



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO EN SANTIAGO DE CHILE:  
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y OPTIMIZACIÓN POR MODELACIÓN INVERSA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN MECÁNICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PABLO ENRIQUE SAIDE PERALTA**

**PROFESOR GUÍA:  
MAURICIO OSSES ALVARADO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LAURA GALLARDO KLENNER  
AXEL OSSES ALVARADO  
MARCELO MENA CARRASCO**

**SANTIAGO DE CHILE  
MARZO 2008**

## Resumen

Santiago de Chile se encuentra entre una de las ciudades más contaminadas del mundo. Por ello es necesario disponer de inventarios de emisión que sean confiables, precisos y detallados. Esta información permite identificar a los principales responsables y así tomar medidas para frenar el aumento o incluso provocar un decrecimiento de las emisiones, además de proveer un formato adecuado para la modelación de la calidad del aire mediante modelos de transporte y química atmosférica.

El presente trabajo aborda dos grandes objetivos ambos desarrollados para la ciudad de Santiago de Chile. El primero es desarrollar y aplicar una metodología de modelación inversa para optimizar un inventario de emisiones de monóxido de carbono (CO). El segundo es aplicar y desarrollar métodos para obtener la distribución espacial de emisiones de fuentes móviles de CO.

Para poder obtener un inventario optimizado por modelación inversa se realizó previamente un análisis de observaciones de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Santiago, una validación de las simulaciones meteorológicas y de dispersión de CO así como una validación de la metodología de modelación inversa utilizada para el caso de estudio. En estas etapas previas se encontraron las limitaciones tanto de las observaciones como de los modelos y metodologías. Finalmente, se obtuvo un inventario de emisiones con características similares al inventario inicial con una disminución global de un 2.1 %. Sin embargo, estos cambios corresponden a una disminución de emisiones en la zona centro-oeste y aumento en la zona este-sur y este-norte, como también a cambios en las emisiones sólo en las horas de la mañana, que en el detalle muestran diferencias superiores al 100 % en algunos puntos con respecto a la referencia.

Basándose en las metodologías existentes de estimación de la distribución espacial de las emisiones se desarrollaron nuevos escenarios obteniéndose resultados satisfactorios. Las metodologías consistieron en usar mapas con información indirecta a las emisiones, como son densidad de población, índices socio-económicos y de uso de suelo; e información directa, como una red vial completa, red vial simplificada e información sobre flujos vehiculares, capacidad de vías y velocidades medias. Las metodologías aplicadas ocupan distintos niveles de información, de forma que dejar abierta la posibilidad de aplicarlas en otras ciudades dependiendo del tipo de información que se posea.

Primeramente se encontró que es posible mediante metodologías simples optimizar un inventario de emisiones utilizando un modelo de dispersión de contaminantes y observaciones de estaciones de monitoreo de la calidad de aire. Segundo, es factible obtener la distribución espacial de las emisiones usando metodologías simples obteniendo un buen nivel de representatividad de la referencia con el fin de evitar el uso de modelos costosos y así dejando abierta su aplicación a otras megaciudades de Sudamérica.

## Agradecimientos

En esta tesis hubo una gran cantidad de personas involucradas que me ayudaron a llevarla a cabo. Primero me gustaría agradecer a mis padres y a Paula por apoyarme siempre en mis decisiones y ayudarme a seguir adelante sin importar si esto significara dedicarles menos tiempo a ellos.

Me gustaría agradecer especialmente a Laura Gallardo, Mauricio Osses y Axel Osses por dedicar gran parte de su tiempo a ayudarme a desarrollar esta tesis, ya que sin esta gran ayuda esta tesis no hubiera sido posible.

Quiero agradecer a la gente del Centro de modelación Matemática (CMM) donde esta tesis fue desarrollada en su gran parte, especialmente a Rodrigo Delgado por su apoyo en la parte computacional. También agradecer a las personas que me recibieron en Suiza en el EMPA, especialmente a Rainer Zah, donde se realizó una estadía de investigación de 4 meses donde se avanzó en una parte importante de este trabajo.

También quiero agradecer a todo el equipo de desarrollo del software Polyphemus, que fueron de gran ayuda y estuvieron siempre disponibles para cualquier consulta, especialmente a Marc Bocquet por su ayuda en la parte teórica.

Quiero agradecer a todas las personas que me proporcionaron los datos necesarios para desarrollar esta tesis, entre ellos se encuentran Pablo Sarricolea (LABTUS, Departamento de Geografía de la Universidad de Chile), Alexis Vásquez (Departamento de Geografía de la Universidad de Chile), Rubén Triviño (SECTRA), Manuel Merino (CENMA), Juan Quintana (DMC) y Rainer Schmitz (DGF). También quiero agradecer a Ana María Córdova por su ayuda en el análisis de datos y a Ricardo Alcañuz por su apoyo en la parte meteorológica.

Este trabajo fue realizado con la ayuda de una beca del “Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN II 2017” que es provista por “US National Science Foundation” (beca GEO-0452325), con la ayuda de una beca CONICYT de magister y con el apoyo parcial del proyecto STIC-AMSUD: “Chemical weather prediction with data assimilation in South American megacities”.

# Índice General

<b>Índice de Figuras</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Optimización de emisiones por modelación inversa . . . . .	1
1.2. Estimación de la distribución espacial de las emisiones . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.3.1. Objetivos principales . . . . .	3
1.3.2. Objetivos secundarios . . . . .	3
<b>2. Mejora del inventario de emisiones para Santiago de Chile mediante modelación inversa</b>	<b>5</b>
2.1. Análisis de las concentraciones de CO de Santiago . . . . .	6
2.1.1. Medición de la calidad del aire en Santiago . . . . .	6
2.1.2. Metodología . . . . .	8
2.1.3. Resultados . . . . .	9
2.1.4. Conclusiones . . . . .	18
2.2. Validación del modelo de calidad de aire . . . . .	19
2.2.1. Área de estudio: Gran Santiago . . . . .	19
2.2.2. La ecuación de continuidad . . . . .	20
2.2.3. La plataforma Polyphemus . . . . .	21
2.2.4. Trabajos anteriores . . . . .	22
2.2.5. Metodología . . . . .	25
2.2.6. Configuración . . . . .	26
2.2.7. Resultados . . . . .	29
2.2.8. Conclusiones . . . . .	41
2.3. Modelación Inversa . . . . .	42
2.3.1. Método de Interpolación Optimal . . . . .	42
2.3.2. Metodología . . . . .	47



2.3.3.	Configuración . . . . .	48
2.3.4.	OI adaptado al caso de estudio . . . . .	50
2.3.5.	Resultados con observaciones sintéticas . . . . .	56
2.3.6.	Resultados con observaciones reales . . . . .	61
2.3.7.	Validación del inventario mejorado . . . . .	66
2.3.8.	Conclusiones . . . . .	68
<b>3.</b>	<b>Estimación de la distribución espacial de las emisiones</b>	<b>70</b>
3.1.	Antecedentes . . . . .	70
3.1.1.	Tuia et al 2007 . . . . .	71
3.1.2.	Ossés et al 2007 . . . . .	77
3.2.	Metodología . . . . .	78
3.2.1.	Limitaciones del método aplicado para distribuir las emisiones . . . . .	78
3.2.2.	Metodologías aplicadas . . . . .	79
3.2.3.	Métodos de comparación . . . . .	80
3.2.4.	Información usada para realizar las estimaciones de la distribución espacial de las emisiones . . . . .	81
3.2.5.	Información usada para comparar con las estimaciones de la distribución espacial de las emisiones . . . . .	84
3.3.	Resultados . . . . .	84
3.3.1.	Creación de nuevos de mapas . . . . .	84
3.3.2.	Resultados usando como referencia inventario Oficial de CO . . . . .	97
3.3.3.	Resultados usando como referencia inventario optimizado por modelación inversa . . . . .	138
3.4.	Conclusiones y comentarios . . . . .	146
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y comentarios finales</b>	<b>149</b>
4.1.	Trabajo Futuro . . . . .	150
	<b>Bibliografía</b>	<b>152</b>
<b>A.</b>	<b>Mapas para Santiago y sus alrededores</b>	<b>I</b>
<b>B.</b>	<b>Monóxido de Carbono como contaminante</b>	<b>XXII</b>
B.1.	Emisión Vehicular de CO . . . . .	XXII
B.2.	Normativas para CO . . . . .	XXIII
B.2.1.	Normativa Estadounidense de calidad del aire . . . . .	XXIII
B.2.2.	Normativa Chilena de Calidad del Aire . . . . .	XXIII
B.2.3.	Normativa Chilena de Emisión vehicular . . . . .	XXIV

B.3. Efectos del CO sobre la salud . . . . .	XXIV
<b>C. Inventarios de emisión</b>	<b>XXVI</b>
C.1. Inventario de emisiones para la ciudad de Santiago . . . . .	XXVII
<b>D. Validación Meteorología</b>	<b>XXX</b>
D.1. Configuración . . . . .	XXX
D.1.1. Modelo . . . . .	XXX
D.1.2. Observaciones . . . . .	XXXI
D.2. Resultados . . . . .	XXXIV
D.2.1. Series de tiempo . . . . .	XXXIV
D.2.2. Gradiente de temperatura . . . . .	XLI
D.2.3. Ciclos diurnos . . . . .	XLII
D.2.4. Gráficos de dispersión . . . . .	XLIX
D.2.5. Perfiles verticales . . . . .	LV
D.2.6. Diagramas de Taylor . . . . .	LV
D.3. Comentarios y Conclusiones . . . . .	LIX
<b>E. Introducción a GIS</b>	<b>LX</b>
E.1. Tipos de GIS . . . . .	LXI
E.1.1. Vectoriales . . . . .	LXI
E.1.2. Raster . . . . .	LXI
E.1.3. Orientados a objetos . . . . .	LXII
<b>F. Gráficos de Taylor</b>	<b>LXIII</b>
<b>G. Ciclos diarios de modelación inversa ficticia y real</b>	<b>LXVI</b>
G.1. Ciclos diarios simulación ficticia . . . . .	LXVI
G.2. Ciclos diarios simulación real . . . . .	LXXII

# Índice de Figuras

2.1. Mapa de las estaciones de monitoreo de la red MACAM2 y topografía de la cuenca de Santiago. . . . .	8
2.2. Series de tiempo completa para el mes de Enero del 2002. . . . .	10
2.3. Ciclo diurno para el mes de Enero del 2002. . . . .	12
2.4. Variación interdiaria para el mes de Enero del 2002. . . . .	14
2.5. Variación interdiaria para todo el período de obtención de datos. . . . .	15
2.6. Ciclo diurno para el mes de Enero para todos los años donde hay datos por estación. . . . .	17
2.7. Diagrama de flujos de trabajo de Polyphemus. . . . .	22
2.8. Ciclos diurnos por sector. . . . .	23
2.9. Tabla de estadísticos de observaciones y modelo. ref: Schmitz 2005. . . . .	24
2.10. Campos de concentraciones horizontales en el primer nivel. . . . .	30
2.11. Campos de concentraciones verticales promedio para una latitud constante. . . . .	31
2.12. Series de tiempo para la concentración, las emisiones y la altura de capa límite en la estación “Santiago” para los 11 primeros días de simulación . . . . .	33
2.13. Series de tiempo para la concentración en las estaciones de monitoreo y para el modelo en cada estación para todo el período . . . . .	34
2.14. Ciclo diurno para las observaciones en las 8 estaciones de monitoreo y para el modelo. . . . .	35
2.15. Variación interdiaria para las 8 estaciones para el mes de Enero del 2002. . . . .	38
2.16. Gráfico de Taylor para datos separados según diurnos, nocturnos y fines de semana. . . . .	39

2.17. Gráfico de Taylor para la serie completa y para estadísticos obtenidos de Schmitz 2005. . . . .	40
2.18. Ejemplo de la L-curve antes de aplicar logaritmo . . . . .	53
2.19. Gráfico de diferencia entre el inventario real y el inventario optimizado usando observaciones ficticias, sin modificar el método. . . . .	54
2.20. Esquema de representación de las celdas vecinas de un punto $i$ singular . . . . .	55
2.21. Diferencia entre inventario real y optimizado para caso ficticio considerando todas las horas. . . . .	57
2.22. Diferencia entre inventario real y optimizado para caso ficticio separando entre mañana y tarde. . . . .	57
2.23. Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones ficticias para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado. . . . .	59
2.24. Ciclo diario de emisiones para el inventario inicial, real y optimizado. . . . .	60
2.25. L-curve para caso de observaciones reales. . . . .	62
2.26. Diferencia entre inventario inicial y optimizado para caso real considerando todas las horas. . . . .	63
2.27. Diferencia entre inventario inicial y optimizado para caso real separando entre mañana y tarde. . . . .	63
2.28. Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones reales para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado. . . . .	64
2.29. Ciclo diario de emisiones para el inventario inicial y optimizado para observaciones reales para observaciones reales. . . . .	65
2.30. Ciclo diurno de observaciones para el período del 2 al 12 de enero para las observaciones en estaciones de monitoreo, modelo ocupando inventario inicial y modelo ocupando el inventario mejorado. . . . .	67
2.31. Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones reales para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado en un período distinto al de la optimización. . . . .	68
3.1. Estimación de la dispersión de contaminantes usando la red vial. ref: Tuia et al 2007 . . . . .	73
3.2. Dispersión de los modelos versus el caso de referencia. ref: Tuia et al 2007 . . . . .	76

3.3. Distancia de Hellinger entre el caso de referencia y los distintos modelos. ref: Tuia et al 2007	77
3.4. Mapas de densidades de población. . . . .	85
3.5. Mapas de densidades normalizadas y diferencias. . . . .	86
3.6. Gráfico de dispersión para el mapa mejorado (símbolos + rojos) y para la densidad por comunas (cuadrados negros). . . . .	87
3.7. Series de escaneo de datos para los 3 mapas de densidad: referencia, mapa mejorado y densidad por comunas. . . . .	87
3.8. Gráfico de dispersión para los 5 casos de estimación de la red vial completa. . . . .	89
3.9. Series de escaneo de datos para el mapa de red vial completa y para los cinco casos. . . . .	90
3.10. Mapas de densidad de largo de calles normalizadas y diferencias con respecto a la referencia.	94
3.11. Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación de la red vial completa usando una combinación de mapas de red vial principal y densidad de población o urbanización. . . . .	95
3.12. Series de escaneo de datos para el mapa de red vial completa y para los tres casos usando combinación de mapas de red vial principal y densidad de población o urbanización. . . . .	95
3.13. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	99
3.14. Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando densidades de largo de calles. . . . .	100
3.15. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando densidades de largo de calles. . . . .	101
3.16. Mapa de diferencia para el caso 1, con información de las zonas industriales obtenida de el mapa de uso de suelos del departamento de geografía y la red vial ESTRAUS. A es un ejemplo de zona industrial, B el centro de la ciudad y C un arco conector de gran flujo (Americo Vesputio, sector la pirámide). . . . .	102
3.17. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	104
3.18. Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando densidades de población y mapas de urbanización. . . . .	105

3.19. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando densidades de población y mapas de urbanización. . . . .	106
3.20. Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando la red vial completa en combinación con mapas de densidad de población y urbanización. . .	108
3.21. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando la red vial principal en combinación con mapas de densidad de población y urbanización. . . . .	108
3.22. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	111
3.23. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos. . . . .	112
3.24. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos. . . . .	113
3.25. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	116
3.26. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	117
3.27. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	118
3.28. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	121
3.29. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	122
3.30. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	123
3.31. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	127
3.32. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo. . . . .	128
3.33. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo. . . . .	128

3.34. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	130
3.35. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad. . . . .	131
3.36. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad. . . . .	131
3.37. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	134
3.38. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo. . . . .	135
3.39. Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo. . . . .	136
3.40. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	139
3.41. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando metodologías descritas previamente. . . . .	140
3.42. Series de escaneo de datos para el inventario oficial optimizado por modelación inversa y las estimaciones usando metodologías descritas previamente. . . . .	141
3.43. Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia. . . . .	143
3.44. Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando metodologías descritas previamente. . . . .	144
3.45. Series de escaneo de datos para el inventario oficial optimizado por modelación inversa y las estimaciones usando metodologías descritas previamente. . . . .	145
A.1. División administrativa de la Región Metropolitana. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	II
A.2. Densidad de población por comunas año 2002. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	III
A.3. Índice de Calidad de la educación año 2001. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	IV
A.4. Índice de Calidad de vida año 2002. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	V
A.5. Índice de Desarrollo humano año 1998. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	VI

A.6. Índice de Prioridad Social año 2000. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	VII
A.7. Porcentaje de población en condición de Indigencia año 2000. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	VIII
A.8. Porcentaje de población en condición de Pobreza año 2000. Ref: otas.gorerm.cl . . . . .	IX
A.9. Red ESTRAUS 2001 para la ciudad de Santiago (red vial principal) . . . . .	X
A.10.Red vial real para la ciudad de Santiago año 2002 (red vial completa) . . . . .	XI
A.11.Densidad de población de alta resolución año 2002. . . . .	XII
A.12.Uso de suelo del departamento de Geografía de la Universidad de Chile, año 2004. . . . .	XIII
A.13.Zona Urbano obtenida del mapa de Uso de suelo del departamento de Geografía de la Universidad de Chile, año 2004. . . . .	XIV
A.14.Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo “Centro Urbano”, obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001. . . . .	XV
A.15.Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo “Industrial”, obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001. . . . .	XVI
A.16.Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo “Residencial”, obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001. . . . .	XVII
A.17.Inventario de emisiones de CO oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana. . . . .	XVIII
A.18.Inventario de emisiones de CO mejorado mediante modelación Inversa para la región Metropolitana. . . . .	XIX
A.19.Inventario de emisiones de CO de fuentes móviles oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana. . . . .	XX
A.20.Inventario de emisiones de CO de fuentes fijas oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana. . . . .	XXI
C.1. Inventario global de CO, EDGAR, año 1995 ( <a href="http://www.mnp.nl/edgar">http://www.mnp.nl/edgar</a> .) . . . . .	XXVII
D.1. Reanálisis NCEP para los períodos del 2 al 11 de enero, 12 al 20 de enero y 21 al 29 de enero. XXXIII	
D.2. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación del aeropuerto de Santiago. . XXXV	



D.3. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Cerrillos. . . . .	XXXVI
D.4. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de El Bosque. . . . .	XXXVI
D.5. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de El Manzano. . . . .	XXXVII
D.6. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de la Torre Entel. . . . .	XXXVII
D.7. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación la Florida. . . . .	XXXVIII
D.8. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Avenida la Paz. . . . .	XXXVIII
D.9. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación La Reina. . . . .	XXXIX
D.10. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Las Condes. . . . .	XXXIX
D.11. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Lo Prado. . . . .	XL
D.12. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Parue O'higgins. . . . .	XL
D.13. Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Pudahuel. . . . .	XLI
D.14. Gradiente de temperatura para todo el período entre las estaciones Lo Prado y Avenida la Paz, para el modelo y las observaciones. . . . .	XLII
D.15. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de el Aeropuerto de Santiago. . . . .	XLIII
D.16. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Cerrillos. . . . .	XLIII
D.17. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de El Bosque. . . . .	XLIV
D.18. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de El Manzano. . . . .	XLIV
D.19. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Torre Entel. . . . .	XLV
D.20. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de La Florida. . . . .	XLV
D.21. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Avenida la Paz. . . . .	XLVI
D.22. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de La Reina. . . . .	XLVI
D.23. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Las Condes. . . . .	XLVII
D.24. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Lo Prado. . . . .	XLVII

D.25. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Parque O'higgins. . . . .	XLVIII
D.26. Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Pudahuel. . . . .	XLVIII
D.27. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación del Aeropuerto de Santiago. . . . .	XLIX
D.28. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de Cerrillos. . . . .	L
D.29. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de El Bosque. . . . .	L
D.30. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de El Manzano. . . . .	LI
D.31. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Torre Entel. . . . .	LI
D.32. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación La Florida. . . . .	LII
D.33. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de La Paz. . . . .	LII
D.34. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de La Reina. . . . .	LIII
D.35. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de Las Condes. . . . .	LIII
D.36. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Lo Prado. . . . .	LIV
D.37. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Parque O'higgins. . . . .	LIV
D.38. Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Pudahuel. . . . .	LV
D.39. Perfiles verticales para las observaciones y el modelo en la estación de Santo Domingo para la Temperatura, Humedad específica y dirección e intensidad del viento. . . . .	LVI
D.40. Gráfico de Taylor para la Temperatura. . . . .	LVII
D.41. Gráfico de Taylor para la Humedad Relativa. . . . .	LVII
D.42. Gráfico de Taylor para la Dirección del Viento. . . . .	LVIII
D.43. Gráfico de Taylor para la Intensidad del viento. . . . .	LVIII
E.1. Ejemplo de capas temáticas de un GIS . . . . .	LX
E.2. Esquema de 2 de los tipos de GIS, Raster y Vectorial, ref: <a href="http://www.gabrielortiz.com">www.gabrielortiz.com</a> . . . . .	LXI

F.1. Relación geométrica entre el coeficiente de correlación $R$ , el error cuadrático medio insesgado $E'$ y las desviaciones standard $\sigma_f$ y $\sigma_r$ del modelo y la referencia respectivamente. ref: Taylor 2001 . . . . .	LXIV
F.2. Diagrama de Taylor para presentar estadísticos. ref: Taylor 2001 . . . . .	LXV
G.1. Grilla del inventario mejorado, numerado por zonas (de 1 a 6) para presentar los gráficos de ciclo diario de emisión ficticio y real . . . . .	LXVI
G.2. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 1. . . . .	LXVII
G.3. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 2. . . . .	LXVIII
G.4. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 3. . . . .	LXIX
G.5. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 4. . . . .	LXX
G.6. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 5. . . . .	LXXI
G.7. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 6. . . . .	LXXII
G.8. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 1. . . . .	LXXIII
G.9. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 2. . . . .	LXXIV
G.10. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 3. . . . .	LXXV
G.11. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 4. . . . .	LXXVI
G.12. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 5. . . . .	LXXVII

G.13. Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 6. . . . . LXXVIII

# Índice de Tablas

2.1. Estaciones de monitoreo de la red MACAM 2 con ubicaciones geográficas. . . . .	7
2.2. Estadísticos entre las observaciones ficticias y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado. . . . .	59
2.3. Estadísticos entre las observaciones en estaciones de monitoreo y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado. . . . .	64
2.4. Estadísticos entre las observaciones en estaciones de monitoreo y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado en un período de simulación distinto al usado en la inversión. . . . .	66
3.1. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para el mapa mejorado y el mapa de densidad por comunas en relación al caso base. . . . .	88
3.2. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 5 casos comparando con la red vial completa. . . . .	91
3.3. Factor óptimo a aplicar al mapa de la red vial principal para cada mapa de densidad y urbanización. . . . .	92
3.4. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con la red vial completa. . . . .	96
3.5. Flujos medios en las calles y Longitud total de la red para las redes viales principal y secundaria.	98
3.6. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia. . . . .	100

3.7. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia. . . . .	105
3.8. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia. . . . .	109
3.9. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos. . . . .	114
3.10. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	117
3.11. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias. . . . .	122
3.12. Clasificación de arcos por tipo de flujo y factor a aplicar a cada categoría. . . . .	125
3.13. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo. . . . .	129
3.14. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad. . . . .	132
3.15. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo. . . . .	135
3.16. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles optimizado (Nuevo) y oficial de CONAMA (Antiguo) usando metodologías descritas previamente. . . . .	140
3.17. Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles optimizado (Nuevo) y oficial de CONAMA (Antiguo) usando metodologías descritas previamente. . . . .	144
B.1. Niveles de emergencia dadas las concentraciones de CO. ref: <a href="http://www.conama.cl">www.conama.cl</a> . . . . .	XXIII

B.2. Límites de emisión de CO para vehículos a gasolina . . . . . XXIV

D.1. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo meteorológicas. . . . . XXXII

# Capítulo 1

## Introducción

La ciudad de Santiago de Chile se encuentra entre una de las más contaminadas del mundo, lo que representa un gran problema para la salud de sus habitantes. Para contrarrestar los efectos de la contaminación un primer paso es disponer de inventarios de emisión que sean confiables, precisos y detallados, con el fin de identificar a los sectores de mayor responsabilidad en la emisión y así tomar medidas. Además, es necesario que estos inventarios provean la información necesaria para ser ocupados en un modelo de predicción de la calidad de aire de forma de ser capaces de predecir episodios y proteger a la población.

El siguiente trabajo está dividido en 2 secciones. En una primera parte se busca utilizar un modelo de calidad de aire (Polyphemus) con el fin de mejorar un inventario de emisiones de CO (monóxido de carbono) correspondiente a la ciudad de Santiago de Chile utilizando técnicas de modelación inversa (Elbern 2007, Pétron et al 2002). En una segunda parte del trabajo se busca realizar una estimación de la distribución espacial de un inventario de emisiones de CO para la ciudad de Santiago usando información de tipo GIS (sistema de información geográfica) como mapas de densidad de población, uso de suelo, índices socio-económicos, distintos niveles de redes viales, entre otras.

### 1.1. Optimización de emisiones por modelación inversa

Sobre la ciudad de Santiago se han realizado por lo menos 2 trabajos anteriores de simulaciones de CO (Gallardo et al, 2000, Schmitz, 2005) donde se encontró una representación aceptable de los ciclos diarios de las concentraciones en las estaciones de monitoreo de la red MACAM2 para 2 años distintos (1998 y 2000 respectivamente), ocupando modelos de dispersión distintos (MATCH y CADM respectivamente) y un inventario de emisiones generado con la metodología MODEM (Corvalán et al, 2002). Sin embargo, hasta el momento no se ha realizado una optimización del inventario de emisiones por medio de modelación inversa.

Para poder realizar la mejora del inventario varias etapas deben ser realizadas previamente:



- Análisis de las observaciones de CO en las estaciones de monitoreo. La optimización del inventario se realizará basándose en mediciones de CO proveniente de la red de monitoreo de calidad de aire MACAM2 de la ciudad de Santiago. Luego, previo a ocupar las mediciones directamente, éstas deben ser analizadas para buscar posibles errores con el fin de descartar períodos de mal funcionamiento o incluso estaciones completas.
- Obtención y validación de campos meteorológicos. El modelo de calidad de aire necesita como entrada los campos meteorológicos (vientos, temperaturas, presiones, etc.) en la zona de análisis para realizar el transporte de los contaminantes. Campos MM5 (modelo meteorológico de la Universidad del estado de Pensilvania y del centro nacional para investigación atmosférica de los Estados Unidos (NCAR)) fueron escogidos y una validación de ellos se puede encontrar en el capítulo de anexos D.
- Validación del modelo de dispersión. Con los campos meteorológicos y el inventario de emisiones se puede utilizar el modelo de dispersión de contaminantes. Es necesario validar el modelo a utilizar (Polyphemus) ya que no ha sido aplicado en una ciudad como Santiago, que tiene características topográficas y meteorológicas distintas a otros lugares. Con la validación se pueden determinar el grado de certeza o incerteza que tiene el modelo, cuando y donde está estimando de buena manera o mala manera.
- Modelación inversa: se puede subdividir en 2 partes
  - Pruebas de la metodología de modelación inversa. Para determinar que la metodología está funcionando de buena manera y entrega resultados correctos es necesario realizar una etapa previa que consiste en utilizar observaciones ficticias en las estaciones de monitoreo. De esta forma se conoce a priori el inventario de emisiones “real” y se puede analizar cuán cerca está el resultado de la modelación inversa con respecto al inventario “real”.
  - Aplicación de la metodología de modelación inversa con observaciones reales. Finalmente, una vez realizados todos los pasos anteriores, es posible obtener un inventario de emisiones mejorado. Luego, debido a que para la inversión se ocupa un set de observaciones correspondiente a un período de tiempo determinado, es necesario realizar una simulación para otro período de tiempo para determinar si el nuevo inventario es una mejora en general, y no sólo para el período seleccionado.

## **1.2. Estimación de la distribución espacial de las emisiones**

La metodología base aplicada para obtener la distribución espacial de las emisiones fue desarrollada en Tuia et al (2007), donde se desarrollaron métodos simples sobre la ciudad de Concepción (ciudad chilena de tamaño medio), encontrándose resultados satisfactorios. Luego, en Ossés et al (2007) se aplicó la

metodología con que se obtuvieron mejores resultados en Tuia et al (2007) y se aplicó a 7 ciudades de Chile de tamaño pequeño y medio, realizando un análisis estadístico, donde se encontró que los resultados tienden a empeorar al aumentar el tamaño y la complejidad de la ciudad. Para el presente trabajo se busca aplicar las metodologías obtenidas en Tuia et al (2007) y mejorarlas tomando en cuenta las recomendaciones hechas en los trabajos anteriores. Además, se aplicarán las metodologías sobre Santiago, que es una mega-ciudad y se usará como referencia no sólo un inventario oficial generado con la metodología MODEM, sino que también el inventario optimizado por modelación inversa obtenido en la primera parte del trabajo.

Los pasos a seguir en esta sección son los siguientes:

- Los métodos existentes son aplicados para la ciudad de Santiago y los resultados son comparados con lo de trabajos anteriores con el fin de ver si las conclusiones existentes son válidas para una ciudad de mayor tamaño, como lo es Santiago, y así buscar formas para mejorar los resultados.
- Utilizando conjuntos de datos no usados en los trabajos anteriores se idean nuevos métodos de estimación de la distribución espacial de las emisiones con el fin de mejorar los resultados de los ya existentes.
- En una primera etapa los resultados son comparados con un inventario obtenido por la metodología MODEM (oficial CONAMA para el año 2002) y luego se cambia la referencia al inventario optimizado por modelación inversa para analizar la sensibilidad de los resultados al usar distintos inventarios como punto de comparación.

### **1.3. Objetivos**

A manera de resumen, los objetivos de este trabajo se pueden separar en principales y secundarios:

#### **1.3.1. Objetivos principales**

- Desarrollar y aplicar una metodología para mejorar un inventario de emisiones de CO para la ciudad de Santiago de Chile utilizando técnicas de modelación inversa.
- Desarrollar y evaluar distintas técnicas de estimación de la distribución espacial de las emisiones de un inventario de CO para la ciudad de Santiago.

#### **1.3.2. Objetivos secundarios**

- Realizar un análisis de observaciones de CO para la ciudad de Santiago.

- Obtener campos meteorológicos de alta resolución sobre la ciudad de Santiago para usarlos como parámetros de entrada del modelo de calidad de aire.
- Dar los primeros pasos en el uso de la plataforma Polyphemus en Chile, pensando en su futuro uso operacional en la predicción de Ozono para Santiago por parte de la dirección meteorológica de Chile (DMC).
- Obtener las concentraciones de CO para la ciudad de Santiago ocupando un modelo de calidad de aire y validar los resultados usando las observaciones analizadas previamente.
- Probar la metodología OI (interpolación optimal) de modelación inversa, adaptándola al caso en estudio.
- Utilizar y mejorar las metodologías en Tuia et al 2007 para distribuir espacialmente las emisiones usando otros tipos de información, como por ejemplo usos de suelo y factores socioeconómicos e incluyendo recomendaciones establecidas en Tuia 2007 y Ossés et al 2007 sobre cómo mejorar la metodología.
- Aplicar los métodos a la ciudad de Santiago Chile, que es una ciudad más grande comparada con las ciudades donde se ha usado el método previamente pensando en su uso futuro en otras mega-ciudades de Sud-América.
- Comparar los resultados de los métodos usados no sólo con el inventario oficial para Santiago, sino también con un inventario mejorado usando modelación inversa.

## Capítulo 2

# Mejora del inventario de emisiones para Santiago de Chile mediante modelación inversa

Un inventario de emisiones surge con el propósito de identificar a él o los responsables de las emisiones producidas en un espacio determinado (ya sea un sector, una ciudad, un continente, etc.) y tomar medidas para disminuir el impacto de las emisiones sobre la población. Sin embargo, es un hecho que los inventarios de emisión tienen altas incertidumbres que dificultan el proceso descrito anteriormente (Power et al 1998). De esta forma es necesario buscar herramientas que permitan mejorar estos inventarios, o sea, llevarlos más cerca a la realidad. Las variables de un inventario que es posible mejorar es la cantidad total emitida de un contaminante en la zona, su distribución espacial y su patrón temporal.

El inventario ocupado en este trabajo es el oficial de CONAMA 2002 de CO para la ciudad de Santiago (para mayor detalle ver anexo C.1). Este inventario está dividido en fuentes fijas y móviles, siendo esta última responsable del 95 % del total de emisiones de CO. El inventario de fuentes móviles se calcula usando la metodología MODEM (Corvalán et al 2002) que es del tipo “Bottom-up”, lo que significa que usa información de alta resolución que después es agregada para obtener el inventario final. En este proceso se realizan una serie de simplificaciones, como por ejemplo el uso de una red vial simplificada y la extrapolación de flujos de punta mañana a todo el dominio temporal, que aumentan la incertidumbre del inventario.

Una forma de mejorar el inventario de emisiones es mediante técnicas de modelación inversa. Esta consiste en usar un modelo de dispersión de contaminantes, el cual es alimentado por el inventario de emisiones y por campos meteorológicos, para obtener concentraciones de los contaminantes en un dominio deseado. Luego estas concentraciones se pueden comparar con las observaciones de concentración obtenidas en estaciones de monitoreo y así encontrar diferencias, las cuales se pueden disminuir ajustando el inventario para obtener una mejor representación de la realidad por parte del modelo. Debido a que este proceso es complejo para contaminantes que dependen de la química atmosférica, se elige un contaminante que puede ser consid-

erado como una traza inerte. Además deben existir observaciones y un inventario de emisiones disponible de este contaminante para la zona de estudio, que se cumple en este caso para el CO. Como las emisiones de CO son producidas principalmente por fuentes móviles los resultados de la modelación inversa podrían ser extrapoladas a otras especies que también son de esta naturaleza, como por ejemplo  $NO_x$ , sin embargo esta aproximación no es siempre cierta debido a que se está suponiendo un error del mismo tipo para el cálculo de las emisiones móviles, lo que no necesariamente es así.

Para realizar la modelación inversa se debe realizar una serie de pasos anteriores que consisten en una revisión de las observaciones en las estaciones de monitoreo, validación del modelo de dispersión y validación de la metodología de modelación inversa, las cuales se encuentran en lo que sigue de este capítulo.

## **2.1. Análisis de las concentraciones de CO de Santiago**

En el contexto de este trabajo es necesario validar la simulación del modelo de dispersión de contaminantes usando las observaciones en las estaciones de monitoreo. Las mismas observaciones son utilizadas para mejorar un inventario de emisiones mediante la técnica de modelación inversa. Por ello es pertinente analizar las observaciones en cuanto a errores y representatividad. Esto conlleva considerar los errores de precisión intrínseco del instrumento, el cual debe ser consistente con la magnitud de las mediciones y errores de calibración y de cero del instrumento. Este análisis considerará juicio experto, comparación entre estaciones y análisis estadísticos, entre otros aspectos.

### **2.1.1. Medición de la calidad del aire en Santiago**

Hacia mediados de la década del 90, la ciudad de Santiago fue declarada Zona Saturada (niveles superiores a la norma) para material particulado respirable (PM10), monóxido de carbono (CO) y ozono ( $O_3$ ), y Zona Latente (niveles entre el 80 % y el 100 % de la norma) para dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). Esta declaración fue el paso previo para la formulación de un Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA), instrumento contemplado en la Ley de Bases del Medio Ambiente (Ley 19.300) para coordinar las medidas locales tendientes a recuperar la calidad ambiental.

Con el fin de verificar el cumplimiento del PPDA y de hacer un seguimiento de la exposición de la población se mejoró la red de monitoreo de la calidad del aire, constituyéndose la red MACAM 2 (Monitoreo automático de la calidad del aire de la región metropolitana). Esta red corresponde a una expansión de la Red antigua (MACAM 1). La red MACAM 2 fue instalada en el año 1997 y cuenta con 8 estaciones de monitoreo ubicadas en distintos sectores de Santiago (ver tabla 2.1). Esta red mide cinco contaminantes: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), ozono ( $O_3$ ) e hidrocarburos totales (la suma de metánicos y no metánicos).

La ubicación de las estaciones de monitoreo fue definida para representar la calidad del aire de distintos sectores de la ciudad, no tan próxima a fuentes contaminantes, y conservando la idea de escala vecinal (1km). La Red de Vigilancia de Calidad del Aire se ubicó en lugares que representaran distintas zonas poblacionales de la región de modo de evaluar los grados de exposición de la población de Santiago a la contaminación.

En la tabla 2.1 se muestran las estaciones de monitoreo separadas por sector y con sus respectivas ubicaciones geográficas y en la figura 2.1 se muestra un mapa de las estaciones.

Tabla 2.1: Estaciones de monitoreo de la red MACAM 2 con ubicaciones geográficas.

Sector	Estaciones de Monitoreo
Santiago Central	Parque O'Higgins (33°27'S, 70°39'W)
Santiago Sur	La Florida (33°31'S, 70°34'W) El Bosque (33°32'S, 70°39'W)
Santiago Oeste	Pudahuel (33°26'S, 70°44'W) Cerrillos (33°29'S, 70°42'W)
Santiago Norte	Avenida La Paz (33°25'S, 70°38'W)
Santiago Este	Las Condes (33°22'S, 70°31'W) Providencia (33°21'S, 70°38'W)

Los equipos usados para la medición de CO en la cuenca de Santiago son de 2 marcas distintas, API y Monithor Lab. A pesar de ser de distintos fabricantes, el método de medición es el mismo y los resultados son similares.

El método de medición usado en estos equipos es de absorción de luz infrarroja mediante filtro de correlación. Consiste en que se hace entrar un flujo continuo de aire por el instrumento al cual se le aplica un rayo infrarrojo de donde se obtiene una primera medida. Luego este flujo es filtrado, de forma de que el aire quede libre de CO. Posteriormente se vuelve a aplicar el rayo infrarrojo. La concentración final de CO se obtiene restando la primera medida con la segunda. Estos equipos tienen una precisión de +/- 0,1 [ppm], y un límite de detección inferior de 0,04 [ppm]. En la práctica, no se miden valores bajo 0,1 [ppm] debido a que si se midieran estos valores, se podrían obtener concentraciones negativas debido al error de precisión.

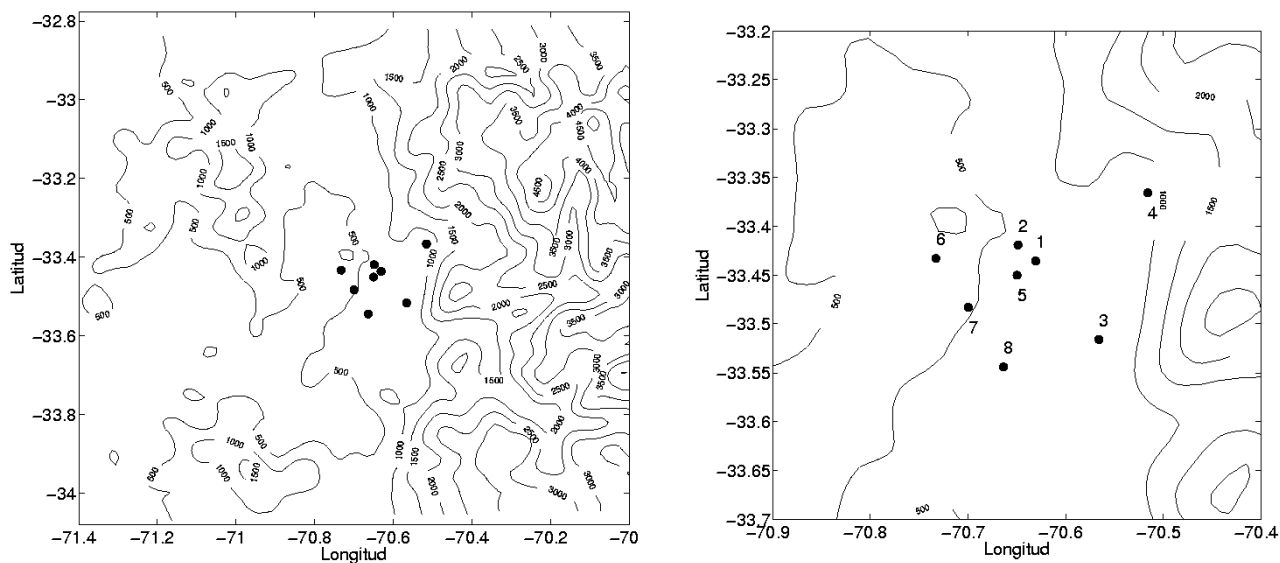


Figura 2.1: Mapa de las estaciones de monitoreo de la red MACAM2 y topografía de la cuenca de Santiago. El lado izquierdo de la figura es un acercamiento centrado en la ciudad de Santiago. Estaciones: 1:Providencia, 2:Independencia, 3:La Florida, 4: Las Condes, 5:Santiago, 6:Pudahuel, 7:Cerrillos, 8:El Bosque.

A estos equipos se les hace mantención una vez al año, a menos que se detecte algún mal funcionamiento. Esto ocurre normalmente alrededor de Marzo, para preparar a los equipos para la época más crítica de episodios de contaminación en los meses de invierno.

El procedimiento de calibración consiste en dos aproximaciones. La primera es llamada 0 y “span”. El “span” consiste en que aproximadamente a las 2 de la mañana, todos los días, mediante dilutores de gases, se hace pasar por 10 minutos un gas de una razón de mezcla de 40 [ppm]. Luego al otro día se verifica la concentración medida por el equipo. Si no es 40 [ppm] se corrige, y con esto los datos se validan.

Otro tipo de calibración es la utilización de una bitácora donde se anotan eventos que ocurrieron en cada estación como mantenciones, visitas de personas a la estación, incendios en los alrededores, etc. Luego las medidas se corrigen considerando estos eventos. Toda la información técnica mencionada previamente se obtuvo a partir de conversaciones personales con Víctor Berríos (Jefe red MACAM2) y Pamela Villavicencio (sección operación y mantención de estaciones laboratorio instrumental de la red MACAM2).

### 2.1.2. Metodología

Para la validación del modelo de calidad de aire y la modelación inversa se usarán concentraciones de CO para el mes de Enero del 2002, debido que las condiciones meteorológicas no presentan grandes variaciones, lo que facilita este estudio. Luego esta sección se concentra en el análisis de las observaciones de este período.

Además se harán algunos de los análisis utilizando información de otros años para verificar qué tan representativo es el comportamiento de las concentraciones de Enero del 2002 con respecto a concentraciones medidas en otros años.

Los datos fueron obtenidos de la página web de la autoridad sanitaria de la Región Metropolitana (<http://www.seremisaludrm.cl>). Estos corresponden a datos oficiales.

Para el análisis se presentaran los siguientes gráficos:

- Series de tiempo: Consisten en graficar para cada estación por separado todas las mediciones en función del tiempo.
- Ciclos diurnos: Consisten en graficar para cada estación el promedio para cada hora para todo el período. Finalmente se obtiene un día representativo del período. Da una idea del ciclo que siguen las observaciones durante el período seleccionado.
- Variación interdiaria o sinóptica. Para cada estación se grafica el promedio de todas las horas de cada día. Finalmente, se obtiene un gráfico donde para cada día del período en estudio se tiene un valor promedio de las concentraciones ocurridas en ese día durante las 1 y 24 horas. Es útil para borrar el ciclo diario y observar la variación sinóptica durante el período.

### **2.1.3. Resultados**

#### **2.1.3.1. Series de tiempo para el período estudiado**

En las figura 2.2 se presentan las series de tiempo de las concentraciones de CO horarias del mes de Enero del 2002. La inspección visual de las series de tiempo deja en evidencia que los valores bajo 0.1 [ppm] son excluidos.

La estación de “Cerrillos” presenta una variabilidad inconsistente con la de otras estaciones en el sector poniente de Santiago. En particular en los días 7, 13, 18, 19 y 22 de Enero los valores permanecen fijos en 0.1 [ppm].



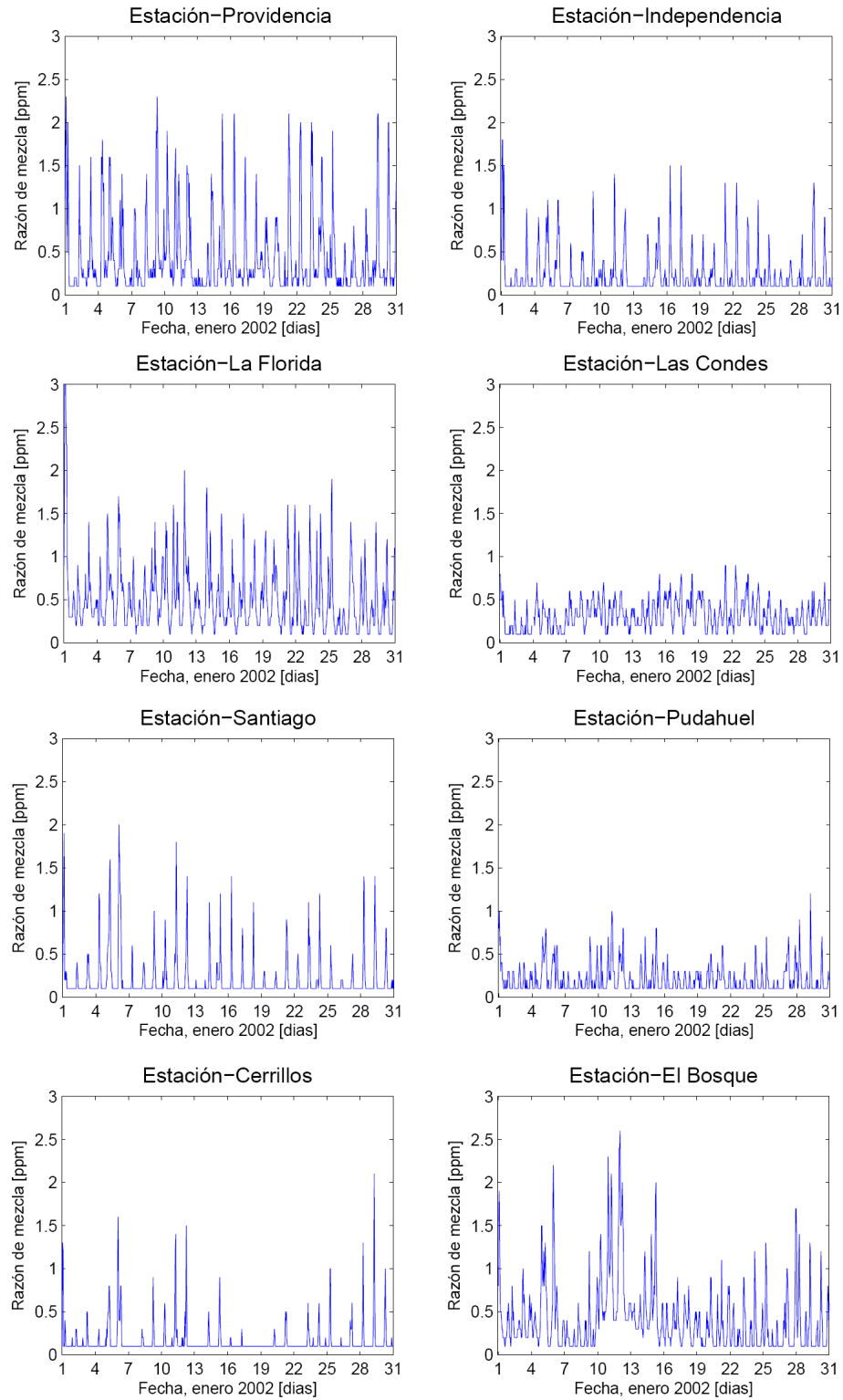


Figura 2.2: Series de tiempo completa para el mes de Enero del 2002.

Algo similar ocurre en la estación de “Independencia” durante todo el día 13 de Enero. Sin embargo, durante este período en la mayoría de las otras estaciones se ve que las concentraciones bajan (ver “Providencia”, “Santiago” y “Pudahuel”), lo que indicaría que esto está asociado a una condición sinóptica dentro de la cuenca o una condición de emisión baja, por lo que este período no puede ser descartado.

La estación “El Bosque” muestra una alteración en los límites inferiores entre el 1 al 5 y del 9 al 14 de Enero. Además los valores de las concentraciones aumentan, lo que podría ser un indicador de problemas en la calibración del cero del instrumento. Cabe hacer notar que este aumento no se observa en las otras estaciones, razón por la cual atribuimos este comportamiento a una mala calibración del instrumento.

A partir de los análisis anteriores, se decide excluir los valores de las estaciones “Cerrillos” y “El Bosque” en los períodos mencionados previamente.

### **2.1.3.2. Ciclo diurno para el mes de Enero**

Estos gráficos representan un día típico del mes de estudio en cada estación. Los resultados se ven en la figura 2.3.

Todas las estaciones, excepto “Las Condes”, muestran un máximo matutino asociable, por un lado, al máximo relativo a emisiones y, por otro lado, a las condiciones meteorológicas estables que prevalecen en la noche y la mañana. En el atardecer, es decir, alrededor de las 19 horas, en todas las estaciones aumenta la razón de mezcla de CO. Esto se asocia, por una parte, al aumento de las emisiones debido al segundo máximo diario, y por otra parte, a las condiciones estables que se comienzan a desarrollarse con el inicio de la noche.

Coincidentemente con el máximo de insolación, las concentraciones mínimas se observan alrededor de las 15 y las 19 horas. Ello se atribuye a la mayor mezcla atmosférica que ocurre en estas horas, debido a un aumento en la mezcla vertical.

En cuanto a la variabilidad del ciclo diurno es de destacar los altos valores encontrados en la horas de la noche, donde las barras de error son de tamaño considerable en relación a la magnitud de las concentraciones a estas horas. Este fenómeno se debe a que no existe un patrón determinado en las horas de la noche, variando de gran manera de un día a otro.

La estación de “Las Condes” presenta un ciclo diario diferente a las demás, con un máximo alrededor de las 12 del día. Este comportamiento puede deberse a que en esta comuna los ciclos diarios de emisión son distintos, posiblemente a cambios en el ciclo diurno de los flujos vehiculares. Se debe notar que esta estación es muy regular, debido a que, en general, la desviación estándar está dentro del error de medición.

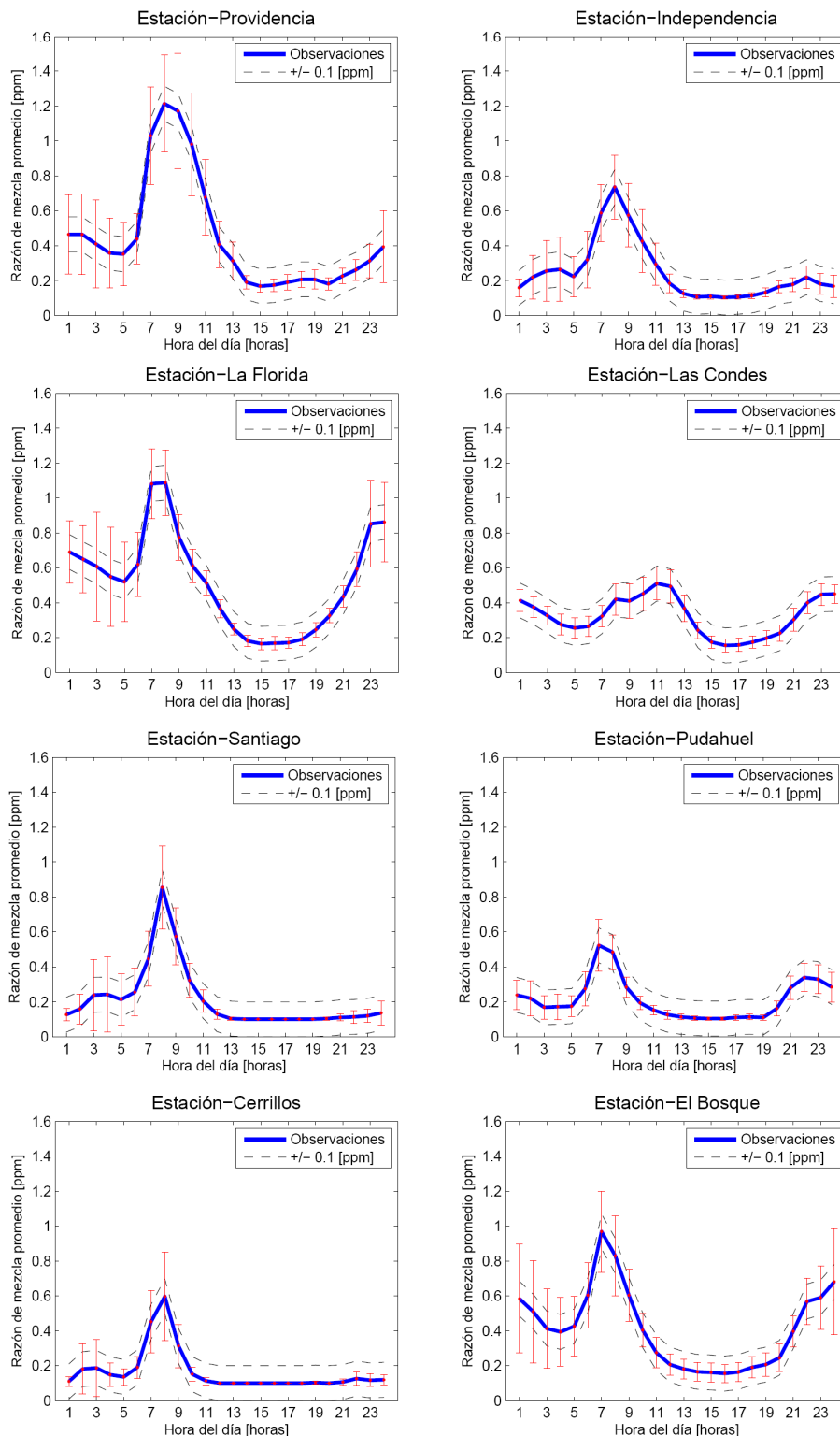


Figura 2.3: Ciclo diario para el mes de Enero del 2002. Las barras de error representan  $\pm 1/2$  desviación estándar con respecto al promedio. Las líneas segmentadas indican el error del precisión del instrumento (0.1 [ppm]).

Se debe notar que siete de las ocho las estaciones en general tienen 2 máximos diarios (ver también figura 2.2), siendo el de la mañana más intenso que el de la tarde. Sin embargo, la estación de “Santiago” presenta sólo un máximo durante la mañana lo cual es un comportamiento normal en esta estación a través de los años (ver figura 2.6).

En las estaciones “Independencia”, “Santiago”, “Pudahuel” y “Cerrillos” se ve que la razón de mezcla medida durante la tarde está bajo el límite de detección. Por esto se obtienen desviaciones estándar cercanas a 0 y la línea de  $-0.1$  [ppm] está en 0. En la estación de “Cerrillos” este comportamiento es más prolongado, ya que ocurre desde las 11 de la mañana hasta las 20 horas.

### **2.1.3.3. Variación interdiaria o sinóptica para Enero del 2002**

Las observaciones muestran una variabilidad asociable al cambio en las condiciones meteorológicas de gran escala. Para cuantificar dicha variabilidad se muestra los gráficos de variabilidad interdiaria o sinóptica, que consisten en promediar las 24 horas de cada día dentro del período de estudio. Se encuentran en la figura 2.4. Mediante estos gráficos se puede ver la variabilidad sinóptica en la cuenca a través de los días, y ver si esta variabilidad se ve representada en todas las estaciones.

Dado que las condiciones meteorológicas de gran escala (sinópticas) afectan a toda la cuenca de Santiago, la variabilidad interdiaria es similar en todas las estaciones. Durante este mes se pueden reconocer 3 períodos meteorológicos (para más detalle, ver anexo D):

- Período 1 (del 2 al 11 de Enero): Predominancia de la alta del Pacífico (AP) lo que conlleva a condiciones estables.
- Período 2 (del 12 al 20 de Enero): Ingreso de una vaguada que irrumpe el flujo del oeste asociado a mezcla vertical, seguido de subsidencia intensificada y comienzo de la recuperación de la AP.
- Período 3 (del 21 al 31 de Enero): Recuperación de la AP.

Además, en torno al 10 de Enero se observa una vaguada costera, con vientos del este y estabilización de la cuenca (aumento en las concentraciones).

### **2.1.3.4. Variación interdiaria o sinóptica para todos los años**

Se obtuvieron los gráficos de variación interdiaria para todo el período en que han habido mediciones de CO. También se muestran los promedios anuales para establecer tendencias. Corresponden a la figura 2.5.

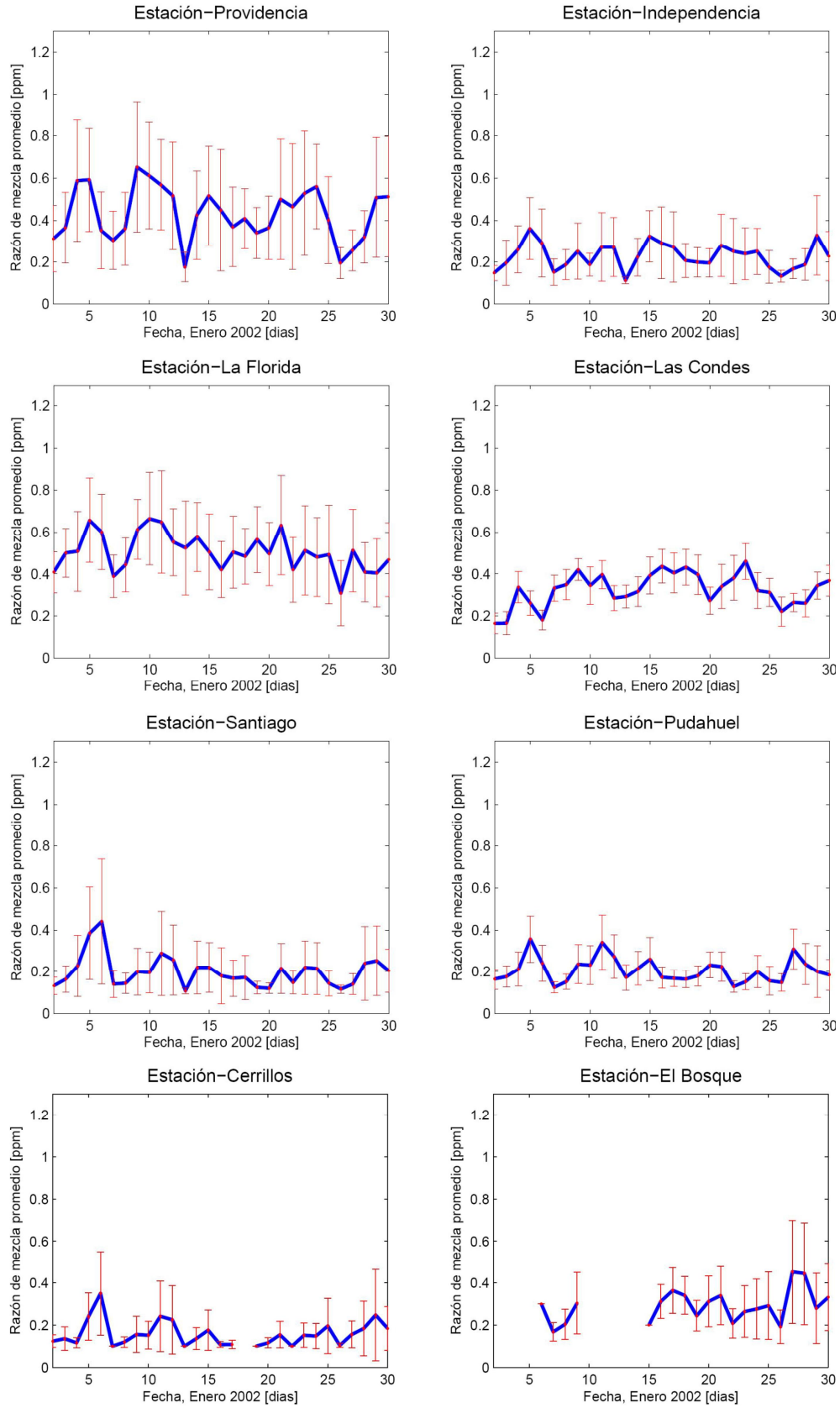


Figura 2.4: Variación interdiaria para el mes de Enero del 2002.

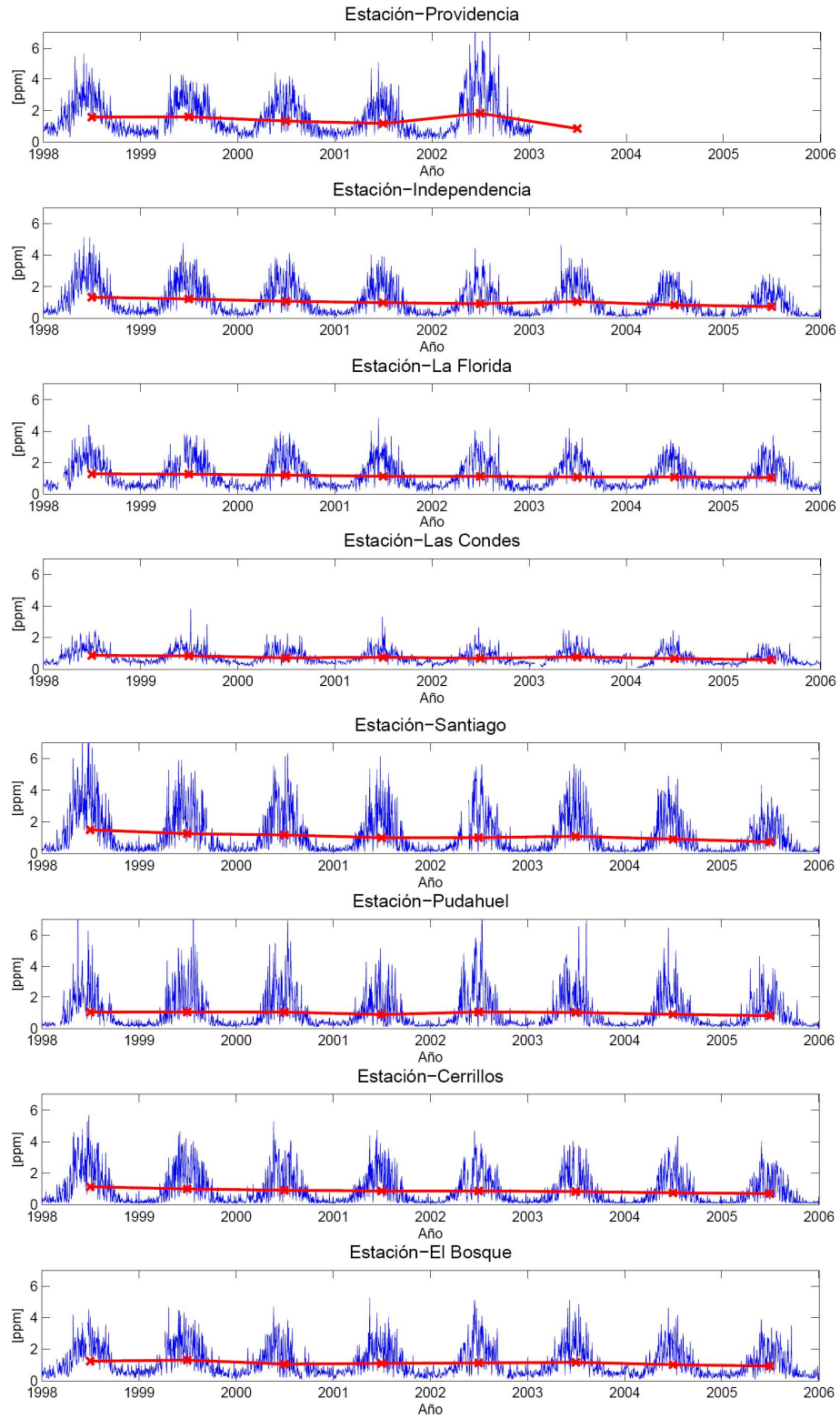


Figura 2.5: Variación interdiaria para todo el período de obtención de datos. La línea con mayor variación representa promedios diarios y la línea más horizontal promedios anuales

Las figuras muestran el ciclo anual de CO, donde las concentraciones aumentan en los períodos de Otoño e Invierno debido a la estabilidad generada en la cuenca de Santiago y disminuyen en los períodos de primavera y verano. Además se ve que en los períodos de invierno y otoño la variabilidad es alta y en verano y primavera es baja.

La tendencia en las distintas estaciones es en general a la baja a través de los años. La estación de “Providencia” sólo tiene datos registrados hasta el año 2003. El año 2002 durante el período de invierno esta estación presentó un comportamiento anormal, mostrando concentraciones más altas de lo esperadas (no sigue la tendencia de las otras estaciones) no así en el período de verano del 2002.

#### **2.1.3.5. Ciclos diarios de Enero, para todos los años**

Con el fin de evaluar el cambio de los ciclos diarios a lo largo de los años, se graficaron los ciclos diarios en cada estación para todos los años donde se tienen datos. Estos gráficos se encuentran en la figura 2.6.

Como se ha discutido antes el ciclo diurno de CO obedece principalmente al ciclo diario de insolación solar y al ciclo de emisiones. En efecto, salvo diferencias debidas a cambios en los niveles de emisión a través de los años, los ciclos diarios estivales (Enero) en Santiago muestran un comportamiento análogo. Esto, más allá de mostrar la similitud en las condiciones meteorológicas estivales, indica también que los ciclos de emisión son similares, los que dependen principalmente de los ciclos de conducción. Es decir, los ciclos de conducción tampoco varían de gran manera de año a año.

A lo dicho anteriormente existen pequeñas excepciones. Para la estación de “Providencia” se ve que el año 2003, que es el último año donde se tienen datos, es el de mayor nivel. Esta curva no debe ser considerada porque seguramente muestra un mal funcionamiento de la estación. En los gráficos de variación interdiaria para todos los años (figura 2.5) se ve que en el año 2002 hay un aumento de las concentraciones, que es anormal en comparación con las demás estaciones. Sin embargo, para el mes de enero no se muestra este comportamiento, obteniéndose niveles de concentración más bajos que los demás años. De aquí se puede deducir que la estación de “Providencia” en el 2002 presenta valores esperados.

La estación “Las Condes”, la cual tiene un ciclo diario distinto al de las demás estaciones, mantiene su ciclo diario en todos los años menos en el 2004, donde los niveles de concentración aumentan considerablemente. Este comportamiento es anómalo y no ocurre en las demás estaciones, lo que podría deberse a una mala calibración del instrumento en este período.

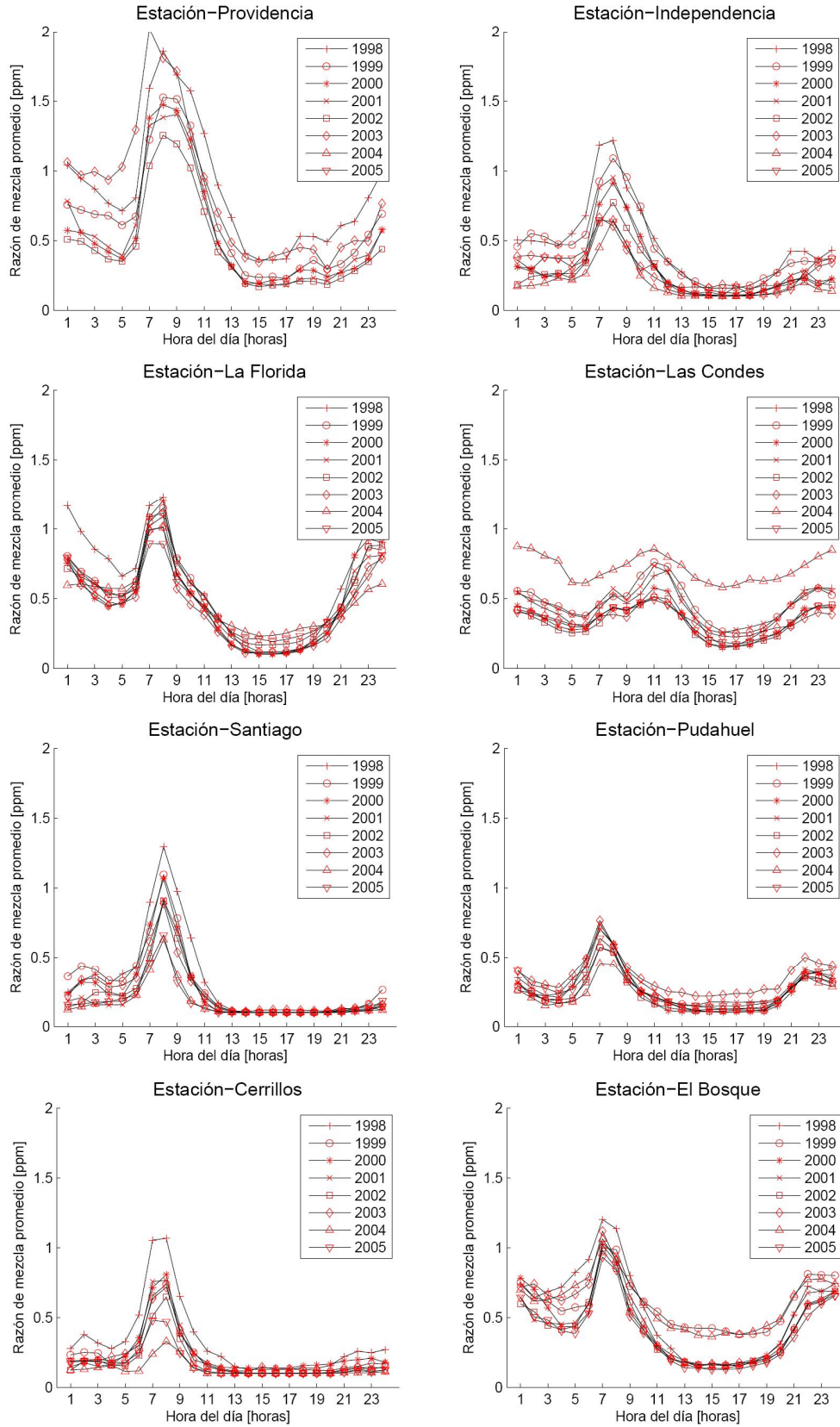


Figura 2.6: Ciclo diario para el mes de Enero para todos los años donde hay datos por estación.



#### 2.1.4. Conclusiones

Los análisis mostrados han permitido seleccionar los datos que se usarán luego en la validación del modelo de dispersión y la modelación inversa, y además, entender cuales son los patrones principales y tendencias seguidos por las observaciones.

El ciclo diario de las observaciones de CO en la ciudad de Santiago para un mes de Enero (época estival) depende del ciclo diario de insolación, encontrándose mínimos de concentración cuando la insolación es máxima por el aumento en la mezcla vertical, y del ciclo diario de emisiones, encontrándose normalmente 2 máximos diarios de razón de mezcla, que obedecen a los máximos en las emisiones, y valores bajos durante las noche donde las emisiones decrecen de gran manera. La variación interdiaria de las observaciones de CO en todas las estaciones es similar, debido a que todas las estaciones se encuentran dentro de la cuenca y su comportamiento meteorológico está regido por las condiciones de gran escala, que en este período muestra una entrada de la alta del pacífico y un episodio de baja costera.

La estación de “Cerrillos” tiene períodos de varios días en los cuales no mide concentraciones, lo cual no se ve reflejado en las demás estaciones. Luego estos períodos no serán considerados en los análisis posteriores.

La estación de “El Bosque”, en el período analizado tiene un problema de calibración del 0, obteniendo un período de concentraciones altas que no es normal. Este período tampoco será considerado.

Las estaciones de “Las Condes” y “Santiago” tienen un ciclo diario distinto al ciclo típico que muestran las demás estaciones que se encuentran dentro de la cuenca. “Las Condes” tiene un máximo de concentración en el medio día y “Santiago” posee sólo un máximo diario. Este es un factor que se debe tener en cuenta al momento de ocupar estas estaciones en los análisis posteriores.

Las demás series de tiempo de las estaciones muestran un comportamiento normal, que no tiene grandes variaciones de año a año y que son consistentes entre ellas al tener comportamientos similares por estar dentro de la cuenca de Santiago.

## 2.2. Validación del modelo de calidad de aire

En esta sección se busca ocupar un modelo de química y transporte de contaminantes (CTM) para la zona de la ciudad de Santiago en conjunto con un inventario de emisiones y campos meteorológicos con el fin de representar la situación real de la calidad del aire en la ciudad. El modelo de calidad de aire será validado usando las mediciones de calidad de aire analizadas en la sección 2.1. Para una descripción detallada de monóxido de carbono (CO) ver anexo B.

### 2.2.1. Área de estudio: Gran Santiago

La ciudad de Santiago (33.5°S, 70.8°W) está localizada en el valle de Chile central. Este valle se encuentra limitado hacia el este por la cordillera de los Andes, la cual tiene un altitud promedio de 4500 [m] s.n.m. Hacia el oeste se encuentra una cadena montañosa de menor altitud (Cordillera de la Costa, 1500 [m] de altitud promedio) y de este a oeste, tanto como en el norte como en el sur del valle se encuentran 2 cadenas montañosas que terminan por delimitar al valle (ver figura 2.1).

El clima de Chile central es semi-árido, controlado fuertemente por factores radiativos (Gallardo et al 2000). La precipitación promedio sobre Santiago es aproximadamente 300 [mm] de agua lluvia por año con una amplia variabilidad de un año a otro. El intercambio vertical de aire durante la mayor parte del año está controlado por la inversión de térmica de subsidencia debido a la rama descendente de la celda de Hadley. En el valle los vientos son principalmente suroeste a lo largo del año, sin embargo durante el invierno también se encuentran frecuentemente vientos noroeste. Los valles del Mapocho y el Maipo ayudan a la ventilación y drenaje de aire frío de la cuenca en las fases más extremas del ciclo diario. Todos estos factores en conjunto resultan en una condición desfavorable para la dispersión de contaminantes en el valle, especialmente durante otoño e invierno. Las condiciones de inversión térmica de subsidencia se ven intensificadas en otoño e invierno por las bajas costeras bajando la base de la inversión (Rutlant y Garreaud, 1995). En primavera y verano existe una intensificación de la radiación solar lo que incrementa la altura de capa de mezcla disminuyendo la concentración de los contaminantes. Sin embargo, la mayor radiación incrementa los flujos actínicos resultando en el incremento de reacciones fotoquímicas.

Cerca de un tercio de la población de Chile vive en la Región Metropolitana. Debido a esto en la ciudad se encuentra una gran concentración de industrias, transporte privado y público, consumo de energía y otras actividades que resultan en emisiones de contaminantes.

Combinando las condiciones meteorológicas adversas con respecto a la ventilación del valle y la emisión de contaminantes a la atmósfera se obtiene una alta concentración de contaminantes en la atmósfera en la ciudad de Santiago. Las máximas concentraciones de partículas y contaminantes debido principalmente

a procesos de combustión ocurren durante otoño e invierno, mientras que en primavera y verano se dan máximos en la concentración de ozono troposférico.

### 2.2.2. La ecuación de continuidad

Para un modelo de dispersión de contaminantes la ecuación principal a resolver es la ecuación de la Continuidad, llamada también ecuación de Conservación de la Masa. Esta ecuación, expresada en su forma Euleriana, es la siguiente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c(\nabla \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la concentración,  $t$  el tiempo,  $\vec{v}$  la velocidad del viento,  $c'$  y  $\vec{v}'$  perturbaciones en torno a la media para la concentración y la velocidad del viento respectivamente y  $Q$  y  $S$  las fuentes y los sumideros.

Dentro de la ecuación de continuidad, se puede identificar la parte correspondiente al transporte de los contaminantes dada por la siguiente expresión:

$$-\vec{v} \cdot \nabla c - c(\nabla \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) \quad (2.2)$$

El primer término de esta ecuación corresponde a la variación por advección por el flujo promedio. Este término es generalmente más importante en la horizontal, debido que aquí se encuentran vientos de alta magnitud. El segundo término corresponde a la variación por convergencia o divergencia de aire, debido a que el aire es tomado como fluido compresible. El tercer término corresponde a la variación de la concentración por flujos turbulentos. Este término tiende a ser más importante en la vertical, debido a la baja velocidad del viento en esta dirección.

Existen una gran cantidad de fuentes y sumideros en la atmósfera, que pueden ser separados en las siguientes categorías:

- Emisiones: Son consideradas como fuentes. Se pueden separar en puntuales, de área o en volumen. Se obtienen de los inventarios de emisiones.
- Transformaciones químicas. Pueden ser tanto fuentes como sumideros. Pueden ser expresadas como tasas de reacción (función de la presión y la temperatura), tanto químicas como fotoquímicas.
- Deposición: Existen dos tipos, deposición seca y húmeda. La deposición húmeda ocurre cuando gotas de nube, gotas de neblina, lluvia o nieve arrastran o disuelven los contaminantes. La deposición seca está dada por la fijación de los contaminantes a la superficie terrestre. Estos procesos son descritos

como parametrizaciones principalmente dados por un coeficiente de remoción, o una velocidad de deposición.

### **2.2.3. La plataforma Polyphemus**

Polyphemus (Mallet et al 2007) es un sistema de modelación de la calidad de aire de código abierto desarrollado por ENPC-CEREA (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique) e INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique). Contiene numerosos modelos de dispersión, para distintos tipos de escalas, para varios tipos de contaminantes, para procesar varios tipos de parámetros de entrada y posee metodologías avanzadas para asimilación de datos, Ensemble Forecasting, acoplamiento de modelos, entre otros.

Polyphemus considera 3 etapas principales:

1. Preprocesamiento: En esta etapa se leen los datos de entrada que va a usar el modelo de dispersión y se interpolan a la grilla a utilizar. Además, se calculan la mayor cantidad de parametrizaciones físicas que se puedan de forma de realizar la menor cantidad de cálculos en la etapa del modelo de química y dispersión.
2. Modelo de química y dispersión. Polyphemus posee básicamente 2 tipos, los modelos Eulerianos (Polar3d, Castor) y modelos gaussianos. Estos toman como entrada los resultados de la etapa de preprocesamiento (por ejemplo, campos de vientos, temperaturas, tasas de transformación química, emisiones, condiciones de borde lateral, etc.) y entregan como salida las concentraciones de los contaminantes en la grilla del modelo.
3. Postprocesamiento: Son librerías especiales (AtmoPy) para leer y graficar las salidas del modelo de dispersión.

Una descripción más detallada de las etapas de funcionamiento de Polyphemus se puede encontrar en el diagrama 2.7.

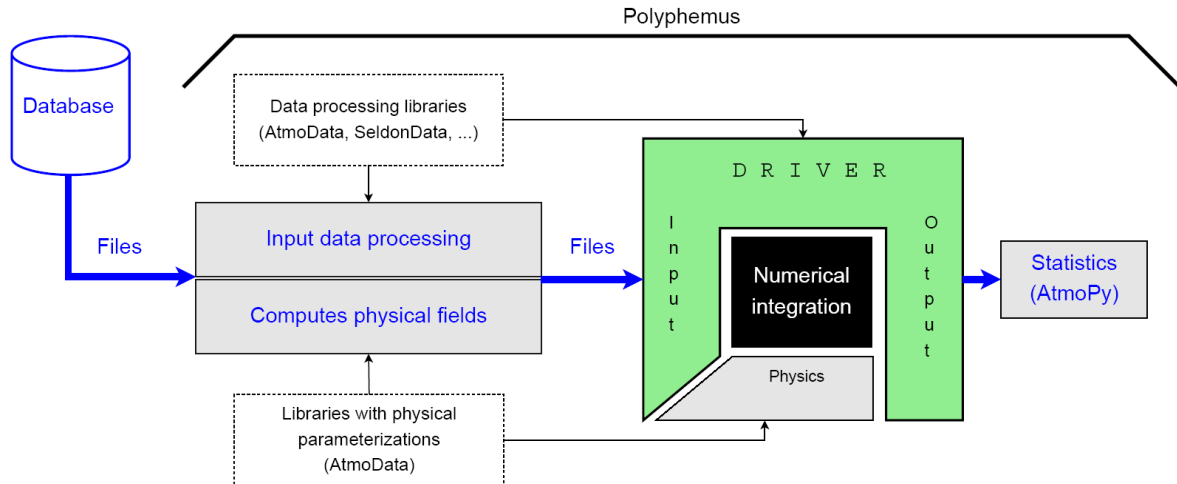


Figura 2.7: Diagrama de flujos de trabajo de Polyphemus. Los datos son pre-procesados con librerías C++ especializadas (SeldonData y AtmoData). El modelo numérico integra la ecuación de transporte en el tiempo y los drivers manejan los resultados dependiendo del tipo de modelación (directa, con asimilación de datos, etc). Para Post-procesamiento es ocupada la librería AtmoPy. ref: Mallet et al 2007

## 2.2.4. Trabajos anteriores

Se pueden encontrar por lo menos 2 trabajos anteriores que simulan la calidad del aire sobre la ciudad de Santiago para CO, que son Gallardo et al 2000 y Schmitz 2005. Los principales resultados de estos trabajos son una representación aceptable de los ciclos diarios de concentraciones, una sobrestimación de las concentraciones en la zona central y subestimación en la zona este y una subestimación en las horas de la noche para todas las estaciones.

### 2.2.4.1. Gallardo et al 2000

Es una simulación de CO para el mes de Enero del año 1998 (Gallardo et al 2000) usando un inventario de emisiones de fuentes móviles de alta resolución espacial ( $1 \times 1 \text{ km}^2$ ), sin química atmosférica y resolución temporal de 1 hora, diferenciando entre días de semana y fines de semana. Este inventario fue obtenido mediante la metodología MODEM.

El modelo usado fue HIRLAM-MATCH (Robertson et al 1996). HIRLAM es un modelo meteorológico de área limitada aplicado con una resolución horizontal de  $10 \times 10 \text{ km}^2$ . El modelo de dispersión usado fue MATCH, que es un modelo de área limitada, off-line y Euleriano. La grilla horizontal usada para MATCH es de  $5 \times 5 \text{ km}^2$  y 15 niveles en la vertical hasta una altura de  $5 \text{ km}$  y las concentraciones fueron guardadas cada 3 horas. Las condiciones de borde son consideradas como aire limpio.

Las observaciones corresponden a la red MACAM2, sin embargo, debido a que la resolución espacial del modelo es relativamente gruesa, las estaciones son agrupadas según la zona de la ciudad en la que se encuentre.

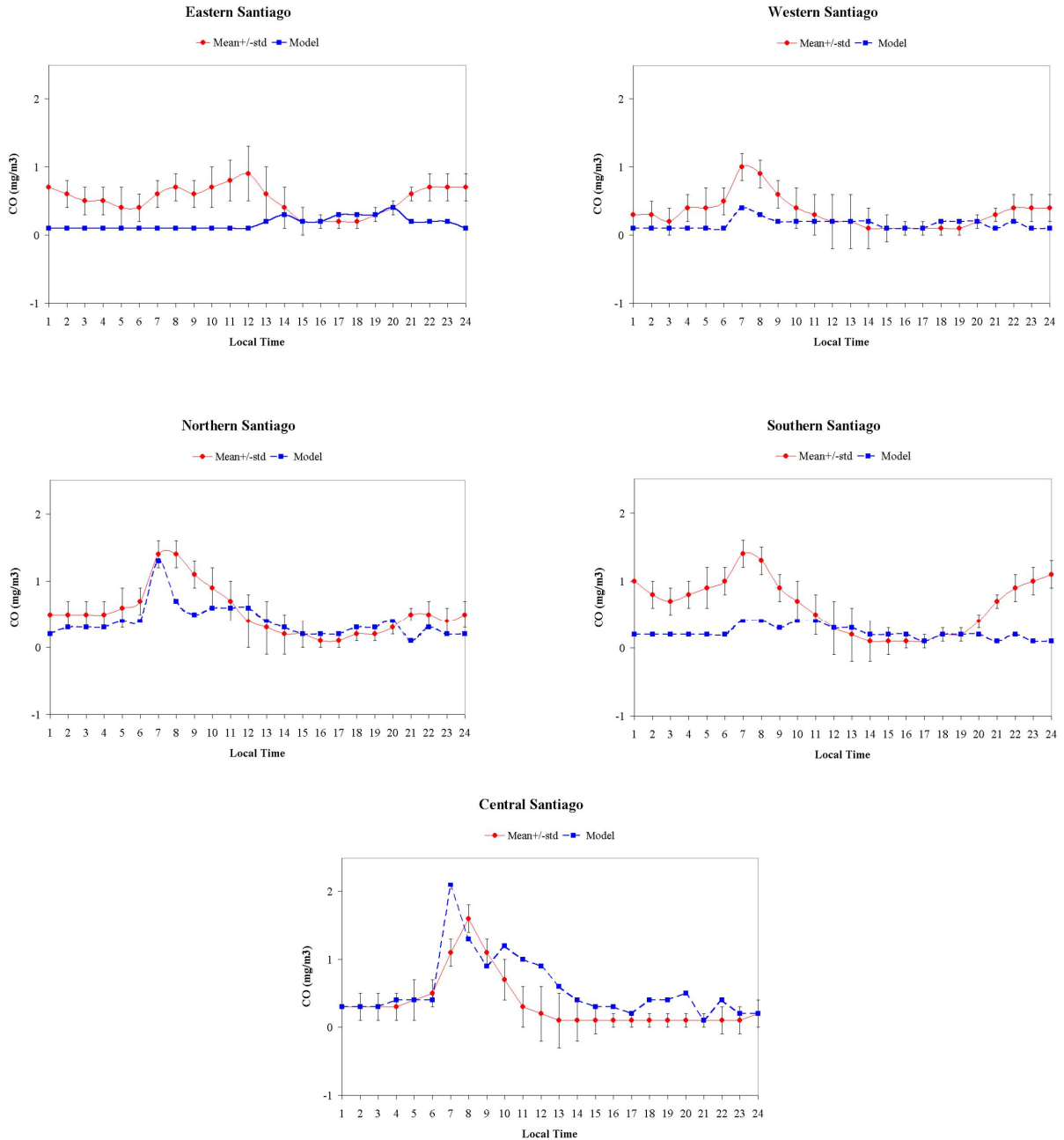


Figura 2.8: Ciclos diurnos por sector. Los círculos corresponden a las observaciones (por hora) y los cuadrados a los valores simulados (cada 3 horas). Las barras de error indican 1 desviación Standard de la media. ref: Gallardo et al 2000

Los resultados muestran que el modelo es capaz de representar el ciclo diario con las mayores concen-

traciones en la hora de la mañana de mayor actividad vehicular (7-8 de la mañana) y un máximo menos pronunciado durante la tarde. Los valores diarios tienden a ser bien estimados, sin embargo los valores nocturnos tienden a ser subestimados.

En la figura 2.8 se pueden apreciar los ciclos diurnos para cada sector. En la zona central de Santiago se obtiene una sobrestimación de las concentraciones. El modelo representa el hecho de que los vientos soplan en dirección suroeste durante el día, y en dirección opuesta durante la noche, representado por una acumulación de contaminantes en la estación de Las Condes hacia la tarde-noche. Sin embargo, para esta estación, el patrón de un máximo al medio día no es representado.

#### 2.2.4.2. Schmitz 2005

Es una simulación de CO para el mes de Enero del año 2002. Los campos meteorológicos usados son simulaciones del modelo meteorológico MM5, el cual será descrito posteriormente. Las emisiones corresponden al inventario oficial CONAMA 2002, que es el mismo ocupado en el presente trabajo y en Gallardo et al 2000 sólo que para un año distinto. Las observaciones de CO corresponden a la red MACAM2.

El modelo de transporte utilizado es el Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Chileno (CADM, Schmitz 2004), que es un modelo de transporte, fotoquímico, off-line y Euleriano en 3 dimensiones desarrollado centrándose en la región metropolitana de Chile. Para el caso de CO sólo se ocupa el modulo de transporte (sin química). Deposición seca o húmeda tampoco es considerada. Las simulaciones se realizan con una resolución espacial de  $2 \times 2 \text{ km}^2$  y 30 niveles verticales (los niveles del modelo meteorológico) y una resolución temporal de 1 hora. Las condiciones de borde son consideradas como aire limpio.

Quantitative measures of the CO dispersion as predicted by the CADM model for January 2002

Station	$\bar{O}$	$\bar{P}$	$\sigma_o$	$\sigma_p$	MAE	RMSE	$r$
B	0.50	0.70	0.52	0.56	0.19	0.61	0.43
O	0.23	0.25	0.21	0.16	0.03	0.21	0.39
N	0.18	0.93	0.33	0.90	0.76	1.11	0.48
M	0.39	0.24	0.20	0.18	0.15	0.29	0.13
L	0.56	0.32	0.41	0.23	0.25	0.49	0.19
Q	0.45	0.36	0.43	0.35	0.09	0.50	0.20
P	0.10	0.42	0.22	0.43	0.32	0.50	0.43

Figura 2.9: Tabla de estadísticos de observaciones y modelo.  $\bar{O}$  corresponde a la media observada,  $\bar{P}$  la media del modelo,  $\sigma_o$  y  $\sigma_p$  las desviaciones standard, *MAE* el error medio absoluto, *RMSE* el error cuadrático medio y  $r$  el coeficiente de correlación. Las estaciones corresponden a: B:Providencia, O:Pudahuel, N:Santiago, M:Las Condes, L:La Florida, Q:El Bosque, P:Cerrillos. ref: Schmitz 2005

Los resultados muestran que se representan de buena forma los patrones de vientos a lo largo del día. Las comparaciones entre observaciones y el modelo son representadas por estadísticos (medias, desviaciones

estándar, error cuadrático medio, coeficiente de correlación) presentados en la figura 2.9. Muestran generalmente una concordancia aceptable, salvo en las estaciones N (Santiago) y P (Cerrillos) donde se presentan grandes sobrestimaciones de las medias diarias. La estación de Pudahuel (O) muestra el mejor comportamiento. La estación de Las Condes (M) muestra similares medias, pero muy baja correlación, debido a una mala representación del ciclo diario. También es mencionado que la representación de los campos meteorológicos en la noche es pobre produciendo diferencias en las concentraciones. Sin embargo los valores nocturnos no tienen mayor influencia en los estadísticos, por ser valores pequeños.

### 2.2.5. Metodología

El modelo de calidad de aire a ocupar es Polyphemus. Este modelo hasta el momento del comienzo del trabajo no había sido usado para ninguna zona localizada en el hemisferio sur. Los pasos a seguir para obtener los resultados finales fueron los siguientes:

1. Escribir el inventario de emisiones en el formato que el modelo de dispersión es capaz de leer. Para realizar este paso fue necesario primero, determinar cómo son leídos los inventarios de emisiones por el modelo, luego determinar las unidades en las cuales debe estar escrito y finalmente escribir un código para interpolar el inventario a la grilla final que ocupa el modelo de dispersión.
2. Obtención de los campos meteorológicos. Fueron obtenidos mediante el modelo MM5. Para detalles sobre esta simulación ver anexo D.
3. Elección de la grilla del modelo de dispersión. Consiste en determinar el paso de la grilla en los 3 ejes (X, Y, Z), los límites geográficos, el paso de tiempo y período de tiempo en el cual se va a correr el modelo para la validación.
4. Resultados preliminares. Una vez que se posee el inventario de emisiones en la grilla del modelo de dispersión, los campos meteorológicos finales y la grilla a ocupar, se pueden realizar simulaciones que deberían entregar resultados comparables con las observaciones. En esta etapa se grafican los resultados comparándolos con las observaciones en las estaciones de monitoreo y se busca el mejor ajuste para los parámetros del modelo de dispersión, de forma que los resultados sean lo más similares a las observaciones.
5. Resultados finales. Con el mejor ajuste de los parámetros del modelo de dispersión se obtiene los resultados finales los cuales son comparados con las observaciones y con resultados de trabajos anteriores.

Los gráficos usados para la comparación son series de tiempo, ciclos diurnos, variación interdiaria o sinóptica (ver sección 2.1.2), gráficos de campos horizontales y verticales y diagramas de Taylor (ver anexo F).



## 2.2.6. Configuración

Para la simulación final se ocupó la versión 1.1.1 de Polyphemus que fue la versión más reciente del software en el momento en que realizaron las simulaciones. En lo siguiente se describe la configuración del software para obtener la simulación final.

### 2.2.6.1. Dominio espacial y temporal del modelo de dispersión

La grilla usada fue elegida de forma que se traslape con la grilla del inventario de emisiones (para que no exista un corrimiento entre grilla y grilla). De esta forma se evita realizar interpolaciones del inventario que podría cambiar la magnitud total de las emisiones. Además, pensando en el uso final en la modelación inversa, el inventario que es mejorado es el ocupado en el modelo de dispersión, luego para volver al inventario inicial habría que interpolar nuevamente para volver a la grilla inicial del inventario. Todos estos problemas se resuelven haciendo coincidir ambos inventarios.

Las grillas horizontales del inventario de emisiones y del modelo se traslapan, pero no son idénticas. El dominio del modelo de dispersión se eligió centrándose en Santiago, abarcando un segmento de la cordillera de los andes para dar cuenta de su efecto, de la misma forma como es descrito en Schmitz 2005. La extensión total del dominio del modelo de dispersión se determinó realizando sucesivas interpolaciones de los campos meteorológicos hasta obtener el dominio del modelo de dispersión completamente incluida dentro del dominio del modelo meteorológico. Esta interpolación sucesiva fue necesaria debido a que ambos modelos están en proyecciones geográficas distintas.

La altura total del dominio vertical fue determinada de forma que estuviera incluida dentro del modelo meteorológico y que tuviera la altura necesaria para representar las diferencias de altura dadas por la cordillera de los Andes (llegando a altura máximas de 4800 m en esta zona). La división entre niveles fue elegida con una mayor resolución en los primeros niveles para una mejor representación de la capa límite.

Así la grilla horizontal es de  $2 \times 2 \text{ km}^2$  con la celda del extremo suroeste con coordenadas  $71.4351^\circ\text{W}$  y  $33.9977^\circ\text{S}$ , con 70 celdas en la dirección oeste-este y 63 celdas en la dirección sur-norte. Se ocuparon seis niveles verticales, con el primer nivel a 25 m y el último nivel a 5000 m (ver niveles verticales en figura 2.11 y dominio horizontal en figura 2.10).

Con respecto a el paso temporal del modelo de dispersión, se tiene un inventario con resolución de 1 hora. Los campos meteorológicos fueron obtenidos en forma horaria. Luego también se obtuvieron salidas horarias del modelo de dispersión. Estas salidas son promedios de todos los pasos realizados dentro de la hora, ya que la simulación se realizó con un paso de tiempo de 200 segundos, para asegurar la convergencia del modelo. Para la convergencia se busca cumplir con la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

para una velocidad media del viento (Mallet et al, 2007). De todas formas, en lugares específicos en cierto momento se obtienen velocidades altas en las cuales la condición CFL no es cumplida. Para esto Polyphemus 1.1.1 tiene un algoritmo que fuerza la condición CFL reduciendo iterativamente el paso de tiempo para estos casos.

Los campos meteorológicos fueron obtenidos para el mes de Enero del 2002, desde el 2 al 30 de este mes. Este fue el mismo dominio temporal que se utilizó para el modelo de dispersión, partiendo desde las 1:00 UTC, lo que equivale a las 22:00 PM del día anterior en hora chilena de verano.

#### **2.2.6.2. Uso de suelo y rugosidad**

Polyphemus necesita como dato de entrada el tipo de suelo en la región a simular para calcular la rugosidad del terreno. Para la región analizada el único set de información que Polyphemus es capaz de preprocesar es el uso de suelo de GLCF (Global Land Cover Facility, <http://glcf.umiacs.umd.edu>) que son datos obtenidos con imágenes satelitales para toda la cubierta terrestre. Los datos recomendados a ocupar es el uso de suelo de 1 [km] de resolución horizontal en unidades latitud/longitud. El conjunto de datos tiene tipos de uso de suelo separados en 13 clases, como por ejemplo agua, distintos tipos de bosques, sitios eriazos y zona urbana. El preprocesamiento interpola los datos a la grilla del modelo de dispersión, obteniéndose finalmente un porcentaje de tipo de uso de suelo en cada celda.

Una vez determinado el uso de suelo el cálculo de la rugosidad se realizó mediante valores por defecto incorporados en Polyphemus para cada categoría de uso de suelo.

#### **2.2.6.3. Meteorología y parametrizaciones atmosféricas**

Como se mencionó previamente, los campos meteorológicos usados son provenientes de simulaciones de MM5. Se encontró que el modelo es capaz de representar las condiciones sinópticas de gran escala obteniéndose una representación aceptable en las estaciones meteorológicas de la cuenca de Santiago, con problemas de representatividad en las horas de la noche (ver anexo D).

En Polyphemus viene incorporada una etapa de preprocesamiento especial para interpolar campos meteorológicos MM5. Los datos son interpolados desde la grilla MM5 a una grilla regular en latitud/longitud en la horizontal y altitud en metros en la vertical. Además necesita como dato de entrada la cubierta de suelo calculada en el paso anterior.

La configuración usada para esta etapa es:

- No se considera la existencia de lluvia acumulada al inicio de la simulación.

- Parametrización de atenuación por nubes: Se usó la parametrización RADM (se usa por defecto).
- Valores mínimo y máximo de coeficientes de difusión vertical. Se tomaron los valores por defecto (0.2 y 1500 [ $m^2/s$ ]). Estos umbrales son considerados para todo el dominio.
- Parametrización para calcular el coeficiente de difusión vertical: Polyphemus tiene disponible 2 parametrizaciones: Louis (Louis 1979) y T&M (Troen and Mahrt 1986). Se hicieron simulaciones con ambas parametrizaciones, comparando ciclos diarios y coeficientes de correlación y se encontró que se obtienen mejores resultados con la parametrización de Louis. Además, se encontró que la parametrización de T&M se usa solamente en condiciones inestables, cambiando a Louis en condiciones estables. Esto produce una discontinuidad en las concentraciones finales cuando existen cambios de condiciones estable a inestables, y viceversa.

Finalmente, de esta etapa se obtienen campos de presión y presión de superficie, temperatura y temperatura de superficie, vientos meridionales y zonales, número de Richardson y número de Richardson de superficie, altura de capa límite, coeficientes de difusión vertical, humedad específica, contenido de agua líquida, coeficiente de atenuación por nubes, intensidad de la radiación solar, intensidad de lluvia y altura de nubes.

#### 2.2.6.4. Parámetros del Modelo de dispersión

El modelo de química y transporte elegido es Polair3d (Boutahar et al 2004), que es un modelo euleriano que resuelve la ecuación de reacción/transporte usando separación de operadores, siguiendo la secuencia advección, difusión y química. El esquema de advección usado es directo de tercer orden en el espacio y en el tiempo con un limitador de flujo tipo Koren. La difusión y la química son resueltas con un método de Rosenbrock de segundo orden (Verwer et al 2002).

Polair3d fue configurado para resolver solamente transporte de CO. La química de CO no fue considerada debido a la escala regional en la cual se está aplicando el problema. El tiempo desde que el CO es emitido y sale del sistema es mucho menor (dada la escala regional) al tiempo de recambio del CO, que es de 2 a 4 meses (Seinfeld & Pandis 2006). Es por esto que esta traza, para la escala ocupada, se puede considerar como cuasi-inerte. Este razonamiento ha sido aplicado en los dos trabajos realizados previamente en la región de Santiago.

La deposición húmeda no fue considerada, debido a las casi nulas precipitaciones que ocurren en el mes de Enero en la zona de análisis y además a la baja disolución del CO en el agua. Además, la deposición seca tampoco fue considerada debido a las bajas velocidades de deposición seca del CO ( $\approx 0,02$  [cm/s] en la tierra, 0 [cm/s] en el océano, Moxley and Cape, 1997) y el consecuente bajo flujo de deposición (esto fue testeado mediante una corrida de prueba).

Las condiciones de bordes son Dirichlet homogénea para flujos de entrada, y Neumann homogéneo para los flujos de salida. Esto significa que se considera que aire limpio entra al sistema (aire proveniente del océano pacífico) y que no hay acumulación de CO dentro del dominio, debido a que todos los flujos normales salen del sistema. Estas consideraciones también fueron aplicadas en los trabajos de Schmitz 2005 y Gallardo 2000. Las condiciones iniciales son tomadas nulas.

Al ocupar sólo el módulo de transporte, los datos meteorológicos necesarios son el viento meridional, viento zonal, coeficientes de difusión vertical, temperatura y presión.

#### **2.2.6.5. Observaciones de las estaciones de monitoreo**

Para validar el modelo se ocuparan las observaciones de las estaciones de monitoreo de la red MACAM2, analizadas en la sección 2.1.

A pesar de que las estaciones “Santiago” y “Las Condes” tienen un comportamiento distinto a las demás, como fue establecido en 2.1, sí serán consideradas en el análisis debido estos patrones se repiten todos los años, con lo que se descarta un mal funcionamiento de la estación.

#### **2.2.6.6. Inventario de emisiones**

Las emisiones consideradas provienen del inventario de emisiones oficial CONAMA 2002, que cuenta con emisiones móviles y fijas para CO. Este inventario tiene una resolución temporal de 1 hora para 1 día representativo del año. Luego este inventario será repetido para cada día de la simulación.

#### **2.2.7. Resultados**

##### **2.2.7.1. Campos horizontales de concentraciones**

Con el fin de analizar la localización y el movimiento de la pluma de CO sobre la ciudad se grafican mapas de las concentraciones del primer nivel del modelo ( $\approx 25$  [m]) de dispersión para distintas horas promediados durante todo el período de simulación. Los gráficos se encuentran en escala logarítmica y se pueden apreciar en la figura 2.10.

A las 4 AM hora local se aprecian concentraciones bajas ( $< 100$  ppm) y condiciones estables con vientos débiles, resultando en un patrón muy semejante a la distribución de las emisiones nocturnas. Las condiciones estables se mantienen hasta las 8 AM pero en este momento las emisiones aumentan, obteniéndose los máximos de concentración. En esta hora se aprecia una leve dispersión de la pluma hacia el sur-oeste, debido a que en estas horas existen vientos de baja magnitud en esta dirección.

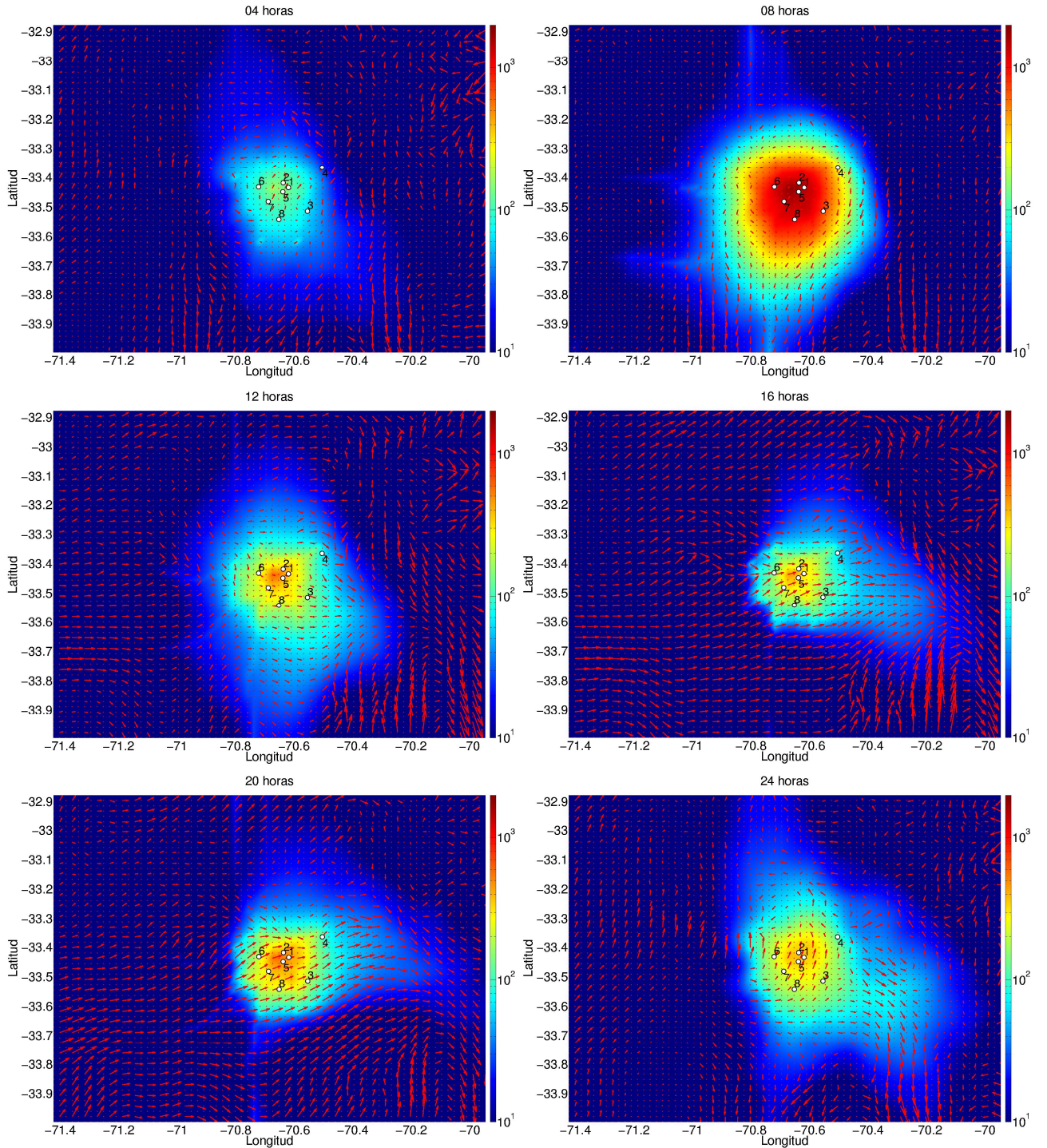


Figura 2.10: Campos de concentraciones horizontales en el primer nivel para todo el dominio del modelo para las 04, 08, 12, 16, 20 y 24 horas (hora local) promediado durante todo el período de modelación. Estaciones: 1:Providencia, 2:Independencia, 3:La Florida, 4: Las Condes, 5:Santiago, 6:Pudahuel, 7:Cerrillos, 8:El Bosque. Escala logarítmica, unidades en  $[\mu\text{gr}/\text{m}^3]$

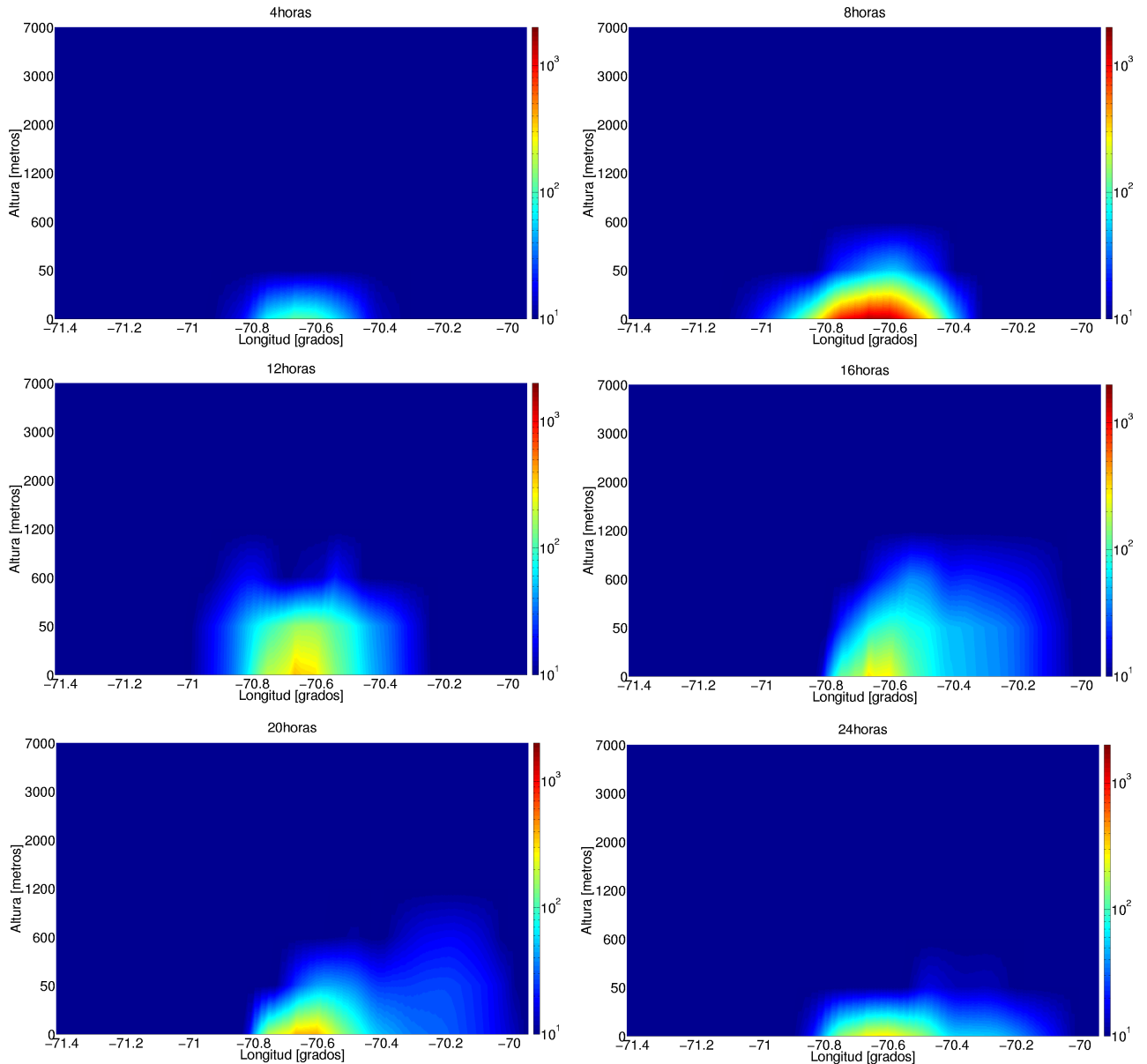


Figura 2.11: Campos de concentraciones verticales promedio para una latitud constante ( $33^{\circ} 27'51''$  S, estación "Santiago") para todo el dominio del modelo para las 04, 08, 12, 16, 20 y 24 horas (hora local) promediado durante todo el período de modelación. Escala logarítmica, unidades en  $[\mu\text{gr}/\text{m}^3]$ . Campos de viento en  $[\text{m}/\text{s}]$  multiplicado por un factor 0.008.

A las 12 PM se aprecia que las concentraciones han bajado respecto de la mañana y que la dirección hacia la cual se dispersa la pluma cambia comenzando a orientarse hacia el este. A las 16 horas se puede apreciar que la pluma se está dispersando principalmente hacia el este debido al aumento de la componente zonal del viento. A las 20 horas se aprecia claramente el patrón de vientos sur-oeste de los cuales se había hablado anteriormente. Para las 24 horas los vientos ya han disminuido su magnitud obteniéndose una pluma



más centrada y no deformada como la obtenida a las 20 horas.

Las principales formas de evacuación de CO desde la cuenca son por el norte, por el sur y por el valle del Maipo en el lado cordillerano donde se tiende a producir una acumulación de CO (al este de Santiago).

En Schmitz 2005 se muestran gráficos de concentraciones horizontales para distintas horas. Comparando se puede decir que se obtienen resultados similares, siempre siguiendo los patrones de viento descritos anteriormente. Una diferencia importante es que en Schmitz 2005 la pluma de CO tiende a concentrarse en el valle del Mapocho cordillerano, en cambio en el presente trabajo esto ocurre en el valle del Maipo cordillerano como fue mencionado anteriormente.

### **2.2.7.2. Campos verticales de concentraciones**

Eligiendo una latitud fija, se puede graficar longitudinalmente el campo vertical de las concentraciones, para analizar la dispersión de CO en la vertical. La latitud elegida equivale a la posición de la estación de “Santiago”(33°27’S, 70°39’W). Estos gráficos son presentados en la figura 2.11.

A través de las horas se puede apreciar el comportamiento de la capa límite. En las horas de la noche se ve que la pluma de CO está concentrada en el primer nivel. A las 8 de la mañana comienza a crecer, pero todavía es baja obteniéndose una alta concentración. En las horas de mayor radiación, representadas por las 12 y las 16 se ve que la pluma alcanza el 3er nivel. Luego comienza a disminuir hasta volver a una nivel bajo nuevamente.

Otro fenómeno que se puede apreciar son los vientos del oeste durante las horas de la tarde, donde se aprecia una mayor dispersión hacia el lado cordillerano a las 16 y 20 horas. Estos resultados son consistentes con los de Gallardo et al (2000).

### **2.2.7.3. Series de tiempo de parámetros del modelo**

En esta sección se presenta un período de 11 días dentro de la simulación donde se muestran las series de tiempo de las concentraciones resultantes del modelo, y 2 parámetros de entrada que influyen sobre este resultado: Las emisiones y la altura de la capa límite. Los resultados se muestran en la figura 2.12.

En este gráfico se puede apreciar la alta dependencia de las concentraciones con respecto a las emisiones y la capa límite. Durante horas de la mañana, cuando la capa límite tiene una baja altura se obtienen los máximos de concentración debido al máximo de emisión a esta hora. Es de notar que en la tarde existe un segundo máximo de emisión al igual que en las concentraciones, sin embargo, el máximo en las concentraciones es de aproximadamente la mitad en magnitud que el máximo matutino, lo que se debe a que en las horas de la tarde la capa límite todavía es alta produciendo un efecto de dilución de las concentraciones. Por

otro lado, en esta figura se aprecia que el inventario de emisiones es repetido a lo largo de los días con lo cual el cambio en las concentraciones es debido a la meteorología.

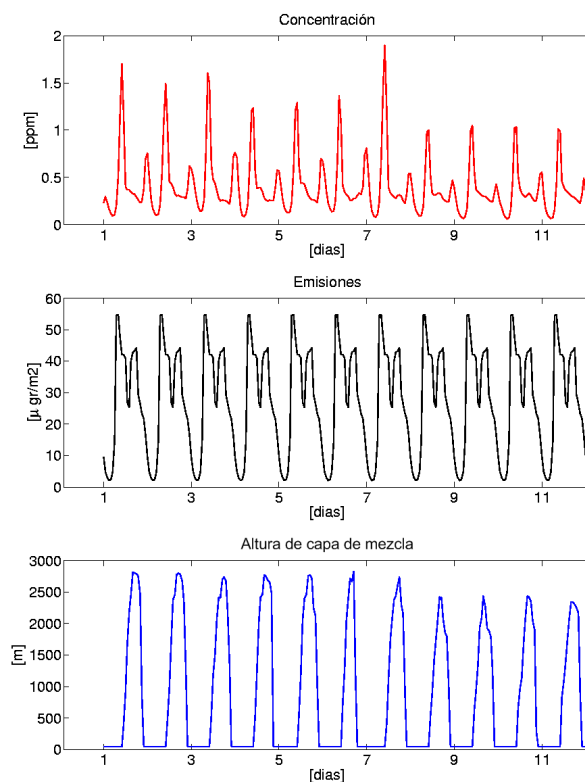


Figura 2.12: Series de tiempo para la concentración, las emisiones y la altura de capa límite en la estación “Santiago” para los 11 primeros días de simulación

#### 2.2.7.4. Series de tiempo de observaciones y modelo

Con el fin de comparar hora por hora los resultados del modelo con respecto a las observaciones en las estaciones de monitoreo se grafican ambas series completas en un mismo gráfico para todas las estaciones. Estos resultados corresponden a la figura 2.13.

El modelo muestra, en general, una buena correspondencia con las observaciones en cuanto al nivel de las razones de mezcla en las diversas estaciones y a la variabilidad diaria e interdiaria de las emisiones. No obstante, hay dificultades en la representación del mínimo de concentraciones en la tarde en “Independencia”, “Santiago” y “Cerrillos”. Estas diferencias se muestran más claras en los ciclos diarios (ver figura 2.2.7.5).



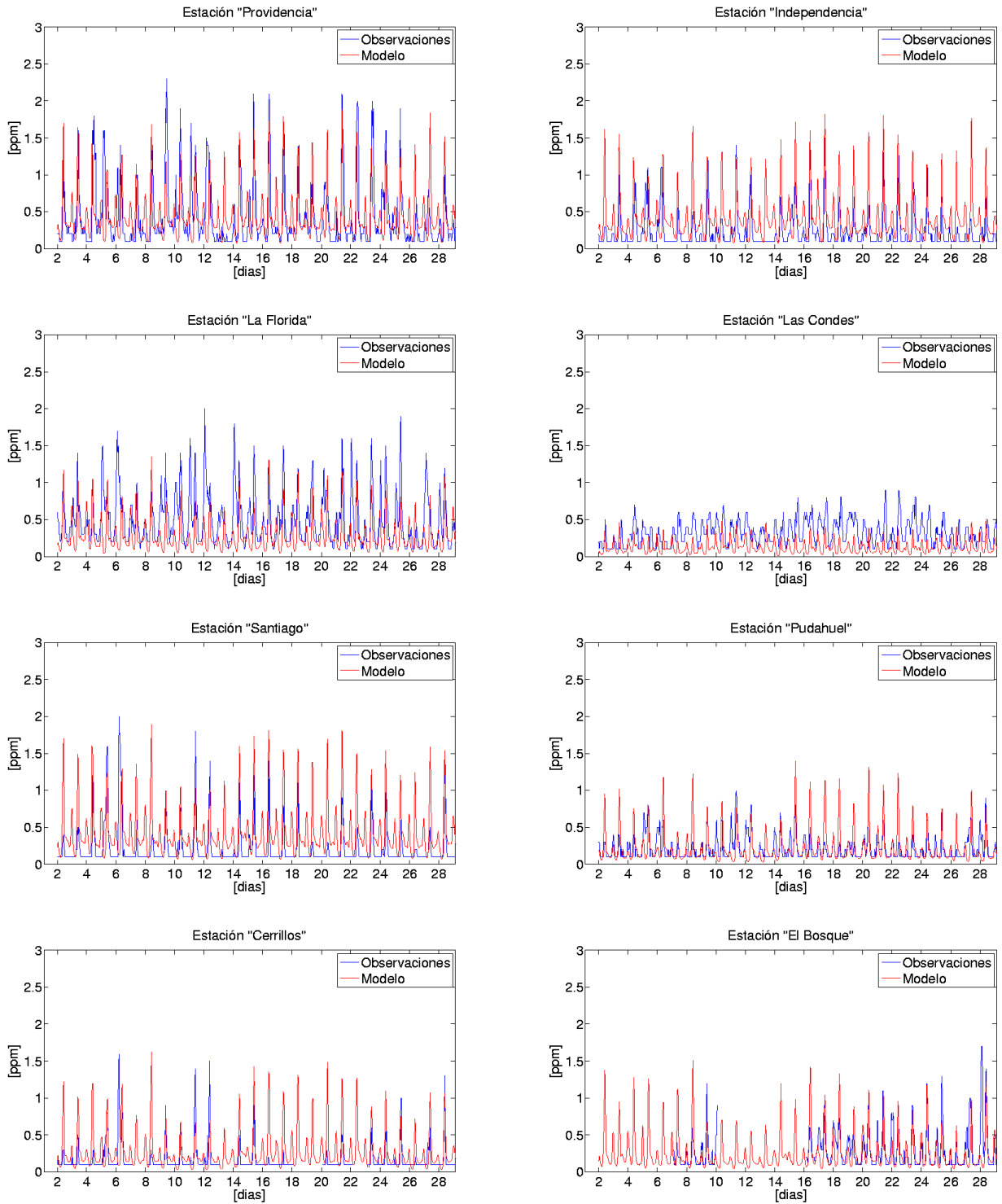


Figura 2.13: Series de tiempo para la concentración en las estaciones de monitoreo y para el modelo en cada estación para todo el período

### 2.2.7.5. Ciclo Diurno

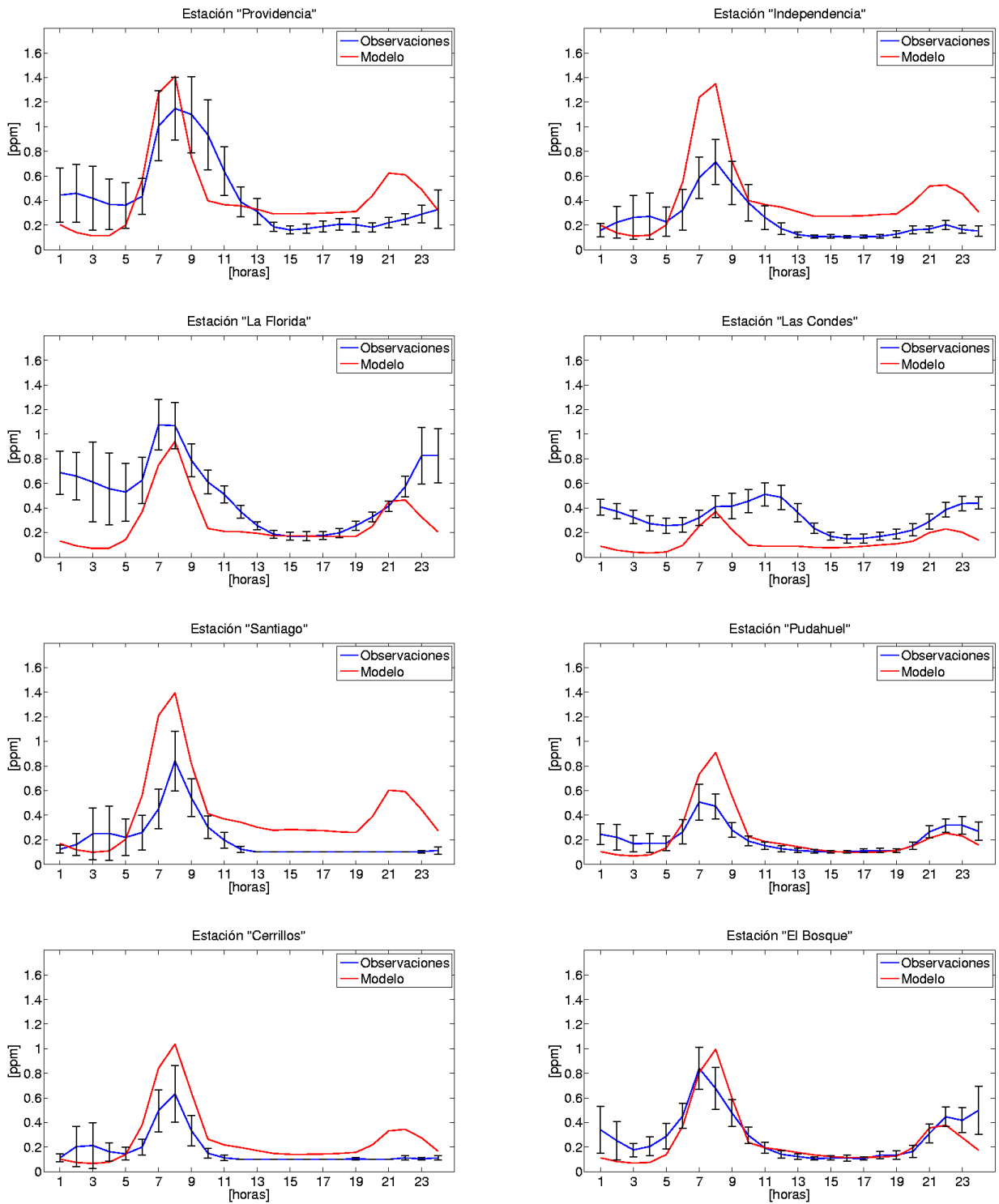


Figura 2.14: Ciclo diurno para las observaciones en las 8 estaciones de monitoreo y para el modelo. Las barras de error representan  $\pm 1/2$  desviación estándar con respecto al promedio.

Los gráficos de ciclo diurno sirven para comparar como se comporta el modelo en relación a las observaciones reales a lo largo del período de simulación. No hay que olvidar que son promedios, luego podría obtenerse un patrón muy similar, pero al ver las series de tiempo completas se podría ver que las series no coinciden. Estos gráficos se muestran para cada estación en la figura 2.14.

Como observación general, se puede decir que el modelo representa de buena forma el ciclo diario en la mayoría de las estaciones. Los máximos de concentraciones en general coinciden. Existen estaciones donde se encuentra una clara subestimación de las concentraciones (“La Florida” y “Las Condes”), otras donde se ve una clara sobrestimación (“Santiago”, “Independencia” y “Cerrillos”). La estación “Providencia” muestra horas de sobrestimación y de subestimación. “Pudahuel” y “El Bosque” muestran un comportamiento muy similar a las observaciones. Algunas de las principales discrepancias son las siguientes:

- Existe una subestimación de las concentraciones durante la noche. Este comportamiento también fue reportado en el trabajo de Gallardo et al 2000. Este comportamiento está ligado a 3 posibles razones: una mezcla exagerada, subestimación en las emisiones nocturnas y alta variabilidad de las observaciones en estas horas. La primera alternativa aparece como plausible al considerar el gradiente de temperatura entre puntos en la cuenca y puntos en la cordillera de la costa. Como se detalla en el anexo D el modelo meteorológico tiende a subestimar el gradiente induciendo una representación exagerada de la mezcla vertical. Sin embargo, al no contarse con observaciones detalladas de la capa límite esta afirmación no excluye la posibilidad de que exista una subestimación de las emisiones nocturnas, o que el problema se deba a la alta variabilidad de las concentraciones en las estaciones de monitoreo durante la noche. Como se puede apreciar en la figura 2.14 las barras de error durante la noche tienden a ser de gran magnitud en comparación a las barras de error del día, a pesar de ser en general valores más pequeños. Esto se ve más claramente al observar las series de tiempo (figura 2.13) donde para valores nocturnos las estaciones no muestran un patrón determinado. Debido a que la capa límite es baja a estas horas, un pequeño cambio en la emisión puede resultar en grandes cambios en las concentraciones medidas por la estación de monitoreo. De esta manera se obtiene una gran variabilidad.
- Como fue mencionado previamente la estación “Las Condes” tiene un ciclo diario distinto a las demás estaciones, con un máximo de concentración alrededor del medio día. Este ciclo no es representado por el modelo. La razón del máximo a medio día no es claro pero podría deberse a un patrón de emisión distinto en esta zona, que no es representado por el modelo de emisiones. El máximo de la tarde mostrado por el modelo se debe a que el patrón de vientos hace aumentar las concentraciones en la hora de la tarde en este sector de la ciudad, siguiendo de cerca a las observaciones.
- En las estaciones “Santiago”, “Cerrillos” y “Providencia” el modelo simula un máximo vespertino que no es observado. Este máximo responde, en parte, al máximo de emisiones especificado en el inventario. Se podría sospechar también que existe una subestimación en las condiciones de mezcla.

Como se observa en el anexo D por un lado, salvo en “Cerrillos”, se tiende a sobrestimar la magnitud del viento y por otro lado se tiende a subestimar el gradiente térmico durante el día, lo que implicaría que se subestima la mezcla vertical. Con estas condiciones las concentraciones tienden a disminuir con la primera condición y a aumentar con la segunda, luego no es claro que esta sea una explicación del fenómeno que ocurre. Además, las observaciones en las demás estaciones tienden a mostrar un máximo vespertino, lo que contradice que este sea un comportamiento general en la cuenca.

Comparado los ciclos diurnos con los obtenidos en Gallardo et al 2000 se aprecia que se repite el comportamiento de sobrestimación en la zona central de Santiago y subestimación en la zona este. Esto podría apuntar a que son las emisiones el problema y no una mala representación del modelo debido a que ambas simulaciones muestran el mismo comportamiento.

#### **2.2.7.6. Variación interdiaria o sinóptica**

Estos gráficos se muestran en la figura 2.15. Se observa que para el modelo los niveles de concentración durante el mes para todas las estaciones son relativamente constantes, lo que significa que no hay acumulación de CO dentro del dominio del modelo según lo especifican las condiciones de borde. Al comparar ambas series se aprecia que los niveles son similares, observándose de mejor manera la subestimación o sobrestimación dependiendo de la estación descrita en la sección 2.2.7.5.

Para un mes de verano para la ciudad de Santiago las condiciones sinópticas son similares a lo largo de toda la estación, lo que se puede apreciar tanto en el modelo como en las observaciones, al no haber una gran variación de un día a otro, lo que no ocurre en invierno, donde existen fenómenos de bajas costeras creando períodos de gran estabilidad presentando altas concentraciones en algunos días. Sin embargo, se aprecia que las observaciones tienen una mayor variabilidad inter-diaria que el modelo. Una explicación de esto es que el inventario usado tiene una resolución temporal de 1 día, y no diferencia entre días de semana y fines de semana. En la realidad las emisiones disminuyen durante los fines de semana, con lo que se obtiene consecuentemente un decrecimiento en las observaciones. Es por esto que algunas estaciones muestran bajas en las observaciones con una frecuencia aproximada de 7 días, lo que no es representado por el modelo.

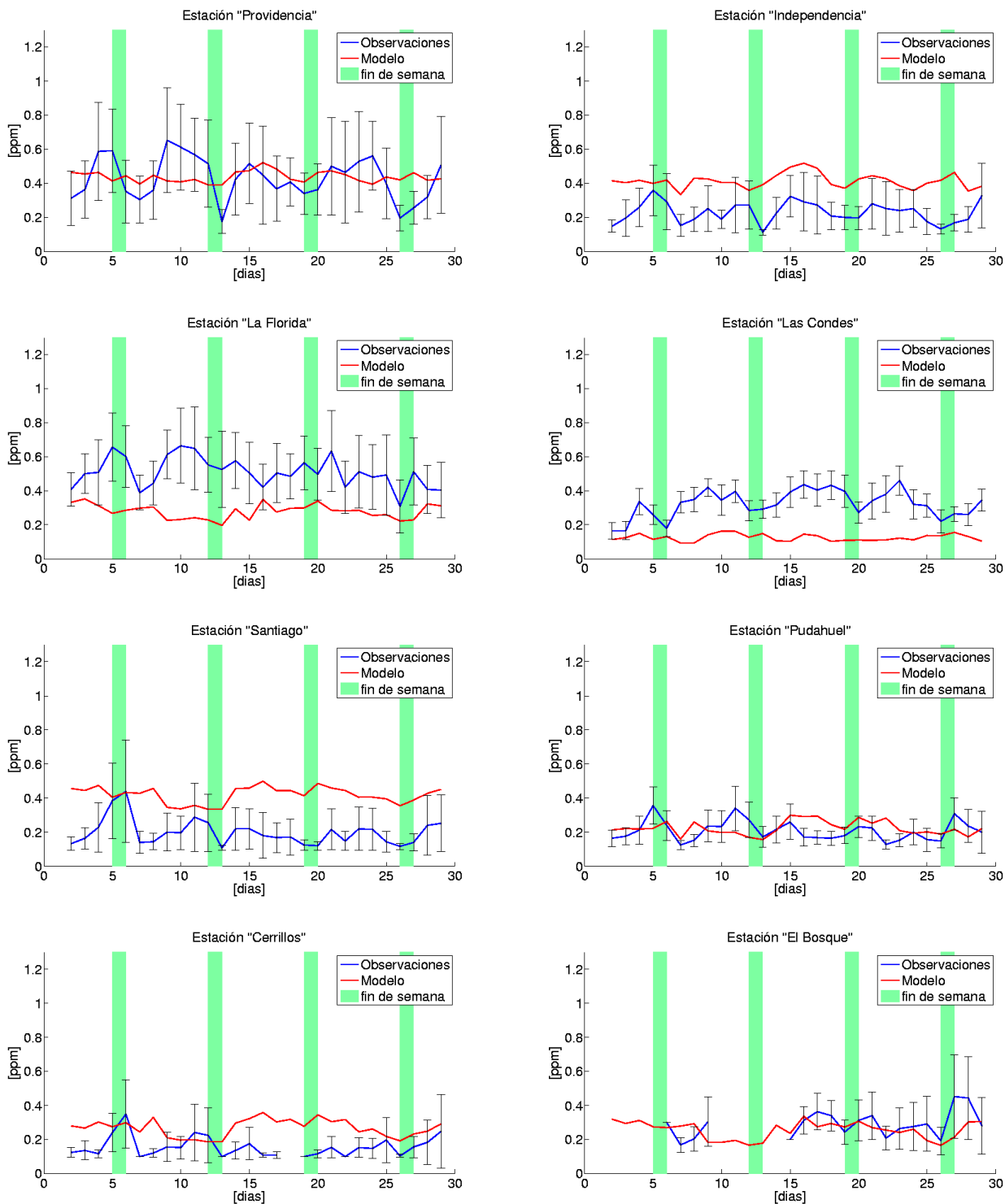


Figura 2.15: Variación interdiaria para las 8 estaciones para el mes de Enero del 2002. Las barras de error representan 1 desviación estándar con respecto a la media.

### 2.2.7.7. Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor son útiles para presentar los estadísticos de un modelo en comparación a la referencia, que en este caso son las observaciones en las estaciones monitoreo (Taylor, 2001). En estos diagramas son representados la desviación estándar tanto del modelo como de la referencia (valores normalizados, representados en la abscisa y ordenada), el coeficiente de correlación (ángulo azimutal) y error cuadrático medio insesgado (círculos con centro en la observación). Para más detalles ver anexo F. Se desarrollaron 2 gráficos de Taylor, correspondientes a las figuras 2.16 y 2.17.

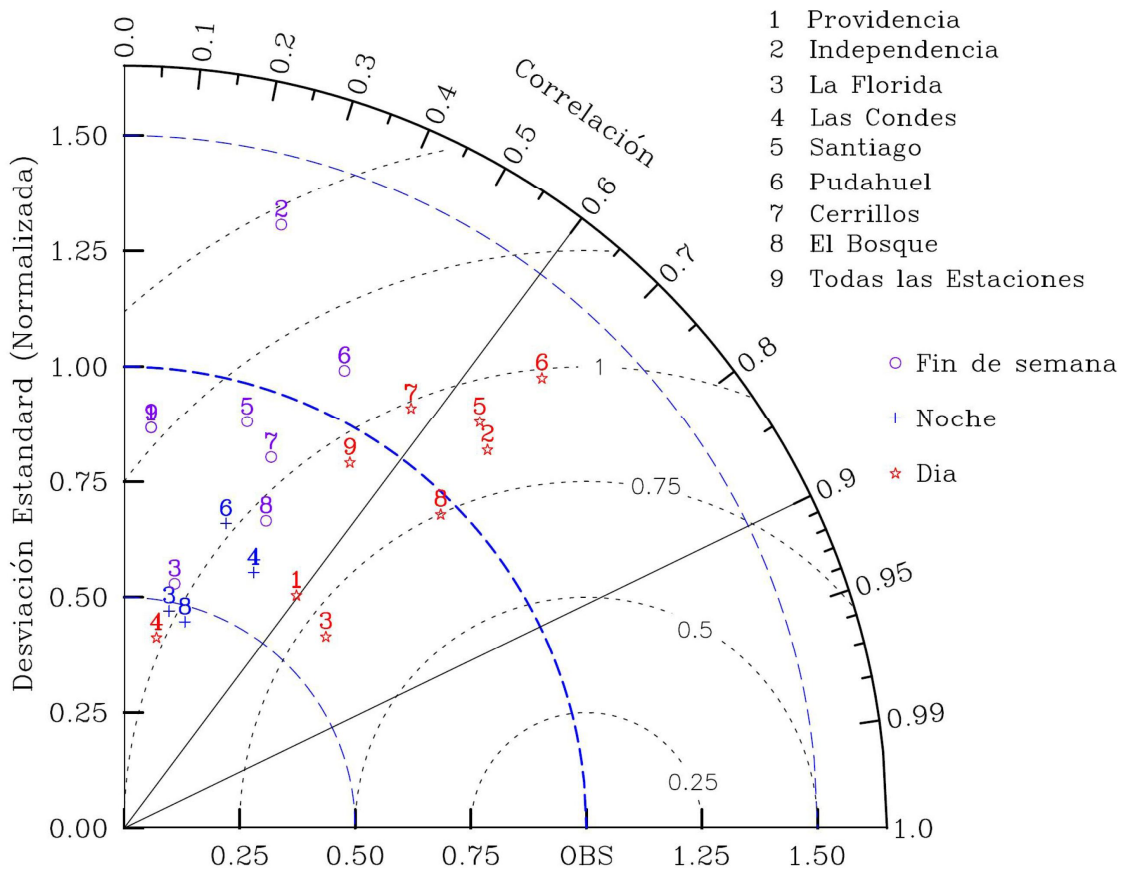


Figura 2.16: Gráfico de Taylor para datos separados según diurnos para días de la semana, nocturnos para días de semana y fines de semana y para todas las estaciones. El día es considerado desde las 6 AM hasta las 21 horas para un día de verano. Los valores no mostrados se encuentran fuera del rango (correlación negativa o desviación mayor a 1.7)

En las secciones anteriores se mencionaron dos grandes problemas de la modelación. Éstos se refieren a la mala representación de la realidad durante la noche y para los fines de semana. Por esto se separaron las series en tres categorías para analizar los estadísticos por separado como se aprecia en la figura 2.16. En esta figura se aprecia que, en general, los estadísticos son mejores para el caso diurno que para los casos nocturnos o de fin de semana. Esto se puede observar ya que los puntos correspondientes a valores diurnos

tienen un menor ángulo azimutal (mejor correlación) y se encuentran en radios centrados en la observación más pequeños (menor error cuadrático medio). La única estación donde no se observa este comportamiento es en “Las Condes” debido a que para esta estación tiene un patrón diario distinto. Se puede observar que hay sólo cuatro valores nocturnos representados, debido a que es muy común obtener correlaciones negativas debido a la mala representación de las observaciones explicada en secciones anteriores.

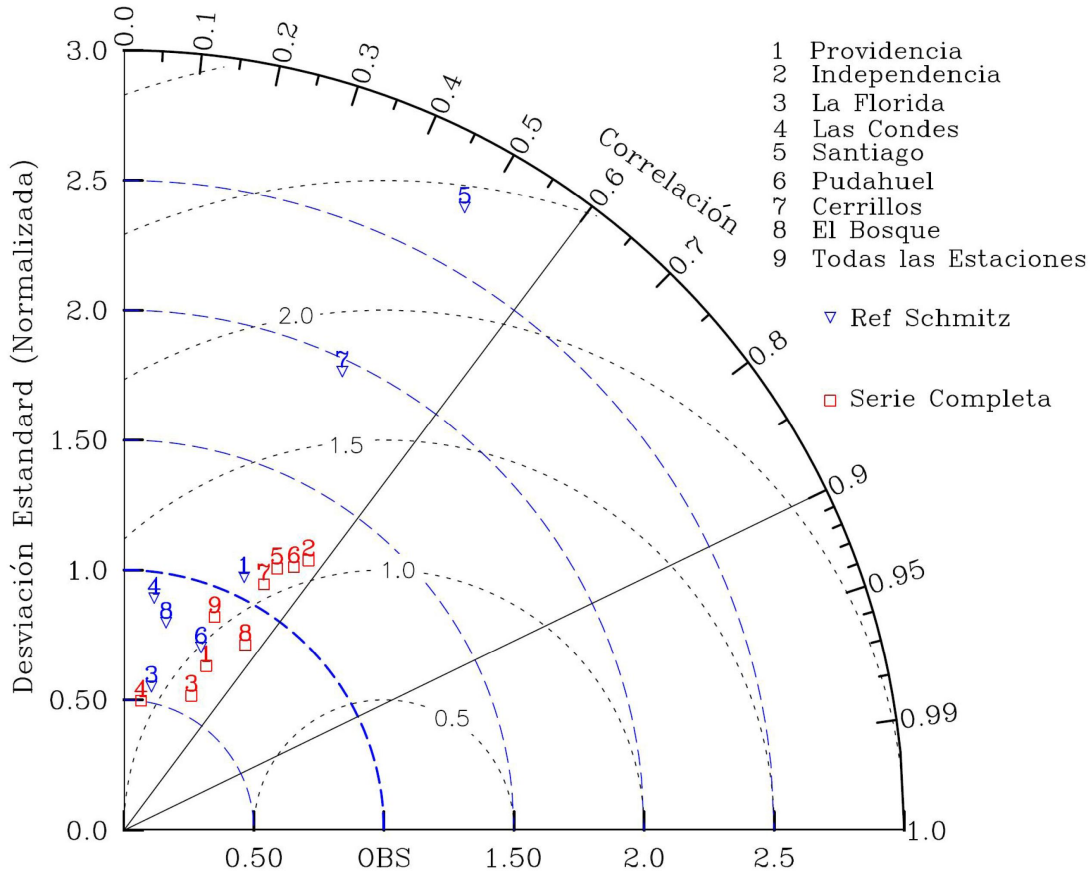


Figura 2.17: Gráfico de Taylor para la serie completa (considerando datos diurnos, nocturnos y fines de semana) y para estadísticos obtenidos de Schmitz 2005 (tabla 2.9).

Centrándose sólo en los valores diurnos se puede apreciar que las estaciones que tienen el mejor comportamiento de ciclo diurno mencionadas anteriormente (“Pudahuel” y “El Bosque”) son aquellas que su varianza es lo más similar a la referencia (se encuentran más cerca al círculo de radio 1 centrado en el 0 del gráfico). Sin embargo, no son las que tienen una mejor correlación o un mejor error cuadrático medio. Por ejemplo, “La Florida” tiene una de las mejores correlaciones y error cuadrático medio pero una diferencia de varianza. Este se puede interpretar como que el ciclo diario es bien representado pero hay una diferencia debida a un nivel errado de emisiones.

En la figura 2.17 se muestran los estadísticos para la serie completa, sin separar por valores diurnos,

nocturnos o de fin de semana. Además, se incorporaron los estadísticos obtenidos en Schmitz 2005 con el fin de hacer una comparación. Es posible hacer una comparación de estadísticos debido a que en ambos trabajos se ocupa el mismo período de tiempo, una meteorología similar, el mismo inventario de emisiones y los mismos datos de red de monitoreo. Se puede apreciar que se obtienen resultados similares, observándose resultados levemente mejores en el trabajo presente. También se observa que en ambos trabajos la estación “Las Condes” tiene un mal comportamiento. Dejando esta estación aparte, se aprecia que para las distintas estaciones del trabajo presente se obtienen estadísticos similares, mientras que para los datos de Schmitz et al 2005 existen mayores diferencias de la representatividad del modelo con respecto a las observaciones.

### **2.2.8. Conclusiones**

En esta sección se realizaron análisis de distintos tipos para determinar el grado de representatividad del modelo de dispersión con respecto a las observaciones. Se comenzó por describir campos de concentración horizontales y verticales los cuales no pueden ser validados por falta de observaciones, y luego se realizaron comparaciones con respecto a las observaciones en las estaciones de monitoreo de la red de Santiago.

En general, se aprecia que el modelo de dispersión aplicado representa de manera coherente las observaciones en las estaciones de monitoreo. Los principales problemas de representatividad del modelo son durante las horas de la noche. También existen problemas durante los fines de semana, debido a la inexistencia de un inventario que distinga entre días de la semana y fines de semana.

Además de los problemas mencionados anteriormente, existen problemas puntuales de representación del ciclo diario en la estación de “Las Condes” (posiblemente debido a un problema de emisiones) donde se obtienen estadísticos inferiores comparados a las demás estaciones y problemas de representación del máximo vespertino en las estaciones de “Santiago”, “Cerrillos” y “Providencia” donde no queda claro la razón del problema, pudiendo atribuirse a problemas en las emisiones o representatividad de las condiciones de mezcla.

El modelo de dispersión calcula los coeficientes de difusión vertical (a partir de datos de altura de capa de mezcla) pero no existen mediciones para poder validar este parámetro, las cuales son necesarias para poder realizar una validación más completa y disminuir la incertidumbre del modelo de dispersión.

Dados los análisis previos, para realizar la optimización del inventario de emisiones serán utilizadas todas las estaciones, considerando sólo valores diurnos y excluyendo fines de semana.



## 2.3. Modelación Inversa

Una vez evaluado el desempeño del modelo de calidad de aire para el área de estudio (sección 2.2) y analizadas las observaciones con las cuales se van a mejorar las emisiones (sección 2.1), se aplica la metodología de modelación inversa para mejorar el inventario de emisiones. Sin embargo, previo a esto la metodología debe ser probada y optimizada para el caso de estudio.

El concepto básico de modelación inversa (o asimilación de datos) consiste en que se posee un modelo el cual es, grosso modo, una función con parámetros de entrada y salida y un conjunto de observaciones correspondiente a mediciones reales y se busca mejorar los resultados del modelo modificando los parámetros de entrada de forma de obtener resultados más cercanos al conjunto de observaciones. Esta idea se ha usado ampliamente en meteorología, mejorando las condiciones iniciales para el próximo paso de tiempo cambiando las condiciones de entrada, ya sea viento, temperatura, presión, de forma de acercarlas a las mediciones disponibles (por ejemplo McPherson et al, 1979). Para un modelo de calidad de aire los parámetros de entrada que normalmente se pueden mejorar son las condiciones iniciales y las emisiones o ambas a la vez. En el caso de la modelación inversa de emisiones se busca mejorar el inventario de emisiones disponible ocupando mediciones de calidad del aire. Esto se ha aplicado en diferentes escalas geográficas, como escalas globales (Pétron et al 2002, Bergamaschi et al 2000, Müller et al 2005), escalas continentales (Palmer et al 2003, Hakami et al 2005, Yumimoto et al 2006, Pan et al 2007) y escalas regionales (Quélo et al 2005).

### 2.3.1. Método de Interpolación Optimal

El método de Interpolación optimal (Optimal Intepolation, OI), también llamado BLUE (mejor estimador lineal insesgado, Best Linear Unbiased Estimator), método de mínimos cuadrados o método de máxima verosimilitud, es una de las metodologías de modelación inversa más simple. Mayor detalle de este método se puede encontrar en Enting (2002) o Luenberger (1969) y algunas aplicaciones del método se encuentran en Pétron et al 2002, Bergamaschi et al 2000 y Palmer et al 2003.

Supongamos que el modelo de calidad de aire se puede representar como una función que tiene como parámetros de entrada las emisiones de un cierto contaminante y como parámetros de salida las concentraciones. De esta forma:

$$y = \Phi(x) \tag{2.3}$$

donde  $y$  son las concentraciones entregadas por el modelo de calidad de aire, el cual es representado por la función  $\Phi$  y  $x$  son las emisiones. Como ya se dijo antes, el objetivo de la modelación inversa es mejorar los resultados del modelo cambiando los parámetros de entrada, lo que se puede interpretar como minimizar el

error entre las concentraciones que entrega el modelo y las observaciones existentes. Además, debido a que este problema no tiene solución única, se agrega la restricción de que las emisiones obtenidas no se alejen de la adivinanza inicial. De esta forma se puede definir el error global suponiendo una distribución normal de las variables. de la siguiente manera:

$$J(x) = \frac{1}{2}(\Phi(x) - y_{obs})^T R^{-1}(\Phi(x) - y_{obs}) + \frac{1}{2}(x - x^b)B^{-1}(x - x^b) \quad (2.4)$$

donde  $y_{obs}$  las observaciones en las estaciones de monitoreo,  $\Phi(x)$  es el modelo en los puntos donde están las estaciones,  $x_b$  las emisiones iniciales también llamadas adivinanza y  $R$  y  $B$  las matrices de covarianza del error en las observaciones y las emisiones (o parámetros) respectivamente. Luego el objetivo es minimizar el funcional  $J$  que toma en cuenta el error con respecto a las observaciones (primer término) y el error con respecto a los parámetros (segundo término). Las matrices de covarianza representan las incertidumbres que se tienen con respecto a las observaciones, como por ejemplo, los errores instrumentales de las estaciones de monitoreo, el error cometido al representar una estación puntual por una concentración en una área o el error estimado de el inventario de emisiones usado como adivinanza.

El problema de esta representación es que la función  $\Phi$  no se conoce. Pero si se puede aproximar por su representación lineal o desarrollo de Taylor de primer orden en torno a la adivinanza de la siguiente manera:

$$y \approx \Phi(x^b) + H(x - x^b) \quad (2.5)$$

donde  $H$  es la matriz jacobiana que representa la sensibilidad del modelo en cada punto de observación y con respecto a la emisión  $x$  centrado en  $x^b$ . Así  $H$  queda definido por componentes de la siguiente manera:

$$H_{ij} = \frac{\delta \Phi_i}{\delta x_j}(x^b). \quad (2.6)$$

De esta forma se puede reemplazar la aproximación lineal del modelo en la fórmula del error, y minimizar este funcional para encontrar la emisión óptima. Reemplazando se obtiene el siguiente funcional:

$$\hat{J}(x) = \frac{1}{2}(\Phi(x^b) + H(x - x^b) - y_{obs})^T R^{-1}(\Phi(x^b) + H(x - x^b) - y_{obs}) + \frac{1}{2}(x - x^b)B^{-1}(x - x^b). \quad (2.7)$$

Las variables se pueden agrupar de la siguiente manera:

$$\bar{x} = x - x^b \quad \bar{y}_{obs} = y_{obs} - \Phi(x^b) \quad (2.8)$$

Luego, el nuevo funcional se puede escribir como:

$$\begin{aligned}\hat{J}(x) &= \frac{1}{2}(H\bar{x} - \bar{y}_{obs})R^{-1}(H\bar{x} - \bar{y}_{obs}) + \frac{1}{2}\bar{x}B^{-1}\bar{x} \\ \hat{J}(x) &= \frac{1}{2}(H^T R^{-1} H\bar{x})^T \bar{x} - (H^T R^{-1} \bar{y}_{obs})^T \bar{x} + \frac{1}{2}(\bar{y}_{obs})^T R^{-1} \bar{y}_{obs} + \frac{1}{2}\bar{x}^T B^{-1} \bar{x}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Derivando con respecto a  $\bar{x}$  e igualando a cero para obtener el mínimo del funcional se obtiene la siguiente ecuación en el óptimo  $\bar{x}^a$ :

$$(H^T R^{-1} H\bar{x}^a)^T - (H^T R^{-1} \bar{y}_{obs})^T + (\bar{x}^a)^T B^{-1} = 0. \quad (2.10)$$

Despejando y volviendo a las variables iniciales se obtiene el estimador OI:

$$x^a = x^b + [H^T R^{-1} H + B^{-1}]^{-1} H^T R^{-1} (y_{obs} - \Phi(x^b)) \quad (2.11)$$

$$P_a = [H^T R^{-1} H + B^{-1}]^{-1} \quad (2.12)$$

con  $x_a$  el inventario de emisiones optimizado mediante la metodología OI. Se puede demostrar que  $P_a$  es la matriz de covarianza de la solución OI. Además, se puede demostrar la siguiente igualdad:

$$W = P_a H^T R^{-1} = [H^T R^{-1} H + B^{-1}]^{-1} H^T R^{-1} = B H^T (R + H B H^T)^{-1} \quad (2.13)$$

donde  $W$  es llamado peso óptimo.

### 2.3.1.1. La Matriz H de forma directa

Como fue dicho previamente, la matriz H corresponde a la matriz de sensibilidades. En otras palabras, es cómo cambia cada observación y al cambiar la emisión  $x$ .

Si suponemos un caso general en el cual hay  $n$  estaciones de monitoreo,  $m$  puntos de emisión que varían en el tiempo y una meteorología variable se puede escribir:

$$y_{(\bar{i})} = \sum_{j,t} h_{(\bar{i})(j,t)} x_{(j,t)} \quad (2.14)$$

donde  $h_{(\bar{i})(j,t)}$  es la sensibilidad de la estación  $i$  en el tiempo  $\bar{t}$  a una emisión ubicada en  $j$  en el tiempo  $t$ . Esto se puede expresar de forma matricial de la siguiente forma:

$$y = Hx \quad (2.15)$$

con  $H$ :

$$H = \begin{bmatrix} h_{(11)(11)} & \cdots & h_{(11)(m1)} & h_{(11)(12)} & \cdots & h_{(11)(mT)} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ h_{(\bar{T}1)(11)} & & & & & h_{(\bar{T}1)(mT)} \\ h_{(12)(11)} & & & & \vdots & \\ \vdots & & \vdots & \cdots & h_{(\bar{i}i)(jt)} & \vdots \\ h_{(1n)(11)} & & & & \vdots & \\ \vdots & & & & & \\ h_{(\bar{T}n)(11)} & \cdots & h_{(\bar{T}n)(m1)} & h_{(\bar{T}n)(12)} & \cdots & h_{(\bar{T}n)(mT)} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

En esta representación los elementos en las columnas de  $H$  están ordenados por estación, es decir, para cada columna se encuentra la dependencia primero para cada paso de tiempo para la primera estación, luego para la segunda y así sucesivamente. Además, los elementos en las filas están ordenados por tiempo, es decir, primero van todos los puntos de emisión para el tiempo 1, luego para el 2 y así sucesivamente.

Para obtener cada columna de la matriz  $H$  se debe realizar una simulación del modelo de dispersión con una emisión unitaria en cada área de emisión. De esta forma la concentración obtenida en los puntos de observación va a ser la sensibilidad para una determinada estación en un determinado paso de tiempo. Por motivos de no-linealidades (como transformaciones químicas, o tasas de deposición) se recomienda hacer la simulación con la emisión del inventario de emisiones y luego dividir por esta magnitud la concentración obtenida (Pétron et al, 2002). De esta forma, en teoría se debería hacer 1 simulación por cada área de emisión. Si el inventario de emisiones tiene resolución espacial de  $X \cdot Y$  celdas y temporal de  $T$  pasos de tiempo se deberán realizar  $X \cdot Y \cdot T$  simulaciones. Si sólo una parte del inventario de emisiones está siendo mejorado, es necesario realizar una simulación extra sólo con el inventario no mejorado con el fin de restar las concentraciones obtenidas en esta simulación a las observaciones, de forma de no considerar su efecto.

### 2.3.1.2. La Matriz $H$ de forma adjunta

Cuando se realiza modelación inversa normalmente el número de parámetros (emisiones en este caso) es mucho mayor que el número de observaciones, llegando a ser a veces mayor en varios ordenes de magnitud. Como se apreció en la sección anterior, el número de áreas de emisiones determina finalmente el número de corridas requeridas para calcular la matriz  $H$ . Sin embargo existe otra forma de obtener la matriz  $H$ , llamado método adjunto, en el cual el número de simulaciones requeridas depende del número de observaciones. De esta forma se puede reducir el número de simulaciones de gran manera y así ahorrar tiempo computacional.

Sea  $\Omega$  un abierto acotado de  $\mathfrak{R}^2$  de frontera  $\partial\Omega$  y normal unitaria exterior  $n$ . Sea  $\{e_j\}_{j=1}^m$  los puntos de

emisión y  $\{r_i\}_{i=1}^n$  los puntos de observación al interior de  $\Omega$ . Para  $T > 0$ , sean  $\{t_l\}_{l=1}^s$  en  $(0, T)$  los tiempos (o intervalos) discretos que se consideran para la emisión y  $\{\bar{t}_k\}_{k=1}^{\bar{s}}$  en  $(0, T)$  los tiempos (o intervalos) discretos que se consideran para cada observación. Consideramos un campo de vientos meteorológico  $v$  que tiene divergencia nula en  $\Omega$ .

Para construir la matriz  $H$ , como fue explicado en la sección anterior, es necesario hacer simulaciones con el modelo de dispersión, que es equivalente a resolver la ecuación de transporte (ver sección 2.2.2). Esta ecuación, escrita de una forma simplificada para resolver el problema en  $\Omega \times (0, T)$  también se llama problema directo, o progresivo (notar que se realizó un cambio de notación con respecto a la ecuación 2.1):

$$\frac{\partial c_{jl}}{\partial t} - \Delta c_{jl} + (v \cdot \nabla) c_{jl} = E(e_j, t_l) \quad (2.17)$$

Con condiciones iniciales nulas en  $t = 0$  y condiciones de borde Dirichlet nulas sobre  $\partial\Omega$ .  $E(e_j, t_l)$  es la emisión en el punto de emisión  $e_j$  en el tiempo (o intervalo)  $t_l$  que genera una concentración  $c_{jl}$ . La observación en el receptor  $r_i$  en el instante (o intervalo)  $\bar{t}_k$  está dada por:

$$h_{ijkl} = c_{jl}(r_i, \bar{t}_k) \quad (2.18)$$

Que corresponde al término de la matriz  $H$  de sensibilidad de la observación con posición  $r_i$  y en el tiempo  $\bar{t}_k$  con respecto a la emisión en la posición  $e_j$  en el tiempo  $t_l$ . Luego, como fue dicho en la sección anterior, se necesita resolver el problema directo para cada  $E(e_j, t_l)$ , o sea,  $m \times s$  veces.

Existe otra manera de calcular la matriz  $H$ , y esta es a través del problema adjunto o retrógrado, que queda expresado según la siguiente expresión:

$$-\frac{\partial c_{ik}^*}{\partial t} - \Delta c_{ik}^* - (v \cdot \nabla) c_{ik}^* = \delta(r_i, \bar{t}_k) \quad (2.19)$$

Con condiciones iniciales nulas en  $t = T$ , es decir, el tiempo corre hacia atrás y condiciones Dirichlet nulas en  $\partial\Omega$  como antes. Esto es, para una emisión masa de Dirac  $\delta_{ik} = \delta(r_i, \bar{t}_k)$  en el receptor  $r_i$  en el tiempo  $\bar{t}_k$  se calcula la dispersión hacia atrás en el tiempo con los campos de viento hacia atrás en el pasado, generando un retopenacho  $c_{ik}^*$ .

Se puede usar  $c^*$  para calcular  $H$  de la siguiente manera. Se multiplica el problema directo por  $c^*$  y se integra sobre  $\Omega \times (0, T)$ . Luego se integra el lado izquierdo por partes considerando las condiciones iniciales de integración en el tiempo ( $c = 0$  en  $t = 0$ ,  $c^* = 0$  en  $t = T$ ) y las condiciones de borde Dirichlet nulas para  $c$  y  $c^*$  en las integraciones en el espacio. De esta manera se obtiene:

$$\int_0^T \int_{\Omega} \left( \frac{\partial c_{jl}}{\partial t} - \Delta c_{jl} + (v \cdot \nabla) c_{jl} \right) c_{ik}^* dxdt = \int_0^T \int_{\Omega} E(e_j, t_l) c_{ik}^* dxdt \quad (2.20)$$

$$\int_0^T \int_{\Omega} c_{jl} \left( -\frac{\partial c_{ik}^*}{\partial t} - \Delta c_{ik}^* - (v \cdot \nabla) c_{ik}^* \right) dxdt = \int_0^T \int_{\Omega} E(e_j, t_l) c_{ik}^* dxdt \quad (2.21)$$

$$\int_0^T \int_{\Omega} c_{jl} \delta(r_i, \bar{t}_k) dxdt = \int_0^T \int_{\Omega} E(e_j, t_l) c_{ik}^* dxdt \quad (2.22)$$

$$c_{jl}(r_i, \bar{t}_k) = \int_0^T \int_{\Omega} E(e_j, t_l) c_{ik}^* dxdt \quad (2.23)$$

$$h_{ijkl} = \int_0^T \int_{\Omega} E(e_j, t_l) c_{ik}^* dxdt \quad (2.24)$$

Luego el coeficiente de la matriz H es igual a la integral de la derecha. De esta forma, para calcular la matriz H mediante el adjunto se requiere resolver el problema retrógrado para cada  $\delta_{ik}$ . Es decir, el número de simulaciones a realizar es igual al número de observaciones (suma del número de estaciones por pasos de tiempo en cada estación, o sea,  $n \times \bar{s}$ ).

De esta forma si  $m \times s \gg n \times \bar{s}$  es más conveniente usar el modelo adjunto, y si  $m \times s \ll n \times \bar{s}$  es más conveniente usar el modelo directo.

### 2.3.2. Metodología

Los pasos seguidos en el trabajo presente para la obtención final de un inventario mejorado por modelación inversa fueron los siguientes:

- Pruebas: En esta etapa se ocupó un inventario de baja resolución espacial y sin resolución temporal de forma de probar la forma en la cual funciona el método de modelación inversa. Debido a que la metodología requiere de alto poder computacional se disminuye la resolución del inventario para poder realizar pruebas que no requieran mayor tiempo de simulación.
- Establecimiento de los parámetros: Hay una serie de parámetros a establecer, como por ejemplo las observaciones que se van a ocupar finalmente para la mejora del inventario (eliminación de estaciones o de ciertas partes de la series), el inventario de emisiones que se va a mejorar (dominio, resolución), el dominio temporal del modelo de dispersión, etc.
- Aplicación del método con observaciones ficticias: Se realiza en primera instancia para probar y mejorar el método de modelación inversa.
- Aplicación del método usando observaciones reales. En esta etapa se obtiene el inventario mejorado.

- Validación del nuevo inventario: Se simula con el inventario antiguo y nuevo en un período de tiempo distinto al anterior para establecer si el nuevo inventario es realmente una mejora.

### **2.3.3. Configuración**

#### **2.3.3.1. Método inverso**

El método elegido para realizar la modelación inversa del inventario de CO es el de interpolación óptima (OI) explicado en la sección 2.3.1. Este método tiene la desventaja de ser una aproximación lineal, luego cuando el sistema a resolver es no-lineal se podrían cometer errores. Sin embargo, debido a que en la simulación no es considerada química atmosférica ni deposición las ecuaciones que describen el sistema tienen bajas no-linealidades y como se describe en Müller et al 2005, este método aun puede ser aplicado.

En la literatura el método más usual de obtener la matriz H es mediante el adjunto (ver Hakami et al 2005, Davoine et al 2007, Yumimoto et al 2006, Roustan et al 2006, Quélo et al 2005). Para el presente trabajo, la forma de obtener la matriz de sensibilidades H será mediante el método directo (ver 2.3.1.1 y 2.3.1.2), debido a que el número de observaciones en las estaciones de monitoreo (1920, lo que equivale a 10 días, 8 estaciones de monitoreo) es del mismo orden de magnitud que el número de puntos de emisión a estimar (2730, ver detalle en sección 2.3.3.4). Otra razón de ocupar el modelo directo es que hasta el momento no se han hecho inversiones con observaciones reales sobre Santiago, luego es necesario comenzar con una metodología más simple como la de utilizar el modelo directo.

#### **2.3.3.2. Dominio modelo de dispersión**

El dominio del modelo de dispersión ocupado para la modelación inversa es muy similar al ocupado en la sección de validación del modelo de dispersión. La única diferencia radica en el dominio temporal utilizado. En la validación del modelo de dispersión el período de tiempo utilizado fue el mes de Enero (29 días en total). En la validación se observaron condiciones sinópticas relativamente constantes, luego no es necesario realizar la inversión durante todo el período. De esta forma se escogió un período de 10 días, partiendo del 15 de Enero. Así el tiempo computacional requerido para realizar la inversión disminuye.

#### **2.3.3.3. Observaciones para la inversión**

En la sección 2.2 se establecieron algunos problemas de representatividad del modelo de dispersión con respecto a las observaciones en las estaciones de monitoreo. Estos eran principalmente una mala representación de las observaciones durante horas de la noche y durante el fin de semana. Luego debido a que el modelo de dispersión no es capaz de representar de buena forma las observaciones en estos períodos de

tiempo, éstos no serán considerados para la inversión. Además las series de tiempo de las estaciones “El Bosque” y “Cerrillos” que no fueron consideradas en la validación del modelo de dispersión tampoco serán consideradas en la inversión.

También en la sección 2.2 se estableció que el modelo no es capaz de representar los patrones diarios de las estaciones “Las Condes” y “Santiago”. Sin embargo esta situación no parece ser un problema del modelo de dispersión. Luego estas estaciones sí serán consideradas para la mejora del inventario de emisiones.

Al decir que cierto período de tiempo no es considerado en la inversión, esto significa que las filas de la matriz H que corresponden a este período son eliminadas.

#### **2.3.3.4. Inventario a ser mejorado (adivinanza)**

Como fue mencionado anteriormente, el inventario de emisiones es el oficial CONAMA 2002 calculado con la metodología MODEM. Este tiene una resolución espacial de  $2 \times 2 \text{ km}^2$  de 60 celdas en longitud y 40 celdas en latitud. Sin embargo, es sólo una parte del inventario la cual representa a la ciudad de Santiago, donde se encuentran las mayores magnitudes de emisión y las estaciones de monitoreo. Luego es necesario hacer una selección de de celdas a mejorar debido a que las estaciones tienen un rango de influencia, en la cual las emisiones lejanas no tienen ninguna influencia sobre las mediciones, y además para ahorrar tiempo computacional.

Las celdas seleccionadas consisten en un grilla de 13 celdas en la longitud y 14 en la latitud, que cubren la zona principal de la ciudad de Santiago. La celda al extremo suroeste se encuentra localizada a  $-70.81^\circ$  longitud y  $-33.60^\circ$  latitud (celda con  $x=30$  e  $y=23$  de el dominio del modelo de dispersión).

Además, debido a que las observaciones de la noche no serán consideradas luego las emisiones de la noche no podrán ser mejoradas. De esta forma el inventario sólo será optimizado durante las 6 AM y las 20 horas (considerando ambos extremos).

Así el número de puntos de emisiones a optimizar es  $13 \times 14 \times 15 = 2730$  (15 debido a que son 15 horas en total). Es decir, como fue explicado en la sección 2.3.1.1 ,para obtener la matriz H es necesario realizar 2731 simulaciones.

#### **2.3.3.5. Matrices de covarianza**

Como fue dicho previamente, las matrices de covarianza representan el error en las observaciones y en el inventario de emisiones.

Las matrices de covarianza serán consideradas diagonales (Yumimoto et al 2006, Quélo et al 2005).



Para la matriz de las observaciones esto significa que los errores de medición de los instrumentos no están correlacionados. Para la matriz de las emisiones significa que los errores cometidos en el cálculo del inventario no están correlacionados. Esta última suposición se puede considerar como aceptable, debido a que la metodología MODEM es del tipo bottom-up ocupando información de alta resolución y sumando todo para obtener el inventario que es de una resolución más gruesa, luego los errores entre las distintas celdas no necesariamente están correlacionados. Es posible que existan correlaciones entre los errores entre las distintas estaciones de monitoreo y correlaciones entre los errores de los distintos puntos del inventario, pero dado a que esta información es desconocida se asume que no existe correlación.

En la diagonal de la matriz de covarianza se encuentra la varianza de cada término. La desviación estándar es obtenida aplicando un error porcentual al máximo de una serie determinada. Este error porcentual es el que debe ser determinado. En la sección 2.1 se habla sobre la precisión de los instrumentos ocupados para medir, que es 0.1 [ppm]. Luego, considerando valores máximos de 2 [ppm] se obtiene un error relativo de 5 % para las observaciones. Debido a que los instrumentos ocupados en las distintas estaciones son de características similares y que es una sola institución la responsable por todos los instrumentos, entonces se puede considerar que los errores en todas las estaciones son similares.

Es un hecho que los inventarios de emisiones tienen grandes incertidumbres, y que estas son difíciles de establecer. Luego es difícil establecer con seguridad cual es el valor de la magnitud del error a aplicar. Lo primero que se puede establecer es la relación que existe entre los errores de cada celda del inventario. Debido a que todo el inventario es calculado con la misma metodología (MODEM), luego el error para cada celda será similar. Con respecto a la magnitud, se consultó con un experto en cálculos de inventarios de emisiones (conversación personal con Mauricio Osses) y se encontró que un error apropiado es del 20 %.

En resumen ambas matrices de covarianza son diagonales, con el mismo valor en su diagonal. Para la matriz de observaciones se ocupa un error de 5 % y para la de las emisiones un 20 %.

#### **2.3.4. OI adaptado al caso de estudio**

Al intentar aplicar directamente el método OI como fue explicado en la sección 2.3.1 surgen una serie de problemas, por lo cual es necesario modificar el método. Los principales problemas son:

- El método OI no restringe el valor de las emisiones, luego al aplicar el método se pueden obtener emisiones negativas, lo que es erróneo.
- Debe existir un factor de compensación de los pesos de los 2 términos en la fórmula del error, ya que no es suficiente con las matrices de covarianza para los errores.
- Las correcciones hechas al inventario en los puntos donde están localizadas las estaciones de monitoreo

son mucho mayores que las correcciones en las demás celdas.

En las siguientes secciones se explican los problemas más a fondo y se muestran las soluciones usadas. Además se presenta la metodología final usada.

#### **2.3.4.1. Condición de positividad de las emisiones**

Debido a que el método OI considera las variables distribuidas normalmente, entonces mediante este método no se puede asegurar que el inventario optimizado va a tener todos sus valores positivos. Lo que se realiza es tomar el funcional del error de la ecuación 2.9 y resolverlo mediante un minimizador considerando condiciones de borde. De esta manera el sistema a resolver es el siguiente:

$$\text{Min } \hat{J}(x) \quad \text{s.a. } x \geq 0 \quad \forall x \quad (2.25)$$

Para encontrar el óptimo de este sistema se usó un minimizador del set de herramientas de optimización del programa Matlab (función “fmincon”). Este busca un mínimo restringido de una función escalar de varias variables comenzando en un estado inicial. Esta metodología es referida como optimización no lineal restringida. La condición inicial usada es el inventario a optimizar.

Este método tiene una serie de condiciones que deben ser cumplidas para que pueda ser aplicado, que son las siguientes:

- Sólo usa variables reales, lo que se cumple en este caso.
- Está diseñado para trabajar con funciones objetivo y de restricción continuas y con derivadas continuas, lo que se cumple para este caso.
- Podrían obtenerse sólo soluciones locales y no globales, lo que no es un problema debido a que se busca que la solución esté cerca del inventario inicial, por lo cual el inventario inicial es usado como condición inicial.
- La función objetivo y la función de restricción no pueden entregar valores complejos, lo que se cumple en este caso.

De esta forma el método escogido es apropiado para la resolución del problema.

Una desventaja de ocupar este método y no el OI original es que este último es capaz de entregar la matriz de covarianza del nuevo inventario, mientras que el método aplicado en este caso sólo entrega el

inventario optimizado. Al aplicar ambos métodos para este caso se puede apreciar que no existen grandes diferencias entre los 2 inventarios optimizados, debido a que sólo los valores de menor magnitud en el inventario son aquellos que se vuelven negativos en la metodología OI. Por eso, en este trabajo se elige como una aproximación asociar la matriz de covarianza obtenida con la metodología OI a la solución obtenida con la metodología de restricciones.

#### 2.3.4.2. Balance entre términos de error: Curva-L

Al usar las matrices de covarianza como únicos pesos de los 2 términos de error en el funcional de error no se obtienen buenos resultados, obteniéndose un inventario muy cercano a la solución inicial o muy lejano, es decir, el problema es sensible a la escala. Esto se debe a que a ambos términos se le está dando un peso inadecuado (Davoine et al 2007). Para mejorar esta situación se agrega un escalar a uno de los términos (en nuestro caso fue agregado al término de error en las emisiones) y se busca el valor adecuado de este parámetro, que se llamará  $\alpha$ .

Para la obtención del parámetro  $\alpha$  existen una gran variedad de técnicas como el algoritmo de maximización de la expectativa (maximitation-expectation algorithm), validación cruzada generalizada (generalized cross validation), máxima verosimilitud generalizada (generalized maximum likelihood) y otros (Davoine et al 2007). En este caso se usará el método de la Curva-L (L-curve, desarrollado en Hansen et al 1993) ya que es fácil de implementar, ha sido utilizado con buenos resultados (Davoine et al 2007) y es aplicable cuando se usan restricciones sobre las variables, como lo es en este caso (ver sección 2.3.4.1).

El funcional a minimizar para obtener la solución se puede escribir de forma simplificada de la siguiente manera:

$$\hat{J}(x) = O(x) + \alpha P(x) \quad (2.26)$$

Donde  $O(x)$  representa el error cuadrático generado al comparar el modelo con las observaciones y  $P(x)$  el error cuadrático respecto a la emisión a priori. Estos 2 errores se pueden apreciar en la ecuación 2.9.

Si  $\alpha$  tiende a 0 se minimiza  $O(x)$  pero a costa de que  $P(x)$  sea muy grande, es decir, la solución va a estar alejada del inventario inicial. Si  $\alpha$  tiende a infinito se minimiza  $P(x)$  a costa de que  $O(x)$  sea muy grande, osea, la solución está muy cerca al inventario inicial pero no se toman en cuenta las correcciones dadas por las observaciones. Si se grafica  $P(x^\alpha)$  versus  $O(x^\alpha)$  usando como parámetro  $\alpha$  se obtiene una hipérbola en donde el parámetro  $\alpha$  crece de 0 a infinito recorriendo la curva de izquierda a derecha, como se puede apreciar en la figura 2.18. El mejor compromiso se tiene cuando la curva se encuentra más cerca del origen, que es cuando ambos términos no son demasiado grandes ni muy distintos entre sí. Debido a que el cambio

de una rama a otra es abrupto, se gráfica en escala logarítmica. Se puede demostrar que el punto de mayor curvatura en esta curva equivale al punto donde la curva se encuentra más cerca del origen (Davoine et al 2007) que es el valor óptimo de  $\alpha$ , donde se obtiene el mejor balance entre ambos errores.

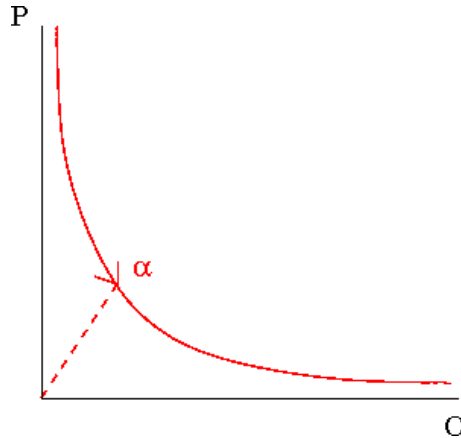


Figura 2.18: Ejemplo de la L-curve antes de aplicar logaritmo

#### 2.3.4.3. Co-localización de estaciones de monitoreo

Al realizar las primeras pruebas para obtener el inventario mejorado con la resolución espacial y temporal final se encontró que se obtenía una gran diferencia entre la mejora en el inventario en las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo y las demás.

Las simulaciones con observaciones sintéticas (ver sección 2.3.5) mostraron resultados como los que se aprecian en la figura 2.19. Para una mejor interpretación de esta figura ver sección 2.3.5. En esta figura se puede apreciar que en los puntos donde se encuentran las estaciones de monitoreo el inventario optimizado está muy lejos del real.

Al analizar las columnas de la matriz  $H$  (recordemos que las columnas están relacionadas con las emisiones) en los puntos donde se encuentran las estaciones se aprecia que la magnitud de los valores es mucho mayor que los demás valores. Esto significa que la sensibilidad de las observaciones con respecto a este punto de emisión es mucho mayor. Este fenómeno se debe a que las emisiones son ingresadas a la grilla del modelo de dispersión directamente como concentración y luego son dispersadas a otras grillas. Es decir, una estación de monitoreo va a estar captando las emisiones transportadas por la meteorología, pero también las emisiones que son ingresadas a la grilla donde se encuentra la estación. Es como si en la realidad la fuente estuviera en el mismo punto que la estación de monitoreo, luego la estación no solo capta los contaminantes traídos por la meteorología, sino que también los emitidos en el mismo lugar. Esta doble forma de obtener la concentración final del modelo genera el problema de las columnas de la matriz  $H$ , lo que genera el problema

descrito previamente. Así estos puntos se convierten en singulares.

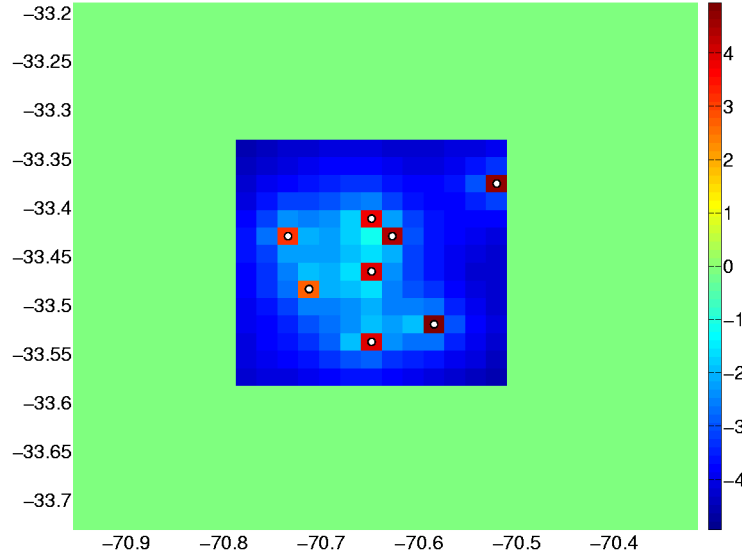


Figura 2.19: Gráfico de diferencia entre el inventario real y el inventario optimizado usando observaciones ficticias, sin modificar el método.

Para resolver el problema se puede seguir dos caminos. Uno es aplicar un factor de corrección directamente a la matriz  $H$ . Otro, que fue el seguido en este trabajo, es aplicar un factor de corrección a la matriz  $B$ . Esto se debe a que la solución OI puede ser escrita:

$$x^a = x^b + W(y_{obs} - \Phi(x^b)) \quad (2.27)$$

$$W = BH^T(R + HBH^T)^{-1} \quad (2.28)$$

donde se aprecia que  $B$  siempre multiplica a  $H$ . Luego si se aplica un factor de corrección a  $B$  finalmente se va a aplicar a  $H$ . La razón de aplicar el factor a  $B$  y no a  $H$  directamente es que este método también tiene una explicación física, ya que al aplicar un factor mayor que 1 a  $B$  sólo en los puntos singulares se aumenta la confiabilidad en el inventario inicial, acercando la solución más hacia el inventario inicial que hacia la variación dada por las observaciones.

Para obtener el factor a aplicar, primero se obtiene la norma del módulo para todas las columnas de la matriz  $H$  comparando las normas de los puntos singulares con el resto. Se puede obtener un factor preliminar de forma de equiparar las normas. Para cada punto singular esto se realiza según la siguiente formula:

$$f_p^{i,j} = \begin{cases} \frac{\sum_{k,l} \|h_{ijkl}\|}{\text{Max} \left\{ \sum_{k,l} \|h_{i^1 jkl}\|, \sum_{k,l} \|h_{i^2 jkl}\|, \sum_{k,l} \|h_{i^3 jkl}\|, \sum_{k,l} \|h_{i^4 jkl}\| \right\}} & \forall i \text{ singular} \\ 1 & \forall i \text{ no singular} \end{cases} \quad (2.29)$$

Donde  $f_p^{i,j}$  es el factor preliminar para la emisión localizada en  $i$  en el tiempo  $j$ ,  $h_{ijkl}$  es la componente de la matriz  $H$  que representa la sensibilidad de la observación en la estación  $k$  en el tiempo  $l$  con respecto a la emisión localizada en  $i$  en el tiempo  $j$ . Las posiciones  $i^1 \dots i^4$  representan los 4 vecinos al punto singular, como se aprecia en la figura 2.20. De esta forma si se divide una columna singular de la matriz  $H$  por este factor se obtiene una sensibilidad mayor o igual que todos sus vecinos.

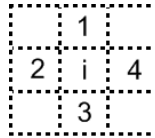


Figura 2.20: Esquema de representación de las celdas vecinas de un punto  $i$  singular

El factor final que divide a la matriz  $B$  debe estar entre  $f_p^{i,j}$  y  $(f_p^{i,j})^2$ , ya que partiendo de la ecuación 2.28 y usando las propiedades de la transpuesta se puede obtener:

$$W = BH^T (R + (\sqrt{BH^T})^T (\sqrt{BH^T}))^{-1} \quad (2.30)$$

Luego para el término de la izquierda el factor apropiado sería  $f_p^{i,j}$  y para los 2 de la de la derecha sería  $(f_p^{i,j})^2$ . Aplicando la metodología con observaciones ficticias con ambos factores se encontró que el factor óptimo a usar es  $f_p^{i,j}$ . Como se dijo previamente,  $f_p^{i,j}$  es un factor para la emisión localizada en  $i$  para el tiempo  $j$ . Luego pueden obtener promedios en el tiempo y en el espacio para obtener factores más globales. Realizando esto se encontró que los mejores resultados se obtienen al aplicar el factor promediando en el espacio, y dejando el factor dependiendo del tiempo. De esta forma:

$$f^j = \frac{1}{N_x N_y} \sum_i f_p^{i,j} \quad (2.31)$$

Donde  $N_x N_y$  es el número de puntos de emisión, dado por una grilla regular de  $N_x$  puntos en la longitud y  $N_y$  puntos en la latitud.

#### 2.3.4.4. OI modificado

En resumen, el sistema a resolver para encontrar el inventario optimizado es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Min } \hat{J}(x) &= \frac{1}{2}(\Phi(x^b) + H(x - x^b) - y_{obs})^T R^{-1}(\Phi(x^b) + H(x - x^b) - y_{obs}) + \frac{\alpha}{2}(x - x^b)(gB)^{-1}(x - x^b) \\ &\text{s.a. } x \geq 0 \quad \forall x \end{aligned} \quad (2.32)$$

donde la descripción de cada término es la misma que en la sección 2.3.1,  $\alpha$  se obtiene con el método de la L-curve explicado en la sección 2.3.4.2 y  $g$  se define como el vector:

$$g = f^{-1} = ((f^1)^{-1}(f^2)^{-1} \dots (f^T)^{-1}) \quad (2.33)$$

donde cada componente del vector  $f^{-1}$  se obtiene según la sección 2.3.4.3.

#### 2.3.5. Resultados con observaciones sintéticas

Para probar el método desarrollado y ver qué es lo que debe ser esperado del inventario mejorado obtenido se realizan simulaciones sintéticas. Una simulación sintética consiste en tomar como real un cierto inventario (en este caso, se considera como real el inventario CONAMA 2002 disponible) y a través de la modelación inversa tratar de recuperar este inventario.

Para realizar una simulación sintética se utilizan observaciones ficticias, las cuales se obtienen realizando una simulación durante el período de la inversión con el inventario real. Luego se obtienen las concentraciones del modelo y se les agrega un error Gaussiano (en este caso de 5%). Para el inventario inicial o adivinanza se ocupa el inventario real pero con un error sesgado (en este caso, se sumaron 5  $[\mu\text{gr}/\text{m}^3/\text{s}]$  a cada valor del inventario). Se utiliza la misma distancia con respecto al inventario real para probar la habilidad del método para devolver la emisión apropiada usando la información contenida en las estaciones de monitoreo. Con esta técnica se puede obtener qué es lo que debe ser esperado al aplicar la metodología.

##### 2.3.5.1. Gráficos de diferencia (o error)

En esta sección se presentan los gráficos de diferencias o de error. Consiste en graficar la diferencia entre el inventario real (que en este caso es el inventario CONAMA 2002) y el inventario optimizado o mejorado. Debido a que ambos inventarios tienen resolución temporal se presenta la diferencia de los promedios temporales para cada celda.

En el gráfico 2.21 se presenta la diferencia entre los inventarios promediados en toda la resolución temporal (de 6 a 20 horas). Recordemos que el inventario inicial (que no es graficado) es el inventario real sumando

5  $[\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}]$  a cada celda. Luego lo primero que se puede apreciar es que todas las celdas tienen una diferencia menor a 5  $[\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}]$ , lo que significa que el inventario optimizado está más cerca del inventario real que el inventario inicial. Luego se puede decir que el método OI aplicado converge.

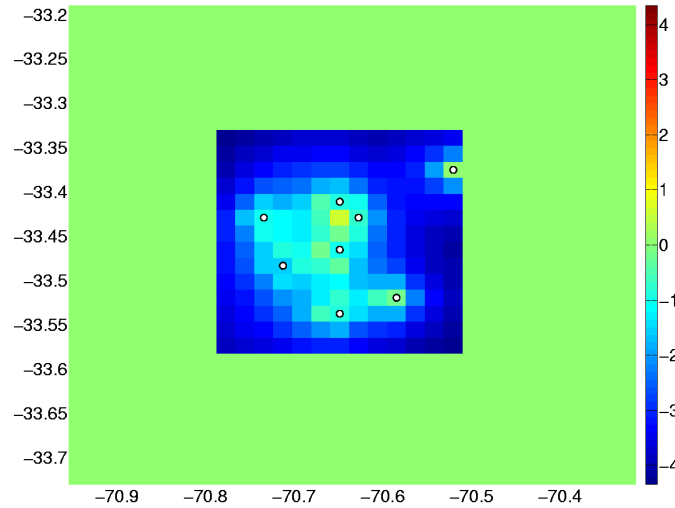


Figura 2.21: Diferencia entre inventario real y optimizado para caso ficticio considerando todas las horas. Los puntos representan las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ .

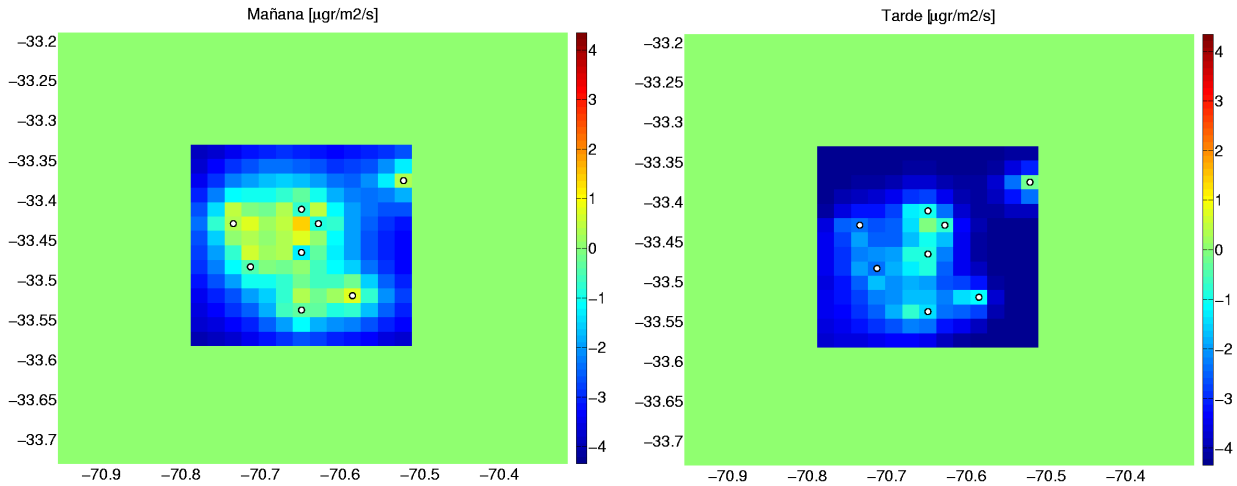


Figura 2.22: Diferencia entre inventario real y optimizado para caso ficticio separando entre mañana y tarde. Los puntos representan las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ .

En los gráficos de diferencia presentados los valores más cercanos a 0 son los puntos de mejor estimación. Para la figura 2.21 se puede apreciar que se obtiene una buena estimación en celdas cercanas a las estaciones de monitoreo, aumentando el error a medida que las celdas no se encuentran cerca a alguna estación de monitoreo. Se debe destacar que cuando la emisión de una celda casi no es percibida por ninguna estación,



por ejemplo, las celdas en los extremos noroeste o sureste, entonces su emisión permanece con el inventario inicial (diferencias cercanas a  $-5 [\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}]$ ) y no diverge.

En la figura 2.22 se encuentran 2 gráficos de diferencia. En este caso se realizaron promedios temporales para la mañana y para la tarde por separado. Se puede apreciar que la estimación del inventario es mejor para las horas de la mañana que para la tarde, obteniéndose un mayor radio de influencia de las estaciones y valores del error más cercanos a cero. Una explicación de este fenómeno es que en las horas de la mañana la BLH (altura de capa límite o Boundary Layer Height en inglés) es de menor altitud que en la tarde. De esta forma, para un mismo cambio de emisiones va a haber mayores cambios en concentración para las horas de la mañana que para las horas de la tarde, debido a que los contaminantes están más concentrados cuando la capa límite es menor. Luego se puede decir que el sistema es más sensible durante la mañana.

De esta forma, al aplicar la metodología OI y tratar de ajustar las concentraciones del modelo con las observaciones se va a preferir un cambio en las emisiones de la mañana debido a que un pequeño cambio en las emisiones genera un aumento pequeño en el término del error de las emisiones (en el funcional de error que se está minimizando), pero genera una mayor disminución en el término del error de las concentraciones. En cambio, si se cambian las emisiones de la tarde el término del error en las emisiones aumenta sin cambiar de gran manera el error del término de las observaciones ya que existe una menor sensibilidad en la tarde. Este fenómeno será llamado “efecto BLH”.

El “efecto BLH” es el fenómeno principal que explica el comportamiento de los resultados de la metodología OI aplicada, pero existe otro que es el efecto de los campos de viento. Si se comparan ambas figuras se puede ver que en la mañana los cambios alrededor de las estaciones son similares en todas las direcciones, pero en la tarde son mayores en lugares que se encuentran al sur-oeste de las estaciones. Esto se debe a que en la mañana la magnitud del viento es pequeña, pero en la tarde aumenta y tiene dirección predominante sur-oeste. Luego para la tarde información de las emisiones que se encuentran viento abajo y a una mayor distancia de las estaciones puede ser mejorada.

### 2.3.5.2. Gráficos de dispersión

En los gráficos de dispersión se muestran las concentraciones del modelo versus las concentraciones en las estaciones de monitoreo usando el inventario inicial y el inventario optimizado. En este caso se utilizan observaciones ficticias.

El gráfico de dispersión se encuentra en la figura 2.23. Se puede apreciar que para el modelo usando el inventario inicial las observaciones son siempre mayores que la referencia, debido al aumento en  $5 [\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}]$  aplicado al inventario. Se obtienen datos dispersos y no sobre una línea recta debido al error aleatorio de 5 % aplicado para obtener las observaciones ficticias. Analizando la figura se puede ver claramente cómo las con-

centraciones obtenidas con el inventario mejorado están sobre la línea media del gráfico, representando una mejora en la representación de las observaciones. Este gráfico sirve para reafirmar el buen comportamiento de la metodología OI aplicada.

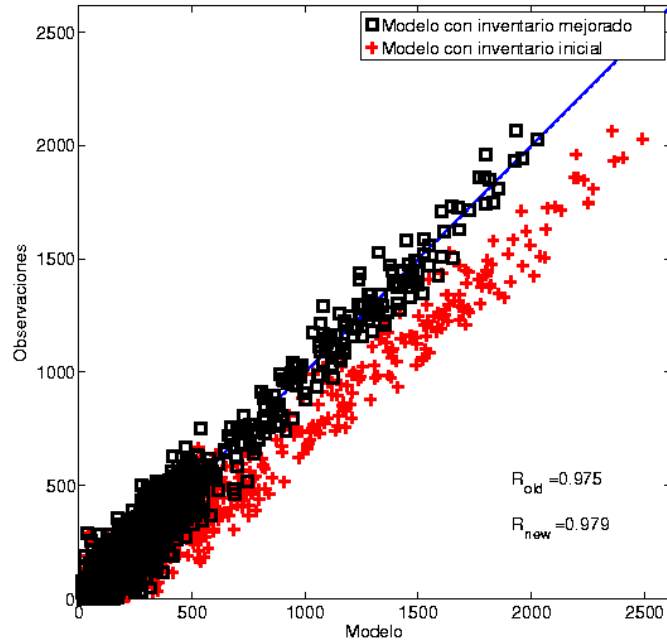


Figura 2.23: Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones ficticias para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

Se calcularon 3 estadísticos para cuantificar el ajuste de las observaciones al utilizar el inventario adivinanza y el optimizado, los cuales son el coeficiente de correlación (R), la pendiente del ajuste de mínimos cuadrados de los datos y el sesgo. Estos datos se muestran en la tabla 2.2. Como se puede apreciar, todos los estadísticos mejoran al utilizar el inventario optimizado.

Tabla 2.2: Estadísticos entre las observaciones ficticias y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado.

	R	Pendiente	Sesgo [ $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ ]
Optimizado	0.979	1.00	17.4
Adivinanza	0.975	0.79	115.4

### 2.3.5.3. Ciclos diarios de emisión

Los ciclos diarios de emisión consisten en graficar para cada celda los valores horarios para el inventario inicial, real y optimizado. Debido a la gran cantidad de gráficos (182 celdas en total) sólo será presentada una selección (figura 2.24). El conjunto completo de gráficos se encuentra en la sección de anexos G.

En los gráficos se muestra el valor del error medio entre el inventario real y el mejorado, que es el mismo valor que fue ocupado para confeccionar la figura 2.21. Las coordenadas  $x$  e  $y$  corresponden a la numeración dada a las celdas partiendo de la esquina inferior izquierda. Las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo se encuentran marcadas por un asterisco. La franja verde representa 1 desviación estándar con respecto a al valor de la emisión, es decir, un 68 % de confiabilidad de encontrar la solución BLUE en esta franja, obtenida mediante la matriz  $P_a$ .

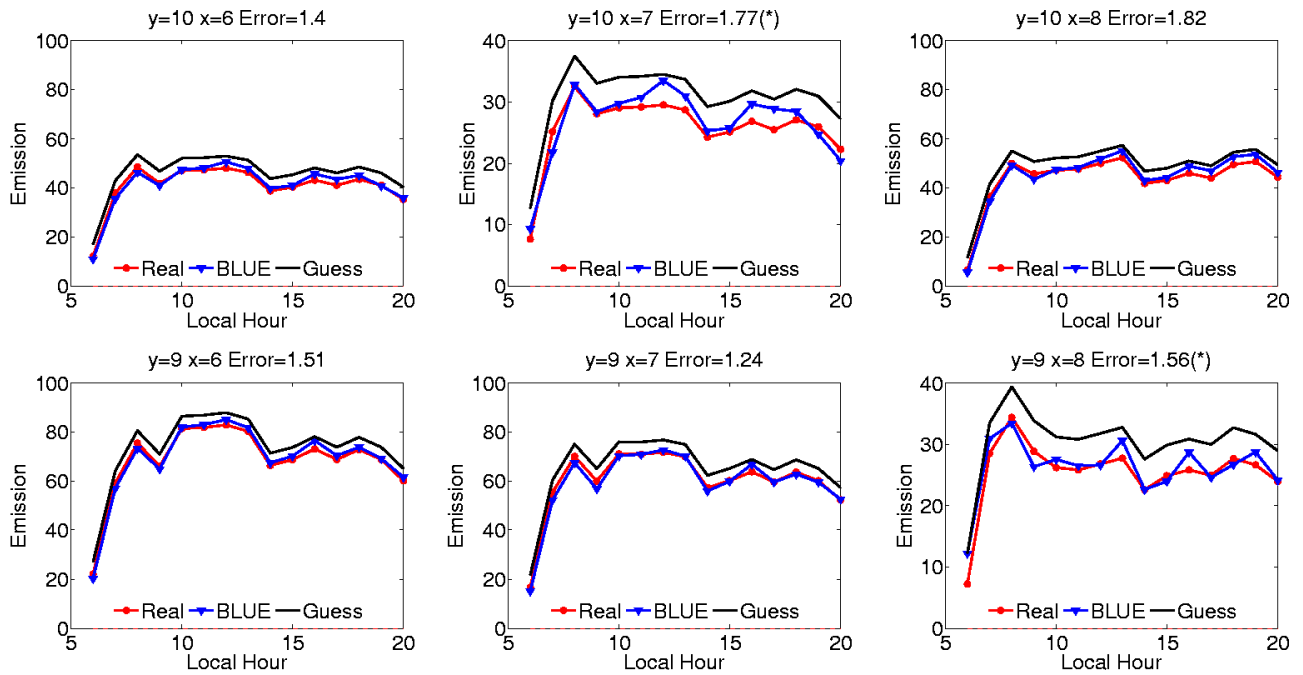


Figura 2.24: Ciclo diario de emisiones para el inventario inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) para una selección de celdas. Valores se muestran sólo en el período optimizado. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ . El error es el promedio de las diferencias entre el inventario real y el optimizado para cada celda

Para la figura 2.24 se muestran 6 celdas, 2 de las cuales corresponden a lugares donde se encuentran las estaciones de monitoreo (“Independencia” al norte, “Providencia” al este). Se puede apreciar que el inventario optimizado está cercano al inventario real, alejándose del inventario inicial. Nuevamente se puede observar el “efecto BLH”(ver sección 2.3.5.1), ya que durante las horas de mayor altura de capa de mezcla las estimaciones están más cercanas al inventario inicial. También se puede ver que existen ciertas inesta-

bilidades en el inventario en los puntos donde se encuentran las estaciones de monitoreo, producidas por el fenómeno de co-localización tratado en la sección 2.3.4.3.

### **2.3.6. Resultados con observaciones reales**

Una vez que la metodología fue probada usando observaciones ficticias, se puede realizar la mejora del inventario con observaciones reales. Antes de realizar la optimización se debe tener en cuenta que si el inventario optimizado es muy cercano al original esto puede deberse a 2 razones: 1. El inventario inicial o adivinanza es cercano al inventario real (que es representado indirectamente por las observaciones) 2. La red monitoreo no recibe información sobre los puntos de emisión, y como fue visto en la simulación sintética, la emisión permanece en su valor inicial. Además se debe tener en cuenta el “efecto BLH”(ver sección 2.3.5.1) que produce mayores cambios en las emisiones en las horas de menor altura de capa de mezcla (principalmente en la mañana).

Al aplicar el método se obtuvo un inventario de emisión mejorado con un 2.1 % menos de emisiones que el inventario original en términos globales. Sin embargo, en las distintas dimensiones tanto espacial como temporal se obtienen aumentos y disminuciones del inventario, pudiendo llegar incluso a más de un 100 % de diferencia entre el valor inicial y el optimizado.

Los resultados serán presentados en gráficos similares a la sección 2.3.5. Además serán presentados los gráficos para la obtención del parámetro  $\alpha$  usando el método de la L-curve.

#### **2.3.6.1. L-curve para el caso aplicado**

Mediante el método de la L-curve se obtiene el parámetro  $\alpha$  para poder aplicar la metodología OI modificada. Para una explicación detallada de este método ver sección 2.3.4.2.

La L-curve obtenida para la simulación con observaciones reales se encuentra en la figura 2.25. Recordemos que el  $\alpha$  óptimo se encuentra en el punto de máxima curvatura de la L-curve. Una forma de obtener este valor es parametrizar la curva de en función de  $\alpha$  y encontrar el máximo de curvatura para la función obtenida. Otra forma mas simple es obtener un valor cercano al máximo por simple inspección de la figura. Se encontró que la solución OI es poco sensible alrededor del máximo, luego no es necesario ocupar exactamente el  $\alpha$  óptimo. De esta manera se obtuvo un valor de  $\alpha = 50$ .

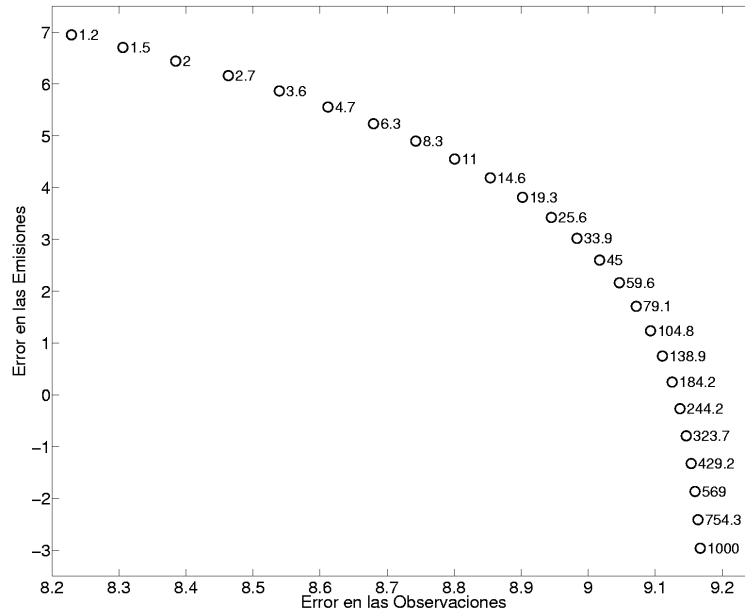


Figura 2.25: L-curve para caso de observaciones reales.

### 2.3.6.2. Gráficos de diferencia

Los gráficos presentados en esta sección son diferentes a los gráficos de diferencia presentados en la sección de simulación ficticia. En este caso la diferencia se realiza entre el inventario inicial o adivinanza (Inventario oficial CONAMA 2002) y el inventario mejorado u optimizado. Esto se debe a que no existe un inventario “Real” ya que es desconocido. Estos gráficos se encuentran en las figuras 2.26 y 2.27.

En la figura 2.26 se presenta un gráfico de diferencia considerando promedio de todas las horas. Se puede apreciar que el inventario mejorado tiene menor emisión que el inventario inicial en el centro-oeste de la ciudad, y mayor emisión en el sector norte-este y sur-este. Estos resultados son los esperados, debido a que en la validación del modelo de dispersión (sección 2.2) se estableció que las estaciones “La Florida” y “Las Condes” sobrestimaban las concentraciones, y estaciones más al centro como “Santiago” y “Providencia” subestimaban las concentraciones. Sólo hay 1 punto de emisión que no sigue este patrón al centro de Santiago donde se aprecia un leve aumento en las emisiones en el inventario mejorado con respecto al inicial. Estas diferencias podrían deberse a errores cometidos al realizar simplificaciones en el cálculo de las emisiones. Además se puede apreciar lo mencionado en la sección 2.3.5 sobre la ausencia de variación de las emisiones cuando están situadas en un lugar lejano a alguna estación de monitoreo.

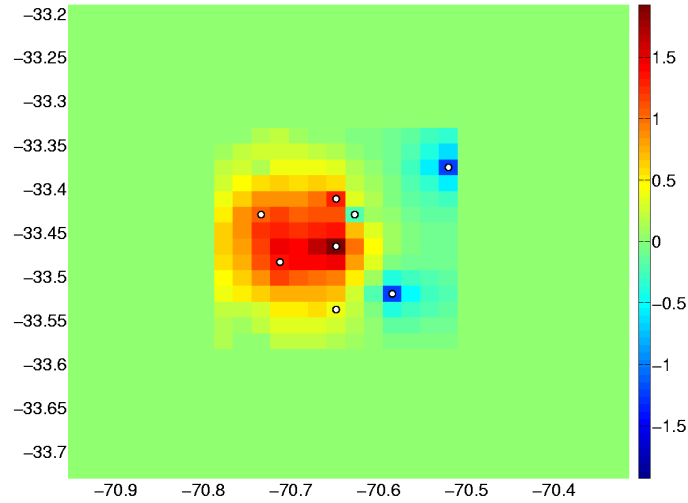


Figura 2.26: Diferencia entre inventario inicial y optimizado para caso real considerando todas las horas. Los puntos representan las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ .

En la figura 2.27 se muestran los gráficos de diferencia separando las horas de la mañana con las de la tarde. Aquí se aprecia el mismo patrón de variación de la emisión descrito anteriormente y al mismo tiempo el “efecto BLH”. Existen celdas en las cuales hay un aumento de las emisiones durante la mañana, pero una disminución por la tarde. Luego así se prueba que es importante realizar la optimización del inventario considerando su resolución temporal, ya que de otra forma esta diferencia no se tomaría en cuenta.

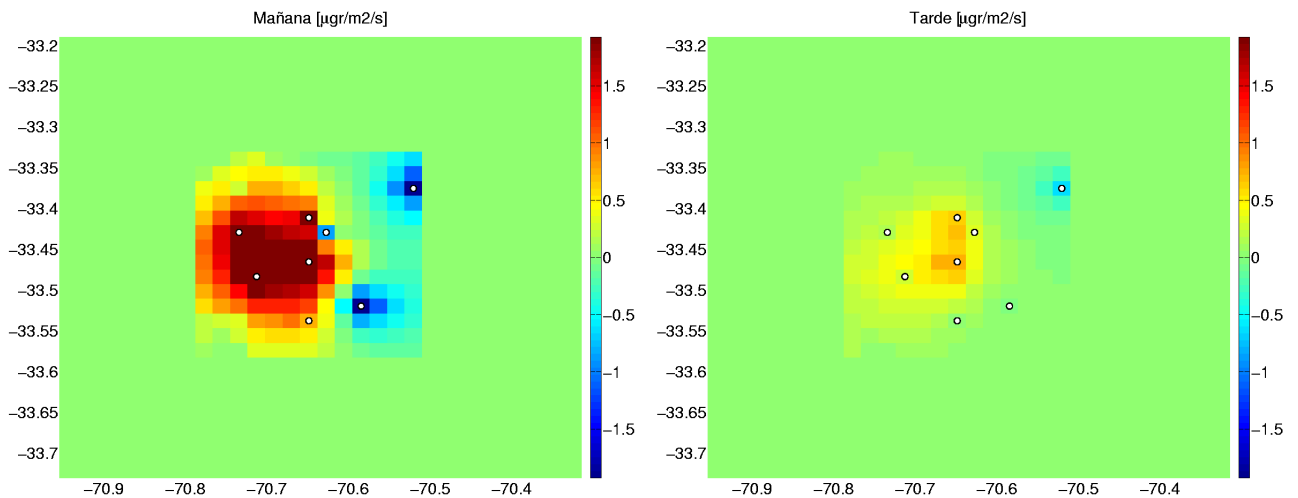


Figura 2.27: Diferencia entre inventario inicial y optimizado para caso real separando entre mañana y tarde. Los puntos representan las celdas donde se encuentran las estaciones de monitoreo. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ .

### 2.3.6.3. Gráficos de dispersión

La figura 2.28 muestra el gráfico de dispersión para la comparación de las concentraciones del modelo y las observaciones real, para el inventario inicial y el optimizado. Se puede apreciar una gran dispersión de los datos en comparación al caso ficticio. El ajuste de los datos es poco claro, observándose una leve tendencia de los cuadrados a estar más cerca de la diagonal.

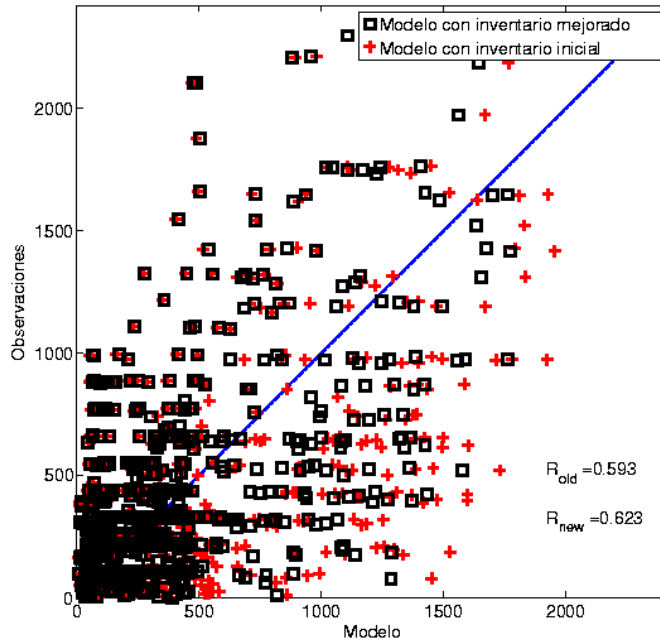


Figura 2.28: Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones reales para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

Al igual que para el caso de observaciones ficticias, se calcularon estadísticos para cuantificar la mejora de los resultados del modelo con respecto a las observaciones usando el inventario adivinanza y el optimizado. La tabla 2.3 contiene a los estadísticos, donde se observa una mejora para los 3 al utilizar el inventario optimizado.

Tabla 2.3: Estadísticos entre las observaciones en estaciones de monitoreo y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado.

	R	Pendiente	Sesgo [ $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ ]
Optimizado	0.623	0.74	21.3
Adivinanza	0.593	0.63	44.7

### 2.3.6.4. Ciclos diarios de emisión

Los gráficos de ciclos diarios de emisión para la simulación con observaciones reales son similares a los presentados en la sección 2.3.5.3 salvo que sólo se presentan los inventarios inicial y mejorado. Nuevamente, debido a la gran cantidad de gráficos, sólo se presenta una selección. El set completo se encuentra en el anexo G.

El comportamiento general que se observa en los gráficos de ciclo diario de emisión, como la selección presentada en la figura 2.29, es un cambio en las emisiones durante la mañana, entre las 6 AM y 12 PM. En las demás horas las emisiones optimizadas son similares al inventario inicial o adivinanza (este comportamiento se puede apreciar en el lado izquierdo de la selección).

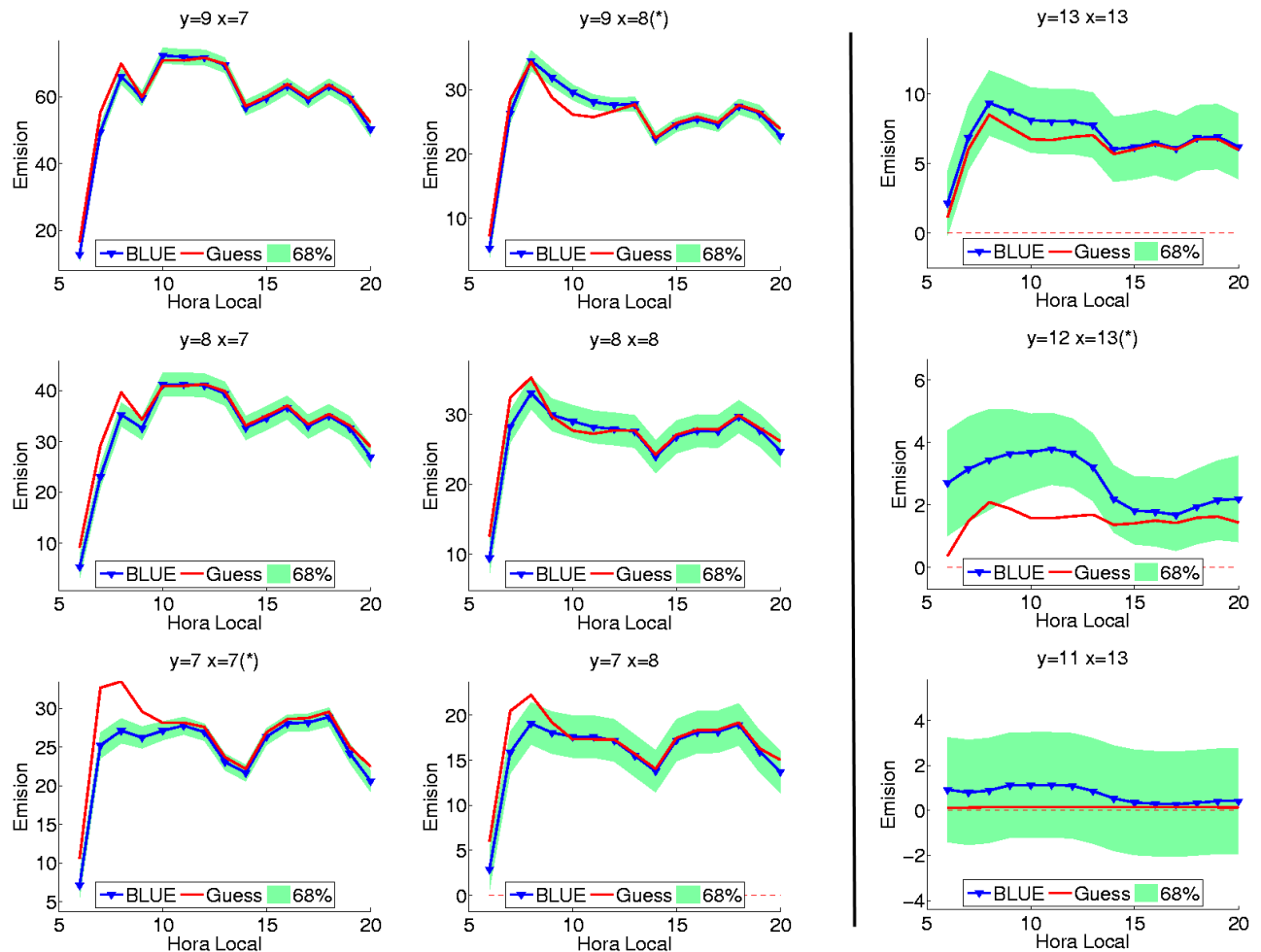


Figura 2.29: Ciclo diario de emisiones para el inventario inicial (Guess), optimizado (BLUE) para una selección de celdas para observaciones reales. En el lado izquierdo al noreste se encuentra “Providencia” y al sur “Santiago”. En el lado derecho se encuentra la estación “Las Condes”. Valores se muestran sólo en el período optimizado. La franja de 68 % equivale a  $\pm 1$  desviación estándar. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^2/\text{s}$ .



Las estaciones “Santiago” y “Las Condes” tienen ciclos diurnos de concentración que no son representados por el modelo de dispersión. La estación “Santiago” tiene diferencias en el ciclo diario de las concentraciones principalmente durante la tarde, sin embargo debido al “efecto BLH” y a las estaciones que la rodean no se aprecian grandes cambios en el nuevo inventario durante las horas de la tarde (ver figura 2.29, sector izquierdo). Por otro lado, la estación “Las Condes” tiene diferencias en el ciclo de concentraciones tanto en la mañana como en la tarde y no está rodeada por otras estaciones, luego el ciclo diurno de las emisiones cambia considerablemente, como se aprecia en la figura 2.29.

### 2.3.7. Validación del inventario mejorado

Una vez obtenido el inventario de emisiones mejorado es necesario saber si es representativo de cualquier período, o es sólo una optimización para el período que fue tomado en cuenta para realizar la inversión. La inversión fue realizada en un período de 10 días desde el 15 al 25 de Enero del 2002. Para realizar la validación del inventario se ocupó el período del 2 al 12 de Enero del 2002. Los resultados presentados son ciclos diurnos de concentración (figura 2.30), gráfico de dispersión comparando los resultados de ambos inventarios en el nuevo período (figura 2.31) y cálculo de estadísticos (tabla 2.4).

En los ciclos diurnos se puede apreciar que existen modificaciones de los ciclos diurnos sólo en algunas estaciones y principalmente en las horas de la mañana, alrededor del máximo de concentración. En general en las estaciones donde existía sobrestimación del máximo el nuevo inventario reduce este máximo, acercándolo a la referencia. En las estaciones donde existía subestimación de las concentraciones (“La Florida” y “Las Condes”) y donde el nuevo inventario aumenta sus emisiones no se aprecian grandes cambios en los ciclos diurnos de las concentraciones debido a que los cambios en las emisiones no son de gran magnitud.

En el gráfico de dispersión se aprecia una leve tendencia de acercarse más a la diagonal por parte de los puntos que corresponden al inventario mejorado. Además se obtiene un aumento en el coeficiente de correlación de las observaciones con el modelo utilizando el inventario mejorado, al igual que una pendiente más cercana a 1 y un menor sesgo (ver tabla 2.4).

Tabla 2.4: Estadísticos entre las observaciones en estaciones de monitoreo y los resultados del modelo usando los inventarios adivinanza y optimizado en un período de simulación distinto al usado en la inversión.

	R	Pendiente	Sesgo [ $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ ]
Optimizado	0.504	0.59	23.7
Adivinanza	0.464	0.46	55.3

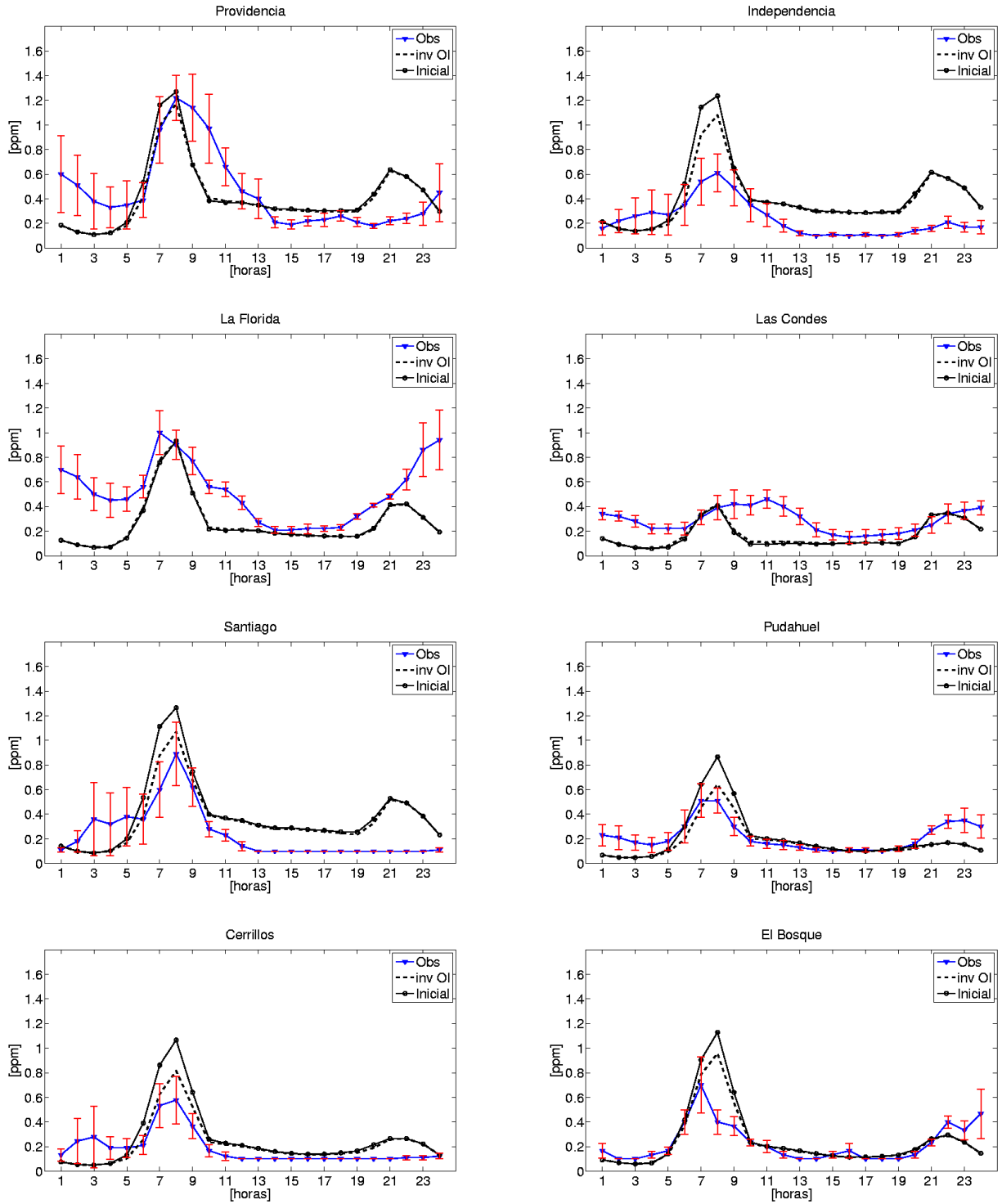


Figura 2.30: Ciclo diario de observaciones para el período del 2 al 12 de enero para las observaciones en estaciones de monitoreo, modelo ocupando inventario inicial y modelo ocupando el inventario mejorado. Las barras de error representan  $\pm 1/2$  desviación estándar del promedio de las observaciones. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

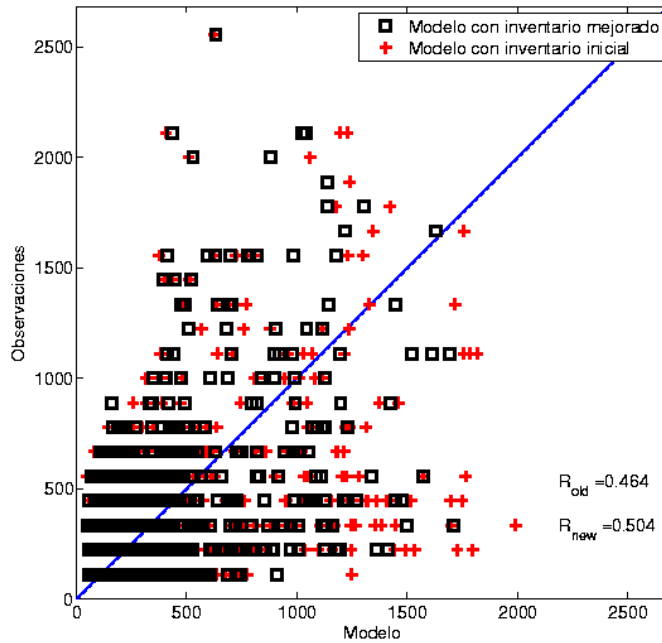


Figura 2.31: Gráfico de dispersión de concentraciones del modelo versus observaciones reales para modelo de dispersión considerando inventario inicial e inventario optimizado en un período distinto al de la optimización. Unidades en  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

### 2.3.8. Conclusiones

A través de esta sección se mostró y aplicó una metodología simple de modelación inversa llamada “Interpolación Optimal” (en inglés “Optimal interpolation”, OI) para mejorar un inventario de emisiones de CO a través de observaciones en estaciones de monitoreo. Este método consiste básicamente en considerar al modelo de dispersión como una función no-lineal, linealizarla en torno a un inventario inicial y minimizar un funcional de errores que contiene dos términos, la diferencia entre los resultados del modelo y las observaciones y la diferencia entre el inventario optimizado y el inicial, con el fin de obtener una solución no muy lejos de esta última. Para poder aplicar el método al caso de estudio fue necesario realizar modificaciones a éste, que consistieron en resolver el funcional de minimización con restricciones para asegurar una solución positiva, agregar un término de peso en el funcional usando la metodología de la curva L (L-curve) e incorporar un término de condicionamiento de la matriz de sensibilidad H aplicado a la covarianza del error de las emisiones con el fin de dar mayor confianza a las emisiones colocadas con los puntos de observación y así evitar la divergencia del método (ver sección 2.3.4). Al aplicar esta metodología se obtuvieron buenos resultados que se sintetizan a continuación.

En una primera instancia se aplicó la metodología considerando observaciones ficticias (sección 2.3.5) donde se obtuvieron las limitaciones de la metodología, destacando un radio de influencia de las estaciones,

el efecto de la capa límite (“efecto BLH”, ver sección 2.3.5.1) y una dependencia de los patrones de viento.

Luego se aplicó el método ocupando las observaciones de las estaciones de monitoreo de donde se obtuvo el inventario de emisiones mejorado. Las principales características de este inventario son que presenta una disminución global de las emisiones de CO en un 2.1 % con respecto al inventario original, las modificaciones ocurren principalmente en las horas de la mañana y existe una disminución de las emisiones en la zona centro-oeste y un aumento en la zona este-sur y este-norte que globalmente resultan en una disminución. Debido a que los cambios ocurren en ciertos sectores y horas, se puede llegar a diferencias sobre el 100 % en algunos puntos. Todos estos resultados están siempre acotados por las limitaciones encontradas en la sección de observaciones ficticias.

Finalmente, se realizó una etapa de validación del nuevo inventario utilizándolo para realizar una simulación en otro período, distinto al cual donde se realizó la inversión. Los resultados muestran que este inventario presenta mejores resultados que el inventario inicial, por lo que se puede concluir que el período de 10 días utilizado para realizar la inversión es representativo.

Entre los análisis realizados se encontró un radio de influencia de las estaciones, que es la zona de la cual las estaciones reciben información. De esta forma, observando los mapas, se pueden ver sectores de Santiago que no son cubiertos por ninguna estación, no habiendo información sobre ellos y no considerándose el impacto producido por las emisiones. Estos mapas pueden servir para encontrar estas zonas y analizar la instalación de nuevas estaciones.

Como se dijo previamente, las emisiones de CO son producidas principalmente por fuentes móviles, luego los resultados de la modelación inversa podrían ser extrapolados a otras especies que también son de esta naturaleza, como por ejemplo  $NO_x$ . Sin embargo, esta aproximación no es siempre cierta debido a que se está suponiendo un error del mismo tipo para el cálculo de las emisiones de fuentes móviles, lo que no necesariamente es así. Un ejemplo de esto es que para el caso del CO las emisiones dependen principalmente de la velocidad mientras que para el  $NO_x$  dependen principalmente de la aceleración, pudiendo existir errores distintos en las distintas especies. Otro aspecto a tener en cuenta es que otros contaminantes, como por ejemplo  $NO_x$ , no son principalmente producidos por fuentes móviles, luego la extrapolación de los resultados sólo podría realizarse hacia la parte producida por fuentes móviles.

## Capítulo 3

# Estimación de la distribución espacial de las emisiones

En este capítulo se desarrollarán y aplicarán métodos para estimar la distribución espacial de las emisiones de CO para la ciudad de Santiago de Chile. Todos estos métodos están basados en el método aplicado por Tuia et al 2007.

En Tuia et al 2007 el trabajo está basado sobre la ciudad de Concepción, que es una ciudad de tamaño medio. En este trabajo el análisis se hace sobre Santiago, que es una mega-ciudad con más de 6 millones de habitantes. Las razones de desarrollar una técnica para estimar la distribución de las emisiones para una mega ciudad son variadas. Usualmente los inventarios en Sudamérica son calculados sin desagregar la información espacialmente, luego esta técnica podría utilizarse con este propósito. Otra razón es que este tipo de métodos puede ser utilizado para calcular la distribución de las emisiones hacia el futuro o hacia el pasado utilizando proyecciones de los mapas. Además de aplicar las metodologías desarrolladas en Tuia et al 2007 se pretende aplicar nuevas metodologías con el fin de mejorar las deficiencias establecidas en los trabajos anteriores.

Finalmente, los resultados de las metodologías no sólo serán comparados con el inventario de emisiones oficial, sino que también se realizará una comparación usando como referencia el inventario optimizado por modelación inversa obtenido en el capítulo 2.

### 3.1. Antecedentes

Los inventarios de emisiones pueden tener 3 dimensiones: la magnitud de la emisión, la distribución temporal y la distribución espacial. Depende del tipo de metodología de cálculo utilizada el tipo de dimensiones que un inventario va a tener finalmente. Por ejemplo, la metodología MODEM utilizada para calcular los inventarios oficiales para la ciudad de Santiago es capaz de entregar resultados con las 3 dimensiones.

Sin embargo, es común encontrar inventarios de emisiones que solamente tienen la magnitud de la

emisión y la distribución temporal sin presentar la distribución espacial (por ejemplo, inventarios IVE). La componente espacial de un inventario de emisiones es también importante ya que sirve para identificar los lugares en los cuales se están produciendo las mayores emisiones para así tomar medidas. Además, sin una distribución espacial el inventario no puede ser usado para realizar simulaciones con un modelo de calidad de aire.

Luego si se posee un inventario que no tiene la componente espacial, es importante poder distribuirlo espacialmente. Con este afán se han desarrollado metodologías que ocupan distintos niveles de información con el fin de obtener la distribución espacial de un inventario de emisiones. En trabajos como Winewarter et al 2000 y Winewarter et al 2001 se desarrollan metodologías para estimar la distribución espacial de emisiones para varios contaminantes (como  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $VOC$  y  $SO_2$ ) y para distintas fuentes (como móviles, industriales y domesticas). La metodología base consiste en ocupar información de uso de suelo obtenida mediante imágenes satelitales interpretadas mediante la metodología CORINE y asignar a los distintos usos de suelo un peso distinto al distribuir las emisiones. Luego, se van agregando distintos niveles de información para mejorar el inventario como por ejemplo fuentes puntuales y fuentes de línea. Para calibrar los pesos asignados a cada uso de suelo se ocupan inventarios de emisiones de referencia calculados con metodologías Bottom-up para distintas ciudades, y luego se aplica la metodología en otras ciudades. Estos trabajos son realizados para grandes ciudades europeas.

Específicamente, en los trabajos de Winewarter para estimar la distribución espacial de las emisiones de fuentes móviles se ocupa, además de los usos de suelo, información sobre registro de vehículos y conteos de tráfico (que es una estimación de los flujos vehiculares).

Existen estudios que se enfocan principalmente en fuentes móviles, que serán explicadas con mayor detalle en las siguientes secciones.

### **3.1.1. Tuia et al 2007**

En Tuia et al 2007 se desarrollan metodologías para estimar la distribución espacial de un inventario de emisiones de  $CO$  para el área Gran Concepción (Chile, VIII región), considerada una ciudad de tamaño medio. Las metodologías desarrolladas buscan correlacionar las emisiones con diversos factores, que pueden ser divididos en 2 familias:

- Parámetros indirectos: Son los factores relacionados indirectamente con el tráfico, tales como la densidad poblacional o uso de suelos urbano.
- Parámetros directos: Se relacionan directamente con el tráfico, como por ejemplo la ubicación de la red vial.

Uno de los objetivos de este estudio es ocupar metodologías simples e información poco costosa. De esta forma no se ocupan registros vehiculares, conteos de tráfico o información de flujos vehiculares proveniente de un modelo de transporte.

### 3.1.1.1. Metodología usada

El espacio a analizar se subdivide en celdas cuadradas todas del mismo tamaño. El tamaño de las celdas debe ser determinado para cada lugar a analizar, y depende de varios parámetros como el tamaño de la región y el tiempo computacional.

Las técnicas de dispersión espacial están basadas en encontrar ciertos factores de peso para cada celda. Estos pesos (o factores de normalización) deben cumplir las siguientes ecuaciones:

$$m_j = \lambda_j * M \quad (3.1)$$

$$\sum_j m_j = M \quad (3.2)$$

Donde  $m_j$  es la emisión de la celda  $j$  y  $M$  es el total de emisión en la región.

El valor  $\lambda_j$  es obtenido de la normalización de un puntaje ( $s_j$ ) asociado a cada celda. Este puntaje es asignado según alguna variable, como por ejemplo densidad poblacional, uso de suelos, etc. La normalización es la siguiente:

$$\lambda_j = \frac{s_j}{\sum_j s_j} \quad (3.3)$$

El objetivo final es obtener estos  $\lambda_j$  para distintas metodologías y comparar los resultados con un caso base. Un esquema de esto se ve en la figura 3.1.

Utilizando el esquema descrito anteriormente, se desarrollaron las siguientes metodologías:

- Usando datos indirectos de urbanización: Para este caso, el parámetro  $\lambda_j$  se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda_j = \sum_j \frac{Area\_urbana_{jk}}{1km^2} \quad (3.4)$$

Donde  $Area\_urbana_{jk}$  es el área urbana que queda dentro de la celda de 1x1 [km].

Esta metodología se usó para 2 mapas de urbanización, uno de la Conaf y otro del Minvu. En ambos casos no se obtienen buenos resultados, debido a una saturación del parámetro cuando las celdas ya se encuentran en áreas completamente urbanizadas. Se obtiene un patrón binario de la distribución de las emisiones.

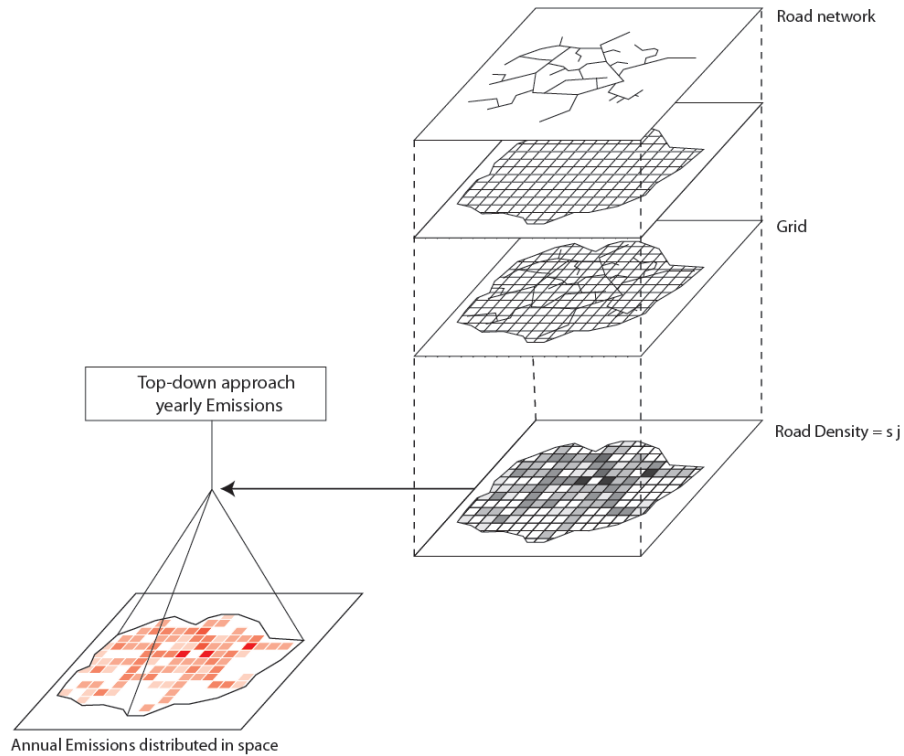


Figura 3.1: Estimación de la dispersión de contaminantes usando la red vial. ref: Tuia et al 2007

- Usando datos indirectos de densidad de población: Se agregó esta información a la de las áreas urbanizadas. Sólo se agregó la información de densidad poblacional a las zonas urbanizadas. El parámetro  $\lambda_j$  se calculó de la siguiente manera:

$$\lambda_j = \sum_j \frac{\text{Densidad Pob}_{jk}}{\left(\frac{\text{Area}_{jk}}{1\text{km}^2}\right)} \quad (3.5)$$

Donde k es el polígono que se obtiene de la intersección de las celdas con la información de densidad poblacional. Esta estimación entrega mejores resultados que la anterior, de lo que se puede concluir que en esta zona la actividad vehicular se relaciona con la densidad vehicular.

- Usando datos directos de densidad de red vial principal

Esta estimación se realiza traslapando la red vial principal con las celdas, y sumando los kilómetros que quedan dentro de la misma celda, de la siguiente manera:



$$\lambda_j = \sum_j \text{largo\_camino}_{ji} \quad (3.6)$$

Donde  $i$  es un segmento de la vía principal. Este modelo entrega mejores resultados aun, reproduciendo la emisión fuera de las zonas urbanizadas.

- Usando datos directos de densidad de red vial principal y secundaria: Al cálculo anterior, se agregan las vías secundarias. A las vías secundarias se les dio una importancia del 10 %, según estudios reportados del IVE. Así, el modelo usado fue el siguiente:

$$\lambda_j = 0,9(\sum_j \text{largo\_camino\_principal}_{ji}) + 0,1(\sum_l \text{largo\_camino\_secundario}_{jl}) \quad (3.7)$$

Donde  $i$  es un segmento de vía principal y  $l$  un segmento de vía secundario. Este método no entregó mejores resultados que el método que sólo ocupa la red principal, pero siguen siendo mejores que los obtenidos con parámetros indirectos.

- Usando datos directos de densidad de red vial principal e indirectos de zonas urbanizadas: Se ocupa esta estrategia de forma de tratar de representar la red vial secundaria. El modelo es el siguiente:

$$\lambda_j = 0,9(\sum_j \text{largo\_camino\_principal}_{ji}) + 0,1(\sum_k \frac{\text{Area\_urbana}_{jk}}{1\text{km}^2}) \quad (3.8)$$

Donde  $i$  es un segmento de vía principal, y  $k$  un polígono obtenida de la intersección de las celdas y las áreas urbanizadas. Este modelo no genera grandes diferencias en relación al anterior.

EL inventario de referencia usado para comparar con los métodos desarrollados fue calculado usando el modelo MODEM 2. Este modelo está calcula las emisiones por arcos, que son una representación de la red vial real(ESTRABIO). Para obtener los puntajes de cada celda se sobreponen los arcos sobre las celdas, los cuales son segmentados. Asumiendo una distribución uniforme de la emisión sobre el arco se suman las emisiones de cada pedazo de segmento que queda sobre 1 celda, y así se obtiene el puntaje de cada celda.

Los problemas de esta estimación radican en 2 principales factores:

- La distribución uniforme de las emisiones a lo largo del arco es una aproximación fuerte
- La geo-referencia de la red de arcos no es idéntica a la red vial existente, lo que genera errores en la estimación espacial.
- Los arcos, en algunos casos, simplifican de gran manera la red vial real, lo que genera errores en la estimación.

### 3.1.1.2. Resultados principales

Para realizar una comparación se obtuvieron gráficos de dispersión de los  $\lambda_j$  de los distintos modelos con respecto a la referencia, lo que se aprecia en la figura 3.2.

Estos gráficos expresan lo dicho anteriormente, donde se ve que con la información de áreas urbanizadas se llega a un valor de saturación, la modelación mejora con la densidad poblacional y mejora aún más al integrar las vías principales. No se ve mayor cambio al considerar las vías secundarias y el modelo combinado.

Una comparación numérica se puede hacer con un índice de similaridad llamado “Distancia de Hellinger”, que se calcula de la siguiente manera:

$$d_{hellinger} = \sum_j (\sqrt{f_j} - \sqrt{g_j})^2 \quad (3.9)$$

Donde  $f_j$  corresponden a los  $\lambda_j$  de los modelos simplificados, y los  $g_j$  al modelo referencial. Este índice sirve para mostrar correlación entre 2 distribuciones. Mientras más cercano a 0, más similares son las distribuciones. En la figura 3.3 se aprecia la evolución de este parámetro.

Se observa una mejora a medida que se agrega información, pero la distancia llega a un límite, desde donde no disminuye. Las posibles fuentes de error se pueden separar en tendencias generales y errores sistemáticos en las celdas.

Las tendencias generales son una subestimación en el centro de Concepción y en el corredor de transporte entre Chiguayante y Concepción y una leve sobrestimación de las afueras del centro de Concepción. Estos errores se deben principalmente a que no se tomaron en cuenta factores de estructura de tráfico, como la congestión vehicular o la repartición de flota. Por esto se recomienda incorporar esta información en forma de pesos que representen estos factores. Esta metodología necesita de una calibración de los pesos que podría ser costosa debido a que depende de cada ciudad.

Existen diferencias sistemáticas al analizar celda por celda que corresponden principalmente a la subestimación de los valores máximos, las cuales se deben a diferencias relacionadas a vías sobrecargadas (el modelo no es capaz de modelar zonas de alto tráfico), errores de digitalización de mapas y incompatibilidad entre modelos lineales y zonales (por ejemplo, hay zonas donde no hay urbanización pero sí hay caminos).

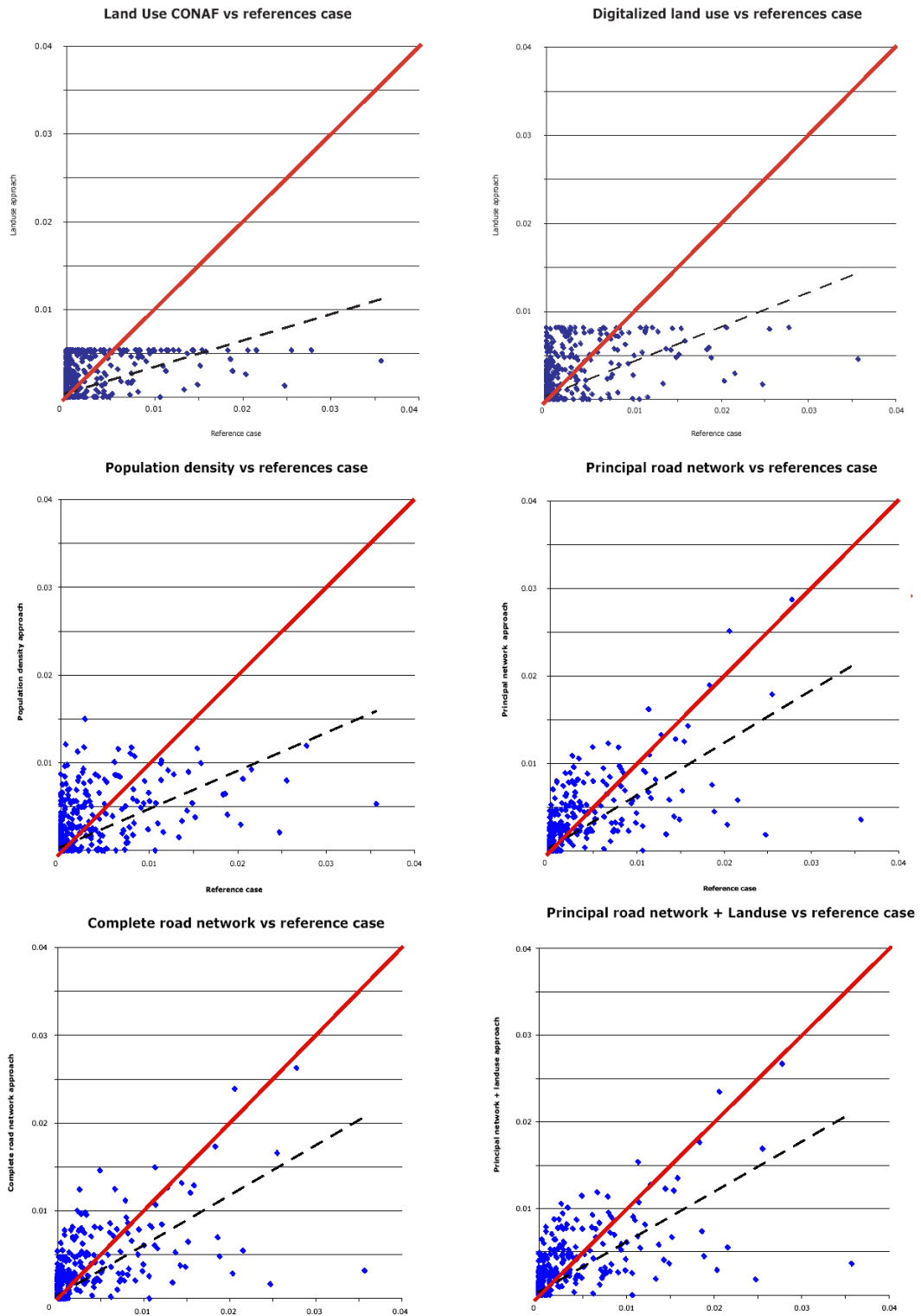


Figura 3.2: Dispersión de los modelos versus el caso de referencia. ref: Tuia et al 2007

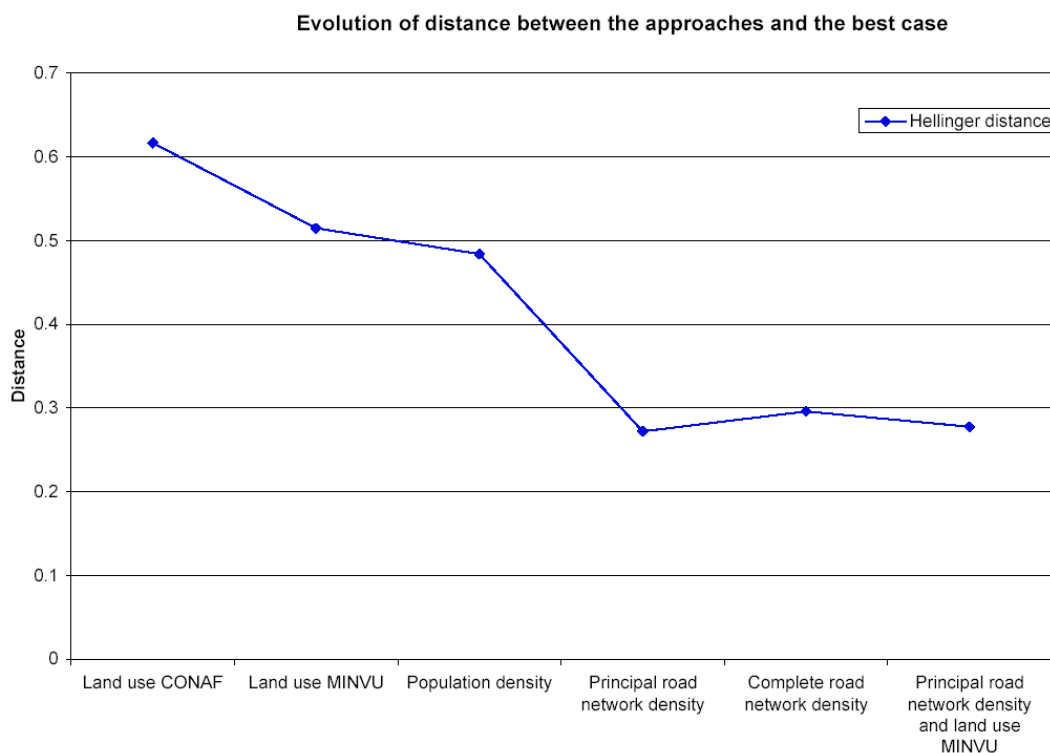


Figura 3.3: Distancia de Hellinger entre el caso de referencia y los distintos modelos. ref: Tuia et al 2007

Finalmente se encontró que al mejorar la información de uso de suelo, se obtienen grandes mejoras en los resultados que ocupan esta información lo que no ocurre al agregar una red vial secundaria a la red vial principal, donde se obtienen resultados similares.

### 3.1.2. Ossés et al 2007

En Ossés et al 2007 se toma la metodología con la cual se obtienen mejores resultados en Tuia et al 2007 (distribuir ocupando una red vial simplificada de la ciudad) y se aplica para 7 ciudades chilenas de tamaño pequeño y medio (Chillán, Temuco, Antofagasta, Talca, La Serena-Coquimbo, Valparaíso y Osorno) y para todos los contaminantes para los cuales se dispone de un inventario de referencia ( $PM-10$ ,  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  y  $FC$ ). Los inventarios de referencia son calculados según la metodología MODEM.

Para realizar las comparaciones entre los resultados de la metodología y las referencia se ocupan métodos cualitativos (comparación de los mapas de emisión, gráficos de diferencia) y cuantitativos (coeficiente de correlación, porcentaje de aceptación de celdas). De los resultados se reafirman las deficiencias de la metodología encontradas en Tuia et al 2007, al subestimar las emisiones en los centros urbanos, en las vías de alto tráfico y en zonas industriales.

Luego, con los resultados de los métodos cuantitativos se realiza un análisis estadístico para determinar si existen diferencias significativas. Se encontró que no existen diferencias significativas al comparar los resultados según contaminantes, es decir, para una misma ciudad, la metodología estima de manera similar la distribución espacial de las emisiones, en cambio sí se encontraron diferencias significativas al comparar los resultados de la metodología entre ciudades. Se encontró que a medida que la ciudad aumenta en tamaño y en complejidad los resultados se degradan.

Además de lo anterior se realiza una comparación de los resultados para 1 ciudad (Antofagasta) variando el tamaño de la grilla del inventario. Se encontró una tendencia de que los resultados mejoran al disminuir el tamaño de la grilla. Esta tendencia no siempre se cumple debido a que otro factor que determina los resultados de la estimación es la posición geográfica de la grilla.

## **3.2. Metodología**

En esta sección se establecen las limitaciones de los métodos aplicados en trabajos anteriores y se proponen los distintos métodos a seguir, comenzando por los aplicados previamente y siguiendo con los nuevos métodos. Además se establece la metodología de comparación de inventarios, la información utilizada como entrada a los métodos y los inventarios de emisión de referencia.

### **3.2.1. Limitaciones del método aplicado para distribuir las emisiones**

Las limitaciones de las metodologías usadas en Tuia et al 2007 y Ossés et al 2007 son las siguientes:

1. El método no es capaz de representar las altas emisiones ocurridas en algunos centros urbanos y en las zonas industriales. Esto debido que en estas zonas, además de existir altos flujos vehiculares, se concentra el tráfico provocando disminución en la velocidad media de los vehículos aumentando las emisiones. Esta limitación fue establecida en Ossés et al 2007.
2. Las emisiones generadas en accesos principales, avenidas principales y carreteras son subestimadas. Esto se debe a que en estas vías los flujos vehiculares son altos. Esta limitación fue establecida tanto en Ossés et al 2007 y Tuia et al 2007.
3. Al usar una red vial simplificada para la estimación de la distribución espacial de las emisiones existen lugares donde hay calles pero su emisión no es finalmente representada.
4. Al correlacionar directamente la densidad poblacional con las emisiones (Tuia et al 2007), no se toma en cuenta que en sectores con mayor nivel socioeconómico se usa más en transporte particular y en sectores de menores niveles se usa más el transporte público.

### 3.2.2. Metodologías aplicadas

Las metodologías que fueron aplicadas en el presente trabajo corresponden a las desarrolladas anteriormente (Tuia et al 2007 y Ossés et al 2007) y a los nuevos métodos propuestos. Los métodos que han sido aplicados anteriormente son:

1. Usar la red vial principal. Con esta metodología se obtuvieron los mejores resultados en Tuia et al 2007.
2. Usar la red vial completa. Esta metodología fue la usada es Ossés et al 2007
3. Usar mapas de densidad de población. Esta metodología fue aplicada en Tuia et al 2007 obteniéndose resultados con mayor error con respecto al inventario inicial comparado con las metodologías que ocupan redes viales. Como para Santiago se tienen mapas de densidad de población de mayor resolución, luego se aplicará la metodología para ver si se obtienen mejoras.
4. Usar la red vial principal y la red vial completa ponderando cada término con un factor distinto. En Tuia et al 2007 se aplicó una metodología similar, usando una red vial secundaria en vez de una completa. Para el presente trabajo se dispone sólo de la red vial completa y no de una red secundaria. La forma de proceder es similar, ya que se busca ponderar de distinta forma las vías principales ya que en estas se concentra la emisión. En Tuia et al 2007 se obtuvieron resultados similares a la metodología de sólo usar la red principal.
5. Usar la red vial principal y mapas de urbanización. La idea es que el mapa de urbanización reemplaza a la red vial secundaria. Esta metodología fue aplicada en Tuia et al 2007 con buenos resultados, similares a los resultados usando la red vial principal.

Los métodos que se proponen para mejorar los problemas listados anteriormente son los siguientes:

1. Usar la red vial principal y mapas de densidad de población en conjunto usando un factor de ponderación para cada uno. Esta metodología busca reemplazar el uso de una red vial completa por un mapa de densidad de población, ya que existe una correlación directa entre ambos debido a que donde vive gente debe haber calles para llegar a estas zonas. Se busca resolver la limitación N°3.
2. Usar mapas de densidad de población ponderado por factores socioeconómicos. Esta metodología busca mejorar la metodología de sólo usar mapas de densidad de población aplicada en Tuia et al 2007 (limitación N°4) asociando mayor actividad vehicular a zonas de mayor nivel socioeconómico.

3. Usar la red vial principal ponderando los largos de los arcos por el flujo y la velocidad en cada arco, buscando solucionar la limitación N°2 con métodos directos. Esta metodología es posible de aplicar debido a que los arcos de la red ESTRAUS tienen información sobre el flujo vehicular y la velocidad media de los vehículos. Es esperable que los resultados mejoren debido a que estos parámetros son usados directamente para calcular las emisiones. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el objetivo de este trabajo no es ocupar los flujos directamente, luego esta metodología se ocupará sólo como punto de comparación y para determinar qué parámetro es más importante, los flujos o las velocidades medias.
4. Usar la red vial principal ponderando cada arco dependiendo de la densidad de población y el nivel socioeconómico que exista en la zona donde se encuentra el arco. De esta forma se intenta estimar los flujos para cada arco. Esta metodología busca solucionar la limitación N°2 y 4.
5. Usar la red vial principal clasificando cada arco según un rango de flujo bajo, medio o alto, y dependiendo de esta clasificación aplicar un factor diferente. Esta metodología busca resolver las limitaciones N°1 y 2.
6. Usar la red vial principal ponderando cada arco por su capacidad. Esta metodología busca resolver las limitaciones N°1 y 2.
7. Usar la red vial principal ponderando cada arco dependiendo de la zona en la cual se encuentre, de forma de dar distinto peso a las vías que se encuentran en centros urbanos o áreas industriales dando cuenta de la mayor emisión generada en ellas. La determinación del tipo de zona se realizará usando mapas de uso de suelo. Esta metodología apunta a resolver el problema N°1.

### **3.2.3. Métodos de comparación**

Lo que se intenta comparar es información en formato de grilla. Para hacer estas comparaciones no existe un método único que permita abarcar todas las diferencias o igualdades entre las grillas comparadas. Para inventarios de emisiones, se han propuesto diferentes métodos que se encuentran compilados en Winiwarter et al 2003.

Los métodos de comparación ocupados en el presente trabajo son:

- Mapas de emisión y mapas de diferencias. Los mapas de emisiones consisten en mostrar mapas de la grilla usada con los valores representado por colores para la referencia y para las metodologías aplicadas. Los mapas de diferencias muestran la diferencia absoluta entre la referencia y las distintas metodologías aplicadas. Estos mapas sirven para identificar los puntos de alta emisión, encontrar sim-

ilaridades o discrepancias entre la referencia y los métodos usados. Debido a que se ocupan escalas de colores, tiene el problema que los valores individuales de cada celda no puede ser obtenidos.

- Series de escaneo de datos. Consiste en graficar los valores de cada celda como si fuera una serie de tiempo. El orden seguido en el presente trabajo es oeste-este y luego sur-norte (empezando desde la celda del extremo sur-oeste). Permiten visualizar la magnitud de las emisiones en vez de una escala manteniendo la relación existente entre celdas aledañas. Además se puede comparar directamente los valores entre la referencias y las distintas metodologías. El ancho y alto de los peaks urbanos permiten realizar comparaciones entre las metodologías usadas y la referencia.
- Gráfico de dispersión y coeficiente de correlación. Se grafica los pares de valores referencia-metodología en un gráfico x-y. El eje “x” siempre corresponde a la referencia (variable independiente) mientras que el eje “y” corresponde a a las distintas metodologías aplicadas (variable dependiente). Además se calcula el coeficiente de correlación dando igual peso a todas las celdas. El coeficiente de correlación es sensible a los valores de mayor magnitud, lo cual es preferible en este estudio debido a que es de gran importancia poder estimar la distribución espacial de los valores máximos de emisión.
- Nivel de aceptabilidad. Consiste en establecer un rango en el cual el valor de la metodología aplicada es aceptable de tal forma que el valor de la referencia y el de la metodología pueden ser considerados equivalentes. Para esto se ocupan 2 criterios. El primero es calcular la diferencia relativa y establecer un % de diferencia que sea aceptable. El segundo tiene que ver con los valores pequeños que son menos importantes y más difícil de representar, que generalmente muestran diferencias relativas grandes. El criterio consiste en que la diferencia absoluta debe ser menor que una fracción del valor medio de la variable independiente (referencia). El resultado final se expresa como el porcentaje de celdas que es capaz de cumplir con alguno de los 2 criterios. Los valores individuales aceptados pueden ser visualizados en el gráfico de dispersión, ya que en estos gráficos se puede representar la zona de aceptación. Este criterio es más sensible a valores pequeños debido a que generalmente la gran mayoría de las celdas tienen emisiones bajas y son pocos los puntos de alta emisión. Para este trabajo se estableció el mismo criterio usado en Winiwarter et al 2003, que corresponde a 10 % de la media para la diferencia absoluta y 30 % para la diferencia relativa.

#### **3.2.4. Información usada para realizar las estimaciones de la distribución espacial de las emisiones**

El tipo de información usada se encuentra principalmente en formato GIS. Para una introducción a GIS ver anexo E. La información disponible se puede separar en las siguientes categorías:

1. Mapas de la red vial: Estos mapas describen la red vial de la ciudad de Santiago.



- Arcos de la red ESTRAUS. ESTRAUS es un modelo de transporte usado para calcular flujos vehiculares en distintos arcos principales de la ciudad de Santiago. La red que se posee es para el año 2001 (ver anexo A, figura A.9). Esta red de arcos es la base que se utiliza para calcular las emisiones oficiales de fuentes móviles para la ciudad de Santiago. Sin embargo, la red utilizada para calcular el inventario oficial no es la misma que la que fue proporcionada.

Los arcos de la red ESTRAUS son una simplificación de la red vial real. Por un lado sólo están representadas las calles con mayores flujos y además la referencia geográfica a estas calles no es siempre correcta. Por ejemplo, una calle que es curva muchas veces es representada como una línea recta. Una ventaja es que para cada arco se posee información sobre flujo vehicular, capacidad, categoría de arco, emisión, entre otras. Esta información fue proporcionada por SECTRA.

- Mapa de la red vial real. Consiste en todas las calles para la región de metropolitana (ver anexo A, figura A.10). Solo se tiene información sobre la forma de las calles, pero no hay separación entre categorías u otros tipos de clasificación. La red es para el año 2002.

## 2. Mapas de densidad de población:

- Mapa de densidad de población de alta resolución. Consiste en una grilla de  $120 \times 120 \text{ m}^2$  donde en cada celda se encuentra la densidad de población equivalente a esa zona. Este mapa fue generado por Pablo Sarricolea (Geógrafo de la Universidad de Chile) a partir de datos del censo del 2002 para la ciudad de Santiago (ver anexo A, figura A.11).
- Densidad de población por comunas. Es un mapa con la densidad de población para cada comuna de la región metropolitana del año 2002, obtenido del CENSO del 2002 (ver anexo A, figura A.2). Esta información es oficial del gobierno de Chile, y se puede encontrar en la página web del gobierno de la región metropolitana ([otas.gorerm.cl](http://otas.gorerm.cl)).

## 3. Mapas de uso de suelo:

- Uso de suelo generado por el departamento de Geografía de la Universidad de Chile. Es un mapa en grilla cuadriculada de alta resolución ( $30 \times 30 \text{ m}^2$ ) donde para cada cuadrícula está indicado el tipo de suelo (ver anexo A, figura A.12). Este mapa fue generado a partir de una imagen satelital del 31 de diciembre del 2004 del satélite LANDSAT, usando los sensores MSS (multispectral scanner) y TM (tematic mapper). La técnica usada para obtener el uso de suelo a partir de la imagen es la de Fotointerpretación manual basado en las tipologías de Pauleit, Anderson y CORINE. Luego de la fotointerpretación se pasa por una etapa de validación con salidas a terreno y comparando con datos del SII (servicio de impuestos internos).
- Uso de suelo MINVU. Consiste en un mapa de uso de suelo de menor resolución espacial que el mapa del departamento de geografía. En cada polígono se encuentra el % de area que ocupa cada tipo de suelo (ver anexo A, figuras A.14, A.15 y A.16 como ejemplos). Esta información fue

proporcionada por SECTRA y es para el año 2001. Para calcular los flujos vehiculares con la red STRAUS se debe primero dar como entrada el uso de suelo MINVU. El uso de suelo MINVU que se posee es el mismo usado para la corrida STRAUS que se posee.

Se debe tener en cuenta que los 2 mapas de uso de suelo tienen distintas categorías, luego la comparación no es directa.

4. Mapas con información Socioeconómica: Se posee información oficial del gobierno de la región metropolitana por comunas (otas.gorerm.cl). Esta información está representada por distintos índices socioeconómicos:

- Calidad de la educación año 2001: Construido a partir de resultados de la Prueba SIMCE aplicada a los 2º medios de todos los colegios de la región (ver anexo A, figura A.3).
- Índice de Calidad de vida año 2002: Permite comparar cómo vive la población en términos de necesidades universales y comunes a cualquier individuo en cualquier contexto territorial (ver anexo A, figura A.4). Toma en cuenta 4 aspectos que son condiciones de la vivienda, situación de los servicios básicos anexos a la vivienda, calidad del espacio público y acceso a equipamiento de salud y educación.
- Índice de desarrollo humano año 1998: Permite visualizar diferencias del punto de vista de desarrollo social y desigual distribución de las condiciones de vida (ver anexo A, figura A.5). Toma en cuenta aspectos de Educación, Salud e Ingreso a partir de índices que reflejan cada uno de estos campos.
- Índice de prioridad social año 2000: Permite identificar los territorios que requieren con mayor prioridad la intervención pública o privada para apoyarlo en su proceso de desarrollo socioeconómico (ver anexo A, figura A.6). Toma en cuenta aspectos de Ingreso, capital humano, educación, salud y sociodemográficos.
- Porcentaje de Población en condición de indigencia año 2000: A un individuo se le considera indigente si su nivel de ingreso no le permite satisfacer sus necesidades alimentarias (ver anexo A, figura A.7).
- Porcentaje de Población en condición de pobreza año 2000: A Un individuo se le considera pobre si su nivel de ingreso se sitúa por debajo de un nivel mínimo que le permita satisfacer sus necesidades básicas (ver anexo A, figura A.8).

La información que se posee es muy variada, desde información muy gruesa hasta información de alta resolución. El propósito de ocupar información con distinto grado de exactitud es ver cuanto mejora la estimación de la distribución espacial de las emisiones cuando se incrementa la resolución de la información

que se posee. No todas las megaciudades de Sudamérica poseen información de alta resolución como se tiene para Santiago, luego es importante desarrollar métodos que contengan información de baja resolución.

Otro ejercicio realizado fue combinar un mapa de resolución gruesa con otro de mayor resolución con el fin de generar un nuevo mapa del mismo tipo del de resolución gruesa, pero con una resolución mejorada.

### **3.2.5. Información usada para comparar con las estimaciones de la distribución espacial de las emisiones**

La información para comparar son inventarios de emisiones. Se encuentran en archivos de texto pero se pueden exportar a una grilla y así tenerlo en formato GIS. Son 2 inventarios:

1. Inventario oficial para el año 2002: Es un inventario de emisiones para monóxido de carbono (CO) con resolución espacial de  $2 \times 2 \text{ km}^2$  y temporal de 1 hora, para un día promedio del año (ver anexo A, figura A.17). Fue proveído por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile). Esta separado por tipo de fuente: móvil y fijas (figuras A.19 y A.20 respectivamente). Más del 90 % de las emisiones corresponden a emisiones de fuentes móviles. Estas fueron obtenidas con la metodología MODEM (ver anexo C para un mayor detalle).
2. Inventario de emisiones optimizado: Es el inventario oficial del 2002 descrito previamente, pero optimizado mediante modelación inversa (ver anexo A, figura A.18). Este trabajo está descrito en el capítulo 2.

## **3.3. Resultados**

### **3.3.1. Creación de nuevos de mapas**

Combinando los mapas existentes se pueden crear mapas mejorados los cuales se pueden usar posteriormente para aplicar los métodos para la estimación de la distribución de las emisiones. Se crearon 2 nuevos mapas, una mejora de la densidad de población por comunas y una estimación de la red vial completa.

#### **3.3.1.1. Mapa de densidad de población mejorado**

Los mapas de densidad de población por comunas, o sectores de una ciudad existen en variadas ciudades y son de fácil acceso. El problema de estos mapas es que su resolución es gruesa y no permite realizar una buena estimación.

Uno de los problemas de estos mapas es el hecho de que muchas áreas dentro de una comuna no son

habitadas, ya sea porque existen cultivos, áreas naturales, parques, etc. De esta forma una densidad ficticia es aplicada a áreas donde la densidad es 0, y donde realmente vive la gente la densidad es subestimada.

Para solucionar este problema se propone usar información de uso de suelo de forma de descartar lugares en los cuales no vive gente y asignar densidad de población 0, repartiendo la densidad de población en lugares poblados. Para la creación de este nuevo mapa se usó la información de uso de suelo obtenido mediante interpretación imágenes satelitales del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile. Los usos de suelo considerados como habitables son: urbanización de alta y baja densidad, áreas industriales y de transporte (aeropuertos).

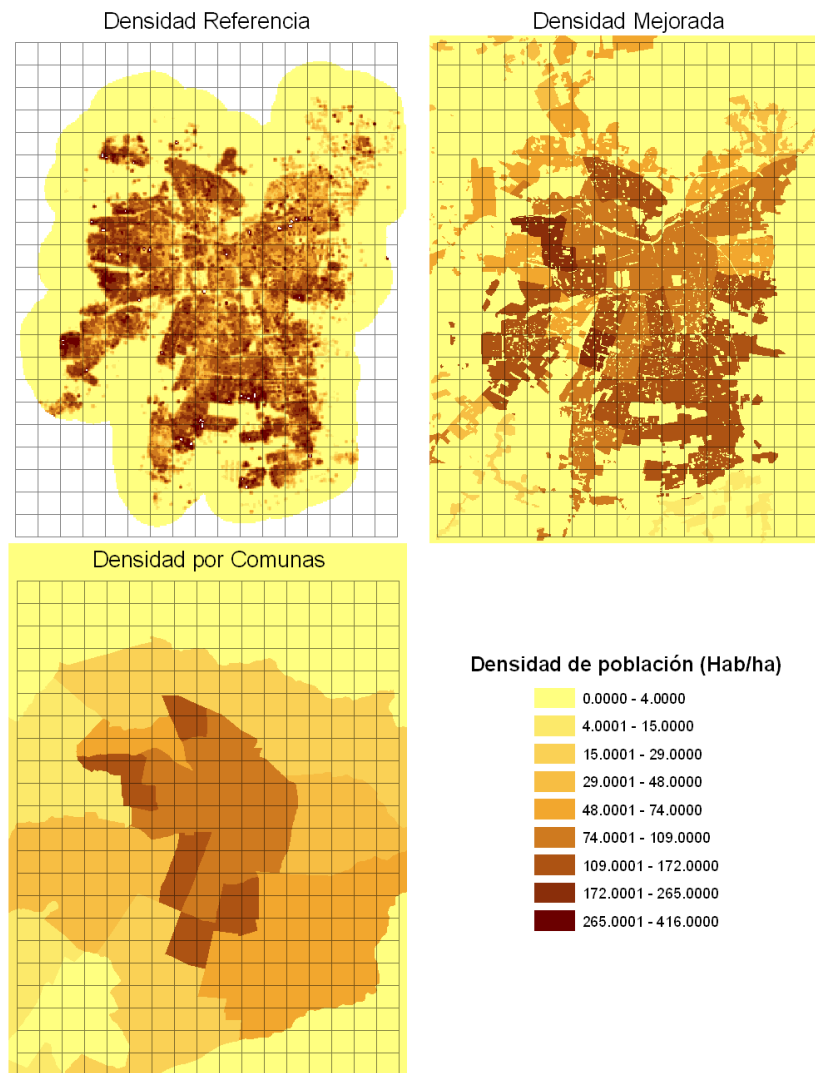


Figura 3.4: Mapas de densidades de población.

Para establecer si este nuevo mapa es una mejora con respecto al anterior se considerará el mapa de densidad de población de alta resolución como referencia para realizar comparaciones. El Caso N°1 corresponde a mapa mejorado y el N°2 al mapa de densidad por comunas. La metodología para realizar las comparaciones será la misma usada para inventarios, considerando la misma grilla de  $2 \times 2 \text{ km}^2$ . Los 3 mapas de densidad de población se pueden apreciar en la figura 3.4 y las figuras para realizar el análisis corresponden a la 3.5, 3.6 y 3.7.

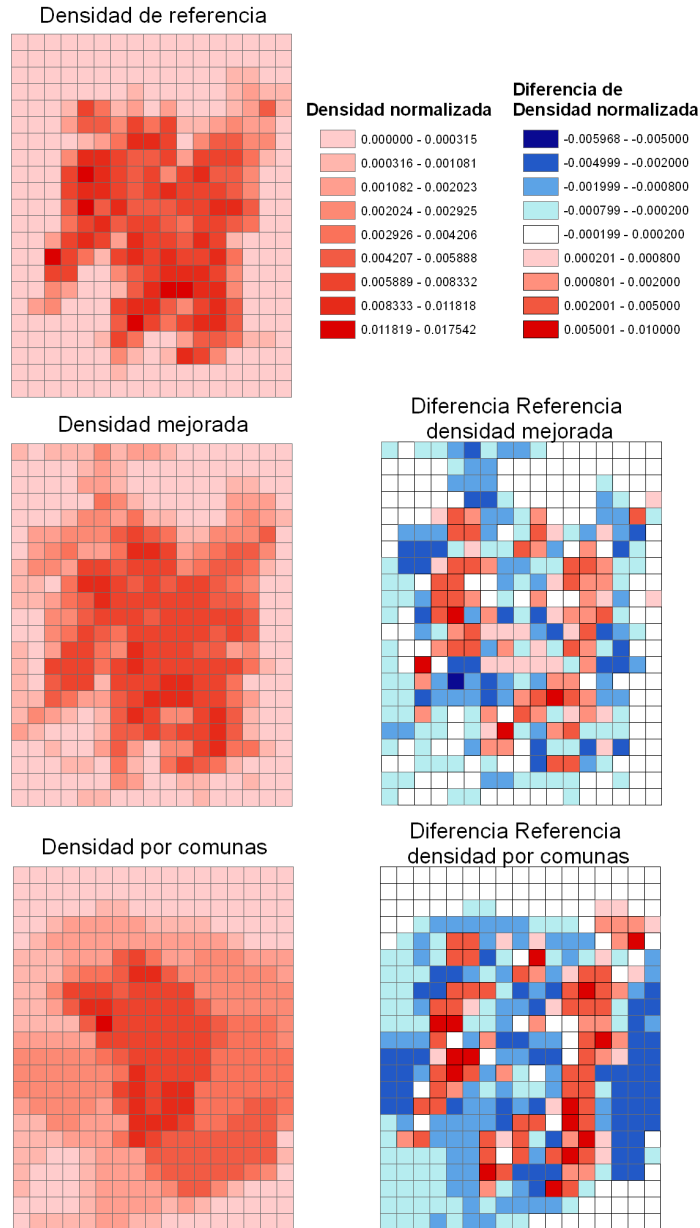


Figura 3.5: Mapas de densidades normalizadas y diferencias.

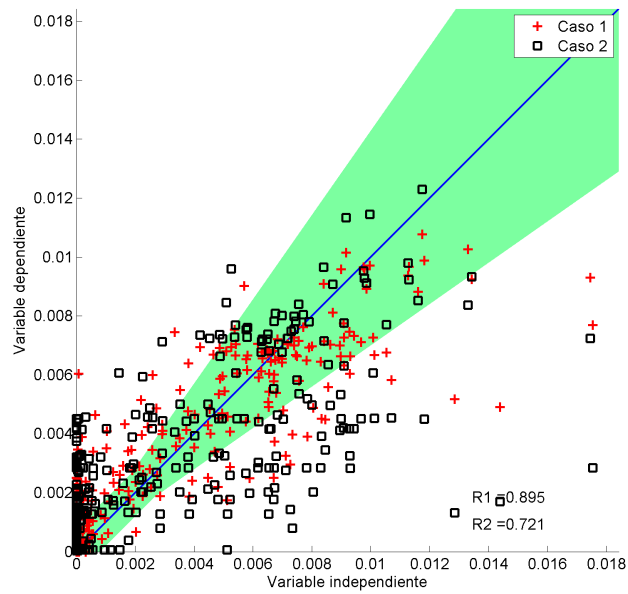


Figura 3.6: Gráfico de dispersión para el mapa mejorado (símbolos + rojos) y para la densidad por comunas (cuadrados negros).

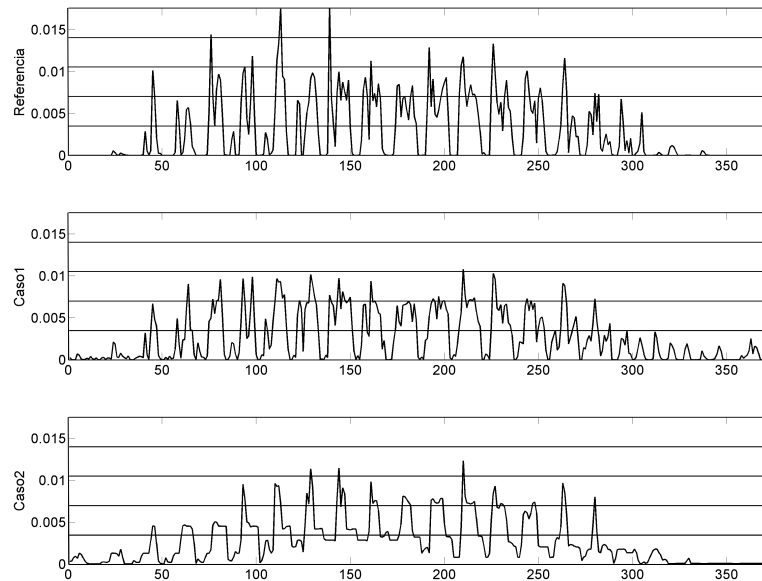


Figura 3.7: Series de escaneo de datos para los 3 mapas de densidad: referencia, mapa mejorado y densidad por comunas.

Tabla 3.1: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para el mapa mejorado y el mapa de densidad por comunas en relación al caso base.

	Densidad mejorada	Densidad por comunas
Coef Corr (R)	0,895	0,721
% Aceptación	59,09	39,84

Mediante el análisis de los mapas de densidades normalizadas y diferencias se puede ver que el mapa de densidad poblacional mejorado es similar en forma al mapa de referencia pero el mapa por comunas se aleja mostrando niveles más homogéneos. En los mapas de diferencias se puede ver que hay muchas celdas que mejoran observándose mayor cantidad de celdas blancas en el mapa de diferencias del mapa mejorado y menor cantidad de valores extremos.

En el gráfico de dispersión se aprecia que los puntos correspondientes al mapa mejorado tienden a agruparse más al centro, mientras que los correspondientes al mapa de comunas están más dispersos. En el gráfico de escaneo se puede apreciar que ninguno de los 2 mapas es capaz de representar los máximos de densidad, pero la serie correspondiente al mapa mejorado representa los mínimos de muy buena manera y la forma de la serie se asemeja a la serie de referencia más que la serie correspondiente al mapa de comunas.

Cuantitativamente, observando la tabla 3.1, se puede apreciar que el coeficiente de correlación y el % de aceptación mejoran para el nuevo mapa.

En resumen se puede decir que el mapa mejorado tiene una mayor similaridad con respecto a la referencia que mapa de comunas, obteniendo mejoras al utilizar todos los métodos de comparación.

### 3.3.1.2. Estimación de la red vial real

Para el presente trabajo se posee una red vial completa (llamada también red vial real) para la ciudad de Santiago, sin embargo, esta información no es de fácil acceso para las grandes ciudades.

La red vial principal representa parte de la red vial completa, pero no es suficiente para representar el detalle. Los mapas de densidad de población muestran donde vive la gente y cuan acumulada se encuentra, lo que está correlacionado directamente con los lugares donde hay calles y cuan acumuladas están éstas. Los mapas de urbanización también pueden ser usados para representar donde viven personas y por lo tanto donde existen calles.

De esta forma, como el resultado final que se usa para la estimación de la distribución espacial de las emisiones es una densidad de largo de calles dentro de una celda, mediante una combinación de la densidad de largo de la red principal y los mapas de urbanización o densidad de población se puede hacer una esti-

mación de la densidad de largo de la red vial completa. Ya que se posee el mapa de la red vial completa para Santiago se puede aplicar la metodología, comparar y buscar un óptimo. La metodología de comparación es la misma usada para comprar inventarios.

**Mapas por separado** Como primera aproximación, antes de combinar los distintos mapas, se puede aproximar la densidad de largo de arcos usando cada mapa por separado. Los resultados se muestran en las siguientes figuras en forma de gráficos de dispersión (figura 3.8), series de escaneo (figura 3.9) y coeficientes de correlación y porcentajes de aceptación (tabla 3.2).

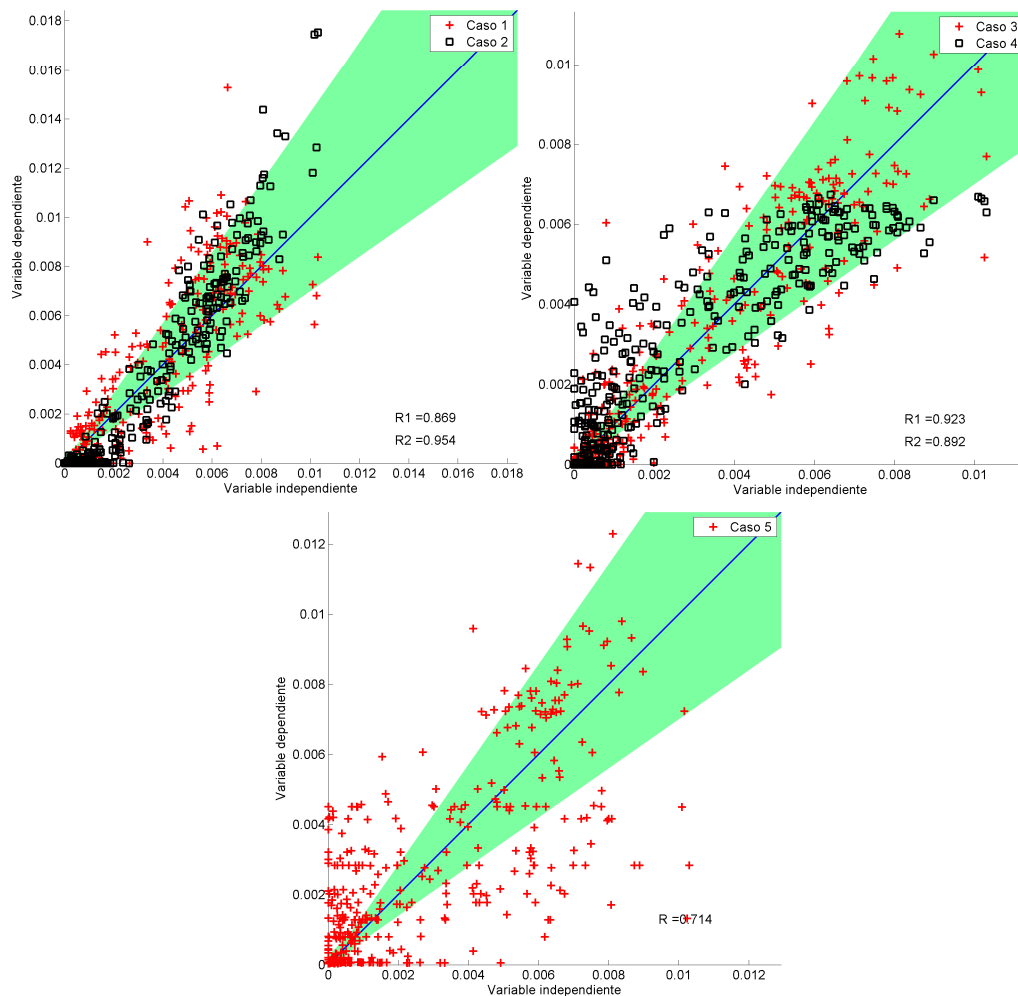


Figura 3.8: Gráfico de dispersión para los 5 casos de estimación de la red vial completa.



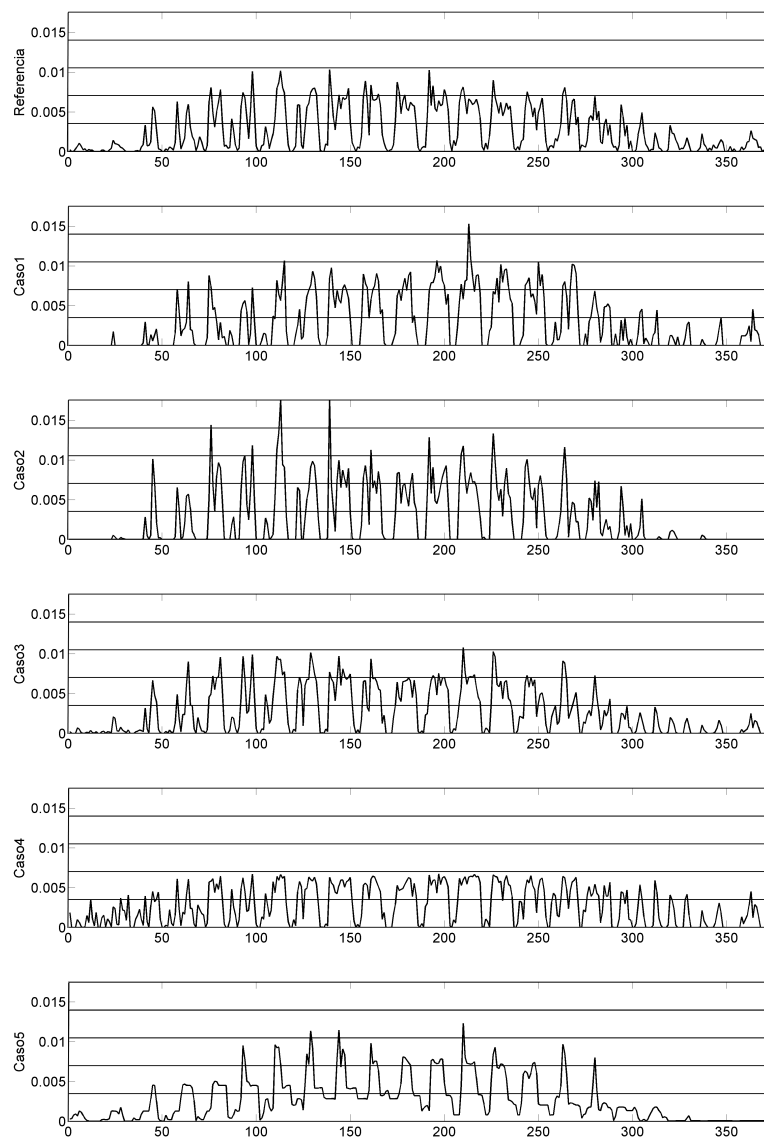


Figura 3.9: Series de escaneo de datos para el mapa de red vial completa y para los cinco casos.

Tabla 3.2: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 5 casos comparando con la red vial completa.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Coef Corr (R)	0,869	0,954	0,923	0,892	0,714
% Aceptación	44,39	51,07	61,76	57,49	38,77

Para todos los gráficos se enumeran los casos desde 1 a 5. Estos corresponden a:

- Caso 1: Estimación con la red vial principal
- Caso 2: Estimación con mapa de densidad de población de alta resolución.
- Caso 3: Estimación con mapa de densidad de población mejorado, obtenido en la sección 3.3.1.1.
- Caso 4: Estimación con mapa de urbanización, obtenido del mapa de uso de suelo del departamento de geografía. Este mapa sólo muestra donde es posible que viva gente. Es la base para la estimación del nuevo mapa de densidad hecha en la sección 3.3.1.1.
- Caso 5: Estimación con mapa de densidad de población por comunas.

De el escaneo de las series se ve que la serie de la referencia no presenta máximos muy pronunciados. Esta es la primera diferencia que se aprecia al comparar con las series de red vial principal(caso 1) y con las series de densidad de población de alta resolución (caso 2), las cuales sí tienen máximos pronunciados. Sin considerar estos máximos, los comportamientos son similares, lo cual se puede apreciar en el primer gráfico de dispersión.

Para la aproximación usando el mapa de densidad población mejorado (Caso N°3), en la serie de escaneo se aprecia un comportamiento muy similar, debido a que esta serie tampoco presenta máximos pronunciados. Sin embargo al ver su gráfico de dispersión (gráfico de la derecha, cruces rojas) se observa que sus puntos están un poco más dispersos que el caso de densidad de alta resolución.

Para la aproximación usando el mapa de urbanización (Caso N°4), observando el gráfico de dispersión (figura de la derecha, cuadrados negros) se ve que hay un umbral del cual los valores no cruzan, lo que significa que estos puntos están inmersos en una zona completamente rural. Esto también se aprecia en las serie de escaneo, donde el umbral es más claro. Sin embargo, el comportamiento es similar con el caso de referencia.

Finalmente, el caso de densidad de población por comunas (Caso N°5) es con el cual se obtienen peores resultados, con una serie que no es similar a la serie de referencia y un gráfico de dispersión con una gran cantidad puntos alejados de la diagonal.

Al observar la tabla de correlación y aceptación, se ve que todos los métodos que usan los mapas de densidad de población y urbanización (salvo el mapa por comunas) tienen mejor correlación y aceptación que el método de la red vial principal. El caso de uso de densidad por comunas está muy por debajo que los demás casos. La mejor correlación se obtiene con la densidad de alta resolución, sin embargo la mejor aceptación la tienen la densidad mejorada y el mapa de urbanización. Esto se debe a que estos 2 últimos mapas representan de mejor forma los valores pequeños que hacen aumentar el porcentaje de aceptación.

Como conclusión, para el caso de Santiago, se puede decir que a medida que se aumenta la calidad del mapa de densidad de población, la estimación de la red vial completa mejora (en términos de correlación). Al realizar la estimación con una red vial principal se pierden muchos lugares donde hay calles y la red principal no las representa, lo que tiende a sobre estimar los máximos y a no representar los valores pequeños. Se obtienen mejores resultados usando un mapa de urbanización que un mapa de densidad por comunas, pero si se mejora el mapa de densidad usando la metodología de la sección 3.3.1.1 con este nuevo mapa los resultados mejoran con respecto de sólo usar la información de urbanización.

**Combinación de mapas** Como la red vial principal da información de donde están las principales vías, y los mapas de urbanización y densidad de población dan información de donde vive gente, una combinación de ambos podría combinar ambos tipos de información para entregar un mejor mapa. Por esto en lo siguiente se ponderan ambos resultados para obtener la aproximación de la red vial completa. Para cada caso se muestran los resultados usando los factores óptimos de ponderación o cercanos al óptimo. La optimización es de 1 variable, debido a que los factores deben sumar 1. La variable elegida es el factor que multiplica a la red vial principal. La función objetivo corresponde al coeficiente de correlación. Los resultados de la optimización de la combinación de la red vial principal y los mapas de densidad y urbanización se pueden ver en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Factor óptimo a aplicar al mapa de la red vial principal para cada mapa de densidad y urbanización.

	Alta resolución	Mejorado	Urbanización	Comunas
factor optimo	0,324	0,316	0,343	0,721
Coef corr	0,972	0,942	0,917	0,885

De los resultados se puede decir que para todas las combinaciones es posible mejorar el coeficiente de correlación. Sin considerar los resultados con el mapa de densidad de población por comunas, se ve que los factores óptimos son muy similares, encontrándose entre 0,31 y 0,35. Para unificar criterios los análisis posteriores se realizarán con un factor 0,3. Luego se usará un peso de 0.7 para los mapas de densidad de población y urbanización y un peso de 0.3 para el mapa de la red vial principal. Los resultados de las combinaciones se muestran en las figuras 3.10, 3.11 y 3.12. Se mostraran sólo los resultados en los cuales el mapa de densidad y urbanización pesa más, o sea, se descartará la combinación de la red vial principal con

el mapa de densidad por comunas.

Para todos los gráficos se enumeran los casos desde 1 a 3. Estos corresponden a:

- Caso 1: Combinación entre la red vial principal y el mapa de densidad poblacional de alta densidad.
- Caso 2: Combinación entre la red vial principal y el mapa de densidad poblacional mejorado obtenido en la sección 3.3.1.1.
- Caso 3: Combinación entre la red vial principal y el mapa de urbanización obtenido a partir del mapa de uso de suelos del departamento de geografía de la Universidad de Chile.

De las figuras de mapas de densidad de largo de calles se puede observar que los 3 métodos siguen la estructura espacial del mapa de referencia. Resalta la diferencia entre la referencia y el caso 1 hacia los extremos del mapa, ya que debido a la concentración de la población y la red vial principal que es una simplificación, los caminos más alejados del centro urbano no son bien representados. En general, todos los mapas sobre estiman la densidad de largo de calle en el centro de Santiago. Una explicación de este fenómeno es que la red vial principal es mucho más detallada en el centro que fuera de este, aumentando la densidad de calles en estos lugares. Sin embargo, como el peso de la red vial principal es de 0,3 este efecto no es muy pronunciado.

Al analizar los gráficos de dispersión se pueden ver las mejoras con respecto a los gráficos de dispersión donde no se usa combinación de mapas. Para el Caso N°1 los valores altos encontrados en el caso de usar sólo la densidad de población de alta resolución son disminuidos gracias a la adición de la red vial principal obteniendo valores máximos más cercanos a la diagonal. Este fenómeno se puede ver también comparando las series de escaneo. En caso en el cual se usaba sólo la densidad de población mejorada, los datos eran más dispersos que cuando se añade la información de la red vial principal. Al comparar con el caso en el cual se usa sólo el mapa de urbanización, se ve que el umbral que existía previamente se ve atenuado mejorando la estimación, lo que también se ve representado en las series de escaneo.

Al analizar la información de la tabla 3.4 hay que notar que el coeficiente de correlación no sufre modificaciones en los 3 primeros decimales al comparar con los factores óptimos de la tabla 3.2. Luego se puede decir que el coeficiente de correlación es poco sensible a cambios del factor cerca del óptimo, de esta forma si se ocupa un factor cercano al máximo se siguen obteniendo buenos resultados. Al comparar los porcentajes de aceptación, se puede apreciar que al agregar la información de la red vial principal a los mapas de densidad o urbanización el porcentaje mejora o permanece igual.



Figura 3.10: Mapas de densidad de largo de calles normalizadas y diferencias con respecto a la referencia.

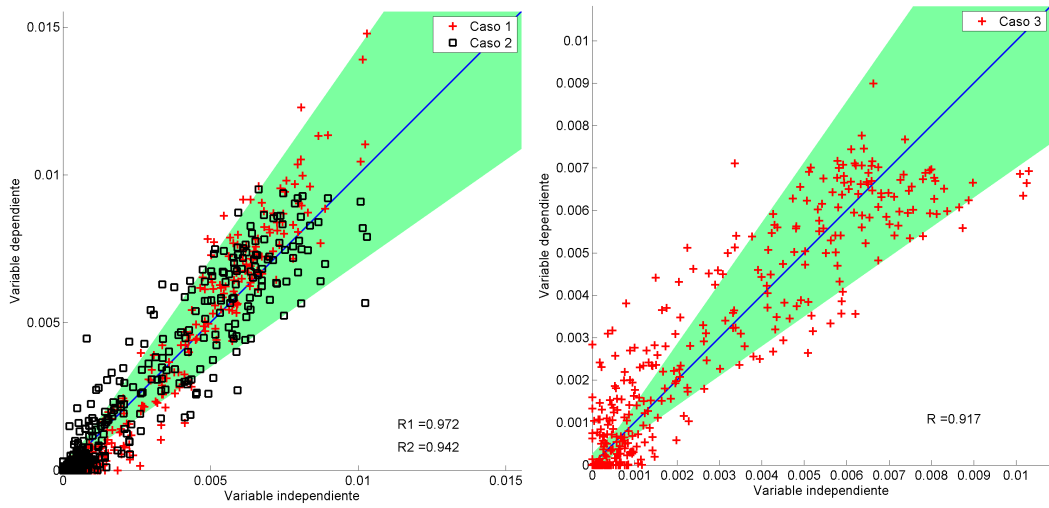


Figura 3.11: Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación de la red vial completa usando una combinación de mapas de red vial principal y densidad de población o urbanización.

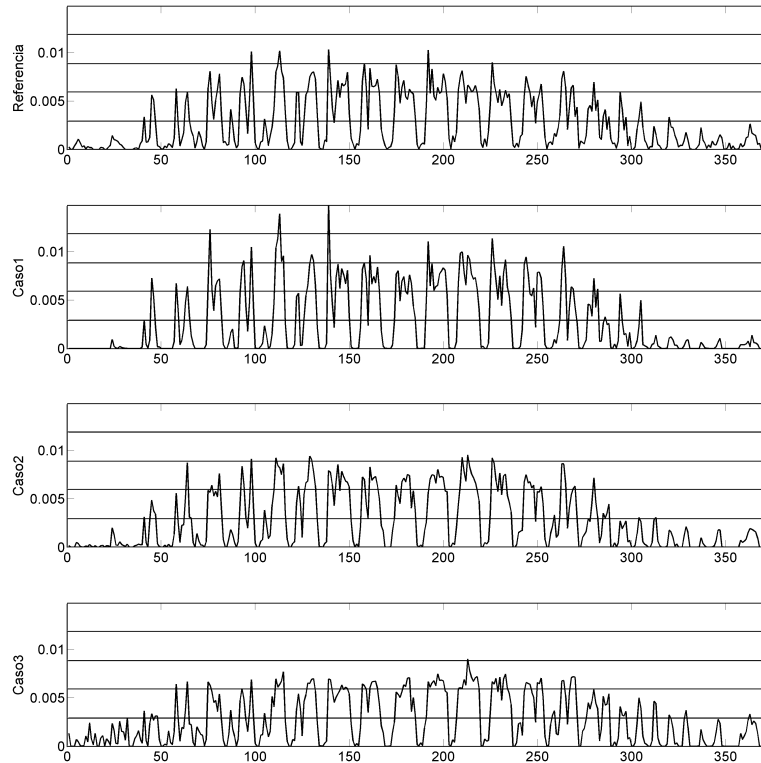


Figura 3.12: Series de escaneo de datos para el mapa de red vial completa y para los tres casos usando combinación de mapas de red vial principal y densidad de población o urbanización.

Tabla 3.4: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con la red vial completa.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,972	0,942	0,917
% Aceptación	62,03	65,78	57,49

Como conclusión se puede decir que el mapa de la red vial principal y mapas de densidad y urbanización poseen distinto tipo de información, que al combinarlas pueden crear una mejor aproximación de un mapa de la red vial completa. El factor de peso usado para realizar la combinación determina la calidad del resultado, sin embargo este factor es poco sensible alrededor del máximo. Para la estimación de la densidad de calles de la red vial completa se obtienen buenos resultados usando un mapa de urbanización, pero este resultado puede ser mejorado agregando información sobre densidad de población siguiendo la metodología descrita en 3.3.1.1 o un mapa de densidad de población más detallado.

### 3.3.2. Resultados usando como referencia inventario Oficial de CO

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al aplicar las metodologías de estimación de la distribución espacial de las emisiones descritas en la sección 3.2.2. En esta sección las comparaciones serán realizadas usando como referencia el inventario oficial CONAMA 2002 de fuentes móviles. Los resultados se encuentran agrupados según similaridad para facilitar comparaciones con el caso de referencia y entre las metodologías.

#### 3.3.2.1. Usando densidad de largo de red vial

En esta sección se encuentran los resultados de distribuir las emisiones espacialmente según la suma de las longitudes de una red vial dentro de la celda, lo que también es llamado densidad de largo de la red vial (ver sección 3.1.1). Para esto se aplican 3 casos:

- Caso 1: Distribuir según la densidad de calles de la red vial principal (arcos ESTRAUS).
- Caso 2: Distribuir según la densidad de calles de la red vial Completa.
- Caso 3: Una combinación ponderada de las densidades de calle del caso 1 y 2.

Una pregunta importante a responder es con qué factor se va a ponderar la red vial principal y la red vial completa para la metodología combinada. Una opción es realizar una optimización para el coeficiente de correlación tomando como referencia el inventario oficial de fuentes móviles de la CONAMA, usando la misma metodología usada en la sección 3.3.1.2. Al realizar este ejercicio se obtiene que el factor óptimo equivale a ocupar sólo la red vial principal (factor 0 para la red vial completa). Este fenómeno tiene una simple explicación. El inventario CONAMA oficial para el año 2002 fue construido usando la metodología MODEM, que como se dijo previamente ocupa la red vial ESTRAUS (red vial principal). Luego las emisiones se encuentran relacionadas sólo a estos arcos. Este es una de las simplificaciones de la metodología MODEM cometiendo un error al no distribuir emisiones sobre las vías que no son consideradas principales. De esta forma, las emisiones del inventario del 2002 siempre van a estar mejor correlacionadas con la red vial principal, por el sólo hecho de que de esta manera se construyó el inventario.

Luego no es recomendable realizar una optimización con el inventario de referencia para encontrar los factores que permiten construir la metodología combinada. Otra metodología es propuesta en este trabajo. Consiste en usar datos de mediciones de flujo reales en distintos tipos de calles (alto flujo, bajo flujo), con el fin de buscar el peso en términos de flujo y largo de calle de la red principal versus las calles restantes.

El primer paso es seleccionar cuales calles van a ser consideradas como de flujo bajo, o secundarias. Para esto se comparan los nombres de las calles en las cuales son realizadas las mediciones con los nombres de los



arcos de la red ESTRAUS, que es la red principal. Luego se seleccionan los puntos de mediciones como de bajo flujo los que no aparecen en la red vial ESTRAUS. Sobre estas calles de bajo flujo se hace una selección al azar para calcular el flujo medio para calles secundarias. Para los puntos de medición cuyas calles existen en la red ESTRAUSS, se selecciona otra muestra al azar para calcular el flujo medio de la red principal. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la tabla 3.5.

El flujo no es el único indicador que representa a las emisiones. Si se aplicara directamente la relación de flujos entre la red principal y la secundaria no se estaría tomando en cuenta que existen muchas más calles secundarias que principales. Para tomar este factor en cuenta se suman los largos de todas las calles, para la red vial principal y la red vial completa. Restando estos 2 valores se obtiene el largo para la red vial secundaria. Estos valores se pueden visualizar en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Flujos medios en las calles y Longitud total de la red para las redes viales principal y secundaria.

	Flujo medio [veh/hr]	Longitud red [m]	Peso final
Red Secundaria	12,21	8772548	0,11
Red Principal	248,51	3347896	0,89

Como se puede apreciar en la fórmula de cálculo de emisiones con la metodología MODEM (ver anexo C.1) y como será mostrado en las siguientes secciones, los flujos multiplicados por los largos de calles están altamente correlacionados con las emisiones vehiculares. Luego la metodología propuesta para determinar el factor a aplicar en la combinación de la red vial principal y la red vial completa es multiplicar los valores medios de los flujos con las longitudes totales y normalizar estos valores para que la suma sea 1. Los factores finales encontrados se muestran en la tabla 3.5.

La metodología usada ocupa muchos supuestos y generaliza muchos aspectos, pero debido a que este trabajo consiste en crear metodologías simples está dentro del contexto. En Tuia et al 2006 el factor usado para la red vial principal es 0.9, lo que es muy cercano a lo encontrado mediante esta metodología.

Como ya fue mencionado previamente, para el presente trabajo no se posee un red vial secundaria, sólo una red vial principal. Por esto se ocupará la red vial completa como una aproximación de la red vial secundaria.

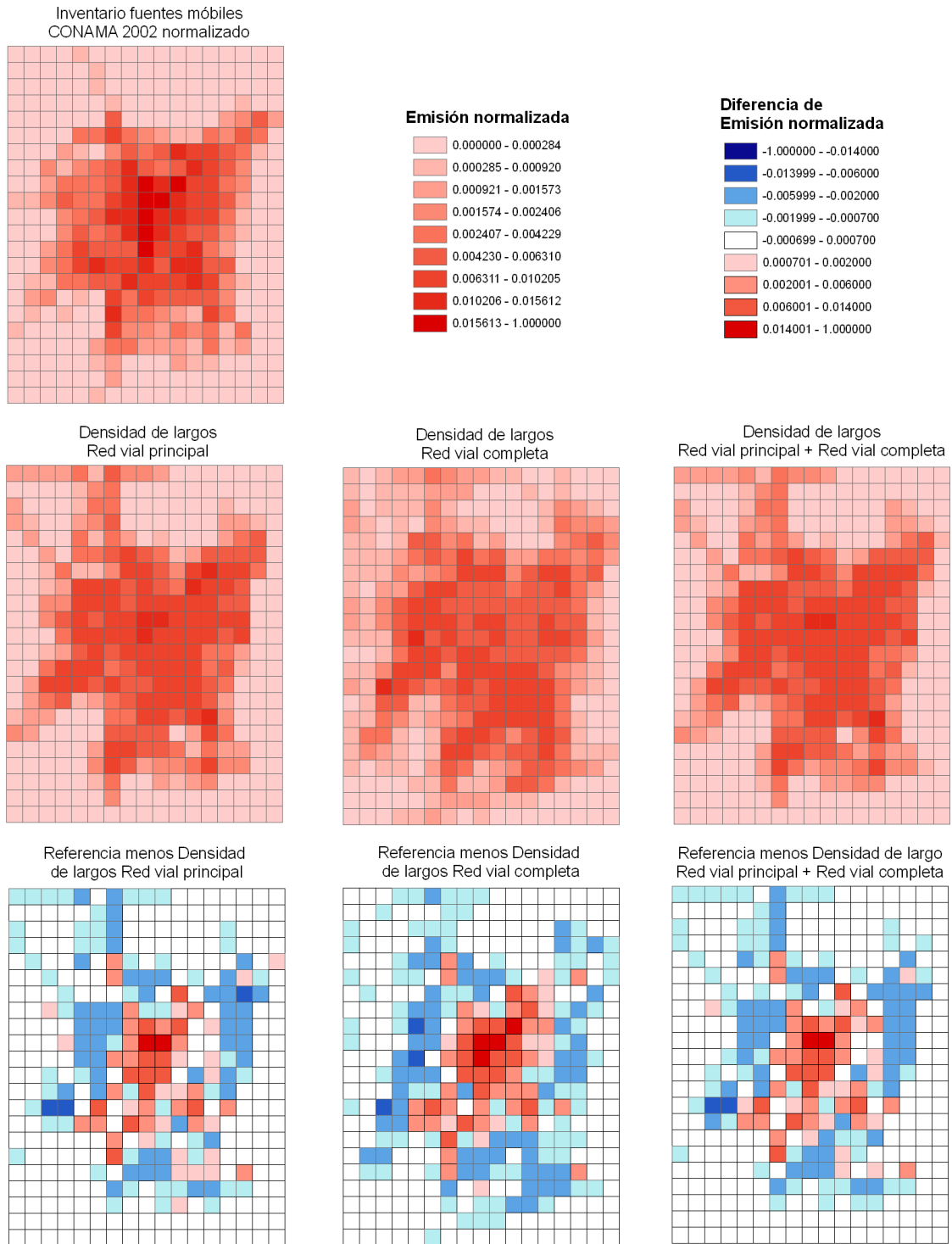


Figura 3.13: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

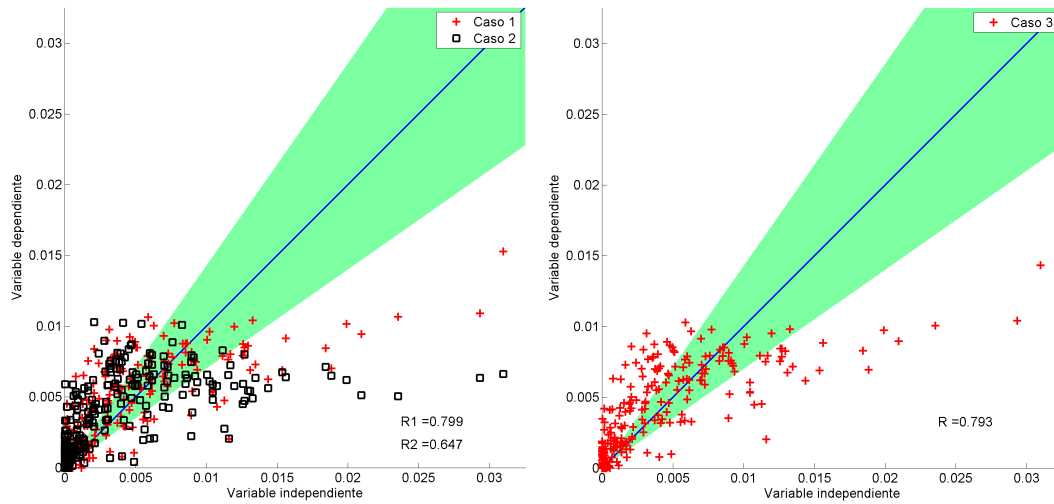


Figura 3.14: Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando densidades de largo de calles.

Tabla 3.6: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,799	0,647	0,794
% Aceptación	55,35	35,56	55,88

Analizando las figuras de mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia, se puede ver que los 3 casos representan de manera similar a la referencia. La estimación utilizando la red vial completa posee valores más dispersos hacia los extremos del mapa, debido a que estas calles no son representadas en la red vial principal (ESTARUS), y por consecuencia tampoco en el inventario de fuentes móviles de CONAMA. Al comparar la metodología que ocupa la red vial principal con la referencia se observan diferencias en la parte norte. Lo que ocurre es que hay arcos de la red ESTRAUS ocupada que no se ven representados en la referencia. El inventario CONAMA fue construido para toda la región metropolitana, y no sólo para la ciudad de Santiago. Luego la red vial ESTRAUS ocupada en el cálculo del inventario CONAMA no es exactamente la misma que la ocupada en este estudio. Esto podría ser la razón por la cual se ven diferencias correspondientes a los arcos de accesos principales o carreteras.

En los gráficos de diferencia se aprecia una subestimación de las emisiones en el centro de la ciudad que se traduce en valores de diferencia de mayor magnitud en esta zona, lo que ocurre para los 3 casos. Este fenómeno es el mismo descrito en Tuia et al 2006 y Ossés et al 2007, debido a los grandes flujos y bajas velocidades en los centros urbanos. A pesar de que en esta zona la red vial se hace más densa, no capaz de representar el gran incremento de las emisiones. Otro fenómeno descrito es Ossés et al 2007 es el

correspondiente a la subestimación en la zonas industriales. Para esto se construyó la figura 3.16, en donde se muestra la red ESTRAUS y las áreas industriales según el mapa de uso de suelo del Departamento de Geografía. 2 zonas industriales fueron encerradas por una elipse, donde se puede ver la ocurrencia de este fenómeno, sin embargo este problema no se encuentra en la totalidad de las zonas industriales. Otro problema descrito en Tuia et al 2006 y Ossés et al 2007 es la subestimación de las emisiones en zonas que tienen sólo un arco conector de alto flujo, que es lo que es representado en “C” en la figura 3.16.

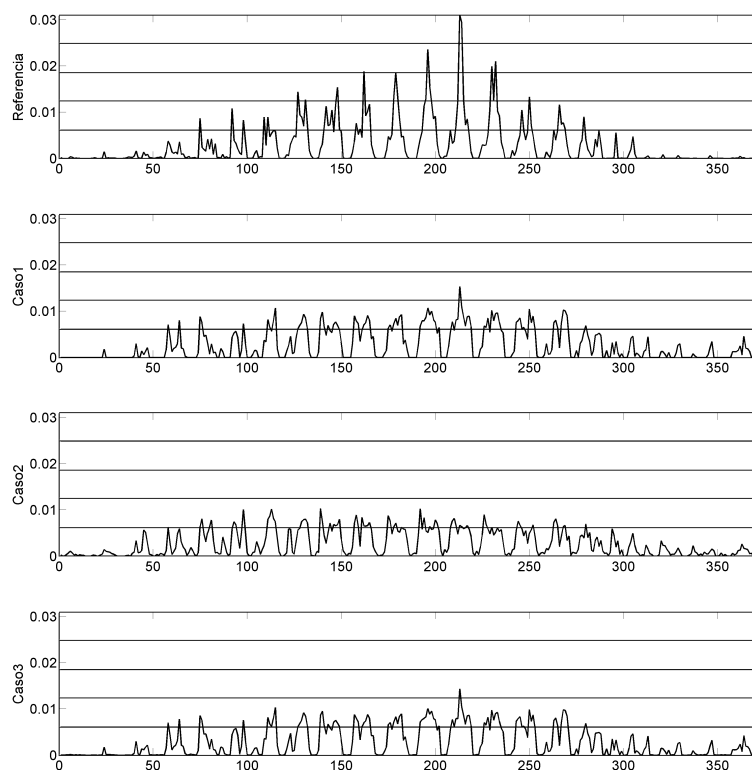


Figura 3.15: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando densidades de largo de calles.

En las zonas que son principalmente residenciales, como por ejemplo el noreste y noroeste de la ciudad (zona urbana) se ve una sobrestimación de las emisiones, debido a que en estas zonas existe una alta densidad de calles, pero con flujos vehiculares pequeños.

Al comparar las metodologías de uso de 1 mapa (casos 1 y 2) con la combinada, se ve que esta última tiene una gran similitud con la metodología que usa sólo la red vial principal. Esto se debe a que el factor de ponderación para la red vial principal es alto dando bajo peso a la red vial completa.

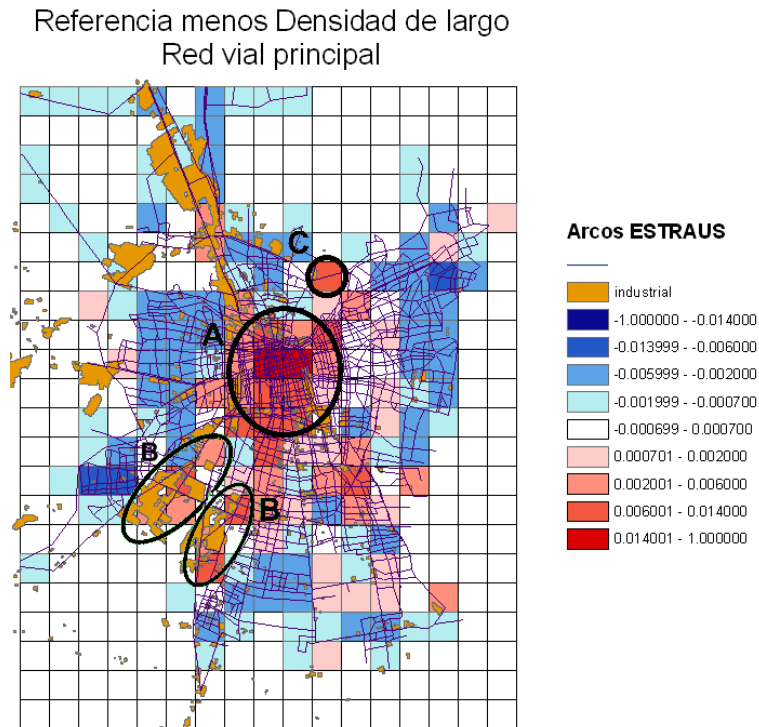


Figura 3.16: Mapa de diferencia para el caso 1, con información de las zonas industriales obtenida de el mapa de uso de suelos del departamento de geografía y la red vial ESTR AUS. A es un ejemplo de zona industrial, B el centro de la ciudad y C un arco conector de gran flujo (Americo Vesputio, sector la pirámide).

Al analizar los gráficos de dispersión que se encuentran en la figura 3.14, se ve un umbral para ambas metodologías, más alto para la metodología que usa la red vial principal. Esto se debe al mismo fenómeno explicado previamente sobre la imposibilidad de representar los flujos altos de la zona central y zonas industriales. La red vial principal tiene un umbral más alto debido a que esta red es más detallada en el centro de Santiago que en los alrededores, obteniéndose una densidad de calles mayor en esta zona, lo que reproduce de alguna manera los máximos en el centro de la ciudad. El gráfico de la metodología combinada (Caso 3) es muy similar al Caso 1, como ya fue explicado previamente.

Al analizar las series de escaneo, se aprecia la magnitud de la diferencia entre los peaks de emisión del inventario y su representación por cada metodología. Los máximos principales superan por aproximadamente el doble a lo que es obtenido con las metodologías. Este es un gran problema de la metodología, ya que se comete un gran error. Fuera de los máximos el comportamiento de las series es similar.

Al analizar la tabla 3.6 de correlación y aceptación, se ve la gran correlación que existe entre la densidad de calles de la red vial principal y inventario de emisiones, lo que fue explicado al inicio de esta sección debido a la construcción del inventario. La correlación y el porcentaje de aceptación decrecen al usar la

red vial completa. Para el caso de la combinación de ambas redes (Caso 3) la correlación y el porcentaje de aceptación se ven levemente afectados. La Correlación obtenida al usar la metodología de la red vial completa podría ser comparada con los resultados mostrados en Ossés 2007 para el coeficiente de correlación de las distintas ciudades para el contaminante CO. Sin embargo, existen algunas diferencias que dificultan esta comparación. Primero, el tamaño de grilla usado en ambos estudios es distinto, ya que en Ossés et al 2007 es de  $1 \times 1 \text{ km}^2$ , mientras que para el presente trabajo es de  $2 \times 2 \text{ km}^2$ . Además, en Ossés et al 2007 se descartan celdas que son consideradas como erróneas, mientras que en el presente trabajo todas las celdas son consideradas. Otra diferencia es que para el cálculo del coeficiente de correlación, en Ossés et al 2007 se consideran sólo las grillas donde existen arcos o calles, en cambio como en este estudio se tiene el inventario oficial que es para una grilla rectangular que abarca toda el área de la ciudad, para el cálculo del coeficiente de correlación se usan celdas que no contienen arcos.

### 3.3.2.2. Usando métodos indirectos

Se les llama métodos indirectos a las metodologías que no usan redes viales para la estimación de la distribución espacial del inventario. La metodología usada se encuentra descrita en la sección 3.1.1. Para la estimación se usarán 3 mapas, que son los siguientes:

- Caso 1: Mapa de densidad de población de alta resolución.
- Caso 2: Mapa de densidad de población mejorado.
- Caso 3: Mapa de urbanización del departamento de geografía de la Universidad de Chile.

No se usará el mapa de densidad de población por comunas ya que no es capaz de representar la red vial de Santiago, lo que se puede apreciar en la sección 3.3.1.2.

Al analizar los mapas de emisión normalizada con respecto a la referencia se puede ver que los valores de la metodología que usa la densidad de población de alta resolución están centrados en la ciudad, al igual la referencia, salvo las carreteras que conectan con la ciudad. En las otras 2 metodologías esto no ocurre, obteniéndose valores un poco más altos en las afueras de la ciudad.

En los mapas de diferencias con respecto a la referencia se aprecia que los 3 mapas tienen un comportamiento similar en el centro de la ciudad, obteniéndose la subestimación de las emisiones antes dicha. Sin embargo, se ve que el mapa de densidad de alta resolución, en las zonas que sobrestima lo hace con una magnitud mayor que los otros 2 mapas, alejándose del inventario. Este fenómeno se ve más claramente en los mapas de dispersión y en las series de escaneo, donde en esta metodología se asocia alta emisión a lugares donde se tiene una densidad de población muy alta, lo que es errado.

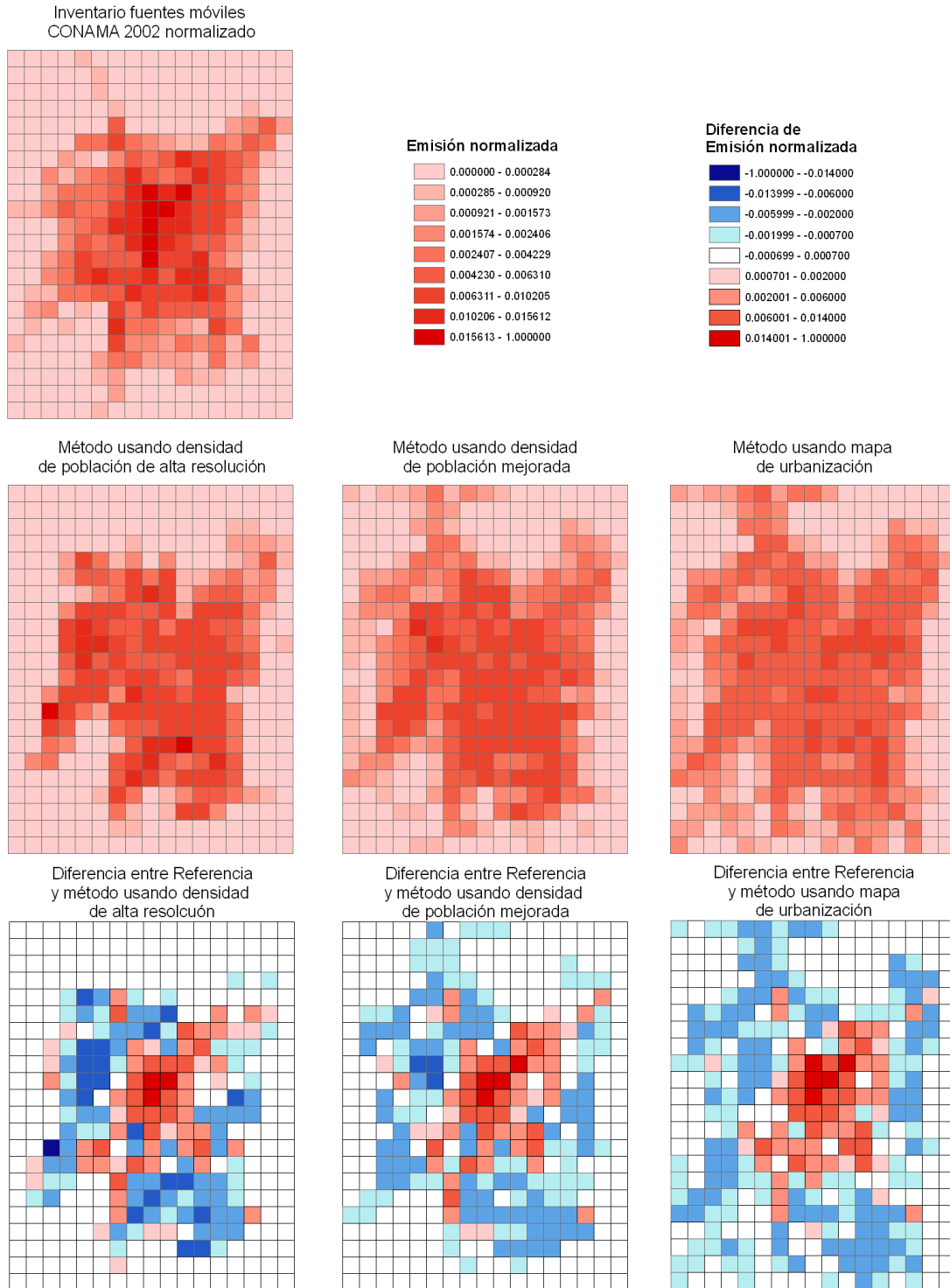


Figura 3.17: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

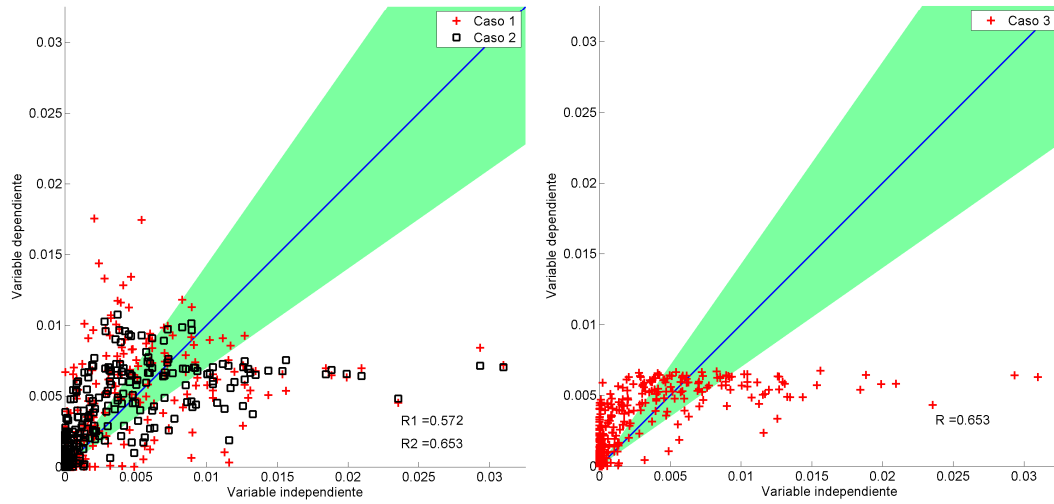


Figura 3.18: Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando densidades de población y mapas de urbanización.

Tabla 3.7: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,572	0,653	0,653
% Aceptación	52,94	44,39	40,11

Debido a que el mapa de densidad de población mejorado no muestra valores altos de densidad de población por tener una menor resolución (al contrario de lo que ocurre en el de alta resolución), esto lo hace seguir un comportamiento más plano con un umbral, tal como se había observado en la estimación usando la red vial completa, no equivocándose en lo máximos como ocurre para el caso N°1. La metodología de uso del mapa de urbanización tiene el mismo comportamiento de umbral, pero con la magnitud del umbral más baja. De esta forma se puede decir que al usar sólo mapas de densidad de población, el mapa de mejor resolución no necesariamente va a entregar los mejores resultados.



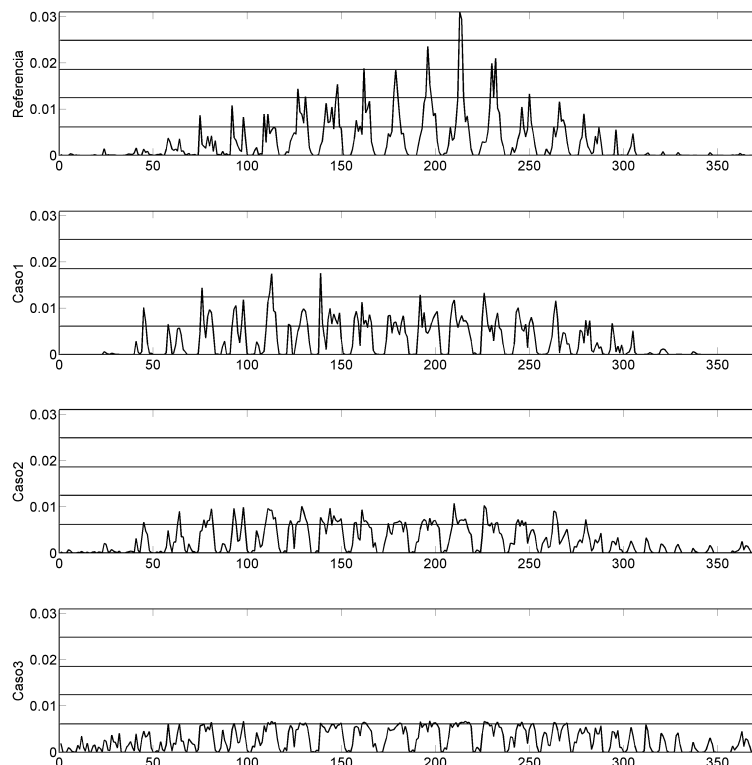


Figura 3.19: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando densidades de población y mapas de urbanización.

Al analizar los valores de la tabla 3.7, se puede ver que los casos 2 y 3 tienen correlaciones más altas que el Caso N°1 (mapa de densidad de alta resolución). Esto se debe principalmente a que el Caso N°1 muestra valores máximos muy lejos de la referencia. Recordemos que el coeficiente de correlación es sensible a valores extremos. Sin embargo, se observa que el Caso N°1 tiene un mejor porcentaje de aceptación que los Casos N°2 y 3, debido a que el mapa de densidad de alta resolución es capaz de reproducir las emisiones de baja magnitud que se encuentran en las afueras de la ciudad.

Se pueden comparar los valores de correlación y aceptación de las metodologías de uso de la densidad mejorada y urbanización con los obtenidos en la sección anterior, ocupando la metodología de la red vial completa. Se puede ver que se obtienen resultados muy similares. Esto se debe a la buena representatividad de la red completa de los mapas de densidad y urbanización (sección 3.3.1.2).

### 3.3.2.3. Usando combinación de densidad de largo de red vial y métodos indirectos

Usando los mapas de densidad de largo de la red vial completa obtenidos en la sección 3.3.1.2 se puede repetir la metodología de usar una combinación de la red vial principal y la red vial completa pero usando esta aproximación para la red vial completa.

Como los mejores resultados de la aproximación de la red vial completa fueron obtenidos con una combinación lineal entre la red vial principal y un mapa de densidad de población o de urbanización, entonces estos serán los mapas utilizados para reemplazar a la red vial completa. De esta forma la metodología para estimar la distribución espacial de las emisiones aplicada en esta sección sigue siendo una combinación de estos 2, pero con factores distintos. El factor para la aproximación de la red vial completa será el mismo que el usado en la sección 3.3.2.1, que representa el peso de la red vial completa como una aproximación de la red vial secundaria. Por otro lado, las metodologías de aproximación de la red vial completa serán las obtenidas en la sección 3.3.1.2 usando los factores aquí obtenidos. Debido a que en esa última parte los valores de ponderación fueron 0.3 para la red vial completa y 0.7 para mapas de densidad o urbanización, luego el factor final a aplicar para la red vial completa es  $0.92 (= 0,89 + 0,11 * 0,3)$  y  $0.08 (= 0,11 * 0,7)$  para los mapas de densidad de población y urbanización.

Los resultados se encuentran en las figuras 3.20 y 3.21 y en la tabla 3.8. Los casos analizados son los siguientes:

- Caso N°1: Red vial principal y densidad de población de alta resolución.
- Caso N°2: Red vial principal y densidad de población mejorada, obtenida en la sección 3.3.1.1.
- Caso N°3: Red vial principal y mapa de urbanización del departamento de geografía de la Universidad de Chile.

Todos los mapas de emisión normalizada y diferencias de la presente sección tienen gran similitud con el Caso N°3 de la sección 3.3.2.1 (combinación de red vial principal y completa) por lo cual estos mapas no serán mostrados y se debe usar como referencia el caso antes mencionado.

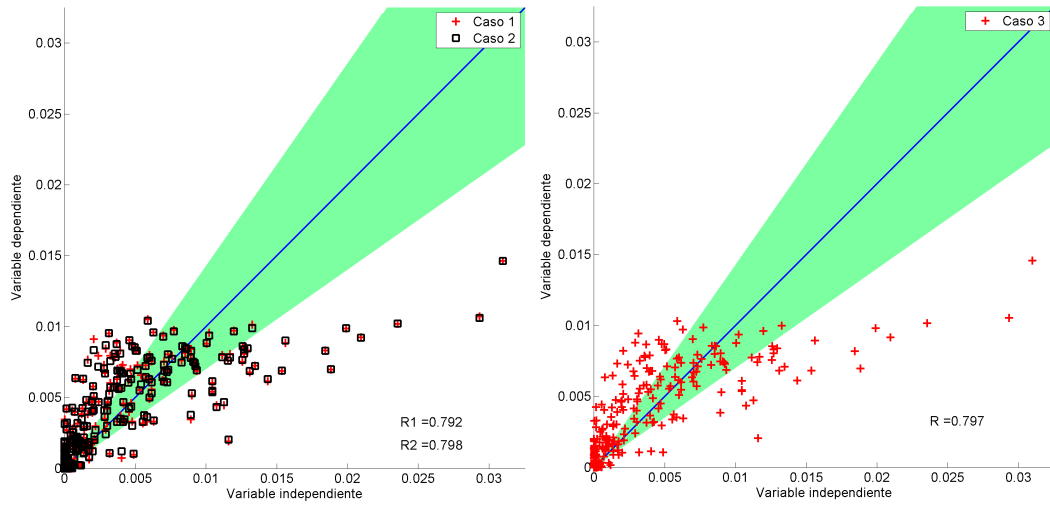


Figura 3.20: Gráfico de dispersión para los 3 casos de estimación del inventario de fuentes móviles usando la red vial completa en combinación con mapas de densidad de población y urbanización.

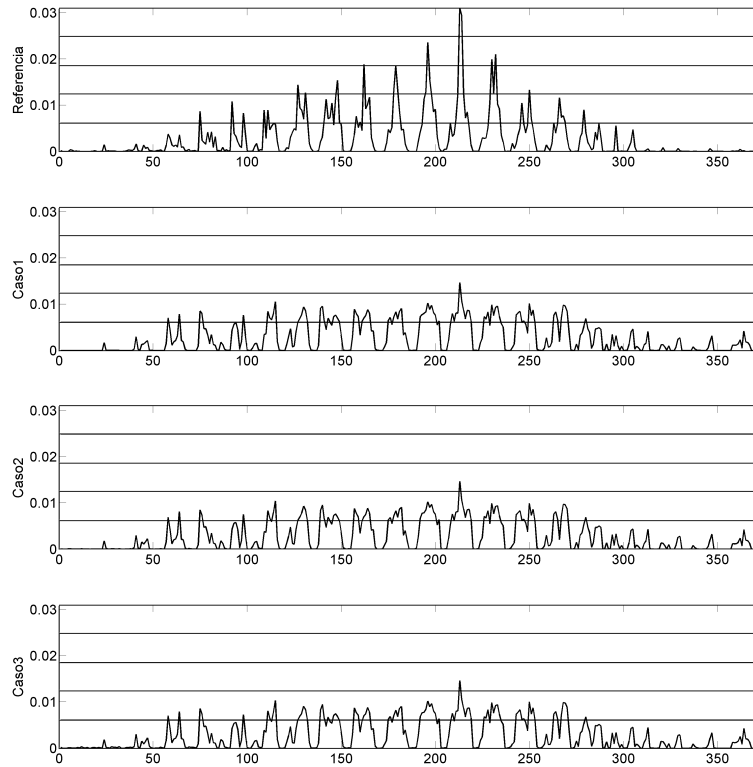


Figura 3.21: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y los 3 casos de estimación usando la red vial principal en combinación con mapas de densidad de población y urbanización.

Tabla 3.8: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para los 3 casos comparando con el inventario de referencia.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,792	0,798	0,797
% Aceptación	56,15	56,68	56,68

Mediante el análisis de las figuras y la tabla de correlación y porcentaje de aceptación se observa que se obtienen resultados similares con los 3 casos, debido a que el peso sobre el mapa de densidad de población o urbanización es muy bajo. Al comparar los resultados con los obtenidos para el Caso N°3 de la sección 3.3.2.1 se pueden observar grandes similitudes.

Como conclusión, se puede decir que cuando el peso aplicado a la red vial completa es bajo, entonces no existen grandes diferencias en la estimación espacial de las emisiones al ocupar la red vial completa o una estimación de esta usando mapas de densidad de población o urbanización. De esta forma, no es necesario poseer la red vial completa, ya que con una simplificación como la aplicada en este trabajo es suficiente. Además, la decisión de qué mapa ocupar (densidad de población de alta resolución, densidad mejorada o urbanización) no es muy importante, ya que se llega a resultados similares. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el factor aplicado depende la cuan compleja es la red vial principal, luego este punto debe ser analizado para cada estudio en particular, ya que, como se vio en secciones previas, existen grandes diferencias al aplicar un mapa de densidad de población de alta resolución, un mapa de densidad mejorado o un mapa de urbanización.

#### 3.3.2.4. Usando mapas de densidad de población ponderados por factores socio-económicos

Un problema al correlacionar directamente la densidad de población con la distribución espacial de las emisiones es que no necesariamente lugares donde hay mayor cantidad de personas significa que haya mayor cantidad de vehículos. Las emisiones de CO provienen principalmente de vehículos particulares, luego zonas con mayor nivel socio-económico van a tener mayor acceso a vehículos particulares, por lo cual la emisión por individuo en esta zona aumenta. En cambio, en las zonas de menor nivel social, al tener menor acceso a un vehículo privado aumenta el uso del transporte público, disminuyendo la emisión por individuo.

Por estas razones la metodología propuesta en esta sección consiste en ponderar ambos factores, la densidad de población y su condición social. Para esto se utiliza la siguiente metodología:

$$E_j = \frac{\rho_j \cdot NSE_j \cdot a_j}{\sum_j \rho_j \cdot NSE_j \cdot a_j} \quad (3.10)$$

Donde  $E_j$  es la emisión normalizada en la zona  $j$ ,  $\rho_j$  la densidad de población en la zona  $j$ ,  $NSE_j$  el nivel

socio-económico en la zona  $j$  y  $a_j$  el área de la zona  $j$ . Para obtener la emisión dentro de una celda, se suman los  $E_j$  pertenecientes a cada celda.

Los niveles socio-económicos a usar son numéricos, luego se pueden multiplicar directamente. El problema es que para que la metodología funcione el valor nivel socio-económico debe aumentar si aumenta el nivel socio-económico, lo que no es siempre de esta manera. Además, para que la metodología funcione los valores numéricos de el nivel socio-económico deben ser positivos. Existen 3 índices que tienen estos problemas, que son la Prioridad Social, el índice de indigencia y el índice de pobreza. Para poder ocupar estos índices se les cambia el signo para que crezcan a medida que aumenta el nivel socio-económico y luego se les suma el mínimo para obtener sólo valores positivos.

El mapa de densidad de población a usar es el mejorado según la sección 3.3.1.1, ya que con este mapa se obtienen los mejores resultados de estimación de las distribución espacial de las emisiones usando sólo métodos indirectos (3.3.2.2). Debido a la gran cantidad de índices socio-económicos los mapas de emisión normalizada y de diferencia presentadas serán para 2 índices y para el caso base de de uso de solamente densidad de población (figura 3.22). En la tabla 3.9 y en las figuras de series de escaneo (figura 3.24) y gráficos de dispersión (figura 3.23) se presentan los resultados para todos los índices.

Los casos están enumerados de la siguiente manera:

- Caso N°1: Usando densidad de población mejorada.
- Caso N°2: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Índice de Calidad de la Educación.
- Caso N°3: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Índice de Calidad de vida.
- Caso N°4: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Índice de Desarrollo Humano.
- Caso N°5: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Índice de Prioridad social modificado según lo explicado previamente.
- Caso N°6: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Porcentaje de Población en condición de Indigencia modificado según lo explicado previamente.
- Caso N°7: Usando densidad de población mejorada multiplicado por el Porcentaje de Población en condición de Pobreza modificado según lo explicado previamente.

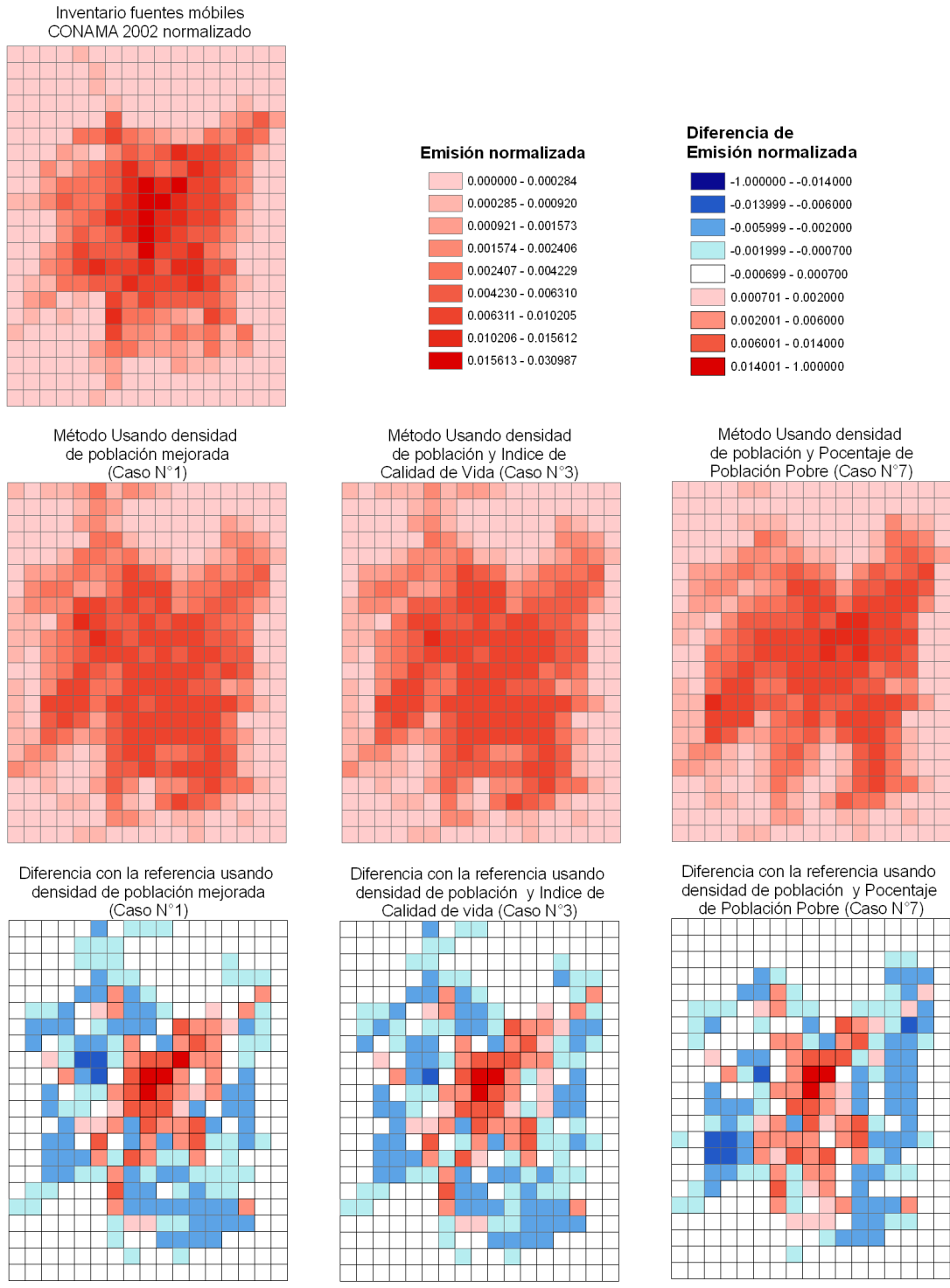


Figura 3.22: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

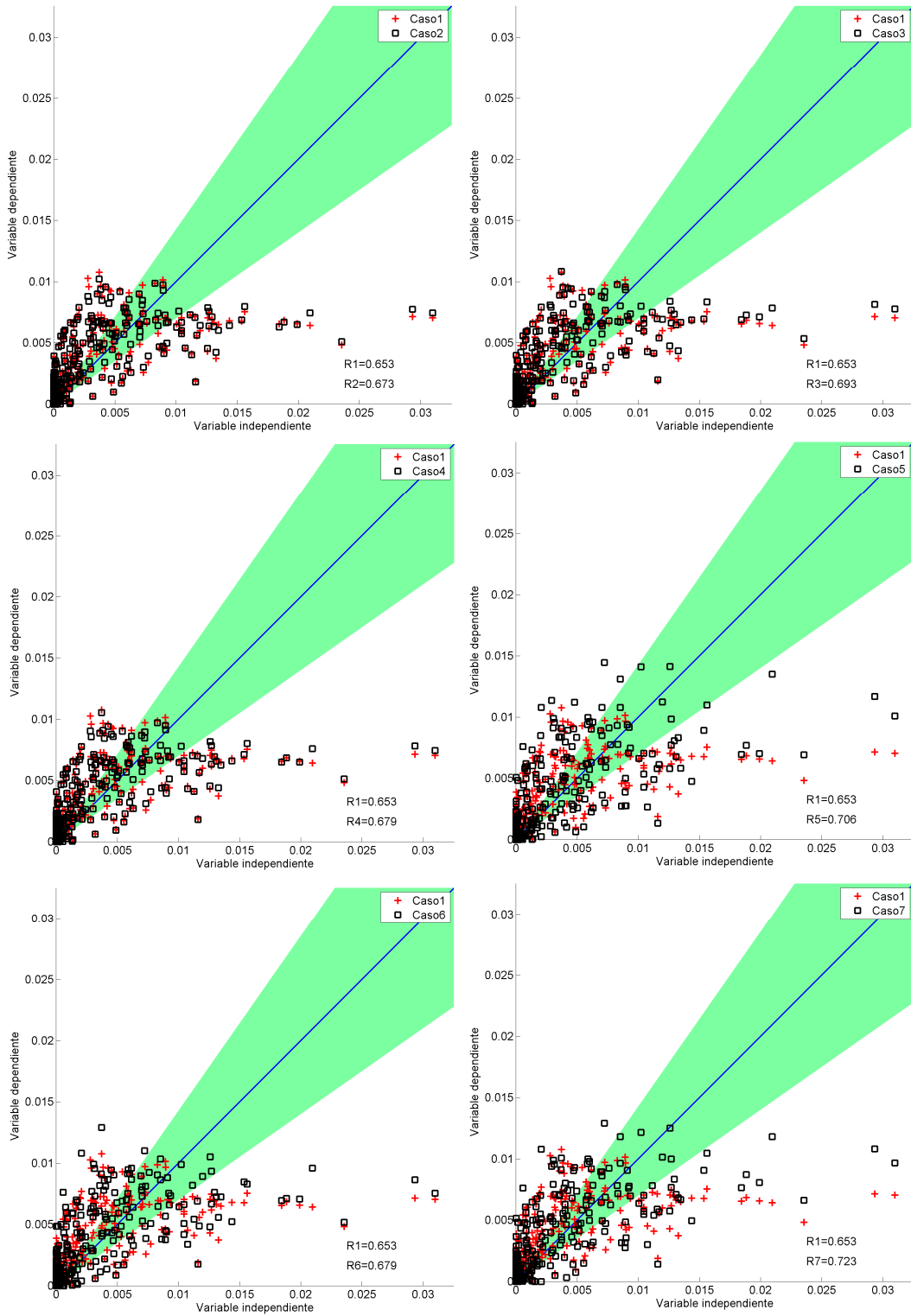


Figura 3.23: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos.

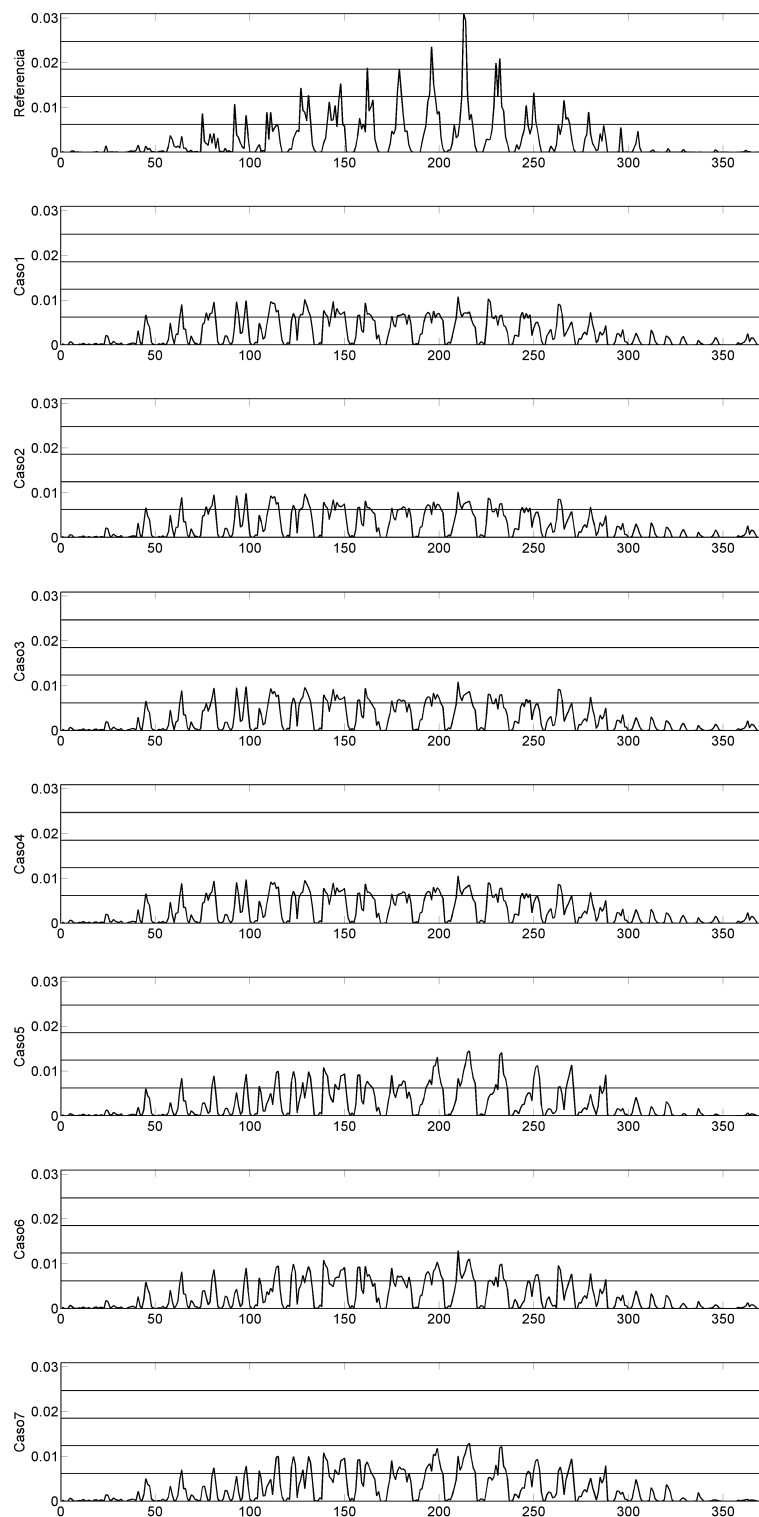


Figura 3.24: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos.



Analizando los mapas de emisiones se observa que la estructura de los 3 casos es similar con algunas leves diferencias. Por ejemplo, el caso N°7 en la zona de la comuna de Providencia (centro desplazado hacia el este) tiende a aumentar las emisiones debido a que en esta zona disminuye el Porcentaje de población pobre en relación a la otras zonas. Observando los mapas de diferencia se ve que no hay grandes diferencias entre ellos. Por ejemplo, para ambos casos de uso de factores socioeconómicos aumentan las celdas de color blanco en la zona norte de la ciudad, debido a que en esta zona las emisiones son sobrestimadas por el uso de un mapa de densidad, pero al agregar la componente del factor socio-económico se ven disminuidas debido a que esta zona tiene una nivel socio-económico más bajo.

Tabla 3.9: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando sólo densidad de población y en combinación con índices socio-económicos.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Coef Corr (R)	0,653	0,673	0,693	0,679	0,706	0,679	0,723
% Aceptación	44,39	47,06	47,33	46,79	50,80	49,47	51,34

Observando los gráficos de dispersión se puede apreciar que las metodologías que usan factores socio-económicos tienden a aumentar la magnitud de las emisiones de mayor valor, mejorando la correlación que existe entre la referencia y las metodologías usadas con respecto al uso de únicamente de la densidad de población. La magnitud de este aumento depende del índice socio-económico usado. Los índices de prioridad social y porcentaje de población en condición de pobreza son los que generan los mayores cambios, obteniéndose finalmente mejores resultados. Los valores de porcentaje de aceptación se mantienen similares pero nunca empeorando con respecto al uso de solamente la densidad de población, lo que quiere decir que los valores bajos y medios no se ven mayormente modificados y en algunos casos mejoran.

Observando las series de escaneo se ve que esta nueva metodología todavía está lejos de llegar a representar los máximos de emisión de la referencia. Los casos de mejor correlación, que son el uso del índice de prioridad social (Caso N°5) y porcentaje de población en condición de pobreza (Caso N°7), describen de una mejor manera estos máximos.

Como conclusión se puede decir que el agregar índices socio-económicos mejora los resultados de la distribución espacial de las emisiones con respecto a sólo usar la densidad de población para distribuir las emisiones. La mejora depende del índice usado, ya que éstos tienen distintas escalas y toman en cuenta distintos factores para su construcción. Sin embargo, los problemas de que existían previamente no son resueltos.

### 3.3.2.5. Usando largos de la red vial principal en combinación con flujos vehiculares y velocidades medias

Esta metodología es posible desarrollarlas debido a que la red ESTRAUS tiene información sobre los flujos vehiculares y velocidades medias.

La información sobre flujos vehiculares disponible en la red ESTRAUS está separada según flujo variable (vehículos particulares) y flujos fijos (buses, taxis-colectivos, camiones y buses inter-rurales). Para ocupar una metodología simplificada se ocupará el flujo total de vehículos. Debido a que el método de cálculo de las emisiones en caliente según la metodología MODEM se multiplica directamente los largos de arcos por los flujos vehiculares totales (ecuación C.1), para esta metodología se seguirá el mismo camino.

La información de velocidad media se tiene para el flujo libre, que es cuando no hay problemas de atochamiento vehicular, y para una situación normal. Para el cálculo se usará la información de velocidad media en una situación normal por ser más realista. Para velocidades bajas como las encontradas en los arcos de la red ESTRAUS, las emisiones disminuyen a medida que la velocidad media aumenta. Luego se debe encontrar una función para aplicar a la velocidad de forma que represente esta situación. Debido a que alrededor del 90 % de las emisiones de fuentes móviles son producidas por vehículos particulares, y dentro de estas, el 80 % son generadas por vehículos sin convertidor catalítico, se usará la fórmula del factor de emisión correspondiente a esta categoría para obtener el factor que se va a usar finalmente en la metodología. Esta fórmula es la siguiente:

$$FE(v) = 0,0203 \cdot v^2 - 2,2662 \cdot v + 77,661 \quad (3.11)$$

Donde  $v$  es la velocidad media y  $FE$  el factor de emisión correspondiente a esa velocidad.

Las metodologías usadas en esta sección son las siguientes:

- Caso N°1: Usar la densidad de largo de la red vial principal
- Caso N°2: Usar los largos de la red vial principal multiplicado por el flujo en cada arco:

$$E_i = \frac{l_i \cdot F_i}{\sum_i l_i \cdot F_i} \quad (3.12)$$

- Caso N°3: Usar los largos de la red vial principal multiplicado por el factor de emisión dependiente de la velocidad en cada arco:

$$E_i = \frac{l_i \cdot FE(v_i)}{\sum_i l_i \cdot FE(v_i)} \quad (3.13)$$

- Caso N°4: Usar los largos de la red vial principal multiplicado por el factor de emisión dependiente de la velocidad y el flujo vehicular en cada arco:

$$E_i = \frac{l_i \cdot FE(v_i) \cdot F_i}{\sum_i l_i \cdot FE(v_i) \cdot F_i} \quad (3.14)$$

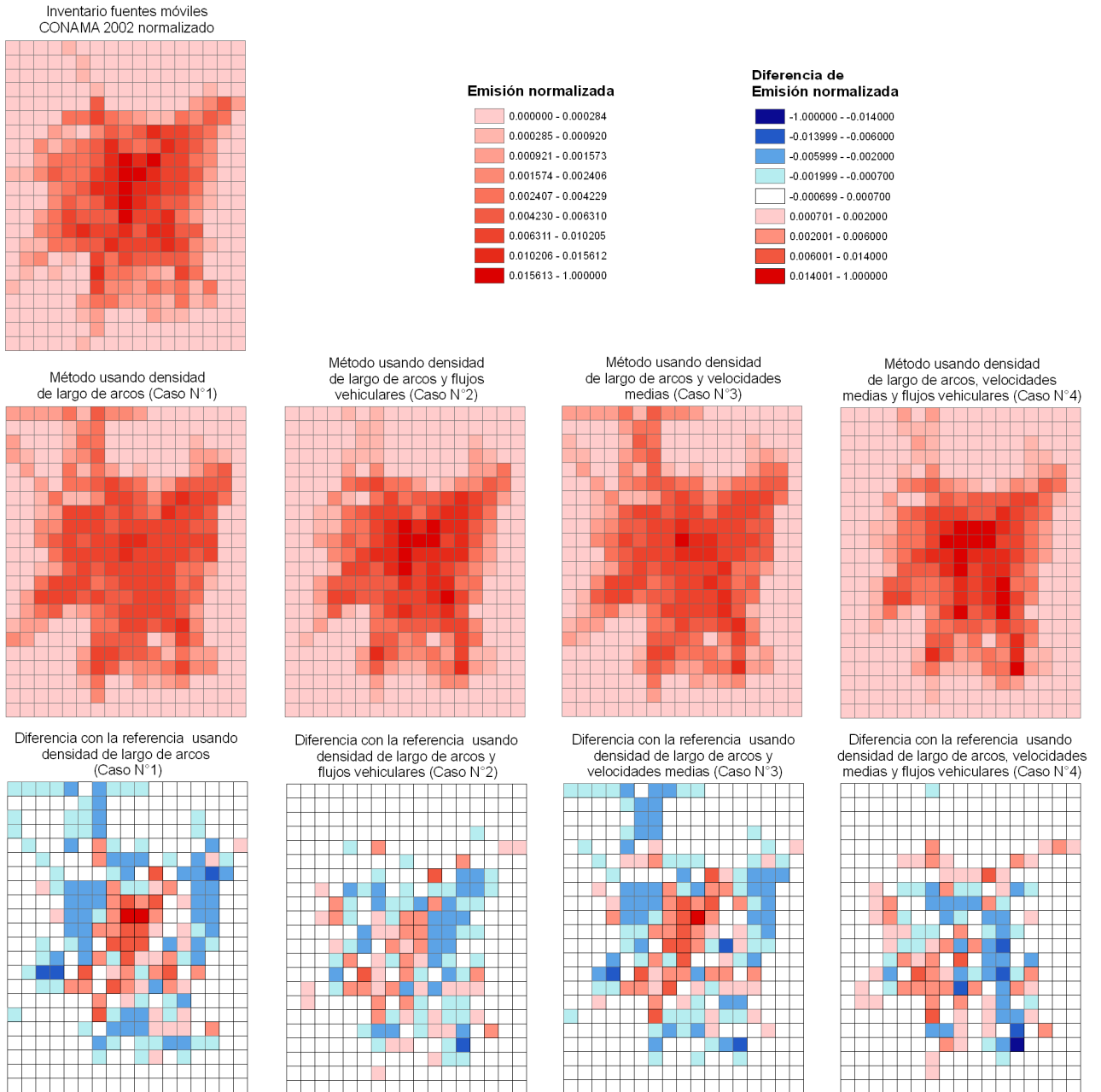


Figura 3.25: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

Por el análisis de los mapas de emisión normalizada (figura 3.25) destaca la gran mejora en la estructura del inventario que tiene la estimación al agregar la información de flujos vehiculares (Caso N°2). Algunos aspectos mejorados con respecto a las estimación que usa solamente la densidad de largo de calles son los máximos en el centro de la ciudad, la pérdida de importancia de vías que tienen flujos pequeños y que no se ven representadas en el inventario de referencia (por ejemplo, las vías al noroeste de la ciudad), aumento de emisiones en las zonas industriales (por ejemplo, la zona al suroeste mencionada en la figura 3.16). El mapa de emisión normalizada que usa la información de velocidades medias (Caso N°3) tiene mejoras con respecto al Caso N°1, pero la estructura permanece más similar a este mapa que a la referencia. El mapa del caso donde se combinan la densidad de largo, velocidades medias y flujos (Caso N°4) tiene un estructura similar a la referencia.

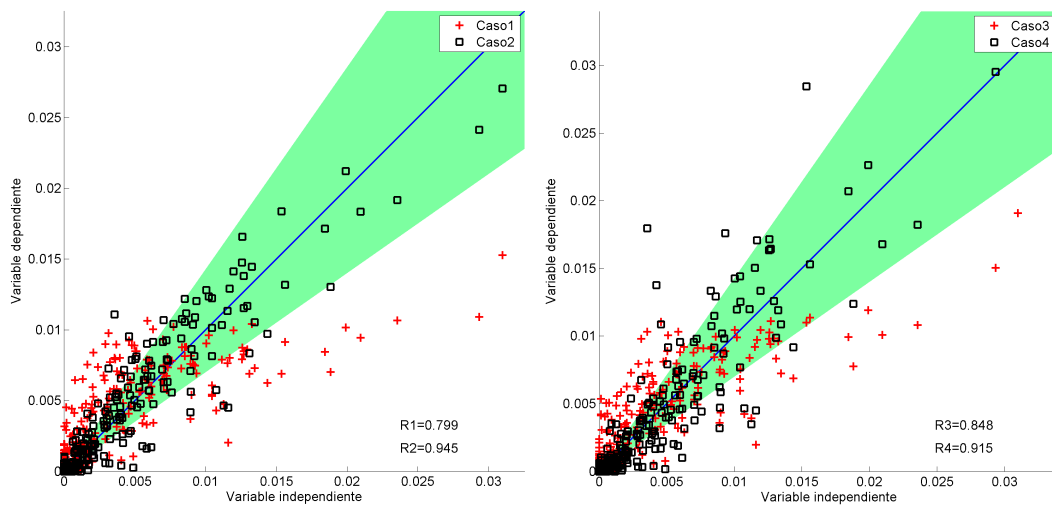


Figura 3.26: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

Tabla 3.10: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Coef Corr (R)	0,799	0,945	0,848	0,915
% Aceptación	55,35	72,99	60,70	69,79

Al observar los mapas de diferencia se ve una gran disminución de las diferencias al agregar la información de flujos vehiculares. Todavía existe una subestimación de las emisiones en la zona central y en zonas industriales. Esto se debe a la falta de incorporación de aspectos sobre la velocidad media (que es más baja en estas zonas, luego las emisiones deberían disminuir) y a aspectos sobre el tipo de flota. Al agregar la información de velocidades medias a este mapa (Caso N°4) se ven algunas mejoras, pero lo que ocurre en

general es que los valores se alejan.

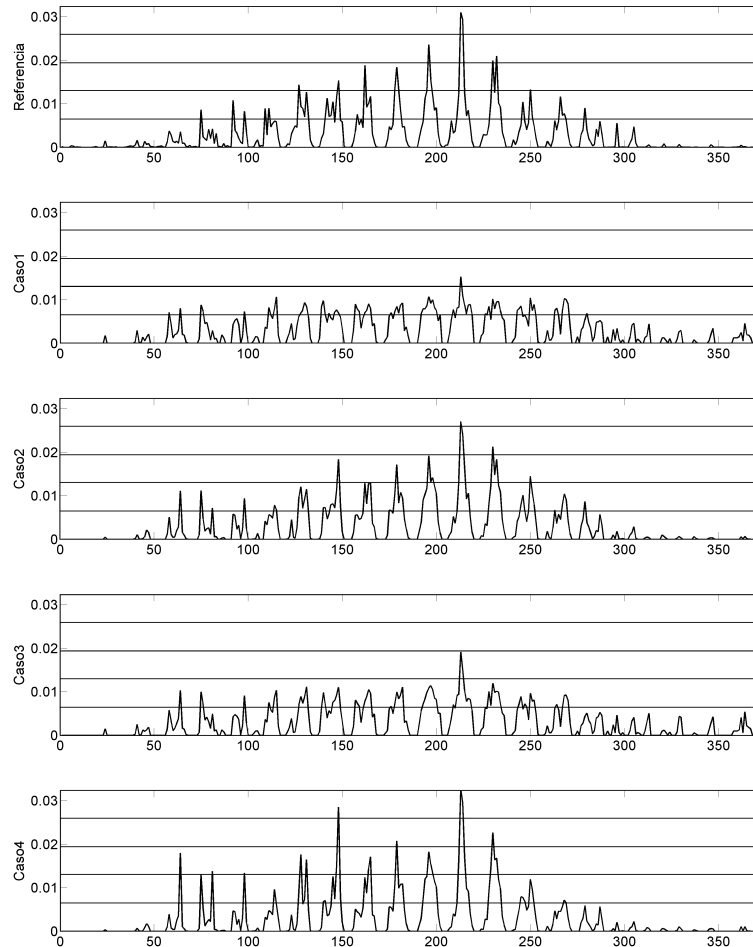


Figura 3.27: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

Los gráficos de dispersión muestran la gran capacidad de ajuste de la metodología que usa flujos vehiculares (Caso N°2). Destaca la gran cantidad de puntos máximos que caen dentro de la zona de aceptación obteniéndose un coeficiente de correlación alto. Al agregar a este mapa la información de velocidades medias (Caso N°4) los valores de mayor magnitud se dispersan más de lo que estaban en el Caso N°2, obteniéndose un coeficiente de correlación menor. El agregar la información y que se degraden los resultados se debe a varios factores. Primero, el escoger una fórmula para el factor de emisión dependiendo de la velocidad es una aproximación ya que no se toman en cuenta las categorías vehiculares que hay en los distintos sectores

de la ciudad. Además para esta metodología se consideró sólo una velocidad, pero en el modelo de emisiones existen tiempos determinados para cada arco en el cual está funcionando con flujo libre o con flujo variable, y dependiendo de estos tiempos se aplican las distintas velocidades, obteniéndose distintos factores de emisión. Debido a que para poder obtener buenos resultados es necesario desagregar la información para poder incorporar de buena manera las velocidades, entonces mediante la metodología simple desarrollada en este trabajo no es posible mejorar más allá que el caso N°2.

Por otro lado, si se observa el gráfico de dispersión para el caso N°3 (densidad de largo de calles y velocidades medias) se observa una mejora con respecto al caso N°1, ya que los valores máximos tienden a alinearse de una mejor forma hacia la línea central del gráfico de dispersión.

Al observar las series de escaneo se aprecia la gran similitud entre la referencia y el caso N°2. Se puede ver que el caso N°4 también tiene una alta similaridad, pero se ven algunas diferencias en los máximos. El caso N°3 es más cercano al caso N°1, pero mejor ya que representa los máximos de una mejor manera.

Como conclusión se puede decir que al agregar información es más conveniente agregar información sobre flujos vehiculares que información sobre velocidades medias, debido a que los flujos se agregan directamente mientras que para agregar información sobre velocidades hay que pasar por categorías vehiculares y tiempos de flujo libre en el arco, que si no son considerados los resultados se ven degradados. Además, sólo agregando información sobre flujos vehiculares se obtienen muy buenos resultados, con la gran mayoría de los máximos de emisión dentro del nivel de aceptación. Si se agregan ambos tipos de información al mismo tiempo no es garantizado que el resultado mejore. Sin embargo, si se posee sólo información sobre velocidades medias, al introducir esta información se producen mejoras, pero no de la magnitud de las obtenidas al agregar información sobre flujos vehiculares.

### **3.3.2.6. Usando red vial principal ponderada por densidad de población y factores socio-económicos**

Como se pudo ver en la sección 3.3.2.5 la estimación de la distribución espacial de las emisiones mejora de gran manera al incorporar información sobre flujos vehiculares a los de largo de calles. En la sección 3.3.2.4 se mejoraron los resultados de la metodología que usa solamente densidades de población ponderando esta última por factores socioeconómicos. El ponderar por factores socio-económicos busca representar la distribución de la cantidad de vehículos particulares que hay en cada zona.

En esta sección en vez de ponderar los largos de calle por los flujos vehiculares como en la sección 3.3.2.5, se pondera por la distribución de la cantidad de vehículos particulares dependiendo de la zona donde se encuentren los arcos. Para realizar comparaciones se agregan las metodologías que consideran solamente la densidad de calles de la red vial principal y además clasificar los arcos pero solamente según densidad de población (sin multiplicar por factor socio-económico).

La metodología general de cálculo de la emisión normalizada es la siguiente:

$$E_i = \frac{l_i \cdot \rho_i \cdot FSE_i}{\sum_i l_i \cdot \rho_i \cdot FSE_i} \quad (3.15)$$

Donde  $E_i$  es la emisión normalizada para cada arco  $i$ ,  $l_i$  la longitud del arco  $i$ ,  $\rho_i$  y  $FSE_i$  la densidad de población y el factor socio-económico asociado a la zona en la cual se encuentra el arco  $i$  respectivamente. Si un arco cruza 2 o más zonas, luego cada segmento se considera como un arco diferente. Para obtener la emisión normalizada en cada celda se suman los  $E_i$  asociados a cada arco que se encuentra dentro de cada celda.

Los factores Socioeconómicos son multiplicados de la misma manera en que fue explicado en la sección 3.3.2.4, de tal forma que sean crecientes a medida que aumenta el nivel socioeconómico. Los casos desarrollados están enumerados de la siguiente forma:

- Caso N°1: Usando densidad de largos de calles.
- Caso N°2: Usando largos de calles ponderado por densidad de población mejorada.
- Caso N°3: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Índice de Calidad de la Educación.
- Caso N°4: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Índice de Calidad de vida.
- Caso N°5: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Índice de Desarrollo Humano.
- Caso N°6: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Índice de Prioridad social modificado según lo explicado en la sección 3.3.2.4.
- Caso N°7: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Porcentaje de Población en condición de Indigencia modificado según lo explicado en la sección 3.3.2.4.
- Caso N°8: Usando largos de calles ponderado por densidad de población y por el Porcentaje de Población en condición de Pobreza modificado según lo explicado en la sección 3.3.2.4.

Las figuras de mapas de emisiones normalizadas y diferencias de emisiones normalizadas (figura 3.28), gráficos de dispersión (figura 3.29) y series de escaneo de datos (figura 3.30) se mostrarán sólo para los casos N° 1, 2, 6 y 8. Los resultados de correlación y porcentaje de aceptación se encuentran en la tabla 3.11 para todos los casos.

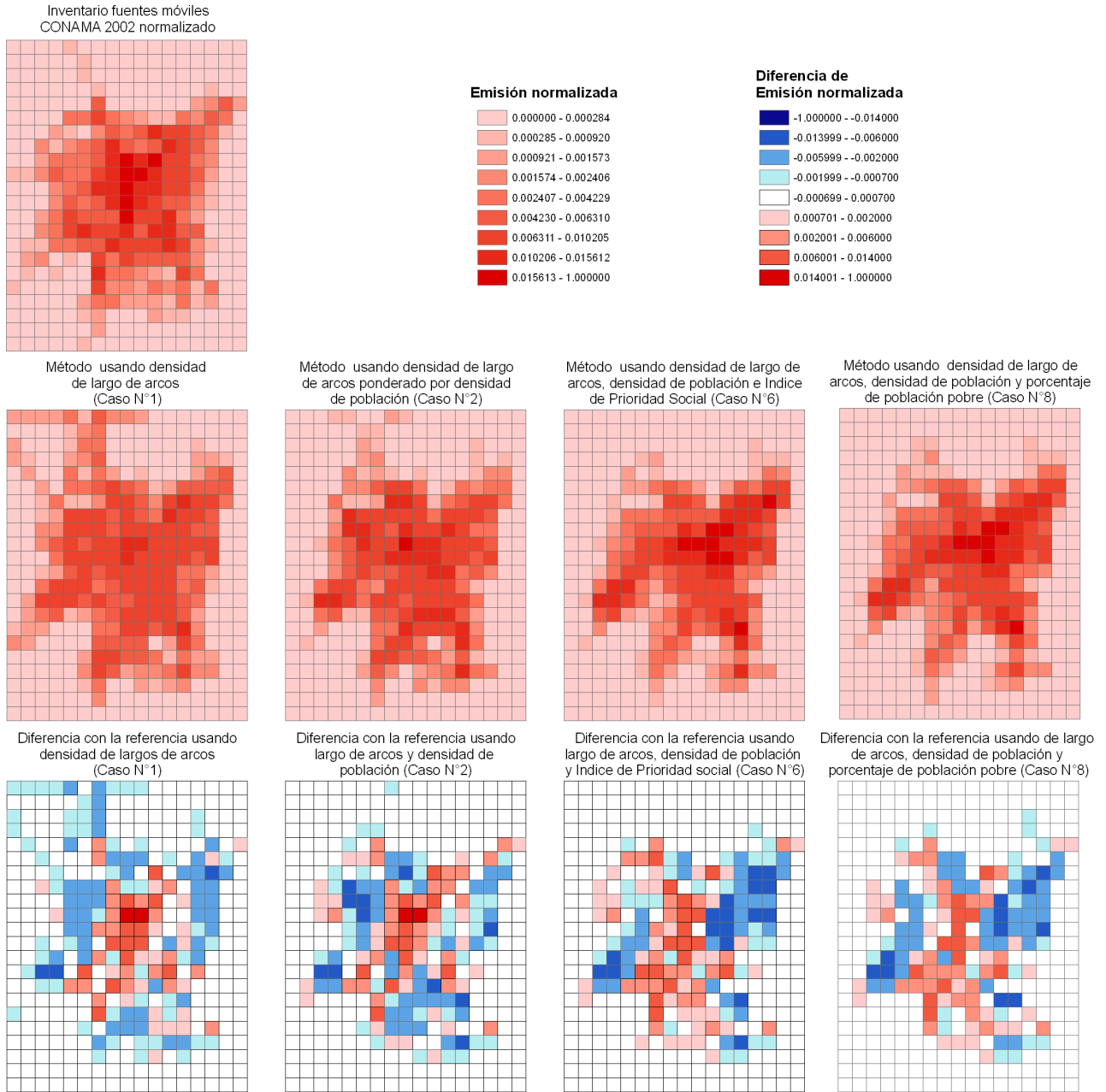


Figura 3.28: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

Analizando los gráficos de dispersión, se puede ver que al usar la red vial principal en conjunto con densidad de población y factores socio-económicos (Casos N° 6 y 8) los valores máximos de emisión son mejorados en relación a la metodología que usa solamente la red vial principal. Sin embargo, para los casos N° 6 y 8 existen valores que aparecen como nuevos máximos, pero que en verdad no lo son (ver cuadrados negros en la parte sobre la línea central). De esta forma, existen celdas que mejoran la estimación de los máximos, pero otras que empeoran. Finalmente, el coeficiente de correlación varía poco al comparar con el



coeficiente de correlación del método que usa sólo los largos de la red vial principal.

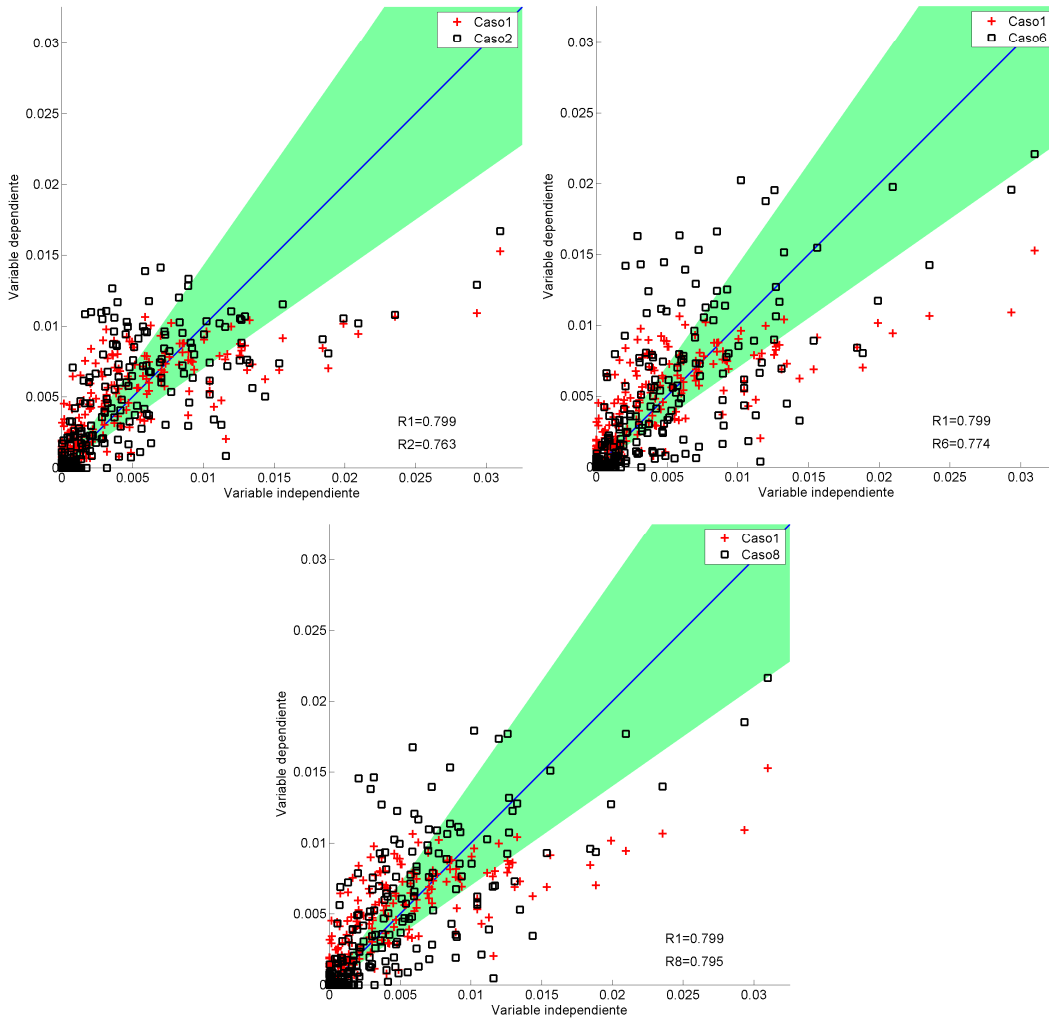


Figura 3.29: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

Tabla 3.11: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Coef Corr (R)	0,799	0,763	0,779	0,793	0,783	0,774	0,775	0,795
% Aceptación	55,35	60,96	62,30	61,50	61,50	60,70	59,36	60,96

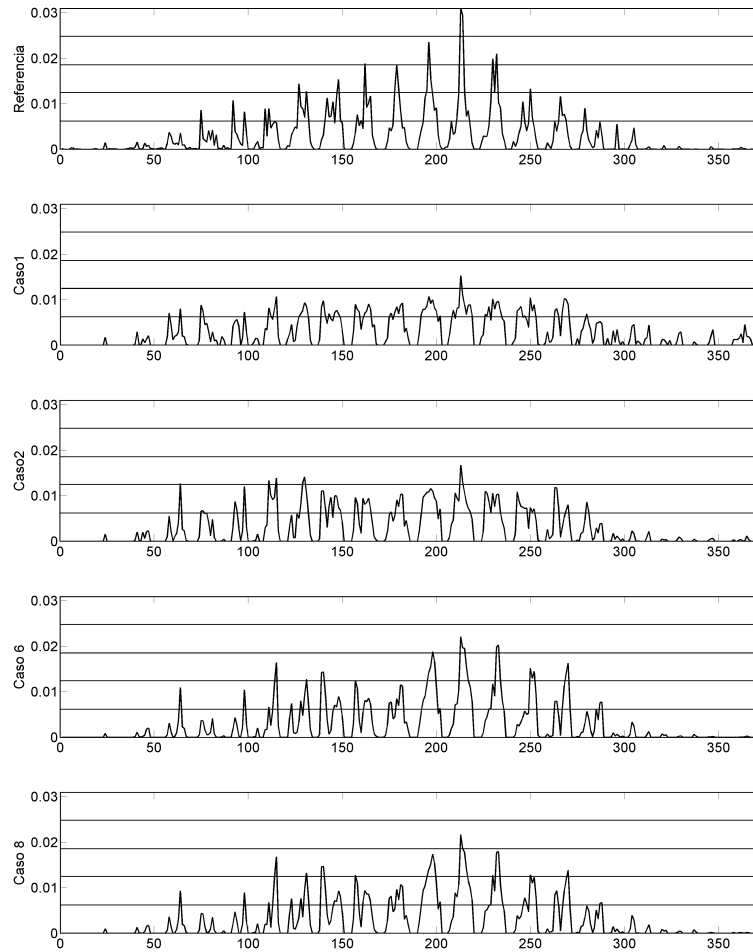


Figura 3.30: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando densidad de largos de calles, flujos vehiculares y velocidades medias.

Se pueden observar los mapas de emisión normalizada y diferencias de emisión para determinar donde ocurren geográficamente los fenómenos de mejora o empeoramiento. Las mejoras de los máximos ocurren en el centro de Santiago, y en lugares residenciales de nivel social bajo, como por ejemplo la zona al oeste del centro de la ciudad. La estimación empeora en zonas industriales debido a que estas zonas son de baja densidad de población y además son zonas de nivel social medio-bajo. Juntando estos 3 factores se obtiene una subestimación de las emisiones en zonas industriales. También empeoran las estimaciones de las zonas residenciales de alto nivel social (zona noreste de Santiago), debido a que por ser zonas residenciales la red vial principal es más detallada, tienen un nivel socio-económico alto y tienen una densidad de población

mayor que otros sectores produciéndose una sobrestimación.

Al analizar las series de escaneo para los casos N°6 y 8 se ve cómo tienden a reproducir los máximos de la referencia, pero con un ancho mayor del peak urbano.

El principal problema de considerar la multiplicación de la densidad poblacional por los flujos es que, como ya fue mencionado, es un estimador de cantidad de vehículos que existen en la zona, pero no un estimador de flujos vehiculares. A pesar de que ambos están correlacionados, se cometen errores en algunas zonas.

En el caso N°2, que pondera la red vial principal sólo por la densidad de población, no se obtienen mejores resultados que el caso N°1 (red vial principal). Tiende a mejorar un poco los máximos de emisión, pero muchas otras zonas se ven empeoradas. El coeficiente de correlación obtenido en este caso es el más bajo de todos para esta sección. En la sección 3.3.2.4 se vio que usar densidad de población en combinación con factores socio-económicos mejora los resultados en relación a usar sólo densidad de población, lo que se refleja nuevamente en esta sección.

Al analizar la tabla con todos los casos (tabla 3.11) se ve que los resultados son similares para los casos que usan factores socioeconómicos (Casos desde el N°3 al N°8). También se aprecia un aumento en el porcentaje de aceptación con respecto al caso base que usa sólo la red vial principal (Caso N°1).

Como conclusión de esta sección se puede decir que no es claro que la metodología de ponderar los largos de los arcos por factores socio-económicos y densidad de población sea una mejora con respecto a sólo usar los largos de las calles. Esta metodología mejora la estimación en algunos puntos pero la empeora en otros obteniéndose comparaciones cuantitativas similares. Lo que es claro es que el agregar información sólo de densidad de población no resulta en una mejora.

### **3.3.2.7. Usando red vial principal ponderada por categorías de flujos**

En la sección 3.3.2.5 se observaron los buenos resultados que se obtienen al multiplicar los largos de los arcos con los flujos en cada arco. Sin embargo para poder tener la información de flujos en cada arco de la red principal es necesario ocupar un modelo de transporte como ESTRASUS, el cual no existe en todas las ciudades y además es costoso.

La metodología presentada en esta sección consiste en clasificar los arcos según sus flujos en 3 categorías: Alto, medio y bajo. Luego al aplicar la metodología, el largo de cada arco es ponderado por un factor que depende de la categoría a la que pertenece el arco. De esta forma, una vez que se tiene información sobre flujos en algunas calles se puede clasificar los arcos de la red principal usando esta información y por similitud en aquellas donde no exista información, no teniendo que aplicar un modelo de transporte.

Antes de aplicar la metodología es necesario primero clasificar los arcos y luego definir el factor que va a ser aplicada a cada categoría.

Para establecer las categorías se usará el método de los umbrales naturales de Jenks (Natural Breaks, Jenks 1963). Este método consiste en obtener categorías de gran homogeneidad interna y al mismo tiempo tener máximas diferencias entre cada categoría.

Una vez establecidas las categorías se obtiene la media de los flujos de cada categoría. Luego las medias se normalizan por el valor menor (flujos bajos) para obtener el factor final. En la tabla 3.12 se muestran las distintas categorías, los flujos y los factores finalmente usados. Debido a que esta metodología es una aproximación, para el valor de los factores se usó el entero más cercano.

Tabla 3.12: Clasificación de arcos por tipo de flujo y factor a aplicar a cada categoría.

Categoría	Lim. Inferior[veh/hr]	Lim. Superior [veh/hr]	Medias [veh/hr]	Factor
Flujo Bajo	0	856	352,5	1
Flujo Medio	856	2262	1360,6	4
Flujo Alto	2262	6447	3189,5	9

Luego, la metodología aplicada finalmente es:

$$E_i = \frac{l_i \cdot f_i}{\sum_i l_i \cdot f_i} \quad (3.16)$$

Donde  $E_i$  es la emisión normalizada del arco  $i$ ,  $l_i$  el largo del arco  $i$  y  $f_i$  el factor asociado al arco  $i$  dado por la clasificación por flujo mencionada previamente.

Un aspecto a considerar para la estimación que se realiza en este trabajo es que la red vial principal es muy detallada debido a que es obtenida de un modelo de transporte. Para otros trabajos no va a ser posible disponer de una red vial con este nivel de detalle. Luego es conveniente realizar la estimación de la distribución espacial de las emisiones simplificando la red vial principal disponible. Una forma de simplificar la red es no considerar los arcos que pertenecen a la categoría de flujo bajo, debido a que cuando se construye una red vial principal los arcos de menor flujo (menor importancia) no serán considerados. Realizando esta simplificación se eliminan el 63 % de los arcos de la red. De esta forma se puede realizar la estimación de la distribución espacial del inventario sólo considerando 2 categorías, flujo medio y alto, usando los mismos factores de la tabla 3.12.

Para esta sección se muestran los resultados para 3 casos:

- Caso N°1: Usando los largos de la red vial principal ponderado por los flujos en cada arco. Esta categoría se presenta para realizar comparaciones.

- Caso N°2: Usando los largos de la red vial principal ponderado por el factor dependiendo de la categoría a la cual corresponde el arco.
- Caso N°3: Usando los largos de la red vial principal ponderado por el factor dependiendo de la categoría a la cual corresponde el arco sin considerar los arcos de flujo bajo.

Observando los mapas de emisión normalizada se encuentra que los casos N°1 y 2 son similares. En cambio, el caso N°3 muestra diferencias principalmente en los sectores más cercanos a los extremos del mapa, ya que aquí se encuentran arcos de menor flujo que no son considerados en el cálculo. El caso N°3 tiende a subestimar las emisiones en las afueras de la ciudad, como muestra el mapa de diferencia y a estimar de buena forma o sobrestimar ligeramente en el centro.

Al observar los gráficos de dispersión se puede ver de mejor forma la gran similaridad que existe entre el caso N° 1 y 2. El caso N°3 se aleja un poco pero la gran mayoría de los valores máximos siguen estando dentro de la zona de aceptación. A pesar de que a primera vista los resultados del caso N°2 son mejores que el caso N°3, tienen coeficientes de correlación muy similares, diferenciándose sólo en la tercera cifra decimal. Además, estos coeficientes de correlación son cercanos al coeficiente de correlación del caso que usa los flujos directamente.

Las series de escaneo muestran nuevamente la similaridad entre el caso N° 1 y 2. El caso N° 3 se ve caracterizado por máximos un poco mayores a la referencia y ancho del peak urbano un más angosto, debido a la simplificación de la red.

El porcentaje de aceptación de los casos N°2 y 3 es muy similar, y decrece con respecto al caso N°1, lo que significa que los valores medios y bajos son estimados de una mejor manera por el caso N° 1, pero esta disminución es menor.

En conclusión, se puede decir que la simplificación de clasificar los flujos en vez de usarlos directamente no cambia de gran manera los resultados, pudiéndose representar los máximos de emisión de buena manera, y con una estructura del inventario similar. Al simplificar la red y aplicar la metodología nuevamente, cuantitativamente los resultados son muy similares al caso de no simplificación de la red, pero se ven algunas diferencias cualitativas como la falta de representación de las emisiones más bajas y lejanas del centro de la ciudad. Este problema podría ser solucionado combinando esta metodología con algún mapa que represente a la red vial completa.

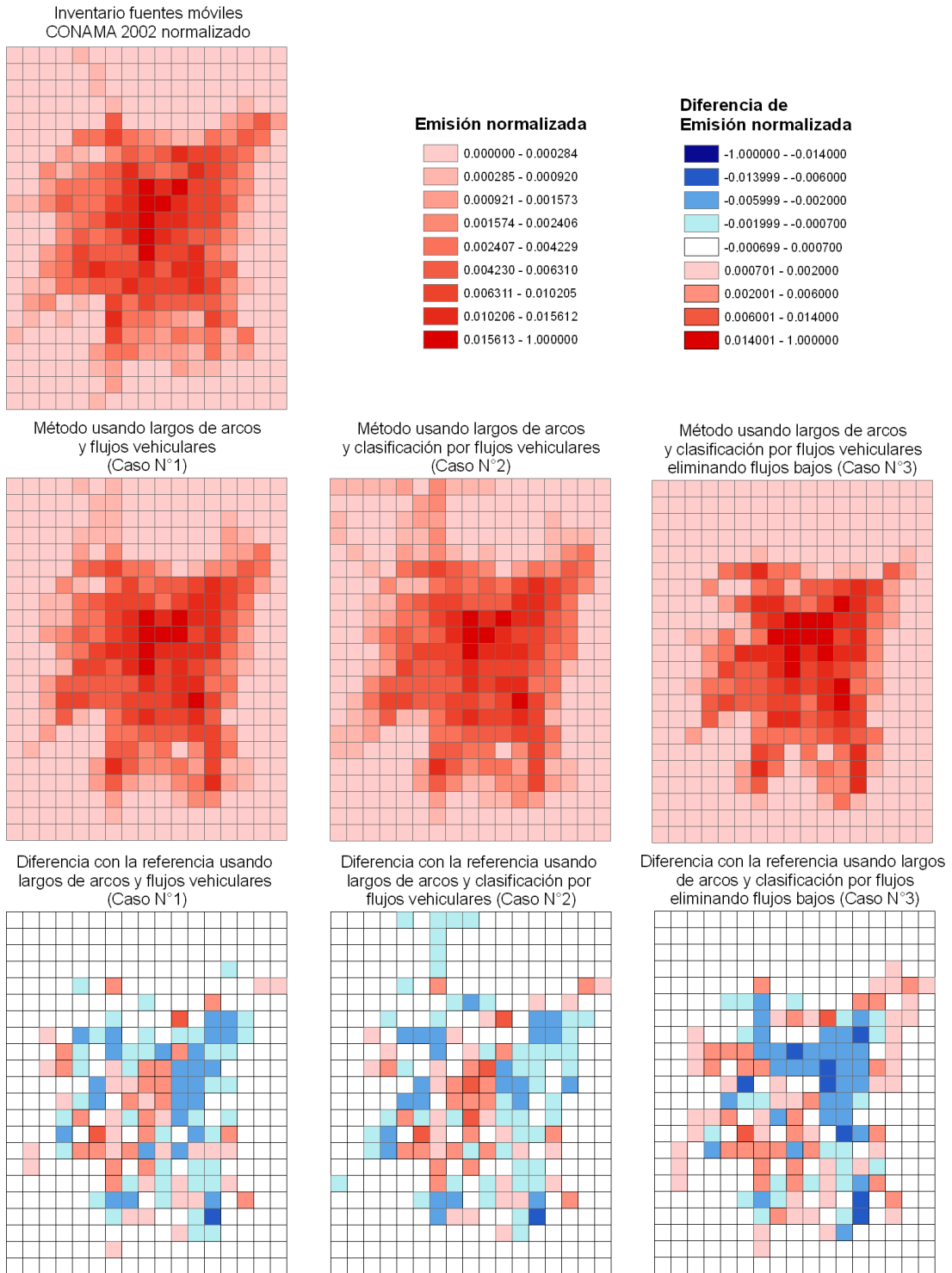


Figura 3.31: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

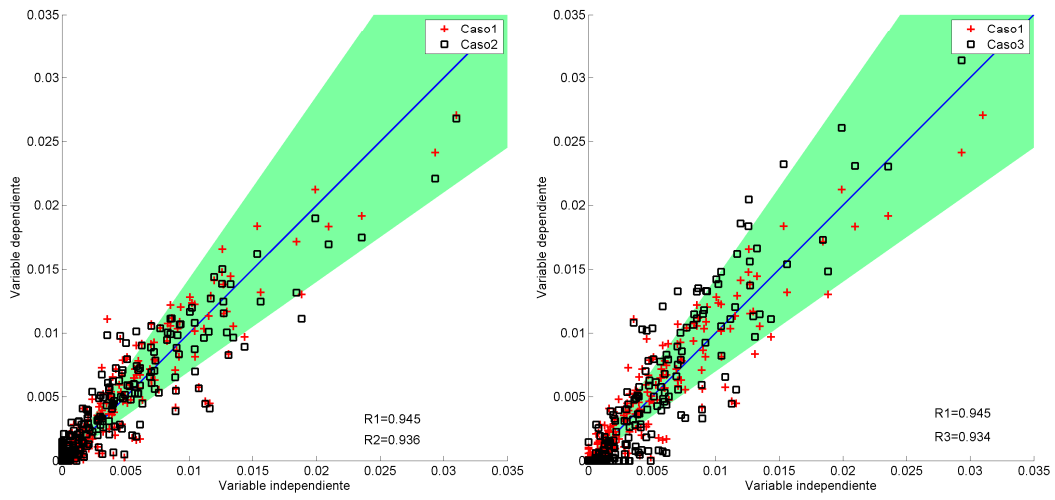


Figura 3.32: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo.

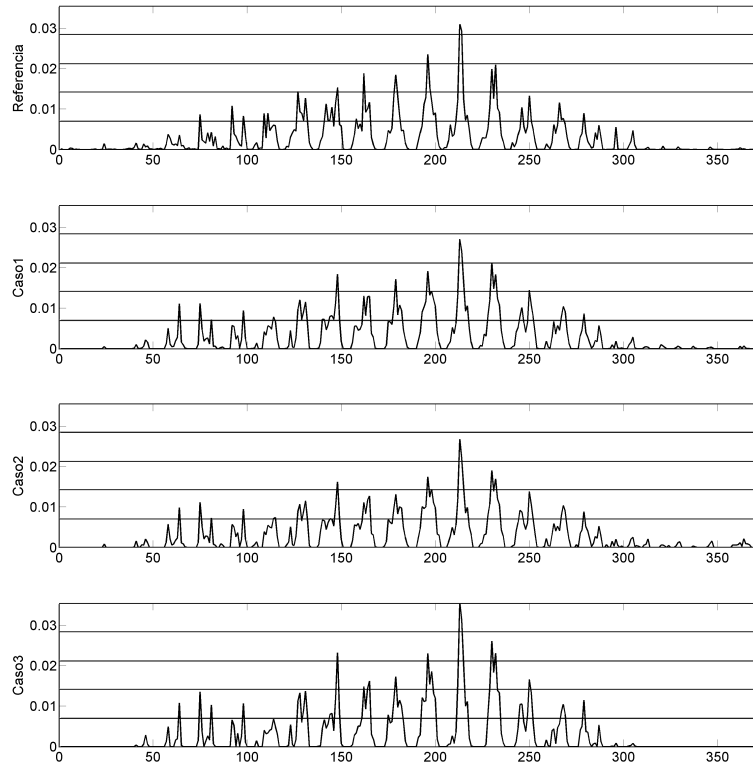


Figura 3.33: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo.

Tabla 3.13: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando flujos vehiculares y clasificación según categoría de flujo.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,945	0,936	0,934
% Aceptación	72,99	67,38	66,31

### 3.3.2.8. Usando red vial principal ponderada por la capacidad de los arcos

La capacidad de una calle es la máxima cantidad de vehículos por hora que pueden pasar por ella. Para tener el dato de capacidad de una calle no es necesario utilizar por un modelo de transporte como ESTR AUS.

Debido a que el dato de capacidad es de fácil acceso (en comparación a tener los flujos vehiculares), en esta sección se analizará si es posible mejorar la metodología que usa los largos de los arcos agregando información de capacidades, debido a que existe una correlación entre la capacidad y el flujo vehicular de una calle. La red ESTR AUS posee datos sobre la capacidad de los arcos, luego estos serán usados directamente.

No necesariamente existe una relación lineal entre la capacidad y el flujo en un arco. Luego una forma de ocupar las capacidades pero que estas representen flujos es clasificando las capacidades de la misma forma que la sección 3.3.2.7, pero en vez de calcular los factores usando las medias de cada categoría de capacidad, se ocupan los factores obtenidos con los flujos (tabla 3.12).

De esta forma, los casos presentados en esta sección son los siguientes:

- Caso N°1: Usando densidad de largos de la red vial principal.
- Caso N°2: Usando largos de la red vial principal ponderado por la capacidad de los arcos:

$$E_i = \frac{l_i \cdot C_i}{\sum_i l_i \cdot C_i} \quad (3.17)$$

- Caso N°3: Usando largos de la red vial principal ponderado por factor dependiendo de la categoría del arco clasificado por capacidad.

$$E_i = \frac{l_i \cdot f_i(C_i)}{\sum_i l_i \cdot f_i(C_i)} \quad (3.18)$$

Analizando los mapas de emisión normalizada (figura 3.34) se aprecia que los nuevos mapas (casos N°2 y 3) son de estructura similar a del caso N°1, salvo algunas diferencias leves. De igual forma, no se muestran grandes diferencias en los mapas de diferencia.

Al observar los gráficos de dispersión (figura 3.35) se aprecia una mejora de los nuevos mapas con respecto al caso N°1, estimando de una mejor manera los valores máximos. Además, para el caso N°2 (uso



directo de las capacidades) se aprecia además una mejora en los valores medios, acercándose más a la línea media. Este último comportamiento no se aprecia para el caso N°3.

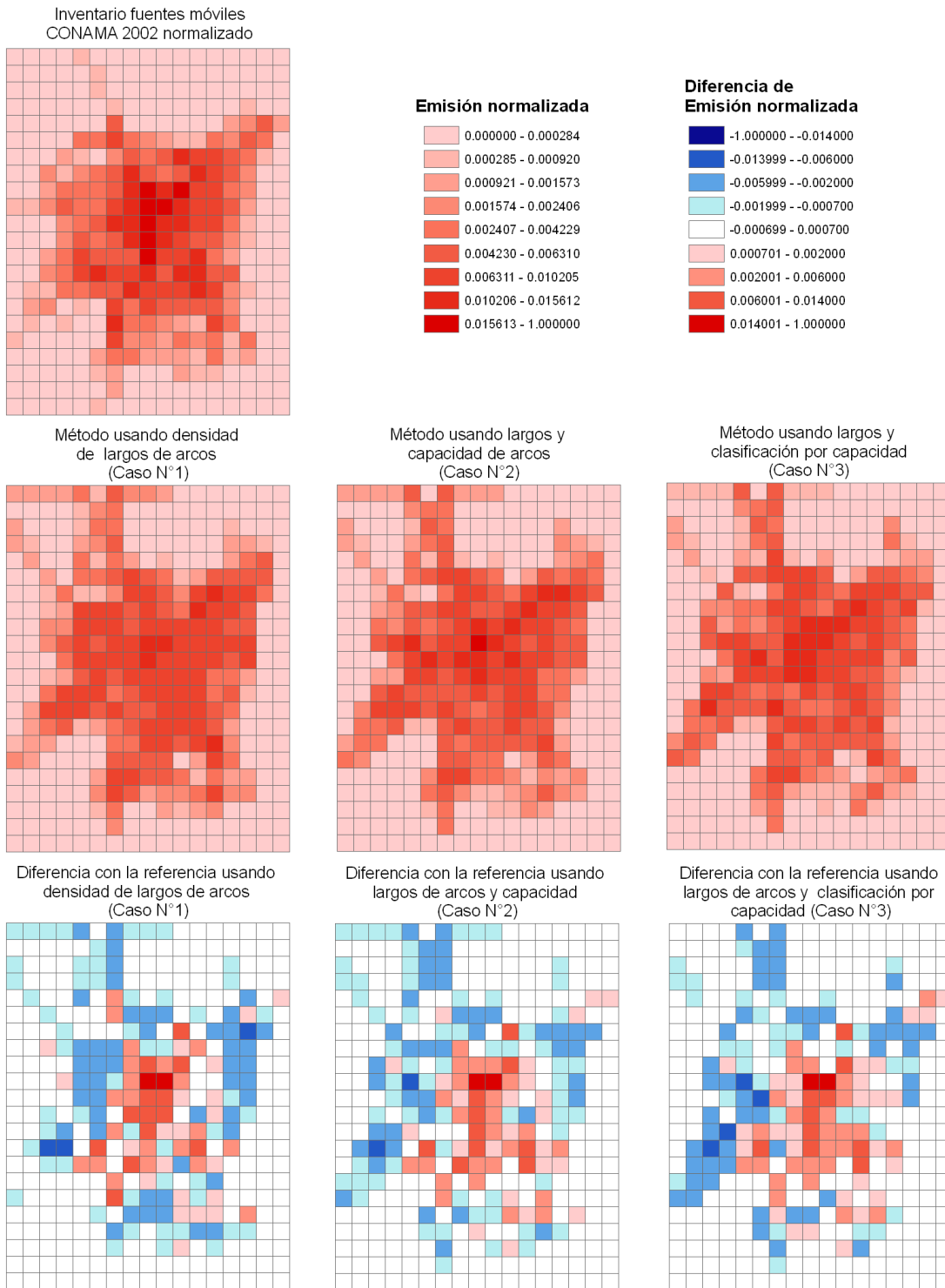


Figura 3.34: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

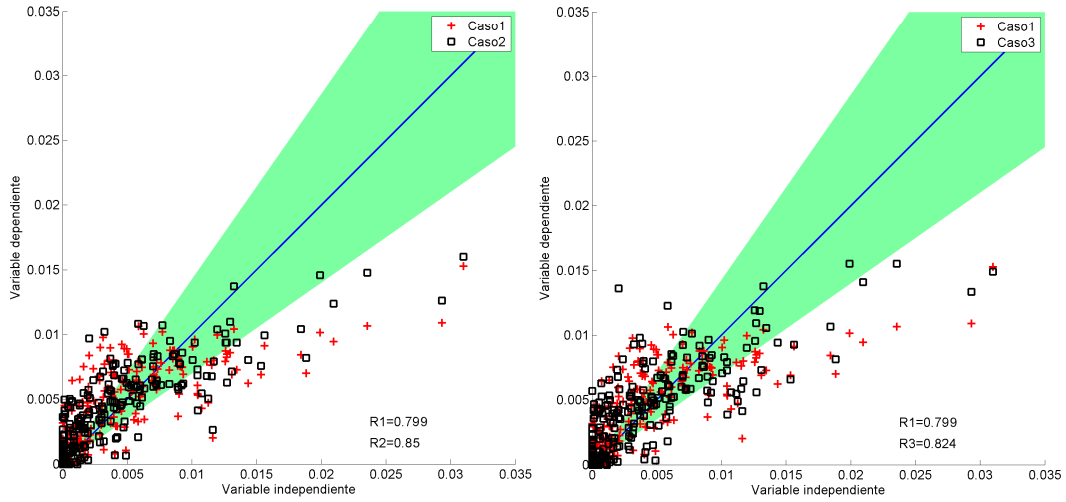


Figura 3.35: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad.

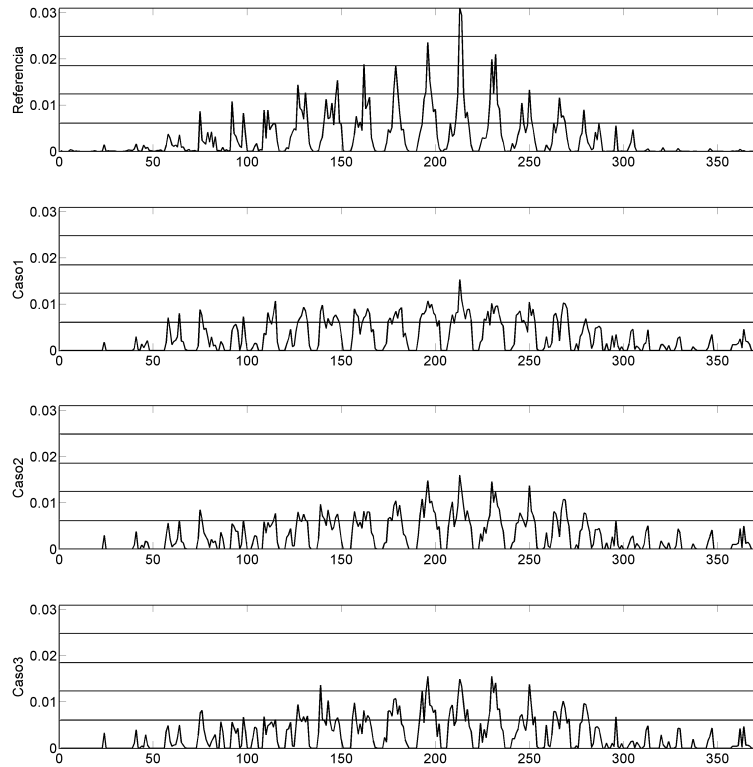


Figura 3.36: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad.

Tabla 3.14: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando capacidad de arcos y clasificación según capacidad.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Coef Corr (R)	0,799	0,850	0,824
% Aceptación	55,35	58,56	59,36

Las series de escaneo (figura 3.36) muestran una mejor representación de los máximos de los casos N°2 y 3 con respecto al N°1, aunque aun lejos de la referencia. Los anchos del peaks urbanos siguen siendo muy similares al caso N°1.

Al analizar la tabla 3.14 se aprecia que el coeficiente de correlación y el porcentaje de aceptación mejoran con respecto al caso que usa solamente los largos de las calles para la estimación. El caso N°2, que usa directamente las capacidades, presenta mejor correlación que el caso que ocupa la categorización según capacidad, pero ocupando factores de flujos. Sin embargo, los valores de porcentaje de aceptación se mantienen similares. Esto significa que el caso N°2 representa de mejor manera los valores máximos del inventario y ambos representan de manera similar los valores medios y bajos.

Como conclusión se puede decir que si para la estimación de la distribución espacial de las emisiones se dispone de una red vial principal con información sobre capacidad de la red, entonces los resultados mejoran al ponderar la longitud de las calles por su capacidad en comparación a ocupar sólo las longitudes. Al tratar de mejorar esta estimación ocupando factores representativos de flujos vehiculares la estimación no mejora. A pesar de obtenerse mejoras al introducir las capacidades, siguen existiendo los mismos problemas mencionados anteriormente, donde hay una subestimación de las emisiones en el centro de la ciudad y en las zonas industriales.

### 3.3.2.9. Usando la red vial principal clasificando por zona en la que se encuentre

En la sección 3.3.2.1 y en Tuia et al 2006 y Ossés et al 2007 se menciona como uno de problemas de la estimación usando la longitud de los arcos de la red vial principal la subestimación de las emisiones en los centros de las ciudades y zonas industriales, además de la sobrestimación en zonas residenciales.

De esta forma una metodología a seguir es darle una ponderación mayor a arcos que se encuentren en los centros urbanos y en zonas industriales, y disminuir la ponderación para zonas residenciales. El mapa de uso de suelo del departamento de geografía sólo distingue las zonas industriales, pero no es posible extraer información sobre zonas residenciales o centros urbanos. Sin embargo, el uso de suelo MINVU tiene un mayor grado de clasificación a pesar de tener menor resolución. Este mapa muestra en cada zona el porcentaje de área que es usado por categoría, las cuales son: Administración pública, agrícola, bodega, comercio, culto,

deporte y recreación, educación y cultura, sitio eriazo, estacionamiento, habitación, hotel-motel, industria, minería, oficina, salud y transporte y telecomunicaciones.

Las zonas industriales y residenciales se definen directamente por las categorías industria y habitación respectivamente. Los centros urbanos serán considerados como zonas con alta actividad comercial, oficinas y administración pública. De esta forma el porcentaje de área de la categoría centro urbano será la suma del porcentaje de estas 3 categorías.

Así se propone la siguiente ecuación para obtener la distribución espacial de las emisiones:

$$E_i = \frac{l_i \cdot (0,25 + \%C_i + \%I_i + (1 - \%R_i))}{\sum_i l_i \cdot (0,25 + \%C_i + \%I_i + (1 - \%R_i))} \quad (3.19)$$

Donde  $E_i$  es la emisión normalizada para el arco  $i$ ,  $l_i$  el largo del arco  $i$ ,  $\%C_i$ ,  $\%I_i$  y  $\%R_i$  el porcentaje de área de las categorías centro urbano, industrial y residencial en la que se encuentra el arco  $i$ . Debido a que el porcentaje de área residencial debe hacer disminuir la emisión este se encuentra en la fórmula de la forma  $1 - \%R_i$ . Se agrega un 0.25 para representar a las zonas que no son consideradas.

Para la estimación también se puede considerar sólo los porcentajes de centro urbano y industrial, o solamente el porcentaje de centro urbano. Así surgen 2 nuevas metodologías:

$$E_i = \frac{l_i \cdot (0,25 + \%C_i + \%I_i)}{\sum_i l_i \cdot (0,25 + \%C_i + \%I_i)} \quad (3.20)$$

$$E_i = \frac{l_i \cdot (0,25 + \%C_i)}{\sum_i l_i \cdot (0,25 + \%C_i)} \quad (3.21)$$

La definición de cada término es el mismo que para la ecuación 3.19. Nuevamente, si no se agrega un factor como 0,25 las zonas que no son ni industriales ni de centro urbano no son consideradas.

Para esta sección los resultados son mostrados para los siguientes casos:

- Caso N°1: Usando la densidad de largo de la red vial principal.
- Caso N°2: Usando la longitud de los arcos ponderado por porcentajes de área de centro urbano, industriales y residenciales según la ecuación 3.19.
- Caso N°3: Usando la longitud de los arcos ponderado por porcentajes de área de centro urbano y industriales según la ecuación 3.20.
- Caso N°4: Usando la longitud de los arcos ponderado por porcentajes de área de centro urbano según la ecuación 3.21.

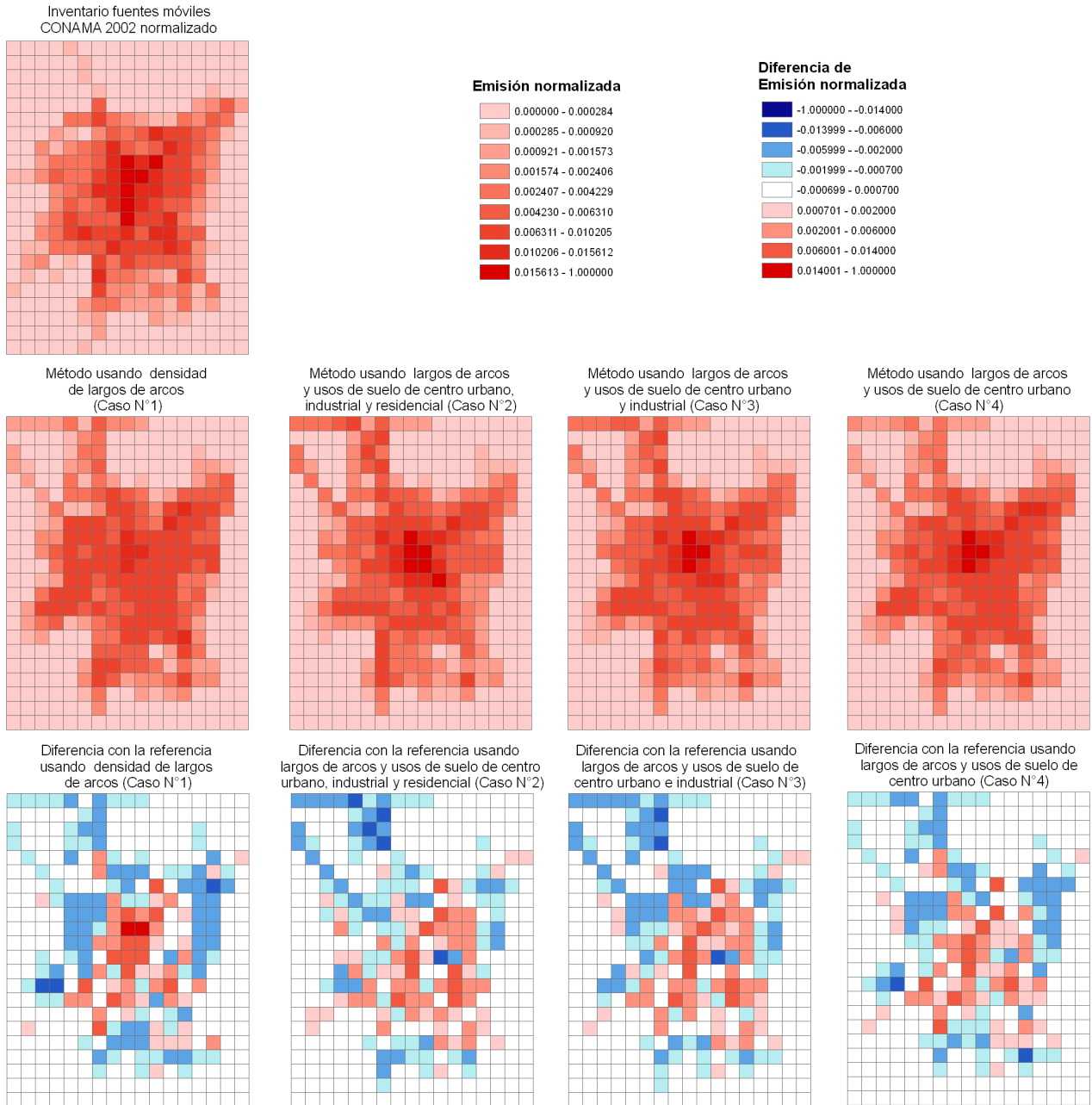


Figura 3.37: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

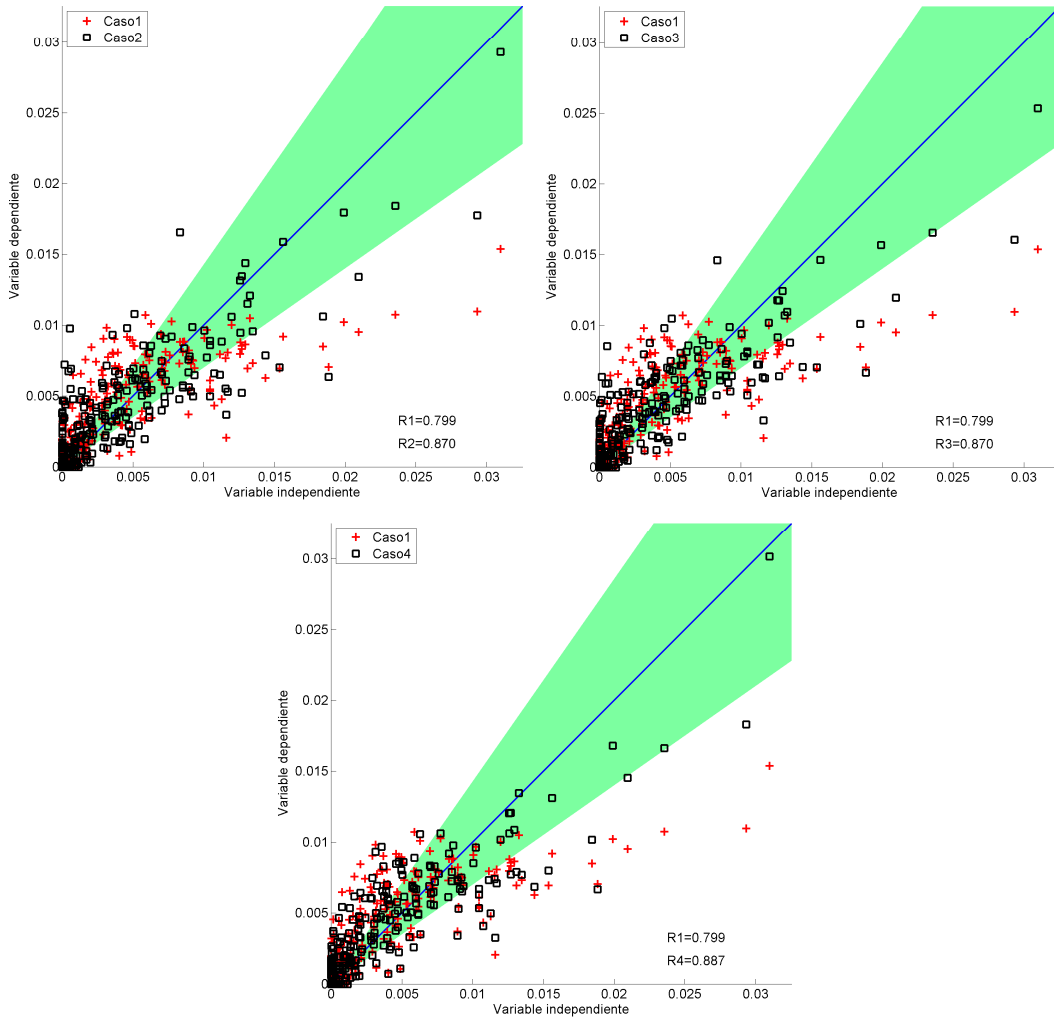


Figura 3.38: Gráfico de dispersión para la estimación del inventario de fuentes móviles usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo.

Tabla 3.15: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Coef Corr (R)	0,799	0,870	0,870	0,887
% Aceptación	55,88	60,16	60,70	60,96

En los mapas de emisión normalizada (figura 3.37) se puede observar cómo aumenta la emisión en el centro de la ciudad al aplicar los casos N° 2, 3 y 4, mejorando la similaridad con el inventario de referencia. El caso que ocupa información sobre uso de suelo de centro urbano, industrial y residencial mejora la estimación de algunas zonas residenciales (zona noroeste como Cerro Navia y Quinta Normal y zona este como Vitacura y Las Condes) pero la empeora en otras zonas residenciales como las comunas de Providencia y Ñuñoa (Zona

este más cercana al centro).

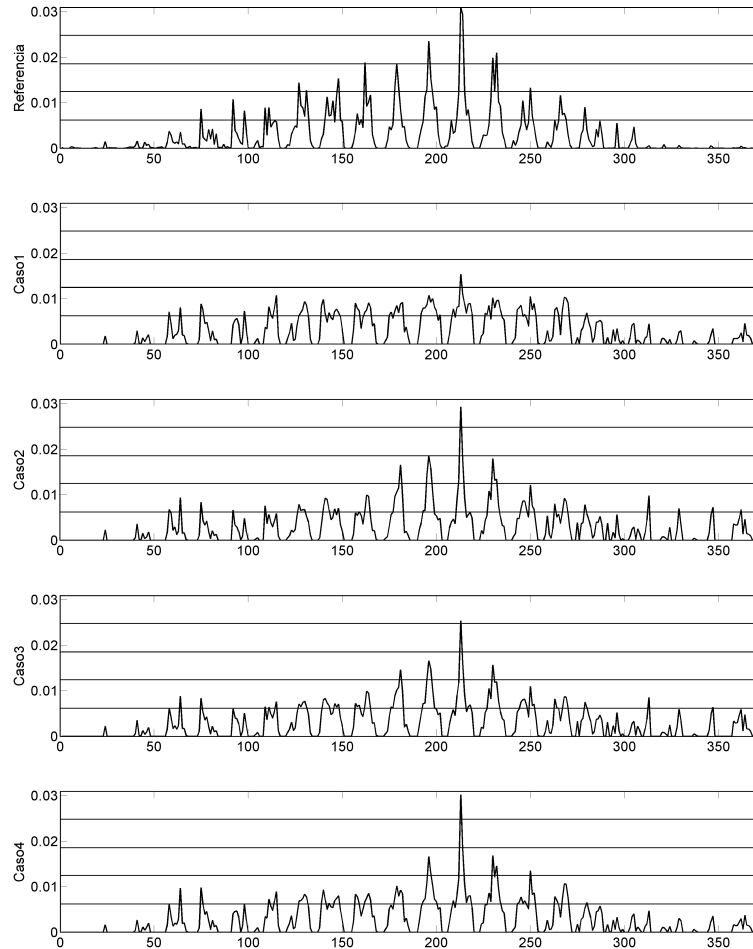


Figura 3.39: Series de escaneo de datos para el inventario CONAMA 2002 (referencia) y las estimaciones usando longitud de arcos y caracterización de arcos según uso de suelo.

Los mapas N° 2 y 3 mejoran la estimación en algunas zonas industriales, pero la empeoran en otras. Esto se debe a que no todas las zonas industriales tienen problemas de atochamiento vehicular. Por ejemplo, toda la zona oeste-norte de estos 2 mapas sobrestima las emisiones con una mayor magnitud que el caso N°1, debido a que esta es una zona industrial, pero sin mayor actividad vehicular.

Los gráficos de dispersión (figura 3.38) muestran una mejora de todos los casos al acercar los máximos hacia la línea central. Una gran parte de los valores máximos que estaban siendo subestimados previamente, ahora

quedan dentro de la zona de aceptación o muy cerca a ella. Además se ve una mejora para las magnitudes medias en los casos N° 2, 3 y 4 con respecto al caso que usa sólo longitud de arcos (N° 1).

Las series de escaneo (figura 3.39) presentan una buena representación de la forma del inventario de referencia. Los anchos de los peaks urbanos son representados de buena manera. Se aprecia que en la zona norte (última parte de la serie) existe una subestimación, que es lo que se aprecia en los mapas.

Analizando la tabla 3.15 muestra la mejora de los casos N° 2, 3 y 4 con respecto al N° 1 en el coeficiente de correlación y el porcentaje de aceptación. Entre los 3 casos no existen grandes diferencias cuantitativas. El caso N° 3 tiende a tener mejor correlación debido a que no comete el error de subestimación en la zona norte.

Finalmente se puede decir que el agregar información sobre uso de suelo de forma de ponderar de distinta forma los arcos que se encuentran en distintas zonas mejora la estimación del inventario. Esta mejora es capaz de reproducir los máximos del inventario. Las 3 metodologías presentadas muestran resultados similares encontrándose mejoras y degradaciones dependiendo de la metodología. Se debe notar que para el caso N° 3 se ocupa sólo información de donde se encuentran los centros urbanos, lo que mejora de gran manera el inventario y esta mejora es comparable a la mejora que se produce al agregar más información, como del tipo industrial o residencial. Esto demuestra que es de gran importancia el disponer de información sobre ubicación de centros urbanos, más que la información de las zonas industriales o residenciales.



### 3.3.3. Resultados usando como referencia inventario optimizado por modelación inversa

En esta sección se comparan una selección de las metodologías desarrolladas en la sección 3.3.2 con el inventario oficial mejorado usando técnicas de modelación inversa. El objetivo es analizar si las metodologías entregan mejores o peores resultados al ocupar el nuevo inventario como referencia.

Lo que se realizó en el capítulo 2 fue mejorar el inventario de CO para la región metropolitana. Este inventario es la suma del inventario de fuentes móviles y fijas. Sin embargo, las metodologías desarrolladas en este capítulo son para estimar la distribución espacial de fuentes móviles solamente.

Para poder realizar la comparación directamente se toma como aproximación que las modificaciones hechas al inventario oficial serán aplicadas solamente al inventario de fuentes móviles, considerando las fuentes fijas como constante. De esta manera, el inventario con el cual se van a comparar las diferentes metodologías será la resta entre el inventario mejorado y el inventario de fuentes fijas, obteniéndose un inventario de fuentes móviles mejorado. Esto se puede realizar debido a la linealidad de la metodología aplicada en la modelación inversa.

Para una mejor claridad, las comparaciones de los distintos casos elegidos con el inventario obtenido por modelación inversa serán agrupadas en 2 grupos.

#### 3.3.3.1. Grupo N°1

Para este grupo las metodologías usadas para comparar con el inventario optimizado por modelación inversa son:

- Caso N°1: Usando la densidad de largo de la red vial principal (arcos ESTRAUS). Ver detalles en sección 3.3.2.1.
- Caso N°2: Usando la densidad de largo de la red vial completa. Ver detalles en sección 3.3.2.1.
- Caso N°3: Usando mapas de densidad de población combinado con el índice socio-económico de porcentaje de población en condición de pobreza. Ver detalles en sección 3.3.2.4.
- Caso N°4: Usando la red vial principal ponderando los largos por los flujos vehiculares de cada arco. Ver detalles en sección 3.3.2.5.

Recordemos que la referencia ocupada en la sección anterior (Inventario oficial CONAMA 2002 de fuentes móviles) fue construido con la metodología MODEM, que ocupa como base una red ESTRAUS muy similar a la que se ocupa como red vial principal para el presente trabajo. La distribución espacial de las

emisiones en este inventario es asignada a esta red principal. Luego es esperable que los resultados empeoren para las metodologías que ocupan la red vial principal al usar como referencia el inventario mejorado con modelación inversa, ya que se pierde parte de esta correlación debido a la forma de calcular el inventario.

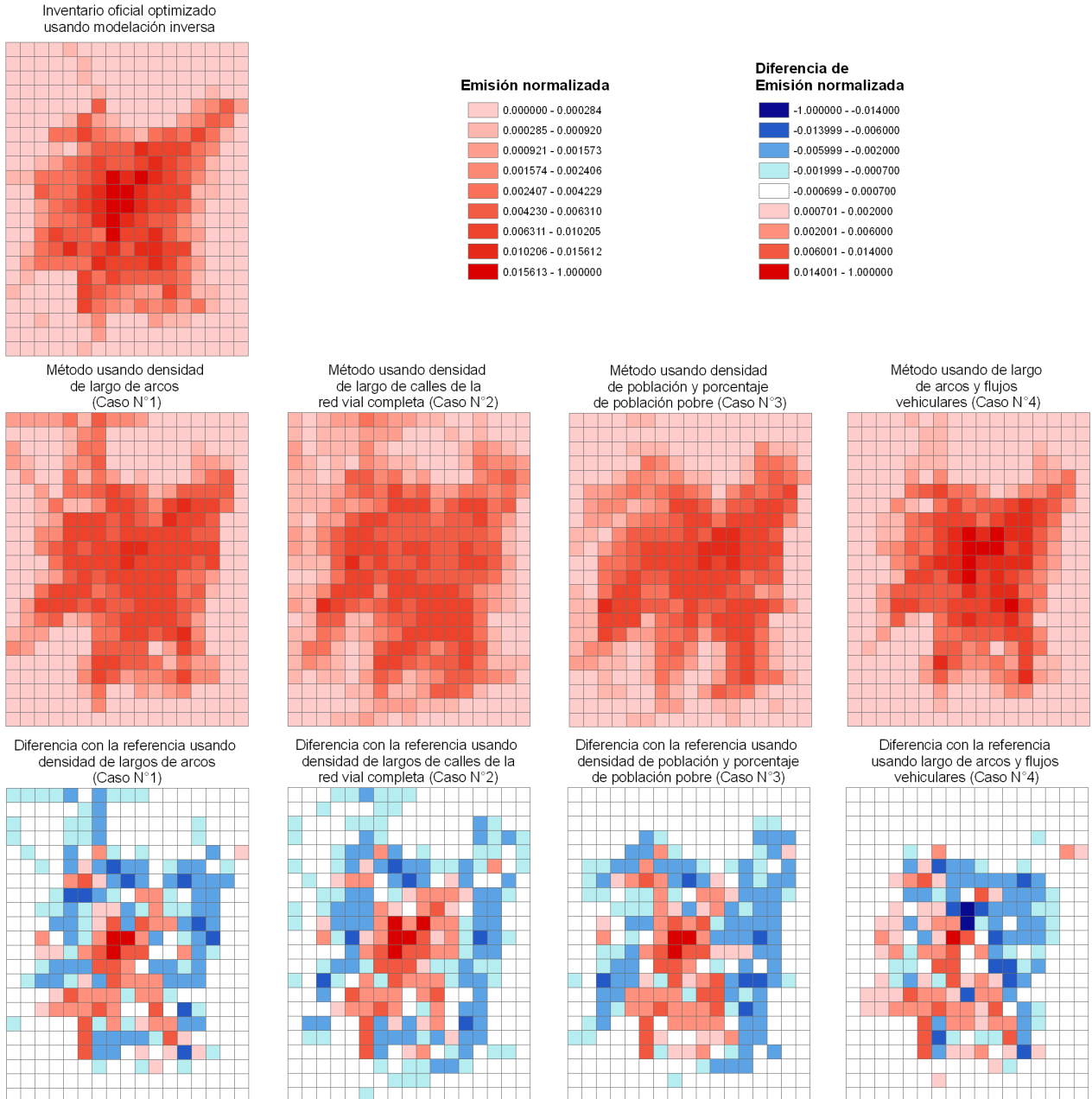


Figura 3.40: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

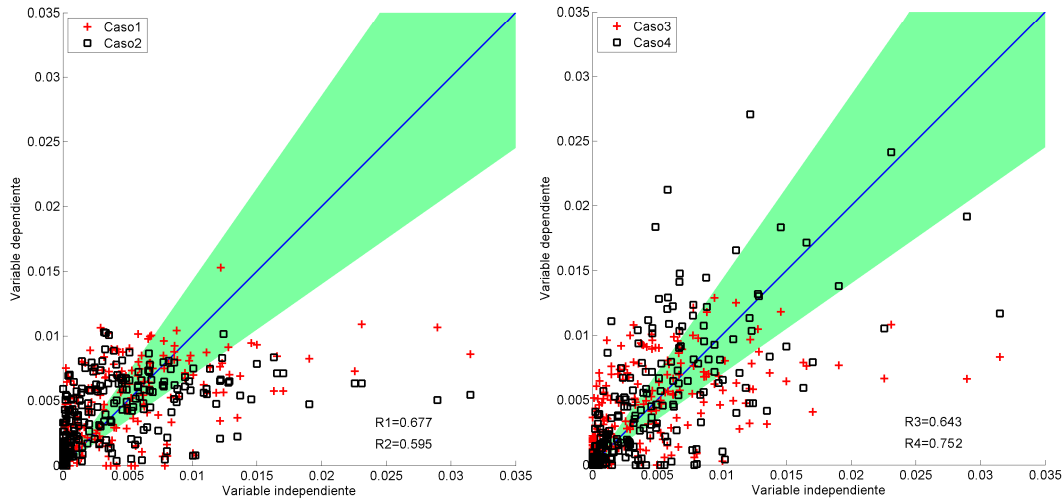


Figura 3.41: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando metodologías descritas previamente.

Tabla 3.16: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles optimizado (Nuevo) y oficial de CONAMA (Antiguo) usando metodologías descritas previamente.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Coef Corr Nuevo	0,677	0,595	0,643	0,752
Coef Corr Antiguo	0,799	0,647	0,723	0,945
% Aceptación Nuevo	52,14	36,10	49,47	61,23
% Aceptación Antiguo	55,35	35,56	51,34	72,99

Para el mapa que usa sólo la densidad de largos de la red vial principal (Caso N°1) los principales problemas eran la subestimación en el centro de la ciudad, algunas zonas industriales y sobrestimación en algunas zonas residenciales. Al realizar la comparación con el inventario obtenido mediante modelación inversa estos problemas siguen existiendo, como se puede ver en la figura 3.40. Al observar el mapa de dispersión se ve que sigue existiendo el umbral de representación de las emisiones de mayor magnitud del inventario de referencia. La correlación con respecto a la referencia disminuye de gran manera, desde 0.799 a 0.677, esto debido a lo explicado previamente sobre la forma de construcción del inventario oficial. Sin embargo, el porcentaje de celdas aceptadas no varía de gran manera (de 55 % a 52 %).

Como se puede apreciar en la figura 3.40 la estimación con la longitud de las calles de la red vial completa (Caso N°2) sigue teniendo las mismas deficiencias con respecto al inventario de referencia. Se aprecia que atribuye emisiones a lugares hacia las afuera de la ciudad, subestima de gran manera las emisiones en el centro asignado una mayor magnitud de emisiones a lugares con una mayor densidad de calles, que corresponden a zonas residenciales. Al observar el gráfico de dispersión para el caso N°2 se sigue apreciando

un umbral en el cual el método es incapaz de reproducir las emisiones de mayor magnitud. Este umbral sigue siendo menor que para el caso que usa sólo la red vial principal (caso N°1). La tabla 3.16 muestra una disminución del coeficiente de correlación en comparación a los resultados obtenidos previamente, pero esta disminución no es de la magnitud de la disminución para el caso N°1. El porcentaje de aceptación disminuye levemente, lo que muestra que no hay grandes diferencias para los valores medios y bajos.

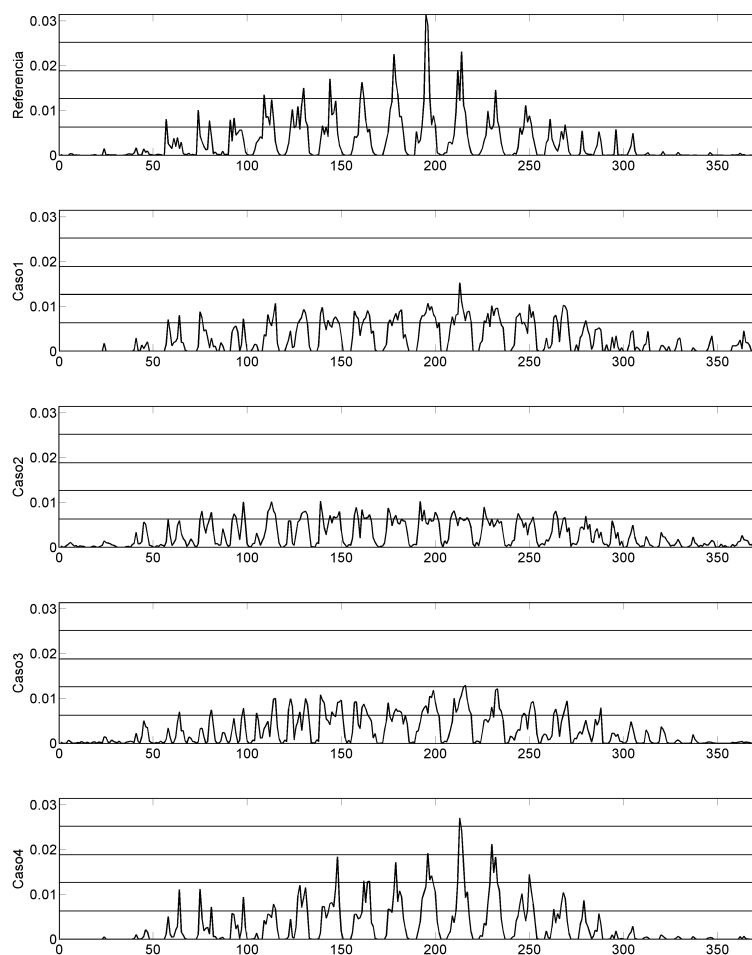


Figura 3.42: Series de escaneo de datos para el inventario oficial optimizado por modelación inversa y las estimaciones usando metodologías descritas previamente.

Para el método que ocupa mapas de densidad de población y índices socio-económicos (Caso N°3) persisten los mismos problemas y ventajas que tenía posteriormente, como la sobrestimación de las emisiones en zonas residenciales de alto nivel socio-económico, subestimación de las emisiones en zonas industriales

que tienen baja densidad de población y se encuentran en una zona de bajo nivel socio-económico y mejora en la zona central de la ciudad con respecto a metodologías que ocupan sólo densidad de población. El coeficiente de correlación desmejora con respecto a la comparación con el inventario oficial y el porcentaje de aceptación disminuye levemente.

La estimación que usa los largos y los flujos de los arcos de la red vial principal sufre una gran desmejora. Los valores máximos ya no son representados de tan buena manera como antes, apreciándose una mayor dispersión de los puntos en el gráfico de dispersión. De esta forma el coeficiente de correlación disminuye de gran manera, pero sigue siendo mayor que todos los otros casos. En las series de escaneo se puede apreciar que el máximo de toda la serie del inventario de referencia cambia con respecto al inventario oficial CONAMA, de esta forma la metodología que usa flujos vehiculares que antes representaba de buena forma estos máximos, ahora comete un error lo que ayuda a disminuir su coeficiente de correlación. El porcentaje de aceptación también decae, lo que se ve reflejado por la mayor dispersión de los datos. Recordemos que la gran correlación de esta metodología con respecto al inventario oficial CONAMA se debía a que en la metodología MODEM se multiplica el flujo por el largo del arco, que es lo que se realiza en esta metodología. De esta forma nuevamente al optimizar el inventario parte de esta correlación se pierde.

Como comentario final se puede decir que todas las metodologías de este grupo tienen una desmejora con respecto a la comparación con el inventario CONAMA 2002, con una mayor desmejora en aquellos casos que ocupan la red vial principal. Sin embargo entre las metodologías se sigue manteniendo el mismo orden en términos de cuál es capaz de representar de mejor forma el inventario de referencia.

### **3.3.3.2. Grupo N°2**

Para este grupo las metodologías usadas para comparar con el inventario optimizado por modelación inversa son:

- Caso N°1: Usando los largos de arcos de la red vial principal ponderado por densidad de población mejorada y el porcentaje de población en condición de pobreza. Ver detalles en sección 3.3.2.6.
- Caso N°2: Usando el largo de los arcos y clasificación de arcos según categoría de flujo (bajo, medio y alto). Ver detalles en sección 3.3.2.7.
- Caso N°3: Usando el largo y la capacidad de los arcos de la red vial. Ver detalles en sección 3.3.2.8.
- Caso N°4: Usando el largo de los arcos y clasificación según el uso de suelo en el cual se encuentre cada arco, usando sólo información de centros urbanos. Ver detalles en sección 3.3.2.9.

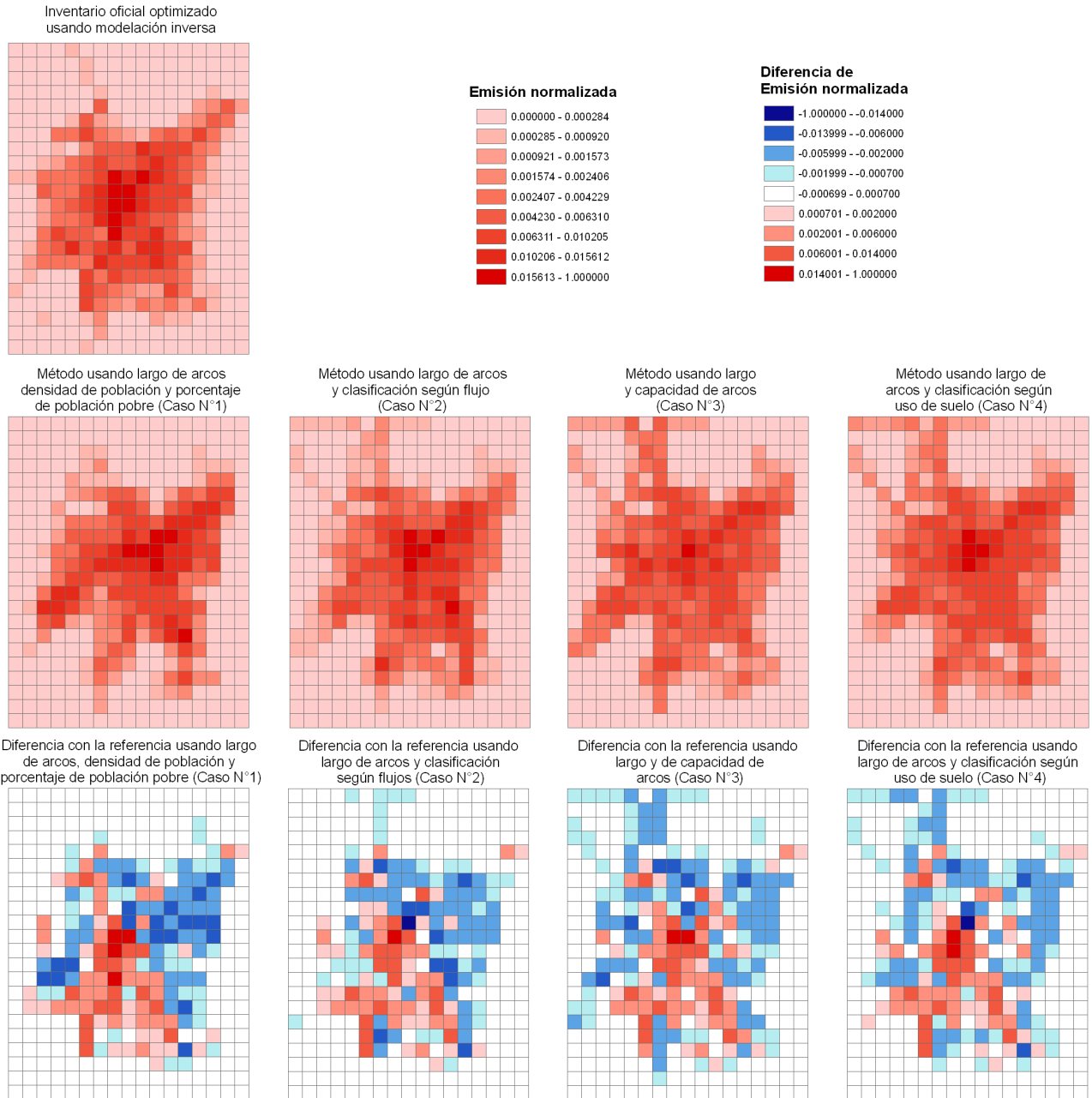


Figura 3.43: Mapas de emisión normalizada y diferencias con respecto a la referencia.

Recordemos que el caso N°1, que corresponde a ponderar los largos de los arcos por densidad de población y factores socio-económicos, tenía mejoras y desmejoras con respecto al uso de solamente los largos de los arcos. Al compararlo con respecto al inventario optimizado no se observan mejoras. Siguen existiendo los mismos problemas de sobrestimación en zonas residenciales de nivel socio-económico alto, subestimación en el centro y áreas industriales. La correlación y el porcentaje de aceptación disminuyen con respecto a la comparación con el inventario oficial.

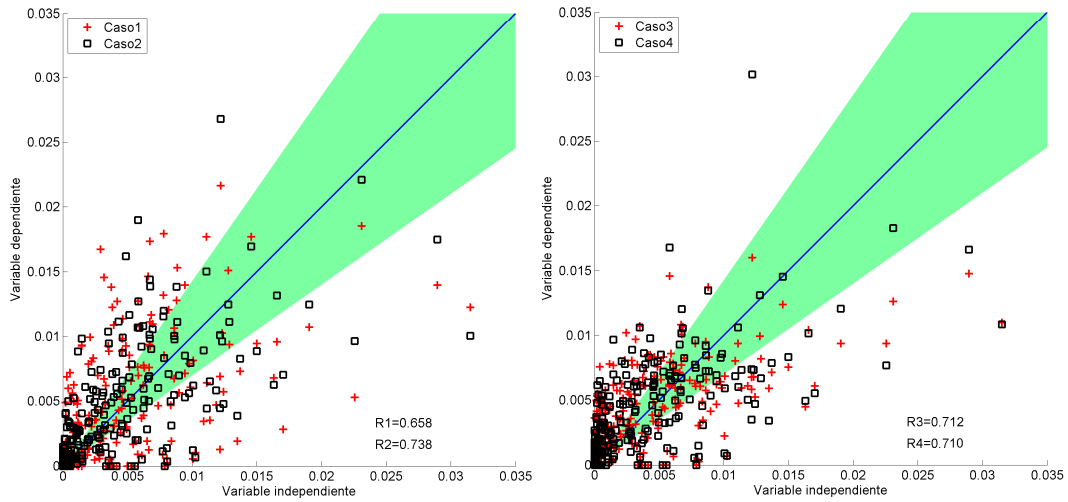


Figura 3.44: Gráfico de dispersión para los la estimación del inventario de fuentes móviles usando metodologías descritas previamente.

Tabla 3.17: Coeficiente de correlación R y porcentaje de aceptación de celdas para la estimación del inventario de fuentes móviles optimizado (Nuevo) y oficial de CONAMA (Antiguo) usando metodologías descritas previamente.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Coef Corr Nuevo	0,658	0,738	0,712	0,710
Coef Corr Antiguo	0,795	0,936	0,850	0,887
% Aceptación Nuevo	56,95	54,55	52,67	52,67
% Aceptación Antiguo	60,96	67,38	58,56	60,96

La metodología que ocupa largo de arcos y clasificación de flujos (Caso N°2) muestra un comportamiento similar al caso N°4 de la sección anterior (que ocupa los flujos directamente) por las mismas razones mencionadas previamente. Recordemos que ambas metodologías ocupan la misma fuente de información, sólo que para la metodología tratada en esta sección se pasa por una clasificación previa de los flujos.

La metodología que ocupa la capacidad de los arcos para calcular las emisiones (Caso N°3) sigue mostrando las mismas deficiencias de antes, al no poder representar los valores máximos del inventario, existiendo un umbral que se aprecia en los gráficos de dispersión.

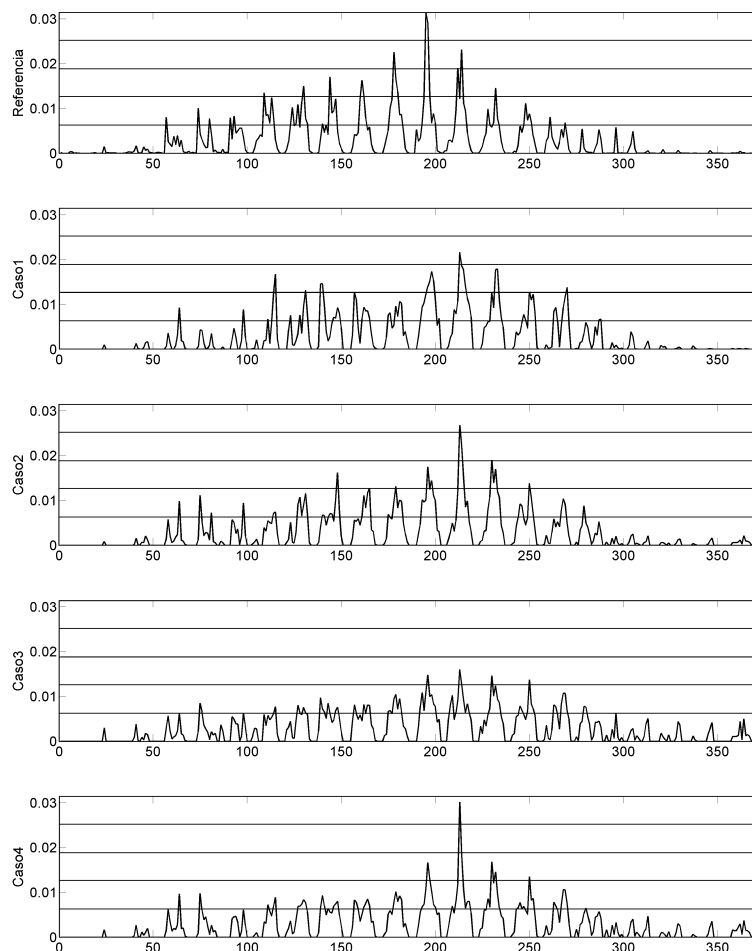


Figura 3.45: Series de escaneo de datos para el inventario oficial optimizado por modelación inversa y las estimaciones usando metodologías descritas previamente.

Para el caso N°4 no mejora la estimación del inventario disminuyendo su coeficiente de correlación hasta el mismo nivel que el coeficiente de correlación del caso N°3, a pesar de que para la comparación con el inventario oficial se obtenía un mejor coeficiente de correlación con esta metodología. Esto se debe a que la zona de emisión máxima ya no está centrada en la zona de centro urbano.

Nuevamente, al igual que en la sección anterior, no existen mejoras al comparar las distintas metodologías con respecto al inventario optimizado mediante modelación inversa. Todas las metodologías desmejoran disminuyendo su coeficiente de correlación y su porcentaje de aceptación. Debido a que todas las metodologías en este grupo son creadas a base de la red vial principal luego existe una desmejora similar en todas.



### 3.4. Conclusiones y comentarios

En este capítulo se han presentado diversos métodos para estimar la distribución espacial de las emisiones de CO para la ciudad de Santiago de Chile. Las primeras metodologías aplicadas fueron las desarrolladas e implementadas en los trabajos Tuia et al 2007 y Ossés et al 2007. En ambos trabajos se obtienen conclusiones similares sobre los errores cometidos, donde el principal es que no son capaces de representar los máximos de emisiones que ocurren en el centro de la ciudad, en vías con alto flujo y en centros industriales. Al aplicar las metodologías, pero ahora para una mega-ciudad como Santiago de Chile, se encontraron resultados muy similares a los descritos previamente.

Luego de aplicar las metodologías provenientes de los trabajos previos, se aplicaron nuevas con el fin de corregir los errores encontrados previamente. En la sección 3.3.2.4 se buscó mejorar la metodología que ocupa sólo información indirecta, en este caso, densidad de población. Ésta consistió en ponderar la densidad de población por algún factor socioeconómico representando las diferencias de uso de transporte público o transporte privado en los distintos sectores de la ciudad. Para el caso aplicado se encontró que la estimación mejora para los 7 índices aplicados, y la magnitud de la mejora depende del tipo de factor que se ocupe.

El siguiente paso fue partir como base de la red vial principal (red ESTRAUS) y ocupar el enfoque de los largos de arcos agregando otro tipo de información de forma de tratar de mejorar la estimación. El primer paso fue ocupar directamente información que se usa en el cálculo de las emisiones usando el modelo MODEM: flujos vehiculares, velocidades medias y una combinación de ambas (sección 3.3.2.5). Los resultados mostraron que al agregar la información de flujos vehiculares se obtienen grandes mejoras. Sin embargo al combinar flujos y velocidades los resultados no mejoran con respecto a sólo ocupar flujos vehiculares. Luego, para metodologías simples, no siempre los resultados mejoran al agregar información debido a las simplificaciones realizadas en el proceso de confección del enfoque obteniéndose resultados más lejanos de la referencia. Agregar la información de manera que los resultados mejoren implica complicar la metodología, que no forma parte de los objetivos de este trabajo.

Una vez determinado cual debe ser el camino a seguir para mejorar los métodos, que es la estimación de flujos, en lo siguiente se pretende estimar esta componente. Debido a que se obtuvieron mejoras en la estimación al agregar factores socio-económicos a la estimación con métodos indirectos, se ponderaron los largos de los arcos por la densidad de población y el nivel socio-económico dependiendo de donde se encontrara el arco. Los resultados mostraron que se obtienen mejoras y desmejoras con respecto a sólo ocupar los largos de los arcos.

Para poder aplicar la metodología que combina los largos de los arcos y los flujos vehiculares es necesario disponer de un modelo de transporte que entregue los flujos. Lo que se busca es tratar de no ocupar el modelo de transporte, debido a que no todas las ciudades disponen de estos tipos de modelos. Una forma de realizar

esto es idear una red vial principal y luego clasificar cada arco dentro de 3 categorías de flujo: alto, medio y bajo. Esta clasificación podría ser realizada con mediciones de flujo en algunas calles, y luego por similitud clasificar las calles restantes. De esta forma, al aplicar el enfoque con los largos de los arcos se pondera cada arco por un factor dependiendo la categoría en la cual se encuentra. De esta forma se obtuvieron resultados muy similares en comparación a cuando se ocupan los flujos directamente. Otro ejercicio realizado fue el de considerar sólo arcos de flujo medio y alto, reduciendo en más de la mitad la cantidad de arcos de la red. Aquí también se obtuvieron buenos resultados, encontrando problemas en zonas de baja emisión.

Se obtienen buenos resultados al ocupar información de flujos vehiculares, pero todavía queda la pregunta de que si es posible mejorarlos sin ocupar este tipo de información. Para esto se idearon 2 metodologías. La primera consiste en usar la capacidad vehicular de los arcos como un estimador de flujo vehicular (sección 3.3.2.8) debido a que es un dato fácil de obtener en comparación con los flujos. Los resultados mejoran con respecto al uso de solamente los largos de los arcos, pero todavía permanecen los problemas de mala representación de los máximos de emisión.

El segundo enfoque aplicado consiste en tomar la idea descrita en Tuia et al 2007 y Ossés et al 2007 de dar distinto peso a los arcos que se encuentran en zonas de centro urbano, industriales o residenciales. Para esto se ocupó un mapa de uso de suelo donde para cada zona se muestra el porcentaje de uso de suelo correspondiente a cada categoría. De esta forma se aplicaron 3 casos, donde se usan los 3 tipos de información (centro urbano, industrial y residencial), sólo 2 tipos (centro urbano e industrial) y sólo 1 tipo (centro urbano). En todos los casos se obtienen resultados similares, concluyéndose que es de mayor importancia identificar las zonas de centro urbano ya que no existen mejoras significativas al agregar la información de tipo industrial o residencial. Los resultados presentan mejoras con respecto a sólo ocupar los largos de los arcos obteniéndose la representación de los máximos de emisión, pero no con la calidad de representación que se obtiene al ocupar la información de flujos vehiculares.

Al comparar una selección de las metodologías aplicadas anteriormente con el inventario obtenido mediante modelación inversa, se obtienen principalmente desmejoras en la estimación, las cuales se acentúan en los inventarios que ocupan la red vial principal como base de la estimación. Esto se debe a que el inventario con el cual se hicieron las primeras comparaciones (Oficial de CONAMA 2002) fue construido con el modelo MODEM, donde las emisiones se atribuyen espacialmente a los arcos de la red ESTRAUS, que es la red vial principal ocupada en este trabajo. La modelación inversa cambia esta distribución espacial, disminuyendo la correlación que existía con la red vial principal.

Como comentario final se puede decir que en el uso de metodologías simples para estimar la distribución espacial de un inventario de emisiones no siempre el agregar más información implica una mejora en los resultados, ya que es necesario utilizar enfoques más complejos para que los resultados no se degraden. De esta forma es más conveniente identificar cuales son las variables más importantes y realizar un mayor

esfuerzo en estimarlas de buena forma.

## Capítulo 4

# Conclusiones y comentarios finales

Este trabajo incluye dos áreas de investigación que se relacionan estrechamente entre sí. El elemento común entre ellas son los inventarios de emisión de monóxido de carbono en zonas urbanas. La presente investigación desarrolla metodologías de mejoramiento de las emisiones y su variación espacial, a partir de mediciones de calidad de aire y empleando información geográfica de fácil acceso.

A través del presente trabajo dos grandes objetivos se han cumplido. En una primera instancia se optimizó un inventario de CO para la ciudad de Santiago de Chile usando técnicas de modelación inversa. Para lograr este objetivo fue necesario realizar una serie de pasos previos, como un análisis de las observaciones en las estaciones de monitoreo, las cuales son la base para la optimización del inventario, una validación de las simulaciones meteorológicas y de dispersión de CO y una validación del método de modelación inversa utilizado.

En resumen, se obtuvo un inventario de emisiones con características similares al inventario inicial con cambios globales de un 2.1 % menos de emisiones. Sin embargo estos cambios corresponden a una disminución de emisiones en la zona centro-oeste y aumento en la zona este-sur y este-norte como también a cambios en las emisiones sólo en las horas de la mañana, que en el detalle muestra diferencias superiores al 100 % en algunos puntos con respecto a la referencia.

Un segundo objetivo cumplido fue el de aplicar y desarrollar métodos para obtener la distribución espacial de un inventario de fuentes móviles de CO para la ciudad de Santiago. Basándose en las metodologías desarrolladas en Tuia et al 2007 se aplicaron éstas y se desarrollaron nuevas para tratar de resolver los problemas de las anteriores obteniéndose resultados satisfactorios.

Las metodologías aplicadas ocupan distintos niveles de información, de forma que dejar abierta la posibilidad de aplicar las metodologías en otras ciudades dependiendo del tipo de información que se posea. Además se encontró que no siempre agregar más información genera mejoras en los resultados, ya que es

necesario utilizar enfoques más complejos para que los resultados no se degraden.

Con respecto a los objetivos secundarios relacionados con modelación inversa se concluye lo siguiente:

- Mediante un análisis de las observaciones se determinaron series de tiempo que parecen no representar la realidad y estaciones que no cumplen con un patrón esperado.
- Se instaló y usó satisfactoriamente la plataforma Polyphemus, encontrando resultados aceptables para CO comparando con las observaciones de la red de monitoreo MACAM2 y con trabajos previos de modelación de la calidad del aire sobre la ciudad de Santiago.
- Se adaptó la metodología OI al caso de estudio generando 3 modificaciones. Por una parte se resolvió el funcional de minimización con restricciones para asegurar una solución positiva. Además, se agregó un término de peso en el funcional usando la metodología de la curva L (L-curve). Finalmente, se incorporó un término de condicionamiento de la matriz de sensibilidad H aplicado a la covarianza del error de las emisiones con el fin de dar mayor confianza a las emisiones colocadas con los puntos de observación y así evitar la divergencia del método.

Con respecto a los objetivos secundarios relacionados con la estimación de la distribución espacial de las emisiones se concluye lo siguiente:

- Se desarrollaron y aplicaron metodologías para estimar la distribución espacial de las emisiones que ocupan información que no había sido utilizada en trabajos previos. Se encontró que al utilizar factores socioeconómicos en combinación con mapas de densidad de población los resultados mejoran con respecto a sólo usar densidad de población, pero la mejora no es clara al combinar la red vial principal, factores socioeconómicos y densidades de población. Sí se obtienen mejoras importantes al utilizar por separado información de flujos vehiculares, velocidades medias, capacidades de vías y usos de tierra en combinación con una red vial principal.
- Los resultados fueron comparados no sólo con un inventario oficial, sino que también con el inventario obtenido mediante modelación inversa encontrándose con este último resultados levemente degradados debido a relación directa existente entre la red ESTRAUS y el inventario oficial, la cual se ve perjudicada al optimizar el inventario.

## 4.1. Trabajo Futuro

Con respecto a la parte de modelación inversa y simulaciones mediante modelo de dispersión queda mucho por hacer. En el presente trabajo se simuló una traza simple como el CO, que puede ser considerada

cuasi-inerte para el caso de estudio. El siguiente paso es incorporar química a las simulaciones, lo que significa simular para todas las demás especies, como por ejemplo  $NO_x$  y  $O_3$ . Luego es necesario validar el modelo al usar el módulo químico.

Un aspecto a tomar en cuenta es la altura de capa de mezcla del modelo de dispersión (BLH). En el presente trabajo no se realizó una validación de este parámetro por la falta de mediciones. Sin embargo la BLH es un factor determinante en las concentraciones finales que se obtienen del modelo de química y transporte. Luego es necesario incorporar una validación de la BLH en los trabajos futuros, para disminuir las incertidumbres con respecto al modelo de calidad de aire.

Luego de validar la química del modelo, se puede realizar la modelación inversa para mejorar los inventarios usados. Para realizar este trabajo ya no es posible ocupar la metodología OI debido a las grandes no-linearidades existentes al incorporar química. Por esto otros métodos como 4d-Var deben ser desarrollados y aplicados al caso de estudio. Estos métodos también requieren la obtención de la matriz de sensibilidades H, luego debido al aumento en el número de inventarios a ser optimizados es necesario calcular la matriz H mediante el modelo adjunto para ahorrar tiempo computacional. También es necesario realizar una refinación del procedimiento por el cual la matriz H es preconditionada en el caso de colocación de observaciones y emisiones.

Con respecto a la parte de estimación de la distribución espacial de un inventario de emisión el trabajo futuro a realizar es aplicar las metodologías desarrolladas a otras mega-ciudades en Sudamérica, para las cuales no existe un inventario de emisiones de referencia. Además, nuevas metodologías de cálculo de emisiones se están aplicando en Chile (como por ejemplo, método IVE) las cuales no estiman la distribución espacial del inventario, luego para esto se podría usar alguno de los métodos desarrollados, dependiendo del nivel de información que se posee. Otra aplicación de esta metodología es su fácil extensión al cálculo de proyecciones a futuro de la distribución espacial de las emisiones, lo que no es posible realizar con modelos convencionales de cálculo de emisiones como MODEM.

## Bibliografía

- [1] Alcañuz, R.(2007), *de estratos a la cuenca de Santiago. Un estudio de sensibilidad usando el modelo MM5*, M.Sc. Atmospheric Sciences thesis, Geophys. Dep., Univ. of Chile, Santiago, Chile.
- [2] Bergamaschi, P., R. Hein, M. Heimann, and P. J. Crutzen (2000). *Inverse modeling of the global CO cycle, 1. Inversion of CO mixing ratios*, J. Geophys. Res., 105(D2), 1909-1928.
- [3] Boutahar, J., Lacour, S., Mallet, V., Quelo, D., Roustan, Y., and Sportisse, B.: *Development and validation of a fully modular platform for numerical modelling of air pollution: POLAIR*, Int. J. Env. and Pollution, 22, 17-28, 2004
- [4] Corvalán R, Osses M, 2002. *Hot Emission Model For Mobile Sources: Application To The Metropolitan Region Of The City Of Santiago-Chile*, Journal of the Air & Waste management Association, 1047-3289(52 (2)): pp. 167 -174, Feb 2002
- [5] Davoine, X. Bocquet, M. *Inverse modelling-based reconstruction of the Chernobyl source term available for long-range transport*. Atmos. Chem. Phys, 7, 1549-1564, 2007.
- [6] Dudhia, J., 1989. *Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model*. Monthly Weather Review 46, 3077-3107.
- [7] Earth Observing Laboratory (2006), *VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study (VOCALS), VOCALS-Southeast Pacific Regional Experiment (REx)*, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo. (Available at <http://www.joss.ucar.edu/>)
- [8] Enting, I. G., *Inverse problems in atmospheric constituent transport*, Cambridge, New York, 2002.
- [9] Gallardo, L., Olivares, G., Aguayo, A., Langner, J., Aarhus, B., Gidhagen, L., 2000. *Regional Dispersion of Oxidized Sulfur over Central Chile Using the HIRLAM - MATCH System. Strengthening of the Air Quality Information System (Working area 2): Application of a regional-scale model over the central part of Chile*. First Advancement Report. National Commission for the Environment. Available at: [http://www.dim.uchile.cl/~lgallard/S\\_disp/HIRLAM-MATCH/hirlam\\_match\\_jan1998.pdf](http://www.dim.uchile.cl/~lgallard/S_disp/HIRLAM-MATCH/hirlam_match_jan1998.pdf)

- [10] Garreaud, R., J. Rutlland & H. Fuenzalida. *Coastal lows along the subtropical west coast of South America: Mean structure and evolution*. Mon. Wea. Rev. 130: 75-88, 2002.
- [11] Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R. *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Tech - Note TN-398+ STR, 1995.
- [12] Hakami, A, Henze, D. K., Seinfeld, J. H., Chai, T. Tang, Y. Carmichael, G. R. *Adjoint inverse modelling of black carbon during the Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment* Journal of Geophysical Research, Vol 110, D14301, 2005.
- [13] Hansen P.C., O'Leary D.P. *The use of the L-curve in the regularization of Ill-Posed Problems*. SIAM J. SCI. COMPUT. Vol. 14, No 6, pp 1487-1503, November 1993.
- [14] Hong, S.Y., and H.L. Pan, 1996: *Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model*. Mon. Wea. Rev., 124, 2322-2339.
- [15] Jenks, George F: *Generalization in statistical mapping.*, Annals of the Association of American Geographers 53: 15-26, 1963.
- [16] Kain, J.S., Fritsch, J.M., 1990. *A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization*. Journal of Atmospheric Science 47, 2784-2802.
- [17] Kalnay and co-authors, *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.
- [18] Louis, J.-F.: *A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere*, Boundary-Layer Meteor., 17, 187-202, 1979
- [19] Luenberger, D.G. *Optimization by vector space methods*. John-Wiley & Sons, Inc. New-York, 1969.
- [20] Mallet, V., Quélo, D., and Sportisse, B., 2005, *Software architecture of an ideal modeling platform in air quality - A first step: Polyphemus*, Technical Report 11, CEREAS.
- [21] Mallet, V., Quélo, D., Sportisse, B., Ahmed de Biasi, M., Debry, E., Korsakissok, I., Wu, L, Rousttan, Y., Sartelet, K., Tombette, M., and Foudhil, H., *Technical Note: The air quality modeling system Polyphemus*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 7, 6459-6486, 2007
- [22] McPherson, R.D., K.H. Bergman, R.E. Kistler, G.E. Rasch and D.S. Gordon, 1979: *The NMC operational global data assimilation system*. Mon. Wea. Rev., 107, 1445-1461.
- [23] Moxley, J.M. and Cape, J.N. *Depletion of carbon monoxide from the nocturnal boundary layer*, Atmospheric Environment, Volume 31, Issue 8, April 1997, Pages 1147-1155.



- [24] Müller, J.-F., Stavrakou, T.: *Inversion of CO and NO<sub>x</sub> emissions using the adjoint of the IMAGES model*, Atmos. Chem. Phys., 5, 1157-1186, 2005.
- [25] Margarita Ossés de Eicker, Rainer Zah, , Rubén Triviño and Hans Hurni: *Spatial accuracy of a simplified disaggregation method for traffic emissions applied in seven mid-sized Chilean cities*, Atmospheric Environment, in press (2007).
- [26] Palmer, P. I., D. J. Jacob, D. B. A. Jones, C. L. Heald, R. M. Yantosca, J. A. Logan, G. W. Sachse, and D. G. Streets, *Inverting for emissions of carbon monoxide from Asia using aircraft observations over the western Pacific*, J. Geophys. Res., 108(D21), 8828, doi:10.1029/2003JD003397, 2003.
- [27] Pan, L., Chai, T., Carmichael, G.R., Tang, Y., Streets, D., Woo, J., Friedli, H.R., Radke, L.F., 2007. *Top-down estimate of mercury emissions in China using four-dimensional variational data assimilation (4D-Var)*. Atmospheric Environment 41, 2804-2819.
- [28] Pétron, G., Granier, C., Khattatov, B., Lamarque, J. F., Yudin, V., Müller J. F., and Gille, J.: *Inverse modeling of carbon monoxide surface emissions using climate monitoring and diagnostics laboratory network observations*, J. Geophys. Res., 107(D24), 4761, doi:10.1029/2001JD001305, 2002.
- [29] Power, H., Baldasano, J.M., *Air pollution emissions inventory*, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1998.
- [30] Quélo, D. Mallet, V. Sportisse, B. *Inverse modeling of NO<sub>x</sub> emissions at regional scale over northern France: Preliminary investigation of the second-order sensitivity*. Journal of Geophysical Research, Vol 110, D24310, 2005.
- [31] Robertson, L., Langner, J., Engardt, M., 1996: *MATCH-Meso-scale Atmospheric Transport and Chemistry modelling system. Basic transport model description and control experiments with 222Rn*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, RMK-70.
- [32] Roustan, Y. Bocquet, M. *Sensitivity analysis for mercury over Europe* Journal of Geophysical Research, Vol 111, D14304, 2006.
- [33] Rutllant, J. and Garreaud, R., 1995. *Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting*. Environmental Monitoring and Assessment, 34, 223-244.
- [34] Schmitz, R, 2005: *Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile*, Atmospheric Environment, Vol 39 (2005) 2035-2047.
- [35] Seaman, N., Michelson, S., 2000. *Mesoscale meteorological structure of a high ozone episode during the 1995 NARSTO-Northeast study*. Journal of Applied Meteorology 39, 384-398.
- [36] J.Seinfeld, S.Pandis: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiley, USA (2006).

- [37] Taylor, K. *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*, Journal of Geophysical research, Vol 106 (2001), pgs 7183-7192
- [38] Troen, I. and Mahrt, L.: *A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation*, Boundary-Layer Meteor., 37, 129-148, 1986.
- [39] Devis Tuia, Margarita Ossés de Eicker, Rainer Zah, Mauricio Osses, Erika Zarate and Alain Clappier: *Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities*, Atmospheric Environment, Volume 41, Issue 17, June 2007, Pages 3658-3671.
- [40] Verwer, J. G., Hundsdorfer, W., and Blom, J. G.: *Numerical time integration for air pollution models*, Surveys on Math. for Indus., 10, 107-174, 2002.
- [41] Wilfried Winiwarter, Chris Dore, Garry Hayman, Diamando Vlachogiannis, Nikolaos Gounaris, John Bartzis, Sam Ekstrand, Matteo Tamponi and Giuseppe Maffei: *Methods for comparing gridded inventories of atmospheric emissions, application for Milan province, Italy and the Greater Athens Area, Greece*, The Science of The Total Environment, Volume 303, Issue 3, 1 March 2003, Pages 231-243.
- [42] Winiwarter, W.; D., Vlachogiannis; N., Gounaris; J., Bartzis; S., Ekstrand; M., Tamponi; G., Maffei; C., Licotti; C., Dore; G., Hayman (2001): *Final Method Evaluation: Development of Spatially Resolved Emission Inventories for Milan and Athens* WP8000 of the EC research project IMPRESAREO; ARC Seibersdorf research Report, ARC.S-0154, 60 pp., October 2001.
- [43] Winiwarter W., S. Ekstrand, D. Johansson (2000): *Evaluation, Validation and Refinement of Spatially Resolved NOx Inventories*. IMPRESAREO - Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories Using Earth Observation Data, WP 4000 . WW4/1200/001/1.3, Seibersdorf Research Report, OEFZS.S-0080, Seibersdorf.
- [44] Yumimoto, K. Uno, I. *Adjoint inverse modelling of CO emissions over Eastern Asia using four dimensional variational data assimilation* Atmospheric Environment 40 (2006) 6836-6845.

## **Anexo A**

# **Mapas para Santiago y sus alrededores**

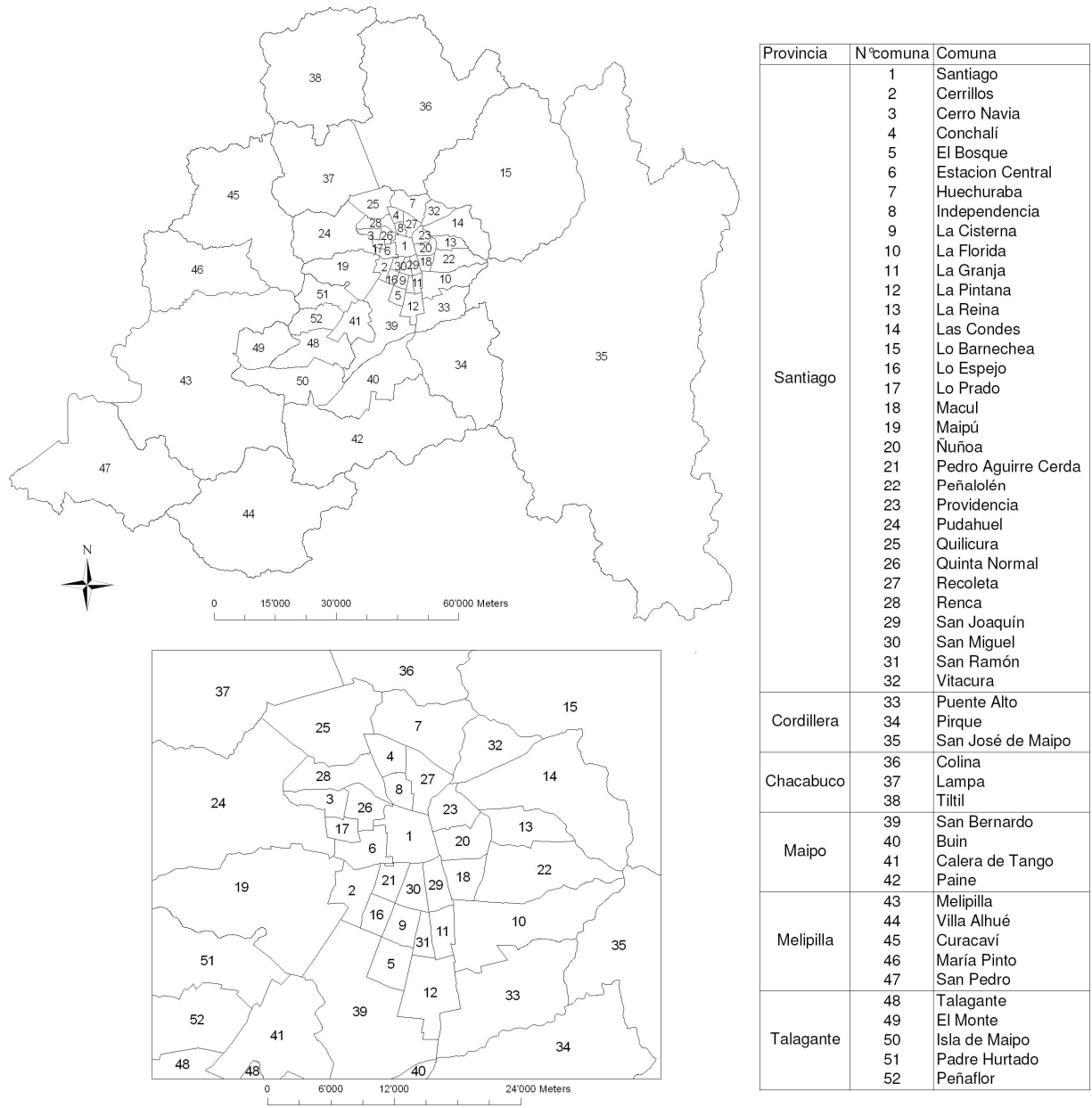


Figura A.1: División administrativa de la Región Metropolitana. Ref: otas.gorem.cl

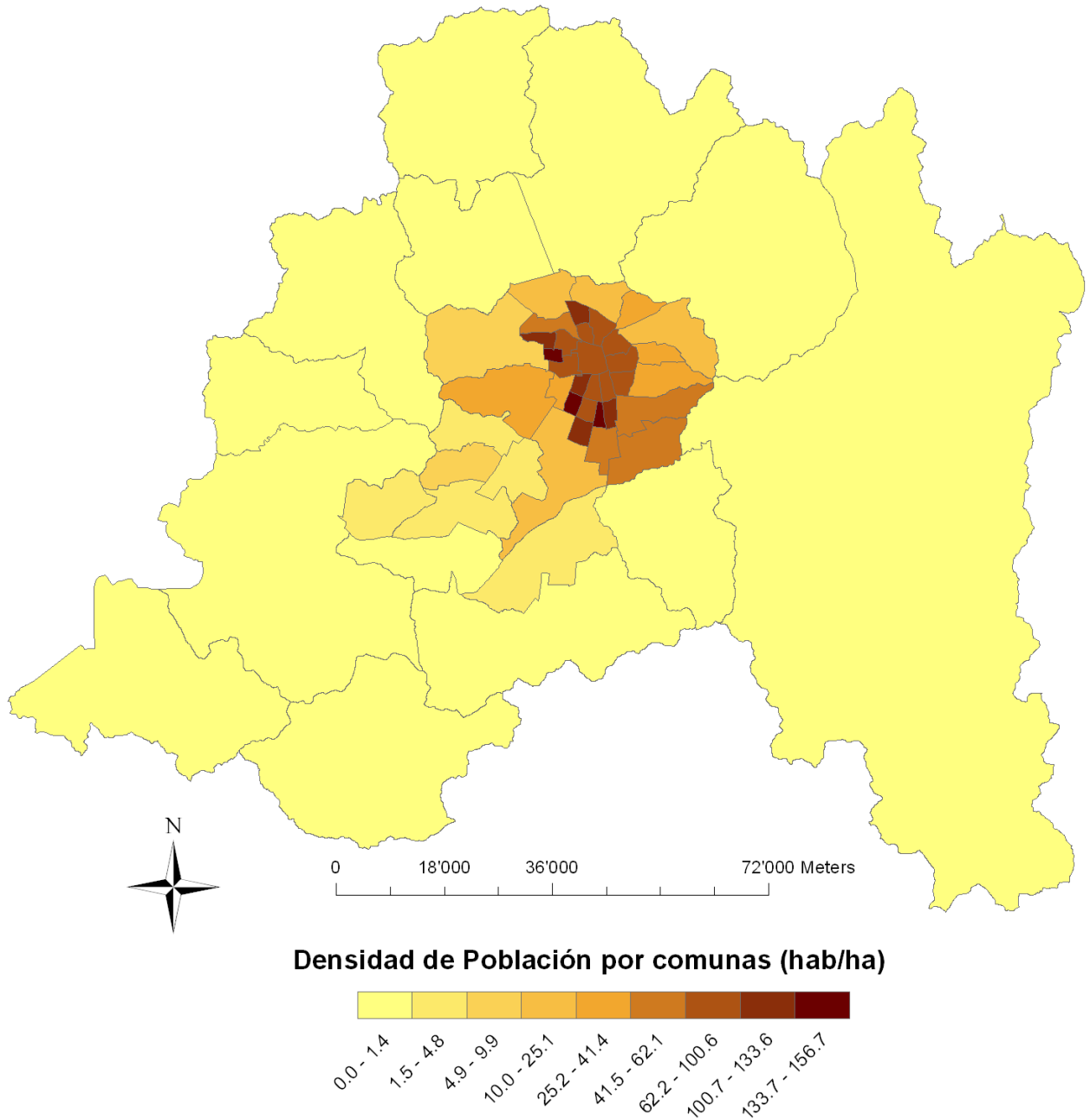


Figura A.2: Densidad de población por comunas año 2002. Ref: otas.gorerm.cl

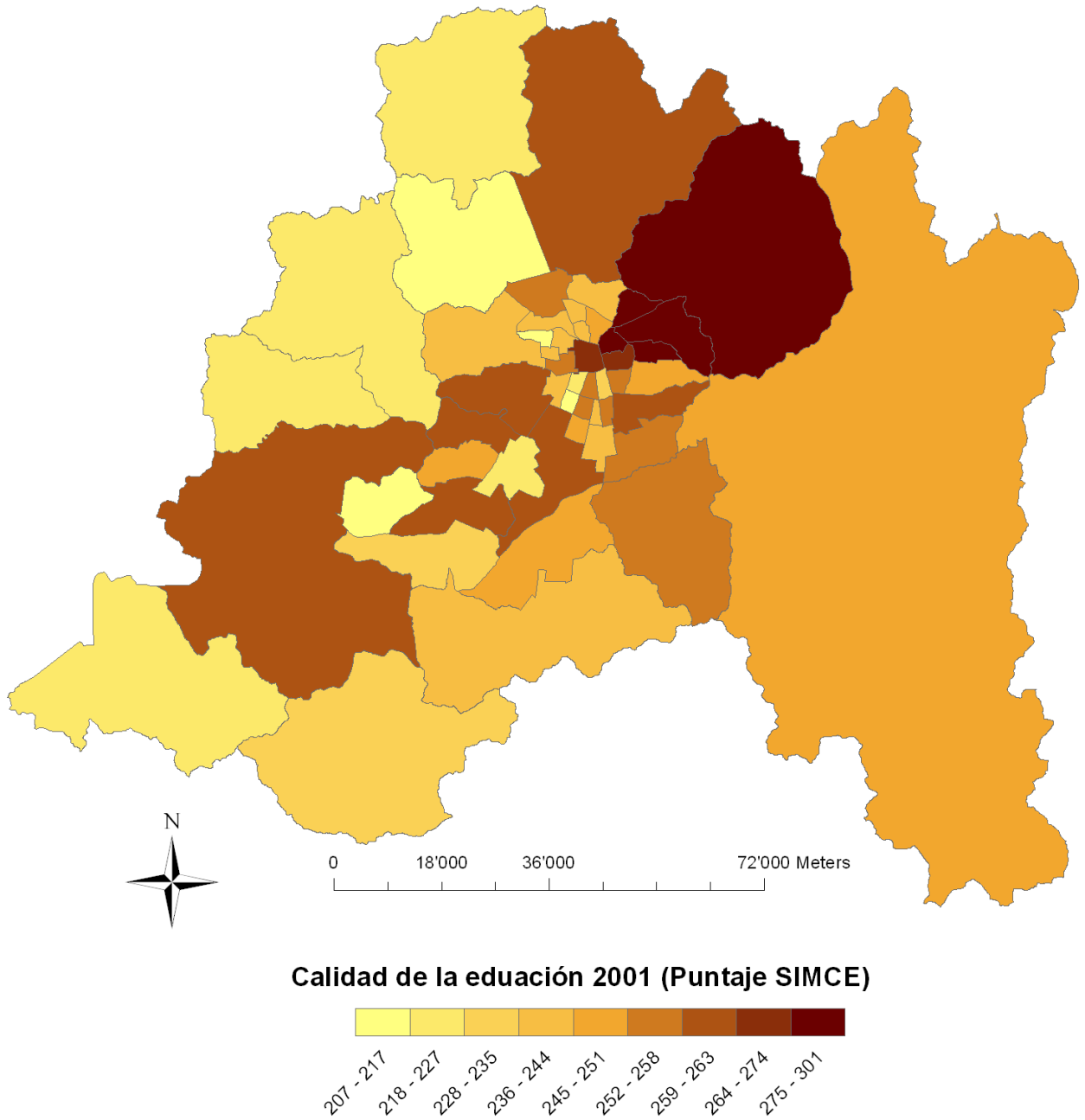


Figura A.3: Índice de Calidad de la educación año 2001. Ref: otas.gorerm.cl

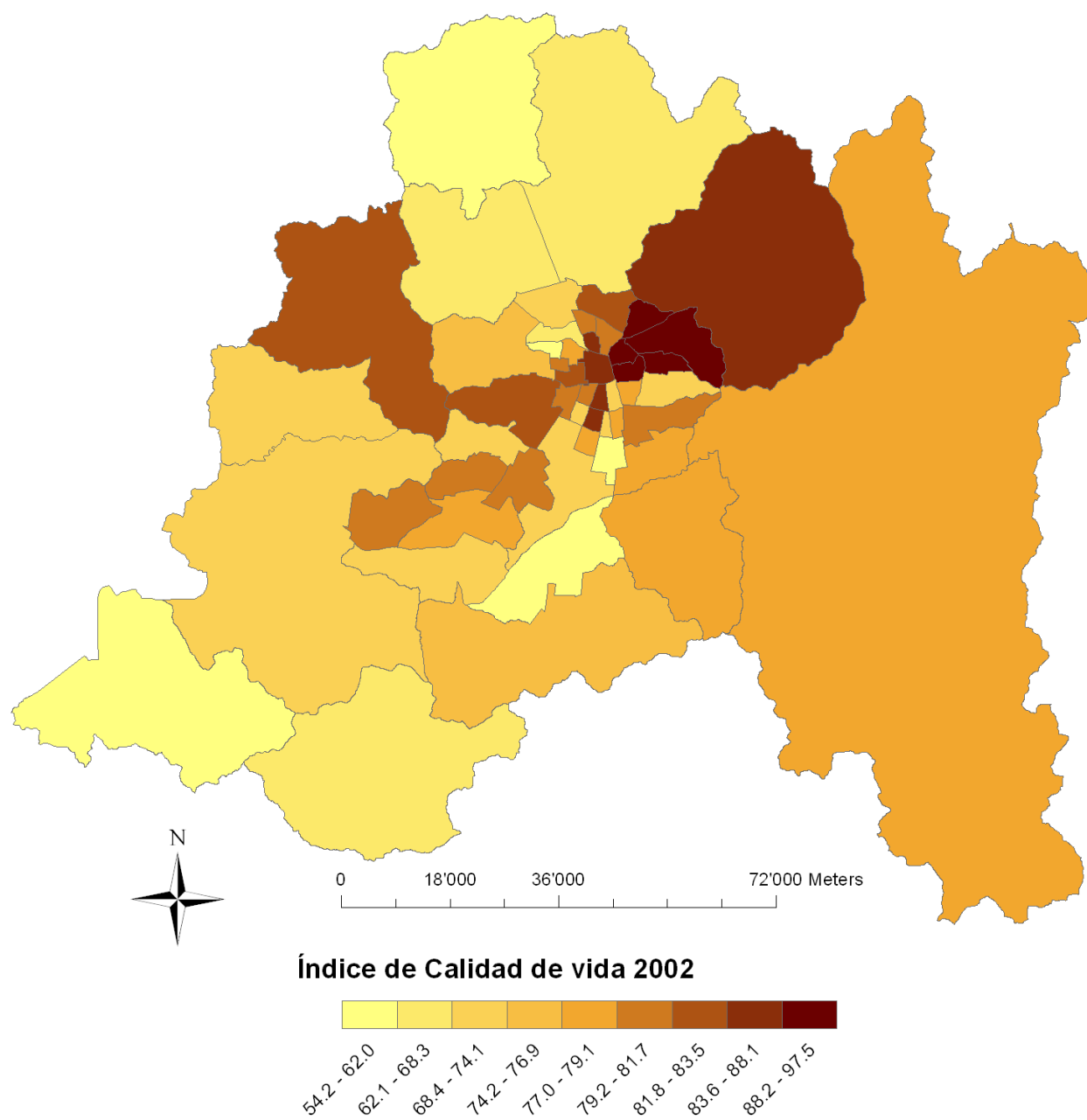


Figura A.4: Índice de Calidad de vida año 2002. Ref: otas.gorerm.cl

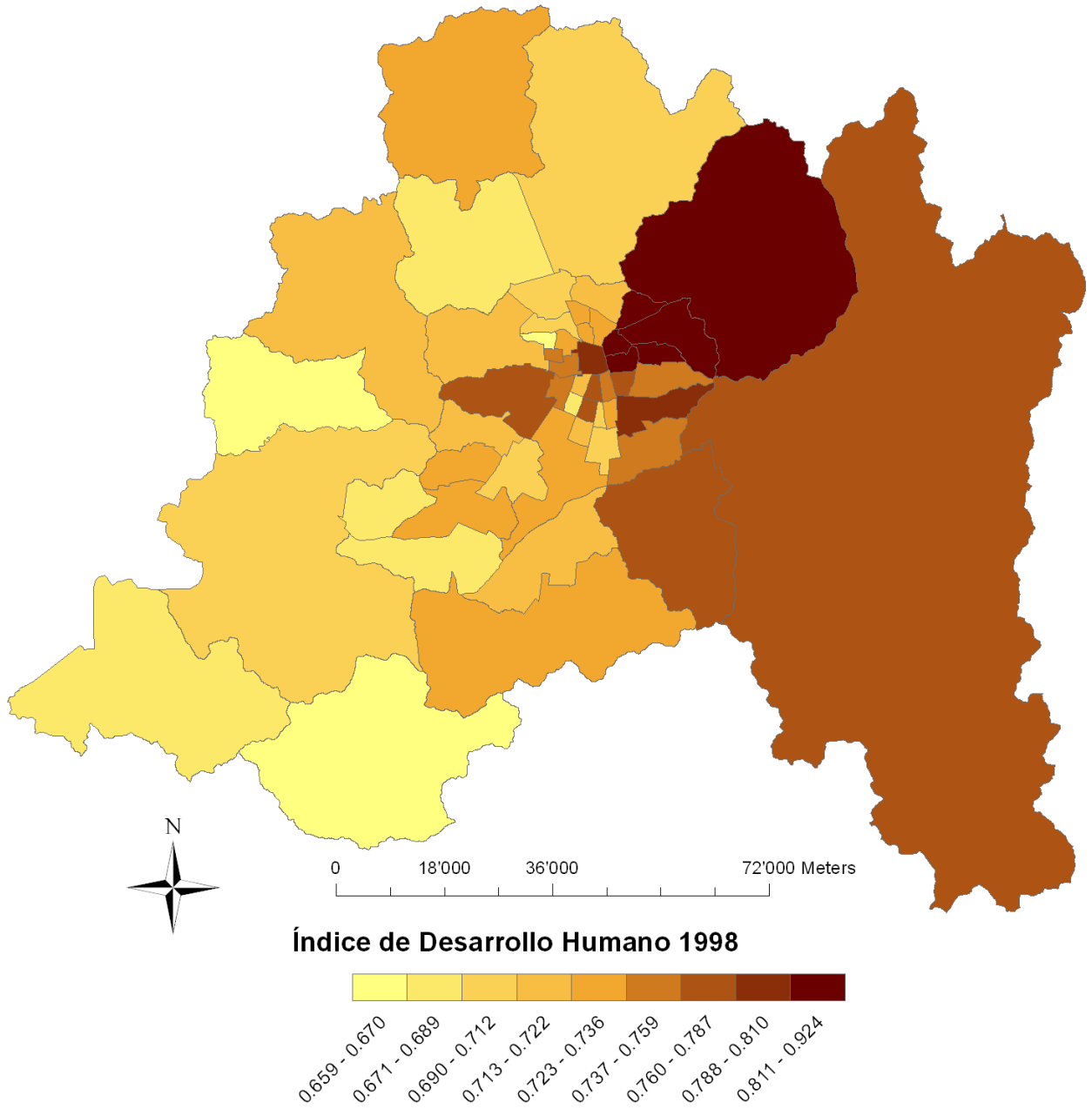


Figura A.5: Índice de Desarrollo humano año 1998. Ref: otas.gorerm.cl



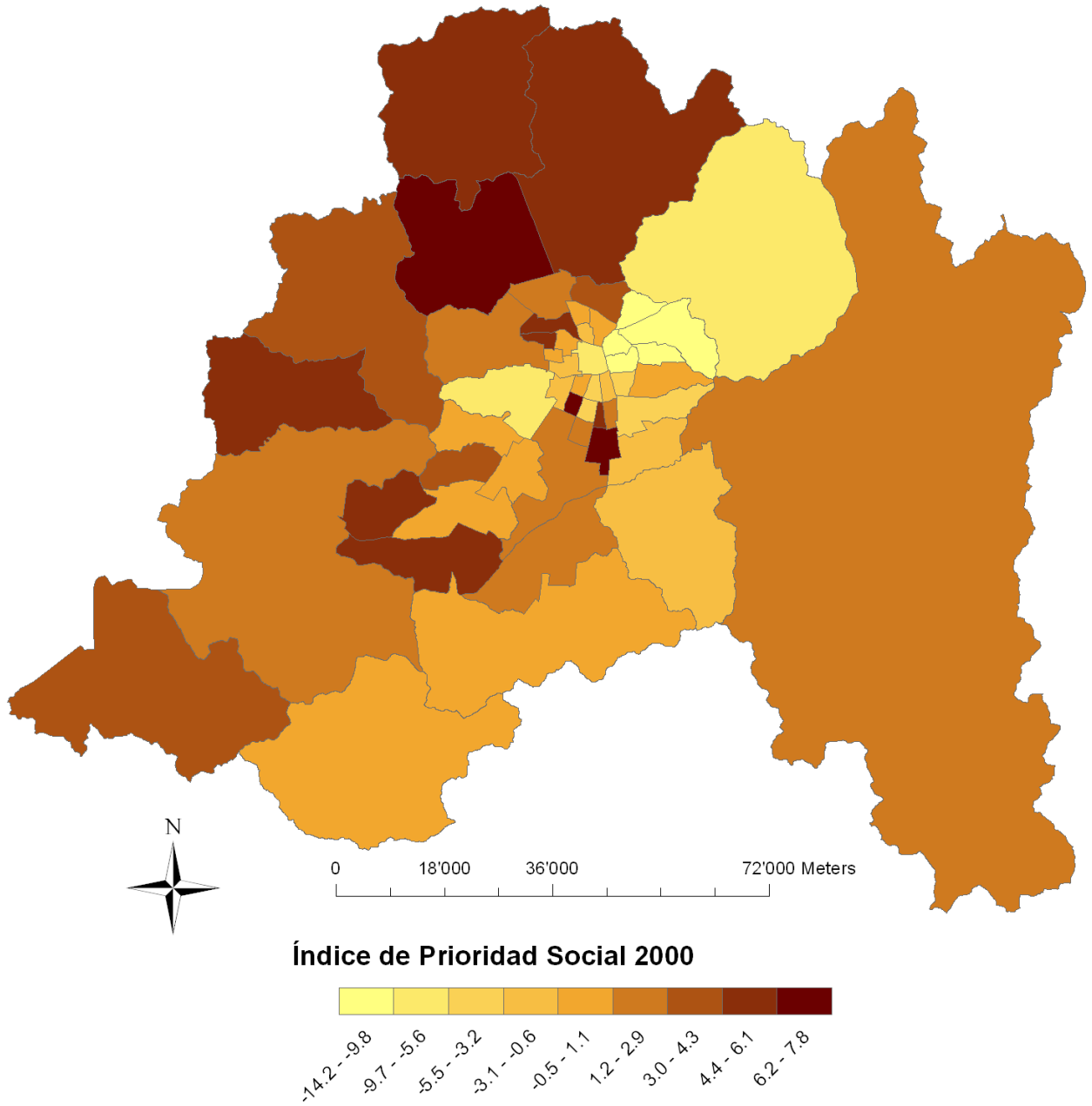


Figura A.6: Índice de Prioridad Social año 2000. Ref: otas.gorem.cl

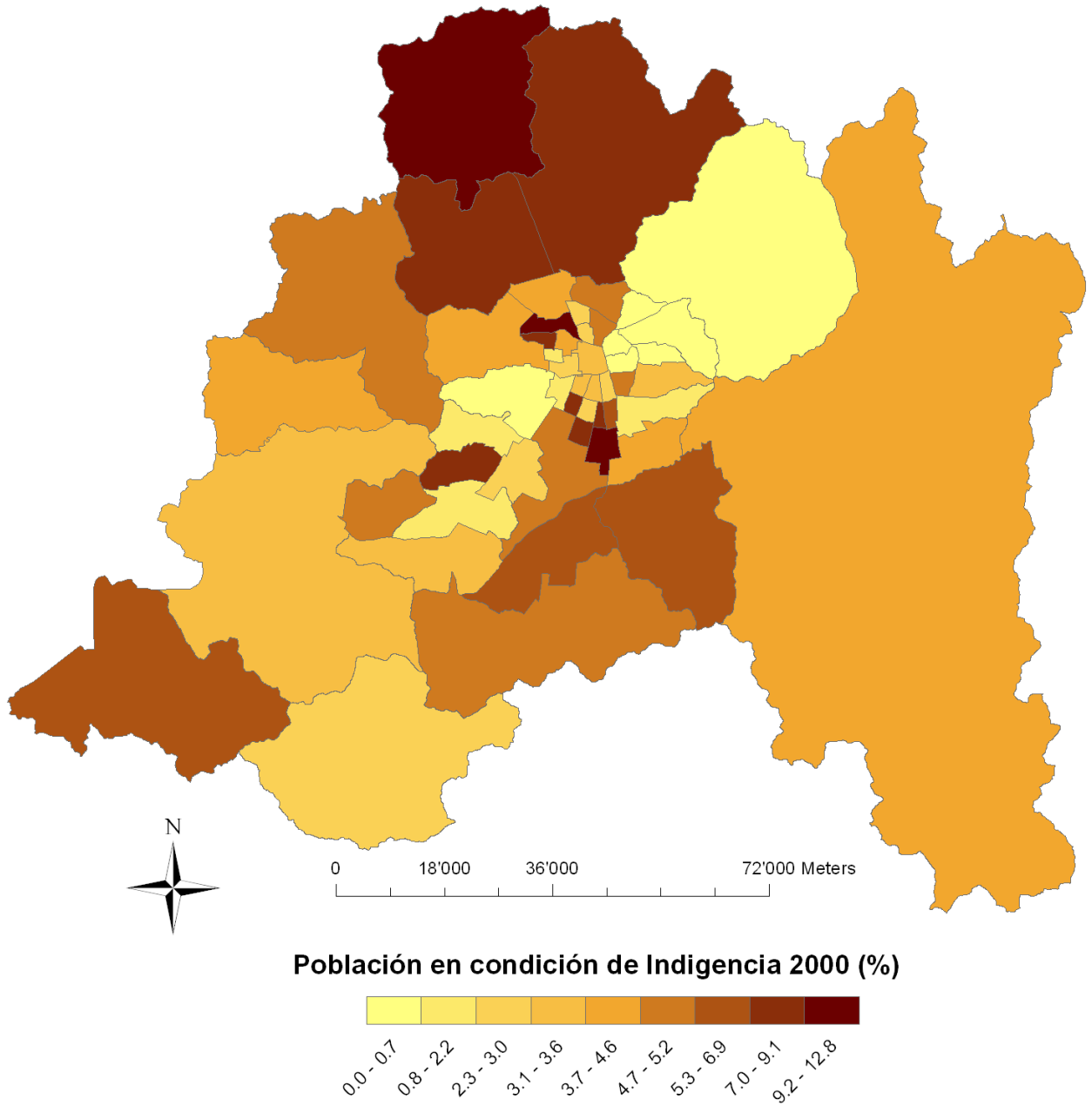


Figura A.7: Porcentaje de población en condición de Indigencia año 2000. Ref: otas.gorerm.cl

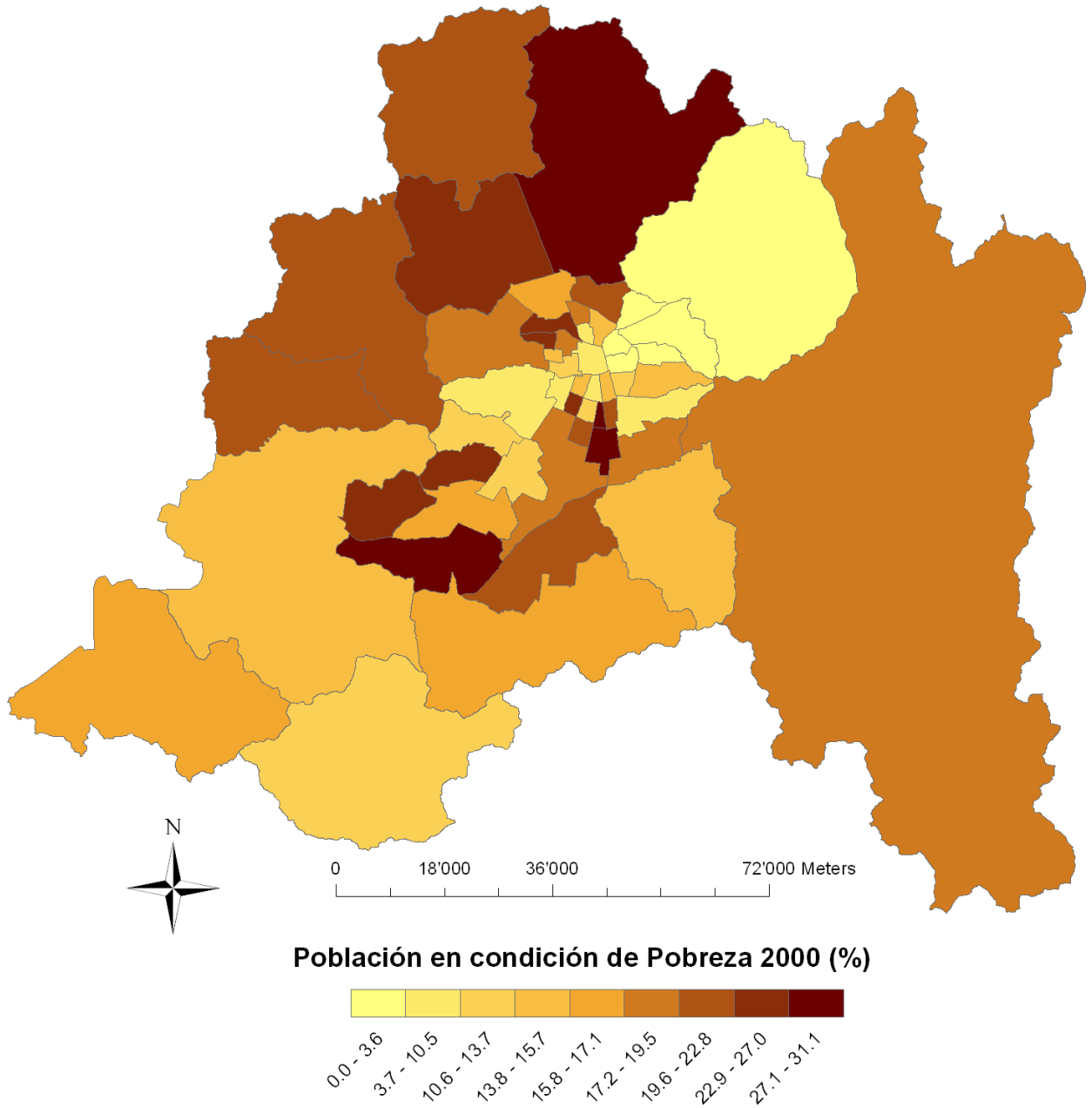


Figura A.8: Porcentaje de población en condición de Pobreza año 2000. Ref: otas.gorerm.cl

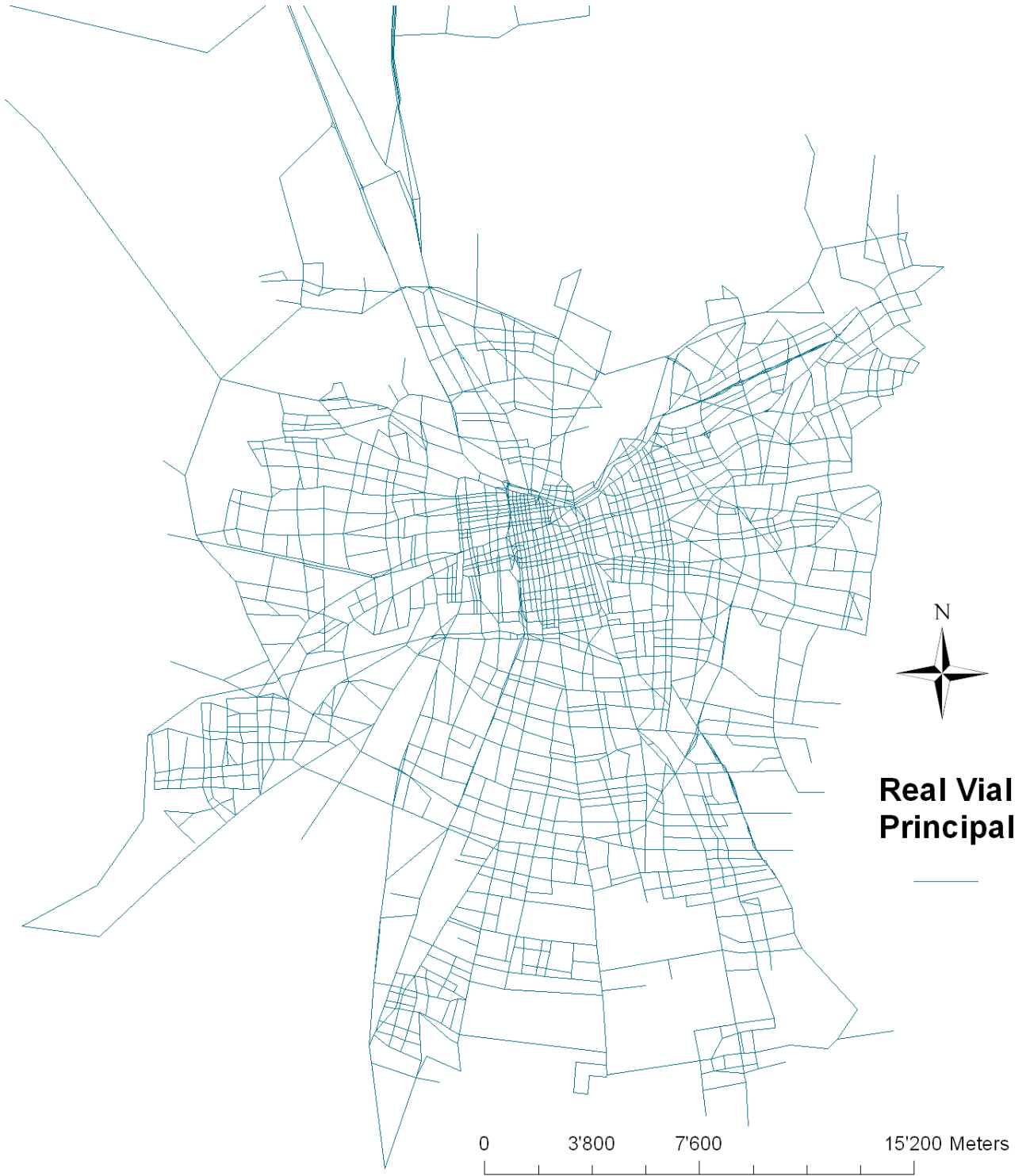


Figura A.9: Red ESTRAUS 2001 para la ciudad de Santiago (red vial principal)

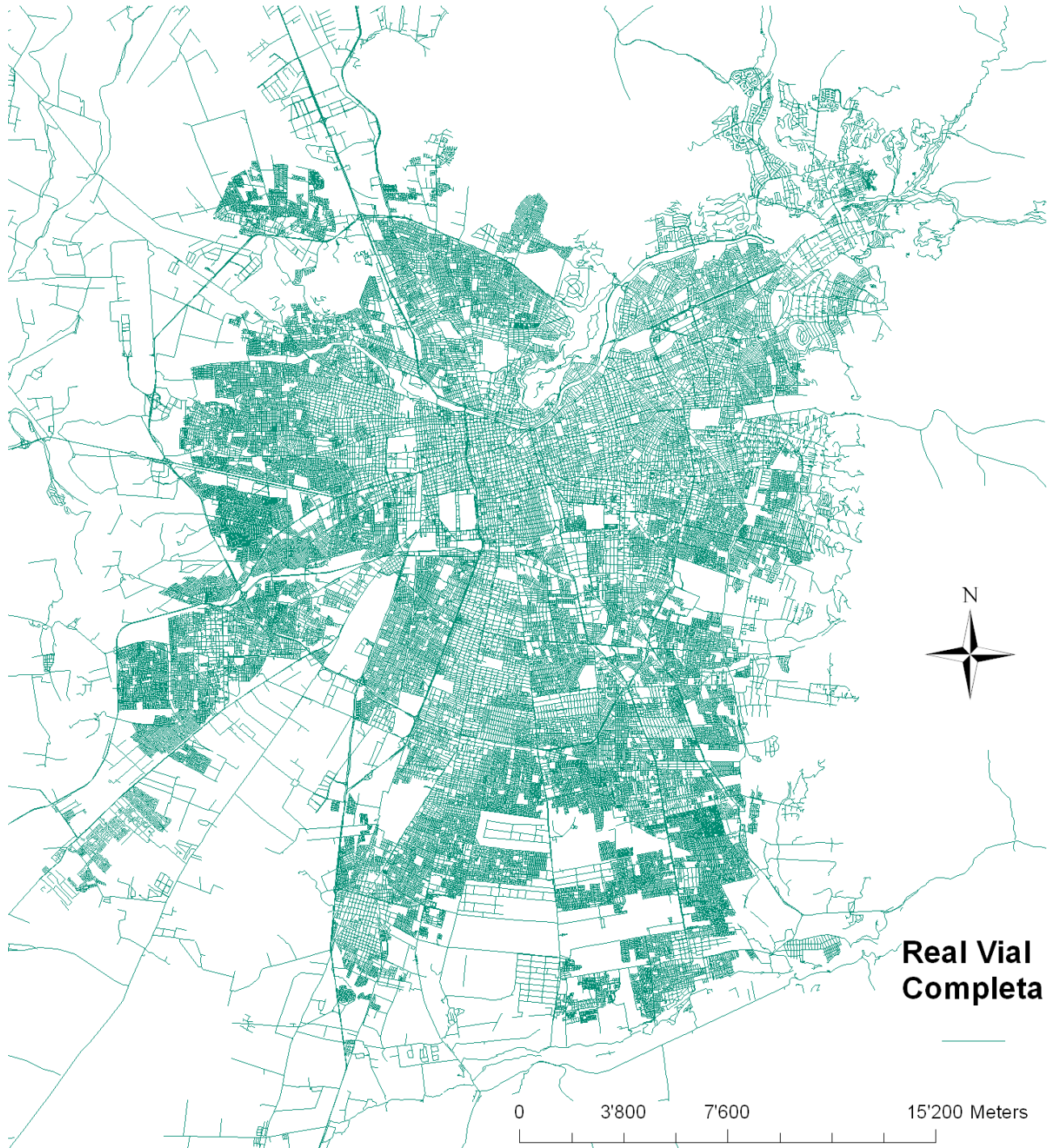


Figura A.10: Red vial real para la ciudad de Santiago año 2002 (red vial completa)

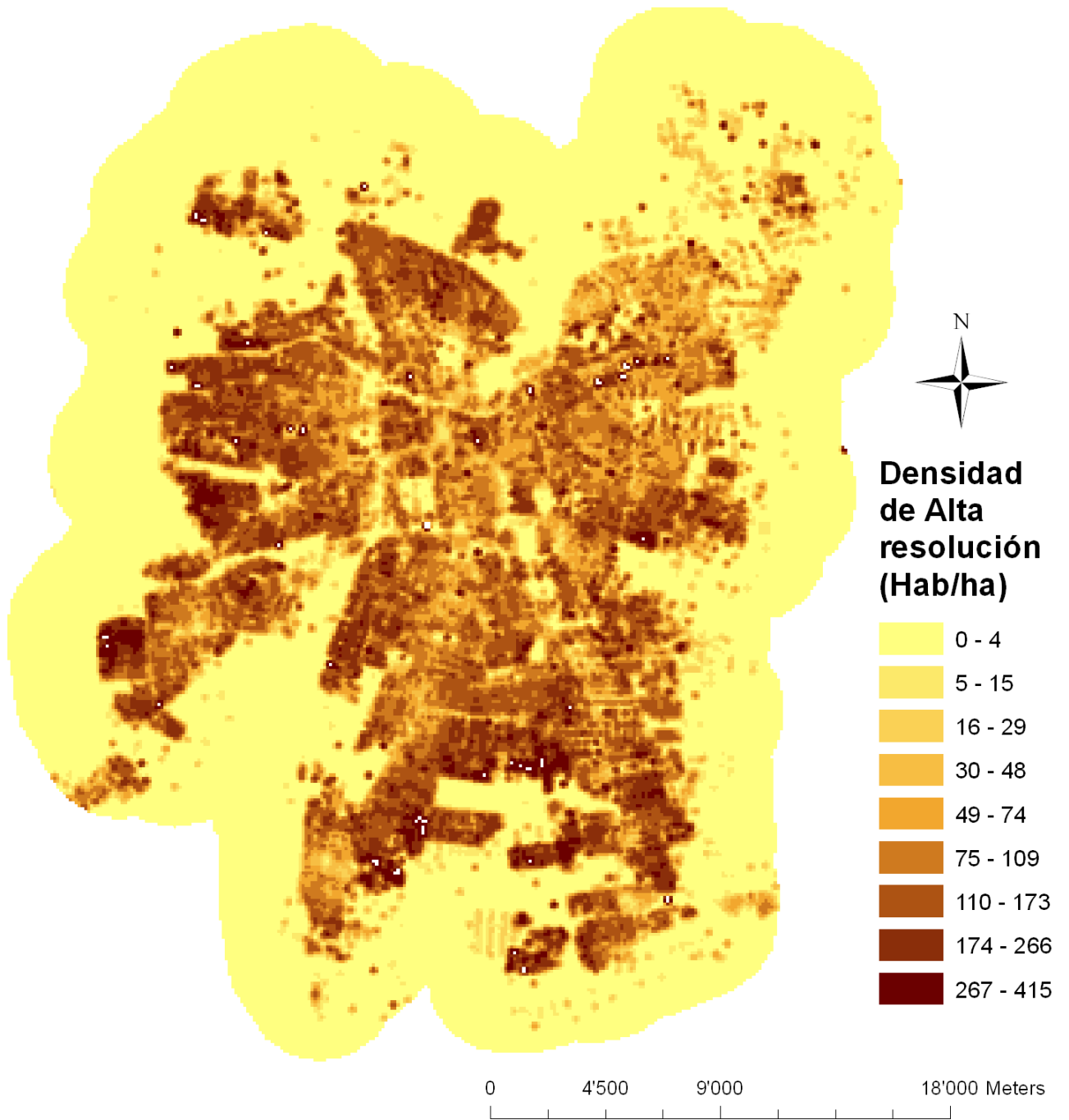


Figura A.11: Densidad de población de alta resolución año 2002.



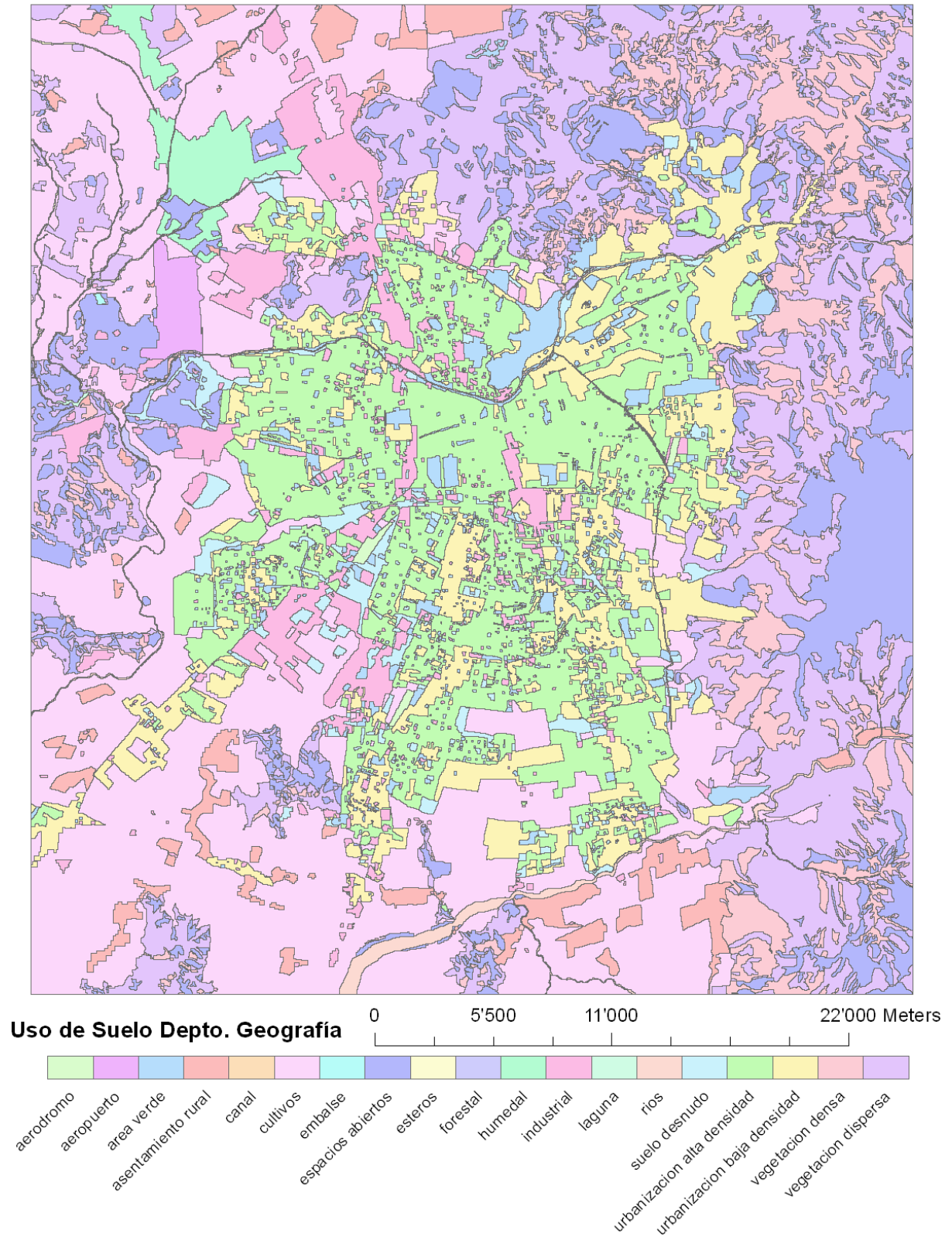


Figura A.12: Uso de suelo del departamento de Geografía de la Universidad de Chile, año 2004.

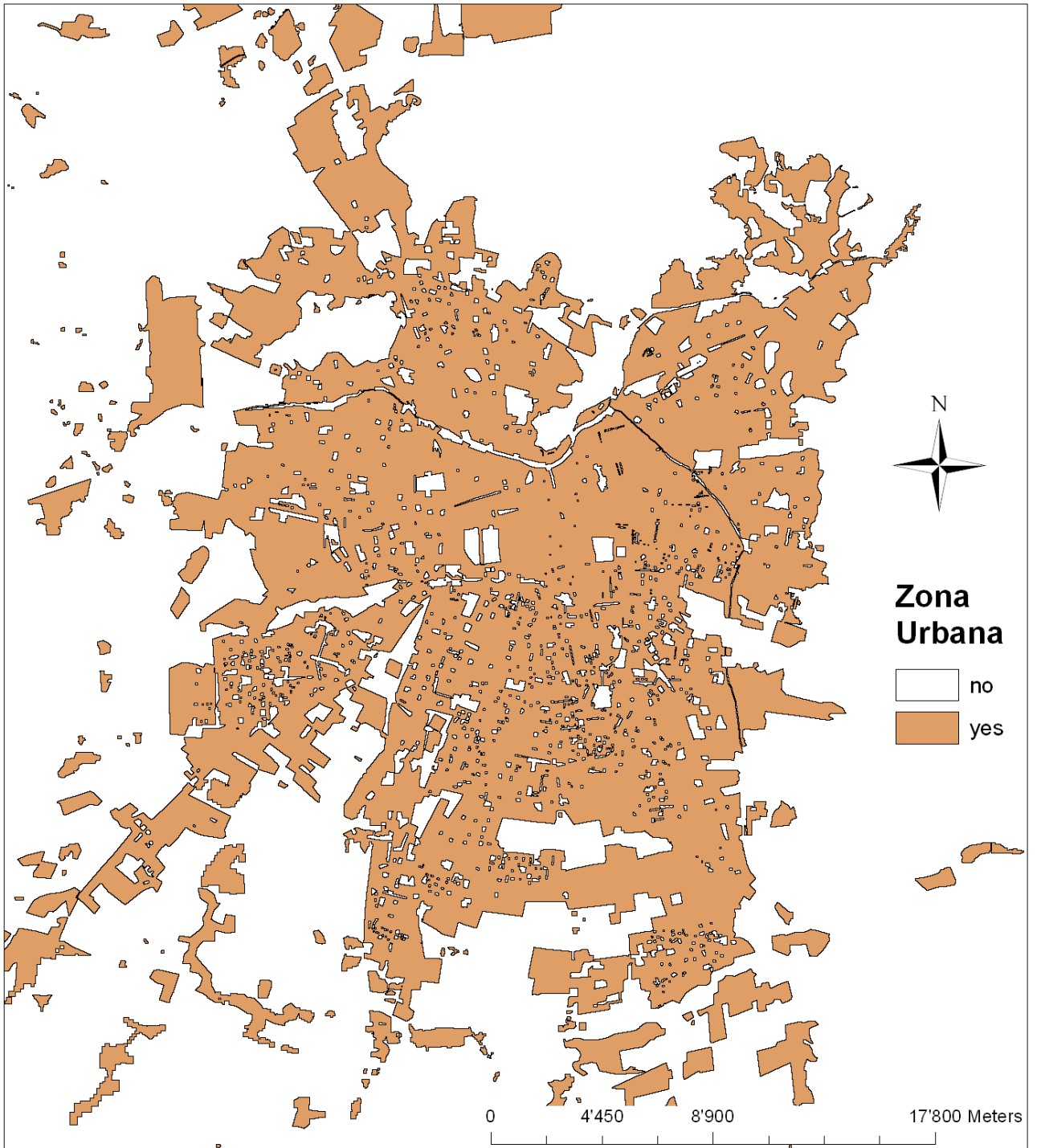


Figura A.13: Zona Urbano obtenida del mapa de Uso de suelo del departamento de Geografía de la Universidad de Chile, año 2004.



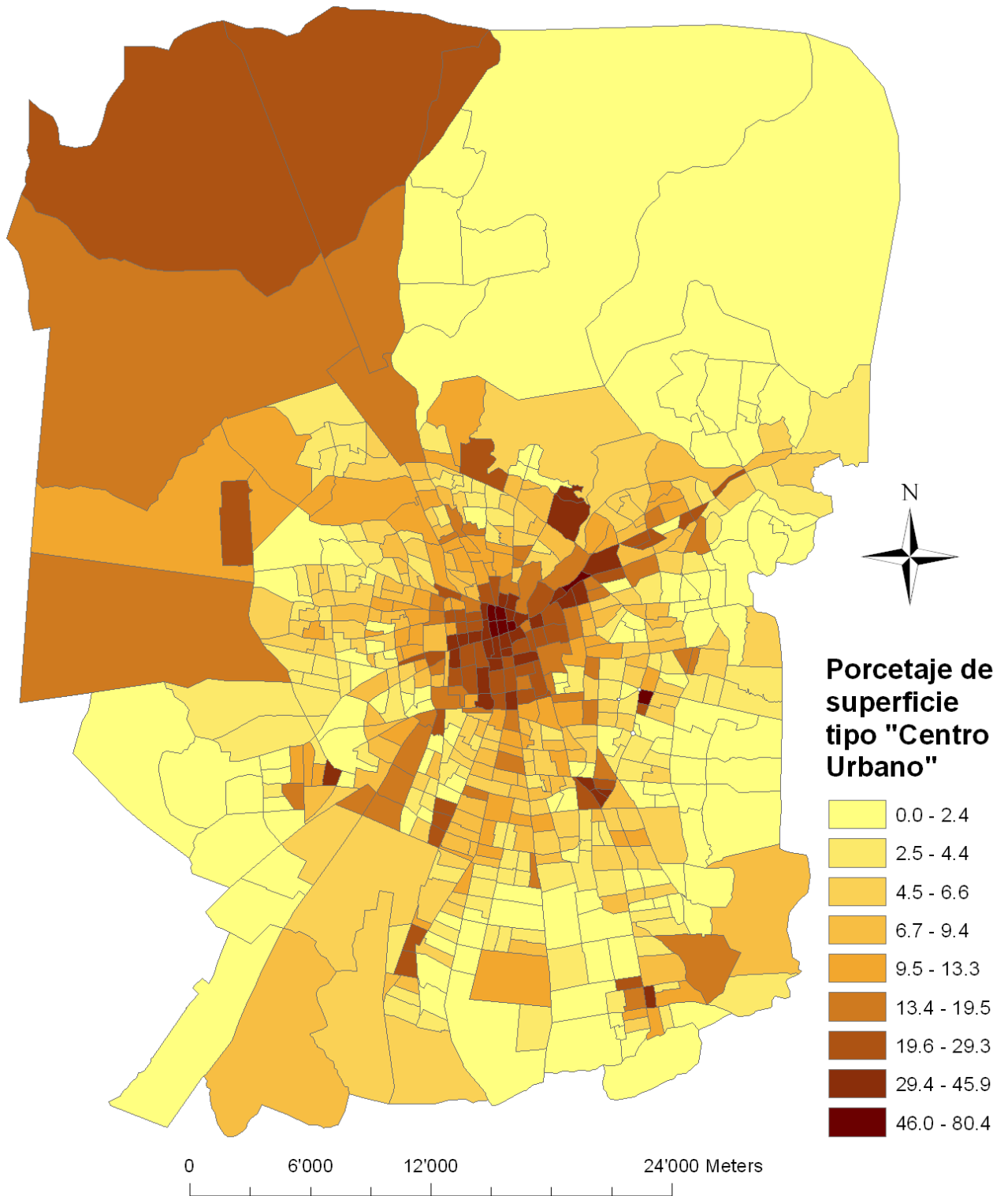


Figura A.14: Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo "Centro Urbano", obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001.

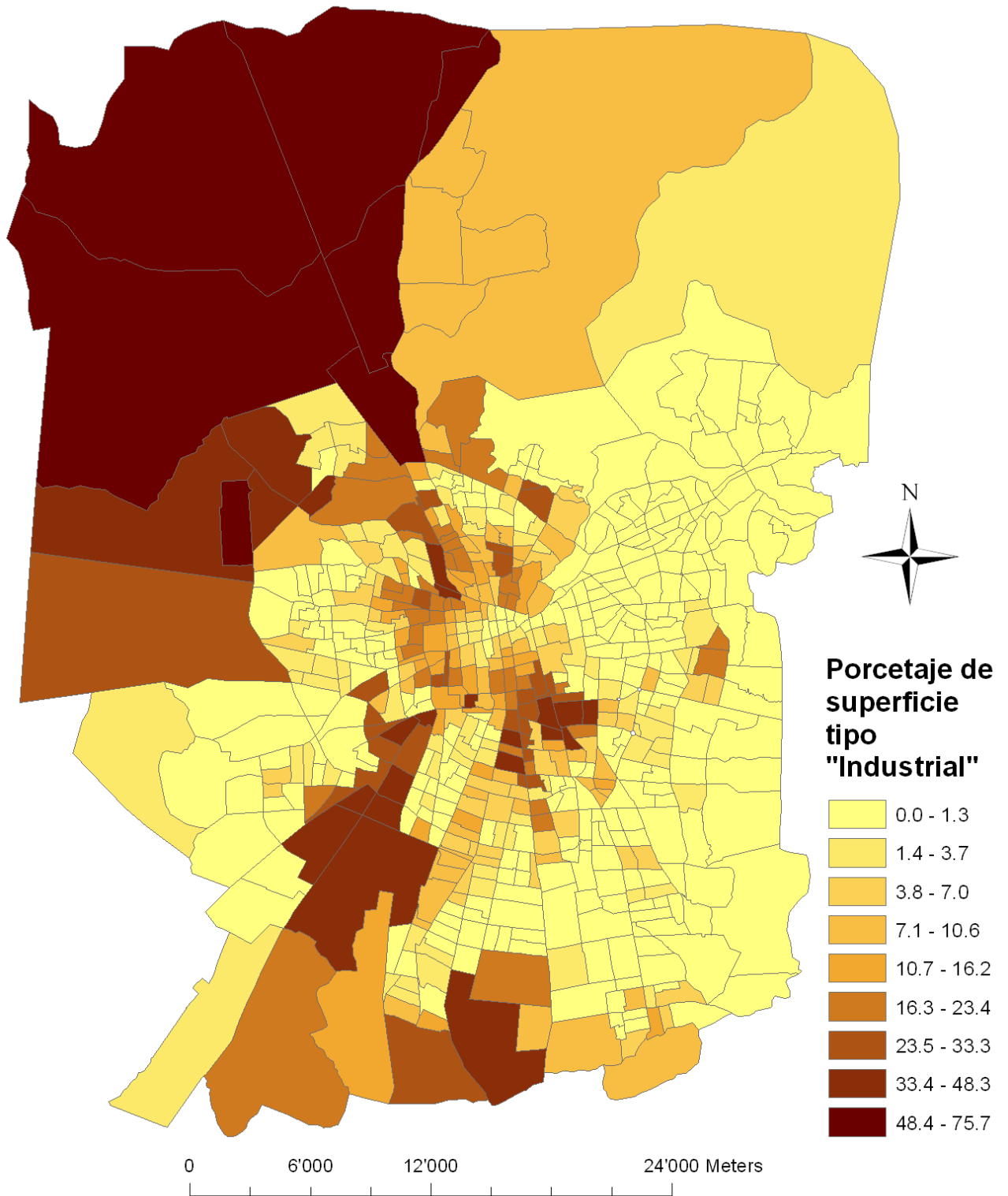


Figura A.15: Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo "Industrial", obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001.

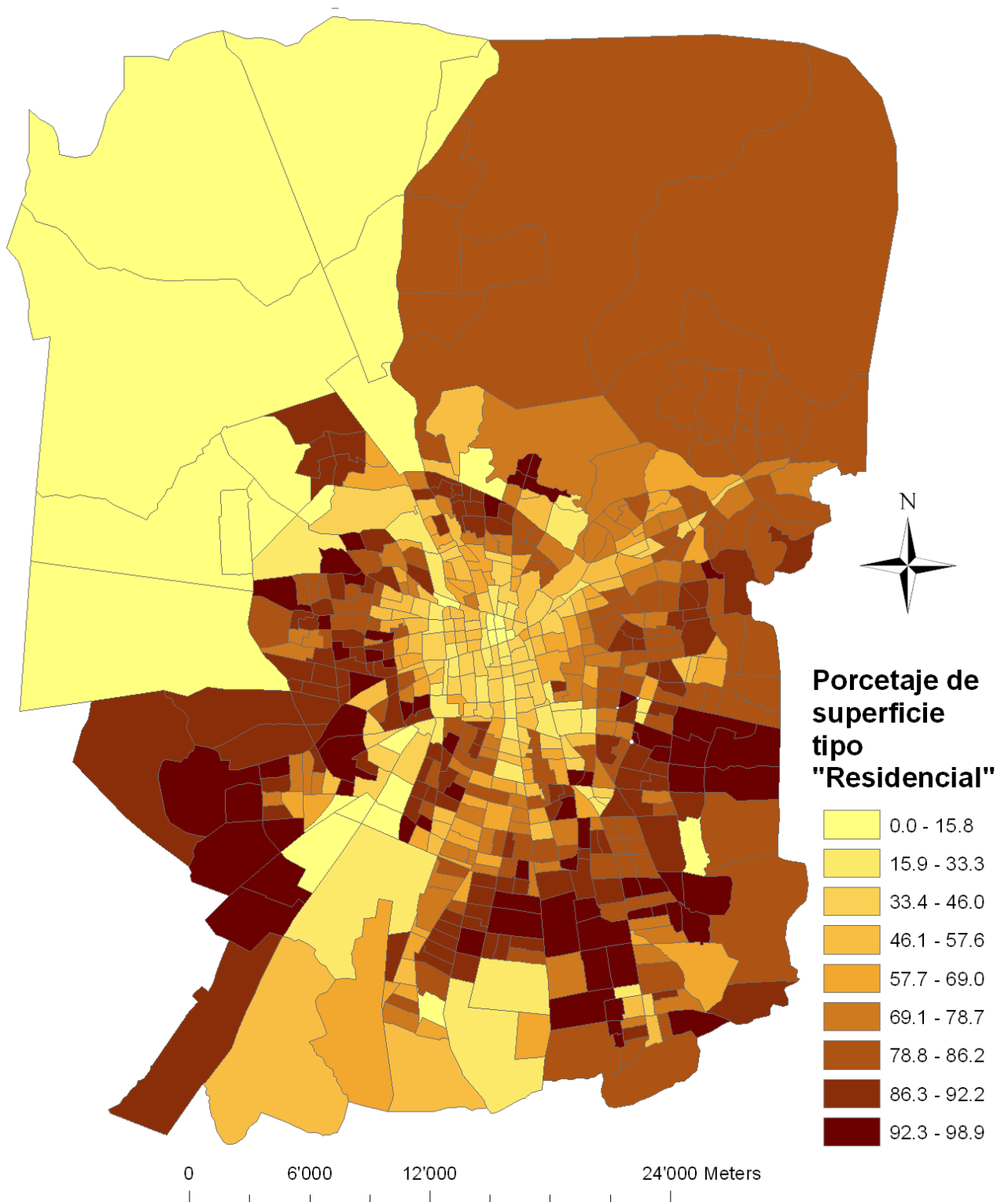
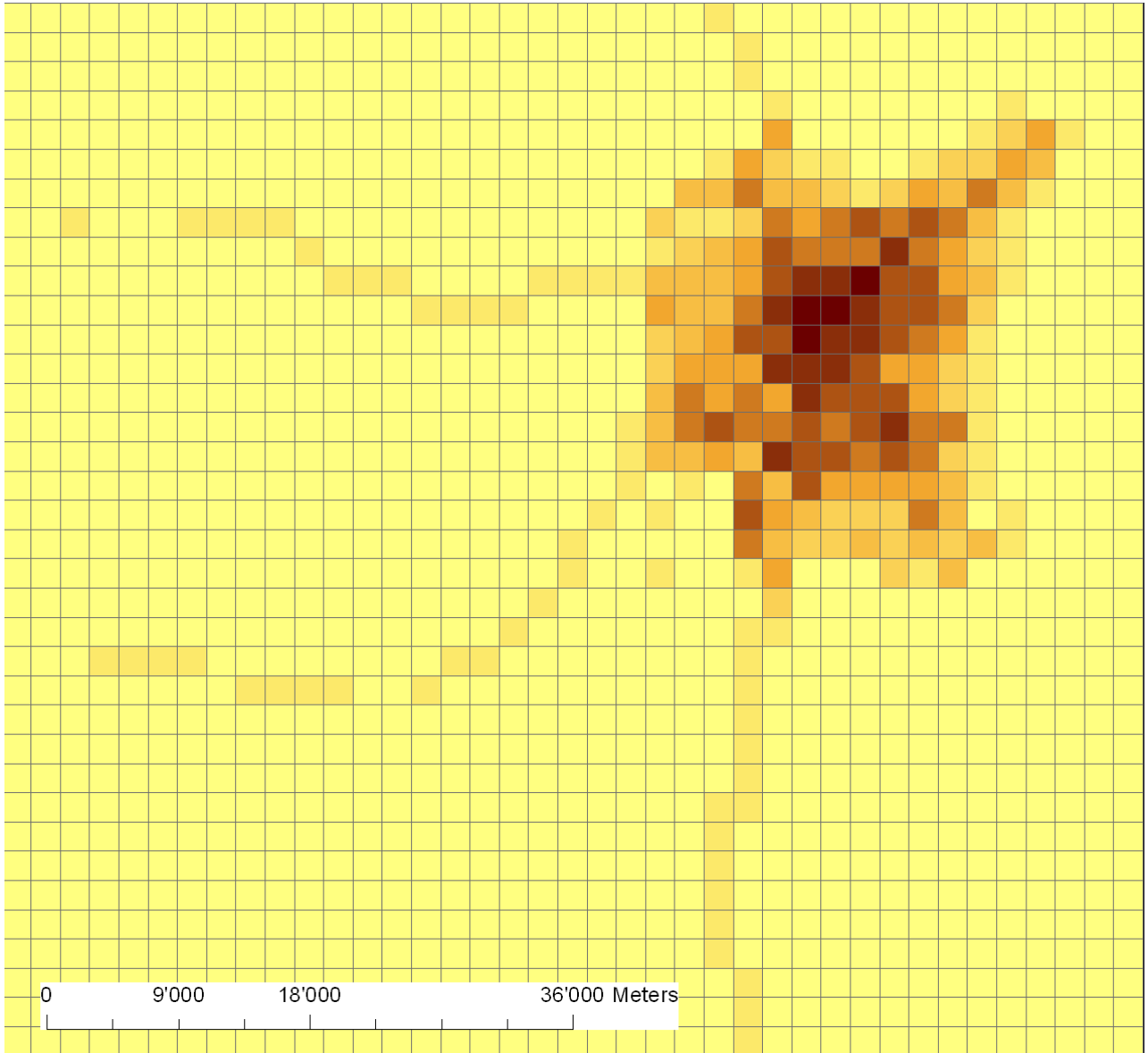


Figura A.16: Porcentaje de área ocupado por el Uso de Suelo tipo "Residencial", obtenido de mapas de uso de suelo MINVU, año 2001.



**Inventario Oficial CONAMA 2002 (microgramo/m<sup>2</sup>/año)**

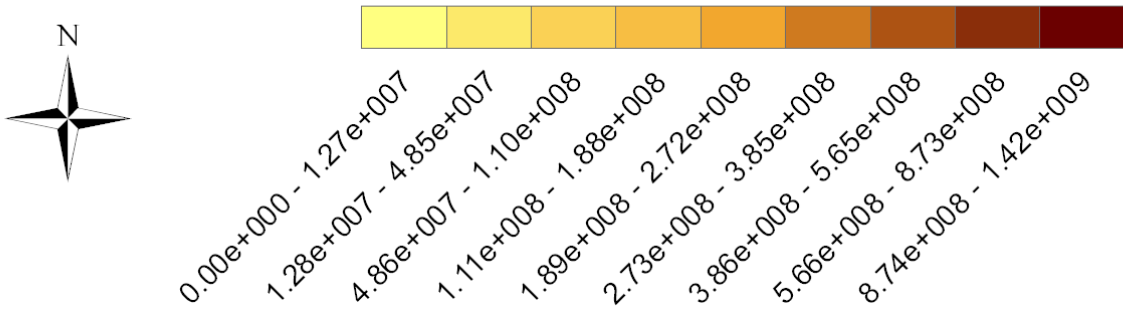
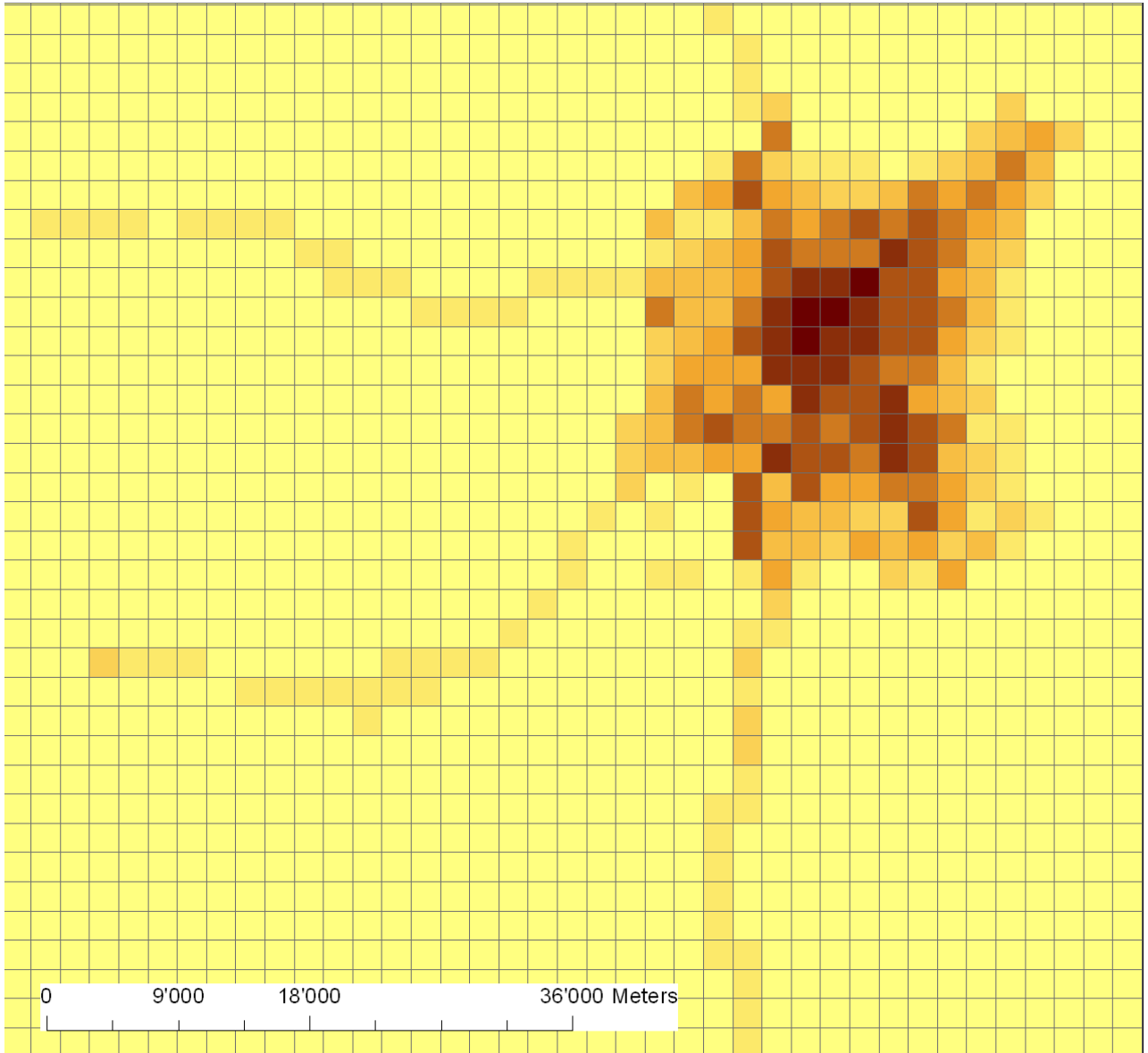


Figura A.17: Inventario de emisiones de CO oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana.



**Inventario mejorado con M. Inversa (microgramo/m<sup>2</sup>/año)**

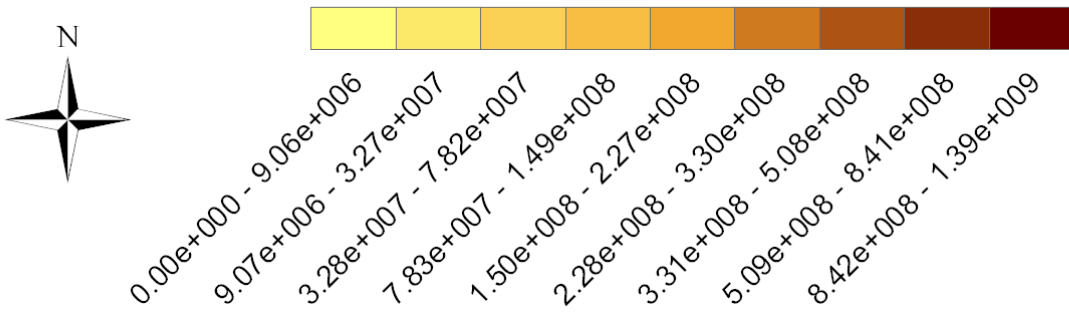
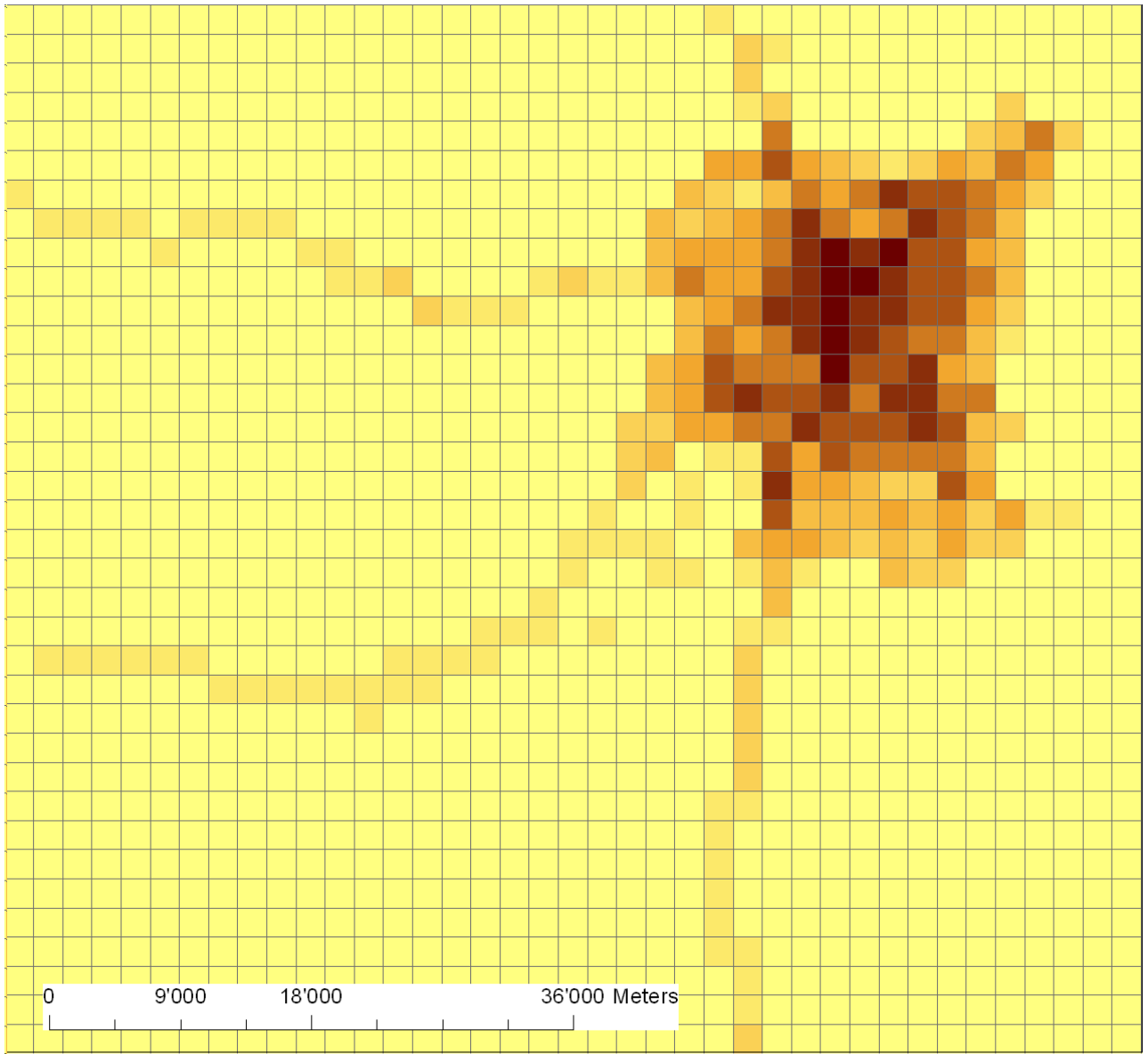


Figura A.18: Inventario de emisiones de CO mejorado mediante modelación Inversa para la región Metropolitana.



**Inventario CONAMA 2002, ftes. móviles (microgramo/m<sup>2</sup>/año)**

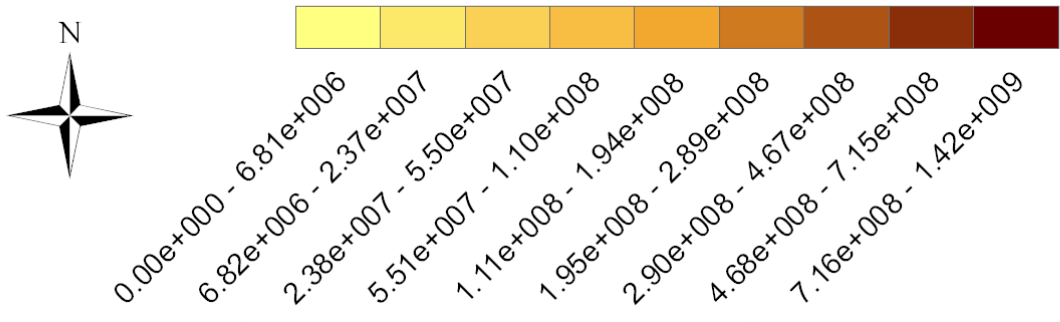
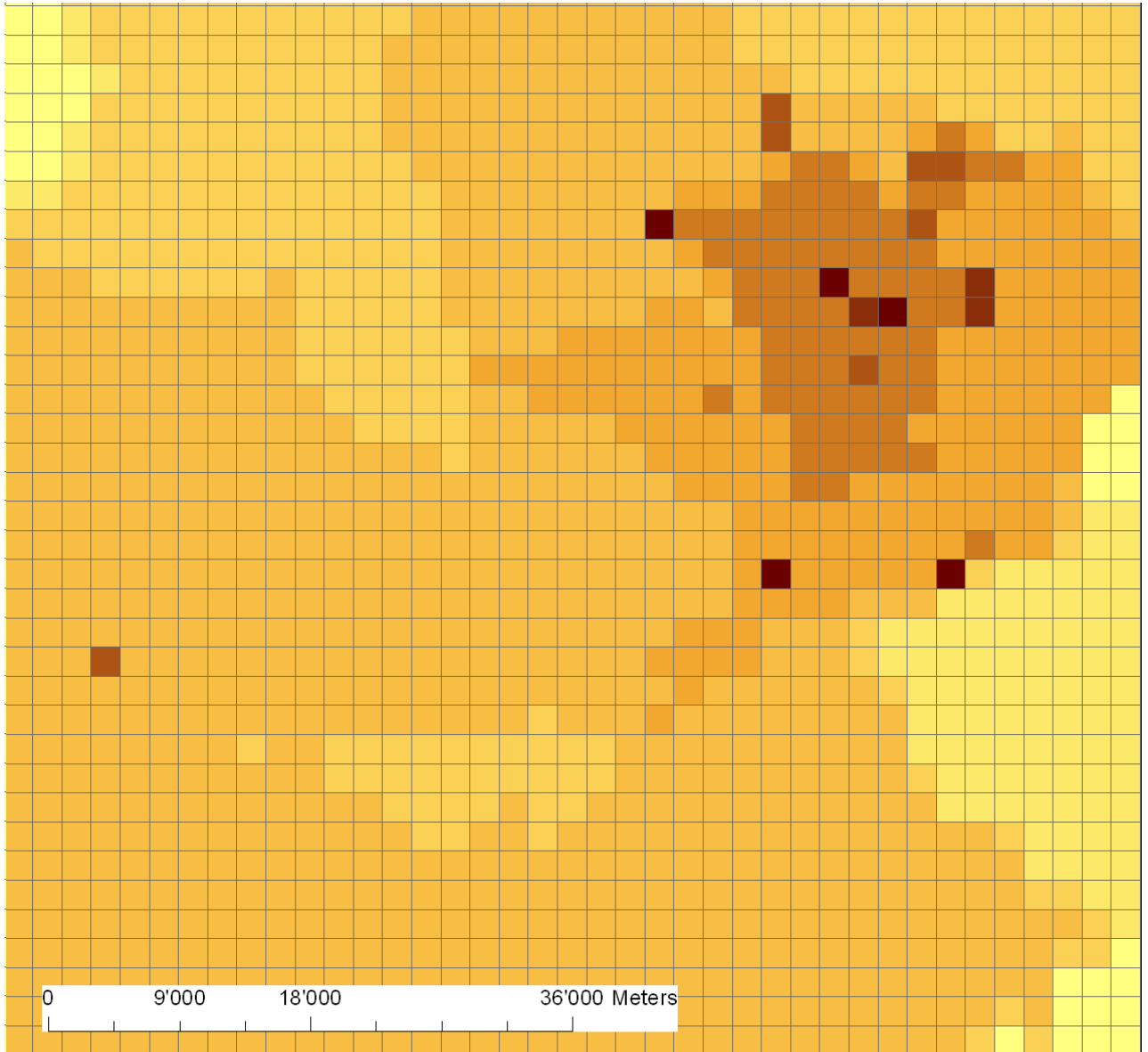


Figura A.19: Inventario de emisiones de CO de fuentes móviles oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana.



### Inventario CONAMA 2002, fuentes fijas (microgramo/m<sup>2</sup>/año)

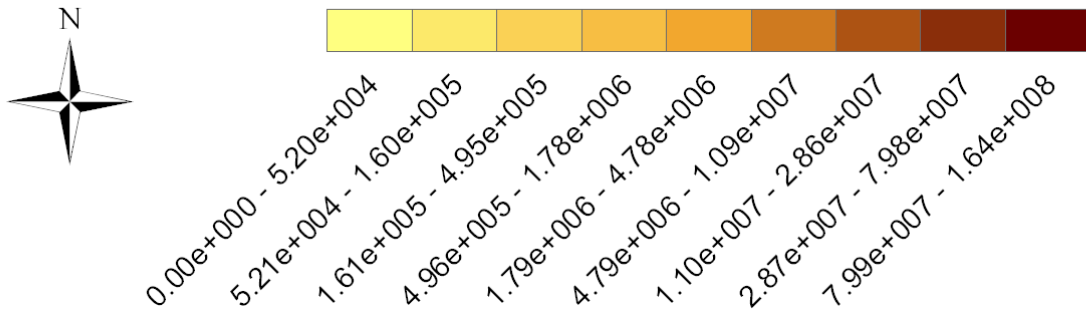


Figura A.20: Inventario de emisiones de CO de fuentes fijas oficial CONAMA 2002 para la región Metropolitana.

## **Anexo B**

# **Monóxido de Carbono como contaminante**

El CO (monóxido de carbono) es un contaminante primario (emitido directamente por una fuente), que tiene la característica de no tener olor, sabor o color. Globalmente, aproximadamente 2/3 de las fuentes de CO son antropogénicas [36]. Las principales fuentes antropogénicas son oxidación de Metano, quema de biomasa y quema de combustibles fósiles.

En los Estados Unidos, cerca del 56 % de las emisiones de CO provienen de los gases de escape producto de los motores de combustión interna vehicular. En zonas mayor congestión vehicular, este porcentaje puede aumentar, pudiendo llegar a rango entre 85-95 % en ciudades ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)). A pesar de un crecimiento en el parque vehicular, en USA existe una tendencia a disminuir las emisiones de CO gracias a los mecanismos de control de emisiones vehiculares.

El sumidero principal es la reacción con radicales OH. La deposición es baja en comparación a la reacción con OH (1 orden de magnitud)[36].

El tiempo de residencia medio en la atmósfera es de 30-90 días [36]. Existe mayor concentración de CO en el hemisferio Norte que en el Sur, habiendo una mayor variación de temporada en Hemisferio norte que en el Sur.

### **B.1. Emisión Vehicular de CO**

El CO proveniente de las emisiones vehiculares se forma principalmente por la combustión incompleta del combustible. La formación de CO se presenta más comúnmente a razones aire-combustible bajas (mezcla rica). Esto ocurre debido que al haber menos aire (oxígeno) del requerido para que exista una combustión estequiométrica, entonces ocurre una combustión incompleta que tiene como uno de sus productos al CO.

Las emisiones de CO ocurren principalmente en motores a gasolina, ya que los motores Diesel se ocupan



mezclas pobres, con exceso de oxígeno. Otras condiciones que se dan para obtener un aumento en las emisiones de CO son durante las partidas en frío, debido a que en esta etapa existe una restricción en la entrada de aire, por mala calibración de los inyectores o por efectos de la altitud (oxígeno disminuye con la altura) sin que el vehículo sea preparado especialmente.

## B.2. Normativas para CO

### B.2.1. Normativa Estadounidense de calidad del aire

La Normativa Estadounidense de calidad de aire para CO, correspondiente a la “Clean Air Act” es la siguiente:

- 9 ppm (10 mg m-3) promediado en 8 horas, máximo 1 vez al año.
- 35 ppm (40 mg m-3) promediado en 1 hora, máximo 1 vez al año.

### B.2.2. Normativa Chilena de Calidad del Aire

Normativa vigente en Chile de calidad de Aire para CO, correspondiente a la “Norma Primaria de Calidad del Aire para Monóxido de Carbono del año 2002”, es la siguiente:

- 9 ppm (10 mg m-3) promediado en 8 horas, media móvil.
- 26 ppm (40 mg m-3) promediado en 1 hora

La norma se verá sobrepasada si durante 3 años consecutivos, los promedios de los máximos diarios son mayores que los límites establecidos previamente.

Además, se generaran episodios de emergencia ambiental para CO en concentración de 8 horas según los siguientes niveles:

Tabla B.1: Niveles de emergencia dadas las concentraciones de CO. ref: [www.conama.cl](http://www.conama.cl)

Nivel	Concentración (ppm)
1	15-29
2	30-34
3	35 o más

### B.2.3. Normativa Chilena de Emisión vehicular

Esta corresponde a “Norma de Emisión de Contaminantes Aplicables a los Vehículos Motorizados (1994)”, en la cual se establecen los límites de emisión, y las formas de medición(www.conama.cl). Los límites son los siguientes:

Tabla B.2: Límites de emisión de CO para vehículos a gasolina

Años de uso del vehículo	% en volumen máximo de CO
13 y más	4,5
12 y menos	4

Estas mediciones deben ser tomadas con el vehículo detenido y el motor funcionando a temperatura nominal, en los estados de ralentí y a 2500+300 Rpm. Estas mediciones se hacen instrumental mente, midiendo los gases a la salida del tubo de escape.

### B.3. Efectos del CO sobre la salud

Los efectos del CO sobre la salud provienen de la disminución de la capacidad de oxigenación de la sangre; según sea la cantidad de CO en el aire y el tiempo de exposición, puede producir dolor de cabeza, reducción temporaria de la capacidad mental, vómitos, coma y muerte.

Cuando la concentración de CO en el aire aumenta, también lo hace el porcentaje de hemoglobina que es incapaz de transportar  $O_2$ , debido a que el CO ocupa el espacio donde se transporta el  $O_2$ . La afinidad de la hemoglobina por el CO es unas 220 veces mayor que por el  $O_2$ , lo que convierte a ese gas en peligroso, aun en concentraciones muy bajas. Así, la presencia de 1000 ppm de CO en el aire resultaría en que aproximadamente la mitad de la hemoglobina se combinaría con CO, con la consiguiente reducción a la mitad de su capacidad de transportar oxígeno.

Los principales efectos sobre la salud debido a la exposición prolongada de bajas concentraciones de CO son:

- Aumento del riesgo de enfermedades coronarias, produciendo dolores de pecho, reducción de la habilidad para ejercitarse.
- Aumento de angina (inflamación de la garganta)
- Disminución de las funciones neuro-conductuales, como problemas a la visión, reducción en la capacidad de aprender, reducción en la destreza manual, dificultad para realizar tareas complejas

- Efectos perinatales: Menor peso del feto y retardo del desarrollo post-natal

Además de todos estos efectos directos, el CO ayuda a la formación de ozono troposférico, el cual tiene otros efectos sobre la salud como problemas respiratorios serios.

## Anexo C

# Inventarios de emisión

Un inventario de emisiones es el cálculo de las emisiones para una zona, ciudad, país, etc. En el aparecen las emisiones de cada contaminante separadas por categoría, que es tipo de fuente que la produce. Con esta separación se pueden identificar los principales responsables sobre la emisión de contaminantes y así les sirve a las autoridades para tomar medidas. Generalmente en unidades de toneladas por unidad de tiempo de algún contaminante.

Cuando estos inventarios son presentados con distribución espacial, pueden ser ocupados para alimentar modelos de dispersión de contaminantes. Pero esto depende de la resolución espacial y temporal que tengan.

Los inventarios que abarcan un mayor dominio espacial, y por ende tienen menor resolución son los inventarios Globales y Regionales. Los globales entregan las emisiones considerando el mundo entero, en cambio los regionales sólo de una parte del globo, como por ejemplo la zona de Euro-Asia. Como ya se dijo previamente, se pueden separar por categorías. Algunos ejemplos de estas categorías son la quema de Biomasa (quemadas de bosques y sabana), emisiones antropogénicas (tecnológicas, bio-combustibles, quemadas de agricultura), emisiones naturales (océanos y vegetación). La resolución espacial de estos inventarios es relativamente gruesa, pudiendo llegar hasta 1° o 0,5° de grilla (inventarios GEIA), equivalentes a 100 o 50 km aproximadamente. La resolución temporal varía, pudiendo ser anual, mensual o diaria. Un ejemplo de un inventario global de CO ilustrado gráficamente se puede ver en la siguiente figura:

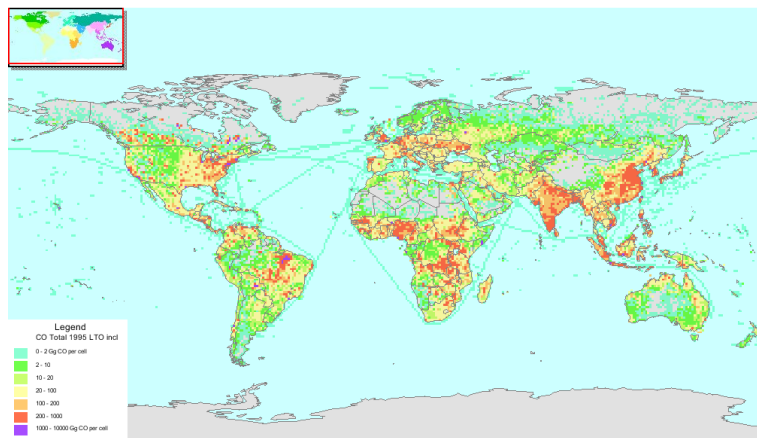


Figura C.1: Inventario global de CO, EDGAR, año 1995 (<http://www.mnp.nl/edgar>.)

Los inventarios de mayor resolución, y que abarcan un dominio espacial menor son los inventarios locales. Un ejemplo de estos inventarios son los que se realizan en Chile. El área que abarcan puede ser muy diversa, desde un país completo hasta la resolución de ciudad. Con estos inventarios se pueden obtener resoluciones altas, como por ejemplo 1x1 km. Un problema de los inventarios locales es que no siempre son hechos con distribución espacial, sino que simplemente se entrega la cantidad de contaminantes por categoría total que ocurre en la ciudad o país.

### C.1. Inventario de emisiones para la ciudad de Santiago

Para la ciudad de Santiago de Chile existen inventarios de emisiones para los años 1997, 2000, 2002 y 2005. Son confeccionados por la CONAMA (comisión Nacional del Medio Ambiente) para identificar los principales responsables de las emisiones y lugares críticos. De esta forma se pueden tomar acciones para reducir el daño de las emisiones.

Para monóxido de carbono para el año 2002, cerca del 95 % de el total de las emisiones proviene de fuentes móviles. Estas emisiones son calculadas con la metodología MODEM (Corvalán et al 2002).

Mediante la metodología MODEM, el inventario se construye sobre la base de un modelo de transporte, que para el caso de Santiago es el ESTRAUS que contiene la red vial de la ciudad, los flujos totales en cada arco y las velocidades medias en cada arco (entre otra información). Las emisiones de fuentes móviles se dividen en 3 categorías: Emisiones calientes, Emisiones en frío y Emisiones evaporativas. Para el caso de CO no existen emisiones evaporativas, ya que el CO se genera a partir de la combustión. Las emisiones en caliente son aquellas emisiones que se obtienen cuando el motor está funcionando a régimen de temperatura normal. Las emisiones en frío son aquellas que se generan en la porción del viaje de un vehículo en la cual

la conducción se realiza en condiciones de temperatura de motor inferiores a las normales de diseño.

La metodología de cálculo de las emisiones en caliente es la siguiente:

$$E_{ijk}^{hora} = FT_{jk}[\text{veh}/h] * L_j[\text{km}] * FE_{ijk}(v)[\text{gr}/\text{km}] * PF_{jk}[\text{hora}] * C_{jk}[\text{hora}] \quad (\text{C.1})$$

Donde:

- $E_{ijk}^{hora}$  son las emisiones en [gr] del contaminante considerado i en un arco j para la categoría vehicular k en una hora determinada.
- $FT_{jk}$  es el flujo total de vehículos en el arco j, medido en vehículos por hora obtenido del modelo ESTRAUSS para el caso base utilizado (ej. punta mañana).
- $L_j$  es el largo del arco evaluado, en kilómetros.
- $FE_{ijk}(v)$  es el factor de emisión del contaminante i en un arco j para la categoría vehicular k. Estos factores dependen de la velocidad media en el arco (v). Sus unidades son de gramos de contaminante producido por kilómetro recorrido.
- $PF_{jk}$  es el perfil de flujo o fracción del flujo total (Flujo jk) correspondiente a la hora evaluada.
- $C_{jk}$  es la fracción del flujo total en el arco j perteneciente a la categoría vehicular k, para la hora evaluada. Estos se obtienen mediante campañas de caracterización de flujos en puntos representativos alrededor de la ciudad.

De esta forma se calculan las emisiones en caliente para cada tipo de contaminante, para todos los tipos de categorías de vehículos, para una hora determinada y un arco determinado. Haciendo la sumatoria de todos estos factores se obtienen las emisiones totales de los contaminantes, en este caso CO.

La metodología de cálculo de las emisiones en frío es la siguiente:

$$E_{ijkm} = E_{ijkm}^{cal} * \left( \frac{e_{frío}}{e_{cal}} \right)_{jk} (T_m) * F_{viaje}(T_m, LV_k) \quad (\text{C.2})$$

Donde:

- $E_{ijkm}$  es la emisión en frío de la comuna i, para el contaminante j, para la categoría de vehículo k, para el mes m, en Ton del contaminante/mes

- $E_{ijkm}^{cal}$  es la emisión calculada con la metodología de arcos (emisiones en caliente) para la comuna  $i$ , contaminante  $j$ , vehículo  $k$ , en el mes  $m$ , en Ton/mes.
- $\left(\frac{e_{frío}}{e_{cal}}\right)_{jk}(T_m)$  es la razón de emisiones entre motor frío y motor caliente para el contaminante  $j$  y vehículo  $k$  (adimensional).
- $F_{viaje}$  es la fracción de un viaje efectuado por un vehículo con el motor en frío dependiente de  $T_m$  y  $LV$ .
- $T_m$  es la temperatura promedio del mes  $m$ .
- $LV_k$  es el largo de un viaje promedio para un vehículo de categoría  $k$ .

De esta forma se calculan las emisiones por comuna para cada categoría y para cada contaminante asociadas al tramo en que el vehículo transita con el motor en frío. Por lo tanto las emisiones calientes correspondientes a este tramo tendrán que ser restadas en el sistema de las calientes originales calculadas con los arcos. Estas emisiones se calculan de la siguiente manera:

$$E_{ijkm} = E_{ijkm}^{cal} * F_{viaje}(T_m, LV_k) \quad (C.3)$$

Donde:

- $E_{ijkm}$  es la emisión en caliente de la comuna  $i$ , para el contaminante  $j$ , para la categoría de vehículo  $k$ , para el mes  $m$ , en Ton del contaminante/mes emitida en el tramo frío.
- $E_{ijkm}^{cal}$  es la emisión calculada con la metodología de arcos (emisiones en caliente) para la comuna  $i$ , contaminante  $j$ , vehículo  $k$ , en el mes  $m$ , en Ton/mes.
- $F_{viaje}$  es la fracción de un viaje efectuado por un vehículo con el motor en frío dependiente de  $T_m$  y  $LV$ .
- $T_m$  es la temperatura promedio del mes  $m$ .
- $LV_k$  es el largo de un viaje promedio para un vehículo de categoría  $k$ .

El nivel de desagregación espacial de las emisiones en frío es a resolución de comuna. Para distribuir las emisiones en frío en cada comuna se distribuyen sobre la red ESTRAUS según largos de arcos, flujos vehiculares y velocidades medias.

## Anexo D

# Validación Meteorología

## D.1. Configuración

### D.1.1. Modelo

El modelo meteorológico utilizado es el MM5, el cual fue elegido por varias razones. La dirección meteorológica de Chile (DMC) ocupa el modelo MM5 en la predicción meteorológica, luego se tiene experiencia en el modelo y se sabe a priori que se obtienen buenos resultados. Además, una de las referencias de este trabajo es Schmitz 2005, que también utiliza campos MM5 para obtener los campos meteorológicos. De esta forma al ocupar una configuración similar en la meteorología se pueden comparar los resultados de los modelos de dispersión. Otra razón de para ocupar el modelo MM5 es que la plataforma Polyphemus es capaz de interpolar los campos de salida de este modelo, sin necesidad de tener que programar el código de interpolación a la grilla del modelo de dispersión.

Para la simulación se realizaron 3 anidamientos (es decir, 4 dominios en total) con un dominio madre de 54 km de resolución de grilla, y anidamientos de 18, 6 y 2 km. El dominio de 2 km cubre la zona central de Chile, desde la costa hasta la cordillera de los Andes centrado en Santiago. Verticalmente, se poseen 30 niveles sigma (siguen al terreno) llegando hasta una presión máxima de 100 hPa.

Para las condiciones de borde se usaron campos de re-análisis NCEP/NCAR (Kalnay et al 1996). Los campos climatológicos de uso de suelo utilizados provienen del instituto “United States Geological Survey” y son usados para caracterizar la humedad e intercambios de energía con la superficie. Las parametrizaciones físicas usadas son las siguientes:

- Humedad explícita: Esquema “Simple Ice” (Dudhia 1989).



- Física de la humedad: Ver tablas de MM5.
- Esquema de cúmulos: Para los 2 primeros dominios se usa un esquema K-F (Kain y Fritsch 1990) y para los 2 de mayor resolución un esquema de micro-física explícita (explicit microphysics, Seaman and Michelson 2000).
- Capa límite Planetaria: esquema MRF (Hong y Pan 1996).
- Enfriamiento de la atmósfera: Esquema de radiación de nubes (Cloud radiation Scheme, Seaman y Michelson 2000).

De las simulaciones del MM5 se extrae los campos de mayor resolución y son interpolados al dominio cartesiano de Polyphemus, el cual tiene 6 niveles verticales sobre la superficie, descrito en 2.2.6. Estos son los valores usados finalmente en los análisis. La única excepción corresponde a la estación de sondeo en Santo Domingo, la cual se localiza fuera del dominio de mayor resolución. Para los análisis con esta estación se usaron datos directamente extraídos de los campos MM5 del segundo dominio anidado.

### **D.1.2. Observaciones**

Para realizar las comparaciones con los resultados del modelo meteorológico se consideraron datos sinópticos de los reanalysis del NCEP, sondeos a las 00-12 UTC obtenido en Santo Domingo (ver tabla D.1) ubicada aproximadamente 100 km al oeste de Santiago. Además se analiza datos meteorológicos promediados por hora obtenidos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire (intensidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) y en el aeropuerto de Santiago (además de los 4 anteriores, se añade presión en la superficie y cobertura nubosa). La ubicaciones de todas estas estaciones se encuentran en la tabla D.1.

Tabla D.1: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo meteorológicas. Los valores de altura con el símbolo (\*) fueron obtenidos usando el software Google Earth. Los valores con una suma de alturas corresponden al nivel del suelo

más la altura del sensor			
Estación	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m)
Cerrillos	-33.4925	-70.7129	514(*)
El Bosque	-33.5439	-70.6638	580(*)
El Manzano	-33.5908	-70.3667	874
Torre Entel	-33.4405	-70.6500	554+120
La Florida	-33.5135	-70.5859	599(*)
Avenida La Paz	-33.4193	-70.6487	576(*)
La Reina	-33.4502	-70.5167	857(*)
Las Condes	-33.3738	-70.5226	800(*)
Lo Prado	-33.4552	-70.9333	1065+50
Parque O'higgins	-33.4612	-70.6582	545(*)
Pudahuel	-33.4349	-70.7479	495(*)
Aeropuerto	-33.3833	-70.7833	479(*)
Santo Domingo	-33.6500	-71.6200	75

#### D.1.2.1. Reanálisis NCEP

De acuerdo a los reanálisis NCEP para el mes de Enero del 2002 (figura D.1 ) este mes está caracterizado por la predominancia de una alta del Pacífico, particularmente en el período del 2 al 11 de Enero. Entre el 12 y 20 de este mes hay una interrupción en el flujo zonal en la troposfera media, el cual es recuperado por el resto del período. Este cambio también es aparente en las observaciones de la estación de sondeo (ver figura D.39). De hecho, entre el 15 y el 20 de Enero existe un debilitamiento de la inversión de subsidencia y un reforzamiento de la mezcla vertical bajo los 1000 m.s.n.m. Anteriormente, entre el 10 y el 15 de Enero, existe evidencia de una baja costera que induce vientos del este sobre la cuenca de Santiago, temperaturas más altas y aire más seco, resultando generalmente en una mayor concentración de contaminantes (Garreaud et al 2002). La situación anterior es contrarrestado parcialmente por la fuerte mezcla radiativa ocurrida en la estación de verano produciendo un desarrollo de la capa de mezcla (Gallardo et al 2000).

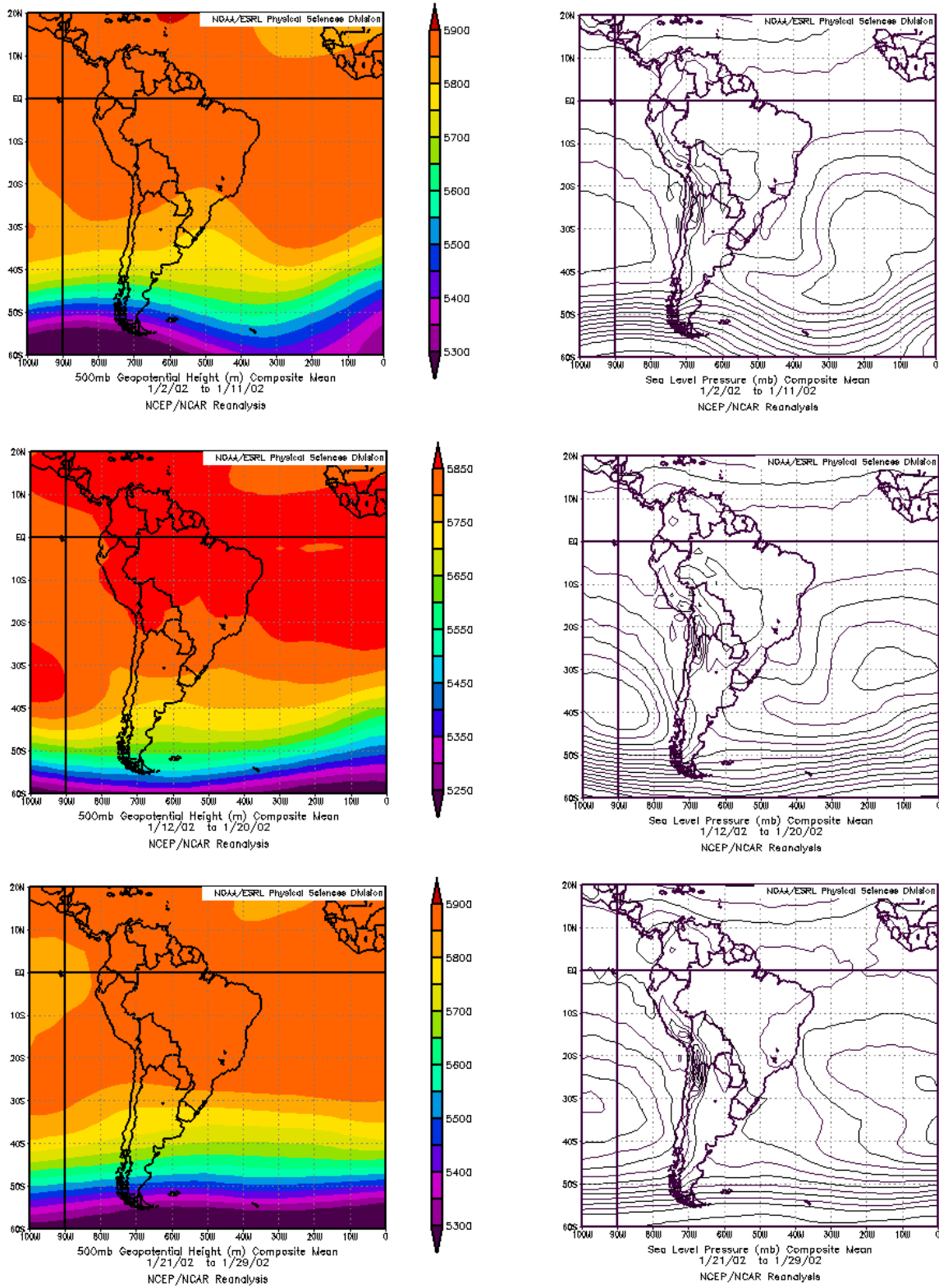


Figura D.1: Reanálisis NCEP para los períodos del 2 al 11 de enero, 12 al 20 de enero y 21 al 29 de enero. A la izquierda se muestra la altura geopotencial y a la derecha la presión al nivel del mar

## **D.2. Resultados**

Los resultados son presentados en términos de gráficos de series de tiempo, gráficos de dispersión, ciclos diarios y diagramas de Taylor (ver anexo F).

### **D.2.1. Series de tiempo**

En las figuras de la D.2 a la D.13 se muestran las series de tiempo para todo el período simulado (2 al 30 de enero del 2002), en rojo el modelo y en azul las observaciones.

En la figura correspondiente al aeropuerto (D.2) se puede apreciar que el modelo sigue de manera cercana los cambios en la presión de superficie que es el resultado de los cambios en las condiciones sinópticas de gran escala. Sin embargo, la cobertura nubosa tiende a ser sobrestimada induciendo vientos y temperaturas de menor magnitud que las observaciones. Esto está relacionado con la mala representación de las nubes en los niveles inferiores de la mayoría de los modelos meteorológicos (EOL 2006). Estas diferencias se aumentan en áreas de terreno complejo como es el caso en estudio (Alcafuz 2007).

Con respecto a las condiciones de viento, temperatura y humedad en la cuenca de Santiago descritas por las estaciones meteorológicas en la área urbana de Santiago el modelo es capaz de reproducir los valores observados. Para estas estaciones en general se observa que los vientos del modelo son mayores que las observaciones, particularmente en las horas de la noche. Esto podría estar relacionado con problemas de representación de la capa límite o representación inadecuada de la rugosidad del suelo. Existe una excepción a este comportamiento en la estación de Cerrillos donde los vientos son subestimados, debido a que el modelo no es capaz de representar las condiciones particulares de esta zona. La dirección del viento es representada de forma menos precisa que las demás variables, principalmente durante la noche cuando los vientos son débiles (intensidad menor a 2 m/s). Sin embargo, los vientos principales son reproducidos con una diferencia de 50 grados o menor.

Las estaciones fuera de la cuenca de Santiago (Lo Prado y El Manzano) tienen un comportamiento diferente, obteniéndose una mala representación de los valores observados. Estas diferencias se deben principalmente a que estas estaciones se encuentran situadas en topografías complicadas dificultando la representación por parte del modelo meteorológico.

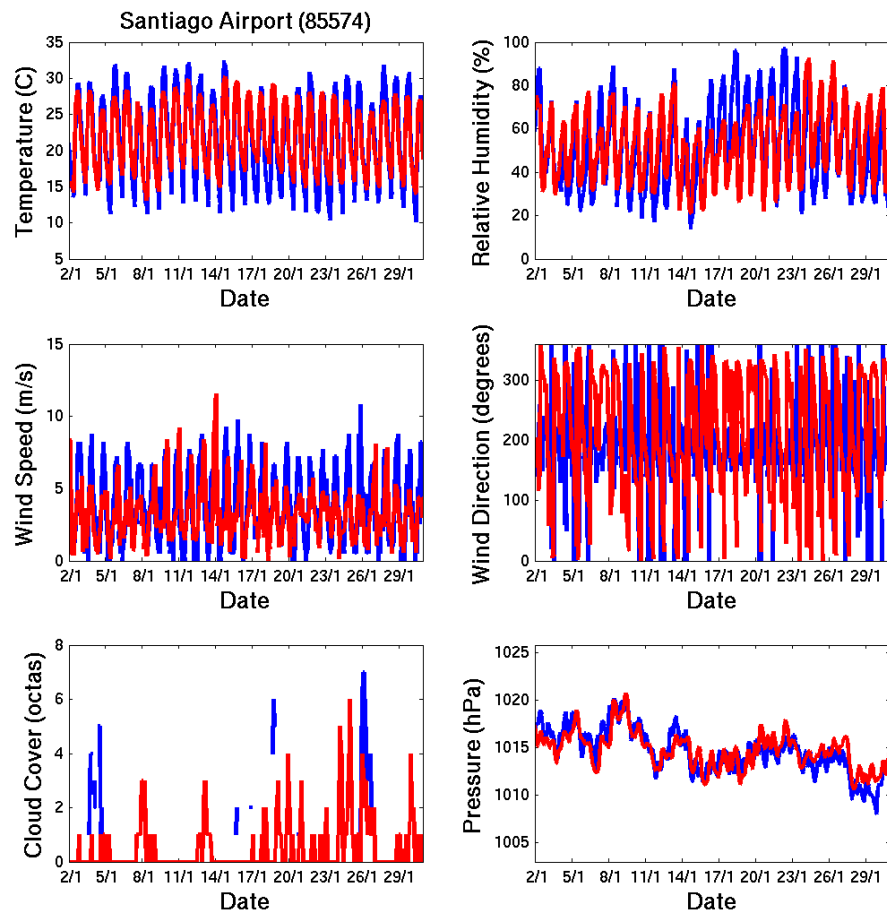


Figura D.2: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación del aeropuerto de Santiago.

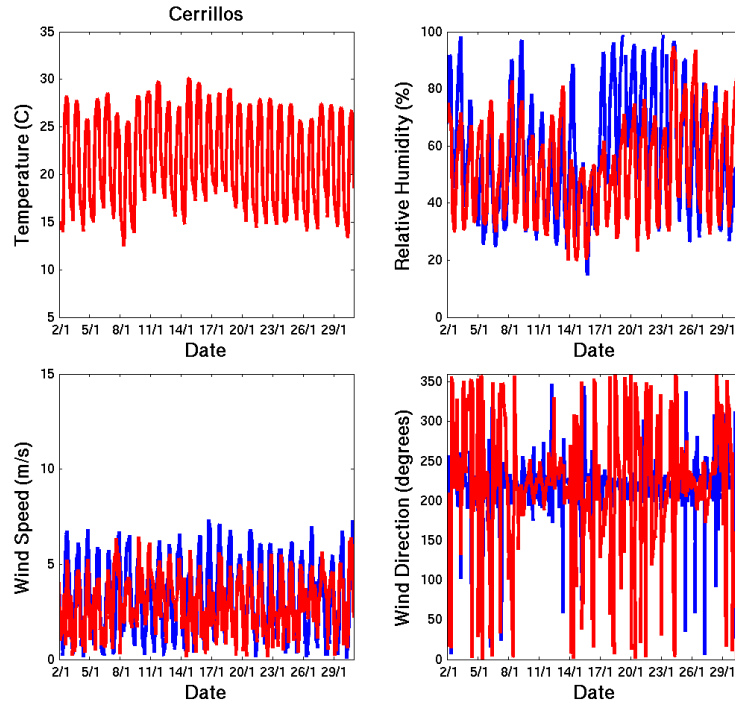


Figura D.3: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Cerrillos.

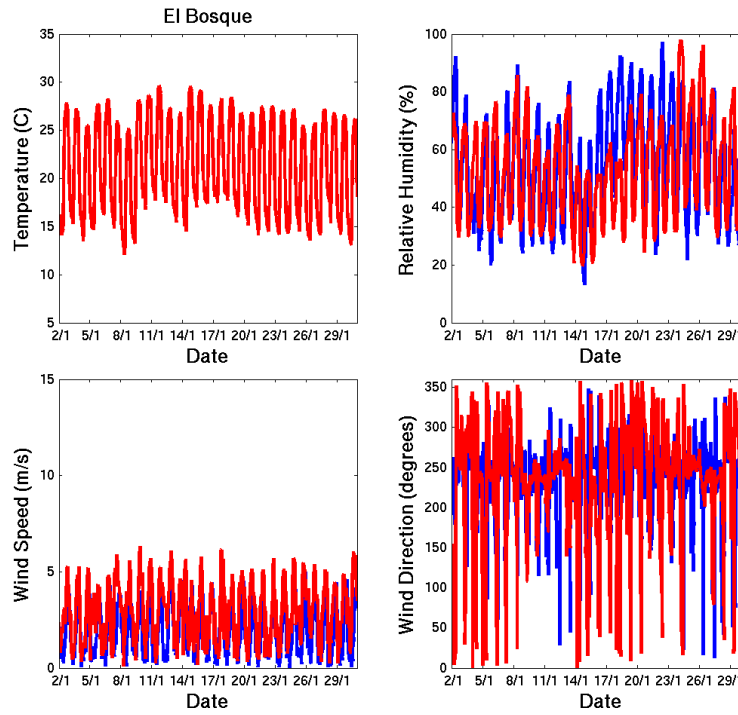


Figura D.4: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de El Bosque.

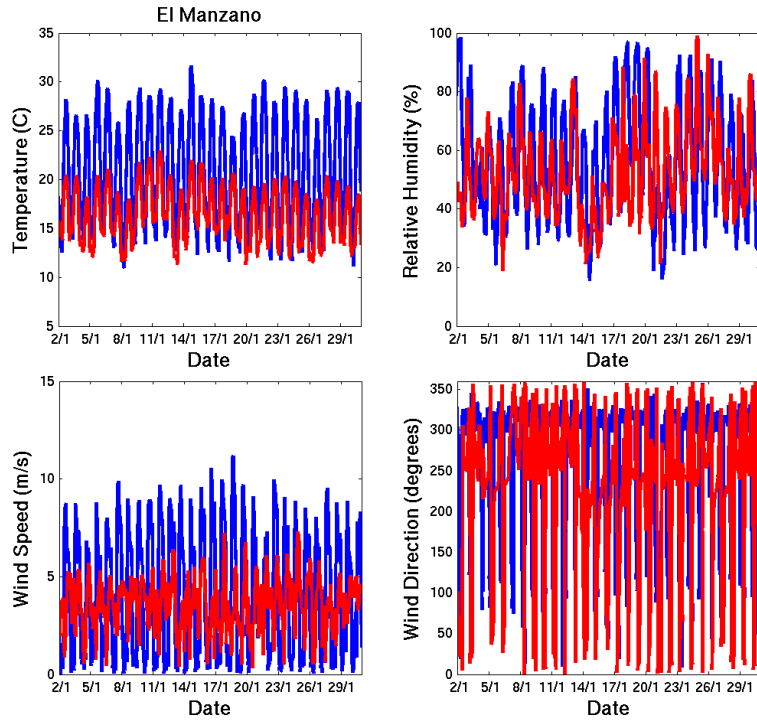


Figura D.5: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de El Manzano.

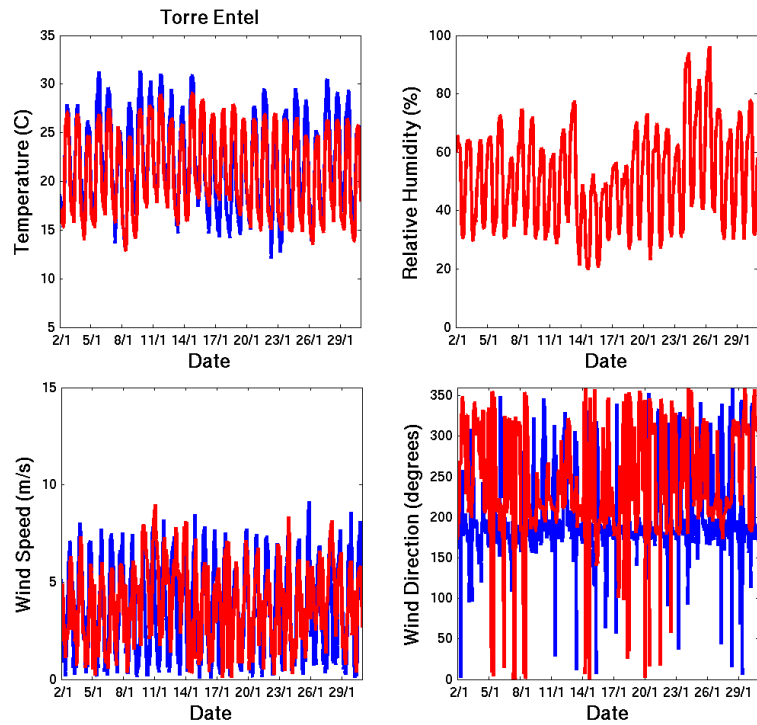


Figura D.6: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de la Torre Entel.

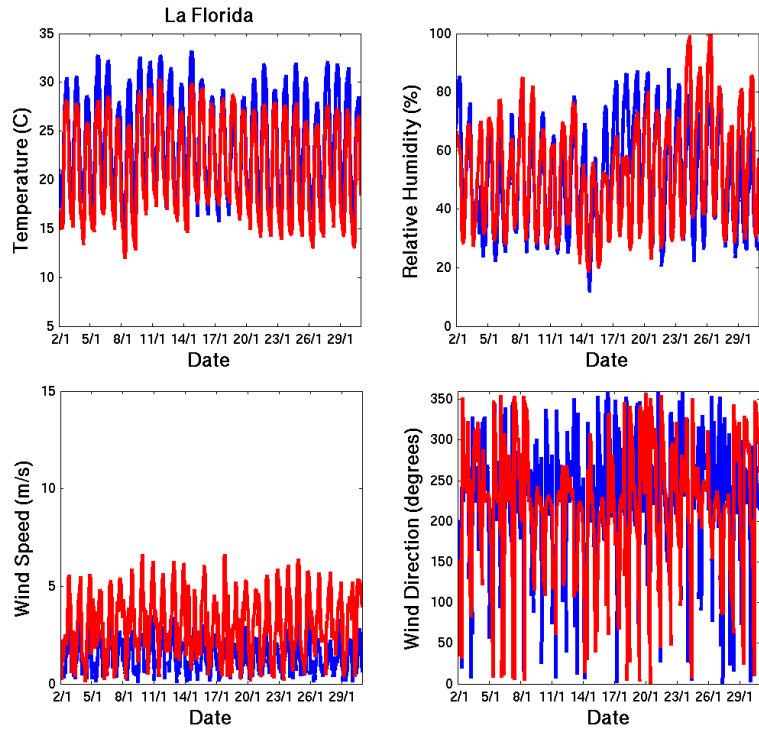


Figura D.7: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación la Florida.

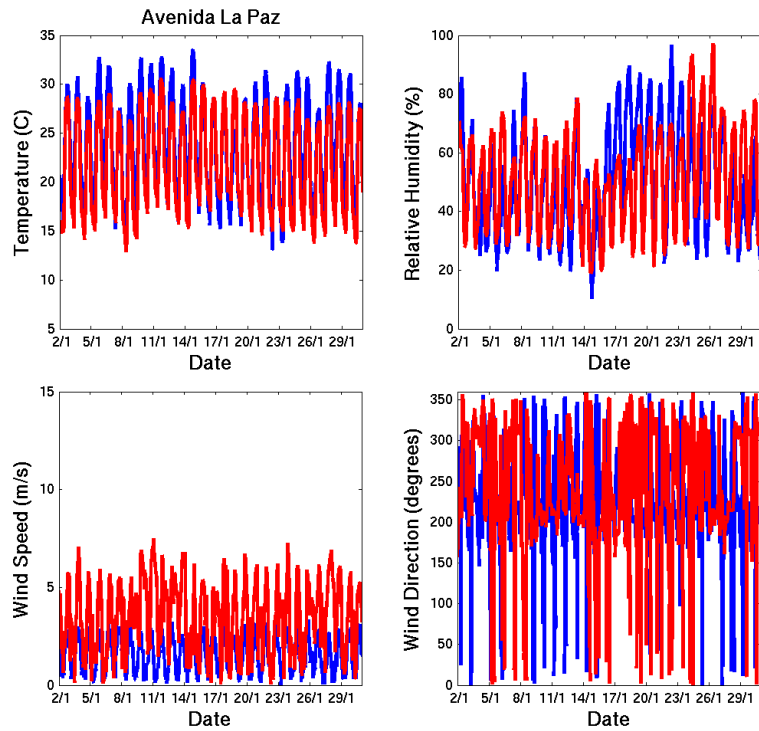


Figura D.8: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Avenida la Paz.



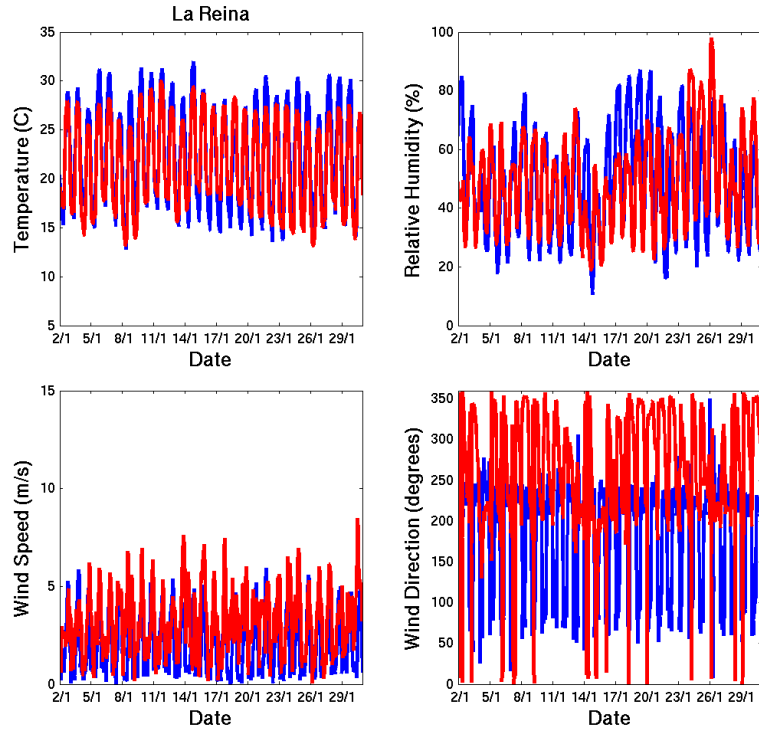


Figura D.9: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación La Reina.

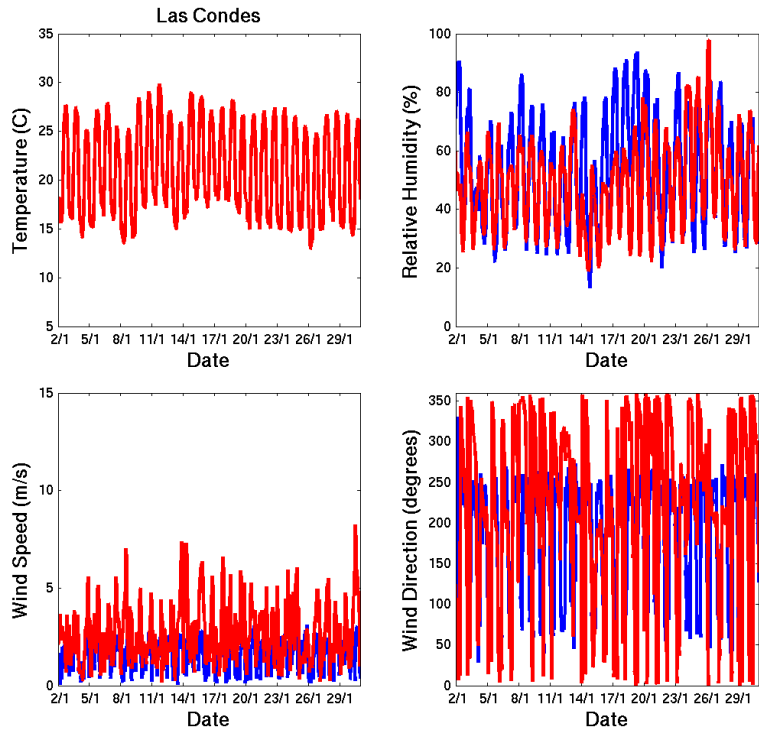


Figura D.10: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Las Condes.

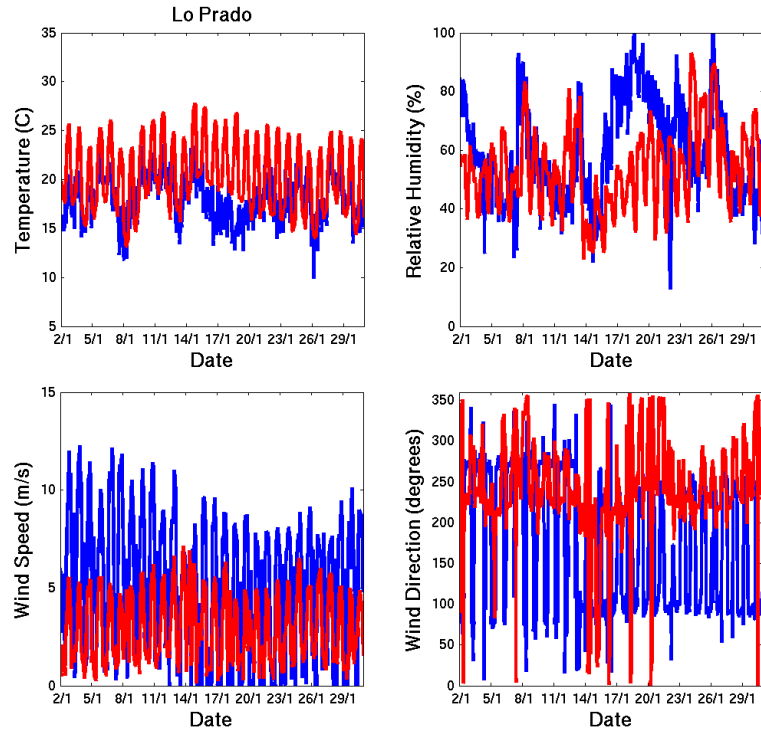


Figura D.11: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación Lo Prado.

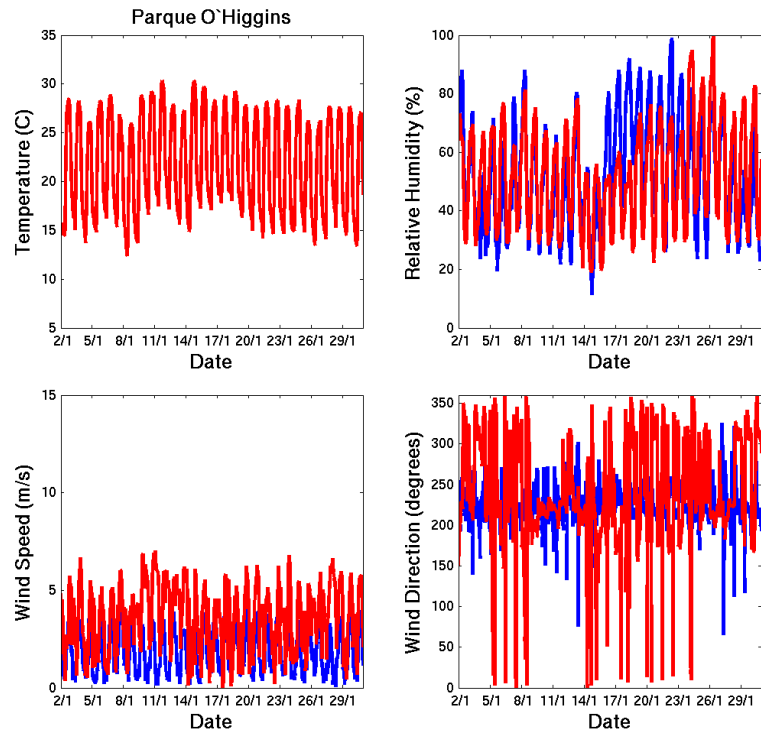


Figura D.12: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Parue O'higgins.

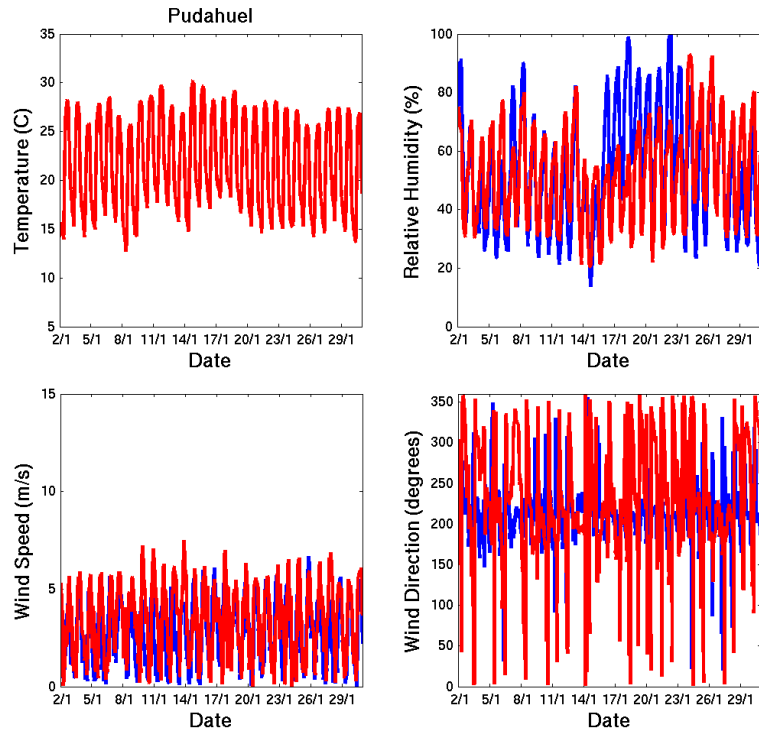


Figura D.13: Serie de tiempo para las variables meteorológicas en la estación de Pudahuel.

### D.2.2. Gradiente de temperatura

Para Santiago no existen mediciones de altura de capa de mezcla para poder validar este parámetro del modelo meteorológico. Sin embargo, se puede calcular el gradiente entre una estación que se encuentre en la cuenca (por ejemplo, estación Avenida La Paz) y una estación que se encuentre en altura, como es la estación de Lo Prado, la cual se encuentra a 1100 m.s.n.m. sobre una cadena montañosa al oeste de Santiago, lo que se encuentra en la figura D.14.

Los resultados muestran que el modelo subestima sistemáticamente el gradiente nocturno sugiriendo una mezcla vertical exagerada durante las horas de la noche, lo que podría explicar las altas temperaturas, mayor humedad y mayores vientos que muestra el modelo en relación a las observaciones.

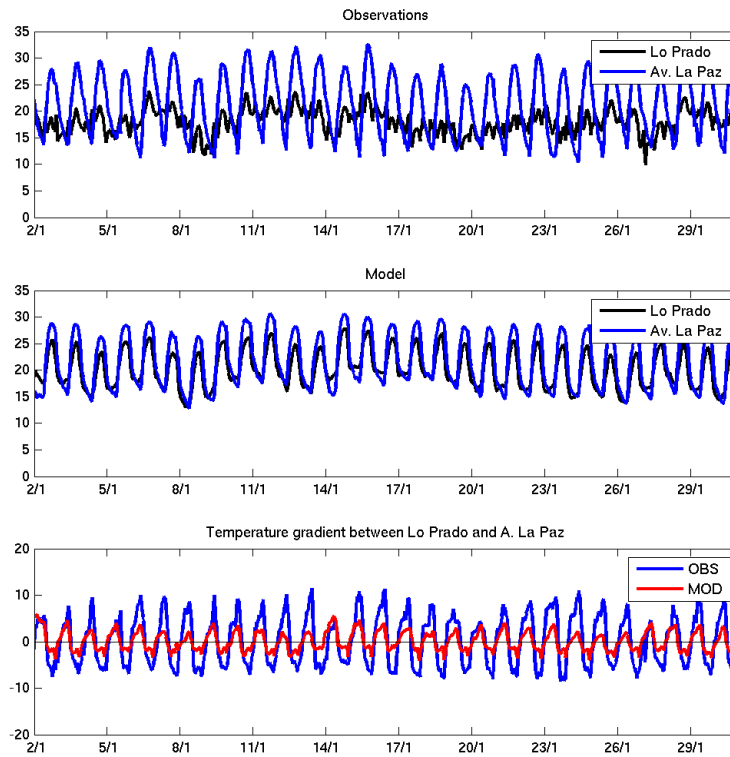


Figura D.14: Gradiente de temperatura para todo el período entre las estaciones Lo Prado y Avenida la Paz, para el modelo y las observaciones.

### D.2.3. Ciclos diarios

Los ciclos diarios para el período de simulación se muestran en las figuras desde la D.15 a la D.26, donde la línea roja corresponde al modelo y la azul a la observación. Se aprecia que en general se capturan los ciclos diarios, teniendo mayores dificultades para la variable dirección del viento. Como se dijo previamente, se observan resultados más lejos de la observación en las horas de la noche.

Dentro de la cuenca, la magnitud del viento tiende a ser sobrestimada salvo en la estación de Cerrillos y Entel donde se subestiman las concentraciones durante el día, sin embargo, durante la noche, todas las estaciones de la cuenca se muestran una sobrestimación de esta variable reafirmando lo dicho previamente sobre la posible sobrestimación de la mezcla vertical a estas horas.

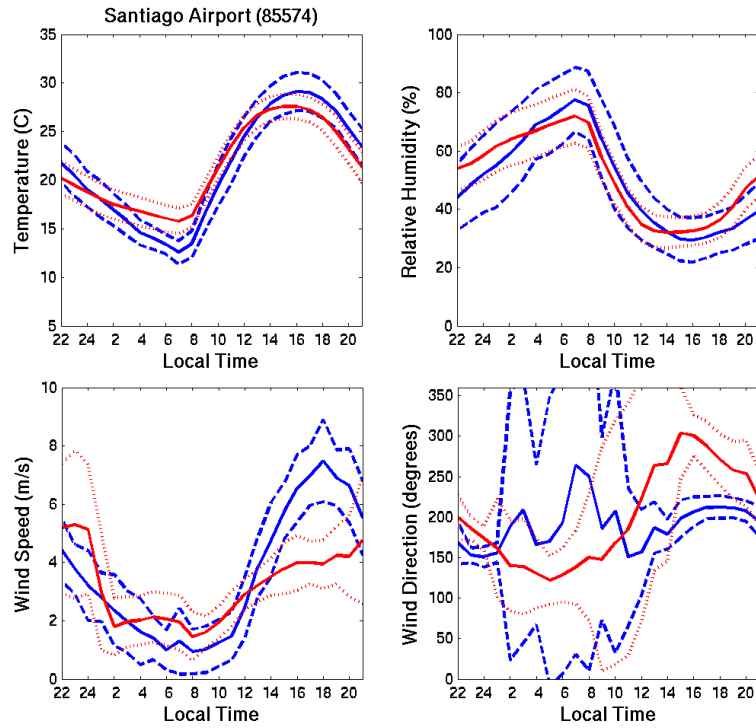


Figura D.15: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de el Aeropuerto de Santiago.

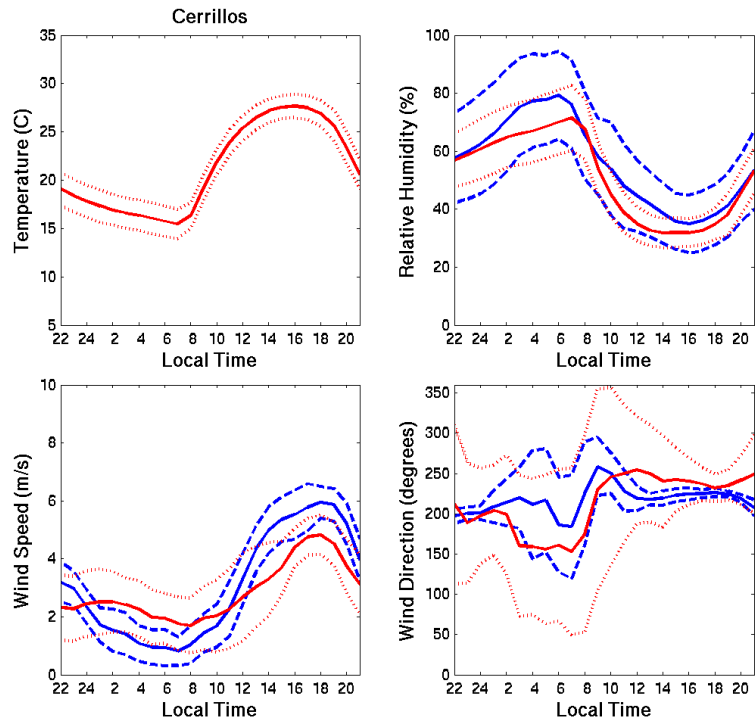


Figura D.16: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de Cerrillos.

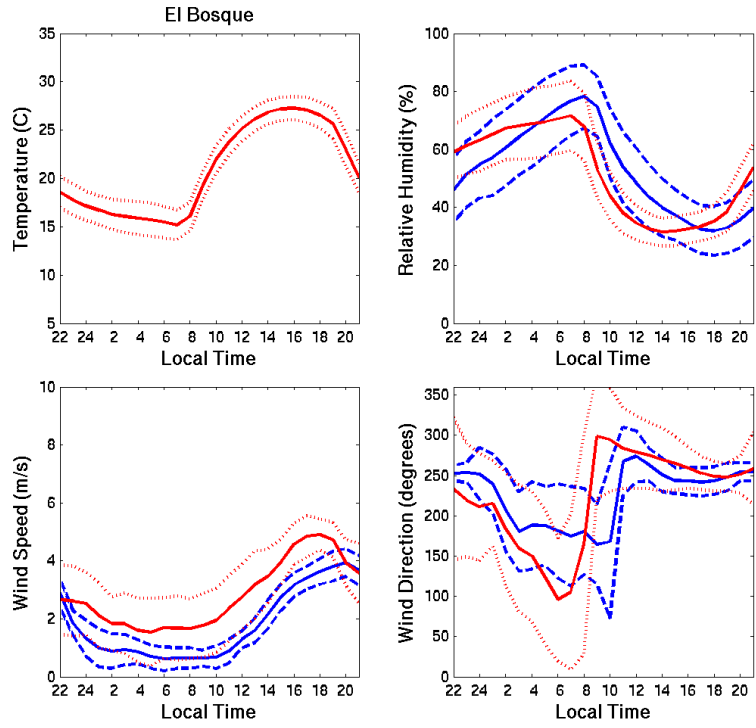


Figura D.17: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de El Bosque.

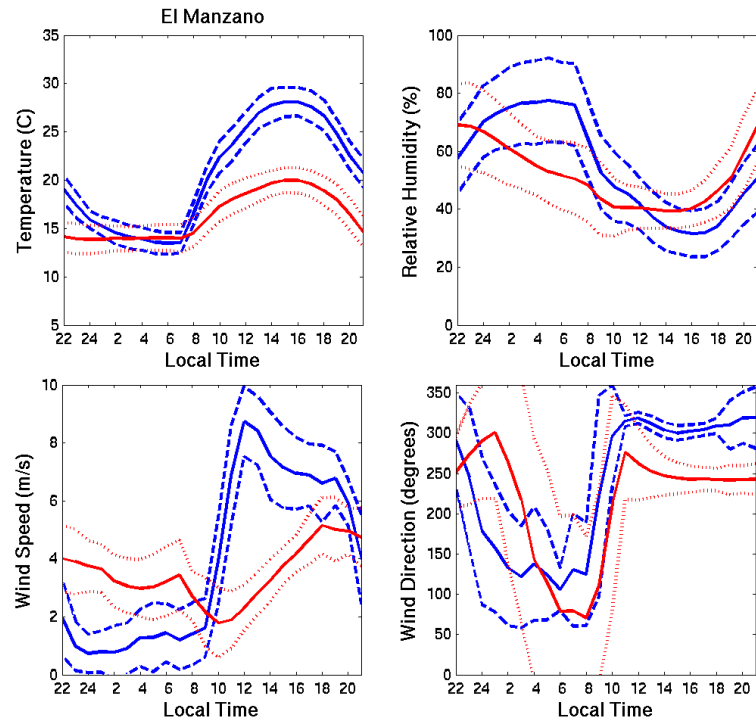


Figura D.18: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de El Manzano.

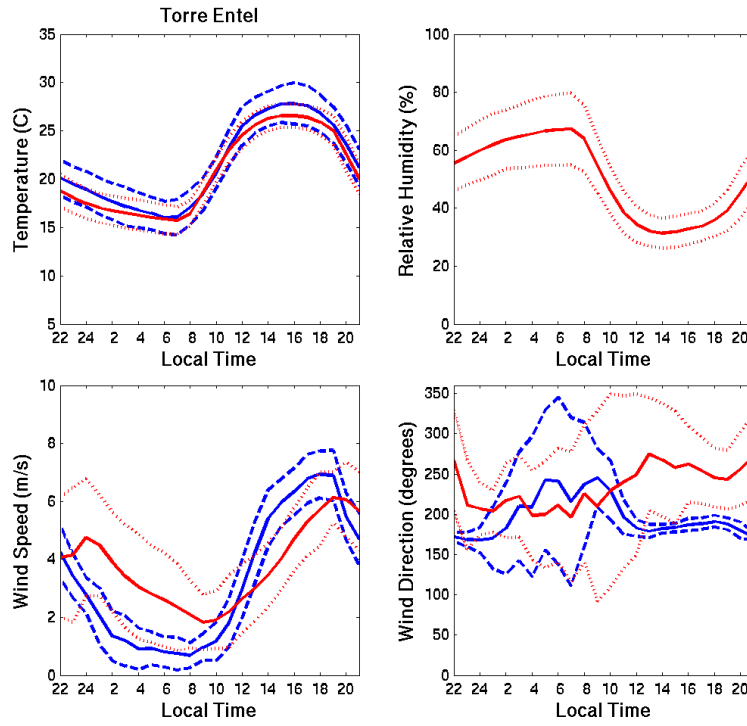


Figura D.19: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de Torre Entel.

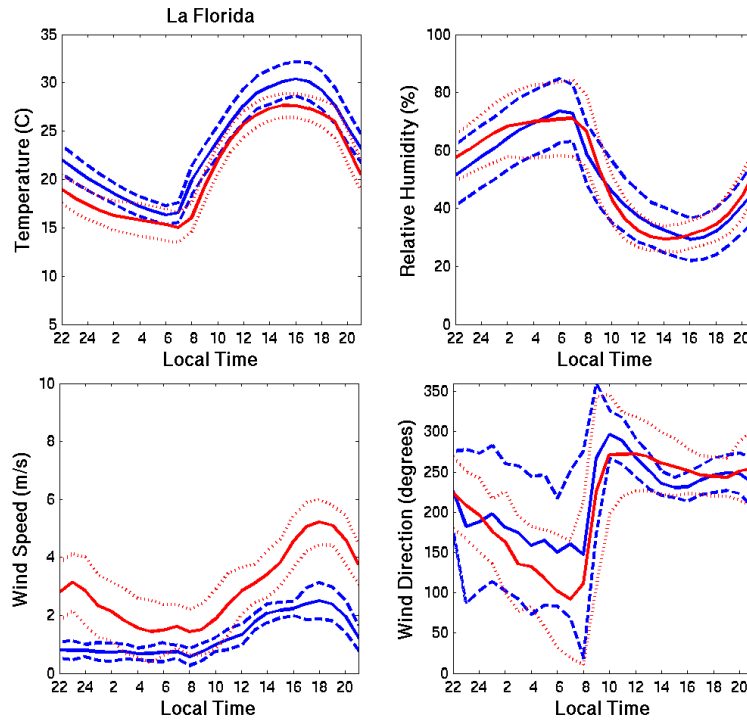


Figura D.20: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de La Florida.

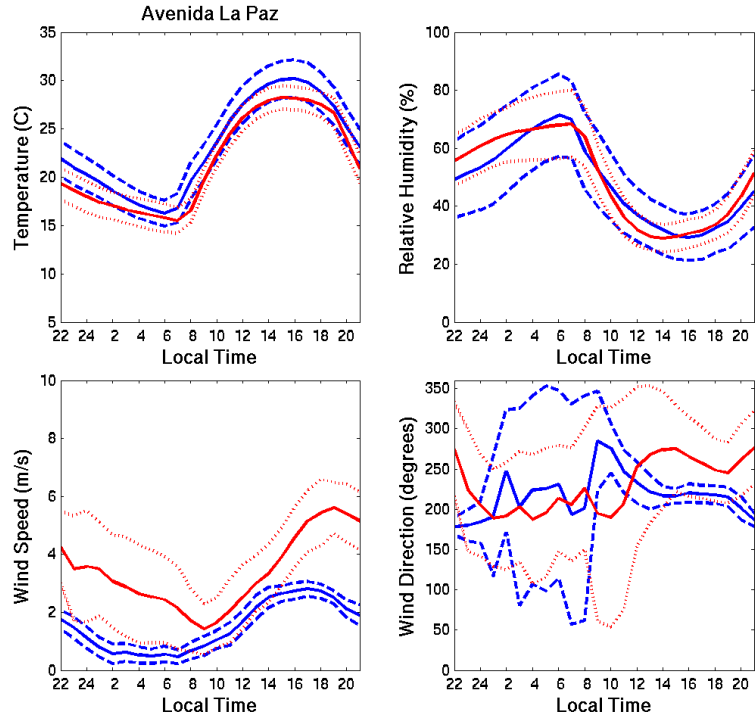


Figura D.21: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de Avenida la Paz.

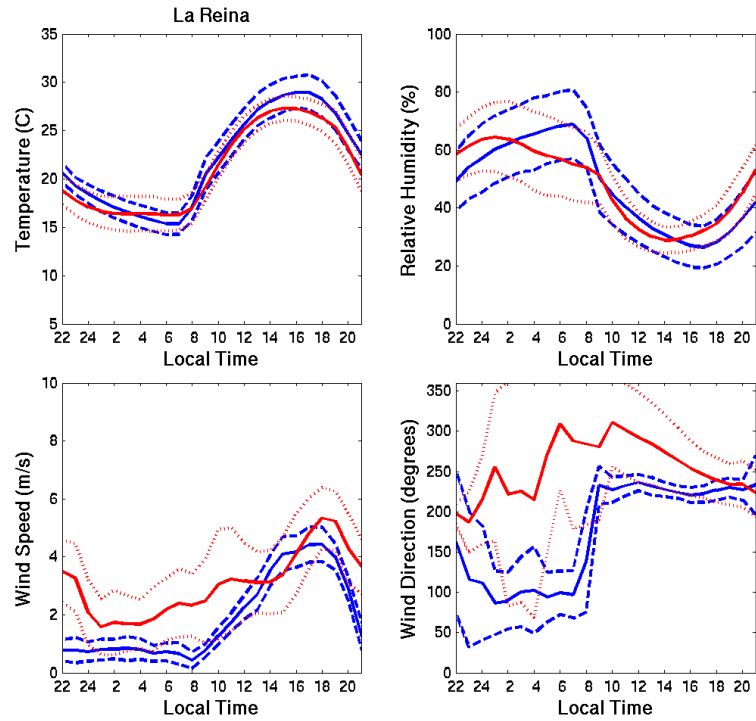


Figura D.22: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de La Reina.



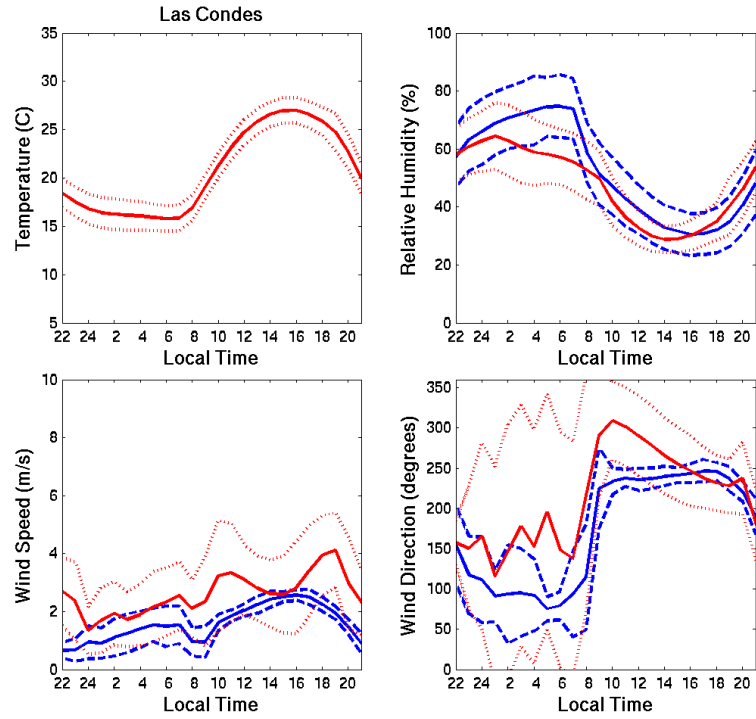


Figura D.23: Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Las Condes.

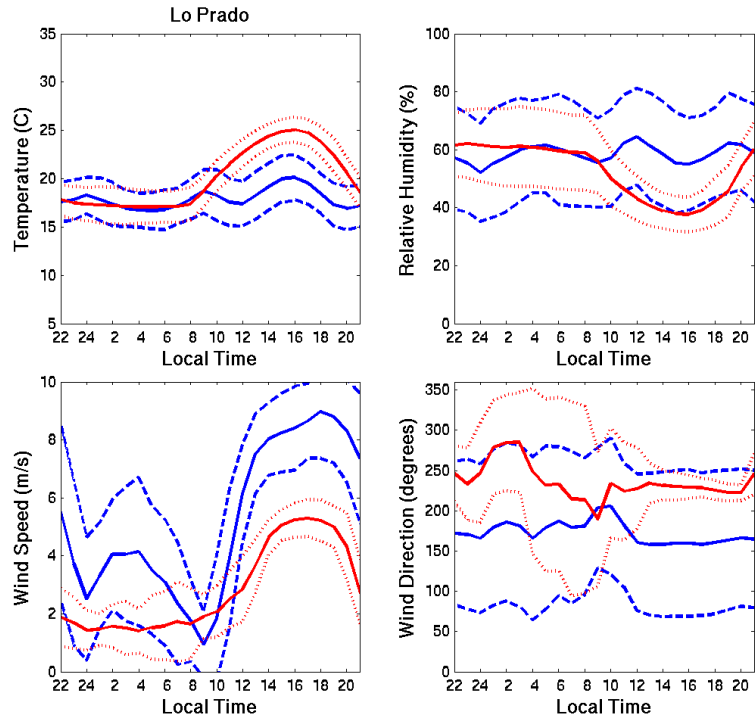


Figura D.24: Ciclo diurno para las variables meteorológicas en la estación de Lo Prado.

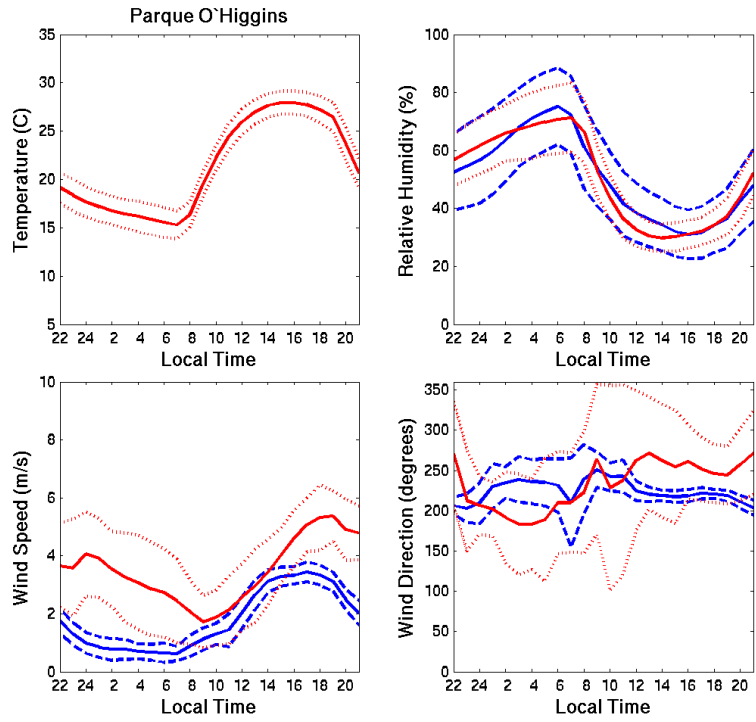


Figura D.25: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de Parque O'higgins.

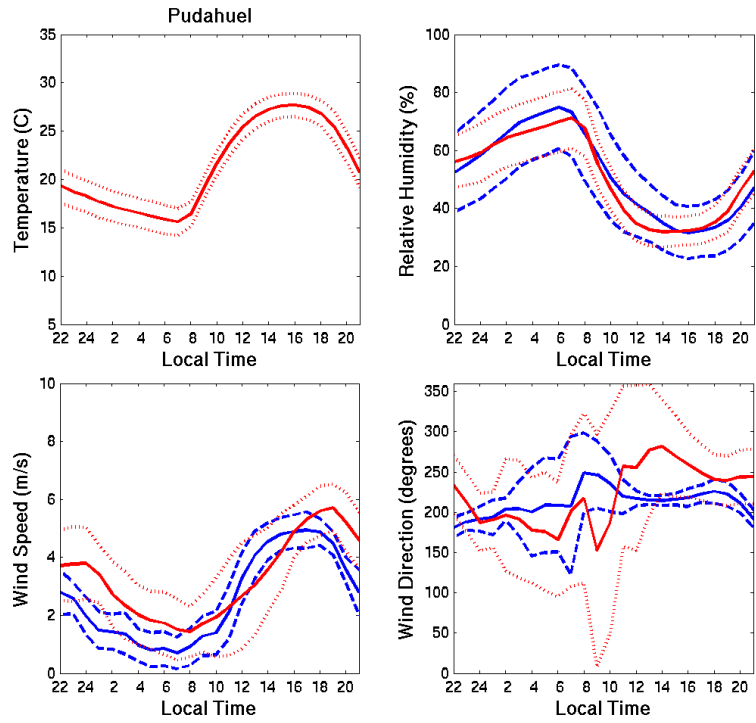


Figura D.26: Ciclo diario para las variables meteorológicas en la estación de Pudahuel.

## D.2.4. Gráficos de dispersión

En las figuras de la D.27 a la D.38 se muestran los gráficos de dispersión para todo el período de simulación, comparando resultados del modelo con las observaciones.

Se observa un comportamiento similar al descrito en la sección D.2.1 donde los mejores ajustes se encuentran para la temperatura, la humedad relativa está representada con un 25 % de diferencia con respecto a lo observado y la variable con representación más pobre es la dirección del viento.

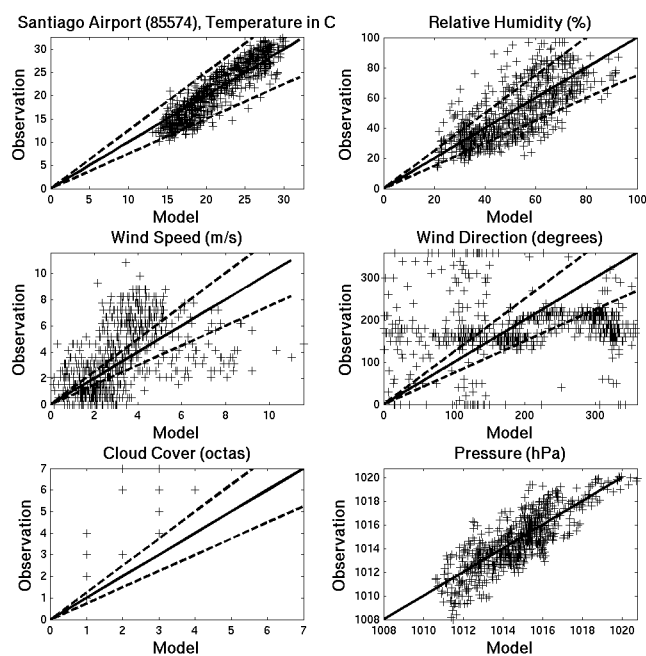


Figura D.27: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación del Aeropuerto de Santiago.

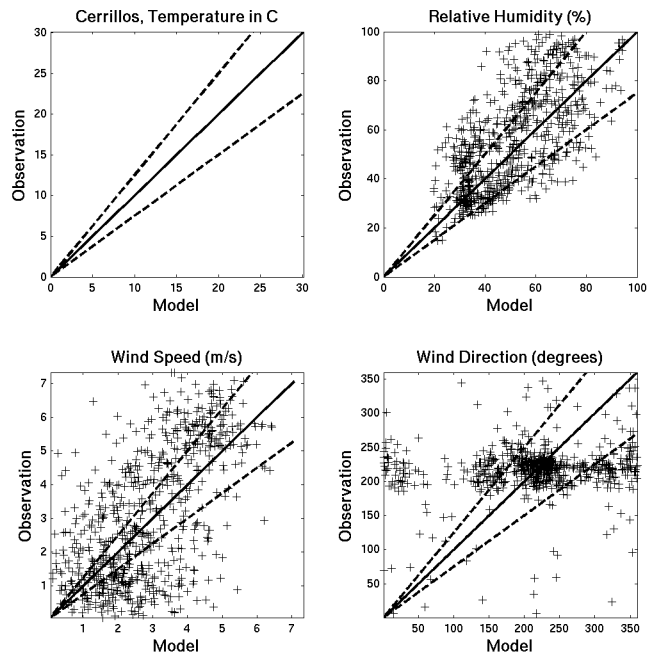


Figura D.28: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de Cerrillos.

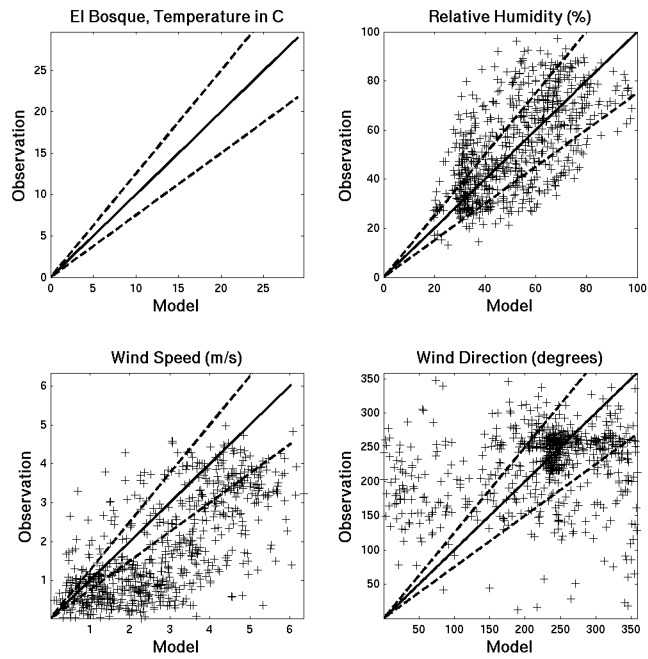


Figura D.29: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de El Bosque.

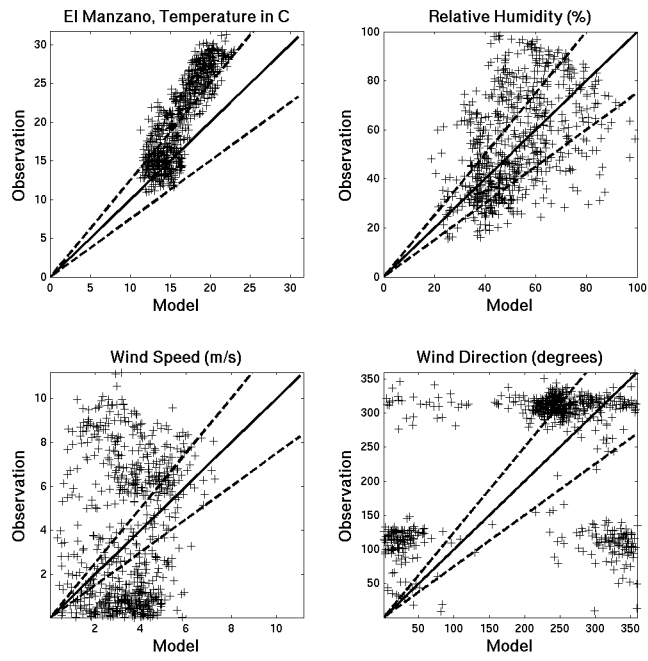


Figura D.30: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de El Manzano.

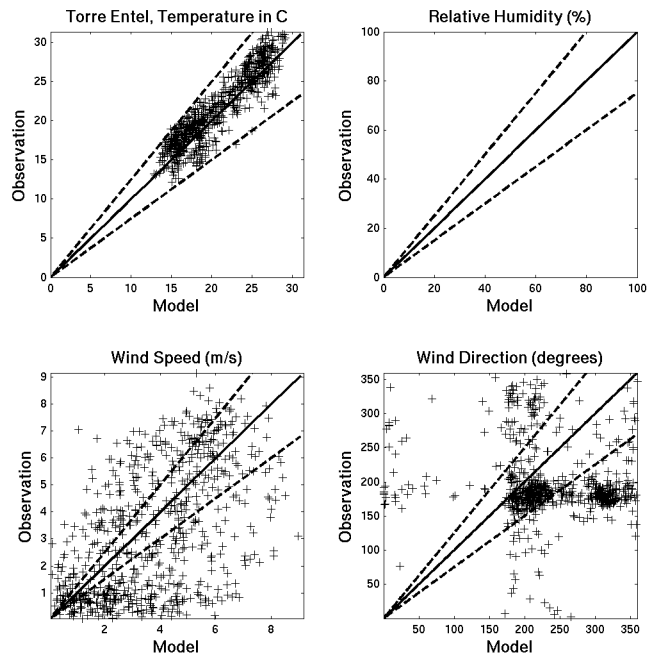


Figura D.31: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Torre Entel.

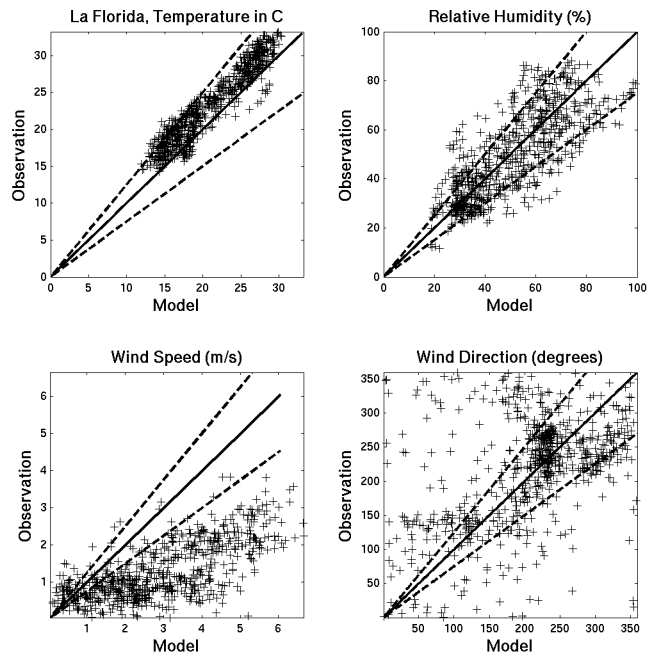


Figura D.32: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación La Florida.

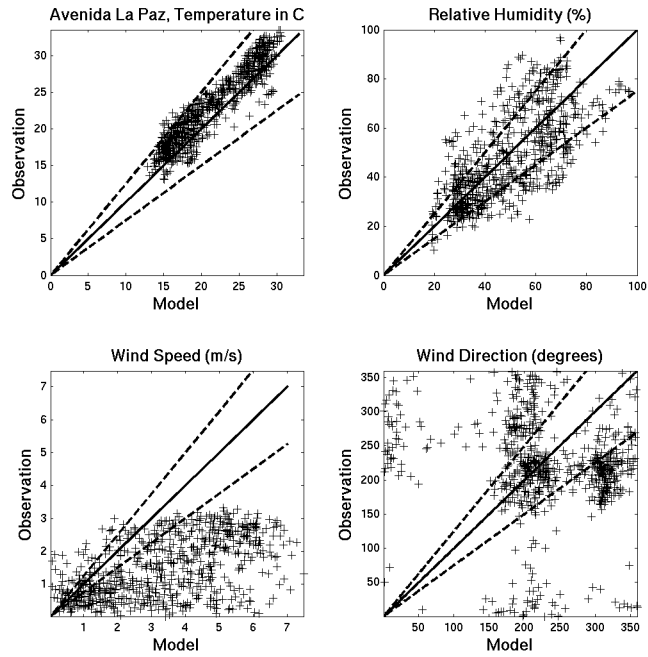


Figura D.33: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de La Paz.

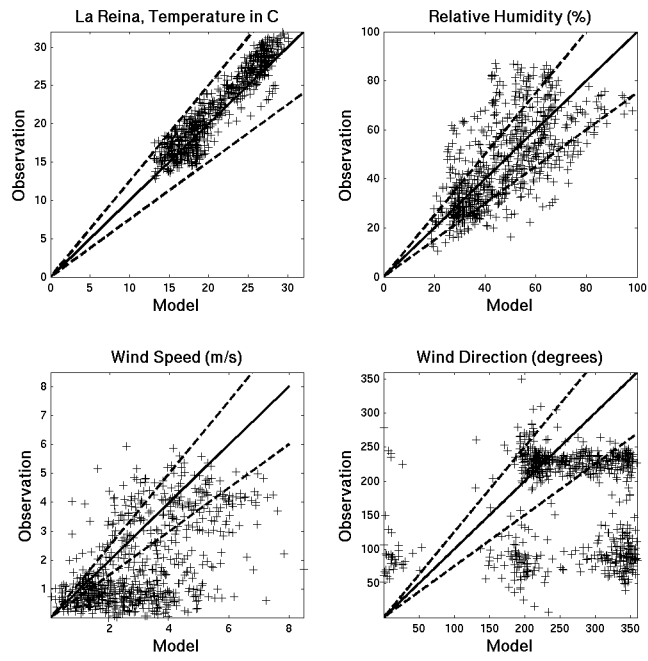


Figura D.34: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de La Reina.

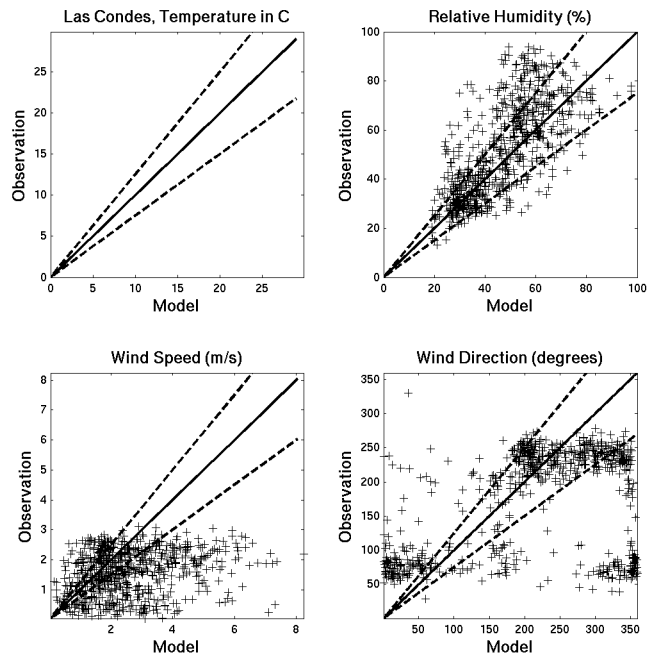


Figura D.35: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación de Las Condes.

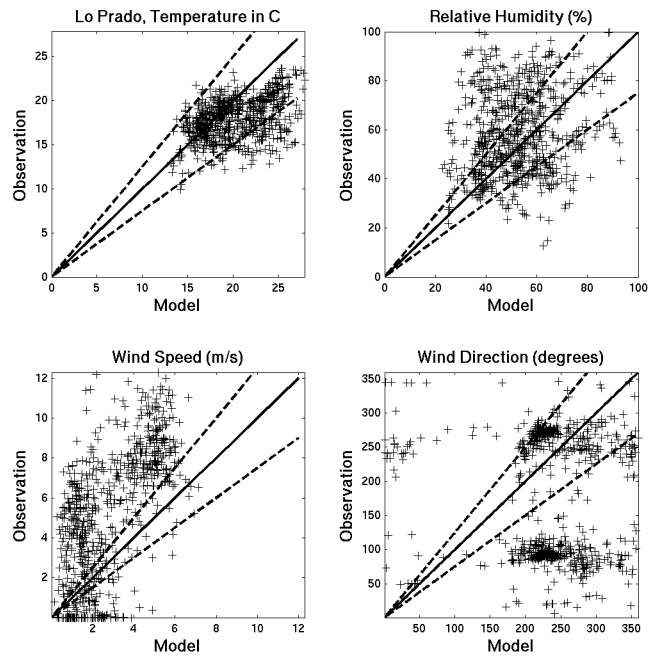


Figura D.36: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Lo Prado.

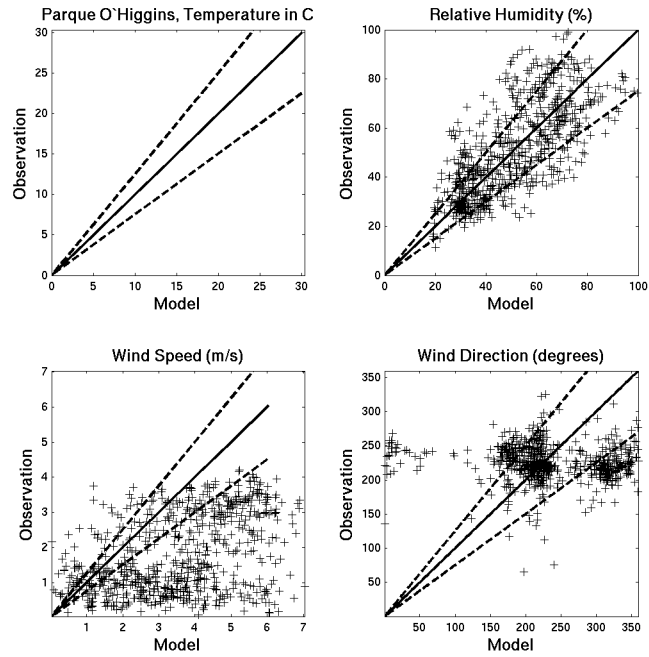


Figura D.37: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Parque O'higgins.



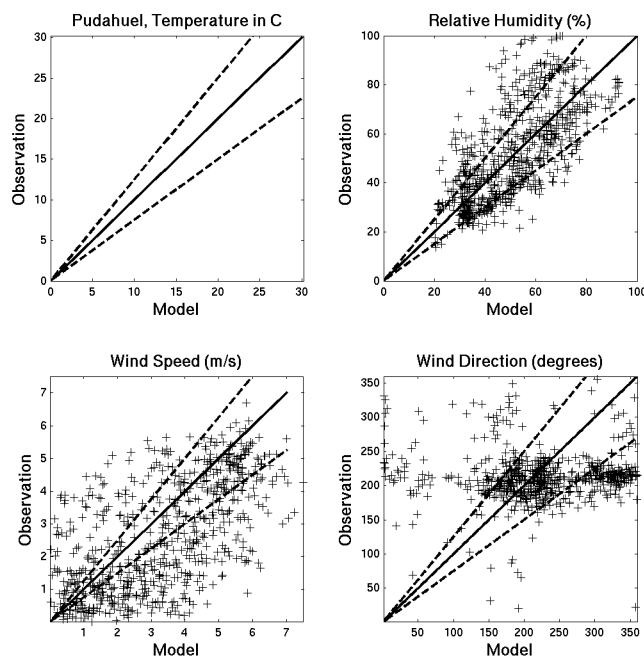


Figura D.38: Gráfico de dispersión Modelo versus Observaciones para la estación Pudahuel.

### D.2.5. Perfiles verticales

La figura D.39 muestra la evolución temporal de la temperatura, humedad específica y viento bajo 5 km. en la estación de Santo Domingo tanto para las observaciones como para el modelo.

En general se aprecia que el modelo captura las variaciones sinópticas observadas, particularmente el evento de baja costera descrito anteriormente. Sin embargo, el aumento de la mezcla vertical ocurrida entre el 15 y el 20 de Enero es subestimada por el modelo. Esto último se puede concluir ya que al observar la temperatura del sondeo entre estas fechas se aprecia una inversión térmica que produce temperaturas más homogéneas en la vertical lo que indica una mayor mezcla, lo que no ocurre con menor magnitud en los resultados del modelo.

### D.2.6. Diagramas de Taylor

En las figuras de la D.40 a la D.43 se muestran los diagramas de Taylor (ver anexo F) por variable meteorológica para todas las estaciones.

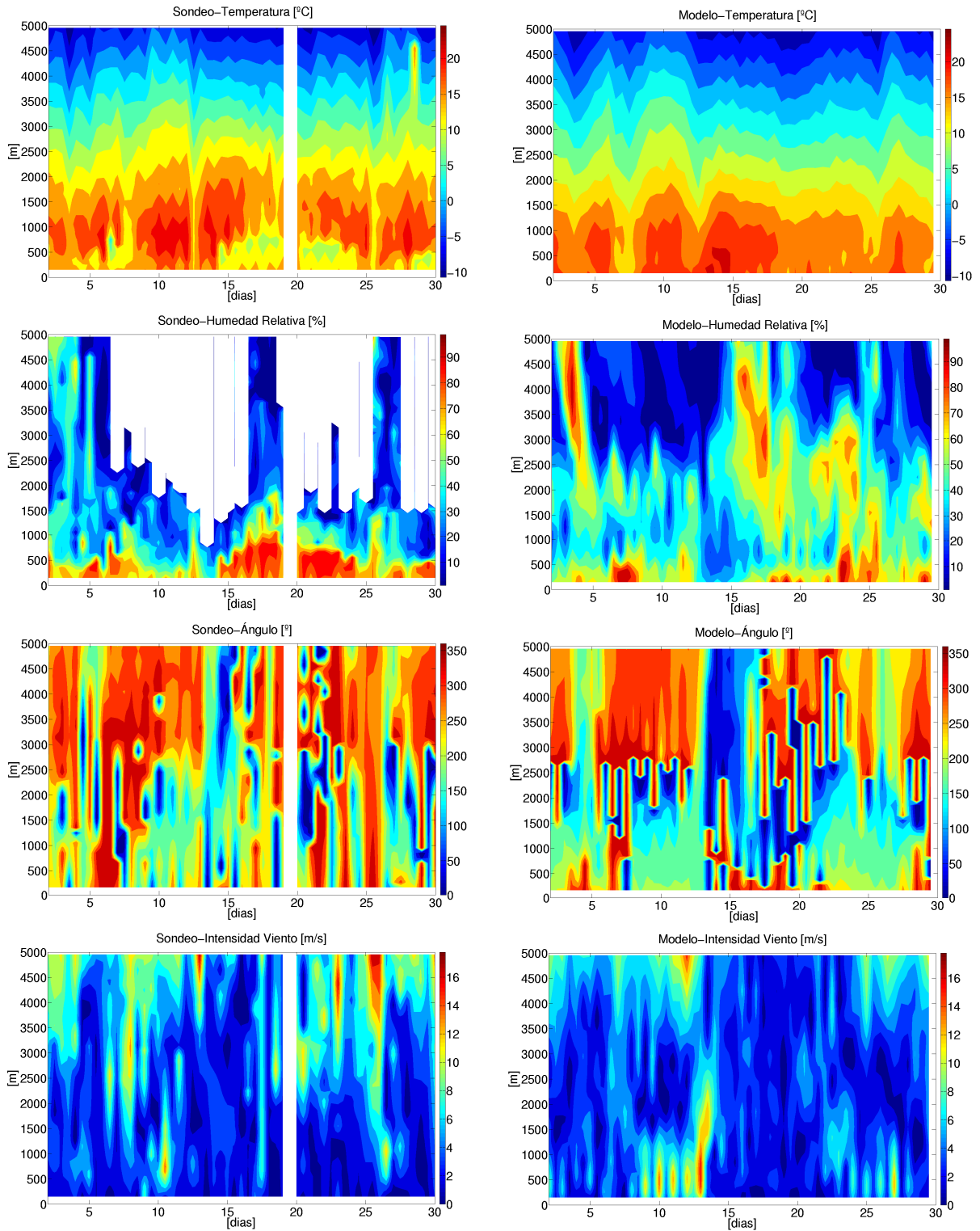


Figura D.39: Perfiles verticales para las observaciones y el modelo en la estación de Santo Domingo para la Temperatura, Humedad específica y dirección e intensidad del viento.

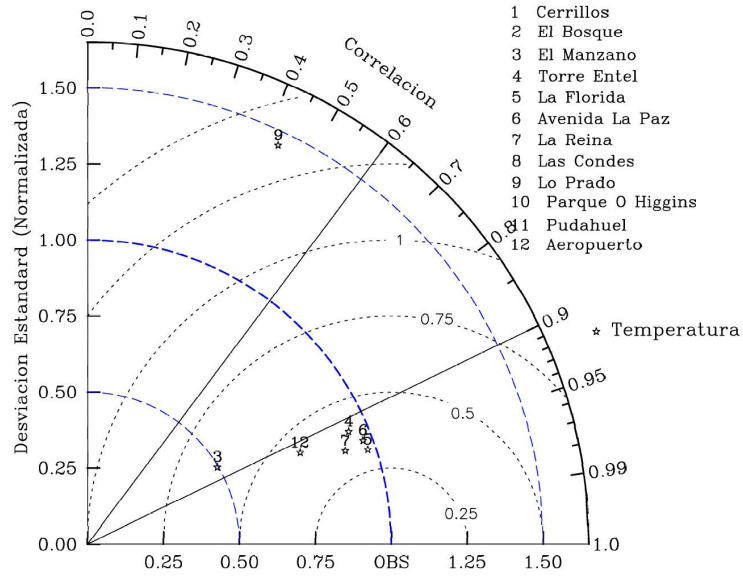


Figura D.40: Gráfico de Taylor para la Temperatura.

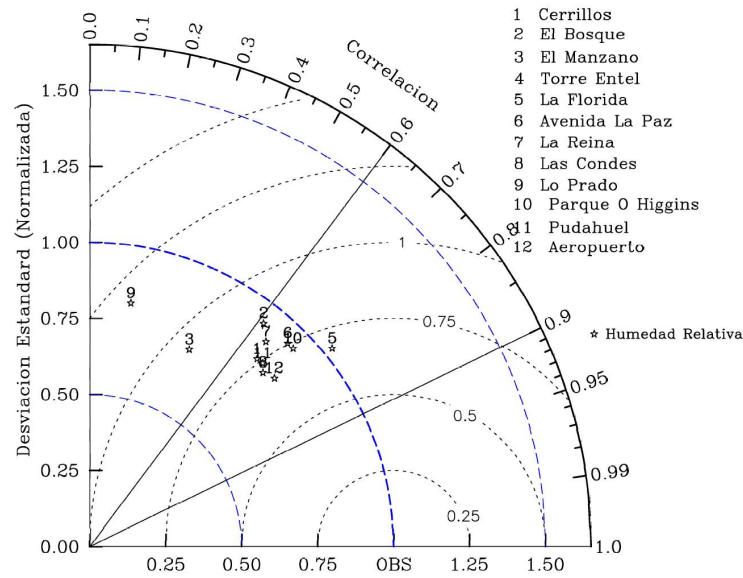


Figura D.41: Gráfico de Taylor para la Humedad Relativa.

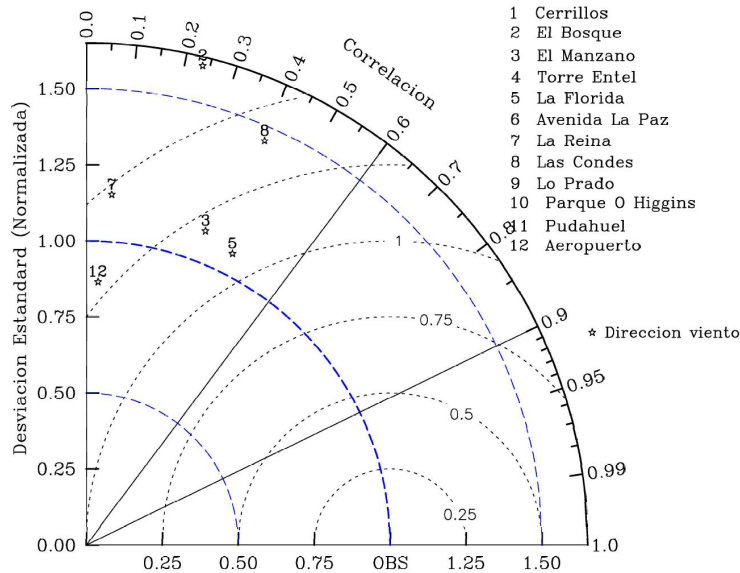


Figura D.42: Gráfico de Taylor para la Dirección del Viento.

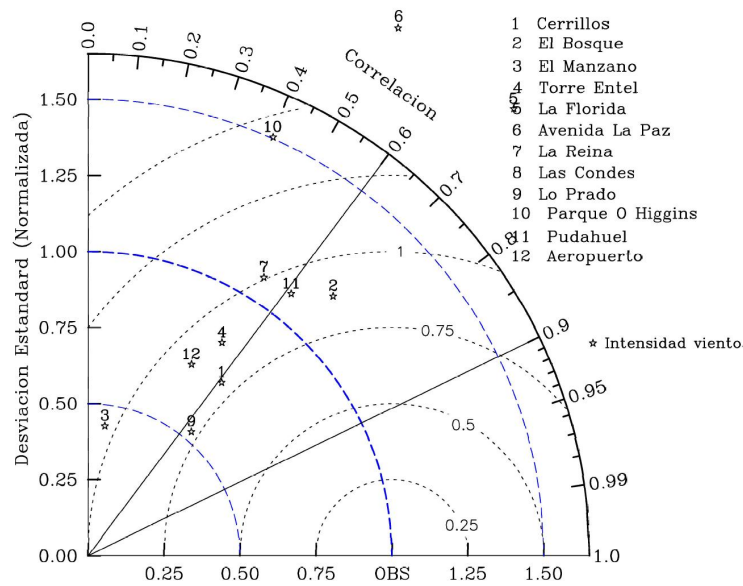


Figura D.43: Gráfico de Taylor para la Intensidad del viento.

Se puede apreciar que la temperatura tiene los mejores estadísticos obteniéndose correlaciones alrededor de 0.9 para todas las estaciones (con excepción de Lo Prado que posee un problema de representación explicado anteriormente). Para la humedad relativa los estadísticos son bastante homogéneos para todas las estaciones que se encuentran en la cuenca de Santiago, obteniéndose correlaciones entre 0.6 y 0.7, desviaciones standar con menos de 25 % de diferencia con respecto a la referencia y un error cuadrático medio

de alrededor de 0.75. Para la intensidad del viento el rango de correlaciones se amplía a 0.4 hasta 0.6, pero se encuentra un gran rango de desviaciones standar, debido a la sobrestimación de esta variable para las estaciones en la cuenca. Los estadísticos para la dirección del viento son bastante pobres, e incluso existen estaciones no representadas en el gráfico debido a correlaciones negativas o desviaciones standar fuera de rango.

### **D.3. Comentarios y Conclusiones**

Se realizó una simulación meteorológica sobre la cuenca de Santiago y sus alrededores utilizando el modelo MM5 y sus resultados fueron comparados con observaciones en estaciones de monitoreo meteorológicas y sondeos en altura.

Se encontró que el modelo es capaz de capturar las variaciones sinópticas de gran escala observándose una buena representación de la presión superficial y de los sondeos en altura. Además para la cuenca en general se obtienen una representación aceptable, existiendo problemas principalmente en las horas de la noche se encuentran temperaturas más altas vientos más altos y aire más húmedo, lo que podría ser explicado por una mala representación del uso de suelo o por una mayor mezcla vertical.

## Anexo E

# Introducción a GIS

Un sistema de información geográfica (SIG o GIS) es una colección organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión entre otros.

Un sistema GIS funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital (información espacial). De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El Sistema de Información Geográfica separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no se podría obtener de otra forma. En la siguiente figura se ve un esquema de esto:

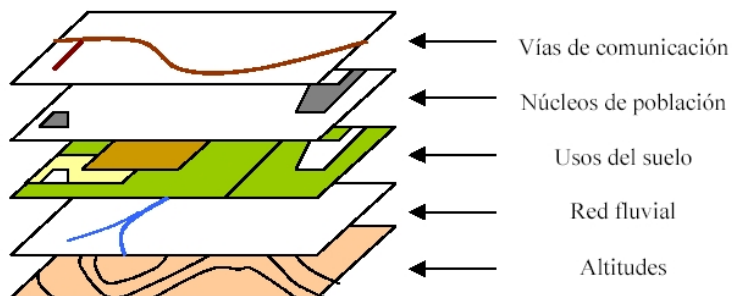


Figura E.1: Ejemplo de capas temáticas de un GIS

## E.1. Tipos de GIS

Existen básicamente 3 tipos: Vectoriales, Raster y Orientados a objetos

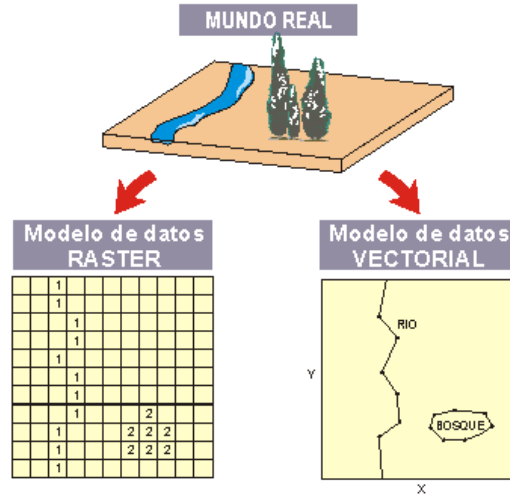


Figura E.2: Esquema de 2 de los tipos de GIS, Raster y Vectorial, ref: [www.gabrielortiz.com](http://www.gabrielortiz.com)

### E.1.1. Vectoriales

Estos GIS utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.

Con un par de coordenadas y su altitud se determina un punto (o sea, un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. De entre todos los métodos para formar topología vectorial la forma más robusta es la topología arco-nodo, cuya lógica de funcionamiento se basa en estructurar toda la información geográfica en pares de coordenadas (puntos), a partir de los cuales se pueden crear líneas y polígonos.

Para implementar este modelo computacionalmente, se hace por interconexión de bases de datos que tienen identificadores comunes.

En general, el modelo de datos vectorial es adecuado cuando se trabaja con objetos geográficos con límites bien establecidos, como pueden ser fincas, carreteras, etc.

### E.1.2. Raster

Los Sistemas de Información Raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Se crean dividiendo la zona de afección de la base de datos en una

retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denomina pixels) y se atribuye un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular (el tamaño del pixel es constante) y que se conoce la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixels están geo-referenciados.

Para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos el tamaño del pixel ha de ser reducido (en función de la escala), lo que dotará a la malla de una resolución alta. Sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla (más resolución), mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional a la hora de procesar la misma.

El modelo de datos raster es especialmente útil cuando se tienen que describir objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo puede ser la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

### **E.1.3. Orientados a objetos**

Mientras los modelos de datos vectorial y raster estructuran su información mediante capas (como ya se ha dicho anteriormente) los sistemas orientados a objetos organizan la información geográfica a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros. De este modo, los objetos geográficos están sometidos a una serie de procesos y se agrupan en clases entre las cuales se da la herencia.

Además, los GIS orientados a objetos introducen un carácter dinámico a la información incluida en el sistema, en contraposición a los modelos de datos vectoriales y raster que tienen un carácter estático.

Así este modelo es usado para situaciones en las que la naturaleza de los objetos que se tratan de modelar es cambiante en el tiempo y/o en el espacio.

Un ejemplo de organización de la información con este modelo de datos es un subcompartimento forestal, dentro del cual se dan muchos árboles, cada uno de ellos sometido a procesos (por ejemplo el crecimiento); este crecimiento es heredado por el subcompartimento y da como resultado que la altura del mismo sea cambiante con el tiempo.



## Anexo F

# Gráficos de Taylor

El objetivo de los gráficos de Taylor (Taylor 2001) es representar distintos estadísticos de un modelo y las observaciones en 1 sólo gráfico. Además, varios modelos o puntos de observación pueden ser integrados en el mismo gráfico de forma de realizar comparaciones.

Supongamos que se tienen 2 series de tiempo,  $f_n$  que representa a los resultados de un modelo y  $r_n$  a la referencia. El coeficiente de correlación entre la referencia y el modelo puede ser escrito de la siguiente manera:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (\text{F.1})$$

Donde  $\bar{f}$  y  $\bar{r}$  son las medias y  $\sigma_f$  y  $\sigma_r$  son las desviaciones estándar de ambas series respectivamente. Otro estadístico usualmente usado para comparar 2 series es el error cuadrático medio, que se escribe de la siguiente manera:

$$E = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{F.2})$$

Con el fin de separar las diferencias entre los patrones de cada serie y entre las series, se puede definir un error cuadrático medio insesgado de la siguiente manera:

$$E' = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r}))^2 \right]^{1/2} \quad (\text{F.3})$$

Luego, se puede demostrar la siguiente igualdad:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \quad (\text{F.4})$$

Por otro lado, la ley de los cosenos es la siguiente:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2abc\cos\phi \quad (\text{F.5})$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los largos de los lados de un triángulo y  $\phi$  el ángulo opuesto al lado  $c$ . De esta forma existe una relación geométrica entre  $R$ ,  $E'$ ,  $\sigma_f$  y  $\sigma_r$  que se puede ver en la figura F.1. Con esta relación se pueden graficar los 4 estadísticos en 1 mismo gráfico, como se muestra en la figura F.2. La distancia radial desde el origen es proporcional a la desviación standard de cada parámetro. El error cuadrático medio insesgado entre el modelo y la referencia es proporcional a la distancia entre ambos puntos (representado por círculos centrados en la referencia). El coeficiente de correlación entre ambos parámetros está dado por la posición azimutal del valor del modelo (ángulo desde la horizontal).

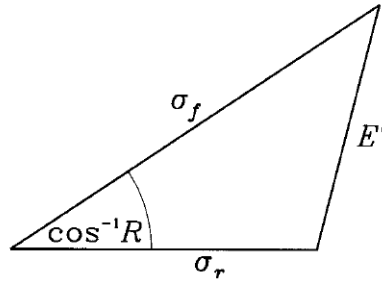


Figura F.1: Relación geométrica entre el coeficiente de correlación  $R$ , el error cuadrático medio insesgado  $E'$  y las desviaciones standard  $\sigma_f$  y  $\sigma_r$  del modelo y la referencia respectivamente. ref: Taylor 2001

En el caso que se estén comparando distintas variables con respecto a distintas referencias, por ejemplo, varias variables de un modelo meteorológico como velocidad del viento,  $T^\circ$ , presión, se normalizan todos los estadísticos por la desviación standard de la referencia, de esta forma la referencia siempre se encuentra en el eje x en el valor 1 y se puede ocupar un mismo gráfico para presentar una gran cantidad estadísticos.

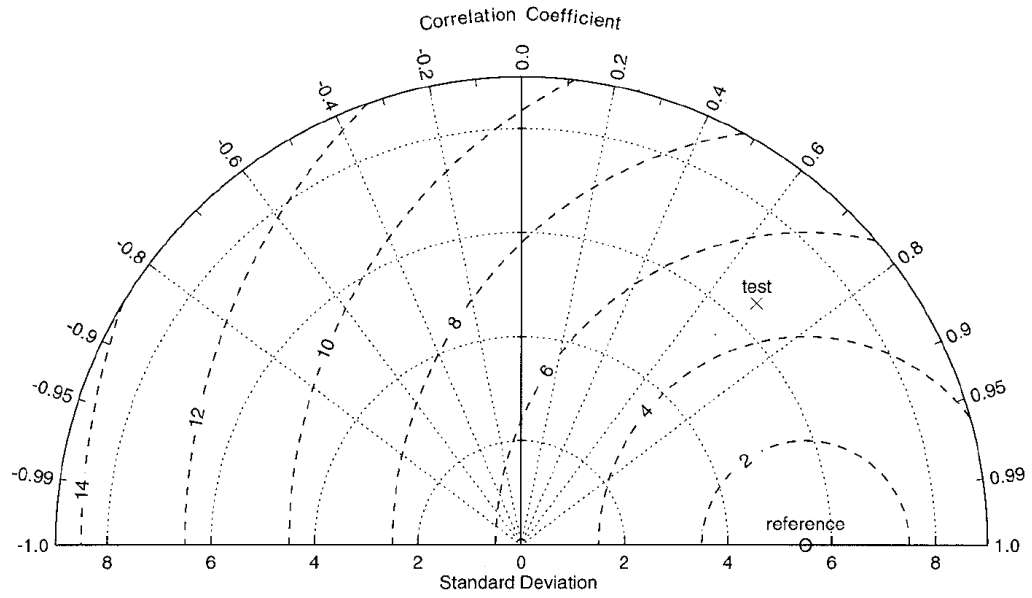


Figura F.2: Diagrama de Taylor para presentar estadísticos. ref: Taylor 2001

## Anexo G

### Ciclos diarios de modelación inversa ficticia y real

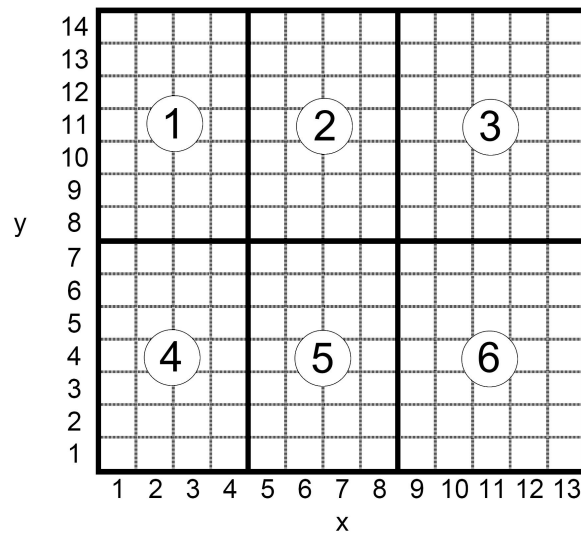


Figura G.1: Grilla del inventario mejorado, numerado por zonas (de 1 a 6) para presentar los gráficos de ciclo diario de emisión ficticio y real

#### G.1. Ciclos diarios simulación ficticia

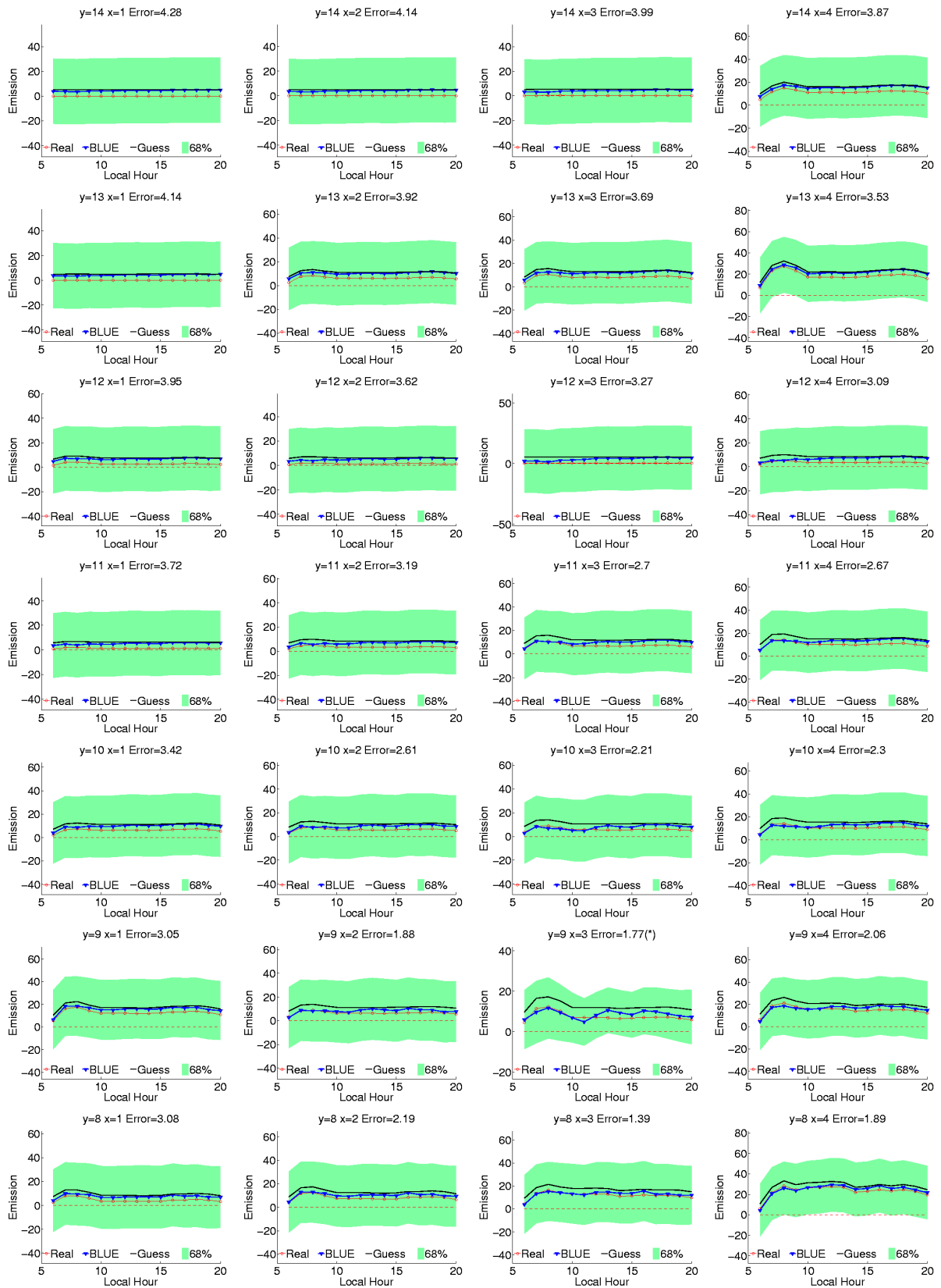


Figura G.2: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 1.

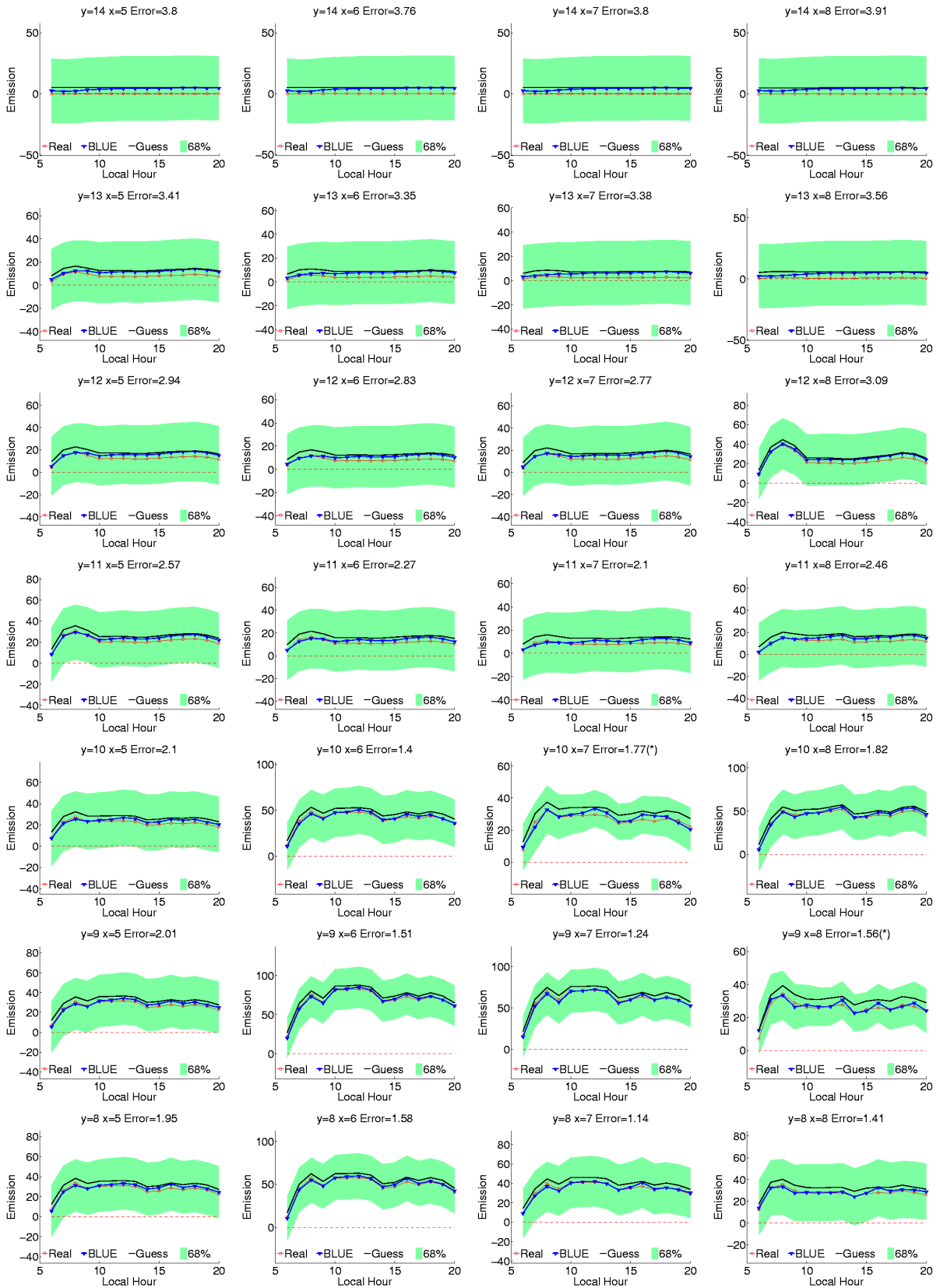


Figura G.3: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 2.

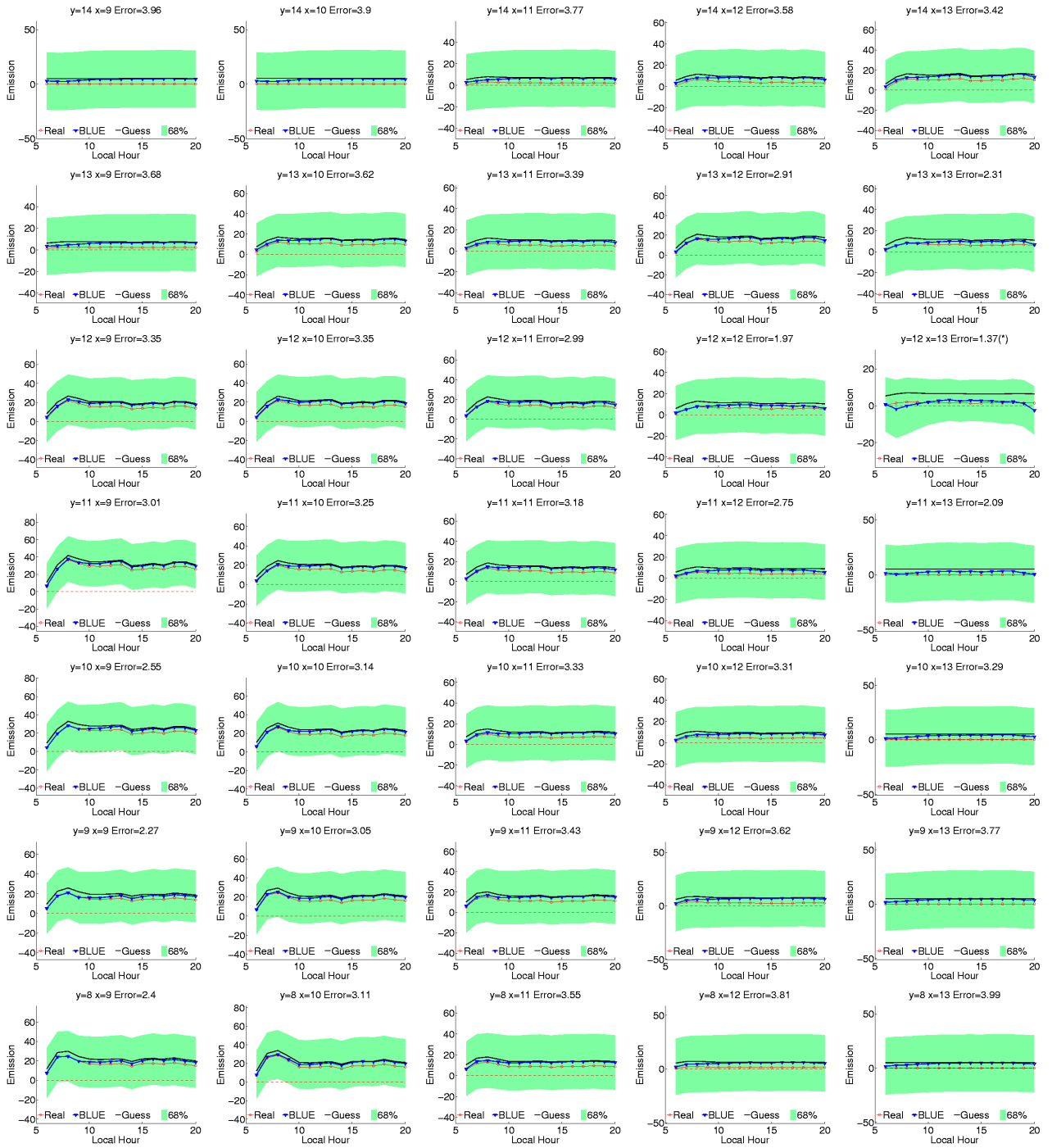


Figura G.4: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 3.

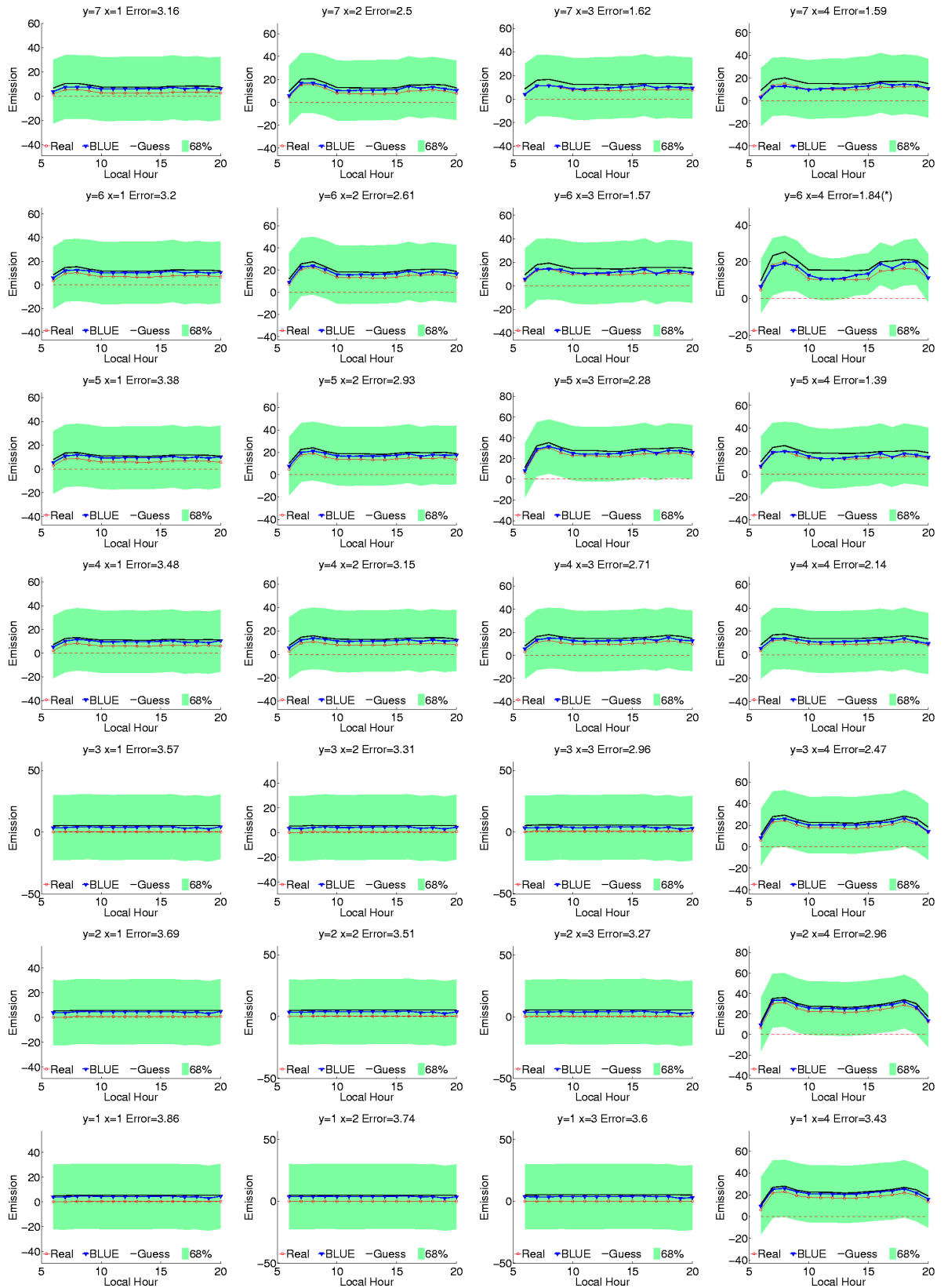


Figura G.5: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 4.



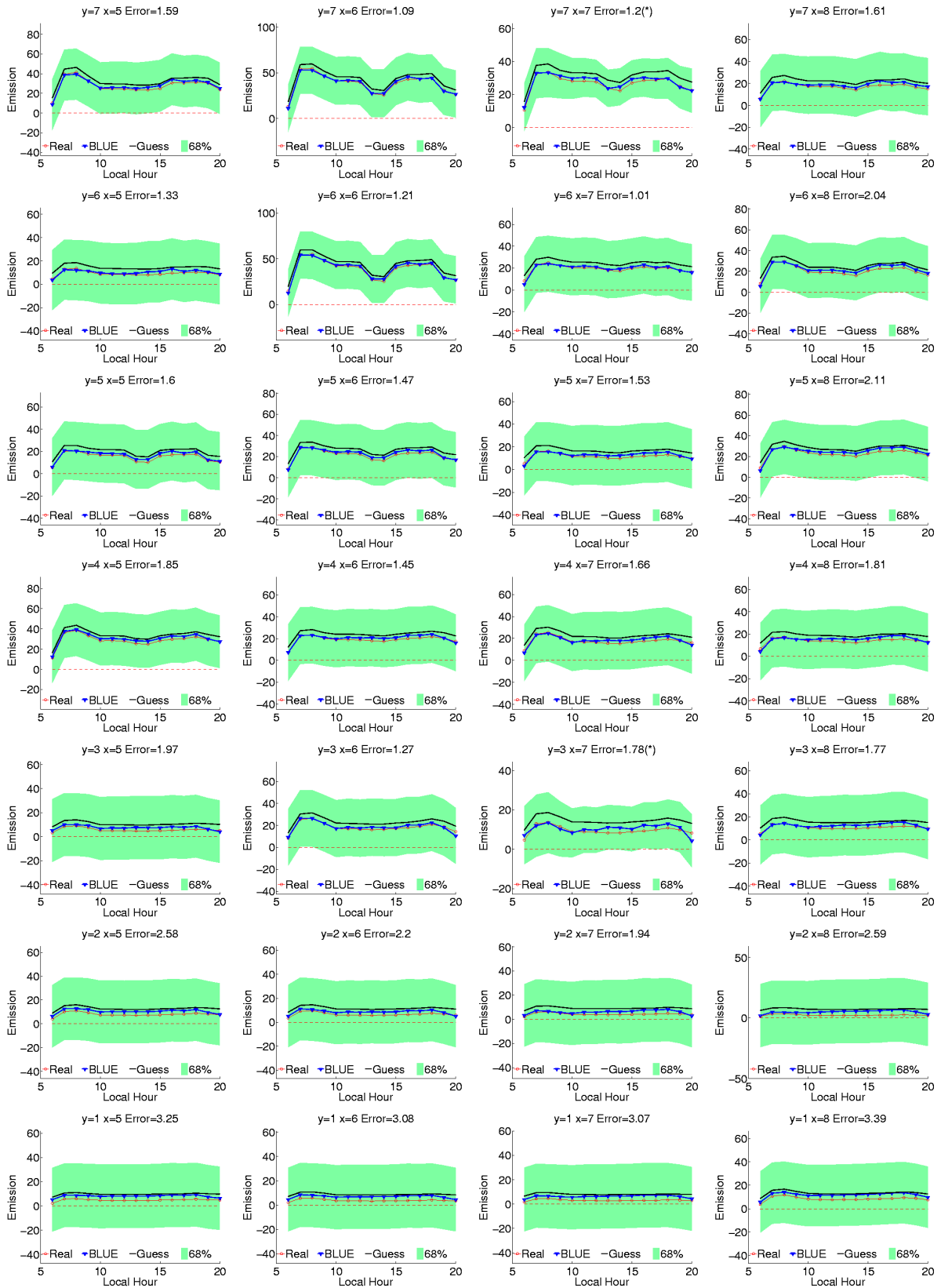


Figura G.6: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 5.

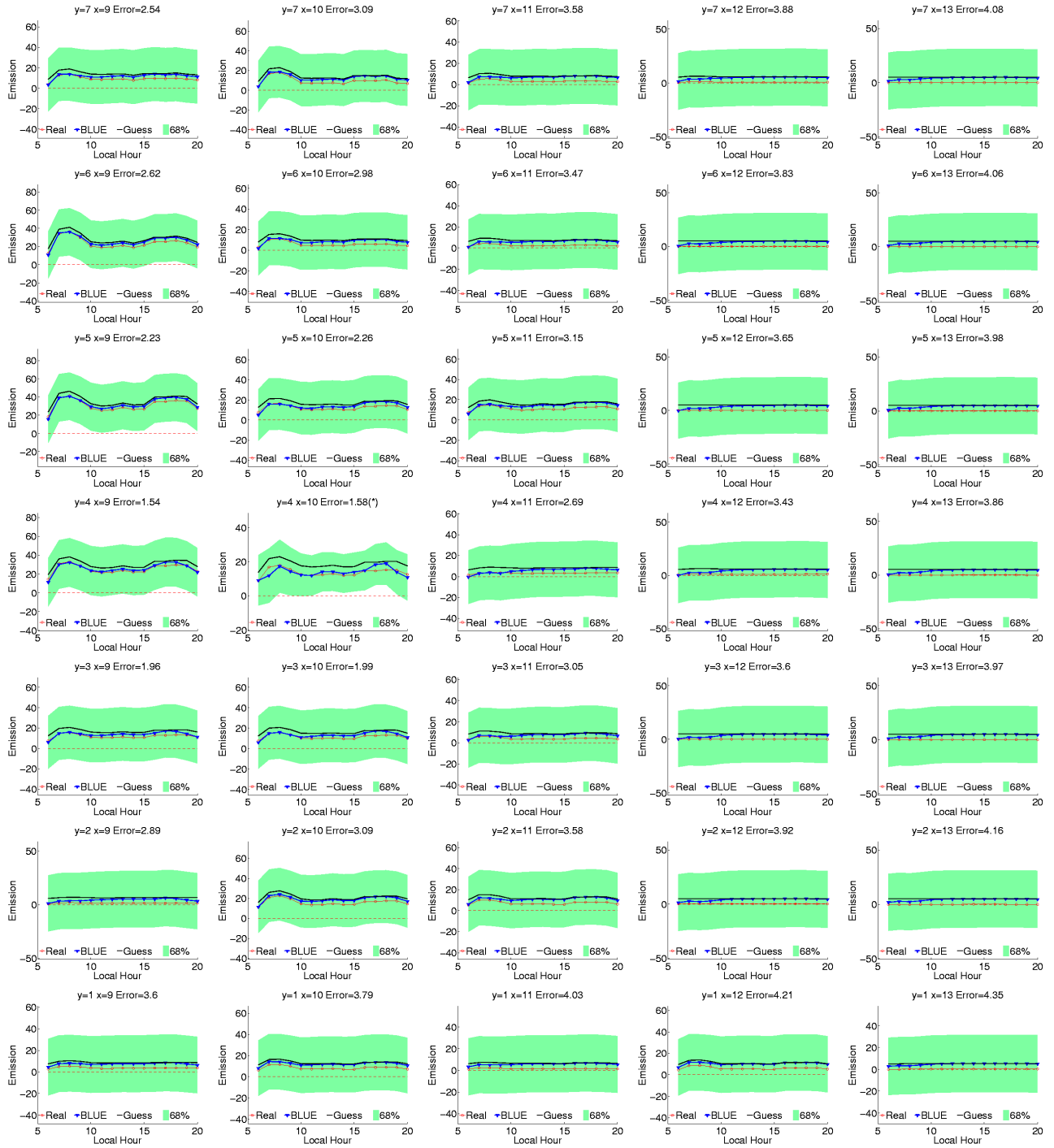


Figura G.7: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones ficticias, zona 6.

## G.2. Ciclos diarios simulación real

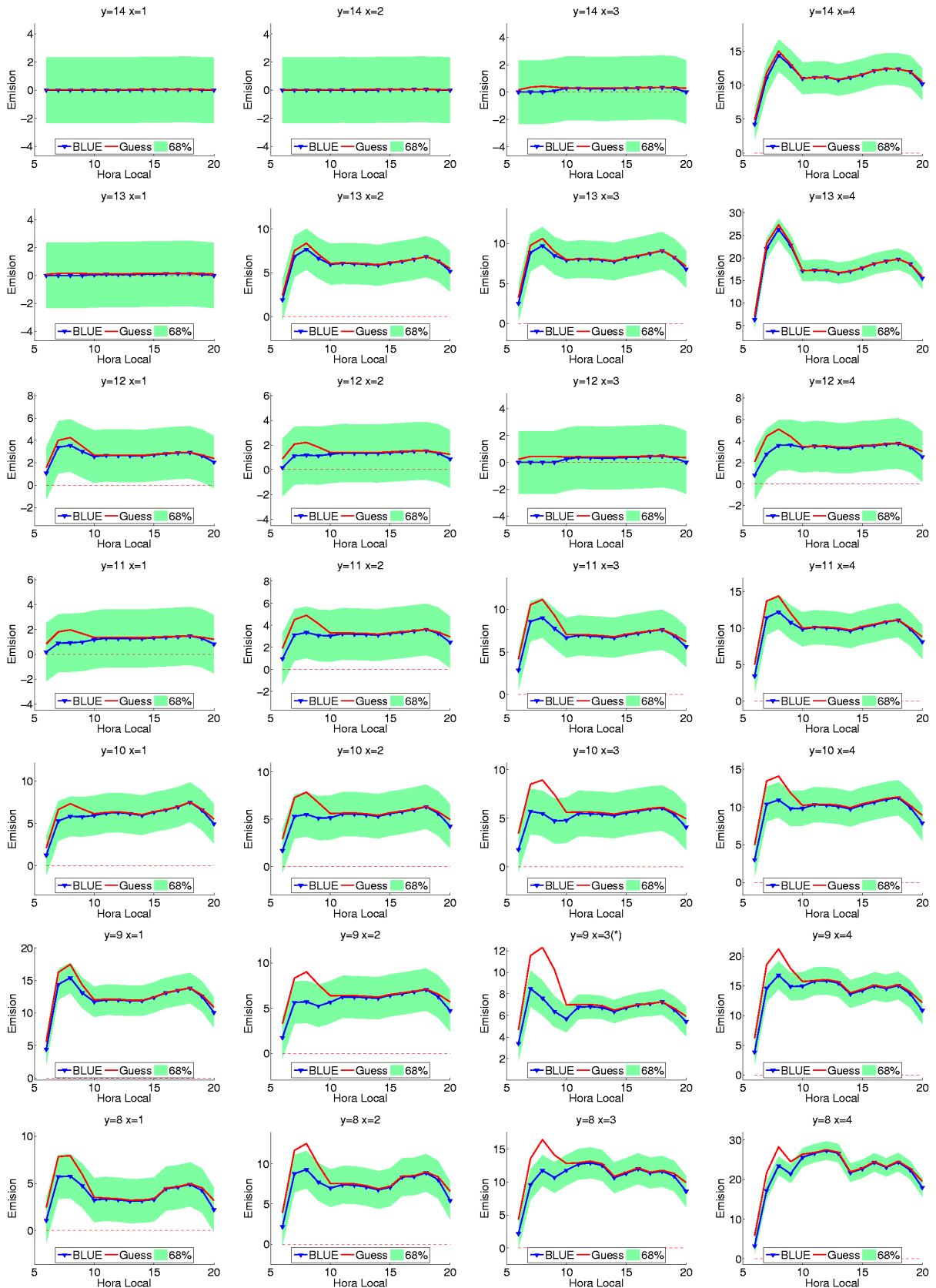


Figura G.8: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 1. LXXIII

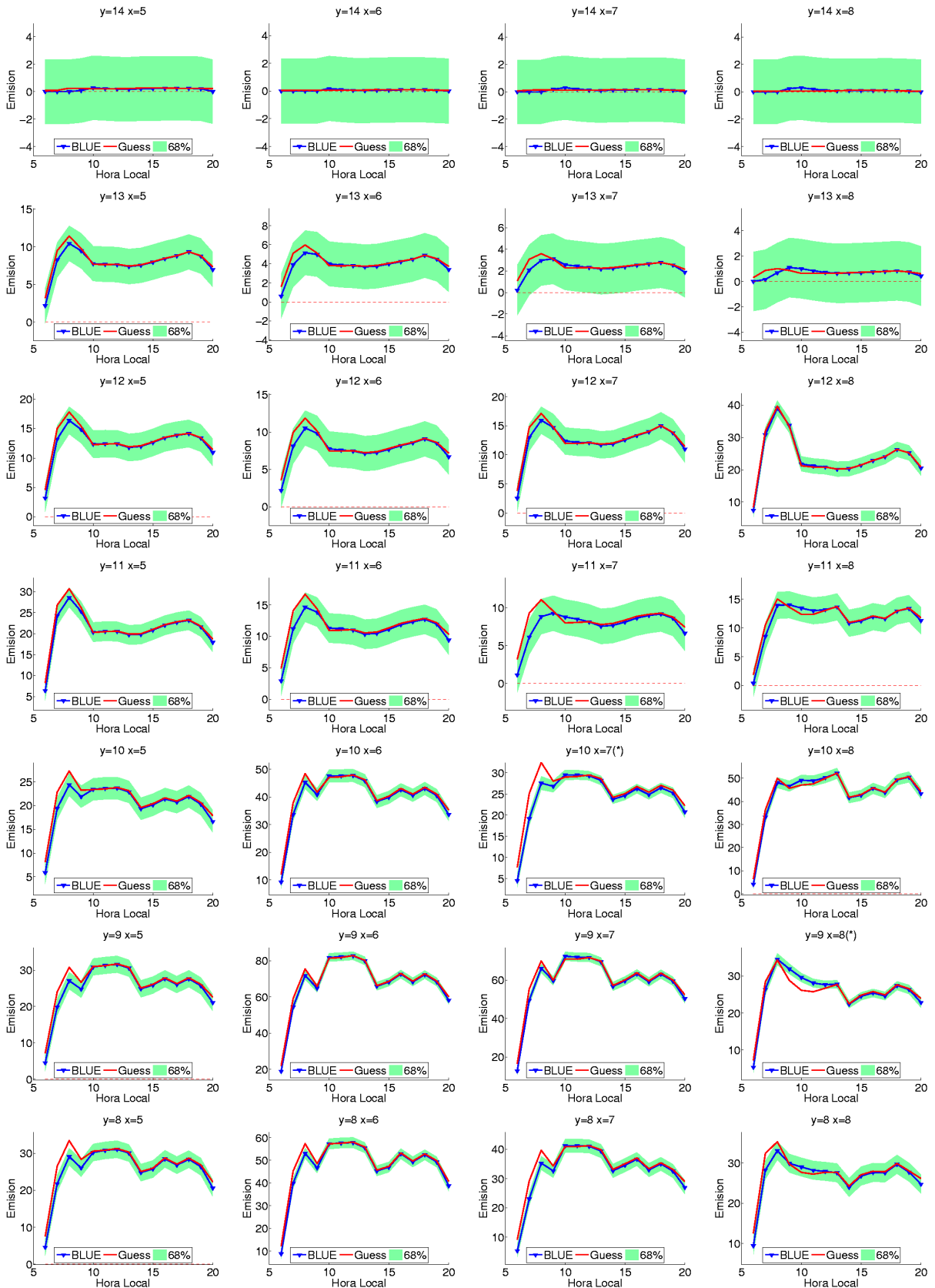


Figura G.9: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 2. LXXIV

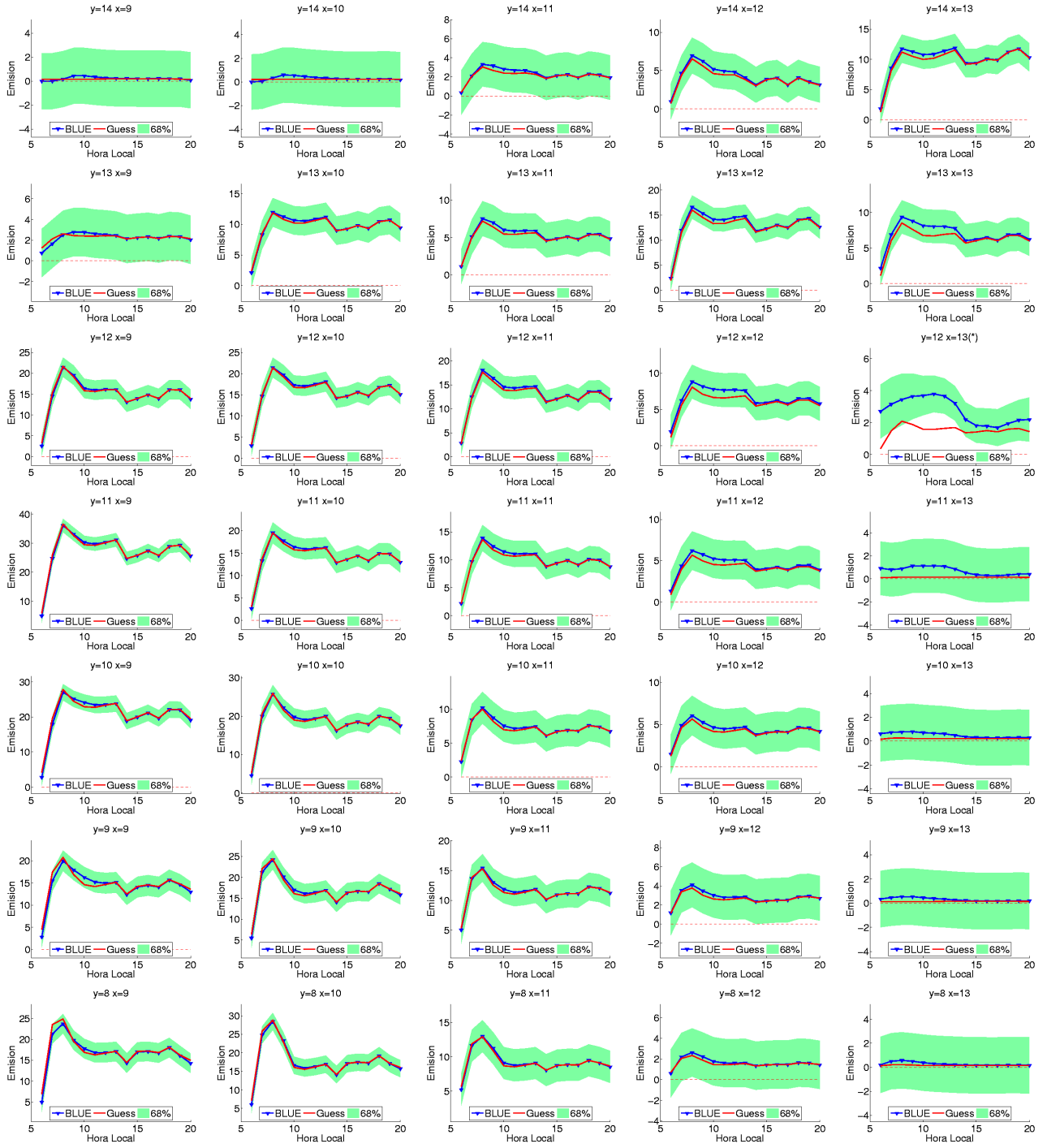


Figura G.10: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 3.

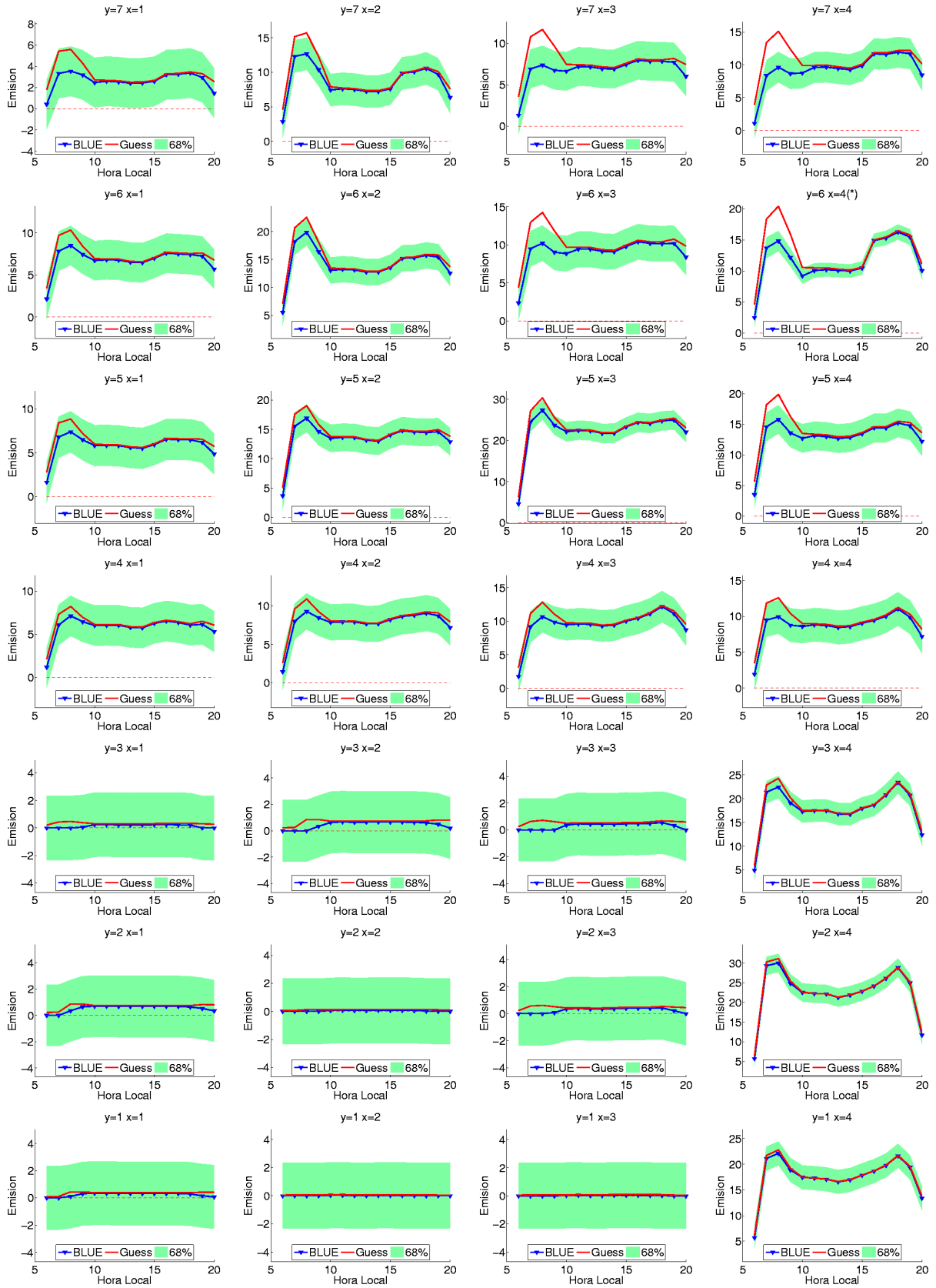


Figura G.11: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 4. LXXVI

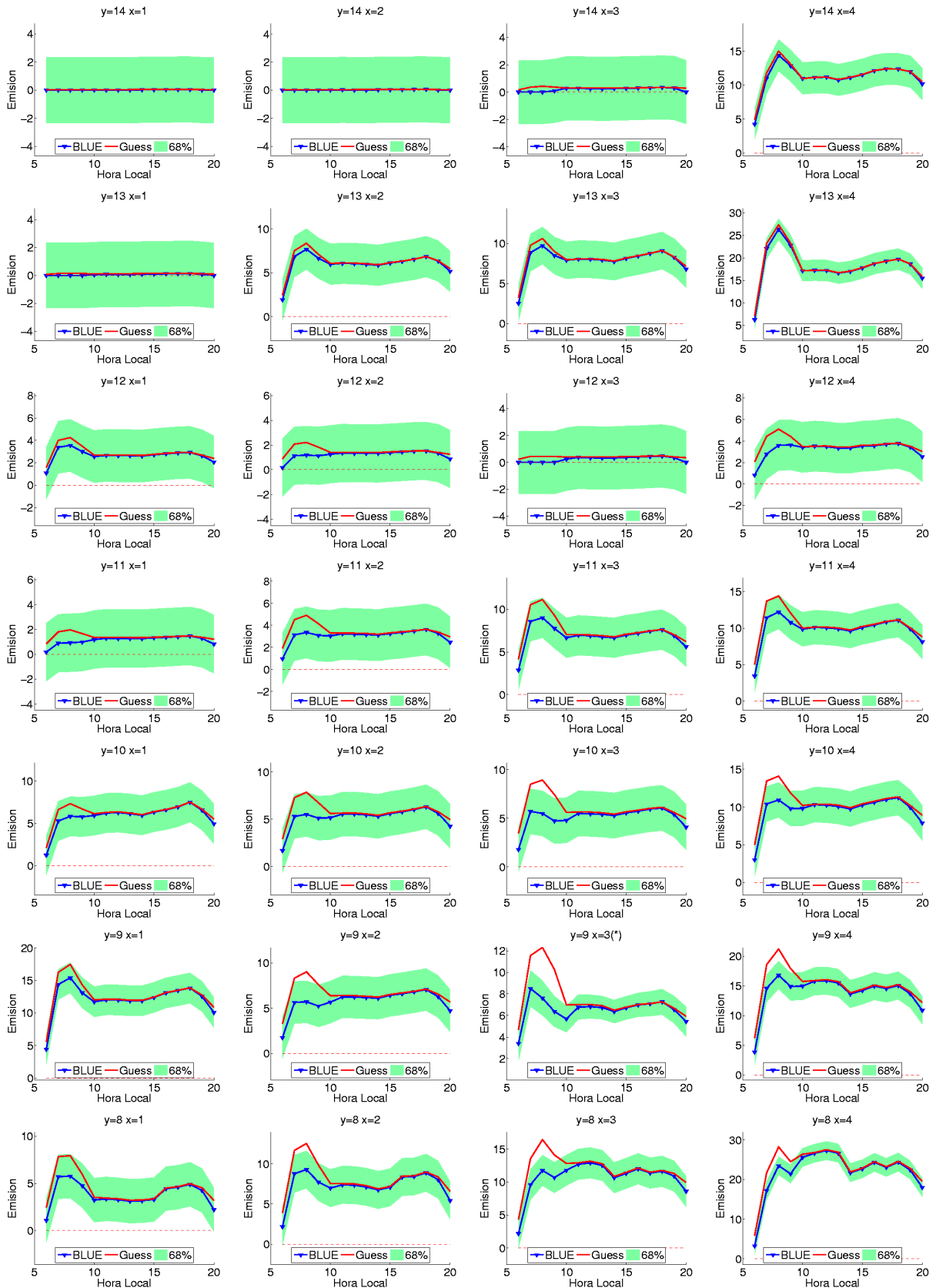


Figura G.12: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 5. LXXVII

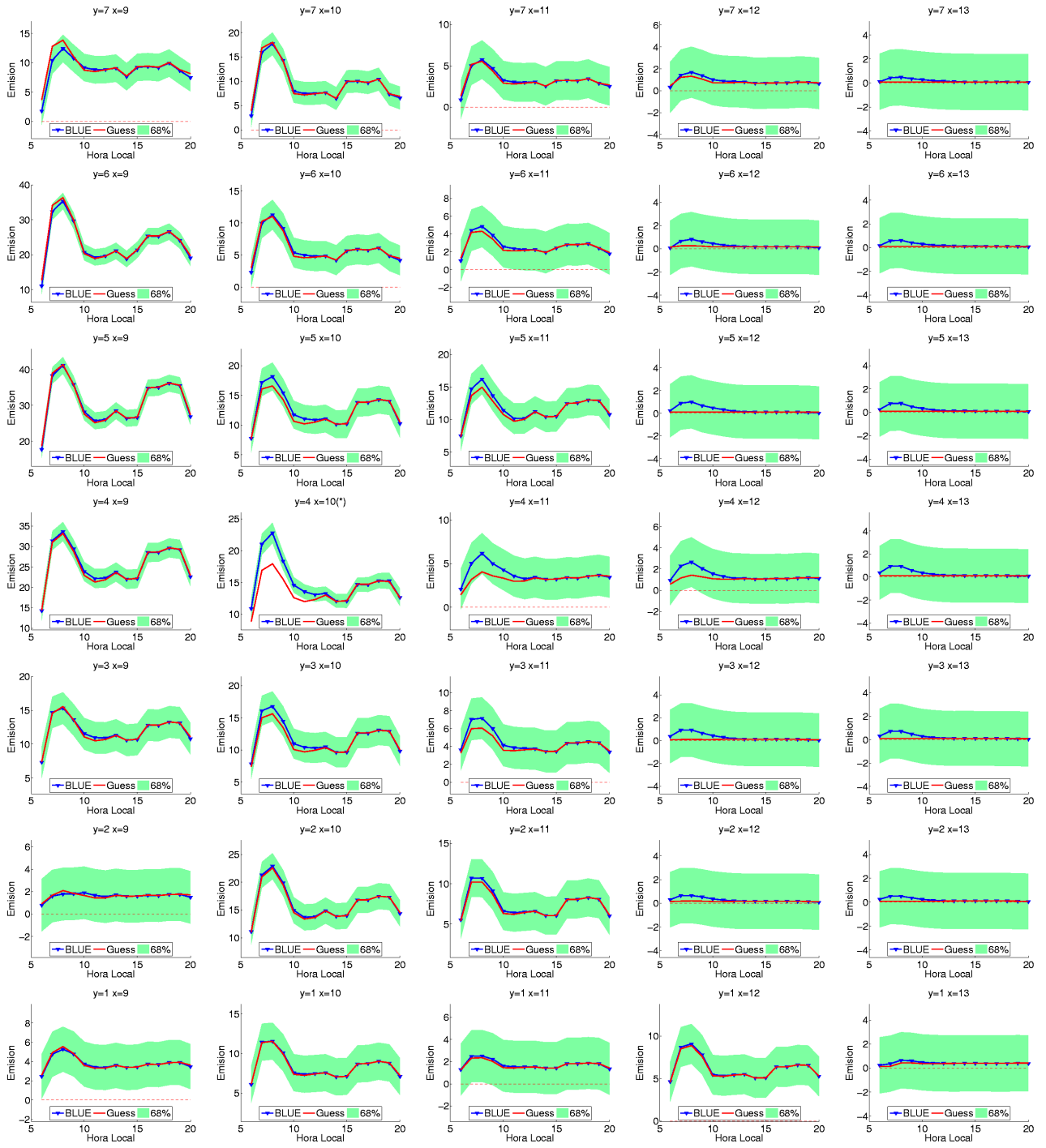


Figura G.13: Ciclo diario de inventarios inicial (Guess), real y optimizado (BLUE) usando observaciones reales, zona 6.