundo y evitar sacudidas bruscas del instrumento. Es importante resaltar que el comportamiento se detectó en otra ocasión, cuando

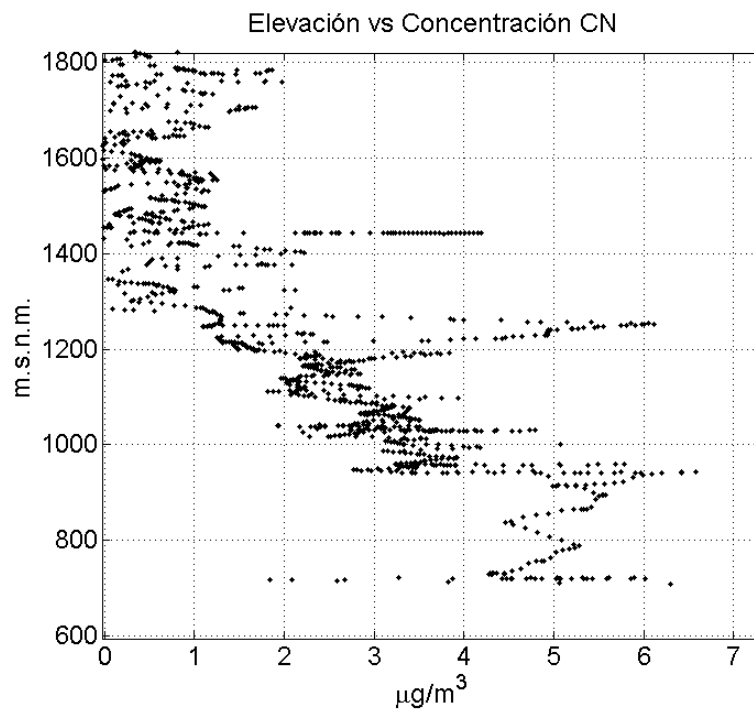


Figura 10-6 Perfil vertical de las concentraciones de Carbono Negro equivalente en la ruta A. 26/05/13

se acercó la entrada de aire del instrumento a una estufa a kerosene. Cuando se procede a retirar el instrumento de las cercanías de la fuente, y retirarse a un ambiente con concentraciones menores previamente conocidas, en vez de estabilizarse y medir las concentraciones de un ambiente más limpio en el que se encontraba el sujeto, y con una configuración de máximo flujo y máxima tasa de adquisición de datos se pudo observar el pulso cuando se detectaron concentraciones negativas. Esto se puede deber a un ajuste de escala automático del instrumento y no a falta de sensibilidad o alza repentina en las concentraciones de CN.

1. PROVINCIA (02/06/2013)

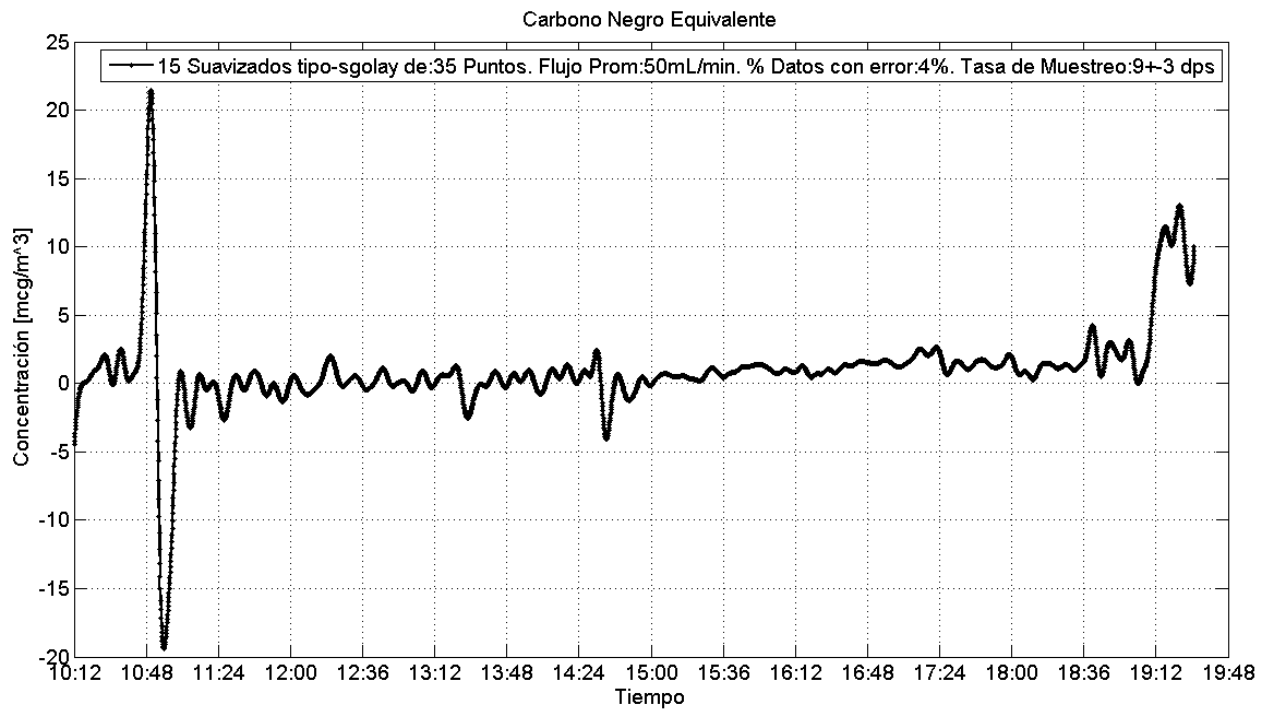


Figura 10-8 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, 02/06/13

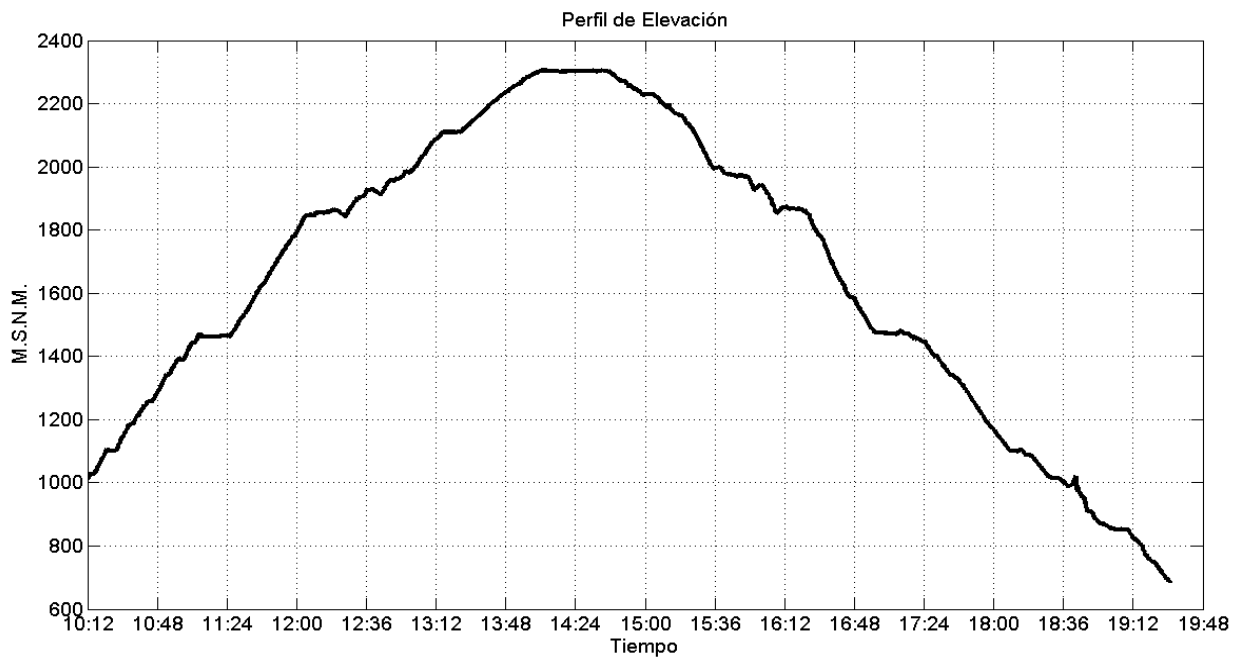


Figura 10-7 Perfil de elevación, 02/06/13

Concentraciones georeferenciadas de CN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

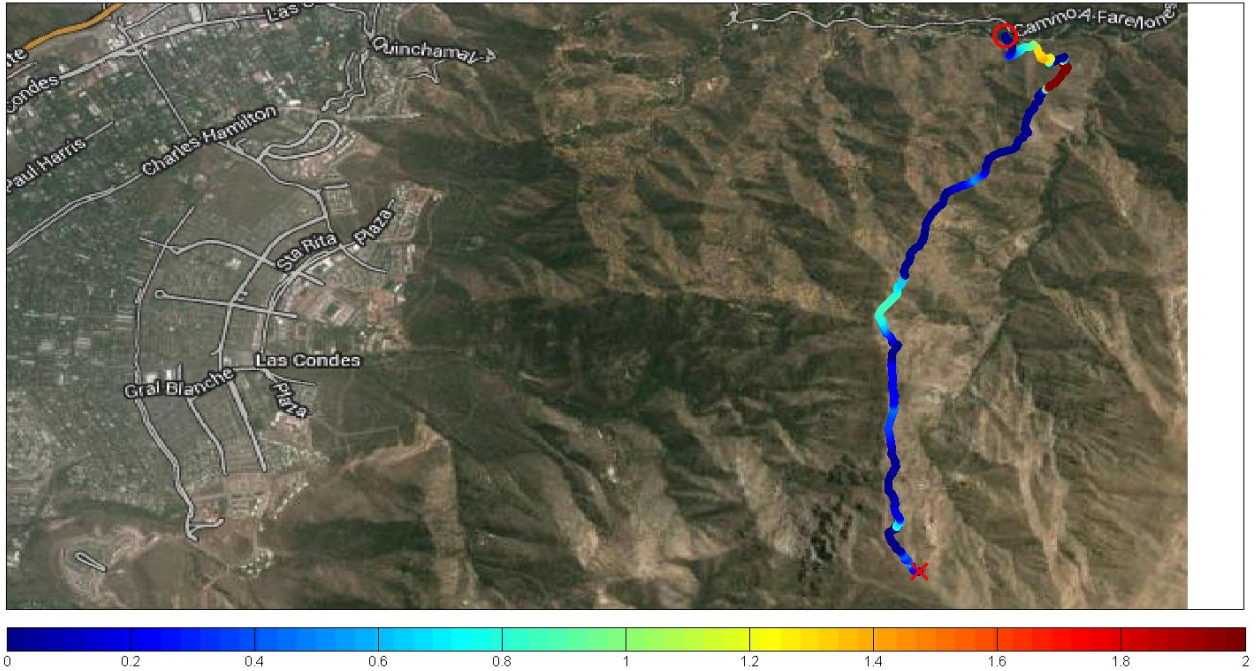


Figura 10-10 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta de ascenso, 02/06/13

Concentraciones georeferenciadas de CN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

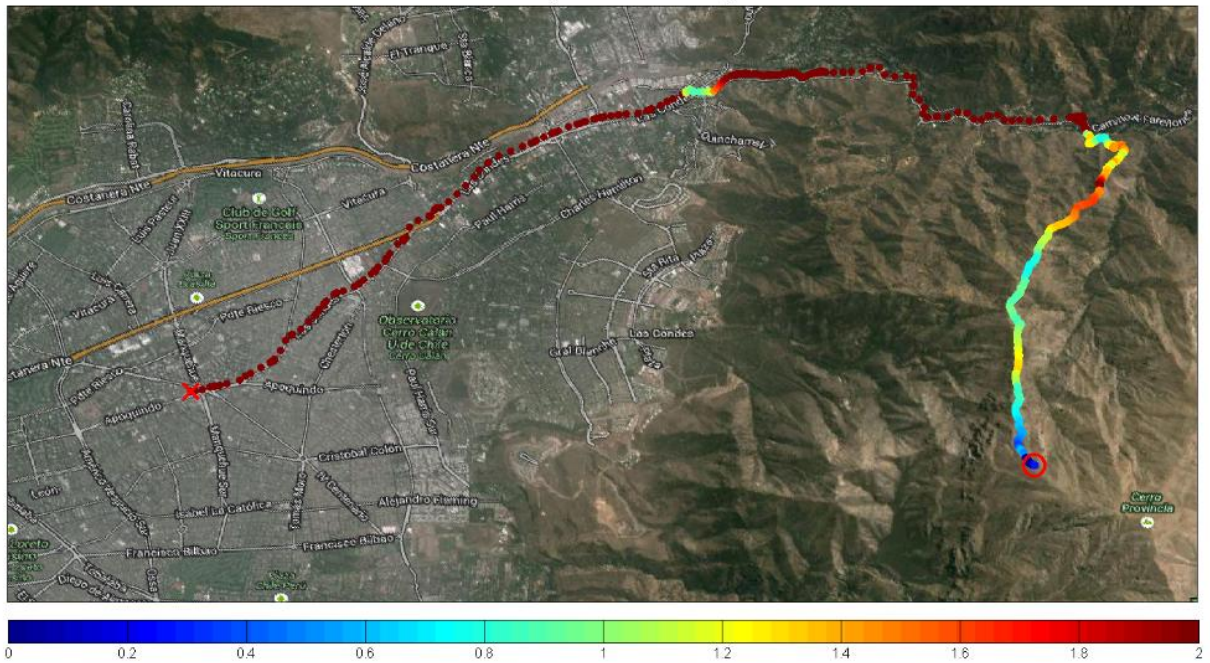


Figura 10-9 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta descenso, 02/06/13

2. PROVINCIA (08/06/2013)

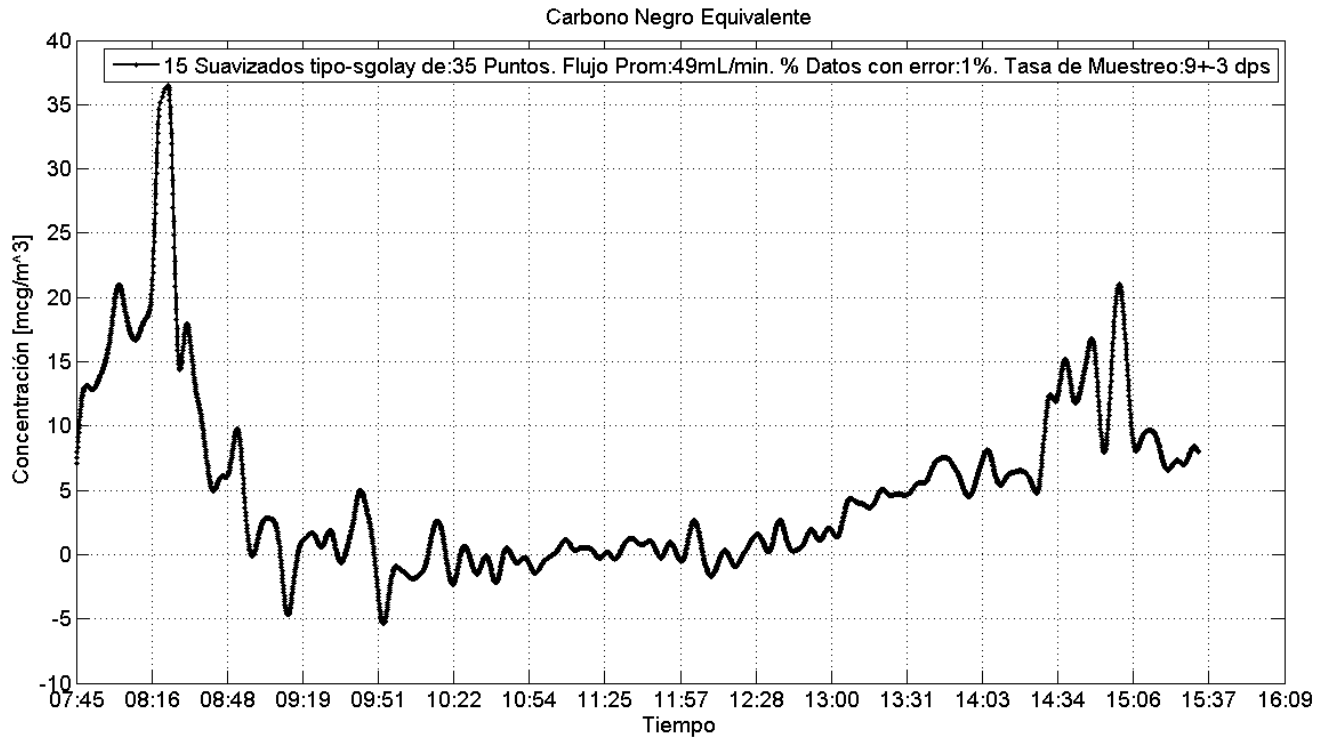


Figura 10-11 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, 08/06/13

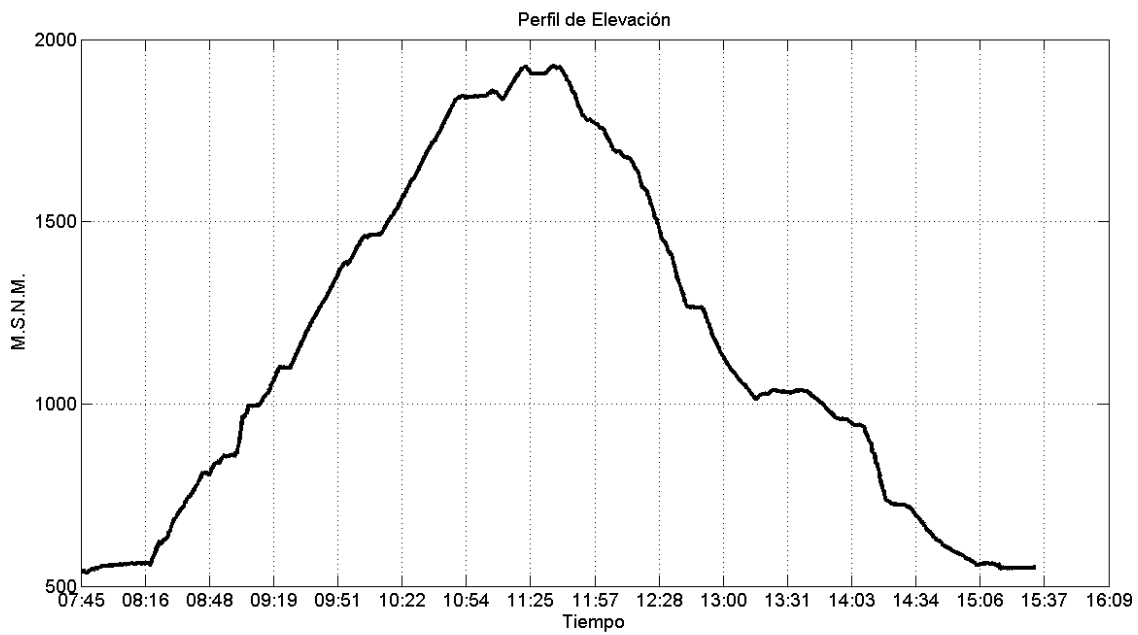


Figura 10-12 Perfil de elevación, 08/06/13

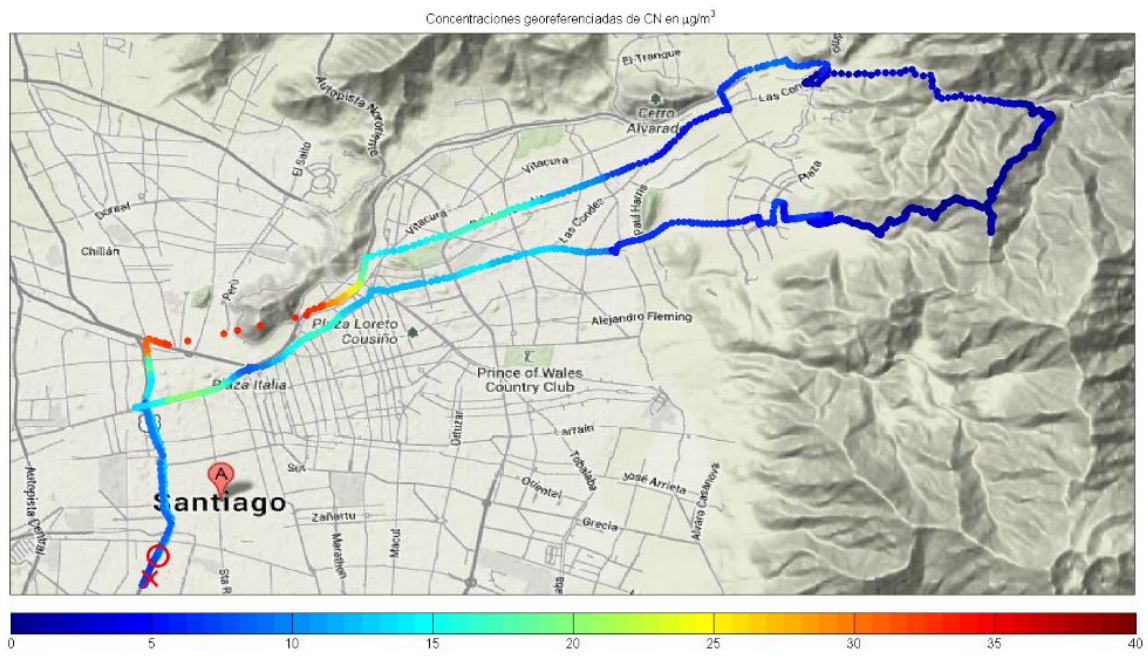


Figura 10-14 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ruta total, 08/06/13

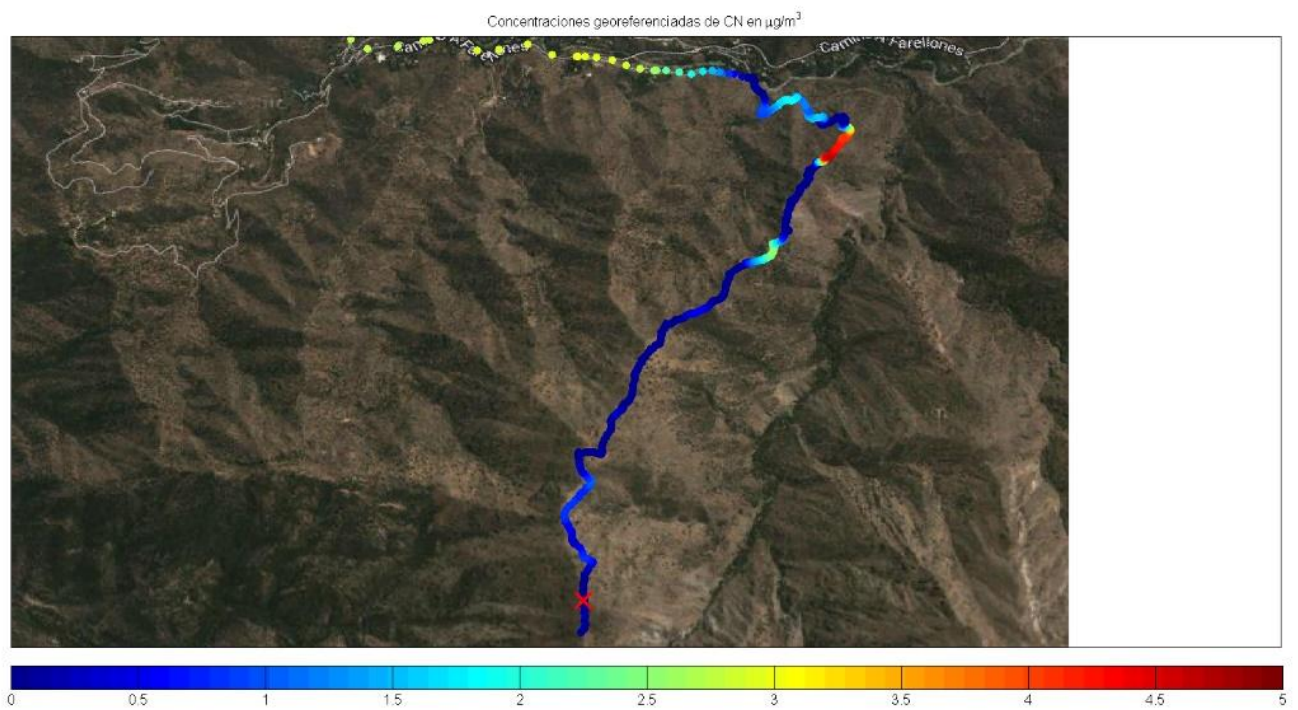


Figura 10-13 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, zoom en cerro, ascenso, 08/06/13

Concentraciones georeferenciadas de CN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

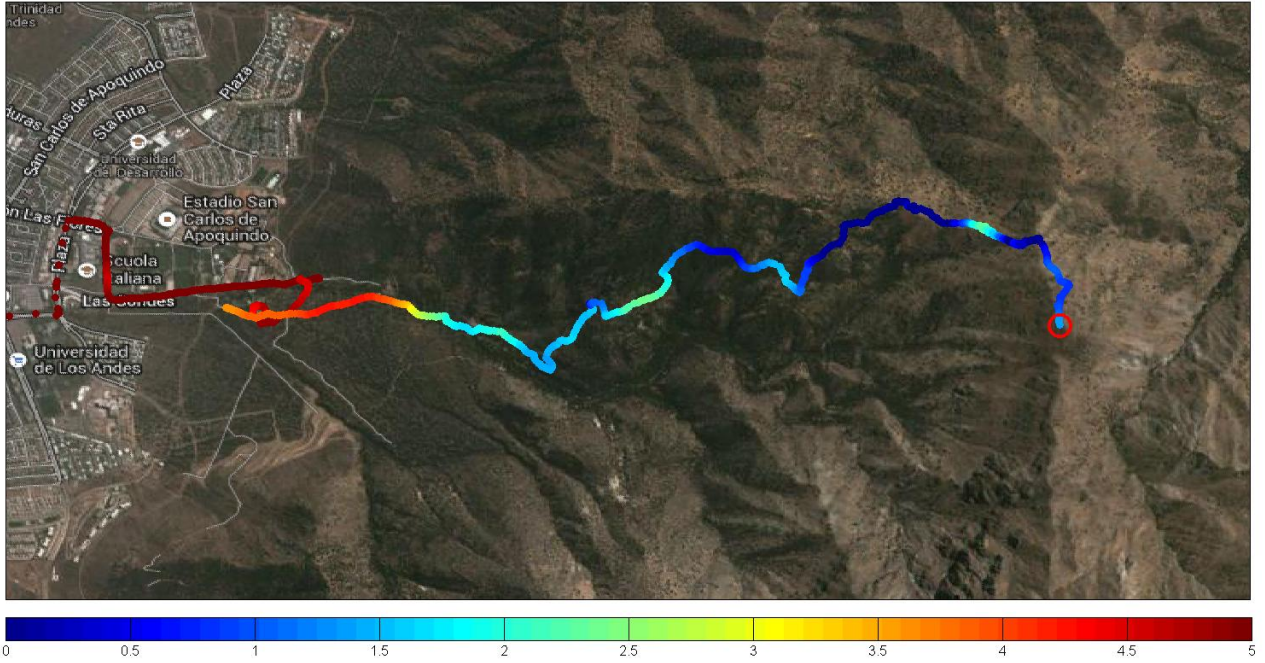


Figura 10-15 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, zoom en cerro, descenso, 08/06/13

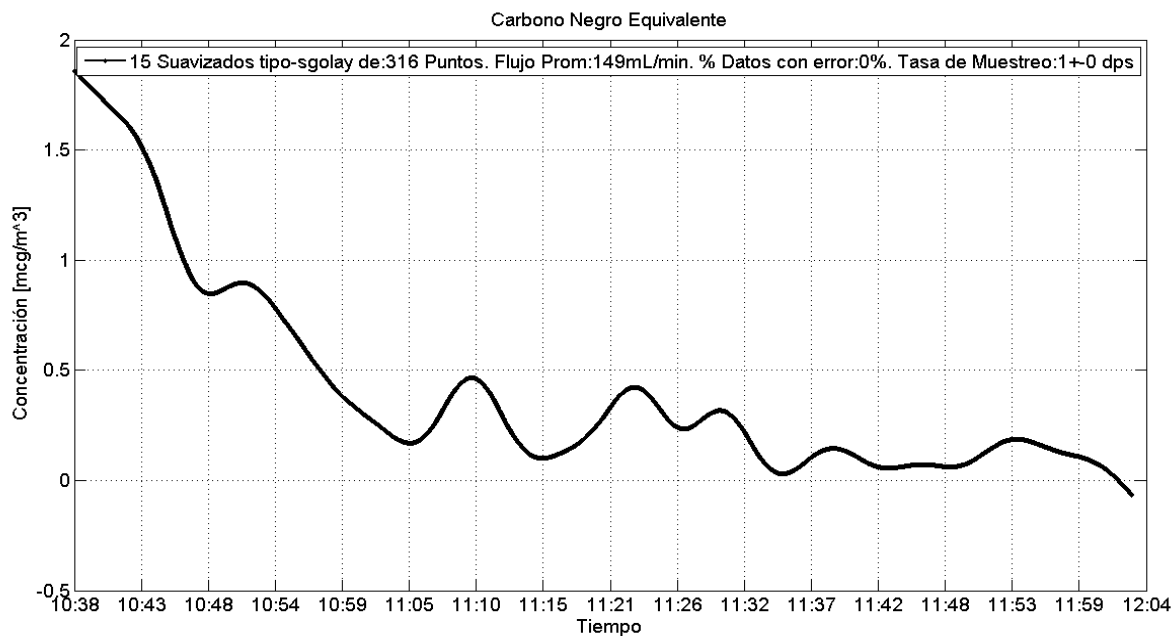


Figura 10-17 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 10/07/13

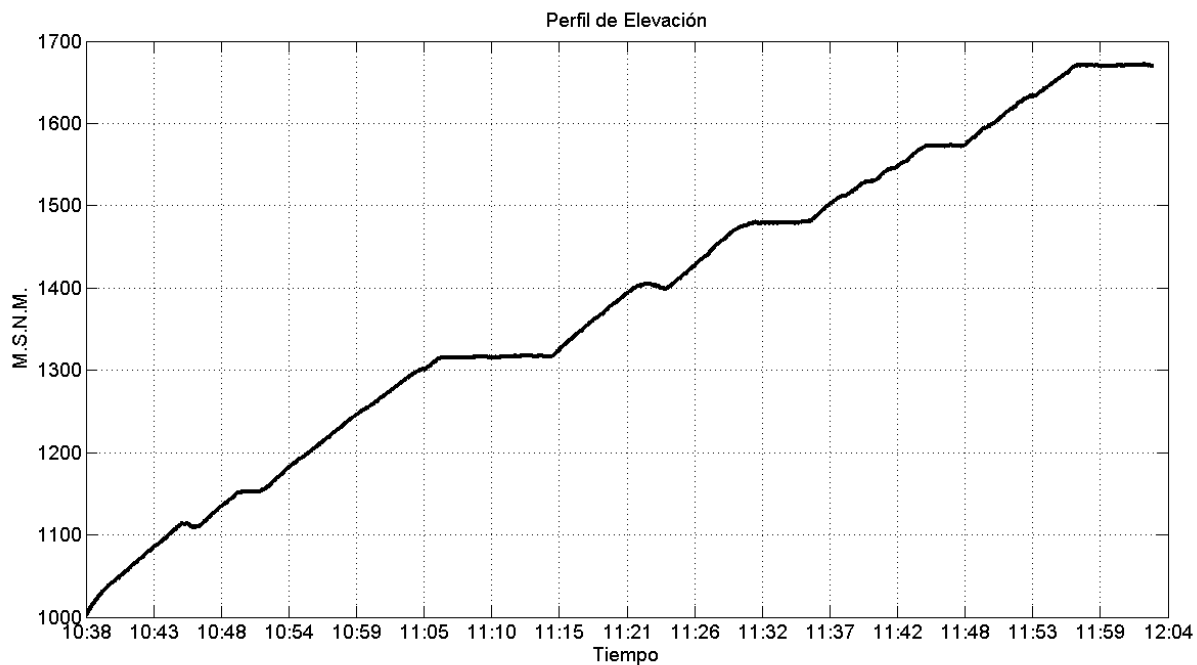


Figura 10-16 Perfil de elevación, ascenso, 10/07/13

3. PROVINCIA (10/07/2013)

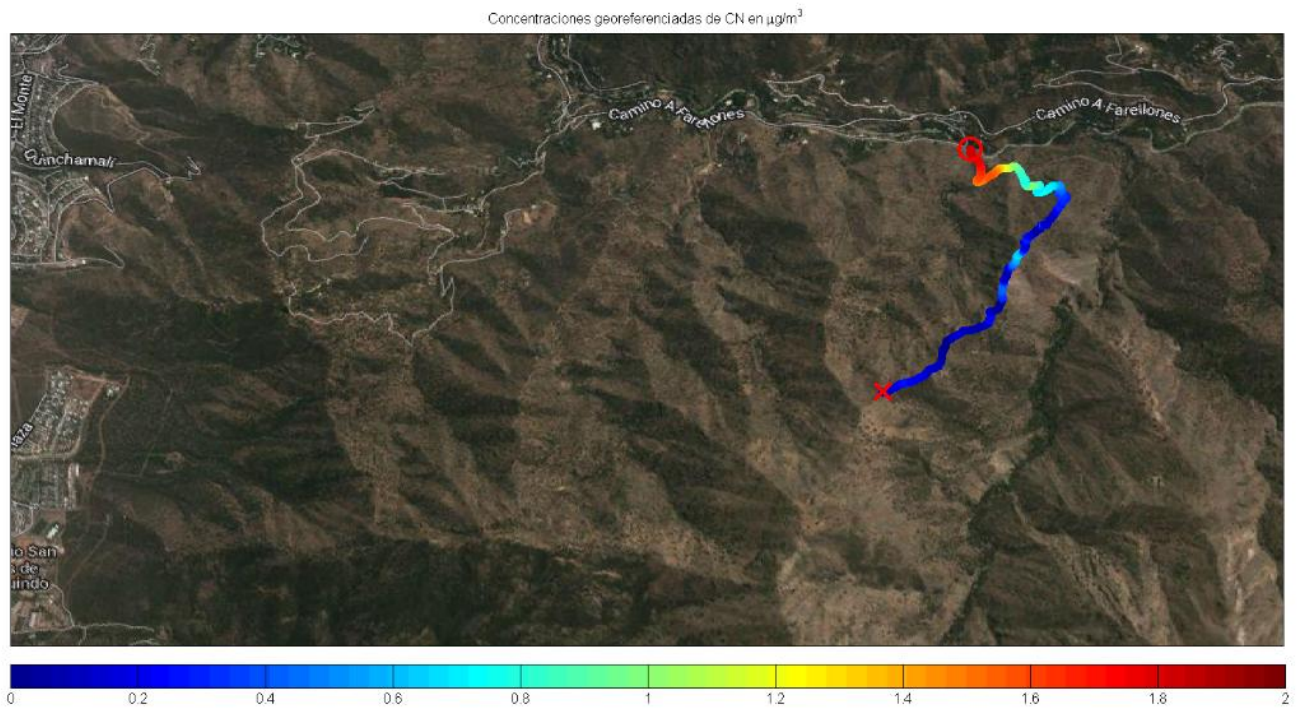


Figura 10-18 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ascenso, 10/07/13

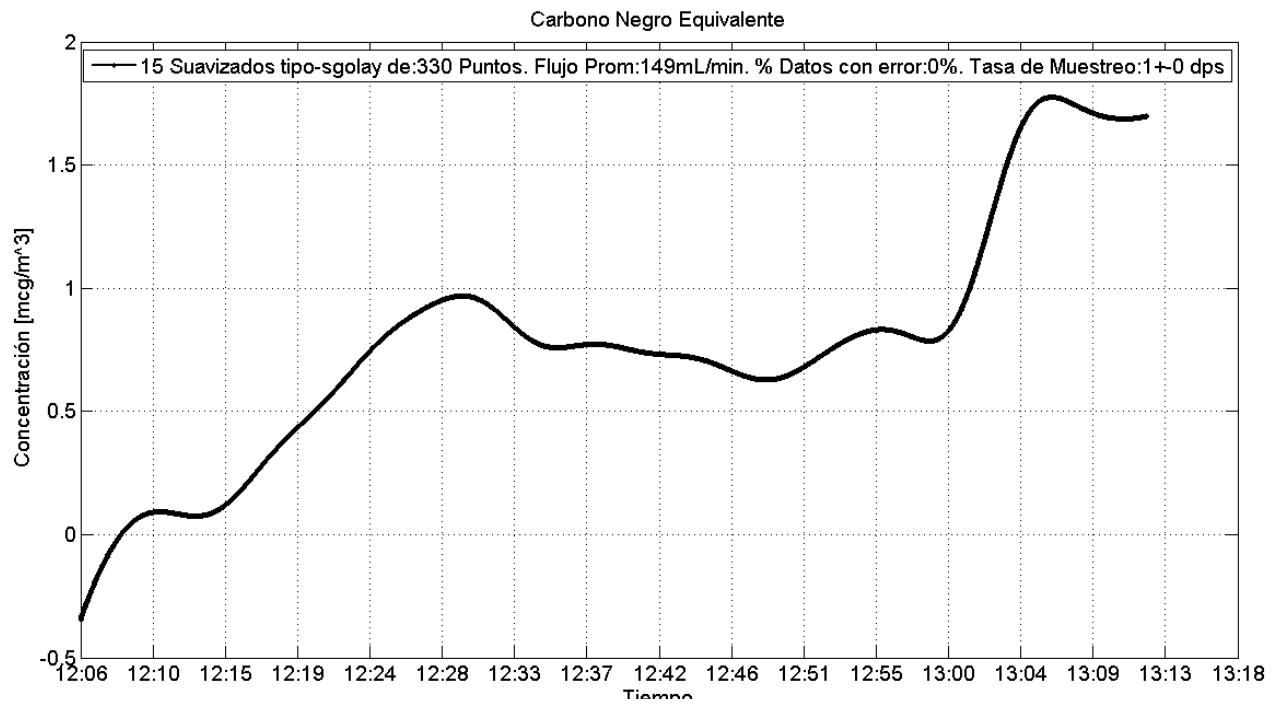


Figura 10-19 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ruta descenso, 10/07/13

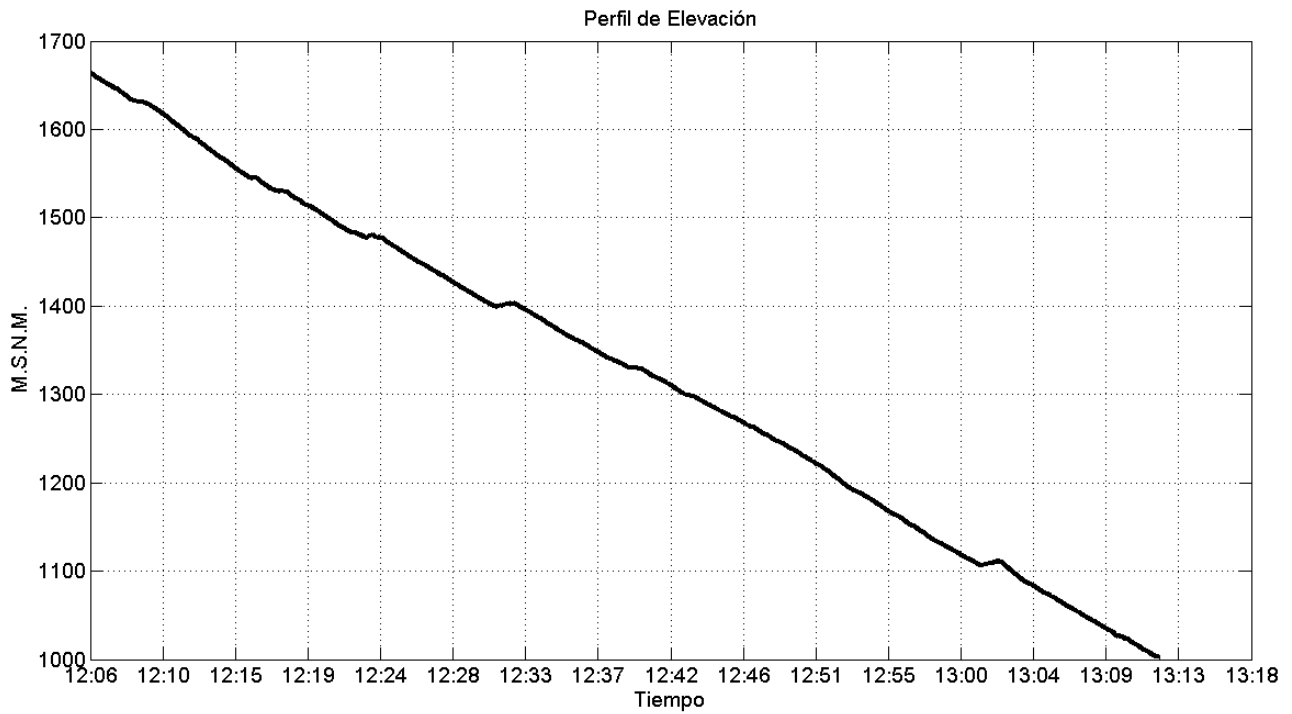


Figura 10-21 perfil de elevación, descenso, , 10/07/13

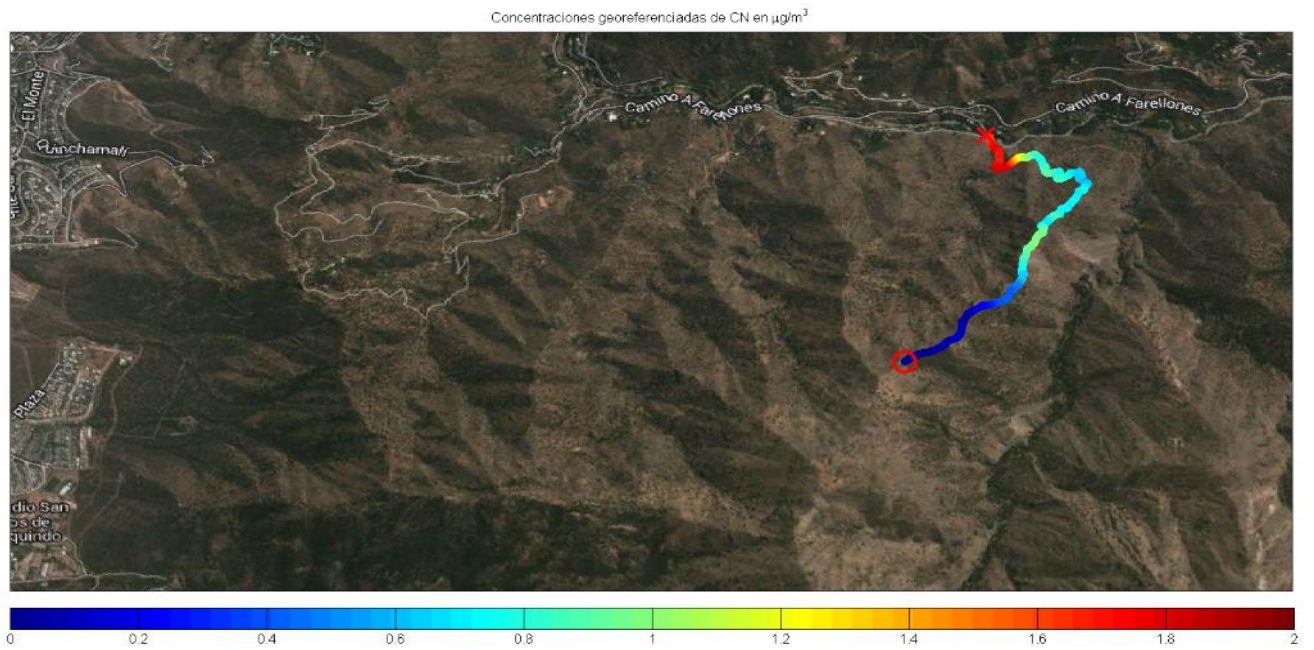


Figura 10-20 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, descenso, 10/07/13

4. POCHOCO 11/07/13

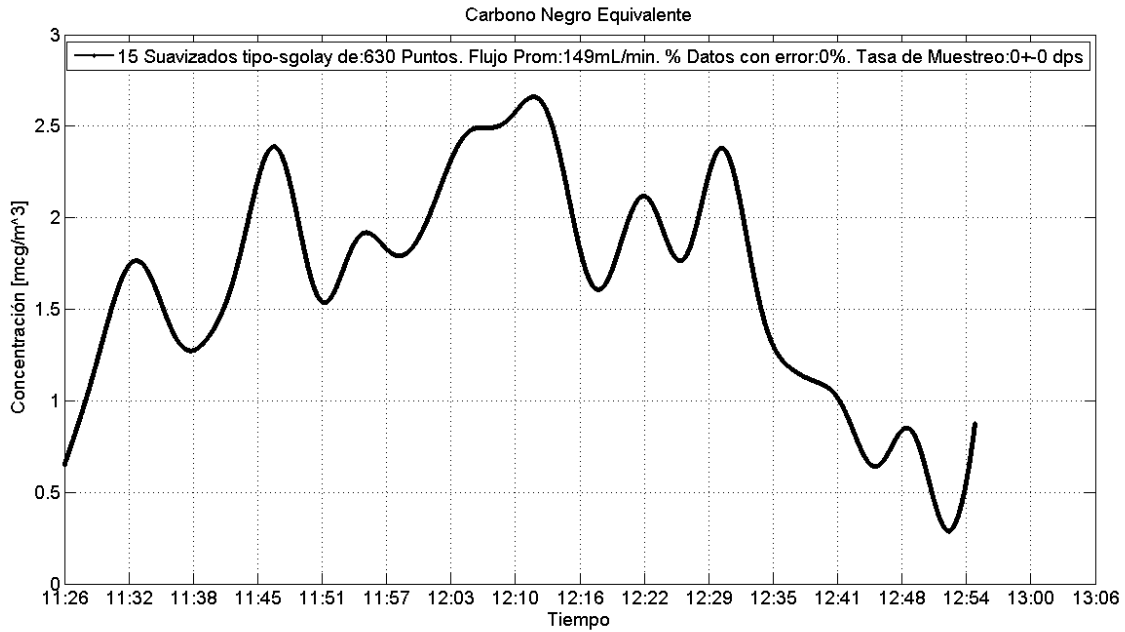


Figura 10-23 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 11/07/13

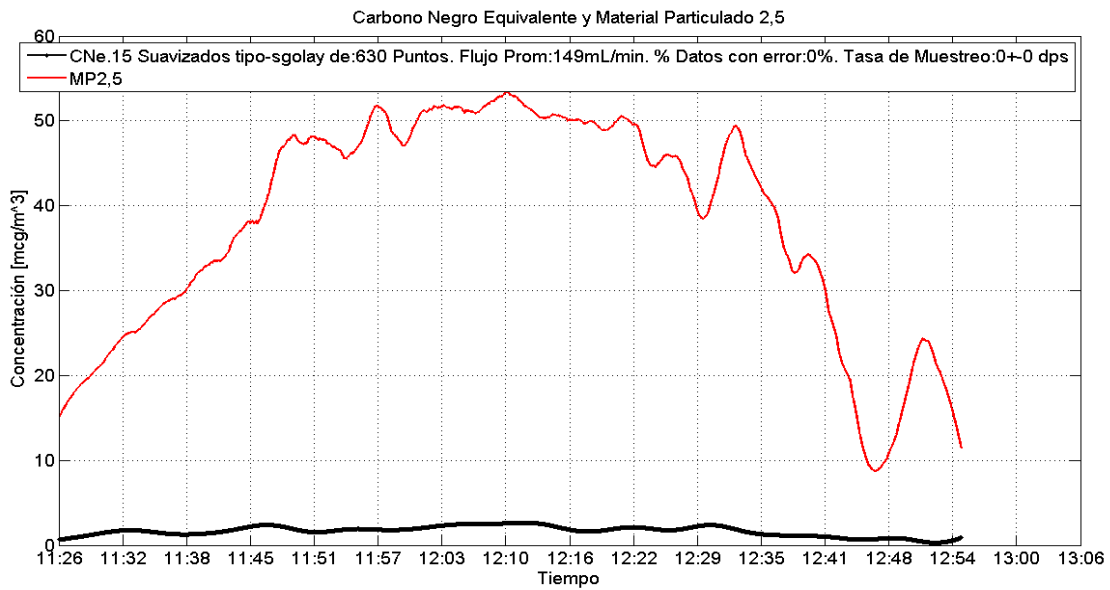


Figura 10-22 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, ascenso, 11/07/13

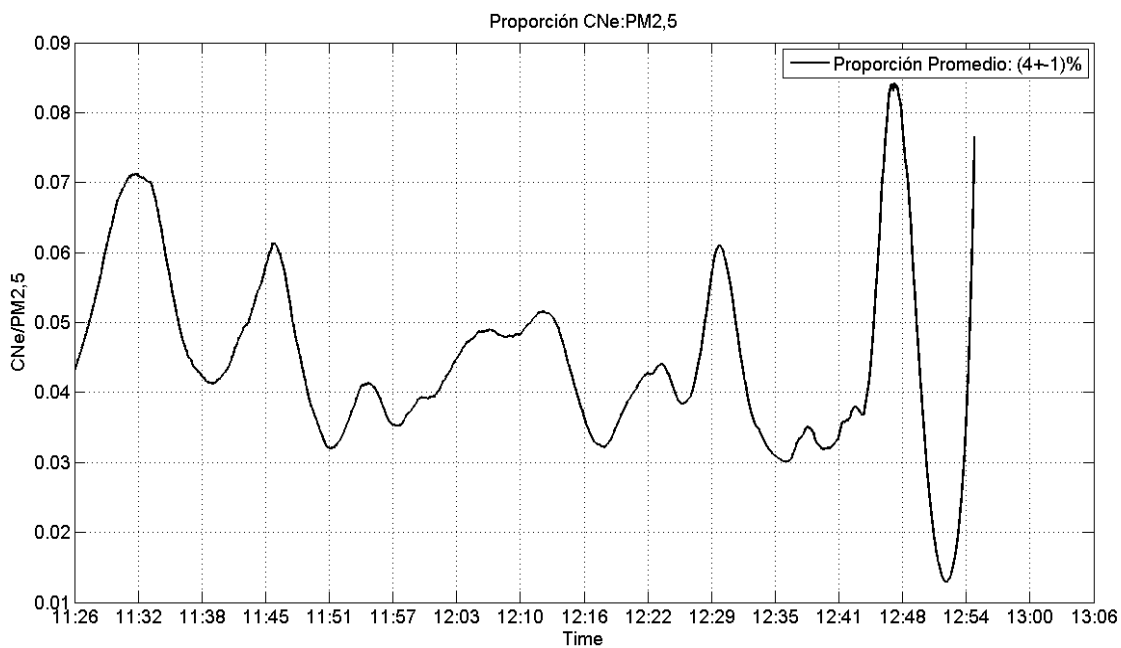


Figura 10-24 Proporción de carbono negro equivalente con mp2,5, ruta ascenso, 11/07/13

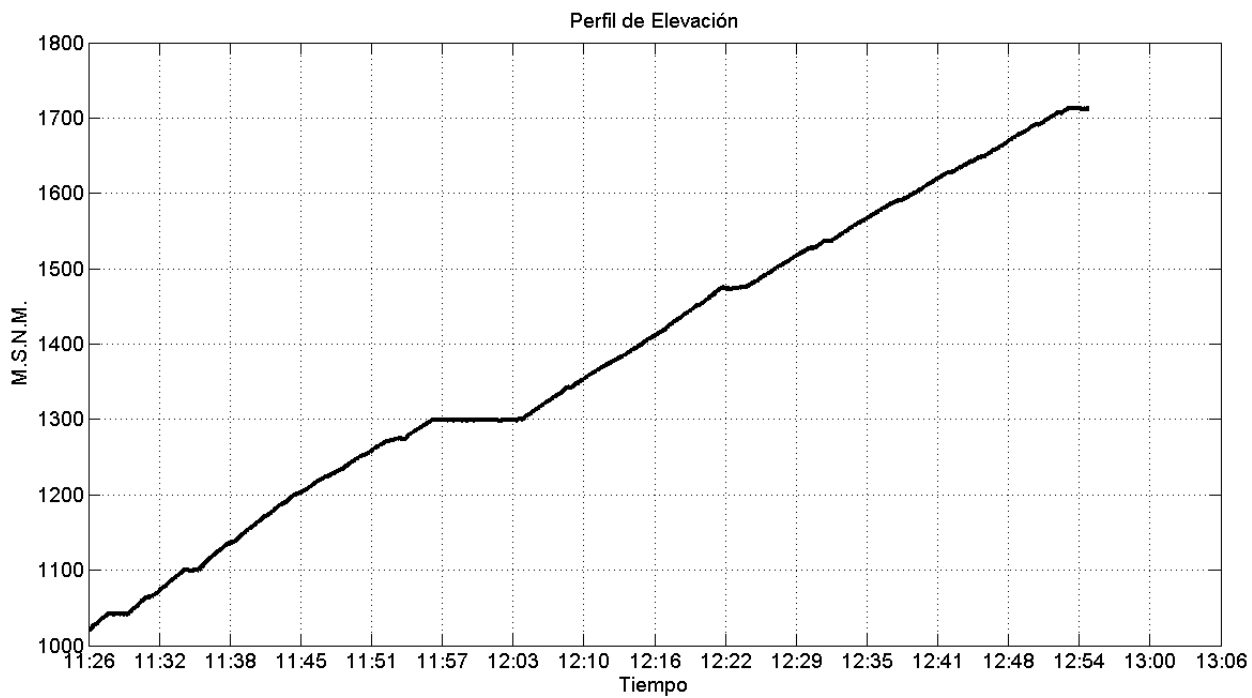


Figura 10-25 Perfil de elevación, ascenso, 11/07/13

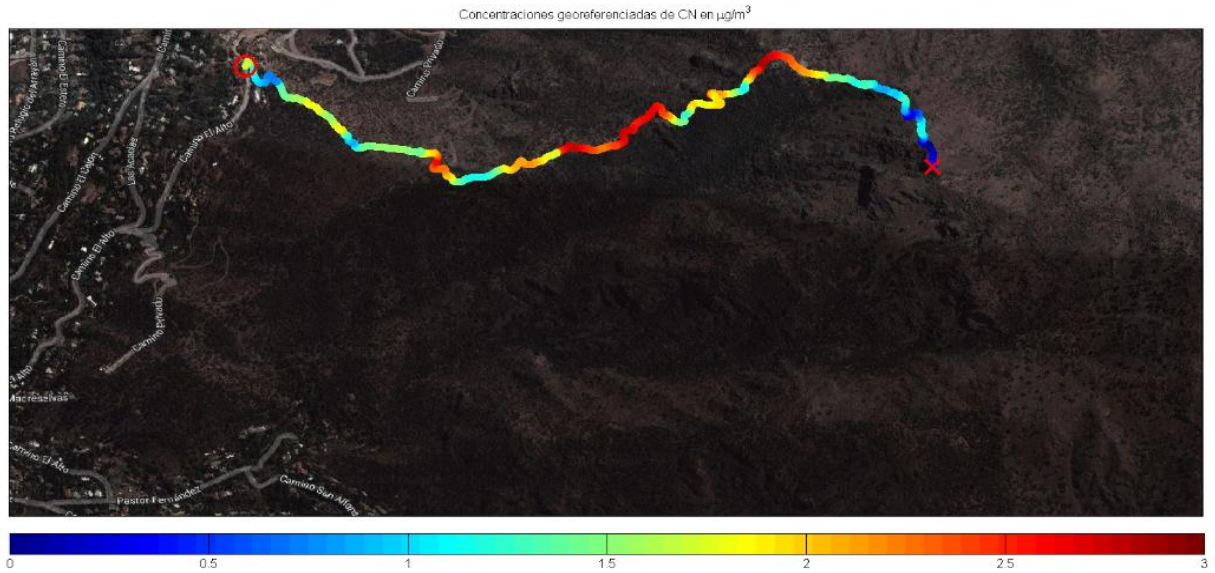


Figura 10-26 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, ascenso, 11/07/13

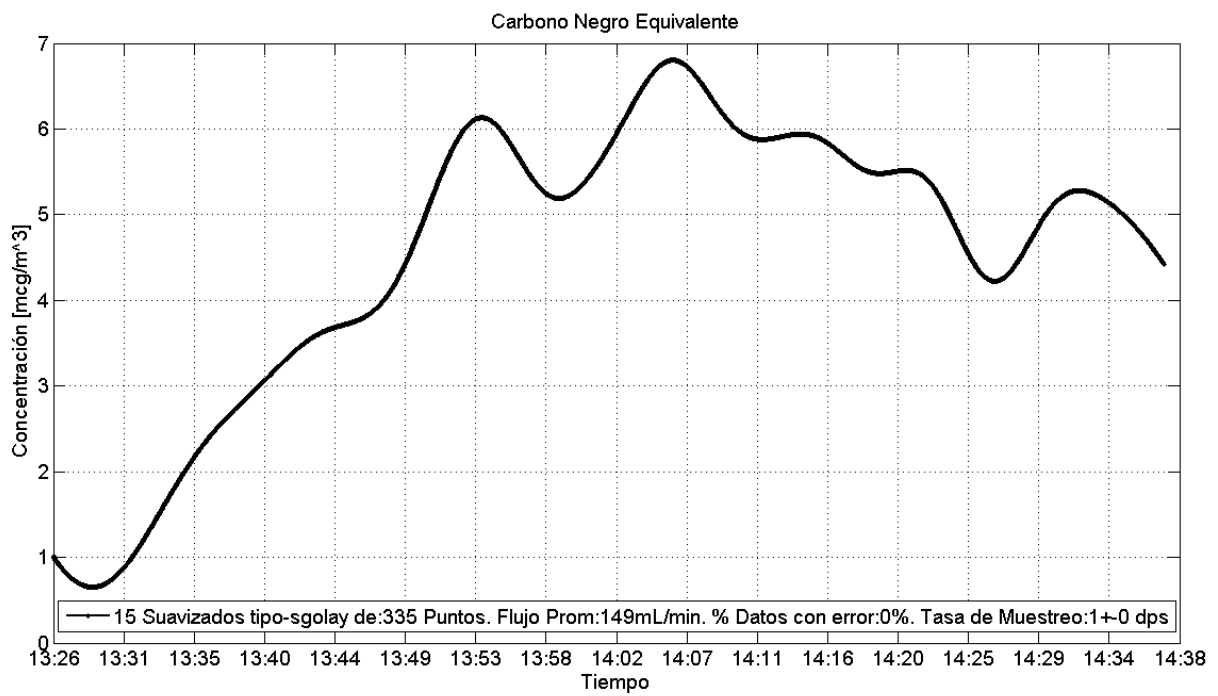


Figura 10-27 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ruta descenso, 11/07/13

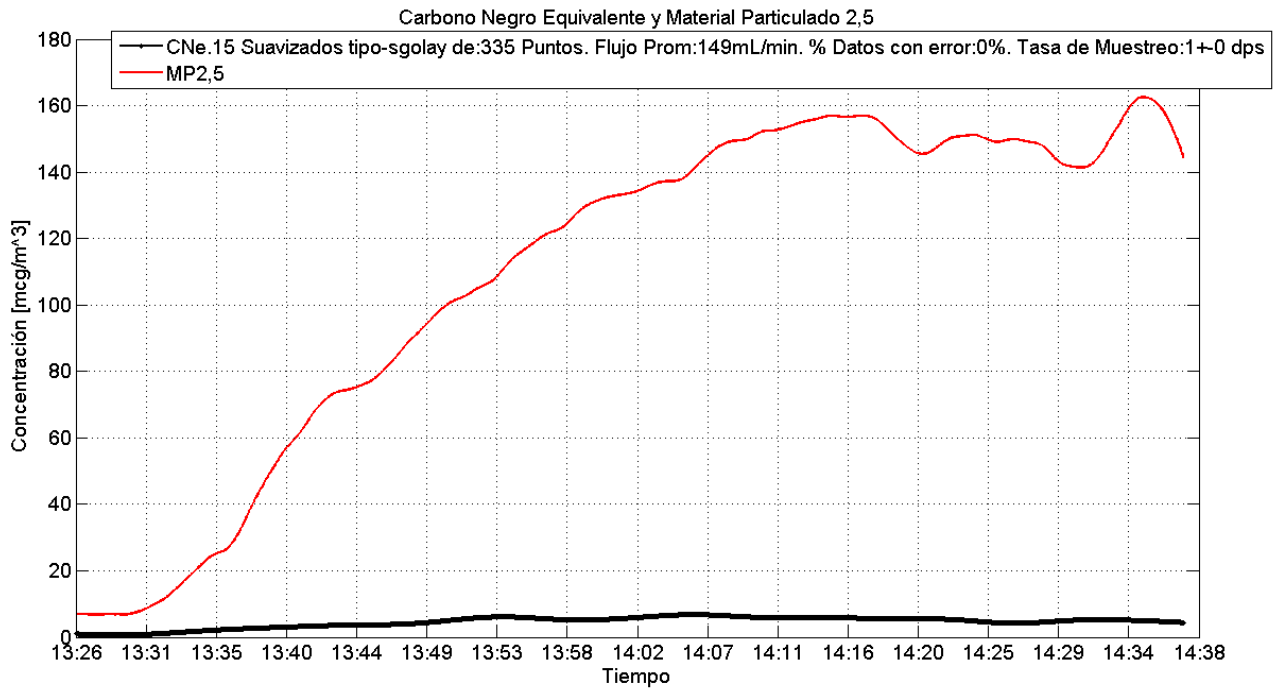


Figura 10-29 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, descenso, 11/07/13

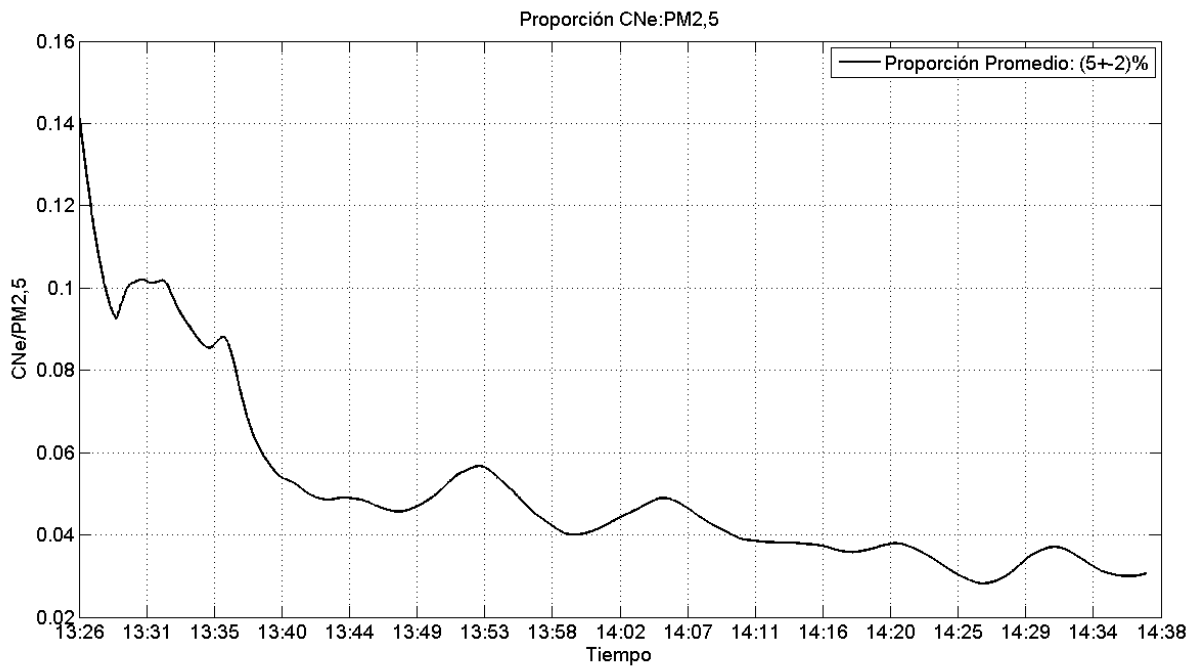


Figura 10-28 Proporción de carbono negro equivalente con mp2,5, ruta ascenso, 11/07/13

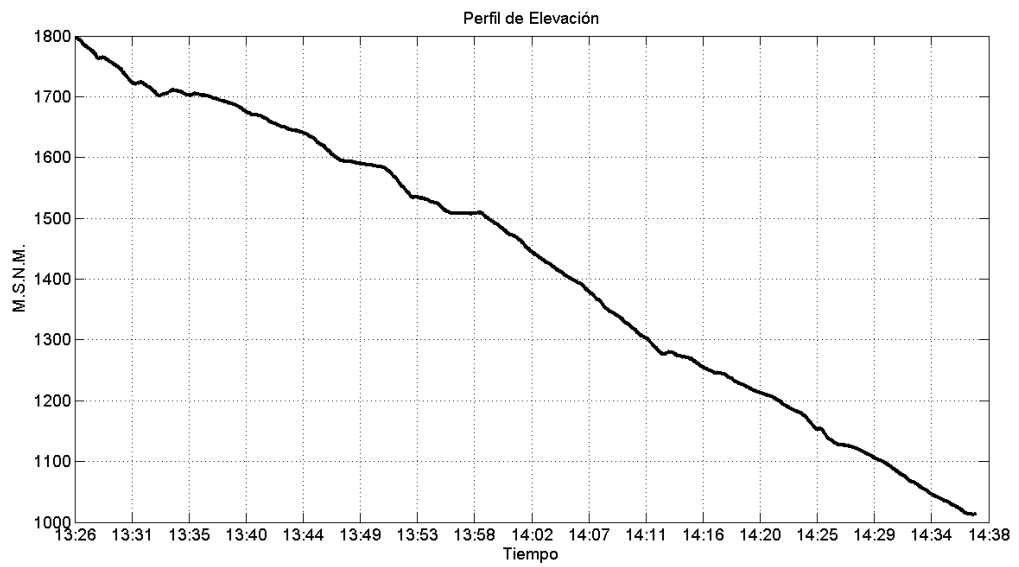


Figura 10-31 Perfil de elevación, descenso, 11/07/13

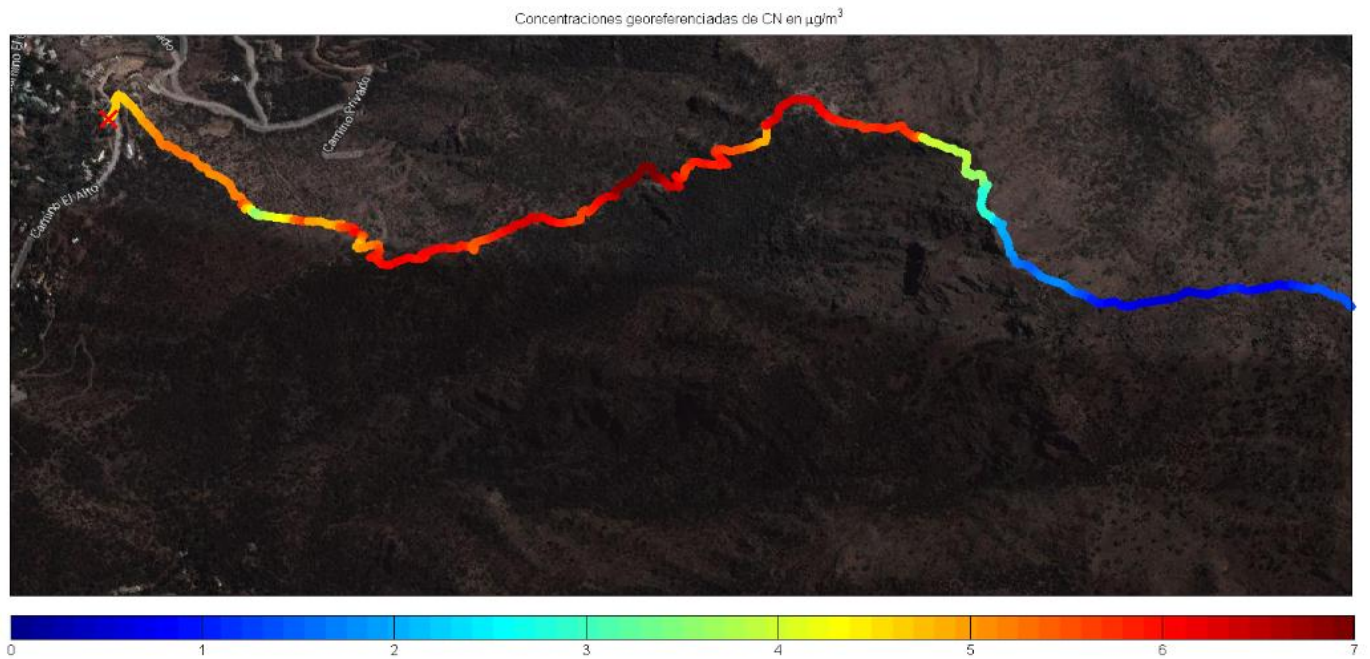


Figura 10-30 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, descenso, 11/07/13

5. LA PARVA 28/07/13

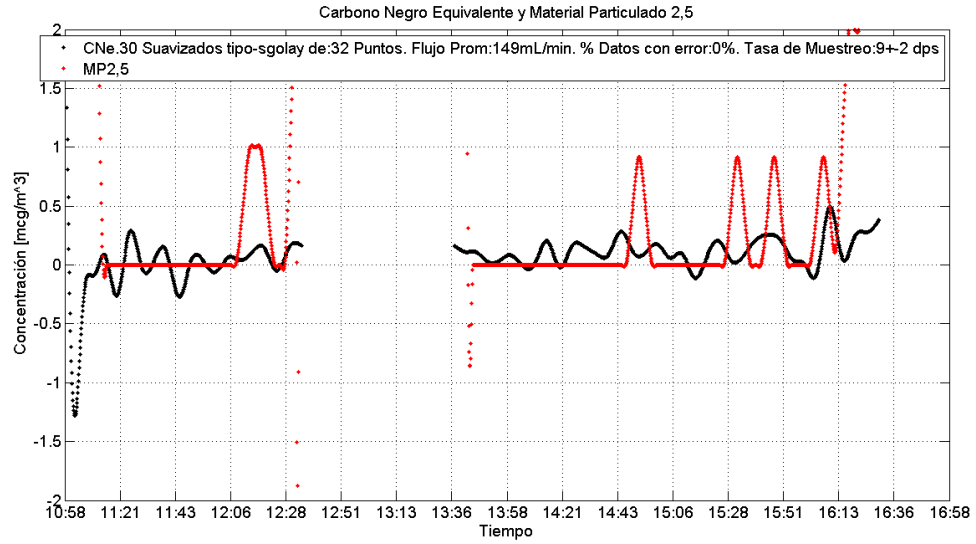


Figura 10-32 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente y pm2,5, 28/07/13

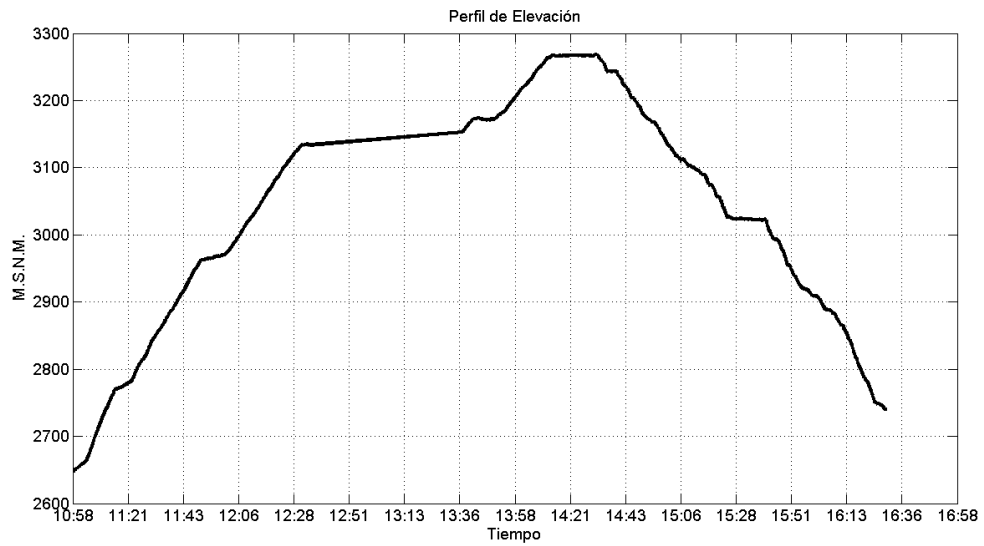


Figura 10-33 Perfil de elevación, 28/07/13

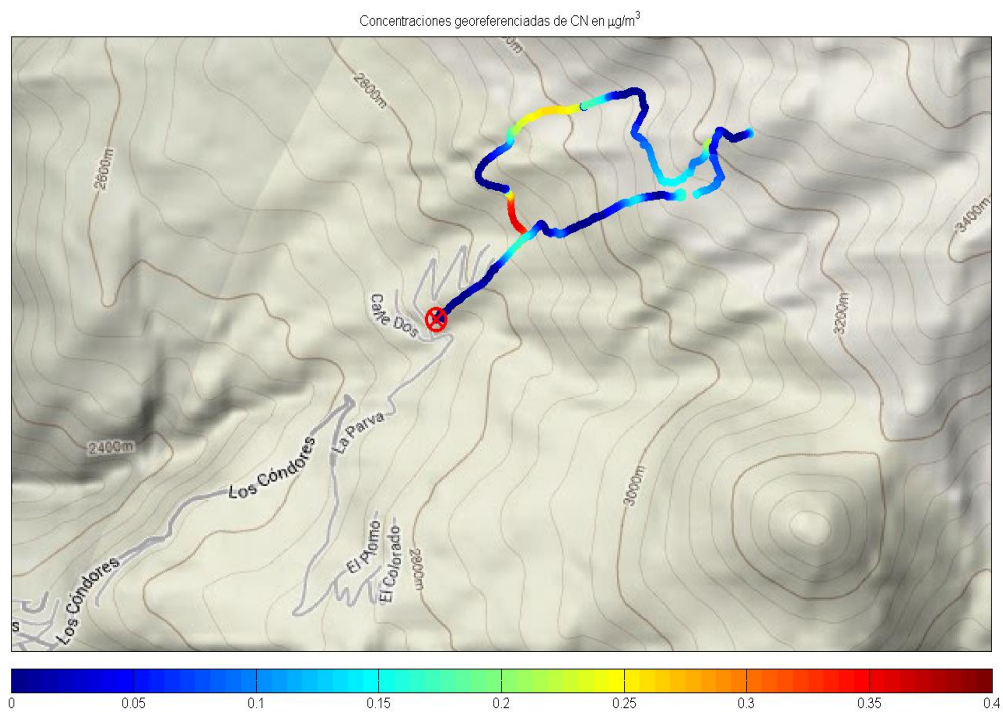


Figura 10-34 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, 28/07/13

6. SAN JOSE DE MAIPO 16/08/13

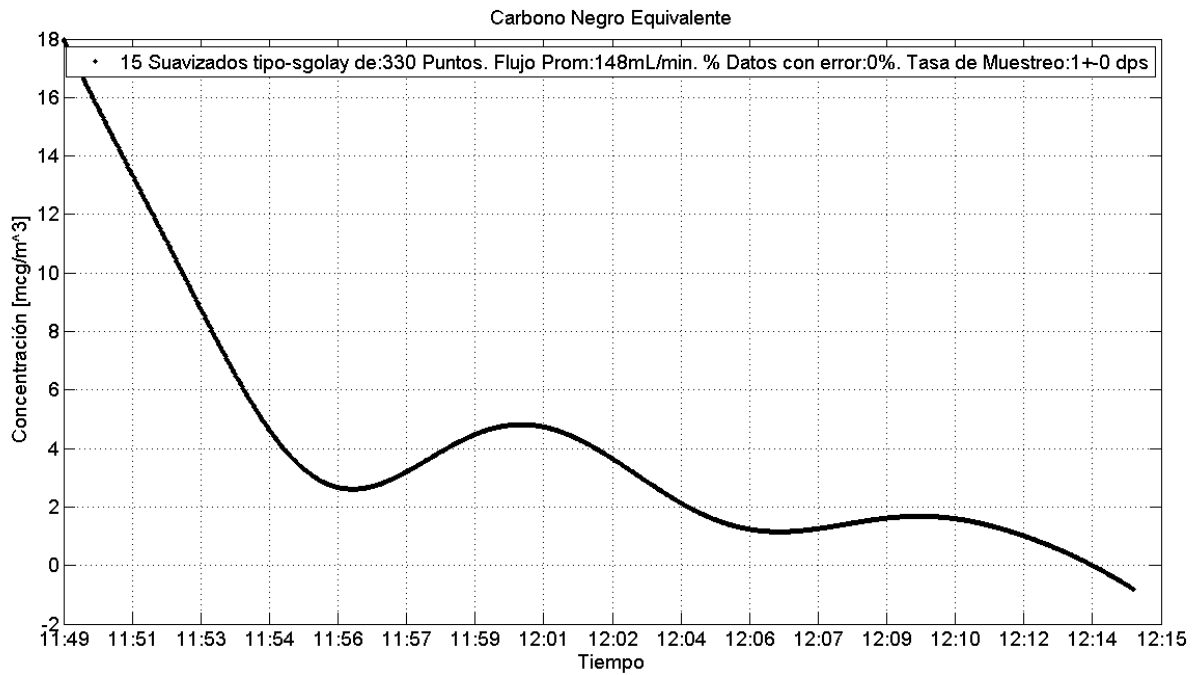


Figura 10-36 Serie de tiempo de concentraciones de carbono negro equivalente, ascenso, 16/08/13

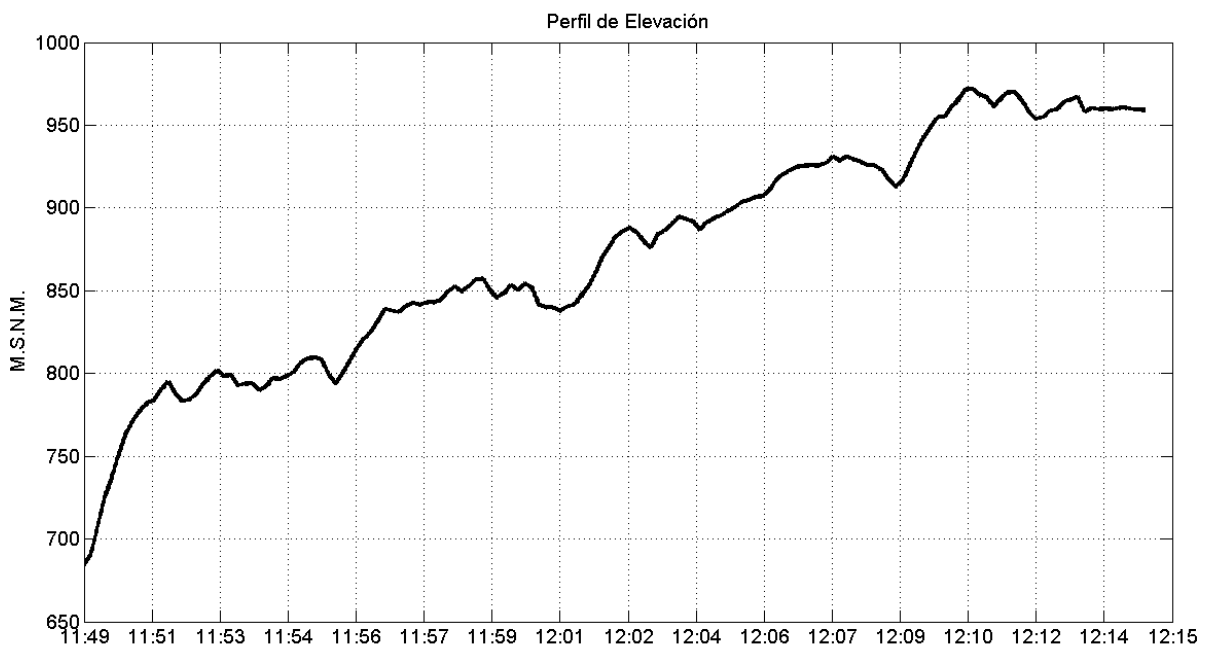


Figura 10-35 Perfil de elevación, ascenso, 16/08/13

Concentraciones georeferenciadas de CN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

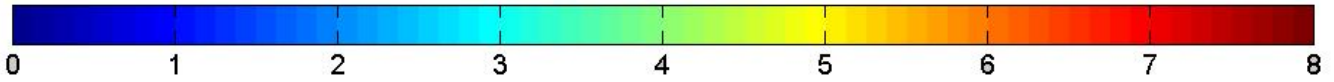
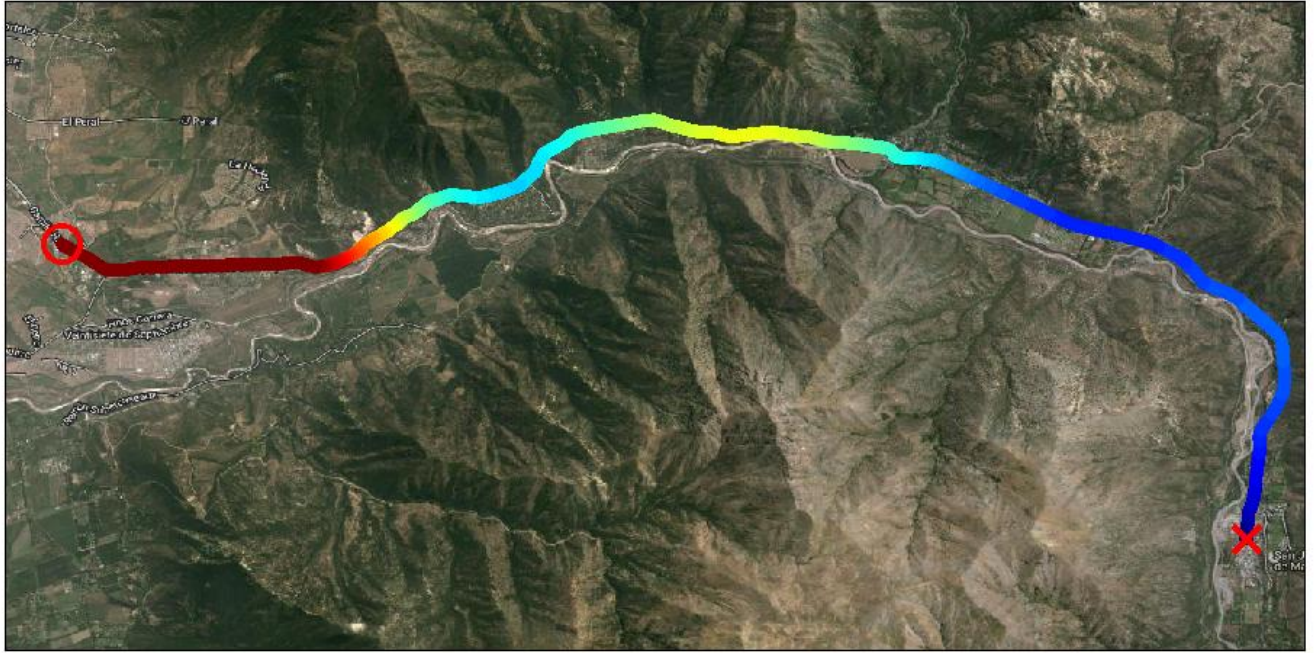


Figura 10-37 Puntos geo-referenciados de concentración de carbono negro, 16/08/13

13 DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO, OTRAS ESTACIONES

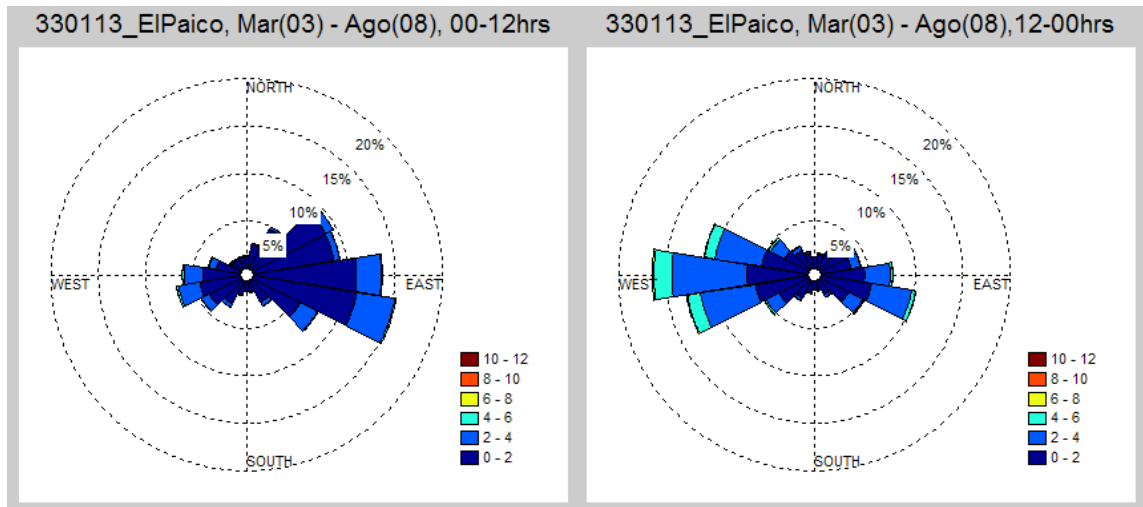
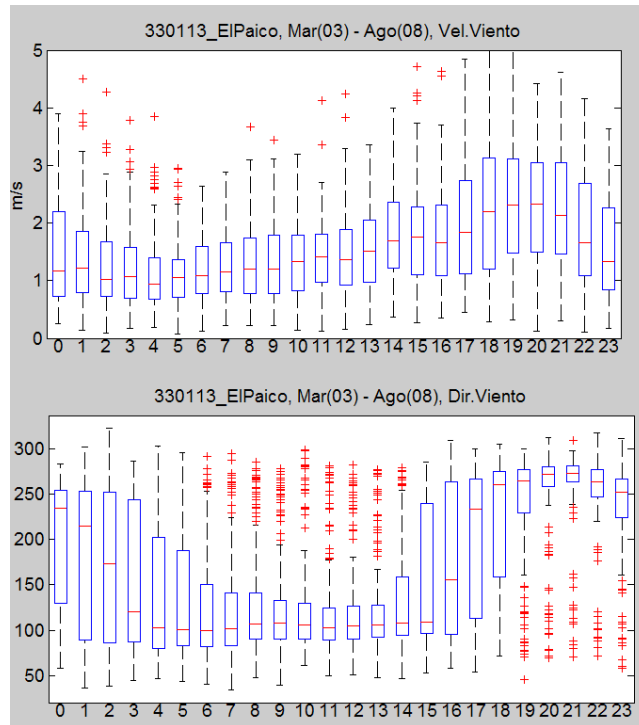


Figura 10-38 Dirección y velocidad del viento, El Paico

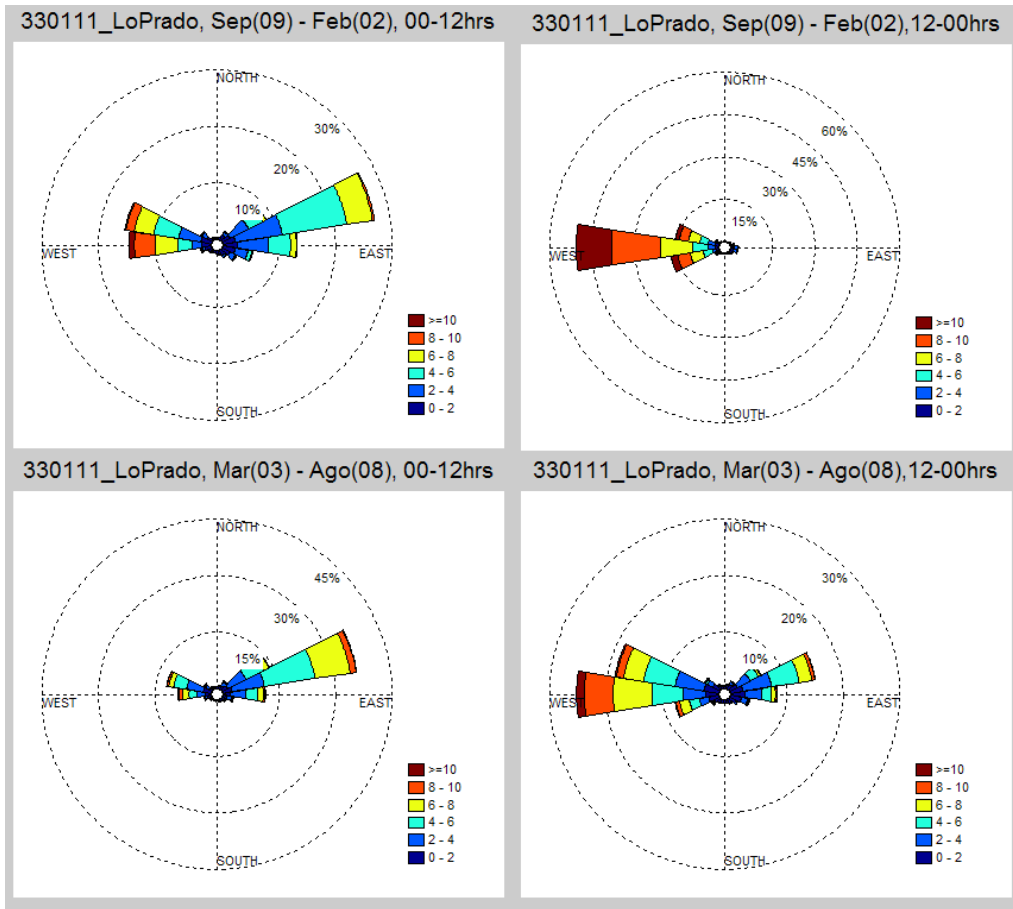
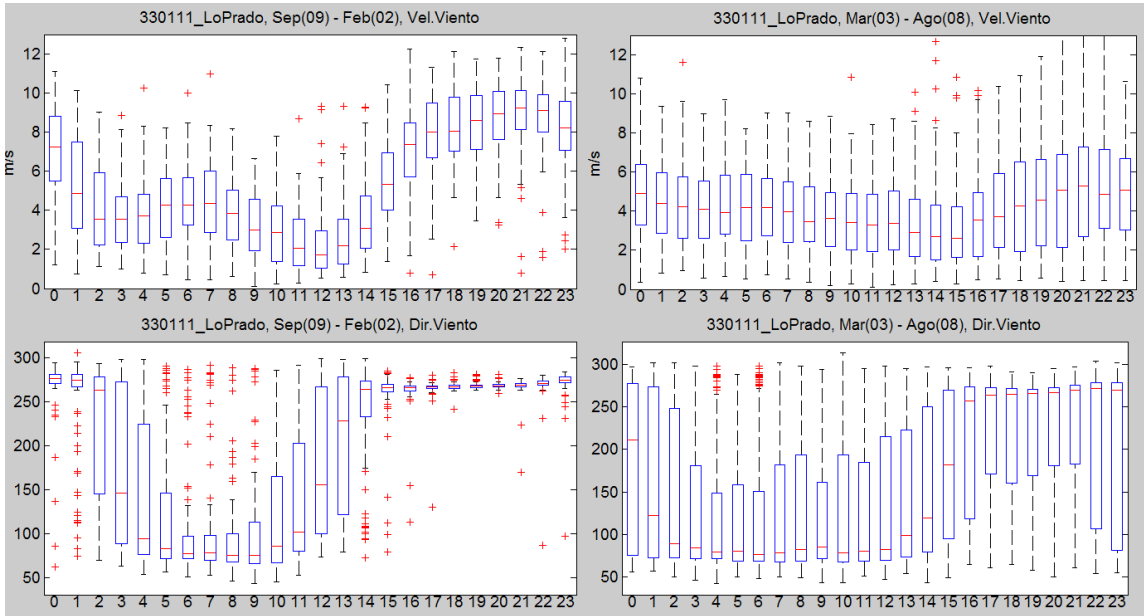


Figura 10-39 Dirección y Velocidad del Viento, Lo Prado

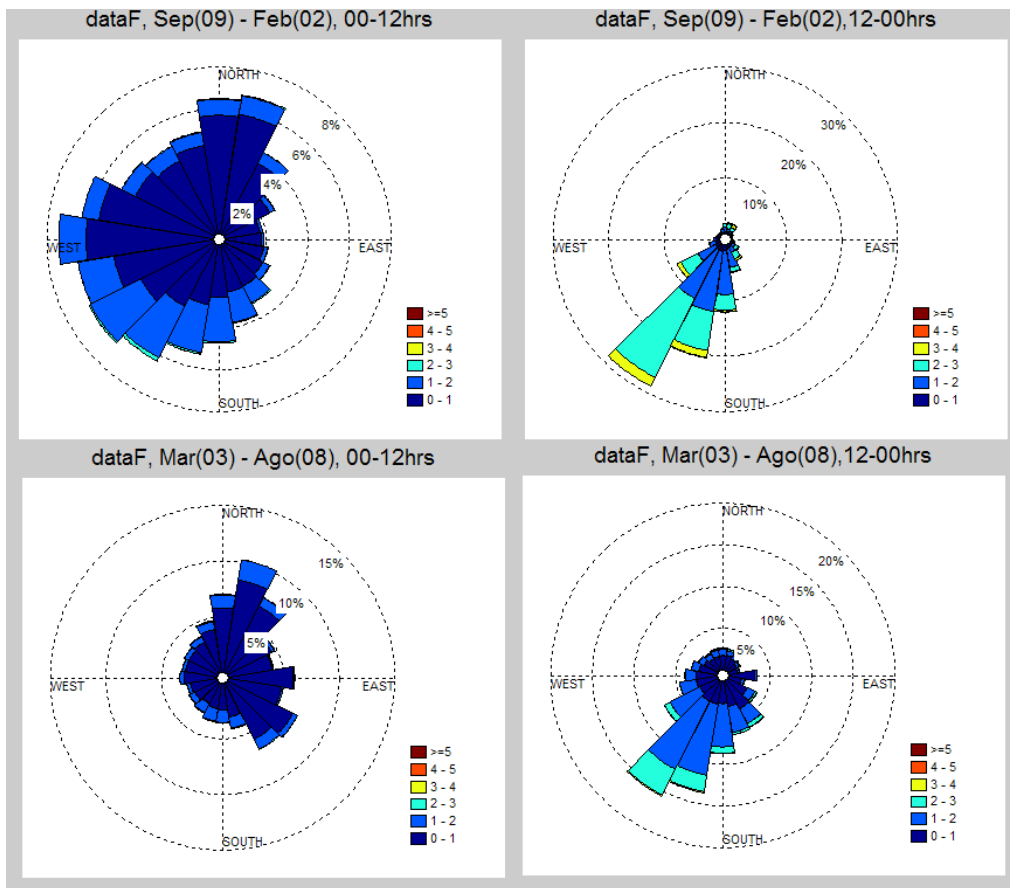
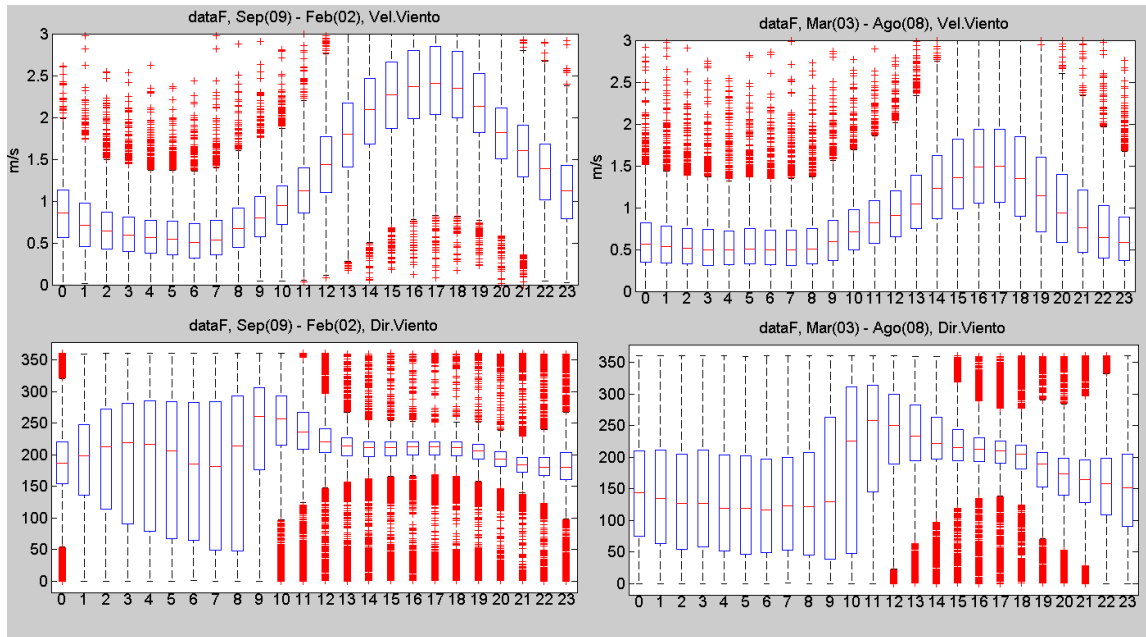


Figura 10-40 Dirección y Velocidad del Viento, estación F

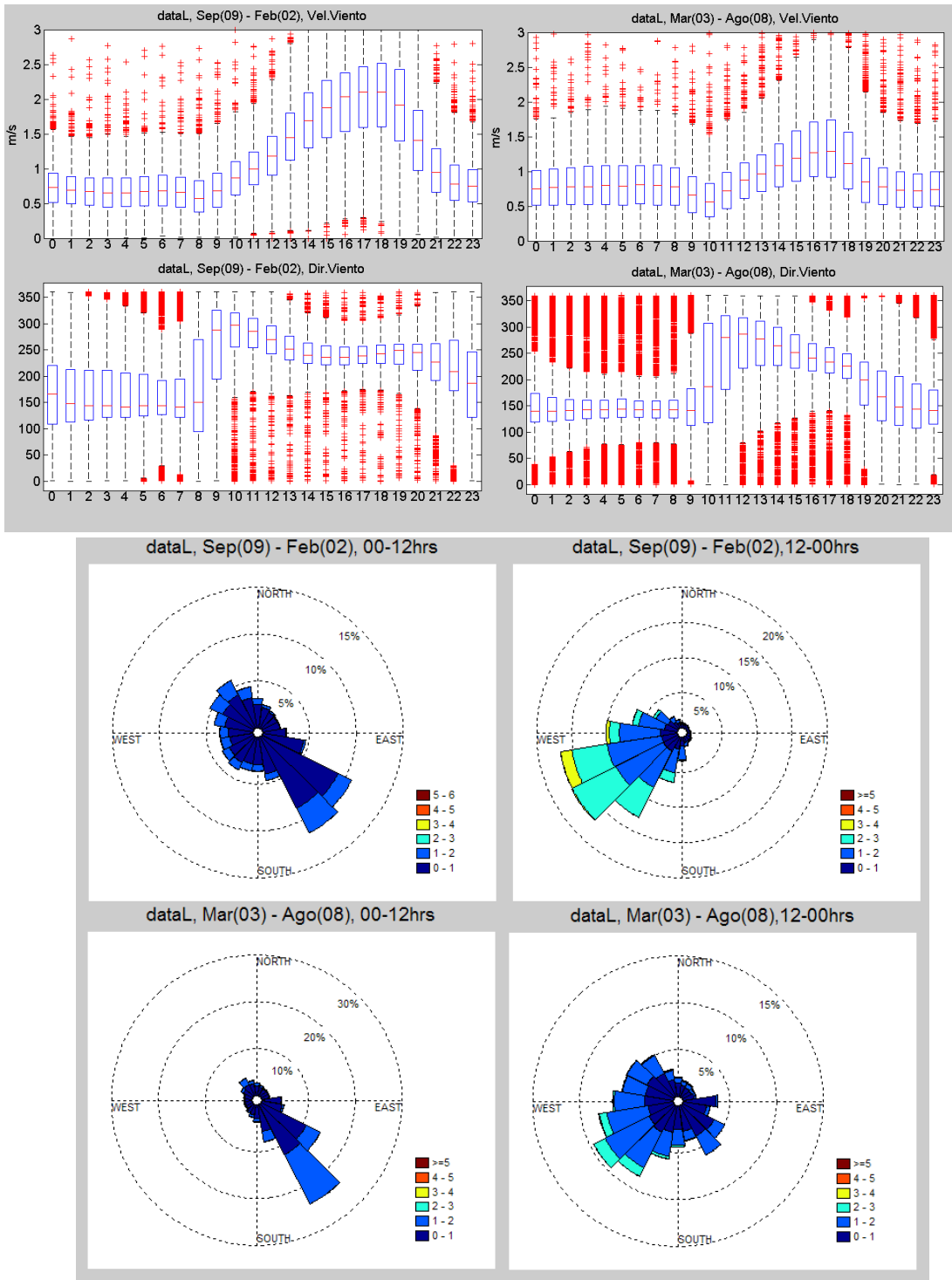


Figura 10-41 Dirección y Velocidad del Viento, estación L

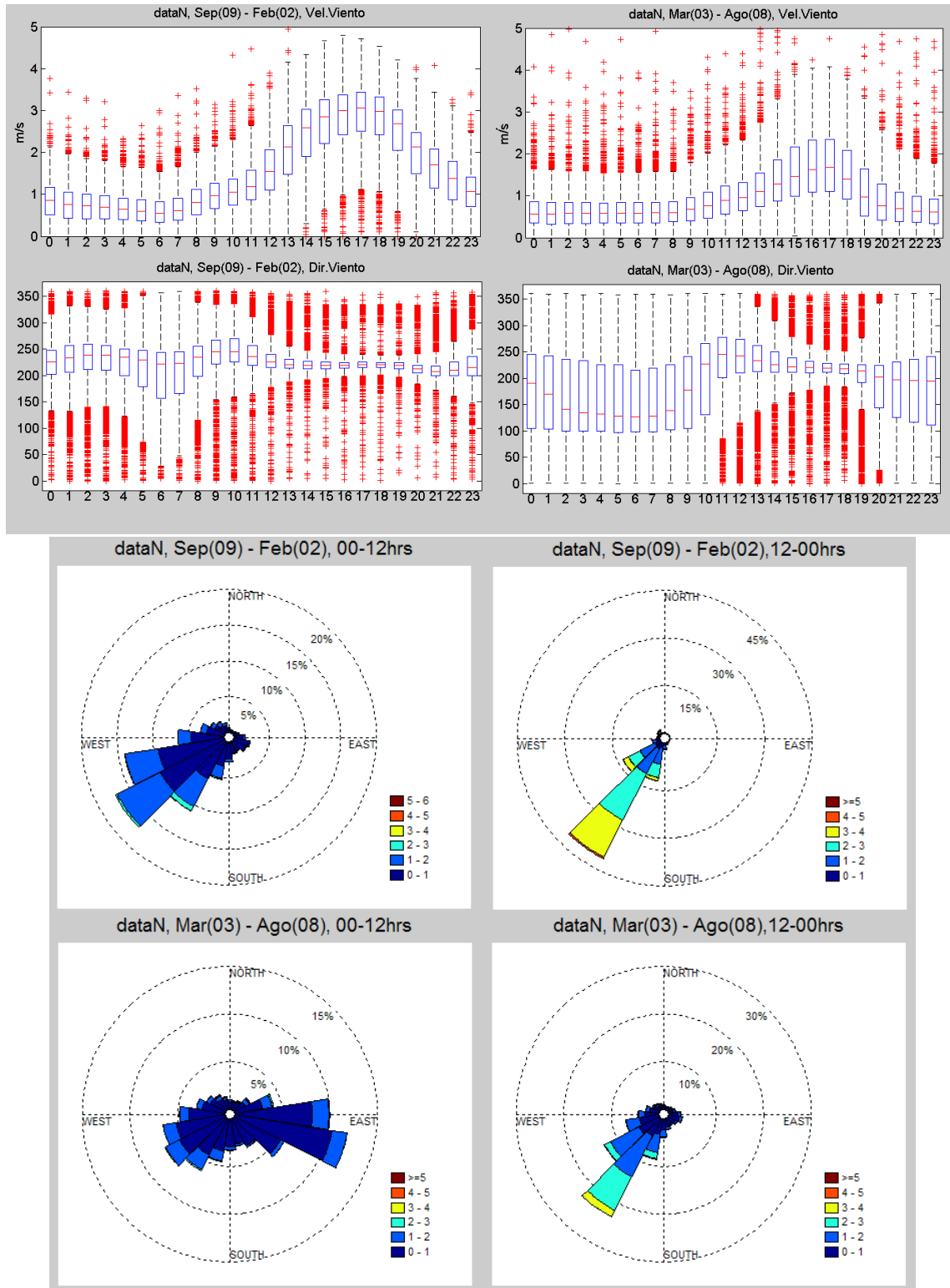


Figura 10-42 Dirección y Velocidad del Viento, estación N

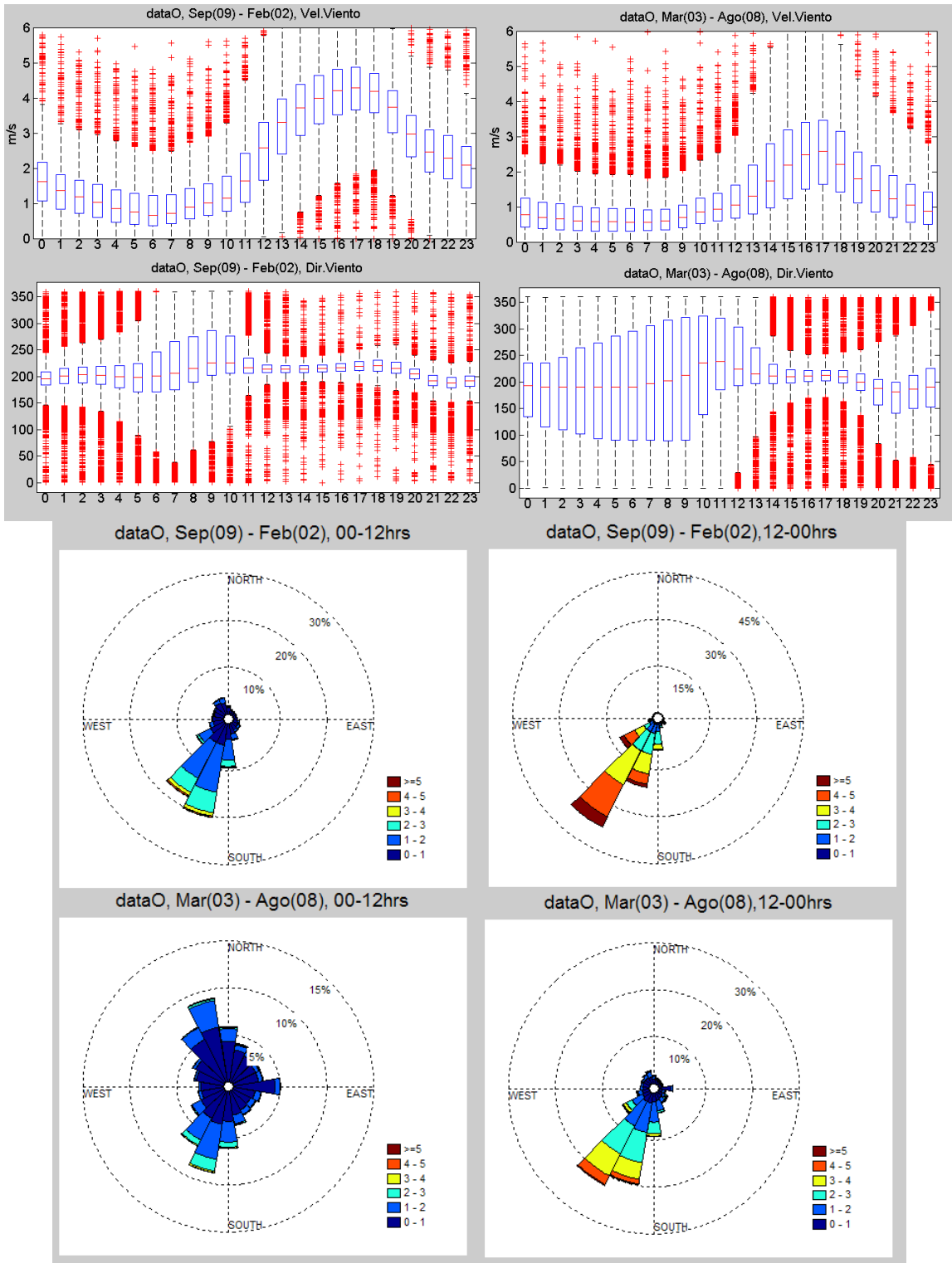


Figura 10-43 Dirección y Velocidad del Viento, estación O

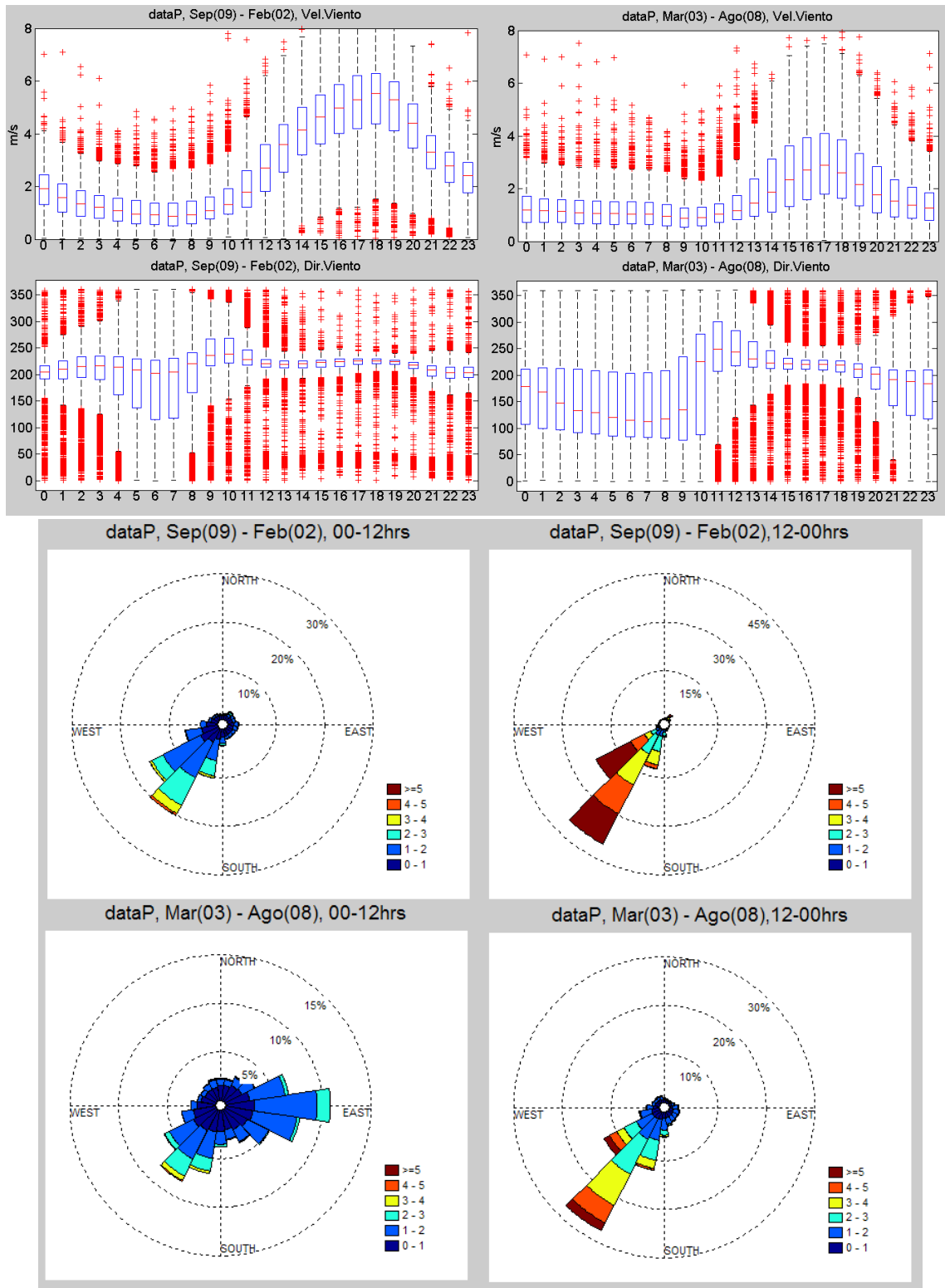


Figura 10-44 Dirección y Velocidad del Viento, estación P

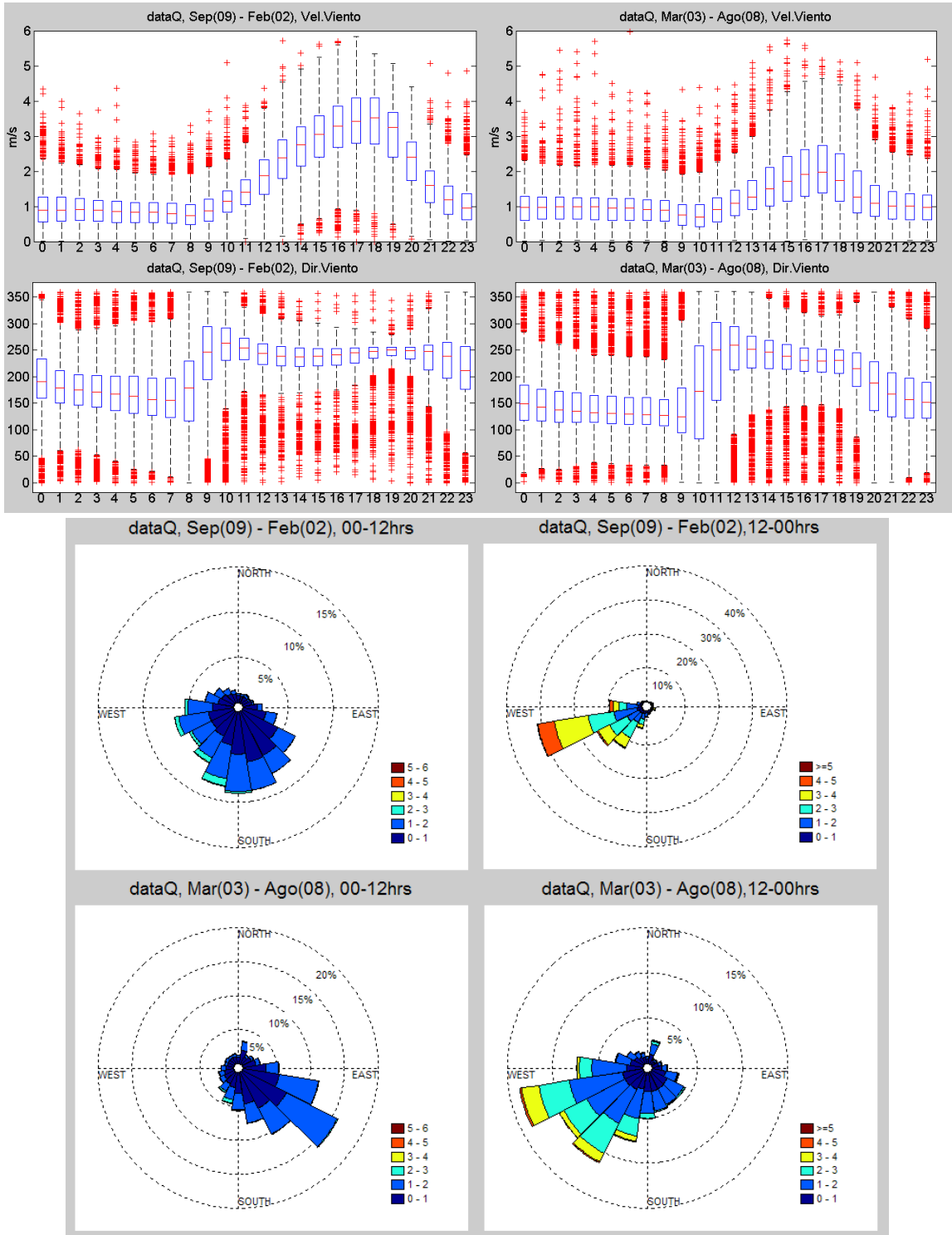


Figura 10-45 Dirección y Velocidad del Viento, estación Q

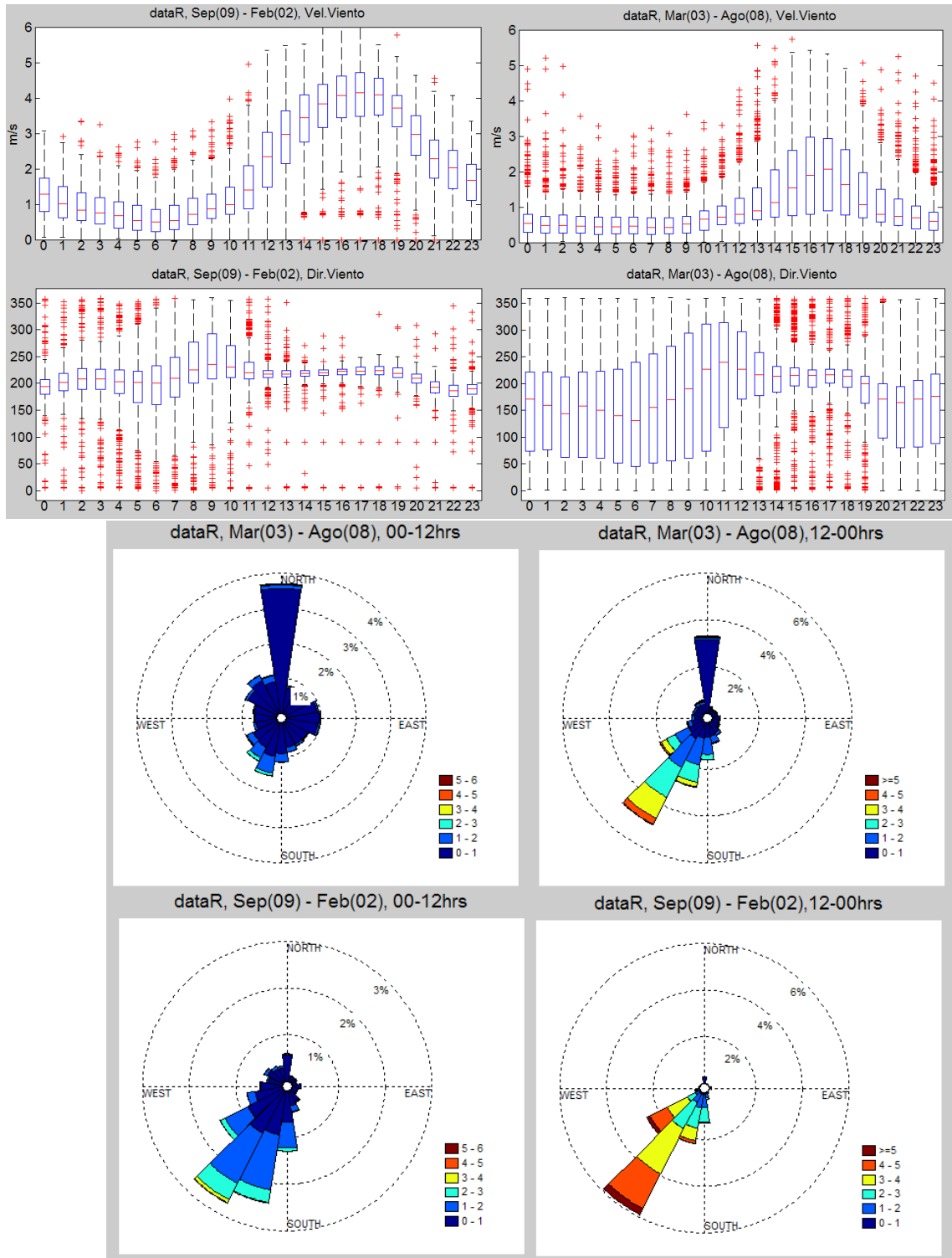


Figura 10-46 Dirección y Velocidad del Viento, estación R

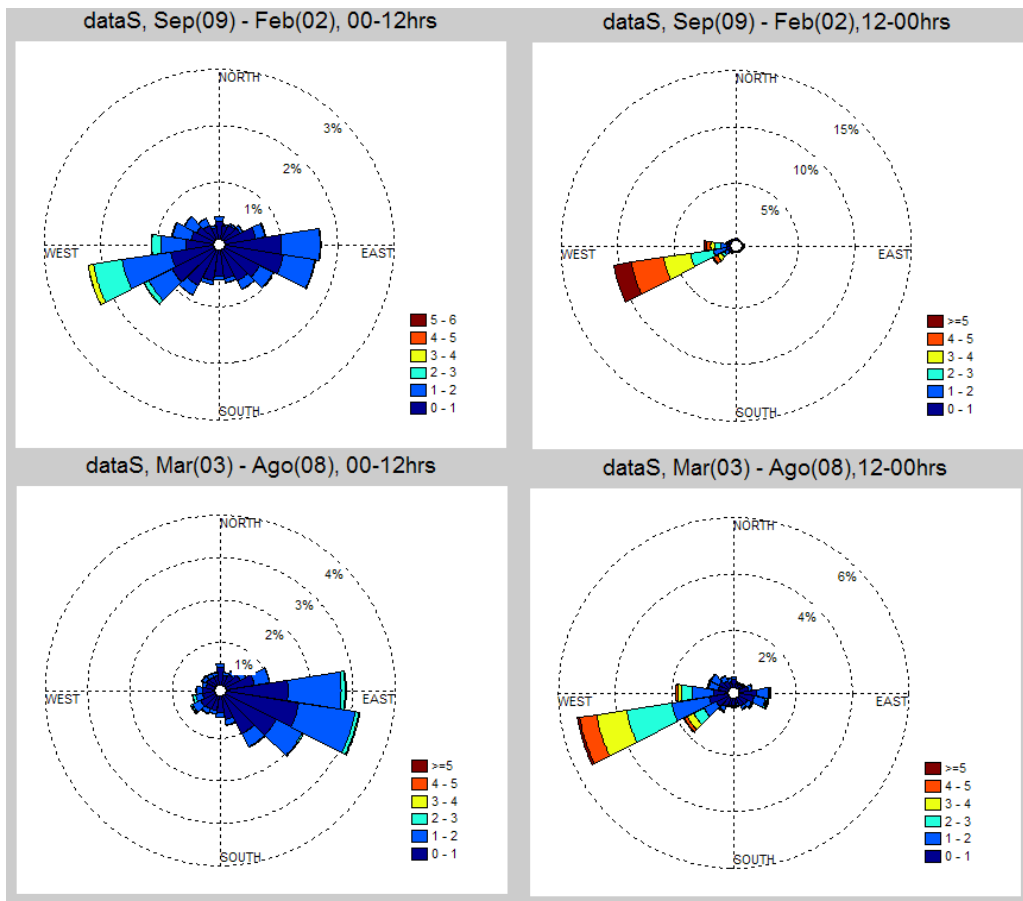
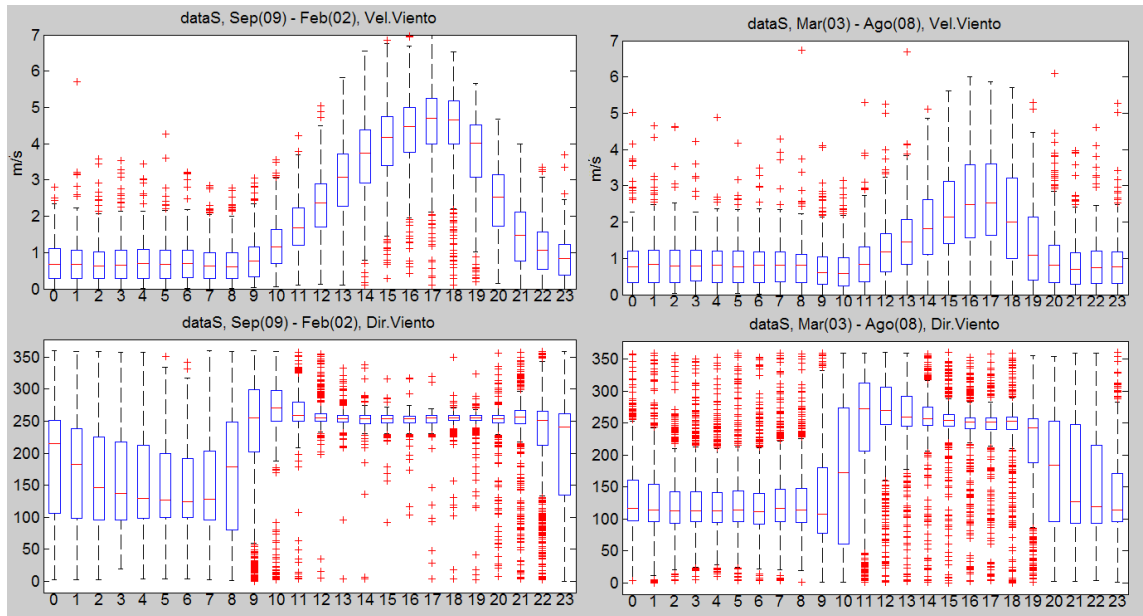


Figura 10-47 Dirección y Velocidad del Viento, estación S

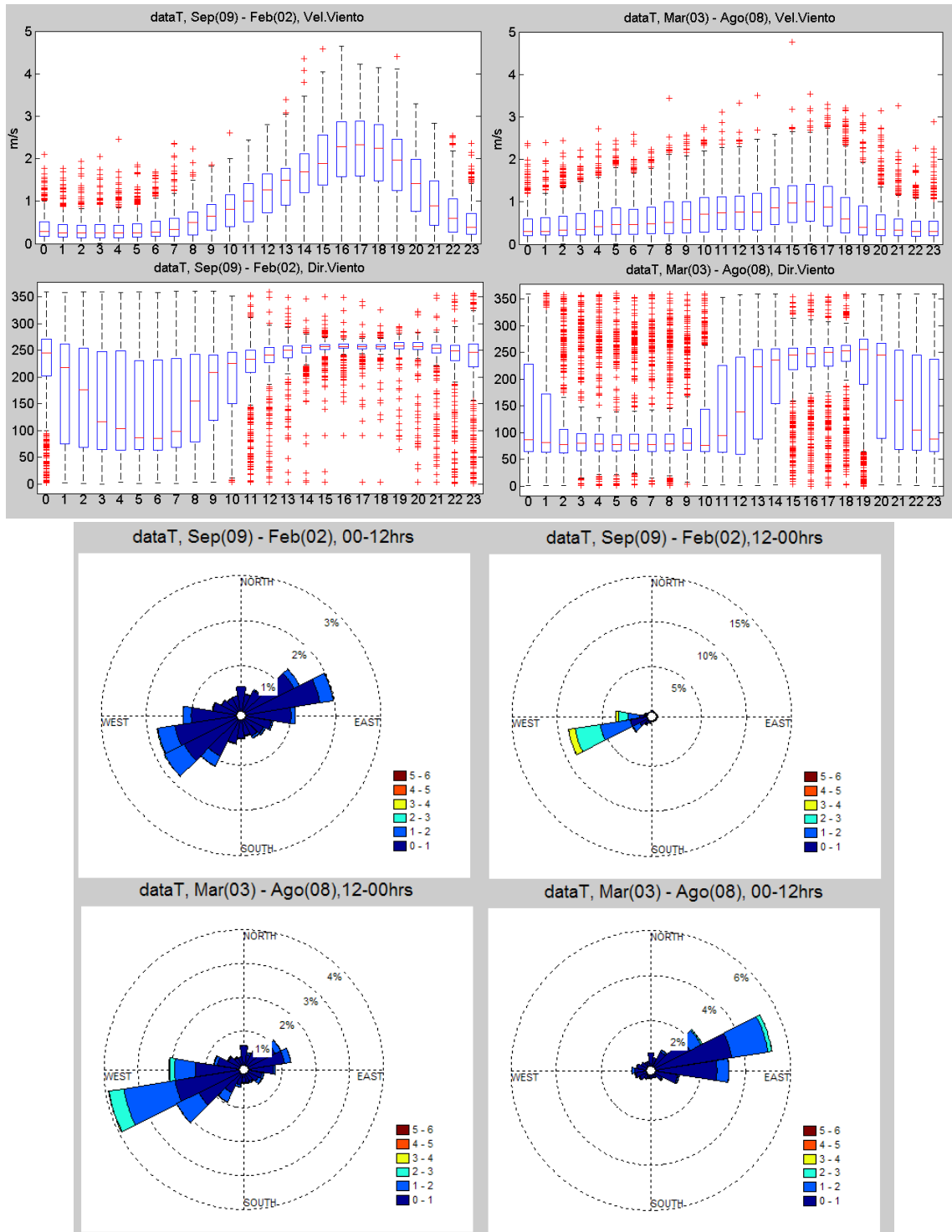


Figura 10-48 Dirección y Velocidad del Viento, estación T

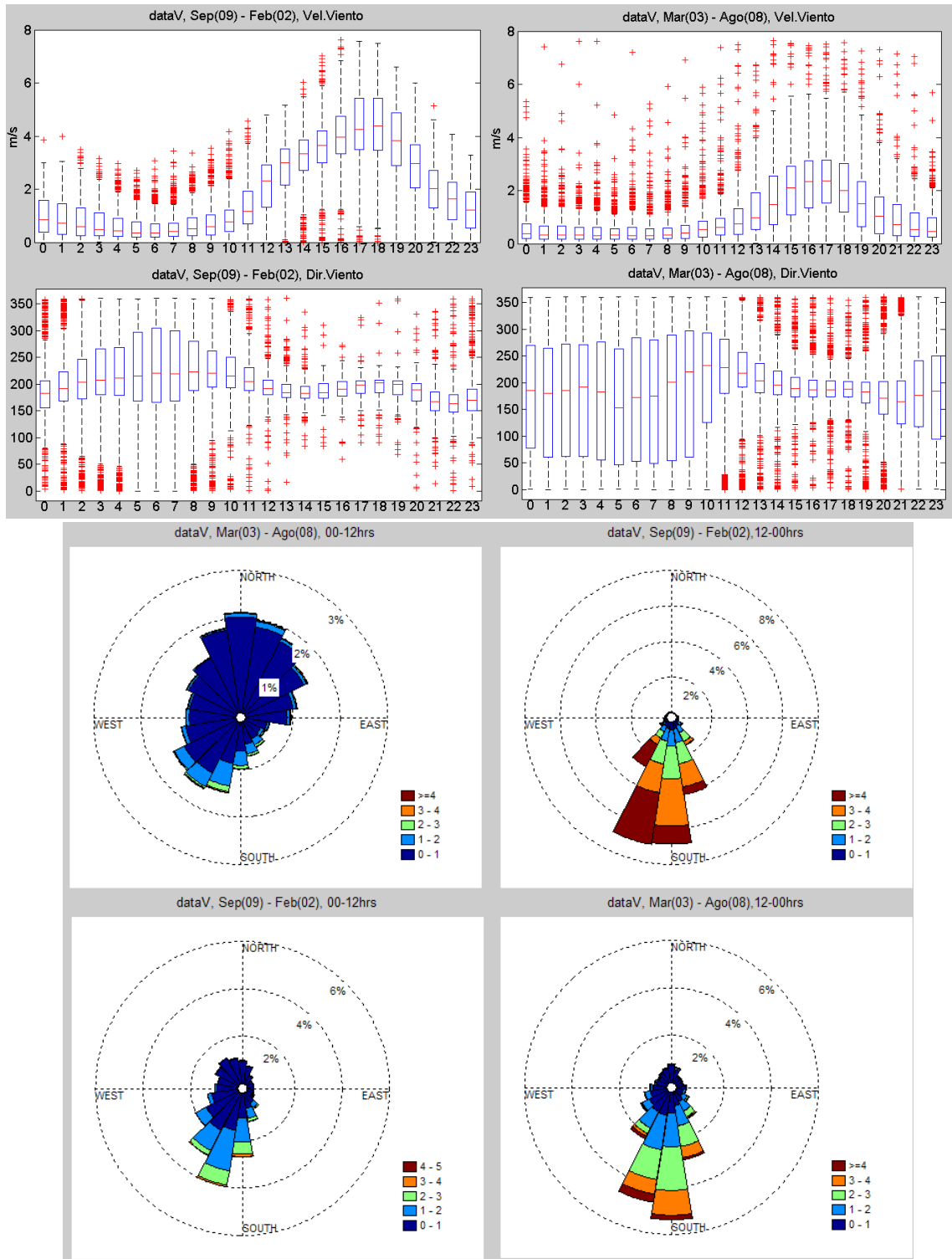


Figura 10-49 Dirección y Velocidad del Viento, estación V