

Tabla de Contenido

Esta tesis consiste en una Revisión general expuesta en los primeros 4 capítulos, además de un Material anexo y un Artículo, listados a continuación. El Material anexo y el Artículo son citados por sus nombres en los capítulos 2, 3 y 4 de la Revisión general

Revisión general	Página
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Sobre aerosoles, su emisión y formación	3
1.2.1. Aerosoles primarios	4
1.2.2. Aerosoles secundarios	4
1.3. Motivación y objetivos	5
2. Metodología	7
2.1. Fuente de datos y su procesamiento	7
2.2. Estimación empírica de aerosoles secundarios	10
2.2.1. Evolución en las tendencias atmosféricas de aerosoles y oxidantes . .	15
2.3. Aproximación mediante simulación para caracterizar aerosoles secundarios .	16
2.3.1. Emisiones:	18
3. Resultados	20
3.1. Estimación empírica de la evolución anual de Aerosoles secundarios	20
3.1.1. Cambios en la capacidad oxidativa de Santiago.	25
3.2. Aproximación mediante simulación para caracterizar aerosoles secundarios .	28
3.2.1. Validación de modelos	28
3.2.2. EMEP: Estimacion multi-modelo para aerosoles secundarios	36
4. Resumen y conclusiones	39

Material Anexo:	Página
5. Anexo	41
5.1. Metodo de Agrupamiento K-MEANS	41
5.2. Fracción MP _{2,5} a CO	42
5.3. Sensibilidad de la formación de ozono.	43
5.3.1. Datos detectados remotamente	43
5.3.2. Determinación del régimen foto-químico.	43
5.3.3. Evaluación de regímenes químicos.	43
5.4. WRF: Estimación en la cubierta de Nubes	45
5.5. EMEP: Estimación numérica para aerosoles secundarios	47

BIBLIOGRAFIA	Página
BIBLIOGRAFIA	50

Articulo I:	Página
--------------------	---------------

Índice de Tablas

1.1. Normativas nacionales (https://www.leychile.cl) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS, www.who.int) para diferentes contaminantes atmosféricos en concentraciones diarias y anuales	2
2.1. Especies y técnicas de medición utilizadas en la red de monitoreo de Santiago. También se indican las estaciones de monitoreo donde se miden las especies (para la ubicación, ver Figura 1.1). Esta información se encuentra en sinca.mma.gob.cl/	10
2.2. Datos meteorológicos de entrada utilizados en el modelo EMEP.	17
2.3. Principales opciones de configuración aplicadas en el modelo meteorológico (WRF) tomado desde Mazzeo et al. (2018)	18
3.1. Composición química de aerosoles medida en Santiago en estudios previos. Los componentes secundarios de aerosol inorgánico y secundario se indican cuando están disponibles.	24
3.2. Tendencias y error en la tendencia estimadas para O ₃ , NO ₂ , O _x y MP _{2,5} observadas en las estaciones de monitoreo de Santiago Este (Las Condes) y Oeste (Pudahuel) para diferentes períodos, en base a observaciones medias mensuales. Fuente de datos: http://sinca.mma.gob.cl/	27
3.3. Comparación estadística entre observaciones y concentraciones de superficie de NO ₂ O ₃ y MP _{2,5} en las estaciones de Padahuel y Las Condes	33
5.1. Detalles para la modelación atmosférica realizada por EMEP https://www.emep.int/	48

Índice de Ilustraciones

1.1.	Características topográficas de la zona de estudio (izquierda) y calidad del aire (derecha) de Santiago. Las estaciones identificadas como: F (Independencia); L (La Florida); M (Las Condes); N (Parque O'Higgins); O (Pudahuel); P (Cerrillos); Q (El Bosque); R (Cerro Navia); S (Puente Alto); T (Talagante). Fuente de la topografía: ETOPO1 Global Relief Model www.ngdc.noaa.gov	2
1.2.	Evolución de las partículas $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$ del centro de Santiago para el período 2001-2018. El panel muestra los promedios de 24 horas y en la línea roja se indica la normativa nacional diaria. El recuadro izquierdo (derecho) encierra los años 2001-2009 (2009-2018) identificando la tendencia decadal de $-9\mu g/m^3 \pm 5\mu g/m^3$ ($2\mu g/m^3 \pm 1\mu g/m^3$).	5
2.1.	Series temporales para la estación Pudahuel en el oeste de Santiago (puntos verdes) en promedios horarios: de ozono (panel a), dióxido de nitrógeno (panel b) y O_x (panel c) en ppbv, material particulado fino (panel d) en $\mu g/m^3$. Sobrepuesto en el panel superior está el promedio de ocho horas (puntos negros). También se indican los estándares chilenos de calidad del aire correspondientes para O_3 , NO_2 y $MP_{2,5}$. Los datos se obtuvieron de https://sinca.mma.gob.cl/ . Ver texto para detalles.	8
2.2.	Series temporales para la estación Las Condes en el este de Santiago en promedios horarios de (puntos verdes): de ozono (panel a), dióxido de nitrógeno (panel b) y O_x (panel c) en ppbv, material particulado fino (panel d) en $\mu g/m^3$. Sobrepuesto en el panel superior está el promedio de ocho horas (puntos negros). También se indican los estándares chilenos de calidad del aire correspondientes para O_3 , NO_2 y $MP_{2,5}$. Los datos se obtuvieron de https://sinca.mma.gob.cl/ . Ver texto para detalles.	9
2.3.	Relación entre promedios diarios de $MP_{2,5}$ (en $\mu g/m^3$) y CO (en ppmv) para la estación Las Condes en el oriente de Santiago, entre 2001 y 2018. Los datos se agrupan según la temporada: cálida (septiembre a febrero), que se muestra con puntos naranjas, y fría (marzo a agosto) que se muestra con puntos azules. Los datos también se agrupan de acuerdo con el rango máximo diario de ozono: el panel a), b), c) y d) muestra la correlación para la actividad fotoquímica baja, media, media alta y alta. También se muestran las líneas de regresión lineal correspondientes (que se muestran en negro) y los factores de correlación, así como el número de mediciones concurrentes de CO y $MP_{2,5}$ (n). El porcentaje se calcula como la relación entre los puntos de estación fría/cálida con respecto al número total de puntos de datos considerados en la regresión.	12

2.4.	Relación entre promedios diarios de $MP_{2,5}$ (en $\mu g/m^3$) y CO (en ppmv) para la estación Pudahuel en el oriente de Santiago, entre 2001 y 2018. Los datos se agrupan según la temporada: cálida (septiembre a febrero), que se muestra con puntos naranjas, y fría (marzo a agosto) que se muestra con puntos azules. Los datos también se agrupan de acuerdo con el rango máximo diario de ozono: el panel a), b), c) y d) muestra la correlación para la actividad fotoquímica baja, media, media alta y alta. También se muestran las líneas de regresión lineal correspondientes (que se muestran en negro) y los factores de correlación, así como el número de mediciones concurrentes de CO y $MP_{2,5}$ (n). El porcentaje se calcula como la relación entre los puntos de estación fría/cálida con respecto al número total de puntos de datos considerados en la regresión.	13
2.5.	Clasificación de agrupación kmeans 3-D realizada con los datos de la estación Las Condes para el periodo cálido (septiembre a febrero) entre los años 2001-2018. Kmeans es configurado con los datos horarios de O_{3max} (en ppbv), CO (en ppmv) y $MP_{2,5}$ (en $\mu g/m^3$) eligiendo una cantidad total de cuatro grupos (k=4). Los grupos son mostrados en 4 colores. Verde (entre 5 y 45 O_{3max} ppbv), Azul (entre 15 y 55 O_{3max} ppbv), Rojo (entre 30 y 65 O_{3max} ppbv) y Morado (superior a 65 O_{3max} ppbv).	14
2.6.	Dominios utilizados para las simulaciones WRF con resoluciones de 18 x 18 km denominadas STGO1 en el texto (arriba a la izquierda), 6 x 6 km referidos como STGO2 (arriba a la derecha) y STGO3 correspondientes a 2 x 2 km (abajo). Tabla desde Mazzeo et al 2008	18
3.1.	Evolución de la fracción secundaria de aerosol (en %) calculada por la metodología de (Chang y Lee, 2007). El panel superior (inferior) muestra los resultados (barras) para la estación Las Condes (Pudahuel) en el este (oeste) de Santiago, considerando los rangos sobre 45ppbv de O_{3max} . El rango de error se calcula como la desviación estándar de cada promedio de 2 años.	21
3.2.	Fracción promedio de aerosol secundario (en %) y su desviación estándar respectiva, agrupados por rango máximo de ozono diario, y por período de años, para las estaciones Las Condes (panel superior) y Pudahuel (panel inferior). Los diferentes períodos de tiempo considerados son 2001-2008 y 2009-2018 y se muestran en negro y gris, respectivamente.	22
3.3.	En el panel superior la evolución mensual en el año 2013 de la fracción secundaria de aerosol (en $\mu g/m^3$) estimada por la metodología empírica en Las Condes (línea negra). En el panel inferior la evolución mensual en el año 2013 de la fracción secundaria de aerosol (en $\mu g/m^3$), observada por Villalobos et al 2015 (línea azul) en La Florida vs la estimada por la metodología empírica (línea negra) en la estación la Florida. En sombreado varianza diaria (calculada como una desviación estándar) sobre el promedio mensual de la estimación empírica.	23

3.4. Ciclo diurno de masas observadas de $MP_{2,5}$ a CO en Pudahuel (a y b) y Las Condes (c y d) para los períodos 2001-2008 y 2009-2018 en días con $O_{3max} < 45$ ppbv. Los datos se presentan como gráficos de caja: la marca central en la caja indica la mediana de la distribución, los bordes de la caja son los percentiles 25 y 75, los bigotes se extienden a los puntos de datos más extremos no considerados atípicos. También se muestra la relación de masa correspondiente de emisiones del sector del transporte de acuerdo con (USACH, 2014) (línea horizontal discontinua).	25
3.5. Tendencias decadales (%) en O_3 , NO_2 y $O_x = O_3 + NO_2$ en Santiago para el período 2009-2018. Los círculos con un asterisco indican tendencias estadísticamente no significativas. Las tendencias se calculan sobre valores promedio mensuales desestacionalizados utilizando el enfoque de (Duncan et al., 2016)	26
3.6. Valores horarios observados (puntos negros) y simulados (líneas azules) de: Temperatura a 2m de altura (panel superior), magnitud en la velocidad del viento a 10 m de altura (solo simulaciones, panel central) y humedad relativa (panel inferior) en la estación Las Condes. En el cuadro de texto se indica, los estadísticos de Correlación (r), error relativo normalizado (Error), índice de acuerdo (IA) y sesgo (Sesgo) entre las curvas observadas y modeladas de cada variable	30
3.7. Valores horarios observados (puntos negros) y simulados (líneas azules) de: Temperatura a 2m de altura (panel superior), magnitud en la velocidad del viento a 10 m de altura (solo simulaciones, panel central) y humedad relativa (panel inferior) en la estación Pudahuel. En el cuadro de texto se indica, los estadísticos de Correlación (r), error relativo normalizado (Error), índice de acuerdo (IA) y sesgo (Sesgo) entre las curvas observadas y modeladas de cada variable	31
32figure.3.8	
3.9. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea de punto negro) por hora de O_3 en ppbv, en Las Condes	34
3.10. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea punteada negra) por hora de $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$, en Las Condes	34
3.11. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea de punto negro) por hora de NO_2 en ppbv, en Las Condes	34
3.12. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea de punto negro) por hora de O_3 en ppbv, en Pudahuel	35
3.13. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea punteada negra) por hora de $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$, en Pudahuel	35
3.14. Valores Simulados por EMEP (línea punteada azul) y observaciones superficiales (línea de punto negro) por hora de NO_2 en ppbv, en Pudahuel	35
3.15. Concentraciones superficiales diarias de $MP_{2,5}$ secundario (barras azules) y $MP_{2,5}$ total (barras naranjas) en $\mu g/m^3$ simuladas por EMEP en enero del año 2016. Panel superior Las Condes, panel inferior Pudahuel	36
3.16. Porcentaje de aerosoles secundarios para el mes de enero del año 2016 en diferentes comunas de Santiago. En barras azules el modelo EMEP, en barras naranjas el modelo empírico. Las líneas de error indican la varianza en los datos promediados a partir de datos horarios	37

3.17. Concentraciones secundarias (en $\mu g/m^3$), estimadas mediante la metodología empírica (barras negras) y modeladas por EMEP (barras azules) en la estación de Pudahuel. para enero del año 2016	38
5.1. Ciclo diurno de masas observadas de $MP_{2,5}$ a CO en Pudahuel (a y b) y Las Condes (c y d) para los períodos 2001-2008 y 2009-2018 en todos los días. Los datos se presentan como gráficos de caja: la marca central en la caja indica la mediana de la distribución, los bordes de la caja son los percentiles 25 y 75, los bigotes se extienden a los puntos de datos más extremos no considerados atípicos. También se muestra la relación de masa correspondiente de emisiones del sector del transporte de acuerdo con (USACH, 2014) (línea horizontal discontinua).	42
5.2. Valores promedio anual para los años 2005, 2010 y 2015 en unidades de $10^{15}mol/cm^2$ para la ciudad de Santiago, mostrando H_2CO y NO_2 en el primer y segundo paneles respectivamente. El cuadro verde es el dominio de la ciudad de Santiago y los puntos indican las estaciones de Las Condes y Pudahuel.. . . .	44
5.3. Valores promediados anualmente para los años 2005, 2010 y 2015 en $10^{15}mol/cm^2$ en la ciudad de Santiago, para H_2CO y NO_2 en el primer y segundo paneles respectivamente. El cuadro verde es el dominio de la ciudad de Santiago y los puntos indican las estaciones de Las Condes y Pudahuel.	45
5.4. Coberturas nubosas observadas por MODIS/Terra (columna izquierda) y modeladas por WRF (Columna derecha), para los días 25, 26 y 27 de enero. La escala en la cobertura nubosa de WRF indica la fracción de nubosidad en el pixel	46
5.5. Concentraciones observadas (izquierda) y simuladas (derecha) de $MP_{2,5}$ a CO por hora en las estaciones O'Higgins Park (arriba) y Pudahuel (abajo)	47
5.6. Niveles de altura sigma (en Pascales) configuradas en EMEP para la distribución vertical de la atmósfera	49