UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE CARBONO NEGRO A TRAVÉS DE LA TROPOSFERA EN LA ZONA CENTRAL DE SANTIAGO DE CHILE

Generación de nuevas bases de datos

FELIPE ANDRES PARDO BARRA

Profesor guía: Dr. Ernesto Gramsch Labra

Tesis para optar al Título de Ingeniero Físico

Santiago – Chile

2014

ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE CARBONO NEGRO A TRAVÉS DE LA TROPOSFERA EN LA ZONA CENTRAL DE SANTIAGO DE CHILE.

Felipe Andrés Pardo Barra

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Ernesto Gramsch Labra del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato

Dra. María Angélica Rubio Campos _____

Dr. Patricio Pérez Jara _____

Dra. Yolanda Vargas Hernández _____

_____

Dr. Ernesto Gramsch Labra

Profesor Guía

_____

Dra. Yolanda Vargas Hernández

Directora del Departamento de Física

© Felipe Andrés Pardo Barra

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.

Dedicatoria

Este trabajo simboliza una etapa, hasta ahora la mejor de mi vida, llena de aprendizaje tanto en temas profesionales e intelectuales como temas humanos de diversa índole, no cabe en unas páginas su expresión.

Dedico este trabajo a mis padres, sin su irremplazable ayuda no sé si hubiera llegado hasta aquí, pero sí sé, que no hubiera llegado así de bien.

Agradecimientos

Quiero agradecer a quienes decidieron compartir de buena fe su tiempo conmigo en esta etapa de mi vida, a mis padres, a mi hermano y a mis amigos. Cada uno aportó con un condimento que le dio sabor a esta experiencia.

Quiero agradecer también a mi profesor guía Ernesto Gramsch por toda la ayuda prestada de buena voluntad, la confianza que depositó en mí y la oportunidad por realizar un trabajo en un tema que me inspira.

Deseo mencionar entre mis amigos, la ayuda que me brindo Sergio con las rosas de viento, entre otros temas relacionados con el medio-ambiente, también a mis compañeros del laboratorio de óptica y semi-conductores Denisse, Francisco, Marcelo y Vanessa por la numerosa cantidad de fotos que les hice sacar entre otras cosas que les pedí.

También agradezco a la gente de la Red MACAM por facilitarme la instalación de un SIMCA en su estación y los datos del Aethalometro.

Agradezco también al personal del Cerro San Cristóbal por el espacio para la instalación de los instrumentos, así como la buena atención que recibí de ellos.

Finalmente y no por ello menos importante agradecer a la gente de la Parroquia San Luis Beltrán por facilitarme un lugar para la instalación de un SIMCA y también la muy buena voluntad para atenderme.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria i
Agradecimientos ii
Tabla de Contenidos iii
Índice de Figuras v
Índice de Tablas xiv
1 RESUMEN 1
1.1 Objetivos 2
1.2 Hipótesis 2
2 INTRODUCCIÓN 3
3 MARCO TEÓRICO 6
3.1 SIMCA 6
3.2 Aethalometro 12
3.3 Sunset OCEC 13
3.4 Comparaciones 14
4 MONTAJE EXPERIMENTAL 17
4.1 Instrumentos 18
4.1.1 SIMCA 18
4.1.2 Aethalometro 20
4.1.3 Estación Meteorológica. 21
4.2 Estaciones de monitoreo 25
4.2.1 Estación Pudahuel 25
4.2.2 Estación USACH 27
4.2.3 Estación San Cristóbal 30
4.2.4 Estación Las Condes 33
5 CAMPAÑA DE MONITOREO 34
5.1 Línea base 34
5.2 Instalación y visitas 35
5.2.1 Estación Las Condes 35

5.2.2 Estación San Cristóbal 35
5.2.3 Estación Pudahuel 38
6 RESULTADOS Y ANALISIS 39
6.1 Calibración 39
6.2 Construcción de gráficos 41
6.3 Relación entre concentración de CN y velocidad del viento 43
6.3.1 Análisis estaciones Pudahuel y USACH 43
6.3.2 Análisis estaciones San Cristóbal y Las Condes. 47
6.3.3 Comparativa entre las 4 estaciones de monitoreo. 49
6.4 Análisis geográfico 51
6.4.1 Canales de ventilación 52
6.5 Construcción e interpretación de las Rosas de Vientos 53
6.6 Análisis de transporte 54
6.6.1 Análisis en el horario de la tarde, entre 12 – 19 hrs 54
6.6.2 Análisis en el horario de la mañana, entre 7 – 11 hrs. 57
6.6.3 Análisis en el horario de la noche y madrugada, entre 20 – 6 hrs 59
6.7 Inversión Térmica 62
6.8 Casos particulares 67
6.8.1 06 de Agosto 67
6.8.2 Del 10 al 13 de Julio 69
6.9 Modelo de dispersión de contaminantes CONAMA 1996 72
6.9.1 Vientos originados en el valle de Melipilla 75
6.9.2 Vientos originados en el centro de Santiago 76
6.10 Análisis estaciones de monitoreo 78
6.10.1 Estación USACH, mediciones de CN 78
6.10.2 Estación USACH, mediciones de velocidad y dirección del viento 79
6.10.3 Estación San Cristóbal, efectos de la topografía 88
6.10.4 Estación San Cristóbal, efectos de la rugosidad. 91
7 CONCLUSIONES 95
8 ANEXO 96
Bibliografía 99

Índice de Figuras

Figura 2.1 Ciclo del carbono: Muestra diversas fuentes de liberación de carbono a la atmósfera y como es atrapado en la superficie del planeta. 3

Figura 2.2 *Gráfico que ilustra la distribución del diámetro aerodinámico de CN medida al interior de un túnel en California, por lo que corresponde principalmente a fuentes primarias de combustión [2].* 4

Figura 3.1 *Esquema que representa el interior del cabezal del SIMCA, donde las flechas azules indican la dirección del flujo de aire y se puede observar la posición de los componentes del cabezal.* 7

Figura 3.2 *A la izquierda se observa una foto de la rejilla donde se deposita el filtro del SIMCA y a la derecha un filtro usado puesto sobre esa misma rejilla, donde se observan líneas blancas donde no se deposita el CN producto de la deformación que sufre el filtro al ser succionado por la bomba y estar encima de la rejilla.* 10

Figura 3.3 *Gráfico que ilustra una comparación entre CE medido por Sunset OCEC y CN medido por un aethalometro donde se observa una relación lineal con coeficiente de correlación* $\boldsymbol{R2 = 0,9526}$. 15

Figura 3.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre EC medido por Sunset OCEC y CN medido por aethalometro AE-21 de Magee Scientific Inc, donde se observa una relación lineal con coeficiente de correlación* $\boldsymbol{R2 = 0,9492}$ *para una muestra de 61 datos.* 16

Figura 4.1 *Mapa que muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo visitadas durante la campaña de medición.* 17

Figura 4.2 *Imagen de SIMCA-Q, un SIMCA modelo escritorio, ubicado en la estación USACH.* 19

Figura 4.3 *Imagen de la Bomba utilizada por un SIMCA de escritorio para la colección de muestras.* 19

Figura 4.4 *Imagen de SIMCA-P, un SIMCA modelo portable, ubicado en la estación San Cristóbal.* 20

Figura 4.5 *Imagen del Aethalometro usado en la estación Las Condes.* 21

Figura 4.6 *Imagen del módulo de adquisición de datos de la estación meteorológica, ubicado en la estación USACH.* 22

Figura 4.7 *Imagen del anemómetro y la veleta, sensores de la estación meteorológica* 22

Figura 4.8 *Imagen de, sensores de lluvia, humedad, presión y temperatura, de la estación meteorológica.* 24

Figura 4.9 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación Pudahuel, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo.* 25

Figura 4.10 *La imagen de la izquierda muestra el exterior de la habitación donde se instaló el SIMCA, mientras que a la derecha se encuentra el interior de la habitación donde se observa el SIMCA y el ordenador* 26

Figura 4.11 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación monitoreo de CN Pudahuel de y de la Red MACAM, entre paréntesis se ve la distancia entre ambas estaciones* 27

Figura 4.12 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación USACH, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo, al*

Oeste la estación limita con la Autopista Central, pero no se visualiza porque se encuentra a 750[m] de distancia aprox. 28

Figura 4.13 *Imagen de la estación meteorológica ubicada en el techo del departamento de física a 3,2[m] de altura con respecto a la terraza, estación USACH.* 29

Figura 4.14 *Imagen que ilustra la posición de los sensores de la estación meteorológica ubicada en el techo del departamento física, estación USACH, vista oeste.* 30

Figura 4.15 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación San Cristóbal, es posible ver que está alejada de las calles, la autopista Costanera Center se encuentra a una distancia aprox de 987[m] y plaza Italia (otra referencia conocida y de gran nivel de trafico) a 1329[m] aprox.* 31

Figura 4.16 *Imagen de la estación meteorológica tomada de 2 puntos distintos, se observa la manguera que SIMCA usaba para colectar la muestra, el fondo corresponde a la parte norte de Santiago.* 32

Figura 4.17 *Imagen que ilustra una vista del sur de Santiago vista desde esta estación.* 32

Figura 4.18 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación Las Condes, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo.* 33

Figura 6.1 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-R y Aethalometro, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,8461.* 39

Figura 6.2 *Gráfico que ilustra una comparación entre BC medido por SIMCA-R y CN medido por Aethalometro AE-21 de Magee Scientific Inc.* 40

Figura 6.3 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*..... 44

Figura 6.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación USACH, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*..... 44

Figura 6.5 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN, para cada hora del día en las estaciones USACH y Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*..... 45

Figura 6.6 *Gráfico que ilustra una comparación entre las velocidades del viento, para cada hora del día en las estaciones USACH y Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.* 46

Figura 6.7 Imagen que ilustra 3 importantes fuentes de CN cercanas a la estación de monitoreo USACH. 47

Figura 6.8 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación San Cristóbal, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*..... 48

Figura 6.9 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación Las Condes, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*..... 48

Figura 6.10 *Imagen que ilustra la distancia entre la estación Las Condes y el pie del Cerro Provincia y una conexión con el valle del Mapocho.*..... 50

Figura 6.11 Mapa de la Macro zona Central, donde se ilustran con diferentes colores las diferentes alturas con respecto al nivel del mar y se nombran los principales canales de ventilación de la ciudad de Santiago. 51

Figura 6.12 *Gráfico que ilustra una comparación entre las direcciones del viento de 3 estaciones durante junio, julio y agosto del 2013.* 52

Figura 6.13 Rosa de vientos correspondiente al mes de julio del 2013 en la estación USACH. 53

Figura 6.14 *Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo durante junio 2013 entre las 12:00 y las 19:00 hrs.* 55

Figura 6.15 *Imagen que ilustra el transporte de CN en la ciudad de Santiago durante junio 2013 entre las 12:00 y las 19:00 hrs.* 57

Figura 6.16 *Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo, durante junio 2013 entre las 7:00 y las 11:00 hrs.* 58

Figura 6.17 *Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo, durante junio 2013 entre las 20:00 y las 6:00 hrs.* 60

Figura 6.18 *Imagen que ilustra el transporte de CN en la ciudad de Santiago durante junio 2013 entre las 20:00 y las 11:00 hrs.* 61

Figura 6.19 Imagen que ilustra las condiciones normales de ventilación para un valle 62

Figura 6.20 Imagen que ilustra condiciones de inversión térmica para un valle 63

Figura 6.21 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación San Cristóbal y la estación Independencia separadas por una línea de 1,7 [km] de distancia.* 64

Figura 6.22 *Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de junio del 2013.* 64

Figura 6.23 *Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de agosto del 2013.* 65

Figura 6.24 *Gráfico que muestra una comparativa entre las temperaturas medidas en la estación Independencia y San Cristóbal el 17 de agosto del 2013.* 66

Figura 6.25 *Foto tomada el día 10 de julio del 2013 a las 18:11 hrs desde el cerro San Cristóbal donde se puede observar que la cima del cerro al horizonte sobresale de una capa de niebla.* 66

Figura 6.26 Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN de la estación USACH para el día 6 de agosto (Eje izquierdo para las ordenadas) y para el promedio de todo el mes de agosto (Eje derecho ordenadas). 68

Figura 6.27 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 15:00 y las 18:00 hrs para la estación Las Condes durante el mes de Agosto (izquierda) y el día 6 de agosto (Derecha). 69

Figura 6.28 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación USACH durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha). 70

Figura 6.29 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación Pudahuel durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha). 71

Figura 6.30 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación Las Condes durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha). 72

Figura 6.31 Imagen que ilustra las estaciones de monitoreo (puntos negros) utilizadas en la obtención de datos para el análisis de dispersión de contaminantes. 73

Figura 6.32 Trayectorias de viento obtenidas en el estudio de CONAMA-SESMA 75

Figura 6.33 Imagen que ilustra la ubicación de la estación Plaza Gotuzzo. 76

Figura 6.34 Imagen que ilustra trayectorias de viento que se originan en el centro de Santiago. 77

Figura 6.35 Gráfico que ilustra una comparación entre el CN medido por SIMCA-Q ea nivel del suelo y SIMCA-R en el 3º piso del Departamento de Física. 79

Figura 6.36 Imagen que ilustra la distancia entre las estaciones de monitoreo USACh y Parque O`Higgins 80

Figura 6.37 *Gráfico que ilustra una comparación entre las velocidades del viento, para cada hora del día en las estaciones USACH y Parque O`Higgins, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.* 81

Figura 6.38 *Imagen que ilustra un edificio ubicado al Norte (Laboratorios de física) de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta* 81

Figura 6.39 *Imagen que ilustra el edificio Parque Estación (departamentos) ubicado al Suroeste de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta.* 82

Figura 6.40 *Imagen que ilustra un edificio ubicado al Suroeste (Mall Plaza estación) de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta.* 83

Figura 6.41 *Imagen que ilustra el este de la estación USACH, donde solo se puede observar el planetario como un posible obstáculo.* 83

Figura 6.42 Rosa de viento de la estación USACH para todo horario en los meses de junio, julio y agosto. 84

Figura 6.43 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación USACH y edificios que posiblemente obstruyan los vientos que llegan a esta, es posible ver entre paréntesis la distancia de las calles a la estación de monitoreo.* 85

Figura 6.44 Imagen que ilustra las rosas de viento para los meses de julio en distintos años 87

Figura 6.45 figura que ilustra la compresión de las líneas de corriente de un flujo cerca de un obstáculo. 88

Figura 6.46 Imagen que muestra la estructura del Belmont Regional Park y la ubicación de los 9 sitios de medición. 89

Figura 6.47 Imagen de la maqueta de Belmont Regional Park 90

Figura 6.48 Imagen que ilustra los resultados del estudio de los efectos de la topografía en la velocidad del viento 91

Figura 6.49 Imagen que ilustra el perfil de un flujo afectado por la rugosidad y los obstáculos del suelo. 92

Figura 6.50 Ley del logaritmo 92

Figura 8.1 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-S, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9836.* 96

Figura 8.2 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-P, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,8188.* 96

Figura 8.3 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-R, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9640.* 97

Figura 8.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de julio del 2013.*..... 97

Figura 8.5 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-R, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9879.* 98

Índice de Tablas

Tabla 5-1 *Tabla que detalla las visitas a la estación Las Condes durante la campaña de monitoreo del 2013.* 35

Tabla 5-2 *Tabla que detalla las visitas a la estación San Cristóbal durante la campaña de monitoreo del 2013.* 36

Tabla 5-3 *Tabla que detalla las visitas a la estación Pudahuel durante la campaña de monitoreo del 2013 (en todas las visitas se realiza la extracción de datos del SIMCA-S vía USB).* 38

Tabla 6-1 Tabla que ilustra datos de SIMCA-S durante Agosto del 2013 entre las 1:00 y las 6:00 hrs, para los días del 1 al 15 de Agosto. Al final se ilustra el promedio de los datos de todo el mes. 42

Tabla 6-2 Tabla que resume las conclusiones obtenidas del análisis de la sección 6.3 49

Tabla 6-3 Tabla que ilustra los valores promedio de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para el día 6 de agosto y para el mes de agosto completo. 67

Tabla 6-4 Tabla que ilustra los valores promedio de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para el mes de julio y los días 10, 11, 12 y 13 de julio. 69

Tabla 6-5 Tabla que muestra las fortalezas y debilidades del modelo de trayectorias de vientos. 74

Tabla 6-6 Tabla que detalla las diferentes trayectorias originadas en el centro de la ciudad. 77

Tabla 6-7 *Tabla que muestra los valores promedios de las velocidades del viento en [m/s] para cada mes en cada estación* 80

Tabla 6-8 Tabla que muestra los valores promedio de la velocidad del viento promedio para el mes de julio en las estaciones USACH y Parque O´Higgins. También se muestra la diferencia y la razón entre las velocidades de estas estaciones 86

Tabla 6-9 *Tabla que muestra los valores promedios de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para cada mes en cada estación.* 86

Tabla 6-10 Tabla que ilustra la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura sobre la cima del cerro San Cristóbal. 93

1 RESUMEN

El carbono negro (CN) es un contaminante atmosférico de corta vida que posee diversos efectos sobre la salud de la población, debido a que funciona como transportador de sustancias toxicas que ingresan a los seres vivos a través de la respiración. También tiene diversos efectos sobre el medio ambiente, principalmente debido a su capacidad de absorción de luz, pues transforma la energía de ésta en calor, contribuyendo con ello al calentamiento global y al derretimiento de glaciares.

Las fuentes emisoras de carbono negro están bien identificadas, siendo una de las principales el uso de combustibles fósiles, principalmente el diésel en lugares urbanizados. Algo que es de gran interés científico, es el destino de las emisiones de estas fuentes, que dependen fuertemente de los parámetros meteorológicos y por ende son característicos de cada zona en particular.

La Ciudad de Santiago, posee condiciones muy desfavorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos, principalmente para los meses de invierno debido a la escasa ventilación, lo que amplifica los efectos del CN en la salud de la población, principalmente en el aumento de enfermedades respiratorias. Es por esto que Santiago fue declarada zona saturada en el año 1996.

Este estudio se enfoca en el transporte de las emisiones de CN a través de la zona central de Santiago, esperando que sirva para la comprensión de la dinámica del CN en la troposfera y ayude a futuras investigaciones.

Considerando además, que a pesar de los efectos de este contaminante no existe una red de monitoreo oficial de CN en Santiago de Chile, se definen los siguientes objetivos para este trabajo:

1.1 Objetivos

- Aportar al conocimiento de las concentraciones de CN en la ciudad de Santiago de Chile.
- Estudiar el transporte de CN a través de la troposfera, en la zona Central de Santiago.

Para llevar a cabo este trabajo se realizó una campaña de medición de las concentraciones de CN en 4 lugares de la zona central de Santiago y mediciones de parámetros meteorológicos en 2 de estos lugares. La campaña de monitoreo se llevó a cabo durante los meses de junio, julio y agosto del año 2013. Dicha información se complementa con bases de datos ya existentes y un análisis geográfico/topográfico.

Finalmente se analiza de la información recopilada en este estudio, con el objetivo de identificar el desplazamiento de CN a través de la ciudad de Santiago. A continuación se define la siguiente hipótesis.

1.2 Hipótesis

Existe transporte de Carbono Negro desde la zona central de Santiago a la zona oriente, pero el transporte de la zona oriente a la zona central no es significativo.

2 INTRODUCCIÓN

El carbono es un elemento químico que se encuentra en la naturaleza con diferentes variedades alotrópicas, de las que se pueden nombrar el grafito, que posee una estructura amorfa y es uno de los materiales más blandos y de bajo costo que existen, mientras que el diamante es uno de los materiales más duros y costosos del mundo. Además el grafito puede conducir corriente eléctrica y no así el diamante, sin embargo, ambos son una colección de átomos de carbono que se diferencian en la distribución de la estructura cristalina a escala atómica [1].

La existencia del carbono es imprescindible para concebir la vida, ya que corresponde a uno de los cuatro elementos (C, H, O y N) más abundantes en los seres vivos. Además este se renueva constantemente, en la Figura 2.1 se representa el ciclo del carbono.

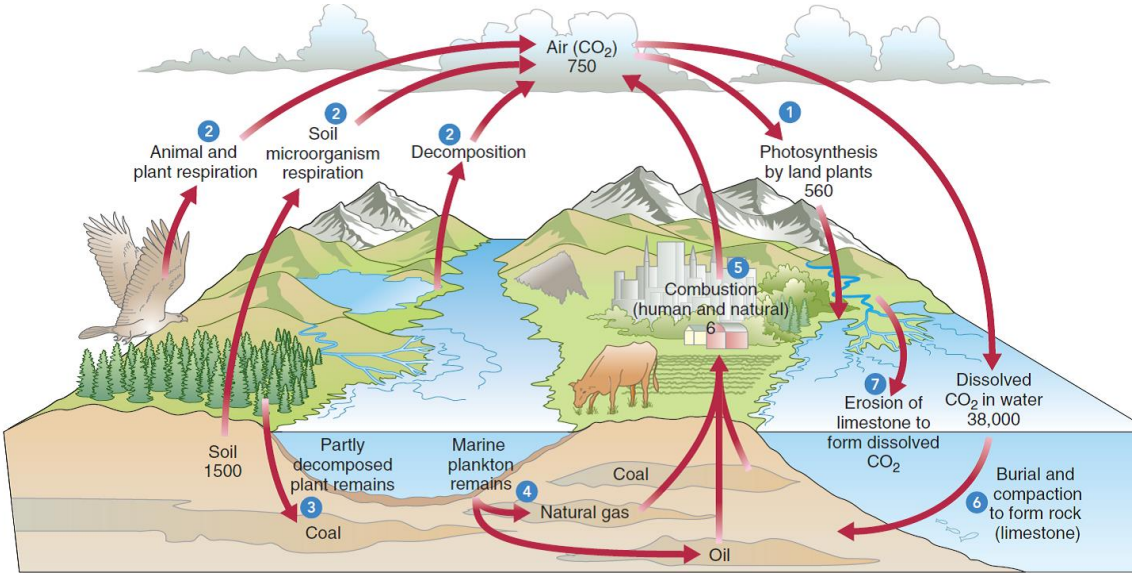

Figura 2.1 Ciclo del carbono: Muestra diversas fuentes de liberación de carbono a la atmósfera y como es atrapado en la superficie del planeta.

Plantas, animales y microorganismos de todo tipo están hechos en un alto porcentaje de carbono y lo liberan a la atmosfera cuando respiran o incluso cuando mueren y se descomponen. Pero si en este proceso de liberación no hay suficiente oxigeno este carbono se queda atrapado en la tierra formando yacimientos de carbón, algo similar sucede en el agua cuando los restos de plancton y animales sin descomponer caen al fondo marino, lo enriquecen con carbono lo que luego de miles de años genera petróleo, por lo tanto con la quema de combustibles ya sea de carbón o petrolíferos, se está liberando a la atmosfera el carbono que estaba contenido en la tierra.

Una fracción importante del material particulado carbonífero que se encuentra en la atmosfera consiste en diversos compuestos orgánicos de carbón (tales como n-alcanos, ácidos n-alcanoicos, ácidos dicarboxílicos alifáticos, ácidos aromáticos policarboxílicos, hidrocarburos aromáticos, etc) y carbono negro (CN), llamado también por algunos autores carbono elemental (CE), este último tiene una estructura química similar a la del grafito impuro y se forma principalmente de los procesos de combustión incompleta, además se encuentra en varios rangos de tamaño, pero principalmente es fino (MP2,5) [2].

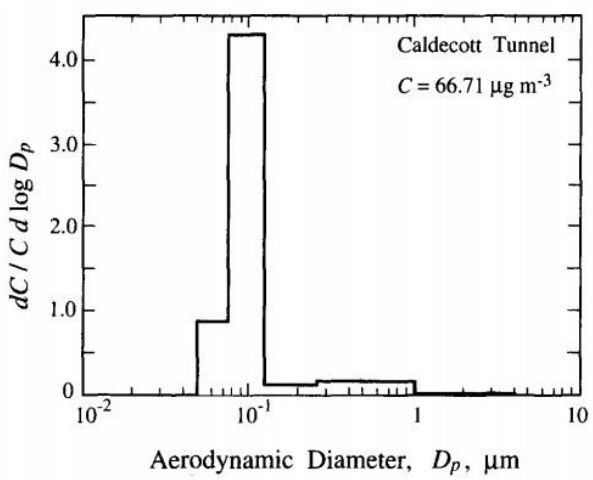

Figura 2.2 ***Gráfico que ilustra la distribución del diámetro aerodinámico de CN medida al interior de un túnel en California, por lo que corresponde principalmente a fuentes primarias de combustión [2].***

Según la OMS la contaminación atmosférica es uno de los 10 principales factores de riesgo para la salud en los países de medianos y altos ingresos. Algunos estudios sugieren que el material particulado fino 2,5 (MP2,5) donde se encuentra en gran medida CN es causante, según la EPA, de diversos efectos sobre la salud como enfermedades cardiovasculares, respiratorias, mortalidad prematura, asma, entre otras [3].

Sin embargo estudios toxicológicos sugieren que el CN no es el mayor tóxico directo del material particulado fino para los pulmones, pero puede operar como transportador de una amplia variedad de químicos con diferentes niveles de toxicidad para estos [4].

Existe evidencia para asociar las exposiciones a CN con problemas en la salud. Para cortos tiempos de exposición se asocia con admisión al hospital por enfermedades cardiopulmonares y causa de muerte por problemas cardiovasculares, algunos estudios ofrecen evidencia de que es causa de muerte por enfermedades cardiopulmonares para largos tiempos de exposición [4].

El CN debe su nombre a la capacidad que posee de absorber luz, debido a lo cual influye directamente en el calentamiento global, ya que si bien este posee un corto tiempo de vida, lo cual significa que generalmente las altas concentraciones se encuentran cerca de las fuentes, en ausencia de precipitaciones puede acumularse a gran escala regional y viajar grandes distancias llegando incluso a glaciares donde se deposita en la superficie de los éstos y con su capacidad de absorción de luz aumenta su derretimiento [5].

3 MARCO TEÓRICO

La absorción de la radiación es linealmente proporcional a la cantidad de partículas que dicha radiación se encuentre en el camino, tomando esta idea se define el coeficiente de absorción óptica (σ) indicado en la ecuación 3.0.

$$\sigma = \alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + \ldots + C \quad \text{Ec 3.0}$$

Donde ρ_i es la concentración del elemento i, α_i es el factor de proporcionalidad para el elemento i y C es una constante relativa a la absorción de los gases.

Sin embargo la gran mayoría de la luz absorbida en la atmósfera es debido a aerosoles (De echo el CN posee una capacidad de absorción de luz 1.000.000 superior a la del CO_2 por unidad de masa [5]) y más del 90% de la luz absorbida por éstos es a causa del CN, por lo cual la ecuación anterior se puede aproximar a:

$$\sigma = \alpha_{BC}\rho_{BC} \quad \text{Ec 3.1}$$

Por lo tanto se considera que monitorear dicho coeficiente, es una forma de monitorear las concentraciones de CN [7].

3.1 SIMCA

El SIMCA (Sistema de medición del coeficiente de absorción) es un instrumento utilizado para medir CN que consta de una bomba de absorción de aire que hace pasar el flujo de éste por un cabezal, que en su interior posee un filtro estilo red donde quedan atrapadas partículas contenidas en dicho flujo de aire. El interior del cabezal (ilustrado en la Figura 3.1) posee 2 fotodiodos y un LED

emisor de infrarrojo, el fotodiodo monitor se sitúa de tal manera que mida la intensidad de la luz emitida por el LED emisor antes de que pase por el filtro, mientras que el fotodiodo detector se sitúa posterior al filtro para medir la intensidad de luz que atraviesa a este.

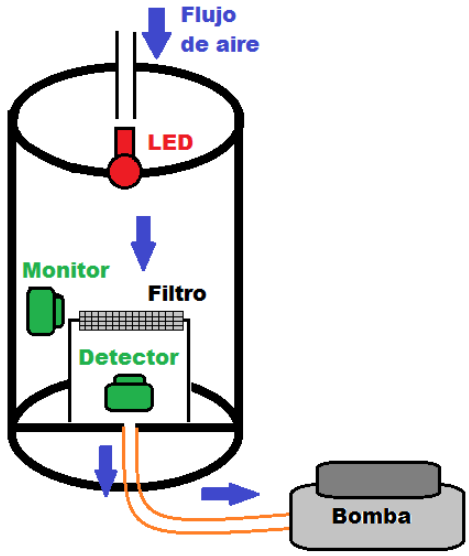

Figura 3.1 ***Esquema que representa el interior del cabezal del SIMCA, donde las flechas azules indican la dirección del flujo de aire y se puede observar la posición de los componentes del cabezal.***

Entre mayores sean las concentraciones de CN mayor cantidad de luz será absorbida en el filtro y por ende mayor será la diferencia entre las intensidades medidas por los fotodiodos, esta diferencia se asocia cuantitativamente a las concentraciones de CN.

Para el correcto funcionamiento del SIMCA antes de tomar la primera muestra de CN, es decir con el filtro limpio, se encienden los fotodiodos, la diferencia de la intensidad luminosa medida por estos se asocia al coeficiente de absorción óptica del filtro limpio. Luego al encender la bomba y tomar la primera muestra se ponen en funcionamiento los fotodiodos y se obtiene el coeficiente de absorción óptica del filtro más la capa de partículas que se quedó atrapada.

Finalmente si se vuelve a encender la bomba y se realiza otra medición se obtendrá el coeficiente de absorción del filtro y la capa de partículas anterior más una nueva cantidad de partículas que se adhiere a esta capa, si restamos los valores de los 2 últimos coeficientes de absorción obtendremos el valor del coeficiente de las ultimas partículas que quedaron atrapadas en el filtro.

Debido a lo anterior el filtro del SIMCA puede ser utilizado varias veces pero como lo que queda atrapado en éste por causa de la succión de aire no son solamente partículas de CN y si dichas partículas son muchas pueden interferir significativamente en la medición. Entonces para evitar esto, se considera que la intensidad de luz medida por el detector no debe ser menor a un tercio de la medida por el monitor. Cuando eso suceda el filtro se considerara saturado y en ese caso debe ser renovado [6].

Las paredes interiores del cabezal, son pintadas de negro opaco para minimizar reflexiones internas del haz infrarrojo y que esto aumente la intensidad captada por los fotodiodos [6].

Existe otra pieza adicional de vital importancia y es un termo calefactor conectado a las paredes del cabezal, puesto que al succionar aire se puede enfriar el interior del cabezal e inducir cambios en el funcionamiento del LED emisor y los detectores, entonces antes de comenzar las mediciones se enciende el termo calefactor hasta que el cabezal llegue al equilibrio térmico con el aire exterior, además esto ayuda a eliminar rastros de humedad, y con ello eliminar posibles absorciones y reflexiones de luz infrarroja por parte de las partículas de agua [6].

Entonces para la obtención del coeficiente de absorción óptica con el SIMCA se debe considerar lo siguiente:

Lo que en realidad se mide es la diferencia de potencial en el fotodiodo monitor y en el detector, entre más CN quede atrapado en el filtro más pequeña será la diferencia de potencial medida en el fotodiodo detector mientras que la del monitor permanecerá constante, por lo tanto:

$$V_d = KI_L \quad \text{Ec 3.2}$$

Donde V es el voltaje, I_L es la intensidad luminosa y K es una constante, entonces se define el siguiente parámetro.

$$\varphi = \frac{V_d}{V_m} \quad \text{Ec 3.3}$$

V_m Diferencia de potencial en el fotodiodo monitor.

V_d Diferencia de potencial en el fotodiodo detector.

Según la ley de Lambert-Beer la propagación de radiación para una longitud de onda determinada a través de una capa perpendicular a la luz de espesor dx que en este caso sería el filtro, tiene una atenuación de la radiación linealmente proporcional a la cantidad de partículas que la radiación se encuentre en el camino, así es posible escribir [2]:

$$I_L(x + dx) - I_L(x) = -\sigma(x) I_L(x) \quad \text{Ec 3.4}$$

Donde σ Coeficiente de absorción óptica, I_L la intensidad luminosa. Luego escribiendo de forma integral la ecuación anterior:

$$I_L(x) = I_0 exp\left(-\int_0^x \sigma \, dx\right) \quad \text{Ec 3.5}$$

Dónde I_0 es la intensidad luminosa entrante al detector e I_L la saliente o en este caso la que mide el detector, luego reemplazando las ecuaciones 3.2 y 3.3 en la 3.5 obtenemos:

$$\varphi(x) = \varphi_0 exp\left(-\int_0^x \sigma \, dx\right) \quad \text{Ec 3.6}$$

Considerando la ley de Lambert-Beer se tiene para la primera medición:

$$\varphi_1 = \varphi_E T f_p exp\left(-\int_{\Delta x} \sigma_1 \, dx\right) + \varphi_0 \qquad \text{Ec 3.7}$$

φ_e Proporcional a la fracción de luz que llega a la superficie del filtro.

T Fracción de luz que atraviesa por el filtro limpio.

f_p Fracción de luz que atraviesa el filtro limpio y llega efectivamente al detector.

φ_0 Es la cantidad de luz que llega al detector sin atravesar la capa de partículas contenida en el filtro.

Cuando la bomba succiona aire, también atrae al filtro deformándolo parcialmente, debido a que éste está sobre una rejilla. En los valles que se forman es donde se acumula la mayor cantidad de partículas mientras que en las orillas de la rejilla el filtro quedará más limpio, ésta será la zona donde una parte de la luz que atraviesa el filtro no pasara por las partículas contenidas en éste (φ_0).

Figura 3.2 ***A la izquierda se observa una foto de la rejilla donde se deposita el filtro del SIMCA y a la derecha un filtro usado puesto sobre esa misma rejilla, donde se observan líneas blancas donde no se deposita el CN producto de la deformación que sufre el filtro al ser succionado por la bomba y estar encima de la rejilla.***

Para determinar φ_0 se deja encendida la bomba del SIMCA ininterrumpidamente entonces llegará el momento en que el filtro de sature de tal manera que el detector no será capaz de seguir midiendo las variaciones de partículas acumuladas y φ llegará a un valor mínimo constante, este es el valor de φ_0.

El subíndice 1 de φ indica que es la primera muestra analizada, entonces tenemos para la segunda muestra:

$$\varphi_2 = \varphi_E T f_p exp\left(-\int_{\Delta x}(\sigma_1 + \sigma_2)\, dx\right) + \varphi_0 \quad \text{Ec 3.8}$$

En general

$$\varphi_i = \varphi_E T f_p exp\left(-\int_{\Delta x}(\sigma_1 + \sigma_2 \ldots . + \sigma_i)\, dx\right) + \varphi_0 \quad \text{Ec 3.9}$$

Entonces

$$\varphi_{i+1} = \varphi_E T f_p exp\left(-\int_{\Delta x}(\sigma_1 + \sigma_2 \ldots . + \sigma_{i+1})\, dx\right) + \varphi_0 \quad \text{Ec 3.10}$$

Consideremos

$$\varphi_i - \varphi_0 = \varphi_E T f_p exp\left(-\int_{\Delta x}(\sigma_1 + \sigma_2 \ldots . + \sigma_i)\, dx\right) \quad \text{Ec 3.11}$$

Reemplazando Ec 3.11 en Ec 3.10

$$\varphi_{i+1} = (\varphi_i - \varphi_0) exp\left(-\int_{\Delta x} \sigma_{i+1}\, dx\right) + \varphi_0 \quad \text{Ec 3.12}$$

Reordenando

$$\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_0}{\varphi_i - \varphi_0} = exp\left(-\int_{\Delta x} \sigma_{i+1}\, dx\right) \quad \text{Ec 3.13}$$

Consideremos también que para cada medición hay un valor de σ constante, lo que significa:

$$exp\left(-\int_{\Delta x} \sigma_i\, dx\right) = exp(-\sigma_1 \Delta x) \quad \text{Ec 3.14}$$

Si consideramos también que el flujo de aire f que pasa por el filtro es constante y pasa por un tiempo Δt, mientras está encendida la bomba, el volumen de aire seria $V = f\Delta t$ que al mismo tiempo es igual al volumen del cilindro de aire succionado es decir $V = A\Delta x$, por lo tanto:

$$\Delta x = \frac{f\Delta t}{A} \qquad \text{Ec 3.15}$$

Reemplazando las ecuaciones 3.14 y 3.15 en 3.13 y aplicando logaritmo natural obtenemos:

$$\sigma_{i+1} = \frac{A}{f\Delta t} Ln\left(\frac{\varphi_i - \varphi_0}{\varphi_{i+1} - \varphi_0}\right) \qquad \text{Ec 3.16}$$

Obteniendo entonces el coeficiente de absorción óptica ilustrado en la ecuación 3.16. Entonces usando este valor en la ecuación 3.1 que relaciona el coeficiente de absorción óptica a las concentraciones de CN, se pueden calcular dichas concentraciones.

3.2 Aethalometro

El aethalometro es un instrumento completamente automático utilizado para medir CN, que colecta una muestra de aire usando una pequeña bomba interna funcionando a 2 litros por minuto, esta tasa es monitoreada por un flujómetro interno y es estabilizada electrónicamente.

El aethalometro colecta la muestra en un filtro en forma de cinta hecho de fibra de cuarzo y la analiza con un método óptico.

El método óptico utilizado es el método de atenuación de la luz, tal como SIMCA con la diferencia de que el aethalometro utiliza 7 diferentes longitudes de onda desde el ultravioleta cercano 370[nm] hasta 950[nm] incluyendo el infrarrojo 880[nm] [8].

3.3 Sunset OCEC

Analizador Semi-Continuo de Carbono Elemental y Orgánico Sunset (Sunset OCEC) utiliza un método de medición que es una modificación del método termo-óptico NIOSH 5040 (National institute for occupational safety and healt) para determinar carbono total (TC), carbono orgánico (CO) y carbono elemental (CE) por 2 métodos, el térmico y el óptico [9].

El CE posee las mismas propiedades antes mencionadas para el CN pero para monitorearlo Sunset OCEC utiliza una propiedad adicional a la capacidad de absorción de luz, esto es que el CE es refractario, esto significa que resiste elevadas temperaturas, sin descomponerse, de hecho el CE se vaporiza cerca de los 4000 K [9].

Para monitorear las concentraciones de CO por el método térmico se deben seguir los siguientes pasos:

- Se monta un filtro de cuarzo en el instrumento
- Se colecta la muestra con una bomba por un tiempo deseado por el usuario
- Se purga de toda impureza el horno principal con Helio
- Se calienta el horno en fases escalonadas hasta los 700ºC
- En cada fase se liberan los compuestos orgánicos
- Los fragmentos de carbono fluyen a través del horno de oxidación donde se convierten cuantitativamente en CO_2
- Se barre el CO_2 fuera del horno de oxidación utilizando Helio puro como transportador, llevándolo al detector infrarrojo donde se cuantifica.

Posteriormente se procede a monitorear el CE, para ello se siguen los siguientes pasos:

- Se enfría el horno hasta 525ºC y luego se inicia otro calentamiento por fases escalonadas hasta los 850ºC
- Se repite el proceso anterior pero esta vez se oxida y cuantifica el CE.

Para monitorear CE por el método óptico Sunset OCEC usa un sistema muy similar al de SIMCA y Aethalometro donde usando un filtro de cuarzo y un detector infrarrojo se mide la transmisión del láser a través del filtro de cuarzo, obteniendo así la cantidad de CE.

Es importante haber extraído todo el CO de la muestra antes de monitorear el CE por método térmico. Al usar este método se debe considerar que debido a la necesidad de calentar la muestra una fracción de CO se "piroliza" y se transforma en CE, lo cual puede resultar en medidas más bajas de lo que corresponde de CO y más altas para CE. Para evitar este problema se monitorea constantemente el filtro de cuarzo por método óptico y cualquier aumento de la absorbancia se asume como un aumento del CE por CO pirolizado, algunos experimentos con muestras preparadas cuidadosamente sugieren que esta corrección es satisfactoria [10].

3.4 Comparaciones

Sunset Lab Inc, realizo una comparación entre el CE medido por el Sunset OCEC y el CN medido por un Aethalometro (ver Figura 3.3) [11].

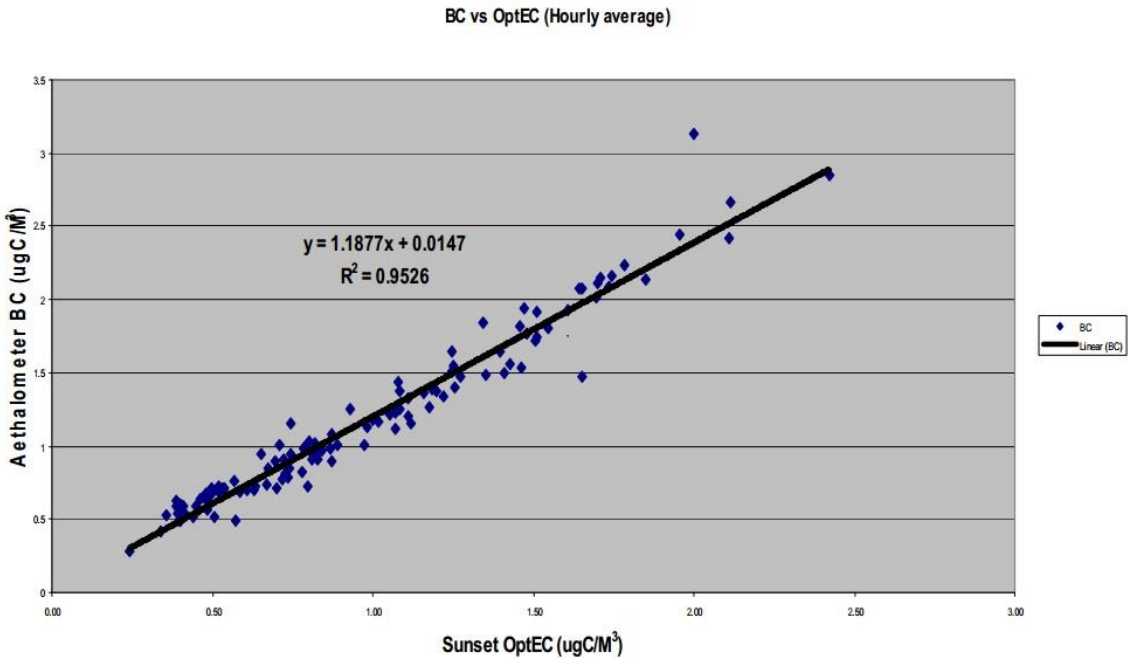

Figura 3.3 ***Gráfico que ilustra una comparación entre CE medido por Sunset OCEC y CN medido por un aethalometro donde se observa una relación lineal con coeficiente de correlación*** $R^2 = 0,9526$.

En la Figura 3.4 se observa una comparación realizada en Nanjing University of information Science & Technology, entre el EC medido por por Sunset OCEC y el CN medido por un Aethalometro modelo AE-21 de Magee Scientific Inc. [12].

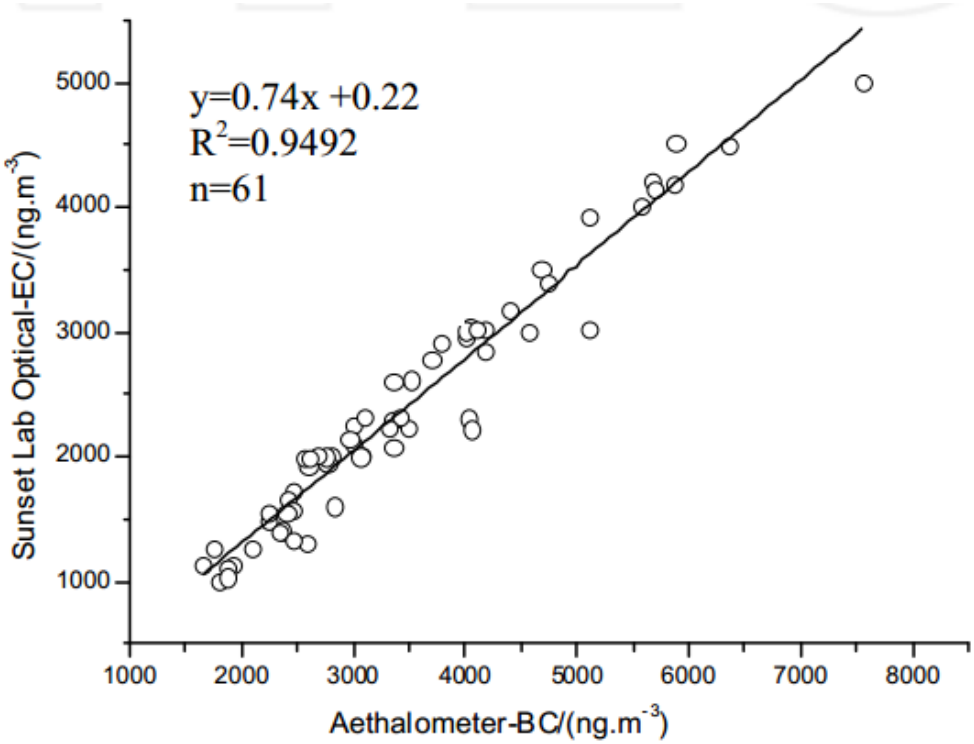

Figura 3.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre EC medido por Sunset OCEC y CN medido por aethalometro AE-21 de Magee Scientific Inc, donde se observa una relación lineal con coeficiente de correlación* $R^2 = 0,9492$ *para una muestra de 61 datos.*

Se observa en Figura 3.3 y Figura 3.4 que el CN y CE están altamente correlacionados de forma lineal, de hecho, algunos autores sugieren que estos carbonos son lo mismo [2].

Una publicación del año 2012 donde participa personal de Sunset Lab Inc. Manifiestan que la diferencia entre CN y CE aún no está resuelta [9]. Tomando como base la alta similitud con que responden los instrumentos, en este estudio se considerará al CN y al CE como equivalentes.

4 MONTAJE EXPERIMENTAL

Se realizaron mediciones en 4 estaciones de monitoreo, ubicadas en USACH, Cerro San Cristóbal, Pudahuel y Las Condes (ver Figura 4.1). Se utilizaron 4 medidores de CN (1 en cada estación), 2 estaciones meteorológicas (1 en san Cristóbal y otra en USACH), los datos adicionales fueron obtenidos de la Red MACAM (Red de monitoreo de la calidad del aire en la Región Metropolitana). Los instrumentos utilizados se mantuvieron fijos en su posición y monitoreaban de forma continua y en tiempo real las 24 horas del día, estos se detallan a continuación.

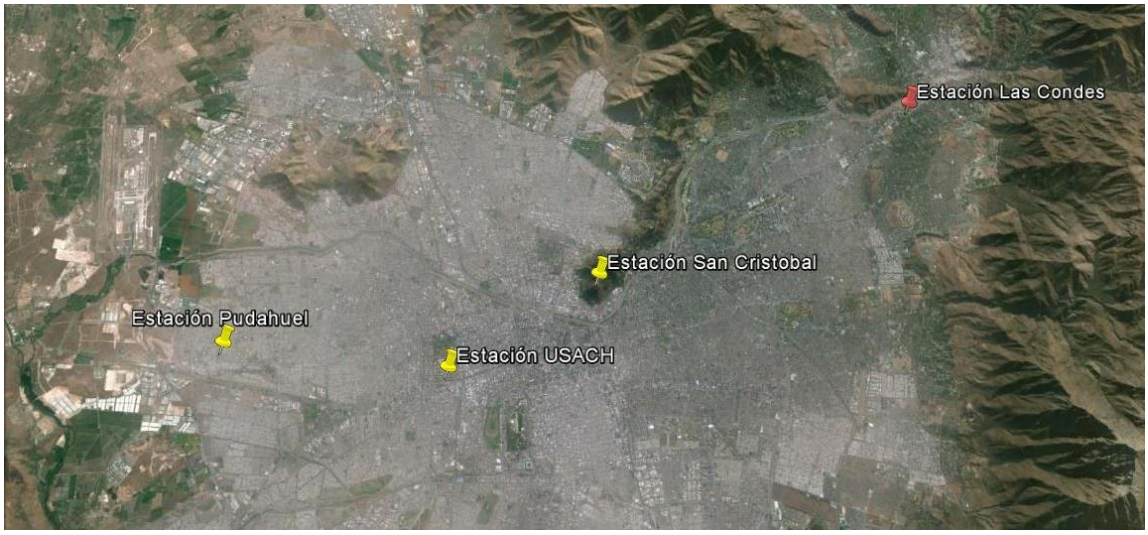

Figura 4.1 ***Mapa que muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo visitadas durante la campaña de medición.***

4.1 Instrumentos

4.1.1 SIMCA

Este instrumento colecta muestras usando una bomba de extracción de aire que funciona automáticamente (ver Figura 4.3), esta se activa durante 1 minuto, luego se apaga por 15 minutos y se vuelve a encender por 1 minuto, después de ese tiempo se vuelve a apagar repitiendo su ciclo de funcionamiento durante las 24 horas del día.

Cuando este instrumento se enciende, comienza a calentarse un cabezal hasta una temperatura de 30ºC, luego de lo cual la bomba empieza a funcionar para estabilizar la posición del filtro en la rejilla y comenzar el ciclo.

Estos instrumento se desarrollan en el laboratorio de óptica y semiconductores de la Universidad de Santiago de Chile, existen 2 tipos, los de escritorio (ver Figura 4.2) y los portables (ver Figura 4.4).

Fabricante: USACH

Sensibilidad: $10^{-6}\ \mu gBC/m^3$

Figura 4.2 ***Imagen de SIMCA-Q, un SIMCA modelo escritorio, ubicado en la estación USACH.***

Figura 4.3 ***Imagen de la Bomba utilizada por un SIMCA de escritorio para la colección de muestras.***

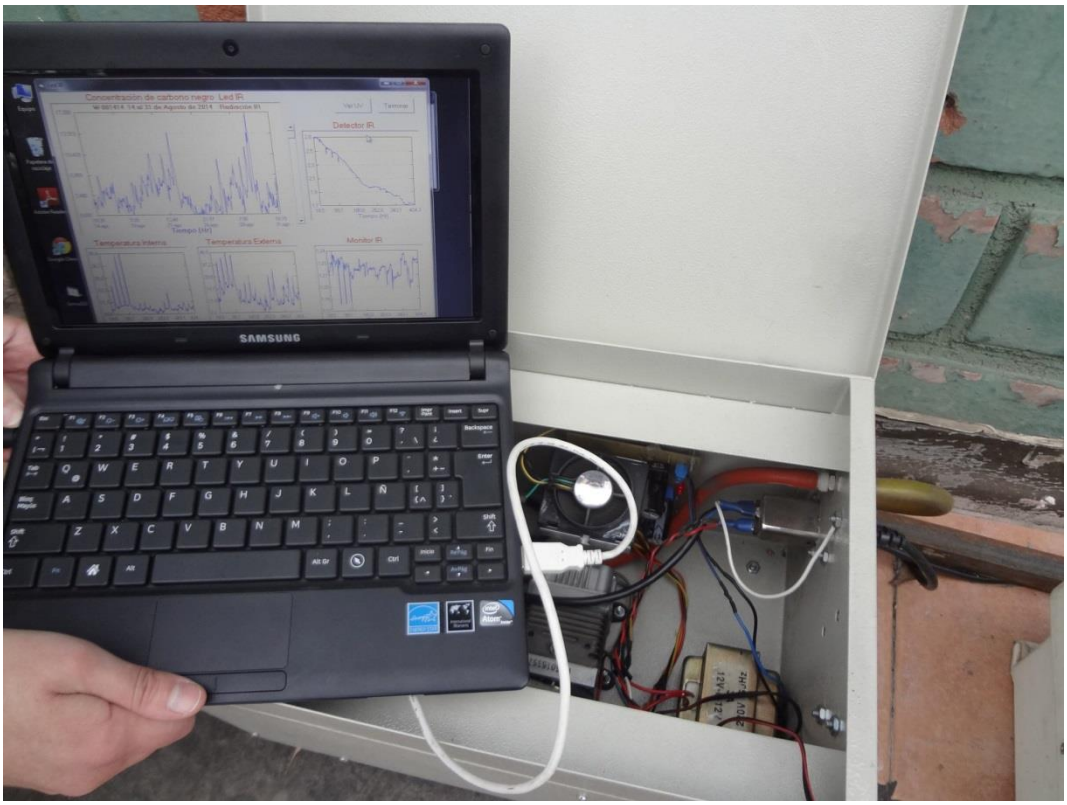

Figura 4.4 ***Imagen de SIMCA-P, un SIMCA modelo portable, ubicado en la estación San Cristóbal.***

4.1.2 Aethalometro

Este instrumento proporciona un monitoreo colectando muestras cada 5 minutos usando una bomba de extracción de aire, el tiempo de colección es de 1 minuto (imagen en Figura 4.5).

Figura 4.5 *Imagen del Aethalometro usado en la estación Las Condes.*

Fabricante: Magee Scientific Inc

Modelo: AE31

Sensibilidad: $10^{-3}\ \mu gBC/m^3$

4.1.3 Estación Meteorológica

Este instrumento consta de un módulo de adquisición de datos (ver Figura 4.6) y una serie de sensores para el monitoreo de variables meteorológicas tales como, dirección y velocidad del viento, presión barométrica, temperatura, humedad relativa y lluvia.

Fabricante: Novalynx Corporation.

Modelo: 110-WS-16

Figura 4.6 ***Imagen del módulo de adquisición de datos de la estación meteorológica, ubicado en la estación USACH.***

Para medir la velocidad del viento usa un anemómetro de 3 tazas (ver Figura 4.7) el cual es un sistema que consiste en 3 piezas con forma de cono que giran al recibir un flujo de viento, la velocidad de giro se asocia cuantitativamente a la velocidad del viento. Para medir la dirección del viento se usa una veleta, la cual es un sistema en forma de flecha que se alinea con la dirección del flujo de viento indicando su dirección (ver Figura 4.7).

Figura 4.7 ***Imagen del anemómetro y la veleta, sensores de la estación meteorológica.***

Velocidad del viento

- Rango: 0 a 55,6 [m/s]
- Sensibilidad: 0.04 [m/s]

Dirección del viento

- Rango: 0º-360º
- Sensibilidad: 1º

Para la medición de la presión barométrica (Figura 4.8 sensor blanco de la derecha) se usa un sensor con un elemento piezoresistivo que en la medida que hay cambios en la presión, éste cambia los valores de su resistencia, lo que es convertido en un voltaje y un microprocesador calcula la presión barométrica.

Presión barométrica

- Rango: 956,6 a 10431,3 [mb]
- Sensibilidad: 0,3 [mb]

Para la temperatura (Figura 4.8 sensor blanco de la derecha) se usa un termistor que cambia su resistencia en respuesta a las fluctuaciones térmicas y para la humedad relativa (Figura 4.8 sensor negro de la izquierda) una película delgada de polímero que cambia su constante dieléctrica.

Temperatura

- Rango: -40º a 160º [C]
- Sensibilidad: 1,7º [C]

Humedad relativa

- Rango: 0%-100%
- Sensibilidad: 3%

Para medir la cantidad de lluvia se usa un pluviómetro (Figura 4.8 sensor negro de la izquierda) con una sensibilidad de 0,254 [mm].

Cantidad de Lluvia

- Sensibilidad: 0,254 [mm], (0.01[”/tip])

Figura 4.8 ***Imagen de, sensores de lluvia, humedad, presión y temperatura, de la estación meteorológica.***

4.2 Estaciones de monitoreo

A continuación se detallan las estaciones de monitoreo visitadas durante la campaña de medición.

4.2.1 Estación Pudahuel

Esta estación está en San Pablo #8971 al interior de la parroquia San Luis Beltrán (Coordenadas UTM 336499.00 m E, 6298331.00 m S) a una altitud de 494[msnm] aproximadamente.

La calle de mayor flujo vehicular es San Pablo que se encuentra a 106 [m] al sur aproximadamente, las demás calles no presentan un flujo constante, se detalla su posición en la Figura 4.9, detrás de la capilla se encuentra una cancha de futbol y pasajes pequeños.

Figura 4.9 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación Pudahuel, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo.***

En esta estación se utilizó solamente un SIMCA, la manguera para extraer aire se situaba a 2,76 [m] del suelo (ver Figura 4.10). El SIMCA utilizado se denomina SIMCA-S el cual es un modelo antiguo de SIMCA del tipo escritorio.

Figura 4.10 ***La imagen de la izquierda muestra el exterior de la habitación donde se instaló el SIMCA, mientras que a la derecha se encuentra el interior de la habitación donde se observa el SIMCA y el ordenador***

Es importante tener en cuenta que la estación de monitoreo de CN y la Red MACAM donde se extraen los datos meteorológicos no se encuentran exactamente en el mismo sitio, aunque si cercanas separadas por una distancia de 942 [m] tal como se indica en la Figura 4.11.

Figura 4.11 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación monitoreo de CN Pudahuel de y de la Red MACAM, entre paréntesis se ve la distancia entre ambas estaciones***

4.2.2 Estación USACH

La estación USACH está en Avenida Ecuador #3493, en el Departamento de Física de la Universidad de Santiago (Coordenadas UTM 343478.00 m E, 6297500.00 m S) a una altitud de 528 [msnm] aproximadamente.

La calle de mayor flujo es Av. Ecuador que se encuentra a 46 [m] al sur de la estación aproximadamente, tal como se indica en la Figura 4.12. Las calles Oriente y El belloto (cuyas distancias se detallan en la Figura 4.12) son normalmente utilizadas como estacionamiento vehicular y son de menor flujo vehicular.

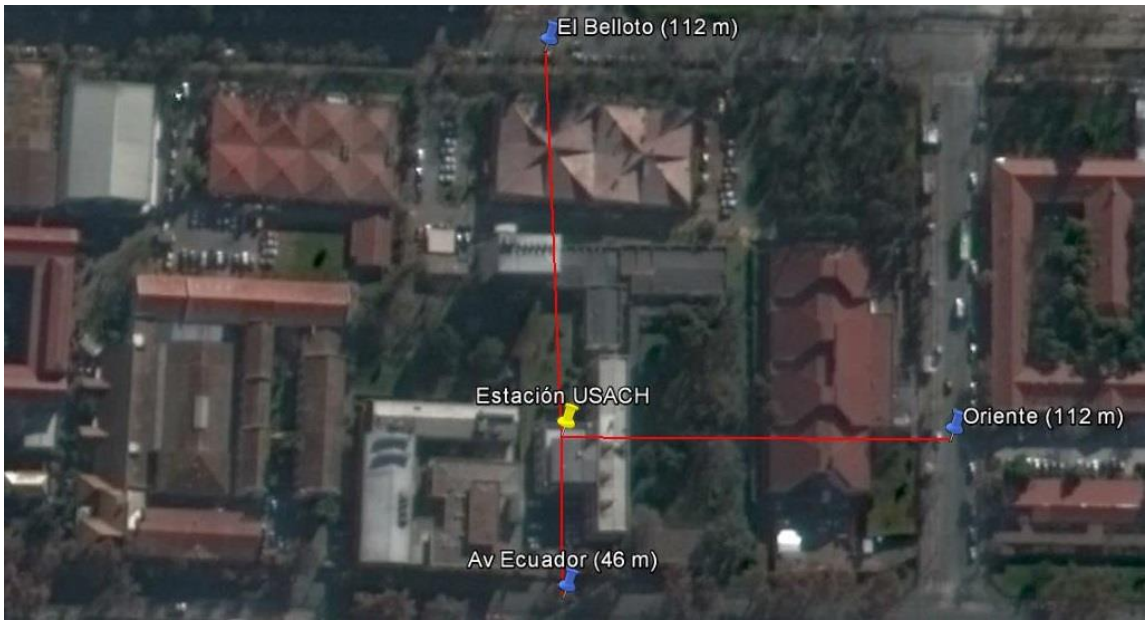

Figura 4.12 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación USACH, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo, al Oeste la estación limita con la Autopista Central, pero no se visualiza porque se encuentra a 750[m] de distancia aprox.***

Esta estación posee un SIMCA que está en el subterráneo del Departamento de Física, en el laboratorio de óptica y semi-conductores con una manguera que sale hacia el exterior por una ventana que da al patio a nivel del suelo y una estación meteorológica que se ubica sobre una superficie de fierro a 3,2 [m] de altura sobre la terraza del Departamento de Física (ver Figura 4.13).

Figura 4.13 ***Imagen de la estación meteorológica ubicada en el techo del departamento de física a 3,2[m] de altura con respecto a la terraza, estación USACH.***

El anemómetro y la veleta se encuentran, sobre un mástil a 2,45 [m] de altura sobre la estación (superficie de fierro), mientras que el resto de los sensores se encuentran a una altura de 1,85 [m] aprox (ver Figura 4.14).

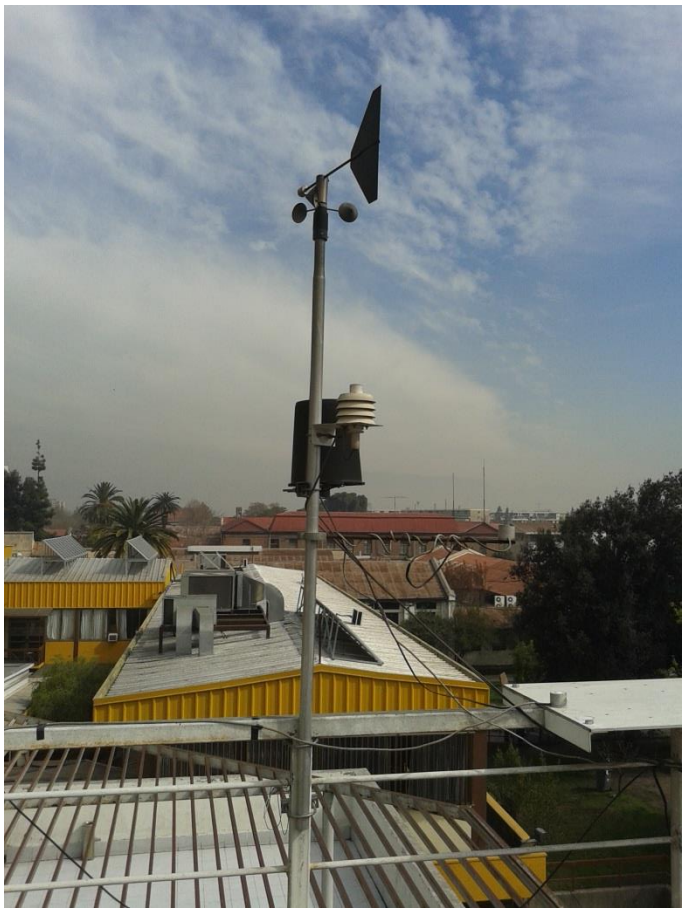

Figura 4.14 ***Imagen que ilustra la posición de los sensores de la estación meteorológica ubicada en el techo del departamento física, estación USACH, vista oeste.***

4.2.3 Estación San Cristóbal

Esta estación está en la cumbre del cerro San Cristóbal (ver Figura 4.15), en un recinto abierto al este de la estatua de la Virgen (Coordenadas UTM 348151.00 m E, 6300377.00 m S) a una altitud de 880 [msnm], lo que significa unos 280[m] de altura con respecto a las calles aledañas.

Figura 4.15 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación San Cristóbal, es posible ver que está alejada de las calles, la autopista Costanera Center se encuentra a una distancia aprox de 987[m] y plaza Italia (otra referencia conocida y de gran nivel de trafico) a 1329[m] aprox.***

En esta estación se encuentra una estación meteorológica y el SIMCA-P, que posee un sensor barométrico y un pluviómetro a 2,08 [m] y 2,12 [m] de altura con respecto al suelo de la estación respectivamente, mientras que la veleta y el anemómetro se encuentran a 2,73 [m] y 2,67 [m] respectivamente (ver Figura 4.16).

La manguera del SIMCA se encuentran sostenida por el mástil de la estación a 1,5 [m] sobre el nivel del suelo (ver Figura 4.16).

Figura 4.16 ***Imagen de la estación meteorológica tomada de 2 puntos distintos, se observa la manguera que SIMCA usaba para colectar la muestra, el fondo corresponde a la parte norte de Santiago.***

Figura 4.17 ***Imagen que ilustra una vista del sur de Santiago vista desde esta estación.***

4.2.4 Estación Las Condes

Esta estación de monitoreo pertenece a la Red MACAM, se encuentra en (Coordenadas UTM 358304.00 m E, 6305904.00 m S) Av Las Condes #11755, a una altitud de 802 [msnm] aproximadamente.

La calle de mayor Flujo es Av Las Condes que está a 154 [m] al norte (ver Figura 4.18).

Figura 4.18 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación Las Condes, entre paréntesis se ve la distancia de las calles a la estación de monitoreo.***

En esta estación se instaló SIMCA-R y se encontraba un Aethalometro y una estación meteorológica pertenecientes a la red MACAM, esta última no fue operada durante las visitas a la estación, si se operaron SIMCA y Aethalometro configurados para colectar muestras cada 15 y 5 minutos respectivamente, ambos instrumentos tenían salida al exterior por una ventana para colectar la muestra a 3 metros de altura con respecto al suelo.

5 CAMPAÑA DE MONITOREO

5.1 Línea base

La estación de monitoreo de la universidad de Santiago, posee una estación meteorológica cuyos datos son en tiempo real y se encuentran disponibles en línea desde el 09 de junio del 2007 hasta la actualidad, fueron descargados de la página (http://ambiente.usach.cl/meteo/) mientras que SIMCA-Q está funcionando desde el año 2008 hasta la actualidad y sus datos fueron descargados con un dispositivo de almacenamiento USB directamente del instrumento.

La estación de monitoreo de Las Condes pertenece a la red MACAM y su estación meteorológica se encuentran en línea y entrega datos en tiempo real que fueron descargados de la página (http://sinca.mma.gob.cl) .El Aethalometro no se encuentra en línea, por lo que para la extracción de datos se visitó la estación de monitoreo para la descarga de éstos, usando una tarjeta de memoria que requiere de un adaptador que se conecta vía USB.

Las estaciones de monitoreo de El Bosque, La Florida, Puente Alto, Quilicura y Pudahuel (esta última se refiere solo a los datos meteorológicos) pertenecen a la Red MACAM y sus datos fueron descargados de la página (http://sinca.mma.gob.cl).

5.2 Instalación y visitas

5.2.1 Estación Las Condes

En la primera visita a esta estación se instaló el SIMCA-R al lado del Aethalometro para qué tome una muestra usada posteriormente para la calibración de este último, el detalle de las visitas de esta estación se ilustra en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 ***Tabla que detalla las visitas a la estación Las Condes durante la campaña de monitoreo del 2013.***

Visita	Observaciones
30-may-2013 19:00	Se instala SIMCA-R y se deja midiendo
3-jun-2013 12:30	Se descubrió que SIMCA se había detenido una hora después de ser iniciado, se extraen los datos de este
11-jun-2013 12:30	Filtro roto, datos de mala calidad sobre todo en el inicio, fueron descartados ante inexistencia de criterios de corrección
28-jun-2013 12:30	Medición dañada, aparentemente el filtro quedo mal puesto (datos descartados) se extraen los datos de SIMCA
4-jul-2013 11:45	Medición SIMCA se encontraba midiendo pero con filtro saturado, se cambia filtro y se extraen los datos
25-jul-2013 11:45	SIMCA se encontraba encendido pero con filtro destruido, se extraen los datos y se retira SIMCA de la estación, se extraen también los datos del Aethalometro
4-sep-2013 11:45	Se extraen los datos de Aethalometro y se deja midiendo.
08-nov-2013 10:05	Se extraen los datos de Aethalometro y se deja midiendo.

5.2.2 Estación San Cristóbal

En la primera visita a esta estación de monitoreo se instaló el SIMCA-P y una Estación Meteorológica, el recinto no posee internet y considerando que se trata de una zona de frecuentes cortes de luz, para chequear los instrumentos y la descarga de datos se visitaba periódicamente la estación. En el caso de la estación meteorológica la descarga de datos se hace mediante un cable de

conexión del instrumento a una salida USB y para SIMCA con un dispositivo de almacenamiento USB.

La estación meteorológica posee una batería interna por lo que si ocurre un corte de luz inferior a un tiempo aproximado de 5 horas esta puede seguir funcionando sin problemas, mientras que SIMCA, no cuenta con un sistema que lo mantenga activo en caso de que esto pase.

En la tabla Tabla 5-2 se detalla las observaciones realizadas en cada visita, en todas las visitas se realizó también la extracción de datos de la estación meteorológica.

Tabla 5-2 ***Tabla que detalla las visitas a la estación San Cristóbal durante la campaña de monitoreo del 2013.***

Visita	Observaciones
24-may-2013 18:30	Se instala SIMCA-R y estación meteorológica, se dejan midiendo
29-may-2013 18:30	Medición con problemas se descartan los datos
10-jun-2013 16:15	Medición con problemas se descartan los datos y se regresa SIMCA al laboratorio para reacondicionarlo
15-jun-2013 15:15	Se reinstala SIMCA y se deja midiendo con filtro nuevo
18-jun-2013 15:15	SIMCA tenía error de sistema, midió bien hasta las 3:15 del presente día
21-jun-2013 15:15	Mide sin problemas
26-jun-2013 15:15	Medición se detuvo el 27 de junio a las 7:30, se informa corte de luz generalizado
1-jul-2013 12:30	Medición se detuvo el 5 de julio a las 0:00
3-jul-2013 15:58	Mide sin problemas
6-jul-2013 15:00	Medición se detuvo el 10 de agosto a las 3:45
8-jul-2013 16:40	Mide sin problemas
10-jul-2013 17:30	Mide sin problemas
12-jul-2013 13:45	Mide sin problemas, se cambia filtro
15-jul-2013 15:00	Medición se detuvo el 14 de julio a las 12:00
18-jul-2013 16:30	Mide sin problemas
20-jul-2013 14:10	Mide sin problemas
23-jul-2013 15:30	Mide sin problemas
26-jul-2013 13:00	Mide sin problemas
30-jul-2013 12:15	Mide sin problemas, se cambia filtro, el archivo BBC estaba corrupto pero se rescataron los datos desde el dat. (explicación párrafo siguiente)
31-jul-2013 10:00	Mide sin problemas
1-ago-2013 12:30	Medición se detuvo el 1 de agosto a las 19:30

3-ago-2013 14:15	Medición se detuvo el 7 de agosto a las 11:00
12-ago-2013 12:45	Medición se detuvo el 15 de agosto a las 2:45
16-ago-2013 19:45	Medición se detuvo al día siguiente a las 11:15
20-ago-2013 18:15	Medición se detuvo el 22 de agosto a las 5:45
22-ago-2013 11:30	Mide sin problemas
26-ago-2013 11:30	Medición se detuvo el 27 de agosto a las 9:00
31-ago-2013 13:15	Medición se detuvo el 1 de septiembre a las 9:00
2-sep-2013 12:15	Medición se detuvo el 3 de septiembre a las 13:30
6-sep-2013 14:15	Medición se detuvo el mismo día a las 21:30
9-sep-2013 11:15	Medición se detuvo el 10 de septiembre a las 5:15
11-sep-2013 15:15	Medición se detuvo el 12 de septiembre a las 15:15, se cortan los últimos 6 datos por salirse del rango
13-sep-2013 13:00	Medición presenta valores fuera de rango, se descarta
16-sep-2013 13:30	No presenta datos desde el 16 de septiembre a las 15:15 hasta el 23 de septiembre a las 18:00
23-sep-2013 18:00	Datos ilegibles.
24-sep-2013 13:30	Medición se detuvo el 25 de septiembre a las 9:00
26-sep-2013 12:45	Medición se detuvo el 30 de septiembre a las 16:00, datos presentan valles en gráficos.
2-oct-2013 13:00	Medición se detuvo el 3 de octubre a las 8:15
4-oct-2013 13:15	Medición se detuvo el 9 de octubre a las 14:30
9-oct-2013 17:00	Mide sin problemas
11-oct-2013 13:30	Medición se detuvo el 10 de octubre a las 10:45, se informó de corte de luz generalizado
15-oct-2013 17:00	Medición se detuvo el mismo día a las 23:30
17-oct-2013 13:00	Medición se detuvo el 20 de octubre a las 12:45
20-oct-2013 12:10	Mide sin problemas
23-oct-2013 12:00	Medición se detuvo el mismo día a las 22:30, se cambia filtro
27-oct-2013 14:45	Medición se detuvo el 29 de octubre a las 5:15
29-oct-2013 15:15	No se encontraba funcionando y no se registran datos, se retira SIMCA

Se observó una considerable baja en las velocidades del viento a partir del día 15 de septiembre, por lo que el día 26 de septiembre se chequeo el instrumento y resulto que el anemómetro se encontraba dañado, una de sus 3 tazas se había quebrado, por esa razón solo se consideran válidos los datos de velocidad del viento hasta el 15 de septiembre del 2013.

5.2.3 Estación Pudahuel

En esta estación se instaló SIMCA-S en la primera visita, la zona tampoco poseía internet por lo que se debía visitar para revisar y descargar los datos del instrumento con un dispositivo USB. Se detallan las visitas en la Tabla 5-3

Tabla 5-3 ***Tabla que detalla las visitas a la estación Pudahuel durante la campaña de monitoreo del 2013 (en todas las visitas se realiza la extracción de datos del SIMCA-S vía USB).***

Visitas	Observaciones
8-jun-2013 14:45	Se instala SIMCA-S
12-jun-2013 18:15	Mide sin problemas, se cambia filtro
17-jun-2013 17:30	Mide sin problemas, se cambia filtro
21-jun-2013 13:00	Medición se detuvo a la noche del día siguiente.
25-jun-2013 12:30	Se reinicia medición y se cambia filtro, se consulta a la gente del recinto acerca de si hubo un corte de luz el día 22 pero no sabían, porque en la noche quedo el recinto desocupado.
1-jul-2013 19:00	Medición se detuvo el 2 de julio a las 14:15 por corte de luz
5-jul-2013 12:00	Medición se detuvo el 6 de julio, no se descubrió la causa
9-jul-2013 11:45	Medición se detuvo el 11 de julio a las 12:00, error del sistema.
11-jul-2013 13:15	Mide sin problemas
15-jul-2013 13:15	Mide sin problemas, aunque los últimos 4 datos se salen del rango.
19-jul-2013 13:15	Mide sin problemas
26-jul-2013 10:45	Mide sin problemas
31-jul-2013 11:15	Mide sin problemas
9-ago-2013 11:30	Mide sin problemas
16-ago-2013 10:45	Mide sin problemas
26-ago-2013 19:15	Mide sin problemas
30-ago-2013 19:00	Los últimos datos presentaban oscilaciones irregulares, se detectó que el termo-calefactor había dejado de funcionar, se revisa y deja funcionando.
2-sep-2013 17:44	Termo-calefactor nuevamente falla, se lleva al laboratorio para reparación, medición descartada
11-sep-2013 12:30	Se instala SIMCA reparado
16-sep-2013 11:30	Mide sin problemas
23-sep-2013 12:00	Mide sin problemas
27-sep-2013 12:30	Mide sin problemas
18-oct-2013 11:00	Medición se detuvo al día siguiente, se cambia filtro
21-oct-2013 10:45	Mide sin problemas
20-nov-2013 11:15	Mide sin problemas
17-dic-2013 12:00	Mide sin problemas
10-ene-2014 11:00	Mide sin problemas, se retira SIMCA del recinto.

6 RESULTADOS Y ANALISIS

6.1 Calibración

El SIMCA-Q fue calibrado usando Sunset OCEC y luego fue usado como SIMCA maestro que calibró el resto de los SIMCAs, (dichas calibraciones se ilustran en el anexo en Figura 8.1, Figura 8.2 y Figura 8.3) luego utilizando SIMCA-R se calibró el Aethalometro, resultado que se ilustra en la Figura 6.1.

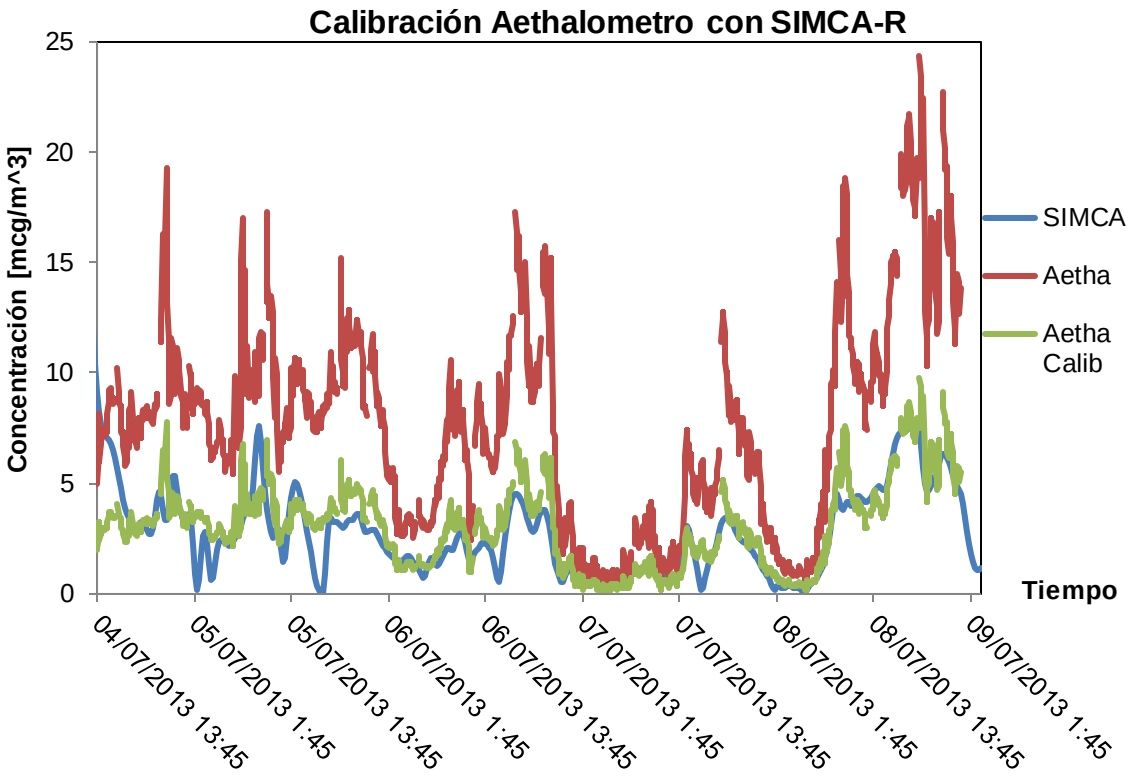

Figura 6.1 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-R y Aethalometro, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,8461.*

Esta calibración fue realizada en Estación Las Condes en los periodos comprendidos entre 04/07/2013 a las 12:00 hrs y 08/07/2013 a las 23:00 hrs, periodo que corresponde a 108 horas de datos medidos de forma continua.

En la Figura 6.2 se grafican las concentraciones de CN medidas por cada instrumento para corroborar la existencia de una relación lineal entre estos.

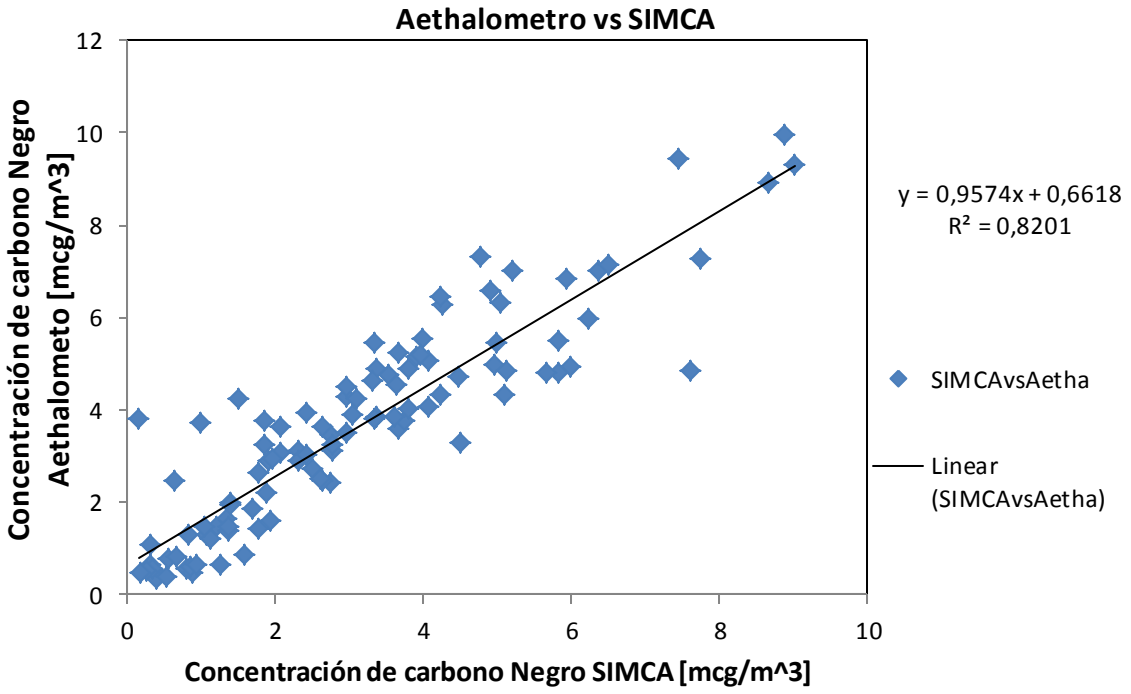

Figura 6.2 ***Gráfico que ilustra una comparación entre BC medido por SIMCA-R y CN medido por Aethalometro AE-21 de Magee Scientific Inc.***

De la Figura 6.2 se observa la existencia de una relación lineal con coeficiente de correlación $R^2 = 0{,}8201$, considerando además que ambos utilizan un método de absorción de luz infrarroja para monitorear el coeficiente de absorción, en este estudio se considerará que ambos instrumentos miden concentraciones de forma equivalente.

SIMCA toma datos cada 15 minutos lo que da un total de 4 datos por hora y Aethalometro cada 5 minutos dando un total de 12 datos por hora. Considerando que la correlación de la figura anterior tiene 108 horas de datos, SIMCA tomo una muestra de 432 datos durante ese tiempo y Aethalometro 1296. Para realizar la comparación de la Figura 6.2 se calculó un dato promedio para cada hora de medición en cada instrumento para igualar el número de datos.

6.2 Construcción de gráficos

Para analizar las diferentes variables consideradas en este estudio, ya sea velocidad del viento, concentración de CN o dirección del viento, se construyen gráficos con promedios de datos.

Para ello consideremos por ejemplo los datos de SIMCA-S medidos durante el mes de agosto, sabiendo que SIMCA toma 4 mediciones por hora se saca un promedio con los 4 datos correspondientes a cada hora y se considera el dato representativo de esa hora en ese día.

Luego, como indica la Tabla 6-1, se ordenan los datos representativos de cada hora para cada día que se desee analizar, poniendo las diferentes horas en las columnas y los días en las filas.

Para efectos de una mejor visualización solo se muestran datos de horarios comprendidos entre las 1 y las 6 de la mañana pero para la construcción de un gráfico normalmente se requieren los datos de las 24 horas del día.

Tabla 6-1 Tabla que ilustra datos de SIMCA-S durante Agosto del 2013 entre las 1:00 y las 6:00 hrs, para los días del 1 al 15 de Agosto. Al final se ilustra el promedio de los datos de todo el mes.

Fecha/Hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
01/08/2013	2,50637	2,79313	2,83855	3,08618	3,18988	3,65838
02/08/2013	1,73912	1,85075	1,74312	1,61496	1,50942	1,65137
03/08/2013	1,38801	1,17629	1,06185	1,07779	1,16856	1,45474
04/08/2013	4,66131	4,79934	3,50178	4,16695	4,82677	3,43544
05/08/2013	2,33881	2,52562	2,77031	2,27669	2,25732	2,48865
06/08/2013	5,59566	5,07542	5,37638	3,72577	3,21652	3,77824
07/08/2013	1,44361	0,80082	0,59983	0,46259	0,5115	0,44306
08/08/2013	0,85821	1,04858	1,19168	1,08469	1,1006	1,02383
09/08/2013	1,50296	1,81071	1,32599	1,44463	1,54866	1,93399
10/08/2013	5,08603	6,20717	6,73324	5,29911	4,27848	5,15167
11/08/2013	3,73708	4,99798	4,43159	3,16513	3,87058	4,254
12/08/2013	4,9273	4,83555	2,8116	1,48676	1,72922	1,58157
13/08/2013	1,49804	1,31777	1,35653	1,4151	1,38937	1,84572
14/08/2013	4,62458	4,58498	4,80686	4,34422	4,20285	3,34774
15/08/2013	12,66268	5,31182	5,12031	6,03755	7,28863	9,24652

Promedio	3,74135846	3,46134808	3,12929308	2,84648538	3,00043923	3,32812615

Finalmente si se promedian todos los datos de cada columna por ejemplo la columna de las 1:00 se obtendrá un valor representativo de esa hora para el periodo comprendido entre todos los días que se utilizaron para calcular dicho promedio, en este caso 15 primeros días de agosto.

6.3 Relación entre concentración de CN y velocidad del viento

Se construyen gráficos con promedios de datos por hora en el periodo comprendido entre los meses de junio, julio y agosto del año 2013, para las variables velocidad del viento y concentración de CN, en las diferentes estaciones de monitoreo.

Debido a que las 4 estaciones presentan comportamientos para cada mes similares durante los 3 meses de la campaña, se construye un gráfico con promedios de datos de los 3 meses para cada estación.

6.3.1 Análisis estaciones Pudahuel y USACH

Al analizar los gráficos de la estación Pudahuel (ver Figura 6.3) y la estación USACH (ver Figura 6.4) se concluye lo siguiente:

- Existe una correlación inversa entre velocidad del viento y concentración de CN, en especial en el horario comprendido aproximadamente entre las 12:00 y las 19:00 hrs.
- En ambas estaciones se observa que se alcanza un mínimo en las concentraciones y a la vez un máximo en las velocidades del viento cerca de las 16:00 hrs.
- Aumento de las concentraciones de CN en las horas de mayor tráfico vehicular, uno pasado las 6:00 hrs y otro después de las 19:00 hrs. Luego del segundo aumento las concentraciones suben hasta avanzadas horas de la noche, a pesar de que pocas horas después hay una disminución de las emisiones de tráfico (también se observa claramente en la Figura 6.5).

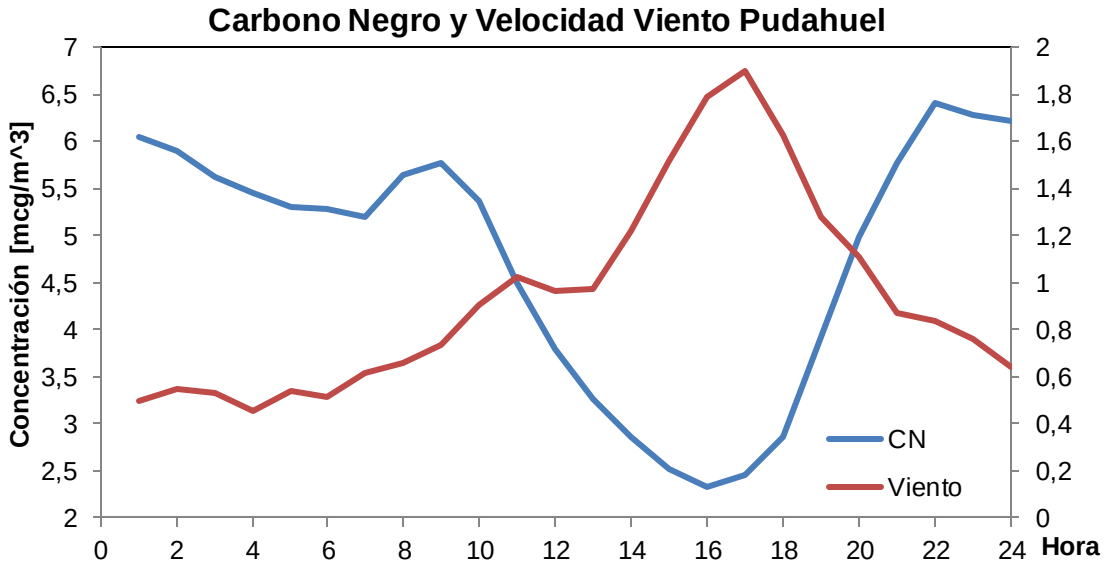

Figura 6.3 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*

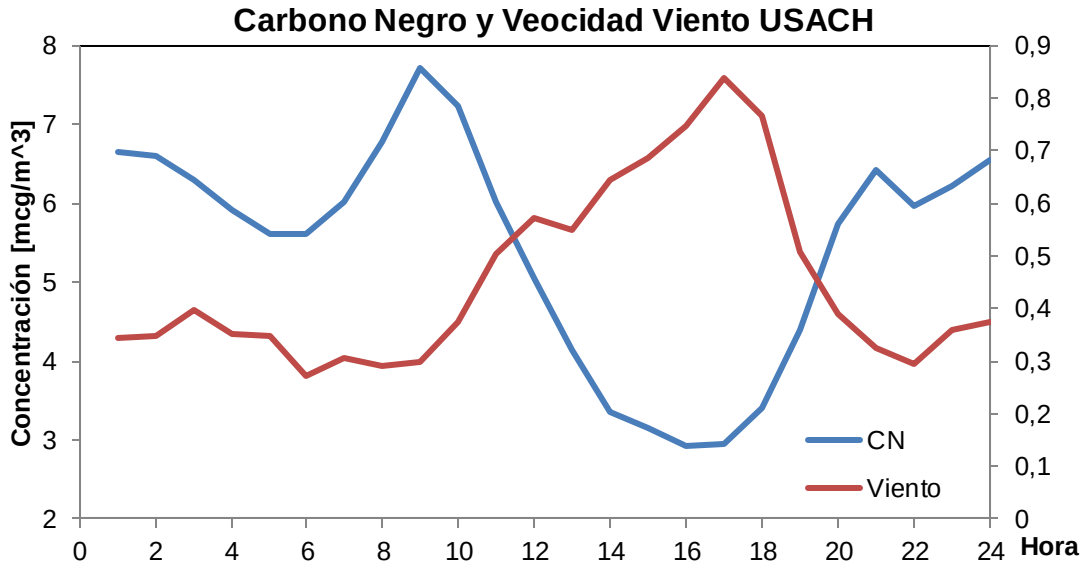

Figura 6.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación USACH, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*

En la Figura 6.5 se observa que la variación de las concentraciones de CN en USACH y Pudahuel tienen un perfil similar, pero las concentraciones en USACH son casi siempre mayores que en Pudahuel.

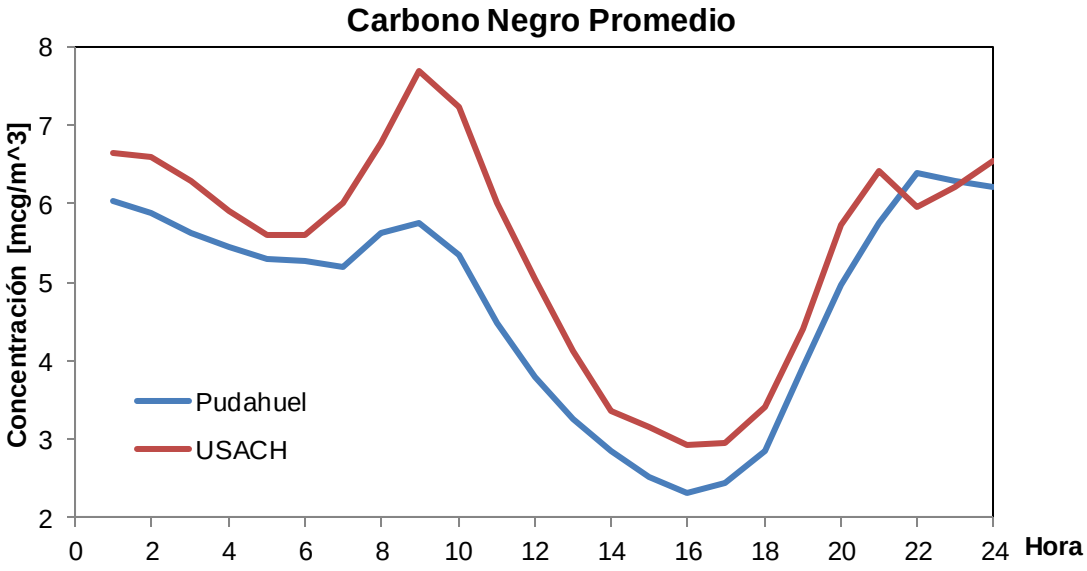

Figura 6.5 ***Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN, para cada hora del día en las estaciones USACH y Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.***

Tanto USACH como Pudahuel son zonas urbanizadas, por lo que un aumento en el flujo de viento significa mayor dispersión de contaminantes locales. También se observa en la Figura 6.6 que las velocidades del viento en USACH son siempre menores que en Pudahuel, lo cual es consecuente con el hecho de que las concentraciones sean mayores.

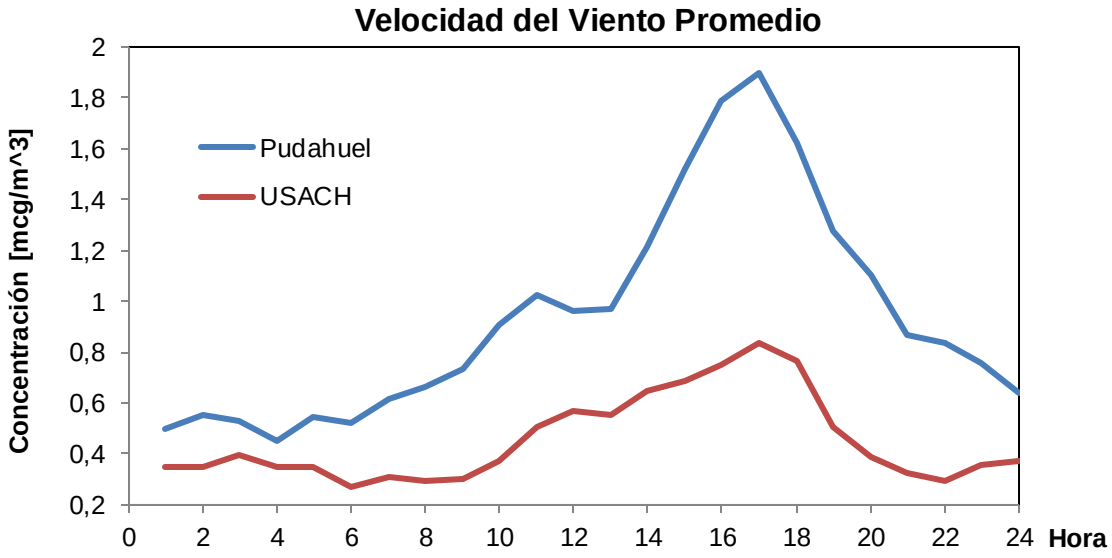

Figura 6.6 ***Gráfico que ilustra una comparación entre las velocidades del viento, para cada hora del día en las estaciones USACH y Pudahuel, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.***

Otra posible explicación para el hecho de que las concentraciones en USACH sean mayores que en Pudahuel, es que la estación USACH se encuentra cerca de importantes fuentes de CN como indica la Figura 6.7, entre las cuales se encuentra la calle Alameda Lib. Bernardo O`Higgins, una de las calles de mayor flujo vehicular de la ciudad.

Cerca de la estación USACH se encuentran también 2 terminales de buses, mientras que cerca de la estación Pudahuel no fueron encontradas fuentes sobresalientes de emisiones de CN adicional a la calle San Pablo.

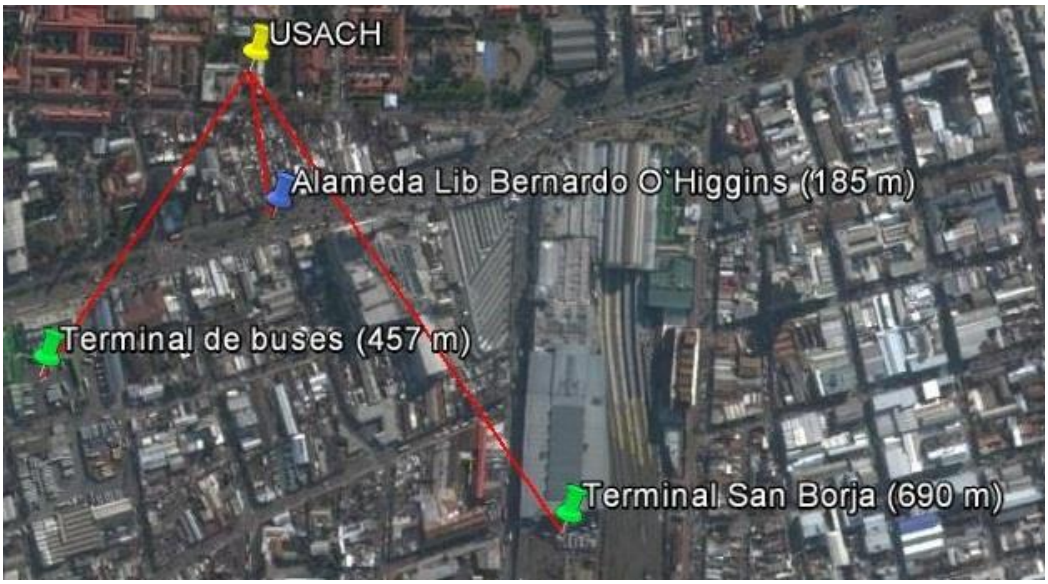

Figura 6.7 Imagen que ilustra 3 importantes fuentes de CN cercanas a la estación de monitoreo USACH.

6.3.2 Análisis estaciones San Cristóbal y Las Condes.

Al analizar los gráficos de la estación San Cristóbal (ver Figura 6.8) y la estación Las Condes (ver Figura 6.9) se observa lo siguiente:

- No se observa la correlación inversa entre velocidad del viento y concentración de CN en la estación San Cristóbal, de hecho cerca de las 12:00 hrs la velocidad del viento aumenta y las concentraciones también, dando a entender que el aumento de los vientos en vez de dispersar emisiones locales, trae contaminación desde otras zonas.
- En Las Condes se observa una correlación inversa pero solo por momentos, uno al final del día y otro cerca de las 6:00 hrs.
- En Las Condes las concentraciones aumentan durante casi todo el día y disminuyen en la noche y la madrugada.

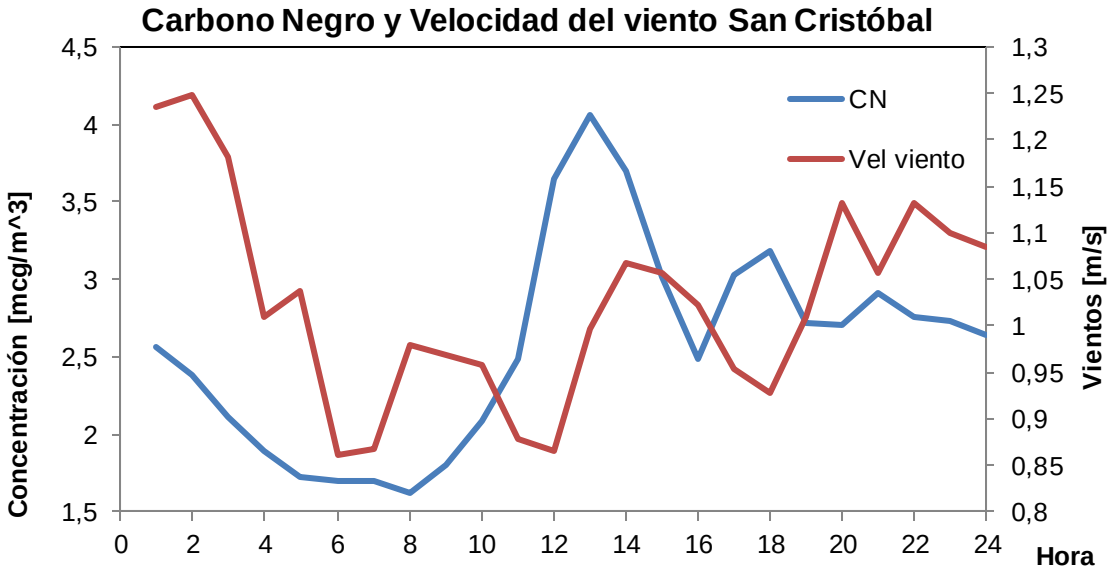

Figura 6.8 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación San Cristóbal, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*

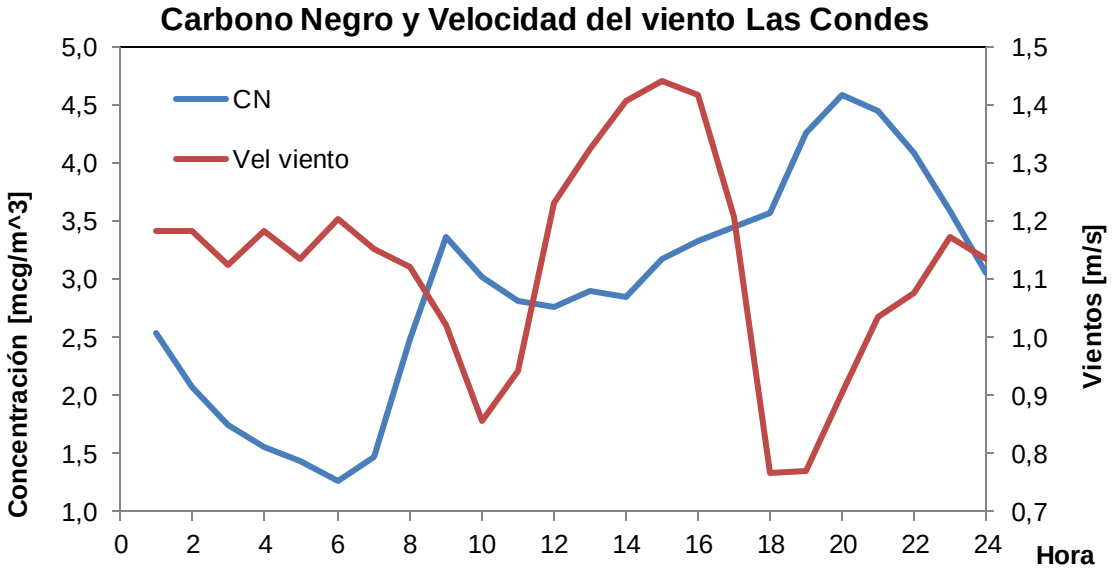

Figura 6.9 *Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN y la velocidad del viento, para cada hora del día en la estación Las Condes, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*

6.3.3 Comparativa entre las 4 estaciones de monitoreo.

En la Tabla 6-2 se resumen las conclusiones obtenidas en los análisis de los gráficos de sección 6.3.

Tabla 6-2 Tabla que resume las conclusiones obtenidas del análisis de la sección 6.3

Horario	Pudahuel/USACH	San Cristóbal/Las Condes
Mañana	Se observan vientos de baja velocidad y altas concentraciones que aumentan más cerca de las 8:00 hrs, coincidentes con el tráfico vehicular.	Se observa un mínimo en las concentraciones que comienza a aumentar cerca de las 8:00 hrs en Las Condes coincidentemente con el máximo tráfico vehicular y en San Cristóbal un par de horas después.
Tarde	Se observa el máximo en la velocidad del viento y un mínimo en las concentraciones, sugiriendo que este las transporta hacia otro lugar.	Se observa un máximo en las concentraciones de San Cristóbal a pesar de un aumento en la velocidad del viento y un aumento constante en Las Condes de las concentraciones, la velocidad del viento no cambia significativamente. Los vientos en vez de limpiar la zona traen CN desde otro lugar.
Noche	Se observa que disminuyen velocidades del viento y aumentan las concentraciones, tendencia que se mantiene así hasta cerca de las 6:00 hrs.	Se observa que aumentan velocidades del viento y disminuyen las concentraciones, tendencia que se mantiene así hasta cerca de las 6:00 hrs.

El comportamiento de la USACH y Pudahuel es similar en cuanto a las variaciones diarias, sin embargo la estación San Cristóbal difiere significativamente de estas últimas (ni siquiera obedece instantáneamente al horario del aumento de tráfico vehicular), pero tiene una diferencia geográfica importante y es que se encuentra a 280 [m] de altura con respecto al pie del cerro (880 [msnm]).

La estación Las Condes por su parte también difiere y posee una diferencia geográfica importante, esta se encuentra aproximadamente a 2.830 [m] al oeste del pie del cerro provincia (donde también se observa un valle) y a 3.283 [m] de una conexión con el Valle del Mapocho, uno de los principales canales de ventilación de la ciudad (ver Figura 6.10).

Figura 6.10 ***Imagen que ilustra la distancia entre la estación Las Condes y el pie del Cerro Provincia y una conexión con el valle del Mapocho.***

Debido a la importancia de la geografía/topografía para el análisis de transporte de contaminantes se procede a hacer un análisis geográfico.

6.4 Análisis geográfico

La ciudad de Santiago posee una geografía/topografía y meteorología muy desfavorables para la dispersión de contaminantes, debido a que se encuentra encerrada por cordones montañosos (ver Figura 6.11), lo que genera una escasa ventilación en especial en los meses de invierno. Al oriente de la ciudad se encuentra la Cordillera de los Andes que posee una altura promedio que sobrepasa los 4.500 [msnm], los principales canales de ventilación de esta zona y de la ciudad son los valles del Maipo y del Mapocho. Al poniente, la cordillera de la costa sobrepasa los 1200 [msnm] en promedio, siendo el valle de Melipilla el principal canal de ventilación de la zona y uno de los principales para la ciudad.

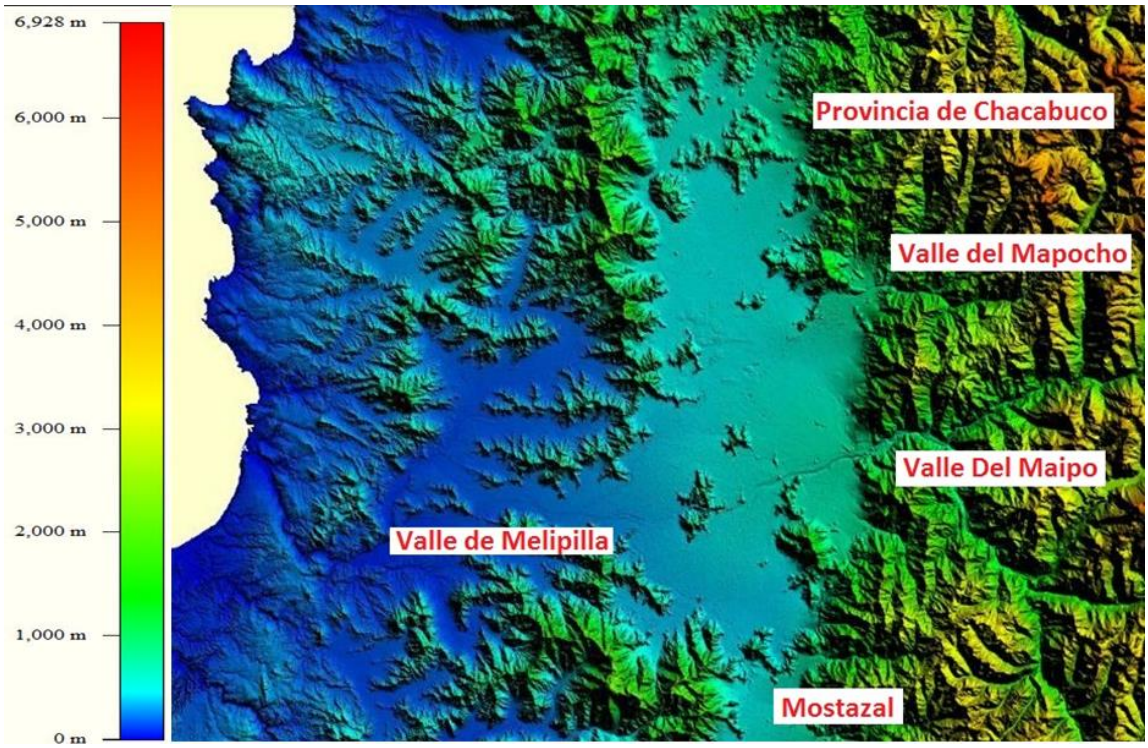

Figura 6.11 Mapa de la Macro zona Central, donde se ilustran con diferentes colores las diferentes alturas con respecto al nivel del mar y se nombran los principales canales de ventilación de la ciudad de Santiago.

En el Norte se encuentra la provincia de Chacabuco y al sur la zona de Mostazal, canales de ventilación para los vientos en direcciones Norte-Sur y Sur-Norte.

6.4.1 Canales de ventilación

Los principales canales de ventilación de Santiago se encuentran en los valles de Melipilla, Mapocho, Maipo y las estaciones de monitoreo más cercanas a estos canales son las estaciones de Talagante, Las Condes y Puente Alto, respectivamente. Por lo tanto el estudio de estas últimas entrega una idea general del comportamiento de los vientos, debido a ello, se procede a analizar un gráfico de promedios de datos por hora, para las direcciones del viento en dichas estaciones, para los meses de junio, julio y agosto del año 2013 (ver Figura 6.12).

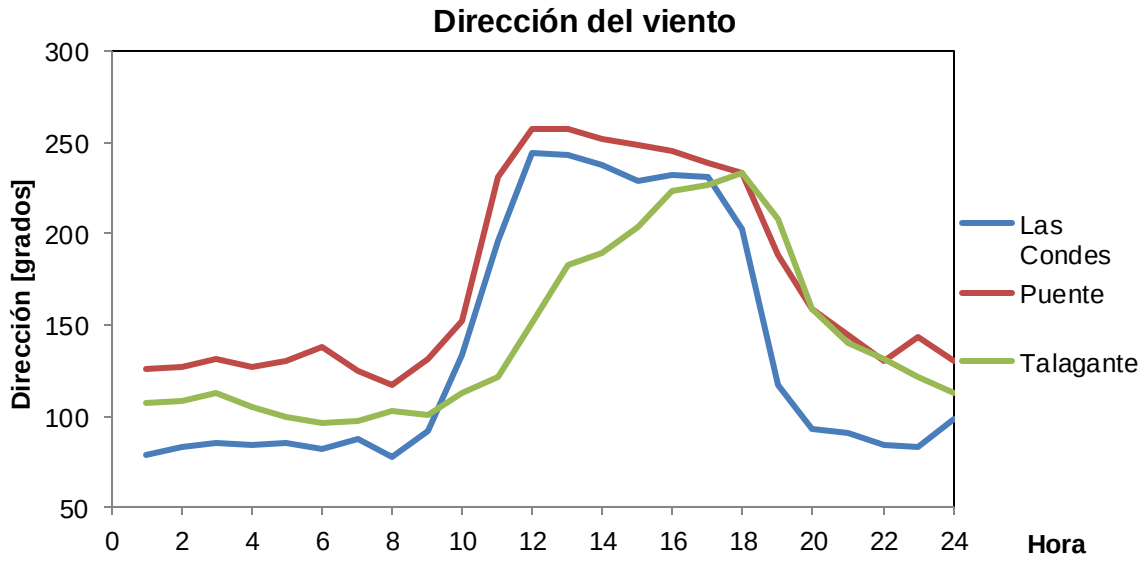

Figura 6.12 *Gráfico que ilustra una comparación entre las direcciones del viento de 3 estaciones durante junio, julio y agosto del 2013.*

Se observa que en el horario comprendido entre 12:00 y las 19:00 hrs hay un cambio en la dirección de los vientos. Este cambio ocurre de manera paulatina en la estación Talagante y de forma más inmediata en las otras 2 estaciones. Este horario es de especial interés para el estudio del transporte de contaminantes debido a que junto al viento cambia la dirección de transporte de contaminantes.

6.5 Construcción e interpretación de las Rosas de Vientos

Las rosas de vientos son gráficos radiales bidimensionales que ilustran velocidad y dirección del viento para un intervalo de tiempo determinado. Para construirlas se consideran todos los datos de velocidad y dirección en el intervalo de tiempo que se desea graficar, estas se construyen con un algoritmo específicamente desarrollado para MATLAB.

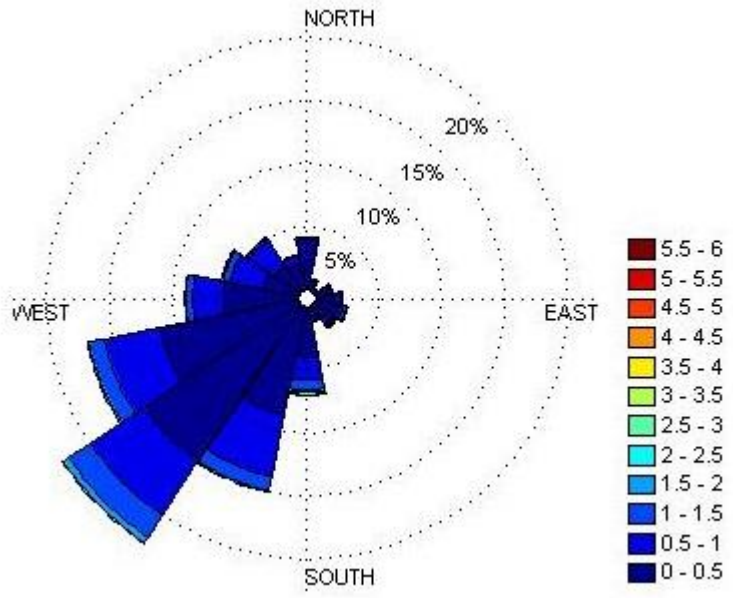

Figura 6.13 Rosa de vientos correspondiente al mes de julio del 2013 en la estación USACH.

En la Figura 6.13 se ilustra la Rosa de Viento correspondiente al mes de julio del 2013 (por ende para construirlas se consideraron todos los datos del mes de julio del 2013). El centro de la rosa representa la ubicación de la estación de monitoreo, las figuras de colores que apuntan hacia el centro representan la dirección desde la cual viene el viento hacia el sector de monitoreo.

Los diferentes colores representan la velocidad de estos vientos, que se encuentran tabulados a la derecha de la figura (En este estudio se utilizará la convención de que dichos valores siempre estarán en unidades de [m/s]).

Entre mayor sea el área de las figuras de colores, significa que durante un mayor porcentaje de tiempo el viento se movió en esa dirección, los círculos concéntricos de líneas punteadas indican el valor de dicho porcentaje.

6.6 Análisis de transporte

Para determinar hacia dónde se traslada el CN emitido en diferentes lugares, se utiliza el análisis de rosas de viento en un mapa de Santiago. Las rosas se encuentran centradas en la ubicación de las estaciones de monitoreo.

Para realizar este análisis se escogen los datos de junio del 2013, los meses de julio y agosto tienen un comportamiento análogo.

6.6.1 Análisis, horario de la tarde, entre 12:00 – 19:00 hrs.

Para escoger este rango de horario se considera el análisis relacionado con las direcciones del viento de la Figura 6.12 en la sección 6.4.1.

En el análisis de la sección 6.3 (resumido en la parte de la tarde de Tabla 6-2) se indica que la concentración de CN disminuye y la velocidad de los vientos aumenta en las zonas de USACH y Pudahuel indicando que los contaminantes se trasladan a otro lugar, mientras que en las estaciones San Cristóbal y Las Condes las concentraciones aumentan.

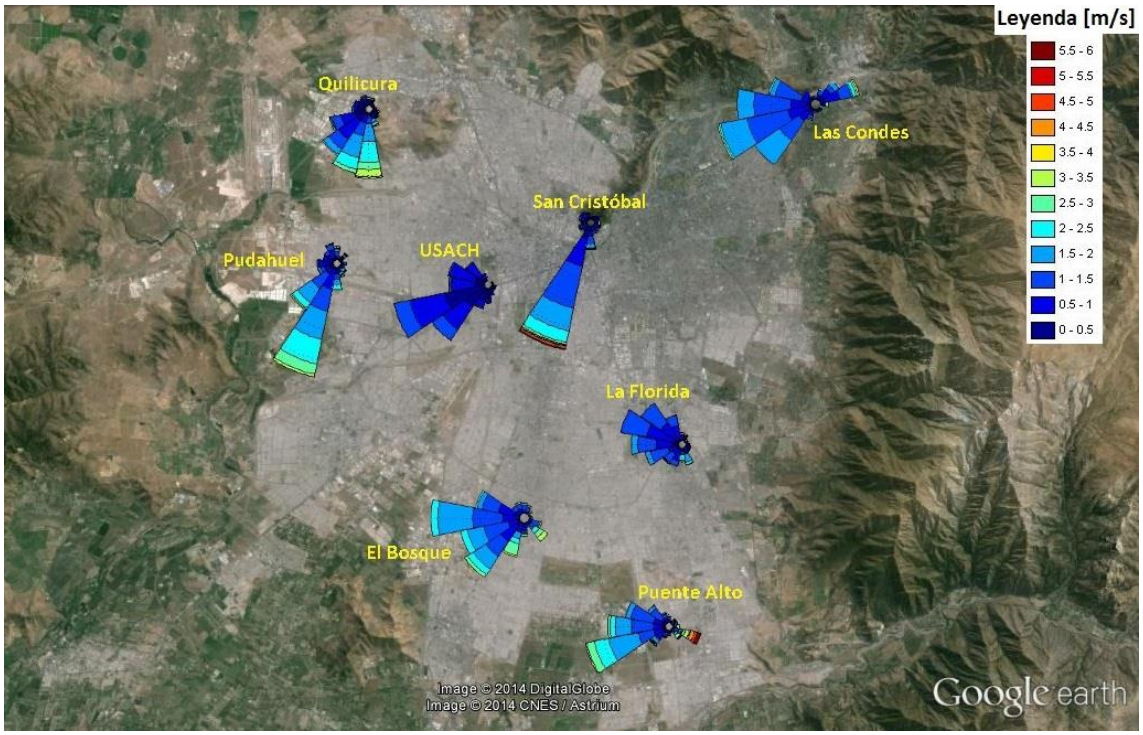

Figura 6.14 ***Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo durante junio 2013 entre las 12:00 y las 19:00 hrs.***

En la Figura 6.14 se observa que los vientos de la zona de Pudahuel vienen del sur y van en dirección a Quilicura, esto sugiere que las concentraciones de CN de Pudahuel se trasladan a Quilicura, donde lamentablemente no existe una estación de monitoreo de CN para corroborarlo. No se observan vientos significativos que conecten la estación Pudahuel con las demás estaciones visitadas durante la campaña, por lo que se descarta transporte de CN hacia dichas estaciones en este horario.

Las estaciones La Florida, El Bosque y Puente Alto apuntan en dirección al Valle del Maipo corroborando que esta zona es uno de los principales canales de ventilación y descartando el transporte de CN hacia alguna de las estaciones de monitoreo visitadas durante la campaña.

Los vientos de la estación USACH indican en dirección a la estación San Cristóbal y Las Condes. Considerando que en USACH las concentraciones disminuyen mientras que en San Cristóbal y Las Condes aumentan se infiere que existe transporte de CN desde USACH hacia estas zonas.

La estación San Cristóbal presenta vientos que vienen mayoritariamente desde el sur- sur- oeste por lo cual es posible inferir que el destino del CN arrastrado desde USACH se va hacia el Norte de San Cristóbal, sin embargo hay que considerar que ésta última estación de monitoreo se encuentra a 880 [msnm] y 280 [m] de altura sobre el pie del cerro, por lo que el nivel de los vientos podría no seguir las mismas líneas de trayectoria que los que pasan por la estación USACH, razón por la cual no es posible asegurar que el incremento de las concentraciones de CN en esta estación tenga como principal origen la zona de USACH, pues hay una amplia zona urbanizada al sur de San Cristóbal.

La estación Las Condes tiene una componente predominante de vientos que vienen del sur-oeste, reforzando la idea de que existe conexión con la zona de USACH. Si sucediera que los vientos de San Cristóbal transportaran el CN originado en USACH hacia el norte, no hay razón para pensar que la totalidad del CN se iría hacia esa dirección, por lo cual la conexión entre USACH y Las Condes no se descarta.

La Figura 6.15 resume las zonas entre las cuales se observa transporte de CN para este horario analizadas en esta sección.

Figura 6.15 ***Imagen que ilustra el transporte de CN en la ciudad de Santiago durante junio 2013 entre las 12:00 y las 19:00 hrs.***

6.6.2 Análisis, horario de la mañana, entre 7:00 – 11:00 hrs.

Este horario se caracteriza por ser posterior al momento de mayor tráfico vehicular en el día, por lo que su análisis sirve para determinar el destino del CN emitido en dicho momento. Durante este horario los principales canales de ventilación de la ciudad mantienen una dirección de los vientos constante, para el término de éste ocurre un cambio de dirección de los vientos en dichos canales.

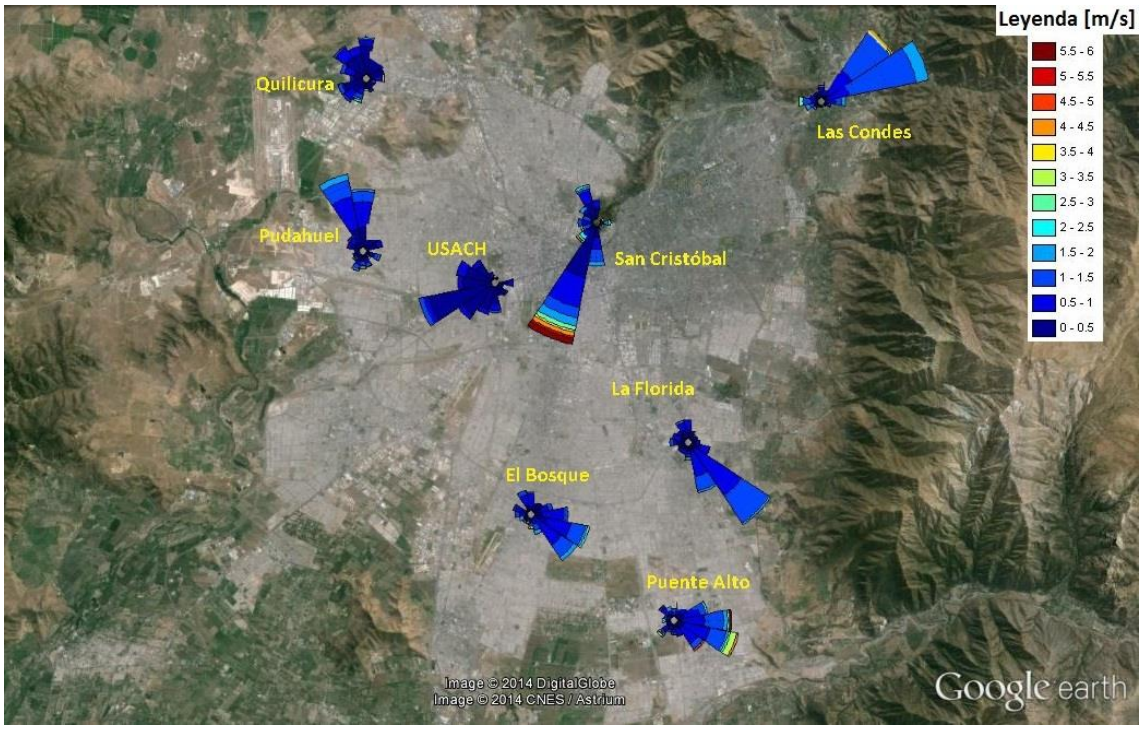

Figura 6.16 ***Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo, durante junio 2013 entre las 7:00 y las 11:00 hrs.***

De la Figura 6.16 se observa nuevamente para la estación Pudahuel una conexión con la zona de Quilicura, sin embargo esta vez es en sentido opuesto, sugiriendo que existe transporte de Quilicura a Pudahuel. El destino de las emisiones de Pudahuel nuevamente no se ve conectado con ninguna de las estaciones de monitoreo visitadas, más bien parece irse hacia el sur.

En el análisis de la sección 6.3 (resumido en la parte de la mañana de Tabla 6-2) se indica que San Cristóbal aumenta sus concentraciones de CN horas después que el resto de las estaciones, debido a que no hay tráfico vehicular cerca de la estación San Cristóbal. De esto se infiere que el aumento en el CN en San Cristóbal es originado por las emisiones de tráfico vehicular de otros sectores.

Debido a que tanto la estación USACH como San Cristóbal no cambian la dirección predominante de sus vientos, nuevamente se concluye la existencia de transporte de CN desde USACH a San Cristóbal.

La estación Las Condes invierte la dirección de sus vientos, los cuales provienen del Valle del Mapocho, una zona no urbanizada por lo que se espera que los vientos limpiasen la zona. Sin embargo en la sección 6.3 se observó que las concentraciones de CN aumentan en el horario punta entre las 6:00 y 8:00 hrs, pero dicho aumento se le atribuye a emisiones locales no a transporte de CN desde otro lugar. Aproximadamente a las 10 hrs se observa en la Figura 6.9 una disminución de contaminantes debido a la limpieza ejercida por los vientos del Valle.

Debido a que la componente de vientos en la Estación San Cristóbal es prácticamente nula en la zona del este, no es posible inferir que existe transporte de CN desde Las Condes a San Cristóbal.

Las estaciones Puente Alto, El Bosque y La Florida muestran vientos provenientes del Valle del Maipo, La estación La Florida apunta en dirección a San Cristóbal por lo que una posible conexión entre éstas últimas no es descartable.

6.6.3 Análisis, horario de la noche y madrugada, entre 20:00 – 6:00 hrs.

Para escoger este horario se consideró que existe un cambio de dirección posterior a las 19:00 hrs en los principales canales de ventilación en la ciudad y que estos vientos transportarán el CN negro emitido en uno de los horarios de mayor tráfico vehicular entre las 19:00 y 20:00 hrs.

En la Figura 6.17 se observa que el perfil de vientos de la estación Pudahuel no tiene una dirección predominante, de todas maneras se observa un cierto predominio del viento en direcciones norte-sur por sobre las direcciones este-oeste. Considerando también que los vientos son de baja velocidad y las concentraciones aumentan durante la noche y disminuyen lentamente en la madrugada, se infiere que la dispersión de CN es baja (la más baja de los 3 rangos de horario). En caso de existir transporte significativo nuevamente esta estación se ve más conectada con la zona de Quilicura que con las estaciones de esta campaña.

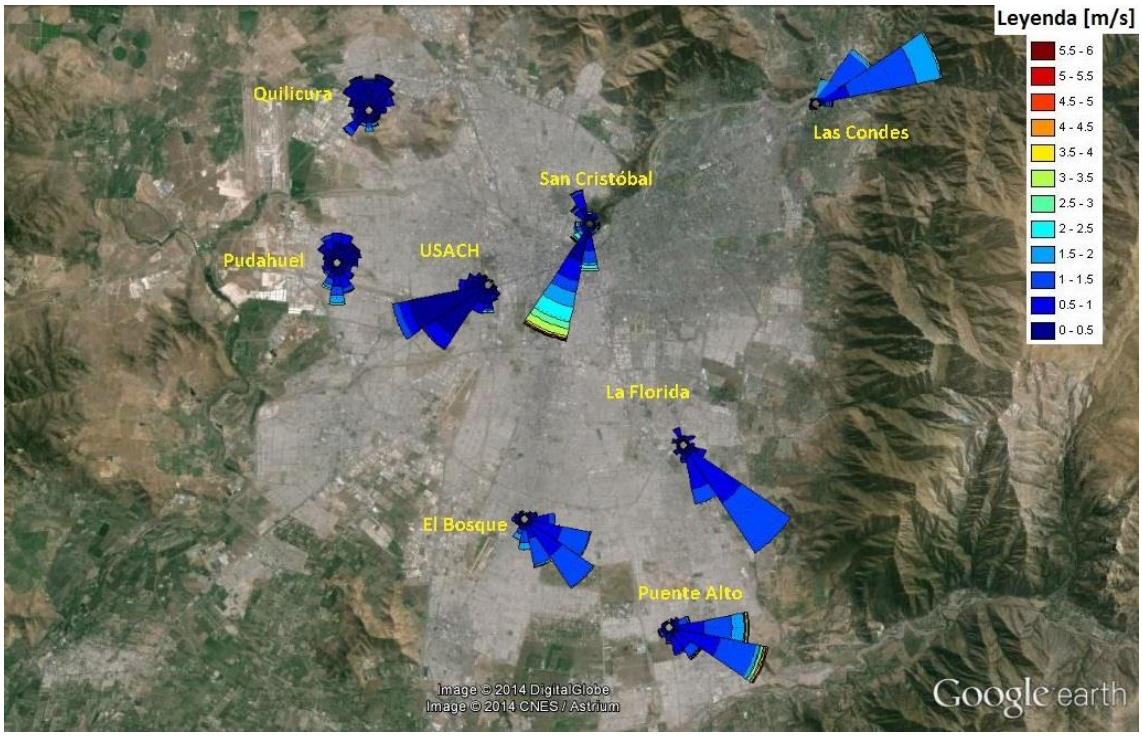

Figura 6.17 ***Imagen que ilustra la ciudad de Santiago vista desde arriba con rosas de viento centradas en las estaciones de monitoreo, durante junio 2013 entre las 20:00 y las 6:00 hrs.***

El resto de las estaciones tiene un perfil de vientos análogo al del horario comprendido entre las 7:00 y las 11:00 hrs, sin embargo la dispersión de CN, disminuye drásticamente en las zonas Pudahuel/USACH y no así en /San

Cristóbal/Las Condes, donde se observa que las concentraciones disminuyen durante casi todo el periodo.

En la estación San Cristóbal nuevamente no se observan vientos provenientes del oriente por lo que no es posible determinar la existencia de transporte de CN, hacia esta zona desde Las Condes.

La Figura 6.18 resume las zonas entre las cuales se observa transporte de CN para el horario comprendido entre las 20 y las 11 hrs.

Figura 6.18 ***Imagen que ilustra el transporte de CN en la ciudad de Santiago durante junio 2013 entre las 20:00 y las 11:00 hrs.***

La explicación de la baja capacidad de dispersión de contaminantes en las zonas Pudahuel/USACH en el horario de la noche y la madrugada se le atribuye

a la existencia del fenómeno de inversión térmica. En la siguiente sección se analiza este fenómeno y porqué solo afecta a las zonas de Pudahuel/USACH.

6.7 Inversión Térmica

Bajo condiciones normales el aire es más cálido entre más cerca este de la superficie, debido a que la temperatura de ésta lo calienta. El aire más cálido es menos denso por lo que tiende a ascender, luego el aire que baja es más frio y se vuelve a calentar por la cercanía con la superficie por lo que asciende generando constantes movimientos ascendentes de aire caliente vertical y movimientos descendentes de aire frio.

Esto es de especial utilidad en los valles debido a que el aire ascendente lleva consigo contaminantes que una vez arriba se dispersan (ver Figura 6.19).

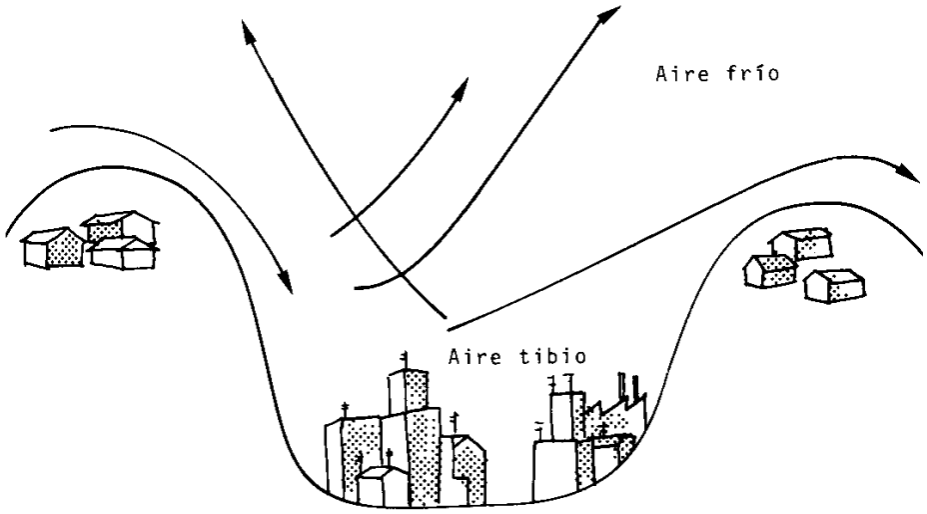

Figura 6.19 Imagen que ilustra las condiciones normales de ventilación para un valle

Pero un fenómeno que ocurre en las noches de invierno es que debido a las bajas temperaturas la superficie mantiene frio el aire circundante, el cual llega a ser más frio que el aire de la capa que se encuentra más alta. Como este aire frio es más pesado no asciende evitando el movimiento de masas de aire vertical y con ello evitando la dispersión de contaminantes (ver Figura 6.20).

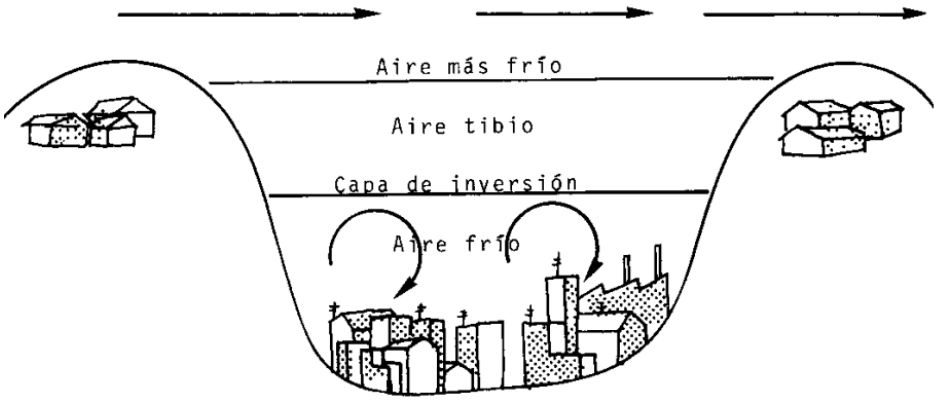

Figura 6.20 Imagen que ilustra condiciones de inversión térmica para un valle

La ciudad de Santiago es afectada por la inversión térmica, es por ello que durante la noche y la madrugada la dispersión de contaminantes de las zonas Pudahuel/USACH se ve tan disminuida. En el caso de las estaciones Las Condes y San Cristóbal si se observa dispersión de contaminantes durante la noche/madrugada, eso es debido a que Las Condes está muy cerca del valle del Mapocho, uno de los principales canales de ventilación de la ciudad y San Cristóbal se encuentra por sobre la capa de aire frio de la inversión térmica.

Para corroborar que San Cristóbal se encuentra por sobre la capa de aire frío se comparan sus temperaturas con la estación de monitoreo más cercana perteneciente a la Red MACAM, la estación Independencia que se encuentra a 1,7 [km] de distancia de la cima del cerro como indica la Figura 6.21.

Figura 6.21 *Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación San Cristóbal y la estación Independencia separadas por una línea de 1,7 [km] de distancia.*

En la Figura 6.22 se presentan los datos de las temperaturas medidas durante el mes de junio en San Cristóbal e Independencia. Donde se demuestra que efectivamente durante la madrugada la temperatura es mayor en San Cristóbal y por ende esta zona no es afectada por el fenómeno de inversión térmica.

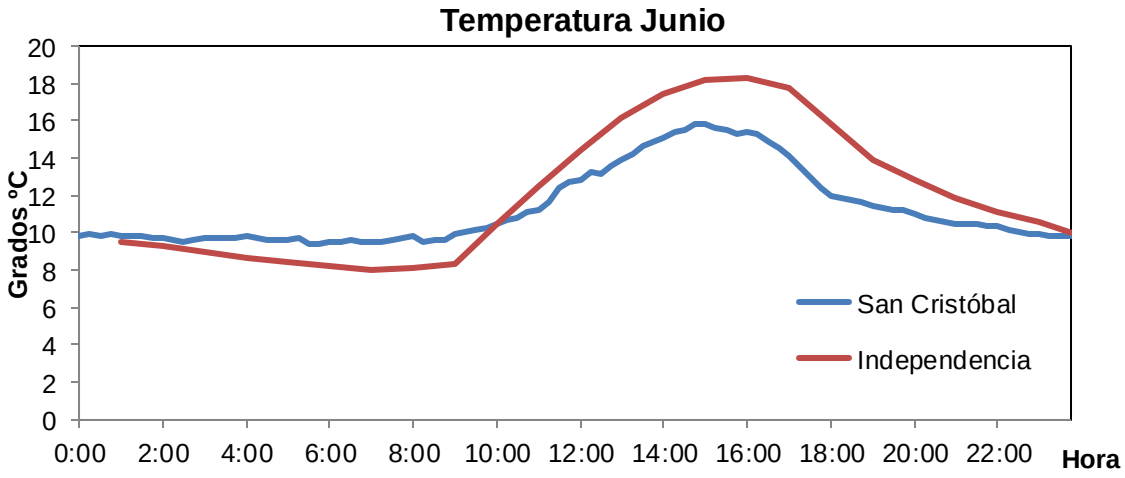

Figura 6.22 *Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de junio del 2013.*

En el mes de julio es posible ver que en promedio la inversión térmica se presenta un poco menos pronunciada (anexo Figura 8.4), pero sigue presente, mientras que en el mes de agosto ya no se refleja dicho fenómeno en promedio (ver Figura 6.23).

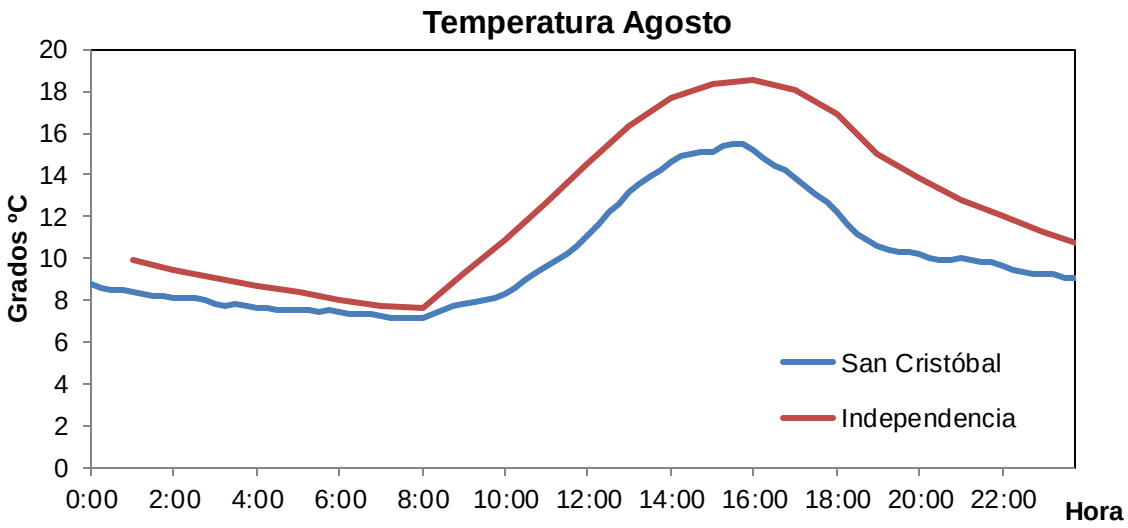

Figura 6.23 ***Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de agosto del 2013.***

Que el fenómeno de inversión térmica no se presente en promedio no quiere decir que nunca haya pasado nunca, en la Figura 6.24 se ilustra un día de inversión térmica en agosto.

En la Figura 6.25 se puede ver una capa de niebla que parece estar bajo la capa de aire frio de la inversión térmica.

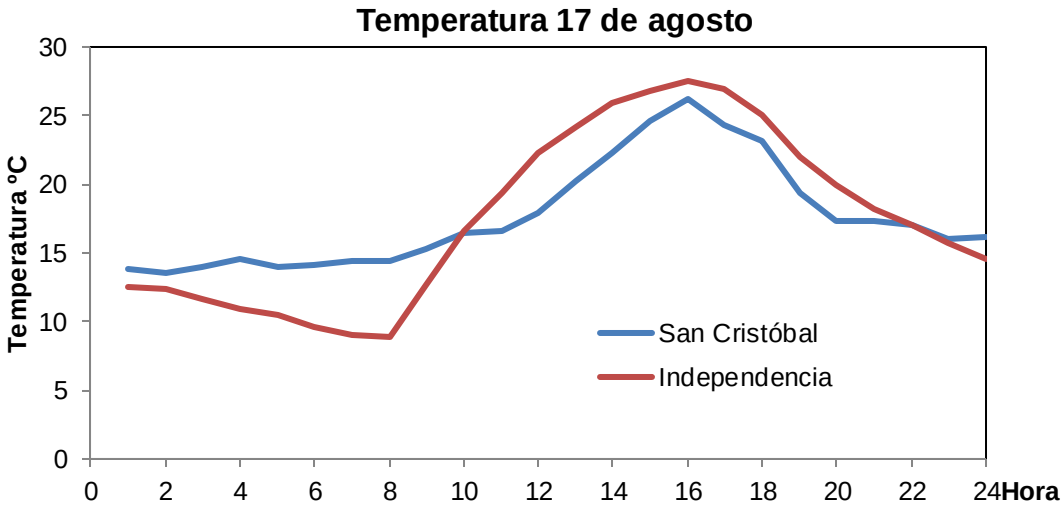

Figura 6.24 *Gráfico que muestra una comparativa entre las temperaturas medidas en la estación Independencia y San Cristóbal el 17 de agosto del 2013.*

Figura 6.25 *Foto tomada el día 10 de julio del 2013 a las 18:11 hrs desde el cerro San Cristóbal donde se puede observar que la cima del cerro al horizonte sobresale de una capa de niebla.*

6.8 Casos particulares

6.8.1 06 de Agosto

Un caso particular que desafía la hipótesis de transporte de CN desde USACH hacia las estaciones al oriente de ésta, es el ocurrido el 6 de agosto.

Este día los niveles de contaminación en USACH fueron aproximadamente el doble que en el promedio del mes, mientras que las concentraciones de San Cristóbal/Las Condes son levemente superiores al promedio como se ilustra en Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Tabla que ilustra los valores promedio de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para el día 6 de agosto y para el mes de agosto completo.

	6 de agosto	Promedio mensual
USACH	11,02	5,11
San Cristóbal	2,96	2,04
Las Condes	3,59	2,37

Se observa en Figura 6.26 que la tendencia durante el mes fue que las concentraciones de CN disminuyan en USACH durante la tarde, sin embargo ese día en lugar de disminuir aumentaron.

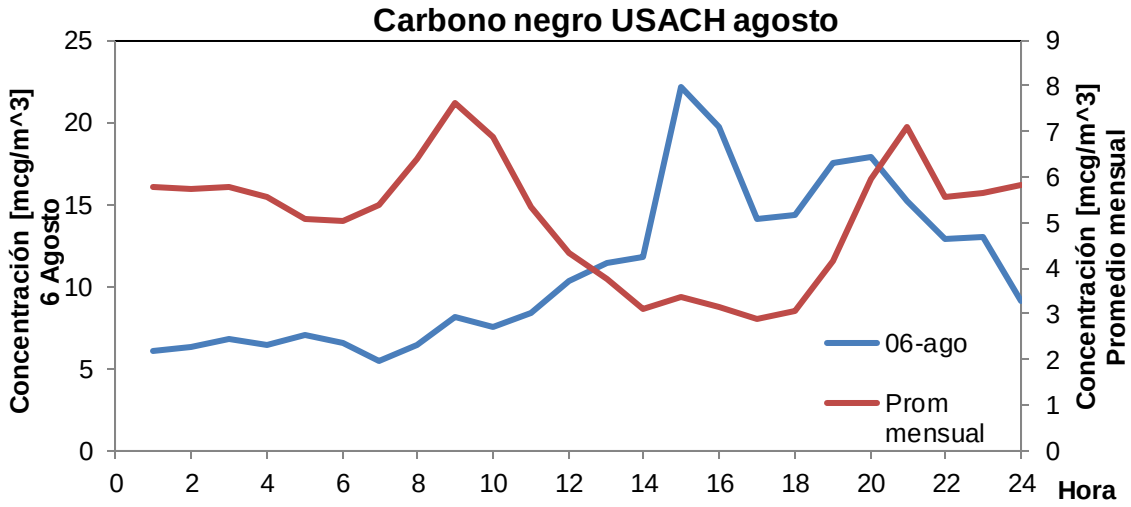

Figura 6.26 Gráfico que ilustra una comparación entre las concentraciones de CN de la estación USACH para el día 6 de agosto (Eje izquierdo para las ordenadas) y para el promedio de todo el mes de agosto (Eje derecho ordenadas).

La razón por la cual este aumento de CN en USACH no se ve reflejado en las estaciones San Cristóbal/Las Condes (lugares hacia los cuales debiera transportarse), es porque como se indica en la Figura 6.27, el viento en la estación Las Condes ese día apunta en dirección opuesta a como lo hace en promedio durante todo el mes. Debido a esto el CN de USACH no pudo llegar hasta Las Condes, durante ese día.

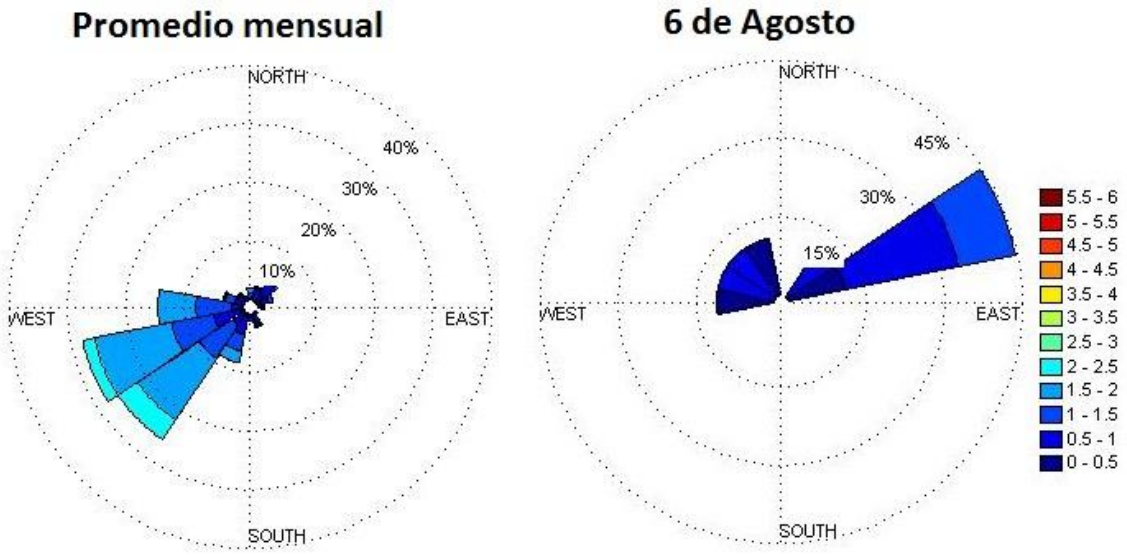

Figura 6.27 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 15:00 y las 18:00 hrs para la estación Las Condes durante el mes de Agosto (izquierda) y el día 6 de agosto (Derecha).

6.8.2 Del 10 al 13 de Julio

Entre los días 10 y 13 de julio del 2013 se observa nuevamente que las concentraciones de Pudahuel y USACH son inusualmente altas con respecto a sus valores promedios, mientras que en San Cristóbal/Las Condes son solo levemente mayores que sus promedios (ver Tabla 6-4).

Tabla 6-4 Tabla que ilustra los valores promedio de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para el mes de julio y los días 10, 11, 12 y 13 de julio.

	Promedio mensual	Del 10 al 13 de julio
Pudahuel	3,6341	7,3268
USACH	5,6909	10,7137
San Cristóbal	2,3170	2,4259
Las Condes	2,9218	3,2303

De existir transporte desde USACH a San Cristóbal un aumento en las concentraciones en la zona de USACH debiese significar un aumento en el CN que llega a San Cristóbal. La Figura 6.28 muestra los vientos en USACH durante el horario comprendido entre las 12:00 y las 19:00 hrs, donde se observa que los vientos se movieron en la misma dirección que lo hacen en promedio pero a velocidades mucho más bajas. Esto resultó en una disminución del transporte de CN durante estos días.

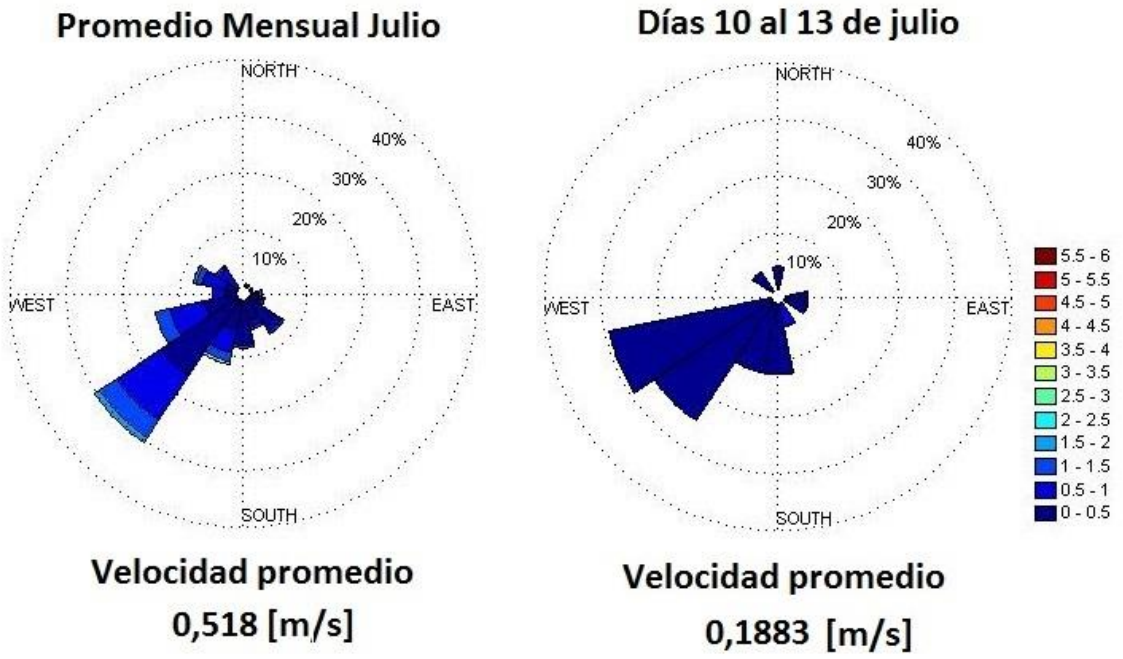

Figura 6.28 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación USACH durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha).

La disminución de transporte de CN desde USACH hacia el este, debiese significar una disminución en el CN medido en Las Condes, sin embargo este aumenta levemente su valor con respecto al promedio mensual. No hay una respuesta precisa para esto, una posibilidad es que hayan sido días de mayores emisiones.

En la Figura 6.29 se muestran las rosas de viento para Pudahuel donde se observa que los vientos mantuvieron direcciones similares y con velocidades mayores, por lo que la dispersión de contaminantes debiese ser mayor, sin embargo las concentraciones también son mayores, esto apoya la idea de que en esos días las emisiones fueron mayores.

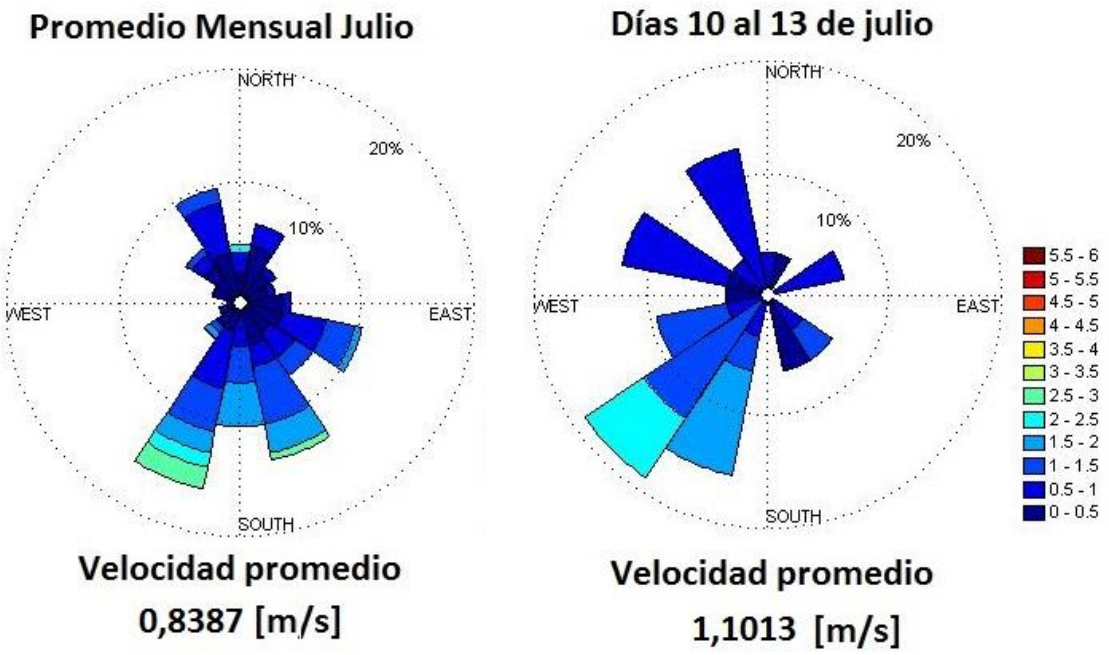

Figura 6.29 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación Pudahuel durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha).

Si se analiza la Figura 6.30 se verá que los vientos de la estación Las Condes se comportan de manera muy similar a la del promedio solo que con una mayor componente de los vientos provenientes del norte, esta vez no ocurre un cambio en la dirección de esta como en el caso particular de agosto.

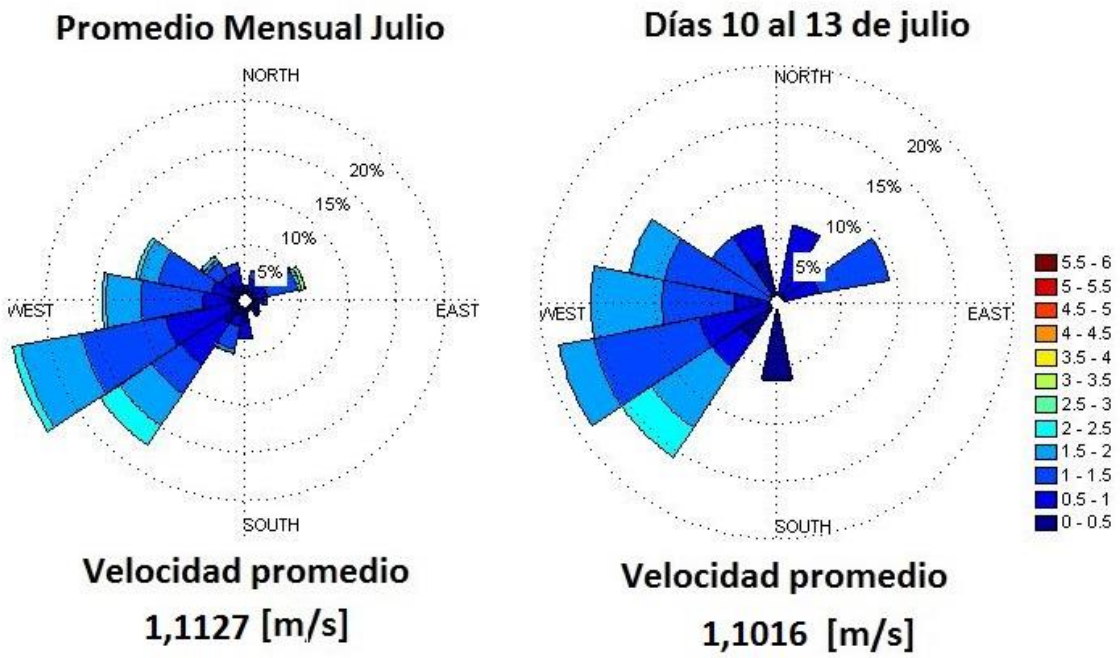

Figura 6.30 Rosas de viento para los horarios comprendidos entre las 12:00 y las 19:00 hrs para la estación Las Condes durante el mes de julio (izquierda) y el periodo comprendido entre los días 10 al 13 de julio (Derecha).

6.9 Modelo de dispersión de contaminantes CONAMA 1996

CONMA-SESMA en conjunto con el reino de Suecia, realizan un análisis de dispersión de contaminantes y campos de vientos utilizando un modelo euleriano de dispersión de contaminantes primarios. El objetivo del análisis es obtener una descripción explícita de la evolución temporal de los campos de viento en la Región Metropolitana, y, más específicamente, realizar un estudio de las trayectorias seguidas por distintos volúmenes de aire dentro del área en cuestión [14].

El estudio analiza vientos horizontales que se mueven a 10 [m] de altura con respecto al suelo, en la Figura 6.31 se ilustran las estaciones de monitoreo usadas para el análisis.

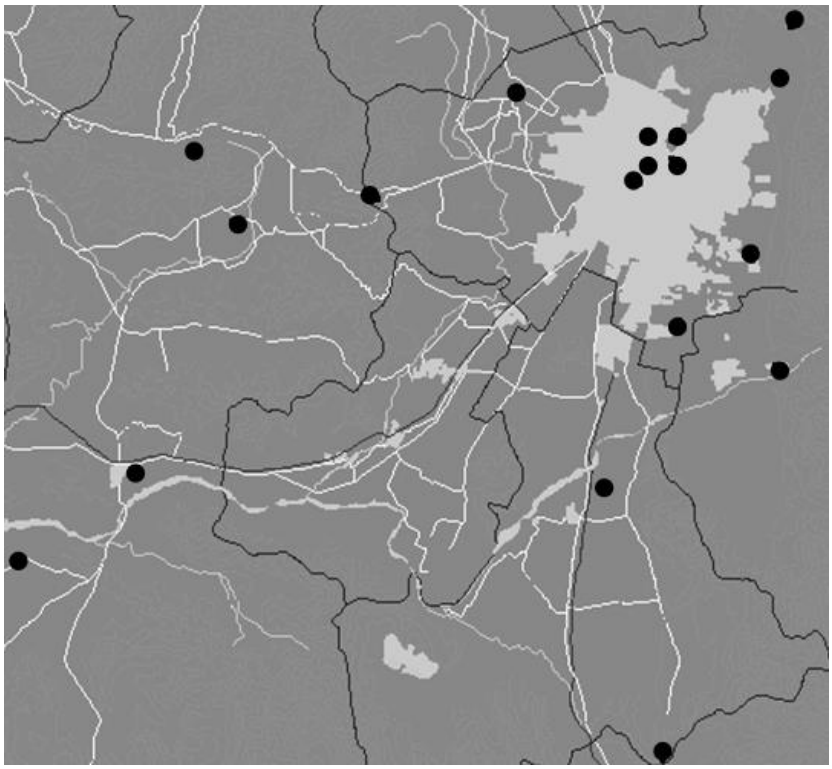

Figura 6.31 Imagen que ilustra las estaciones de monitoreo (puntos negros) utilizadas en la obtención de datos para el análisis de dispersión de contaminantes.

El modelo tiene fortalezas y debilidades como se muestra en la Tabla 6-5, una de ellas es que se subestima la componente norte-sur de los vientos cercanos a los cordones montañosos. Debido a ello se considera un aporte significativo la medición de vientos en la estación San Cristóbal, realizadas en esta tesis, puesto que se entregan nuevos datos de vientos de la componente norte-sur, en una zona que no se había medido antes.

Tabla 6-5 Tabla que muestra las fortalezas y debilidades del modelo de trayectorias de vientos.

Fortalezas	**Debilidades**
En verano la meteorología de Santiago sigue ciclos muy definidos.	No se cuenta con suficiente información de calidad de aire fuera del área urbana como para poder validar los resultados del modelo.
Los días elegidos fueron considerados representativos de las condiciones normales en la Región Metropolitana (Valores de temperatura, velocidad y dirección del viento, dentro del promedio).	Se modela solo días comprendidos entre el 5 y 7 de febrero, del año 1995 (Problema de instalación de nuevas estaciones).
Rapidez y dirección de viento calculadas por el modelo y las medidas las estaciones coinciden casi a la perfección.	Se dispone de muy poca información meteorológica utilizable para toda el área norte del valle de Santiago, y por lo tanto se estima que se subestima la componente norte-sur de los vientos en áreas cercanas a cordones montañosos.

Los resultados del modelo concluyen varios tipos de trayectorias pero solo 2 de ellos pasan cerca de las estaciones de monitoreo visitadas para esta tesis, dichas trayectorias se revisan a continuación.

6.9.1 Vientos originados en el valle de Melipilla

El modelo encuentra 4 trayectorias que inician en el valle de Melipilla, 2 de ellas pasan cerca de las estaciones de monitoreo utilizadas en esta tesis. La primera trayectoria ocurre de día y la segunda de noche, ambas se ilustran en la Figura 6.32.

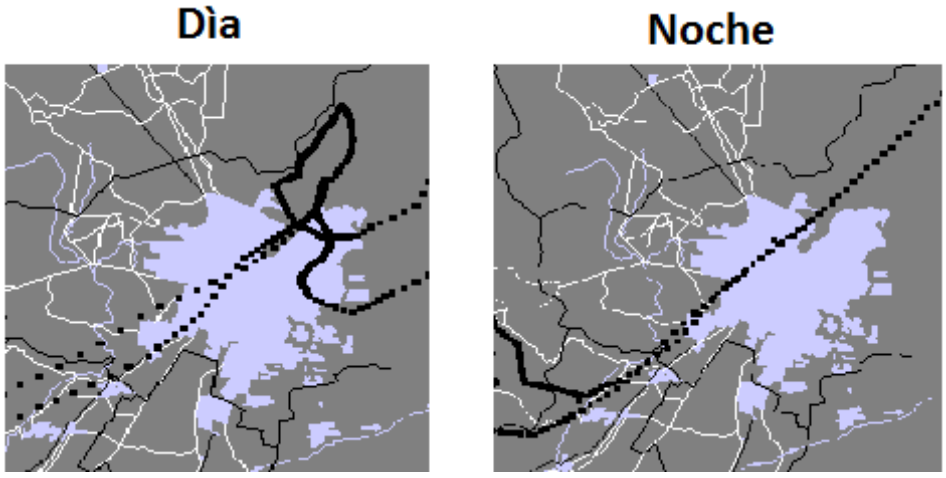

Figura 6.32 Trayectorias de viento obtenidas en el estudio de CONAMA-SESMA.

La trayectoria de día inicia en Melipilla entre las 15:00 y 16:00 hrs, llegando al Valle de Santiago cerca de las 18:00 hrs, pasa por los alrededores del cerro San Cristóbal a las 20:30 hrs y finalmente llega a Las Condes a las 6:00 del día siguiente.

Estas trayectorias se mueven solo por lugares donde existen estaciones de monitoreo de CONAMA, por lo que considera improbable que estos resultados estén significativamente errados.

La trayectoria de la noche comienza en Melipilla entre 21:00 y 22:00 hrs, luego entran al valle de Santiago cerca de Talagante aproximadamente a las 11:00

hrs del día siguiente, después llegan al centro de Santiago cerca de las 15:30 hrs y finalmente llegan al sector de Las Condes y La Dehesa cerca de las 16:00 hrs.

6.9.2 Vientos originados en el centro de Santiago

Se estudian las trayectorias originadas en el centro de Santiago, más específicamente en Plaza Gotuzzo (ver Figura 6.33), estas trayectorias corresponden solo al día 5 de febrero del año 1995.

Figura 6.33 Imagen que ilustra la ubicación de la estación Plaza Gotuzzo.

En la Figura 6.34 se ilustran las diferentes trayectorias que se originan en el centro de Santiago, sus características se explican en Tabla 6-6.

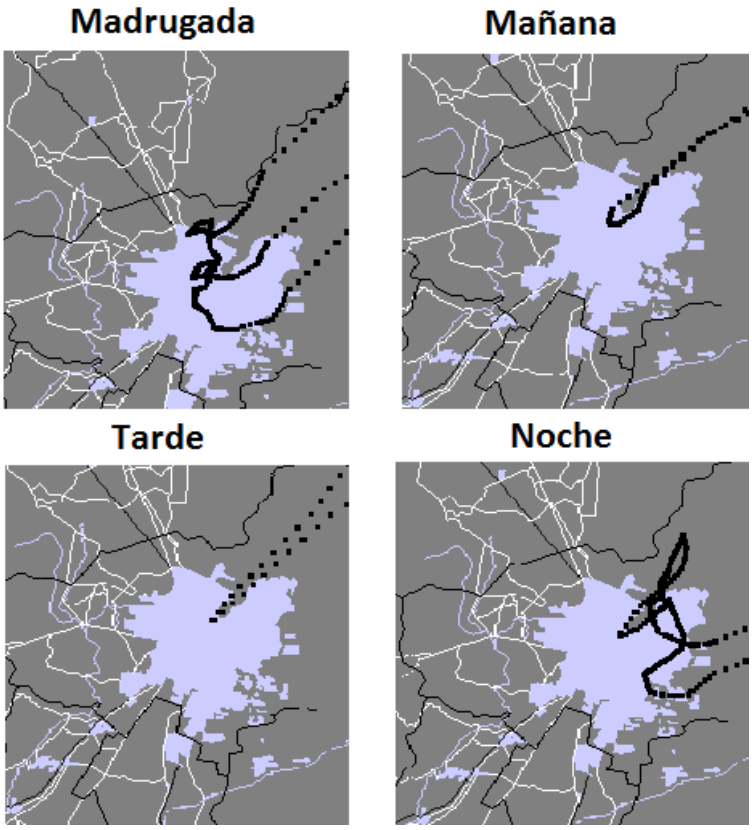

Figura 6.34 Imagen que ilustra trayectorias de viento que se originan en el centro de Santiago.

Tabla 6-6 Tabla que detalla las diferentes trayectorias originadas en el centro de la ciudad.

Trayectoria	Descripción
Madrugada	Circulan por la ciudad, hasta que cerca de las 10:00 son afectadas por los vientos de la mañana y se mueven al noroeste.
Mañana	Se originan cerca de las 9:00, llegan a Las Condes a las 12:20 y finalmente a La Dehesa a las 14:00.
Tarde	Se originan entre as 15:00 y 17:00 y se llegan a La dehesa en aproximadamente 90 minutos.
Noche	Se origina a las 21:00 y se queda circulando en la ciudad durante la noche, en la mañana del día siguiente se dirige al noroeste.

Un problema de compatibilidad entre el modelo y este trabajo, tanto para las trayectorias originadas en centro de la ciudad como las del Valle de Melipilla es que dichas trayectorias se modelan para días de verano, mientras que esta campaña se llevó a cabo durante el invierno.

Considerando que la muestra es de solo 3 días y que se conoce que las velocidades del viento en verano son superiores a las de invierno, los resultados obtenidos por el modelo solo son considerados una referencia para analizar zonas que tienen tendencia a tener trayectorias de viento conectadas, dejando fuera las velocidades de transporte.

De todas maneras el modelo refuerza la hipótesis de que existe transporte de contaminantes desde la zona de USACH hacia San Cristóbal y Las Condes.

6.10 Análisis estaciones de monitoreo

6.10.1 Estación USACH, mediciones de CN

El SIMCA-Q utilizado en la estación USACH se encuentra en el subterráneo del Departamento de Física y toma datos a nivel del suelo por una manguera que sale por la ventana. El personal del laboratorio de óptica y semi-conductores llevo el SIMCA-R a la terraza del 3º piso del Departamento de Física con el objetivo de calibrarlo (ver anexo Figura 8.5).

En la Figura 6.35 se ilustra una relación lineal con coeficiente de correlación $R^2 = 0{,}9412$, obtenida a partir de los datos de CN medidos en el subterráneo y en la Terraza. De lo cual se concluye que una variación en las concentraciones

de CN a nivel del suelo, significa una variación en la misma proporción de las concentraciones de CN en el 3º piso.

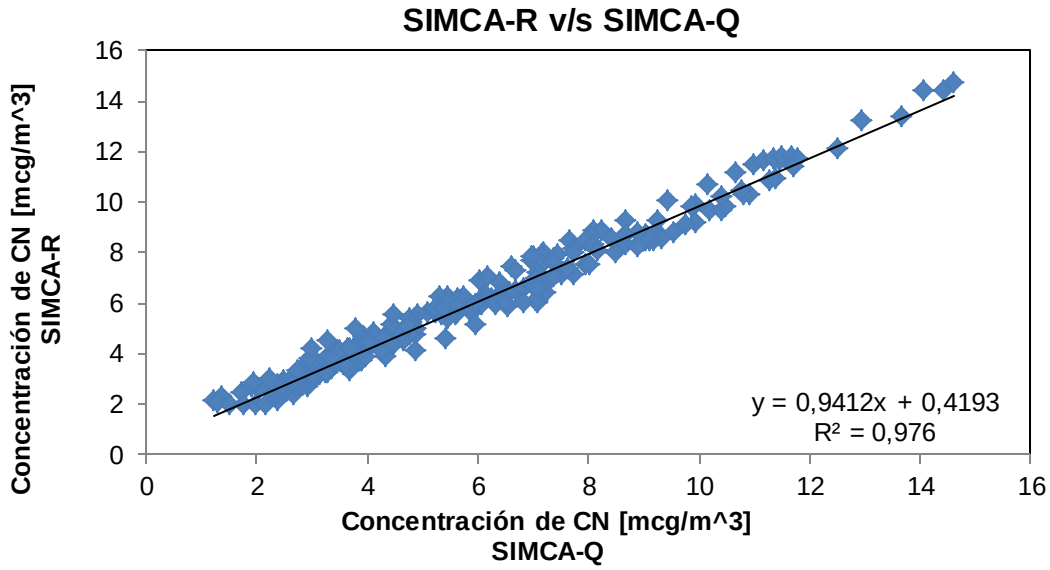

Figura 6.35 Gráfico que ilustra una comparación entre el CN medido por SIMCA-Q ea nivel del suelo y SIMCA-R en el 3º piso del Departamento de Física.

6.10.2 Estación USACH, mediciones de velocidad y dirección del viento

En la Figura 6.6 de la sección 6.3.1 se observó que los vientos en la estación USACH siempre tienen velocidades más bajas que la estación Pudahuel, además se puede ver en Tabla 6-7 que las velocidades del viento de USACH son en promedio las más bajas de las 4 estaciones de monitoreo visitadas durante la campaña.

Tabla 6-7 *Tabla que muestra los valores promedios de las velocidades del viento en [m/s] para cada mes en cada estación*

	Junio	Julio	Agosto	Promedio
San Cristóbal	1,180	1,087	0,813	1,026
Pudahuel	0,878	0,882	1,053	0,937
Las condes	1,142	1,109	1,124	1,125
USACH	0,420	0,407	0,533	0,453

Se procede a comparar la velocidad del viento de USACH, con la estación Parque O`Higgins, que se encuentra a 2,6 [km] (ver Figura 6.36) de distancia y es la estación de monitoreo mas cercana.

Figura 6.36 Imagen que ilustra la distancia entre las estaciones de monitoreo USACH y Parque O`Higgins

En la Figura 6.37 se observa que la velocidad del viento en la estación USACH es siempre más baja que en Parque O`Higgins, debido a esto se analiza si alguna de las construcciones cercanas a la estación USACH obstruye en alguna medida los vientos que son medidos por ésta. Las construcciones son ilustradas en Figura 6.38, Figura 6.39, Figura 6.40 y Figura 6.41.

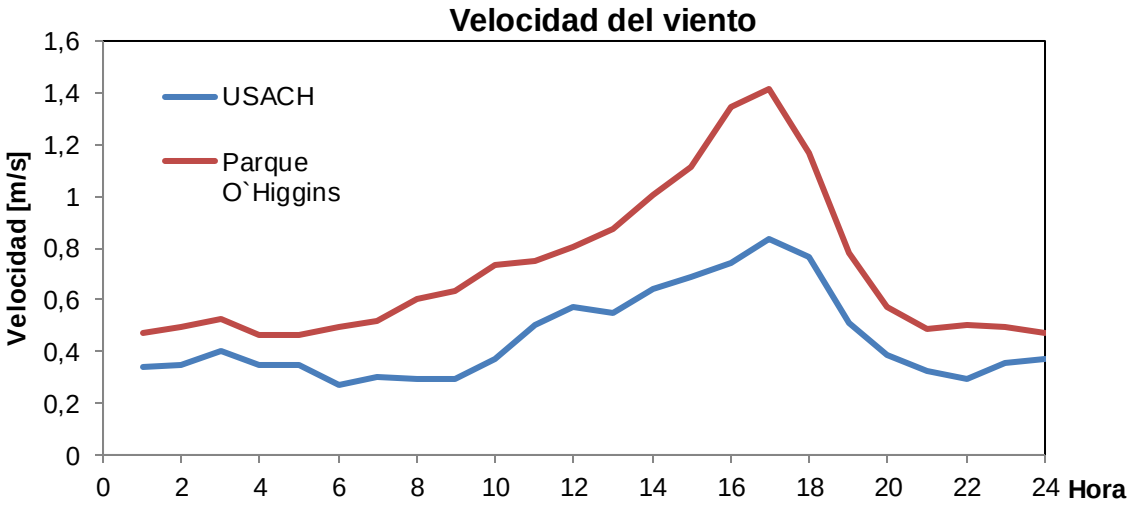

Figura 6.37 *Gráfico que ilustra una comparación entre las velocidades del viento, para cada hora del día en las estaciones USACH y Parque O`Higgins, correspondiente al periodo comprendido entre junio y agosto del 2013.*

Figura 6.38 *Imagen que ilustra un edificio ubicado al Norte (Laboratorios de física) de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta*

Figura 6.39 ***Imagen que ilustra el edificio Parque Estación (departamentos) ubicado al Suroeste de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta.***

Figura 6.40 ***Imagen que ilustra un edificio ubicado al Suroeste (Mall Plaza estación) de la estación USACH y que podría actuar obstruyendo los vientos medidos por esta.***

Figura 6.41 ***Imagen que ilustra el este de la estación USACH, donde solo se puede observar el planetario como un posible obstáculo.***

En la Figura 6.42 se ilustra una rosa de vientos para los 3 meses de la campaña de monitoreo en la estación USACH para todo horario, en dicha rosa se observa que todo el tiempo los vientos vienen predominantemente del sur-este a toda hora.

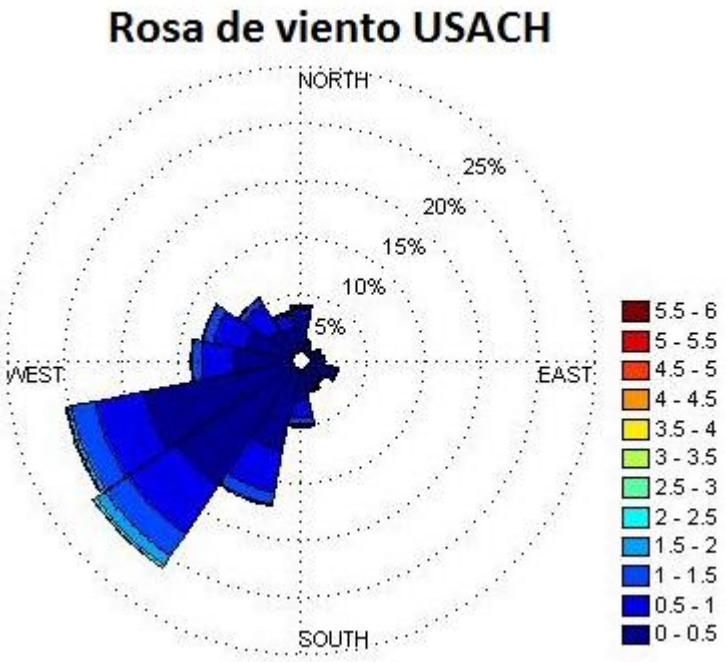

Figura 6.42 Rosa de viento de la estación USACH para todo horario en los meses de junio, julio y agosto.

En la Figura 6.43 se detallan las ubicaciones de las 4 construcciones que podrían estar interviniendo los vientos en la estación USACH, donde se observa quea 154 [m] al sur-este se encuentra el edificio Parque Estación, el cual podría estar influyendo en las mediciones de vientos de la estación.

Figura 6.43 ***Imagen que muestra la ubicación exacta de la estación USACH y edificios que posiblemente obstruyan los vientos que llegan a esta, es posible ver entre paréntesis la distancia de las calles a la estación de monitoreo.***

El edificio del Mall Plaza Alameda fue construido el año 2008, mientras que el edificio Parque Estación fue construido entre los años 2008 - 2009 [14].

En la Tabla 6-8 se muestra que en el año 2013 la razón entre la velocidad de los vientos de USACH y Parque O`Higgins es aproximadamente 0,6, mientras que en año 2007 cuando no existía ni el Mall Plaza Alameda ni el Edificio Parque Estación, la razón entre sus velocidades es similar (0,58). Esto indica que la existencia de los edificios no tuvo mayor incidencia en la velocidad de los vientos.

Finalmente para el año 2010 cuando ya existían ambos edificios la razón USACH/ Parque O`Higgins es menor indicando que la diferencia entre la velocidad de los vientos es aún mayor porcentualmente en Parque O`Higgins con respecto a USACH, que en el año 2007 cuando no existían los edificios. Por lo tanto se concluye que la existencia de los edificios no influye de forma significativa en los valores de la velocidad del viento.

Tabla 6-8 Tabla que muestra los valores promedio de la velocidad del viento promedio para el mes de julio en las estaciones USACH y Parque O´Higgins. También se muestra la diferencia y la razón entre las velocidades de estas estaciones

2007	Promedio	Diferencia	US/POH
USACH	0,5221308	0,3711238	0,58453
Parque	0,8932546		
2010	Promedio	Diferencia	US/POH
USACH	0,5915709	0,5705863	0,50903
Parque	1,1621571		
2013	Promedio	Diferencia	US/POH
USACH	0,4068175	0,276198	0,59562
Parque	0,6830155		

Además como se muestra en la Tabla 6-9, el hecho de que las velocidades del viento en USACH sean más bajas es consecuente con el hecho de que las concentraciones de CN sean más altas.

Tabla 6-9 *Tabla que muestra los valores promedios de las concentraciones de CN en [mcg/m^3] para cada mes en cada estación.*

	Junio	Julio	Agosto	Promedio
San Cristóbal	2,960534	2,703131	2,040443	2,568036
Pudahuel	5,48919	4,892093	3,828146	4,736476
Las condes	3,351024	2,882387	2,498072	2,910495
USACH	5,537063	5,690903	5,109384	5,445783

Con respecto a la dirección del viento en la Figura 6.44, se muestran las rosas de viento para los meses de julio de distintos años, donde se observa que en julio del 2007 a diferencia de todos los otros años, lo vientos en USACH no tienen una dirección predominante. Considerando que los edificios Parque Estación y Mall Plaza Alameda comenzaron a ser construidos el 2008, es posible que estos alteren la dirección del viento medida en la estación.

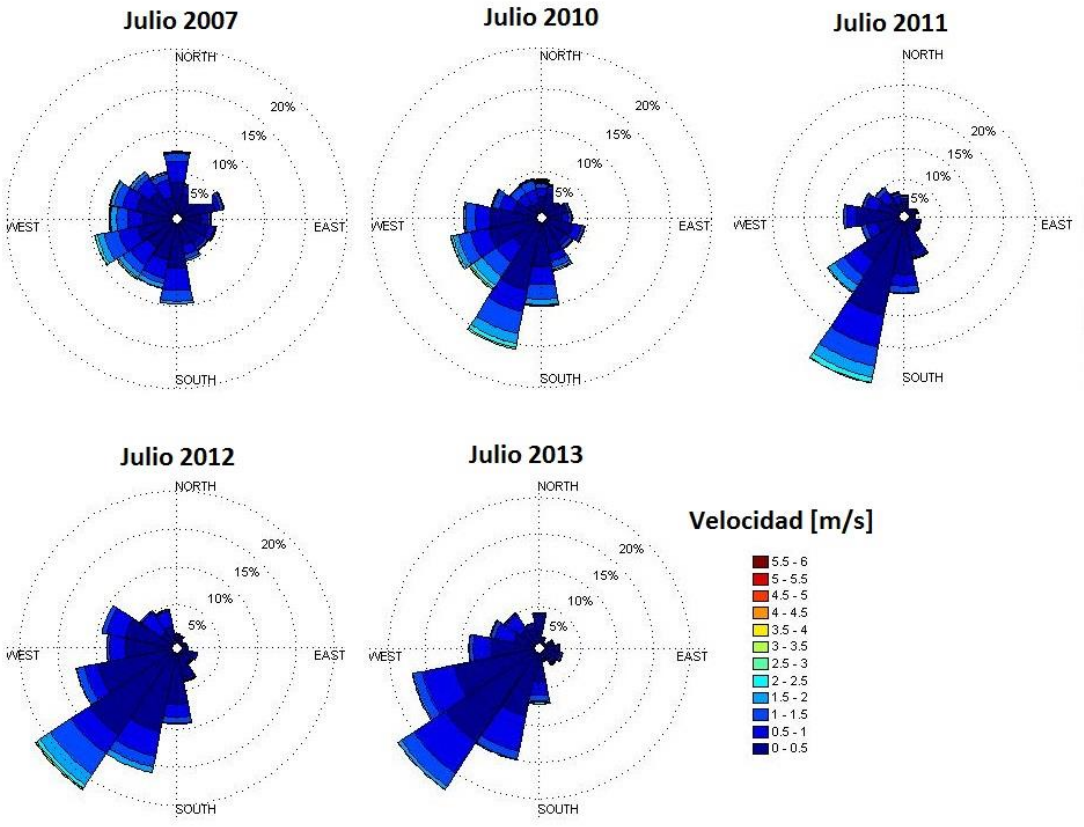

Figura 6.44 Imagen que ilustra las rosas de viento para los meses de julio en distintos años

Sin embargo la estación de monitoreo USACH comenzó a operar el 9 de junio del año 2007, por lo que éste es el único año con información antes de que se comiencen a construir los edificios, debido a ello no es posible concluir ni descartar que los edificios estén alterando la dirección de los vientos medida en la estación.

6.10.3 Estación San Cristóbal, efectos de la topografía

Cuando un flujo se encuentra con un obstáculo sus líneas de corriente se alteran, normalmente las líneas de corriente se comprimen, lo que desencadena un aumento en la presión y velocidad del fluido. Este es el caso del viento cuando se acerca a una montaña como se ilustra en la Figura 6.45.

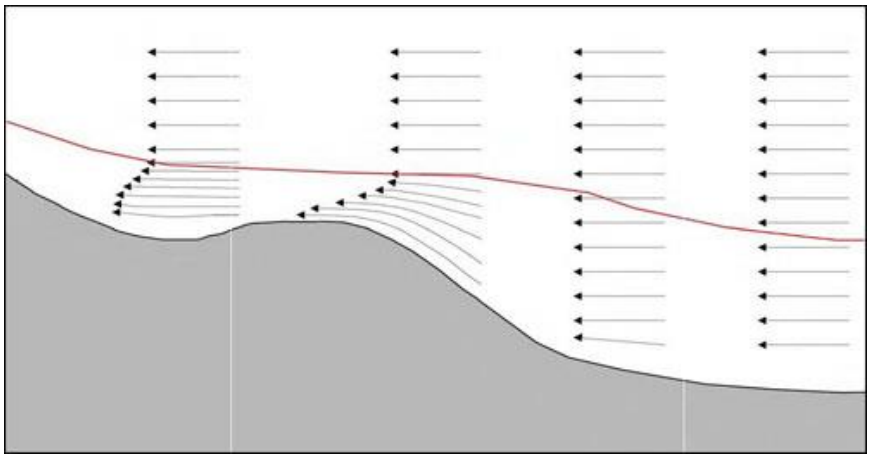

Figura 6.45 figura que ilustra la compresión de las líneas de corriente de un flujo cerca de un obstáculo.

En Nueva Zelanda este fenómeno es tan importante que la velocidad del tiene aumentos lo suficientemente significativos debido a la topografía como para dañar estructuras, tales como torres de comunicación. Motivado por ello en el año 2012 se realizó un estudio de la modificación de la velocidad del viento en Belmont Regional Park [15].

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron 9 mástiles de 5 [m] de altura con anemómetros de 3 tazas (sensibilidad 1% en el rango 10 a 55 m/s) y veletas (sensibilidad +- 3º), ubicados a lo largo de Belmont Regional Park como se indica en Figura 6.46. Se llevaron a cabo 18 horas de observación entre los días 6 y 7 de febrero del 2011.

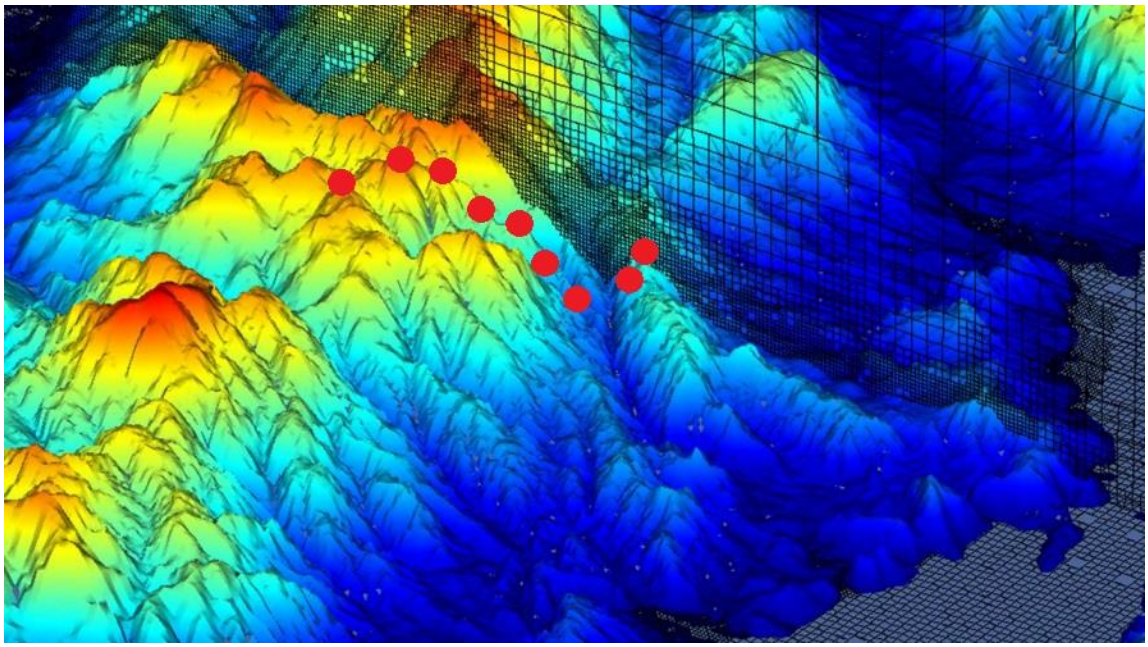

Figura 6.46 Imagen que muestra la estructura del Belmont Regional Park y la ubicación de los 9 sitios de medición.

Para poder llevar a cabo experimentos controlados se construyó una réplica a escala 1:20.000 del Belmont Regional Park, utilizando Espuma de poliestireno (ver Figura 6.47), la cual simula un terreno de una densa capa de arena. Se controlaba el flujo de viento con un ventilador programable y se usaron anemómetros de 2,5 [mm] (respetando la escala 1:20.000).

Los anemómetros de película caliente funcionan con el principio de velocidad de enfriamiento, para una temperatura ambiente conocida, la taza de enfriamiento de éstos se asocia cuantitativamente a la velocidad del flujo.

Figura 6.47 Imagen de la maqueta de Belmont Regional Park

Los resultados de este estudio se ilustran en la Figura 6.48 donde los diferentes colores representan el porcentaje de aumento de la velocidad del viento por efectos de la topografía, tabulado a la derecha de la misma figura.

La Topografía de Belmont Regional Park es muy distinta a la de San Cristóbal, sin embargo se puede hacer una aproximación si se considera que San Cristóbal se encuentra a aproximadamente 280 [m] de altura con respecto a su pie y la diferencia de alturas entre las cimas marcadas con los números 1 y 2 en la Figura 6.48 es aproximadamente 250 [m]. Por lo tanto el factor de incremento de la velocidad observado en la cima 2 puede tener cierta similitud con la de San Cristóbal.

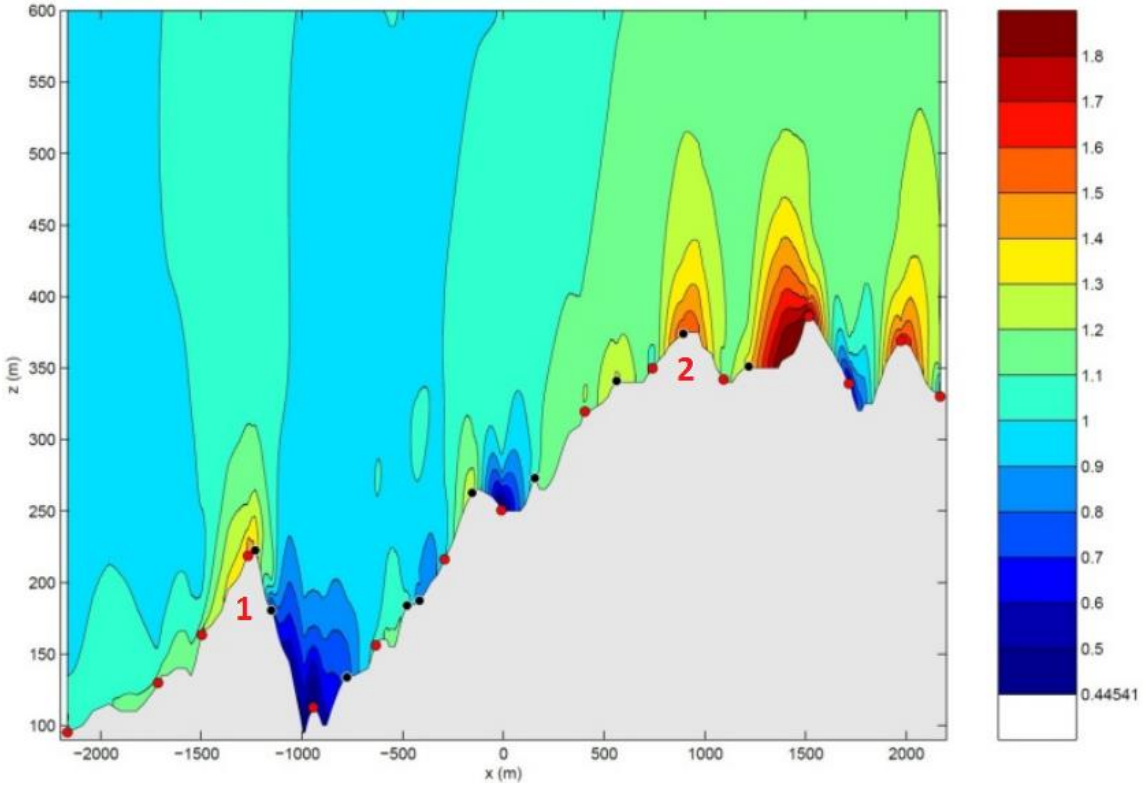

Figura 6.48 Imagen que ilustra los resultados del estudio de los efectos de la topografía en la velocidad del viento

En la cima marcada con el número 2 a 17 [m] de altura de ésta, la velocidad es incrementada en un factor 1,5, luego el factor desciende a 1,4 hasta los 32 [m] de altura.

6.10.4 Estación San Cristóbal, efectos de la rugosidad.

El tipo de suelo afecta la velocidad del viento que pasa sobre él, entre más cerca del suelo se mida, más afectada estará la velocidad del viento y entre más rugoso y con más obstáculos se encuentre el suelo, también más afectara

la velocidad del viento. La Figura 6.49 muestra el perfil de un flujo afectado por rugosidad.

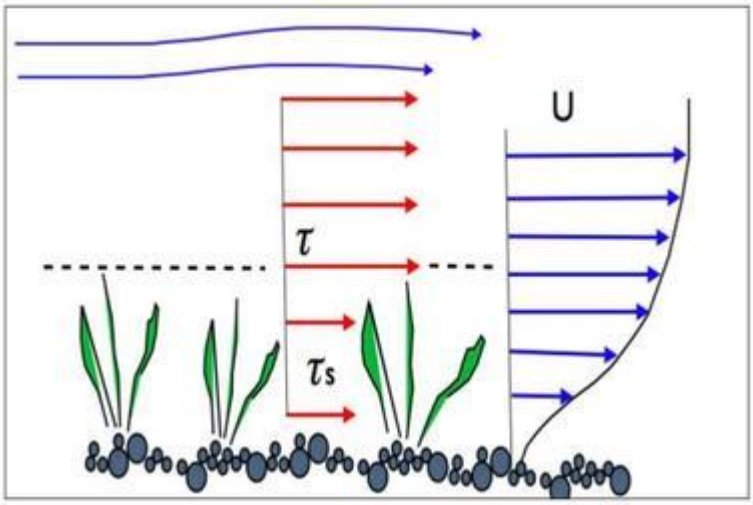

Figura 6.49 Imagen que ilustra el perfil de un flujo afectado por la rugosidad y los obstáculos del suelo.

La forma en que el tipo de suelo afecta la velocidad del viento es simulado por la ecuación de la Figura 6.50, llamada la "ley del logaritmo" la cual está basada en el principio de capa límite de los fluidos reales [16].

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_o}\right)}$$

Figura 6.50 Ley del logaritmo

Donde z es la altura en la cual se tomaron las mediciones, U(z) es la velocidad a dicha altura, z_r es la altura a la cual se desea estimar la velocidad, U(z_r) es la velocidad a esa altura y z_0 es una constante relativa al tipo de suelo.

Considerando que en San Cristóbal la superficie del suelo posee harta vegetación con bastantes árboles, recibe un valor de z_0 = 0,5 (tabulados en [16]). La altura de las mediciones del cerro San Cristóbal es de 2,7 [m] con respecto al suelo de la cima y la velocidad medida es en promedio 2,5 [m/s], tomando estos datos se hace una tabla con la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura sobre la cima del cerro (ver Tabla 6-10).

Tabla 6-10 Tabla que ilustra la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura sobre la cima del cerro San Cristóbal.

Altura (z_r)	Velocidad U(z_r)	%
2,7	2,5	0
4	3,1	0,19
5	3,4	0,27
6	3,7	0,32
10	4,4	0,44
15	5	0,5
20	5,4	0,54
40	6,5	0,62
60	7,1	0,65
100	7,9	0,68

En la Tabla 6-10 se muestra que la velocidad de los vientos medida a 2,7 [m] esta disminuida en un 50% con respecto a la velocidad a 15 [m] de altura y en la sección anterior se concluyó que hasta los 17 [m] de altura la velocidad esta aumentada en un 50% por efectos de la topografía.

Aceptando válidas las suposiciones de los análisis topográficos y de rugosidad la velocidad medida a 2,7 [m] de altura en la estación San Cristóbal sería representativa de la velocidad medida a 15 [m] de altura con respecto a la cima del cerro.

En la Tabla 6-10 también se puede ver que a los 100 [m] de altura la velocidad no deja de aumentar, por lo que las mediciones aún estarían siendo afectadas por la capa limite.

Un estudio de la capa límite realizado en la ciudad de Santiago concluye que ésta tiene alturas que varían entre 150 [m] y 400 [m] y además de lo anterior varía su altura con respecto a la temperatura [17].

De lo anterior se concluye que todas las mediciones realizadas en este estudio, fueron afectadas por la capa límite.

7 CONCLUSIONES

Se determina la existencia de transporte de carbono negro desde el sector de la estación USACH hacia San Cristóbal y Las Condes. Se encuentra que en ciertos horarios los vientos de la zona de La Florida se mueven en dirección a San Cristóbal, por lo cual para futuros estudios se sugiere agregar información de Carbono Negro de La Florida, para verificar posible conexión con San Cristóbal y agregar más estaciones de monitoreo en zonas intermedias como la comuna de Macul.

Se encuentran trayectorias de vientos comunes entre Pudahuel y Quilicura. Para futuros estudios se sugiere agregar información de carbono negro de Quilicura, para verificar la existencia de transporte de carbono negro.

La estación San Cristóbal se encuentra por sobre la altura de inversión térmica en algunos días de invierno, el sector de Las Condes no se ve tan perjudicado por esta, debido a que su cercanía con el valle del Mapocho que funciona como canal de ventilación aún bajo condiciones de anticiclón en el centro de la ciudad.

No se detecta que haya una tendencia de transporte de carbono negro desde el sector de Las Condes hacia San Cristóbal ni hacia el centro de la ciudad.

Las zonas correspondientes a las estaciones de USACH y Pudahuel tienen comportamientos muy similares en sus concentraciones, pero no hay evidencia de que exista transporte de carbono negro entre estas zonas.

Se descarta el transporte significativo de carbono negro entre las zonas de San Cristóbal y Las Condes con la zona de Pudahuel.

8 ANEXO

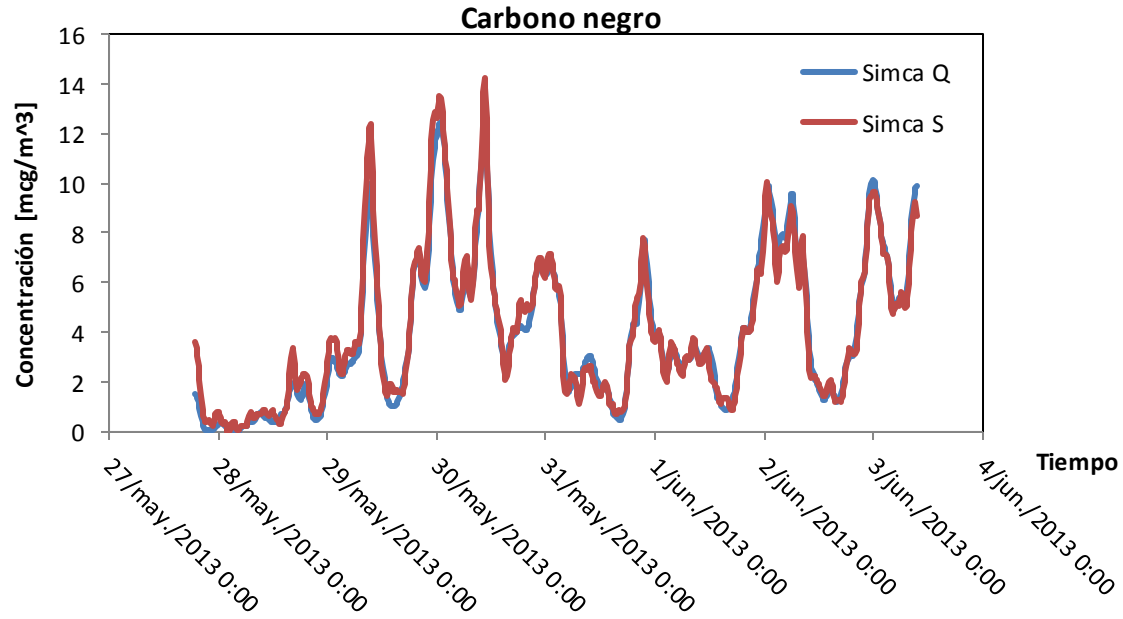

Figura 8.1 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-S, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9836.*

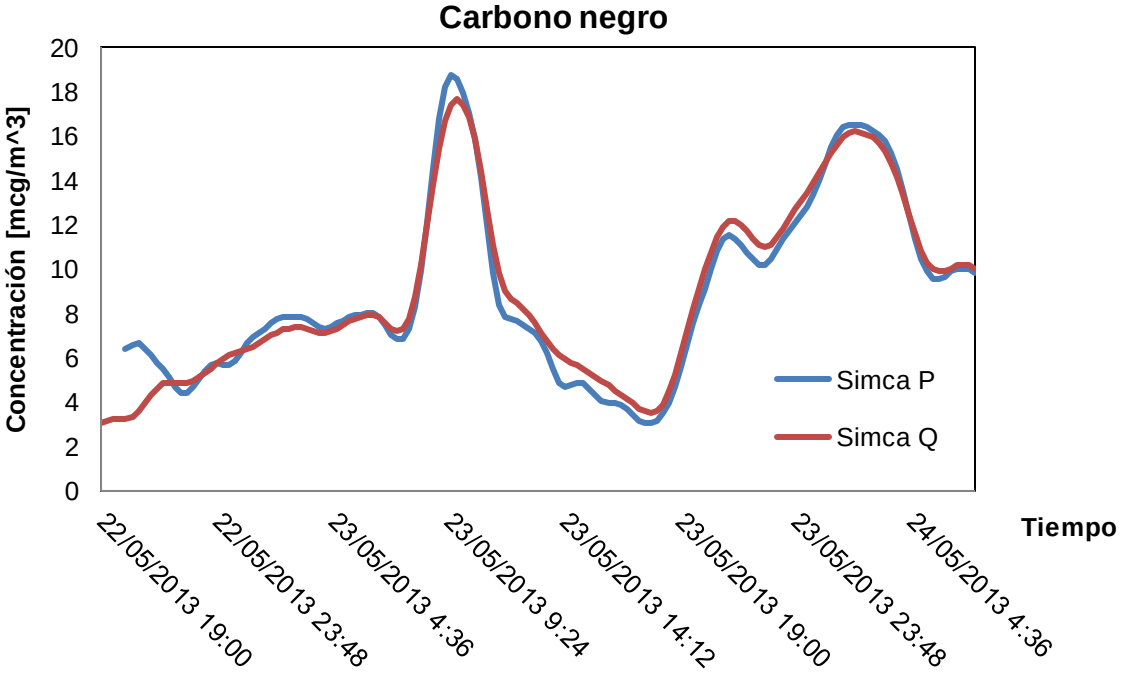

Figura 8.2 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-P, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,8188.*

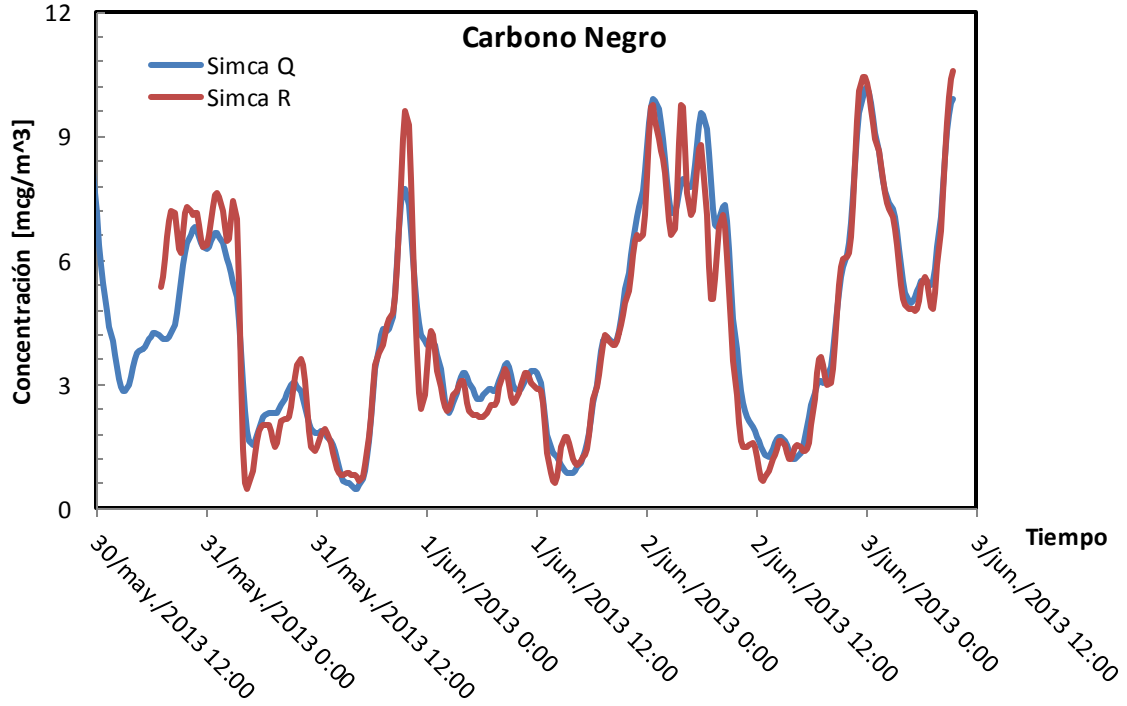

Figura 8.3 *Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-R, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9640.*

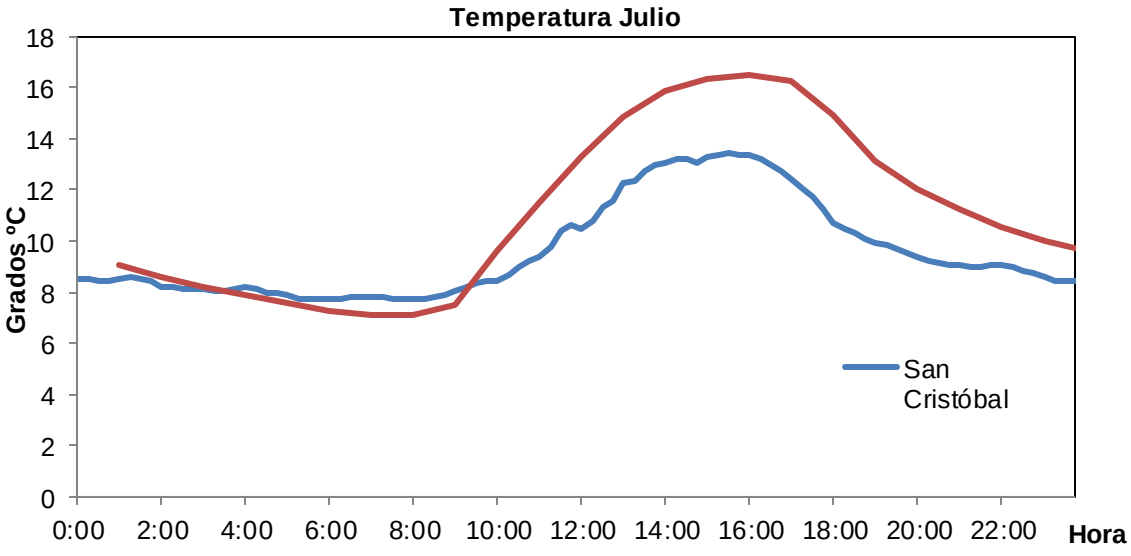

Figura 8.4 *Gráfico que ilustra una comparación entre las temperaturas en la cima del cerro San Cristóbal y la estación de monitoreo Independencia durante el mes de julio del 2013.*

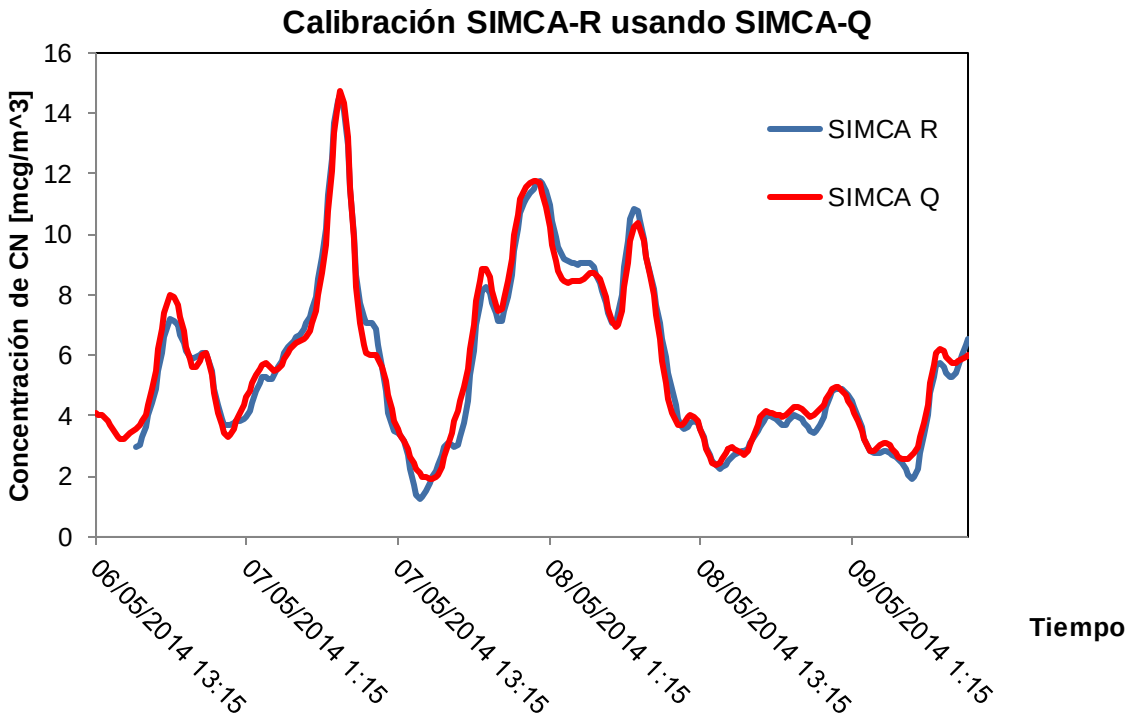

Figura 8.5 ***Gráfico que ilustra la calibración entre SIMCA-Q y SIMCA-R, se obtiene un coeficiente de correlación r= 0,9879.***

Bibliografía

[1] Química orgánica conceptos y aplicaciones quinta edición Philip S. Bailey, Christina A. Bailey. Capítulo 1 Enlaces en los compuestos orgánicos Pags.33-34

[2] Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. John H Seinfeld, Spyros N Pandis. Caps 4 y 14

[3] Report to congreso on Black Carbon. Chapter 3: Balck Carbon Effect on public Health and the enviroment.

URL: http://www.epa.gov/blackcarbon/

[4] Health effecs of black carbón "World Health Organization"

URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/162535/e96541.pdf

[5] Integrated Assesment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. UNEP Caps 1 y 3 (pag 63)

URL: http://www.unep.org/dewa/portals/67/pdf/BlackCarbon_SDM.pdf

[6] Traffic and seasonal dependence of the light absorption coefficient in Santiago de Chile.

E Gramsch, L Catalán, I Ormeño, G Palma.

[7] Use of the light absorption coefficient to monitor elemental carbon and PM 2,5- Example of Santiago de Chile.

E Gramsch, I Ormeño, G Palma, F Cereceda, P Oyola

[8] The Aethalometer "Magee Scientific"

URL:
http://www.psi.ch/catcos/ProjectDetailCatcosOperationsEN/Aethalometer_book_2005.07.02.pdf

[9] Charaterization of the Sunset Semi-Continuous Carbon Aerosol Analyzer

J Bauer, X Yu, R Cary, N Laulainen, C Berkowitz

URL: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.59.7.826

[10] Sunset_Manual: A guide to running and maintaining the sunset laboratory semi-continuous OCEC analyzer "Sunset Laboratory Inc"

URL: http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/spec/Sunset_Manual.pdf

[11] Automatic Semi-continuous field-deployable thermal/optical OCEC carbon aerosol analyzer "Sunset Laboratory Inc" (conferencia)

R. Cary, D Smith

URL: http://www.epa.gov/ttnamti1/files/2006conference/cary.pdf

[12] Observational Study of Black Carbon in the North Suburb of Naijing, China

Lili Tang et al.

URL: http://www.intechopen.com/books/advanced-air-pollution/observational-study-of-black-carbon-in-the-north-suburb-of-nanjing-china

[13] Antecedentes para la declaración de zona saturada de la Región Metropolitana.

[14] http://www.befco.cl/obras/ejecutadas/edificacion-en-altura

[15] Modified wind speed due to topographic effects.

"GNS Consultancy Report 2012/07"

A.B King, M. Revell, P. Carpenter, R. Turner, P. Cenek, R. Flay.

[16] Analysis of wind shear models and trends in differents terrains

"University of Massaschusetts"

M.L Ray, A.L. Rogers, J.G. McGowan

[17] Capa limite, reflectancia y espesor òptico de aerosoles sobre Santiago

"Universidad de Chile"

J. Escribano.