



## INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y MODELACIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS COMUNAS DE CURICÓ, TENO, ROMERAL, RAUCO, SAGRADA FAMILIA Y MOLINA, AÑO BASE 2014

Talca, Junio del 2016

Jaime Escobar Melero, [jescobar@sistam.cl](mailto:jescobar@sistam.cl)  
Lincoln Norambuena Castro, [lnorambuena@sistam.cl](mailto:lnorambuena@sistam.cl)



### Antecedentes Iniciales

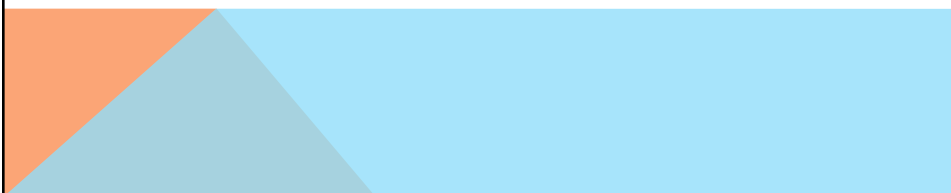
- Dentro de la estrategia de planes de descontaminación 2014-2018 del programa de Gobierno, se encuentran consideradas las comunas de Curicó y Teno, como una nueva zona saturada por MP10 y MP2,5, por superación de normas diarias y anual.
  
- Para poder declarar zona saturada el área y posteriormente elaborar el respectivo PDA, es necesario:
  - ✓ Caracterizar las fuentes emisoras
  - ✓ Determinar como se dispersan los contaminantes en Curicó y Teno y comunas aledañas (Romeral, Rauco, Sagrada Familia y Molina)
  - ✓ Determinar el Área Geográfica que será declarada zona saturada



## Objetivos

### Objetivo General

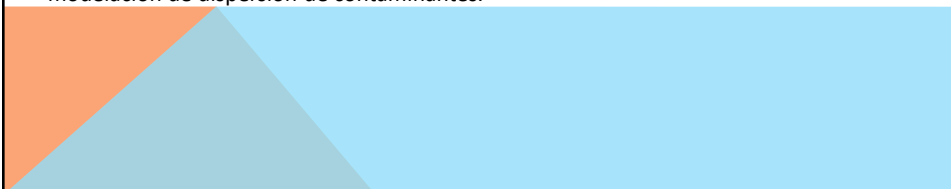
Contar con antecedentes técnicos necesarios que sirvan de insumo para la declaración de zona, a través del desarrollo de un inventario de emisiones atmosférico y a través de la aplicación de un modelo de dispersión de Material Particulado Respirable para delimitar el área a declarar como zona saturada.

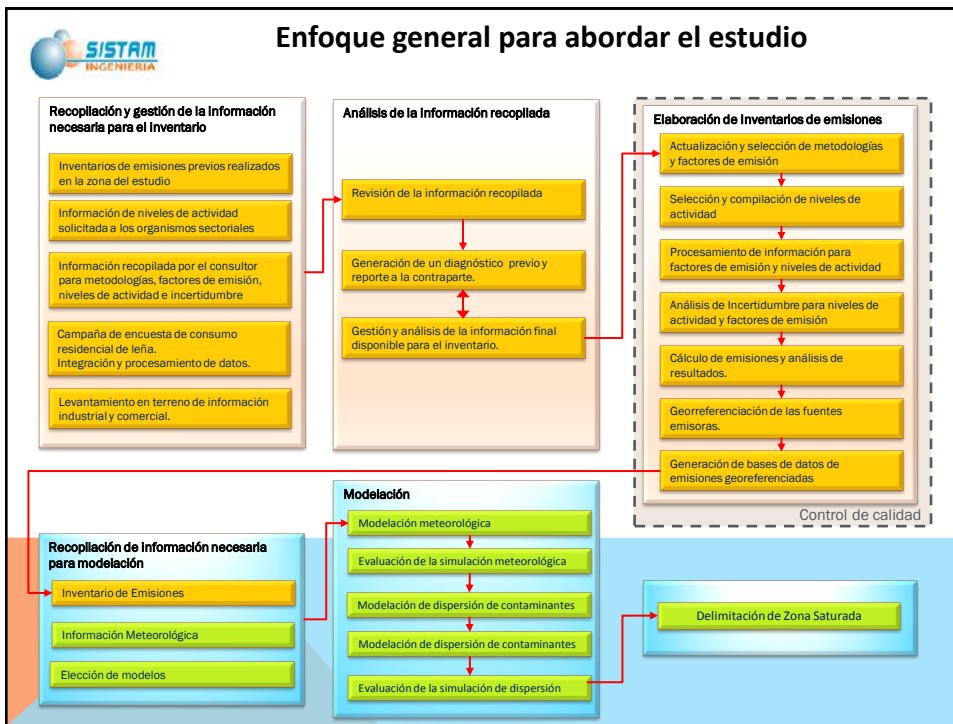


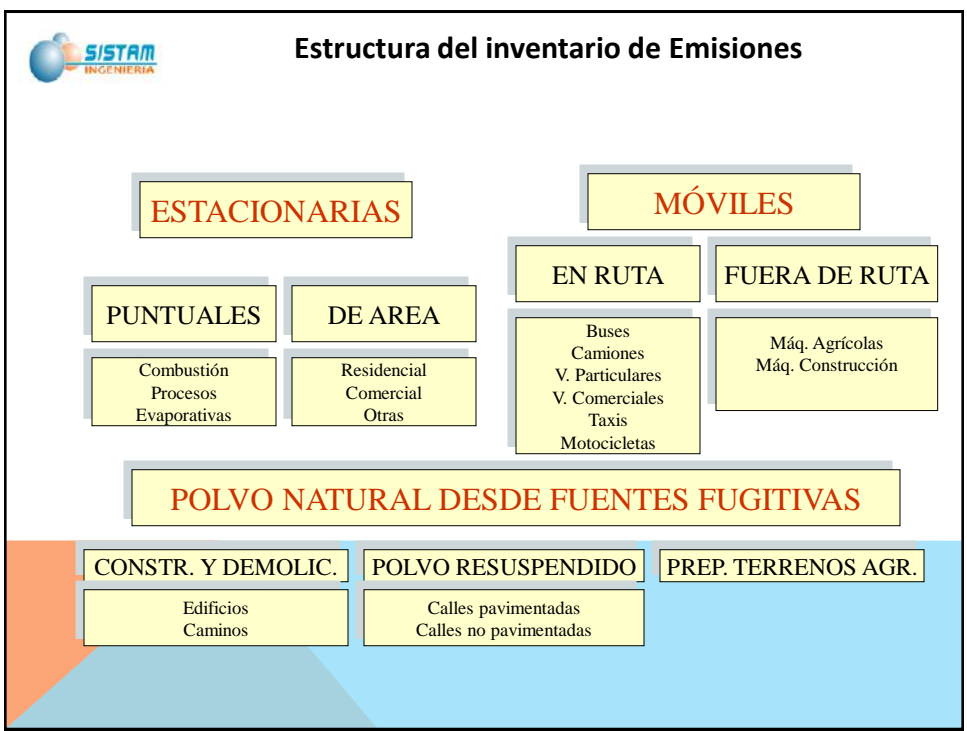
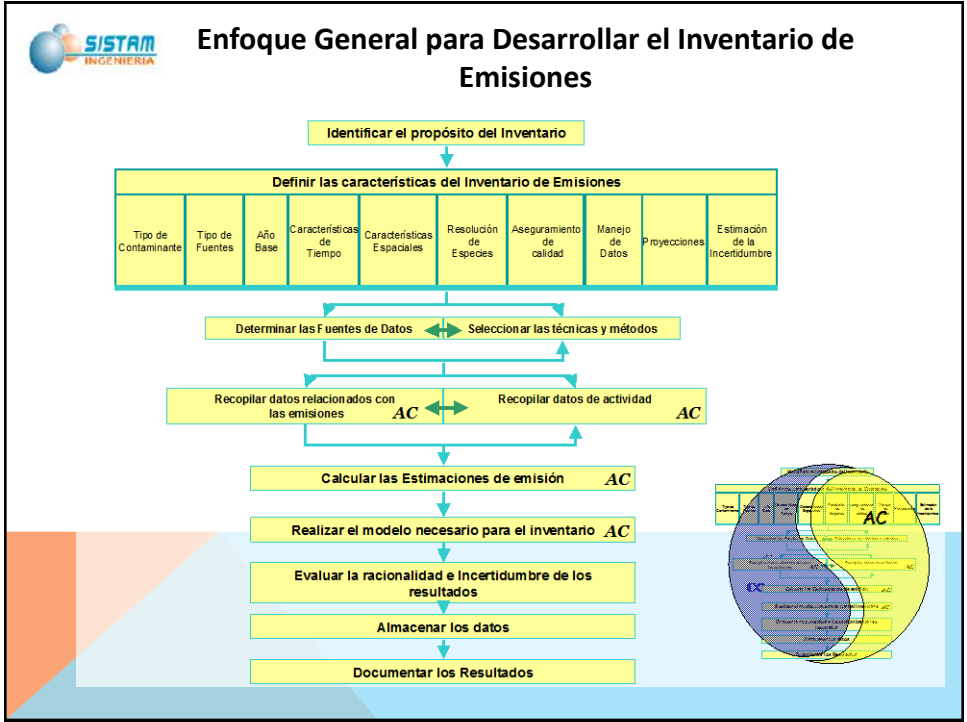
## Objetivos


### Objetivos Específicos


1. Contar con un inventario de emisiones de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ , CO, NOx,  $SO_2$  y COVs, para todas las fuentes de interés en la zona de estudio, para una base temporal correspondiente al año 2014.
2. Aplicación de control de calidad sobre el inventario de emisiones realizado.
3. Contar con una base de datos estructurada del inventario de emisiones en un formato a ser definido en conjunto con la contraparte técnica del estudio.
4. Realizar una proyección del inventario de emisiones a partir del inventario año base 2014, en un horizonte a 15 años, el cual será discutido con la contraparte técnica del estudio.
5. Proponer una delimitación de la zona saturada mediante el uso de herramientas de modelación de dispersión de contaminantes.







 <b>Estructura del inventario de Emisiones</b> <b>Fuentes Aerales</b>				
GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	
FUENTES AREALES	Comercial	Evaporativas comercial	Aplicación de asfalto	
			Distribución de combustible	
		Evaporativas comercial	Fugas comerciales de GLP	
			Imprentas	
			Lavasecos	
		Rest. y comida rápida	Talleres de pintura	
			Panaderías	
	Otras	Actividades agrícolas	Fertilizantes	
		Crianza de Animales		Aves
				Bovinos
				Caprinos y Camelidos
				Cerdos
				Ovinos
		Disposición de residuos	Plantas de tratamiento de aguas servidas	
			Quema abierta de basura	
			Rellenos sanitarios (sin quemas de biogás)	
		Emisiones biogénicas	Todas las especias vegetales	
	Quemas		Cigarrillos	
			Incendios forestales	
			Incendios urbanos	
		Quemas agrícolas		
Residencial	Combustión externa residencial		Gas Licuado	
			Kerosene	
			Leña	
	Evaporativas residencial		Fugas residenciales de GLP	
			Pintado arquitectónico	
		Residencial de NH3		
		Solventes de uso doméstico		
		Uso de Adhesivos		

 <b>Estructura del Inventario de Emisiones</b> <b>Fuentes Fijas, Fuentes Móviles y Polvo Fugitivo</b>			
GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	Calderas (Industriales y de calefacción)
			Generación eléctrica (Turbinas y Calderas de generación eléctrica)
	Procesos	Combustión interna	Grupos electrógenos
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles en ruta	Ind. de productos minerales	<b>Producción de Cemento</b>
		Buses licitados urbanos	Buses licitados urbanos
		Buses particulares e institucionales	Buses particulares e institucionales
		Buses rurales e interurbanos	Buses rurales e interurbanos
		Camiones livianos	Camiones livianos
		Camiones medianos	Camiones medianos
		Camiones pesados	Camiones pesados
		Motocicletas	Motocicletas
		Taxis colectivos	Taxis colectivos
		Vehículos de alquiler	Vehículos de alquiler
		Vehículos livianos comerciales de uso de empresas	Vehículos livianos comerciales de uso de empresas
		Vehículos livianos comerciales de uso particular	Vehículos livianos comerciales de uso particular
		Vehículos livianos de pasajeros	Vehículos livianos de pasajeros
		Vehículos medianos	Vehículos medianos
	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	Maquinaria agrícola
POLVO FUGITIVO	Construcción y Demolición	Construcción de caminos	Construcción de caminos
		Construcción de edificios	Construcción de edificios y viviendas
		Producción de áridos	Producción de áridos
	Polvo Resuspendido de calles	Calles en red urbana e interurbana	Calles no pavimentadas en red urbana e interurbana
		Calles en sitios industriales	Calles pavimentadas en red urbana e interurbana
	Preparación de terrenos agrícolas	Calles en sitios industriales	Calles no pavimentadas en sitios industriales
		Cereales y chacras	Cereales y chacras
Cultivos Industriales		Cultivos Industriales	
	Hortalizas	Hortalizas	



## Metodología Estimación de Emisiones, Fuentes Fijas, Fuentes Areales y Polvo Fugitivo

- Ecuación General para el Calculo de Emisiones

$$E = fe * Na * \left[ 1 - \frac{Ea}{100} \right]$$

Donde:

E : Emisión

fe : Factor de emisión

Na : Nivel de actividad de la fuente.

Ea : Eficiencia de abatimiento

En el caso de fuentes fijas se privilegian las mediciones por sobre las estimaciones



## Metodología Estimación de Emisiones, Fuentes Móviles (en ruta y fuera de ruta)

$$E_{total} = E_{caliente} + E_{partidas\ en\ frío} + E_{evaporativas} + E_{polvo} + E_{desgastes}$$

Donde:

$E_{total}$  : Emisiones totales del contaminante considerado [gramos]

$E_{caliente}$  : Emisiones en caliente, fase estabilizada del motor [gramos]

$E_{partidas\ en\ frío}$  : Emisiones por partidas en frío [gramos]

$E_{evaporativas}$  : Emisiones por evaporación [gramos]

$E_{polvo}$  : Emisiones provenientes del polvo resuspendido por la circulación de vehículos sobre calles pavimentadas [gramos]

$E_{desgaste}$  : Emisiones por desgaste de frenos, neumáticos y superficie [gramos]

- Metodología Bottom Up para comuna de Curicó (Ciudad con modelo de transporte, SECTRA)
- Metodología Top Down para comunas de Molina, Rauco, Romeral, Sagrada Familia y Teno
- Metodología Top Down para red interurbana del área de estudio (información de vialidad)




## Fuentes de Información Metodológicas

### Metodologías Internacionales

- AP-42, EPA
- WebFire, EPA
- EMEP CORINAIR, EEA
- CARB, California Environmental Protection
- NCAR (centro nacional para la investigación atmosférica de E.E.U.U.), MEGAN
- ECETOC (Centro europeo de ecotoxicología y toxicología de productos químicos)
- COPERT IV

### Metodologías Nacionales

- Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el RETC
- Metodologías de estimación de emisiones RETC

 <b>Fuentes de información para FE y NA</b> <b>Fuentes Fijas, Fuentes Móviles y Polvo Fugitivo</b>					
GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	FACTOR DE EMISION	NIVELES DE ACTIVIDAD
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	Generación eléctrica (Calderas y Turbinas)	Guía metodológica RETC, WebFire/ EPA	<u>DS 138/MINSAL</u>
			Calderas (Industriales y de calefacción)	Guía metodológica RETC, WebFire/ EPA	<u>DS 138/MINSAL</u>
		Combustión interna	Grupos electrógenos	Guía metodológica RETC, WebFire/ EPA	<u>DS 138/MINSAL</u>
	Procesos	Ind. de productos minerales	Producción de Cemento	Guía metodológica RETC, WebFire/ EPA	<u>DS 138/MINSAL y Cementos Bio Bio</u>
POLVO FUGITIVO	Construcción y Demolición	Construcción de edificios	Construcción de edificios y viviendas	CARB	INE : Banco de Datos Región del Maule.
		Construcción de caminos	Construcción de caminos	CARB	MOP (Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características, año 2014)
		Producción de áridos	Producción de áridos	AP-42/ EPA	DS 138/MINSAL
	Polvo Resuspendido de calles	Calles en red urbana e interurbana	Calles pavimentadas en red urbana e interurbana	AP-42/ EPA	SECTRA (corridos de transporte para Curico), MOP (Censo de vialidad), INE (BD de permisos de circulación) y PRT (plantas de revisión técnicas de Curico)
			Calles no pavimentadas en red urbana e interurbana	AP-42/ EPA	SECTRA (corridos de transporte para Curico), MOP (Censo de vialidad), INE (BD de permisos de circulación) y PRT (plantas de revisión técnicas de Curico)
	Preparación de terrenos agrícolas	Cereales y chacras	Cereales y chacras	Cereales y chacras	AP-42/ EPA
Cultivos Industriales			Cultivos Industriales	AP-42/ EPA	ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias)
Hortalizas			Hortalizas	AP-42/ EPA	ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias)
FUENTES MÓVILES	Fuentes móviles fuera de ruta	Maquinaria vehicular	Maquinaria agrícola	Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling- Compression-Ignition / EPA	PRT (plantas de revisión técnicas de Curico)
	Fuentes móviles en ruta	CCF6	CCF8	COPERT IV	SECTRA (corridos de transporte para Curicó), MOP (Censo de vialidad), INE (BD de permisos de circulación) y PRT (plantas de revisión técnicas de Curicó)



### Fuentes de Información para FE y NA Fuentes Areales (Residenciales y Comerciales)

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	FACTOR DE EMISION	NIVELES DE ACTIVIDAD	
FUENTES AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	Gas Licuado	AP-42/ EPA	Informe Estadístico de Combustibles 2014.(SEC)	
			Kerosene	AP-42/ EPA	Informe Estadístico de Combustibles 2014.(SEC)	
			Leña	AP-42/ EPA	Encuesta Realizada por Sistam Ingeniería y CASEN 2013	
		Evaporativas residencial	Solventes de uso doméstico	AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)	
			Pintado arquitectónico	AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)	
			Uso de Adhesivos	AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)	
			Residencial de NH3	CARB	INE (Estadísticas de población 2014)	
		Comercial	Evaporativas comercial	Fugas residenciales de GLP	AP-42 y SEC	SEC (Informe Estadístico de Combustibles 2014)
				Distribución de combustible	AP-42/ EPA	SEC (Informe Estadístico de Combustibles 2014)
				Lavasecos	AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)
	Talleres de pintura			AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)	
	Imprentas			AP-42/ EPA	INE (Estadísticas de población 2014)	
	Aplicación de asfalto	CARB		MINVU		
	Rest. y comida rápida	Panaderías	Guía metodológica RETC, WebFire/ EPA	SEC (Informe Estadístico de Combustibles 2014) DS 138/MINSAL		



### Fuentes de Información para FE y NA Fuentes Areales (Otras)

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	FACTOR DE EMISION	NIVELES DE ACTIVIDAD
FUENTES AREALES	Otras	Disposición de residuos	Plantas de tratamiento de aguas servidas	Development and Selection of Ammonia Emission Factors Final Report/ EPA	SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios)
		Quemas	Quemas agrícolas	CARB	CONAF (Cooperación nacional Forestal)
			Incendios forestales	CARB	CONAF (Cooperación nacional Forestal)
			Incendios urbanos	CARB	Carabineros de Chile
			Cigarrillos	CARB	INE (Estadísticas de población 2014) y OPS (Organización Pnamericana de la Salud)
		Emissiones biogénicas	Todas las especies vegetales	MEGAN 2.1	MEGAN 2.1
		Actividades agrícolas	Fertilizantes	EMEP/EEA	FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias)
		Crianza de Animales	Bovinos	AP-42/ EPA	INE : Estadísticas Pecuarias y Odepa
			Cerdos	AP-42/ EPA	INE : Estadísticas Pecuarias y Odepa
			Ovinos	AP-42/ EPA	INE : Estadísticas Pecuarias y Odepa
			Aves	AP-42/ EPA	INE : Estadísticas Pecuarias y Odepa
	Caprinos y Camelidos	AP-42/ EPA	INE : Estadísticas Pecuarias y Odepa		





## Metodología Estimación de Emisiones Combustión Externa Residencial de Leña.

$$E_{total\ i_{km}} = \sum ( NA_{km} * FE_{ik} ) / 1.000.000$$

- E<sub>total i<sub>km</sub></sub>** : Emisiones en (ton/año) del contaminante i, para la comuna k, para el tipo de población m.
- NA<sub>km</sub>** : Consumo de leña en (kg/año) para la comuna k, para el tipo de población m.
- FE<sub>ik</sub>** : Factor de emisión en (g/kg) del contaminante i, para la comuna k.
- M** : Población Urbana o Rural

$$NA_{km} = Pob_{km} * Consumo_{km}$$

- Pob<sub>km</sub>** : Número de personas del tipo de población m de la comuna k.
- Consumo<sub>km</sub>** : Consumo percapita de leña (kg/per) del tipo de población m de la comuna k.

$$FE_{ik} = \sum ( Comp_{jnk} * FE_{base} )$$

- Comp<sub>jnm</sub>** : Composición del artefacto j con un rango de humedad n para la comuna k
- FE<sub>base</sub>** : Factor de emisión base para el contaminante i, para el artefacto j con un rango de humedad n, para la comuna k

$$Comp_{jnk} = PDA_{jk} * RH_{nk}$$

- PDA<sub>jk</sub>** : % de distribución de consumo de leña para el artefacto j en la comuna k
- RH<sub>nk</sub>** : % de distribución de consumo de leña por rango de humedad n en la comuna k



## Marco Teórico de la Encuesta de Leña

Comuna	Población	Número de viviendas	Tamaño de la muestra
Curicó	146.662	40.028	475
Molina	42.128	11.639	302
Rauco	9.970	2.974	57
Romeral	14.983	4.173	60
Sagrada Familia	19.467	5.514	85
Teno	28.397	7.707	123
Totales	257.607	72.035	1.102

Fuente  
Elaboración propia



## Resultados Encuesta de Leña

### Consumo de leña por hogar

Comuna	Urbano (kg/hogar)	Rural (kg/hogar)
Curicó	1.520,09	1.611,61
Molina	887,88	826,06
Rauco	168,52	180,77
Romeral	210,00	184,19
Sagrada Familia	264,88	286,88
Teno	393,60	403,25

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de leña

### Consumo de leña percapita

Comuna	Urbano (kg/persona)	Rural (kg/persona)
Curicó	67,81	63,96
Molina	130,47	140,23
Rauco	153,21	142,83
Romeral	111,31	126,91
Sagrada Familia	133,90	123,64
Teno	97,50	95,17

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de leña, en conjunto con indicadores (hogar-persona y urbano-rural) de la Encuesta CASEN 2013



## Resultados Encuesta de Leña

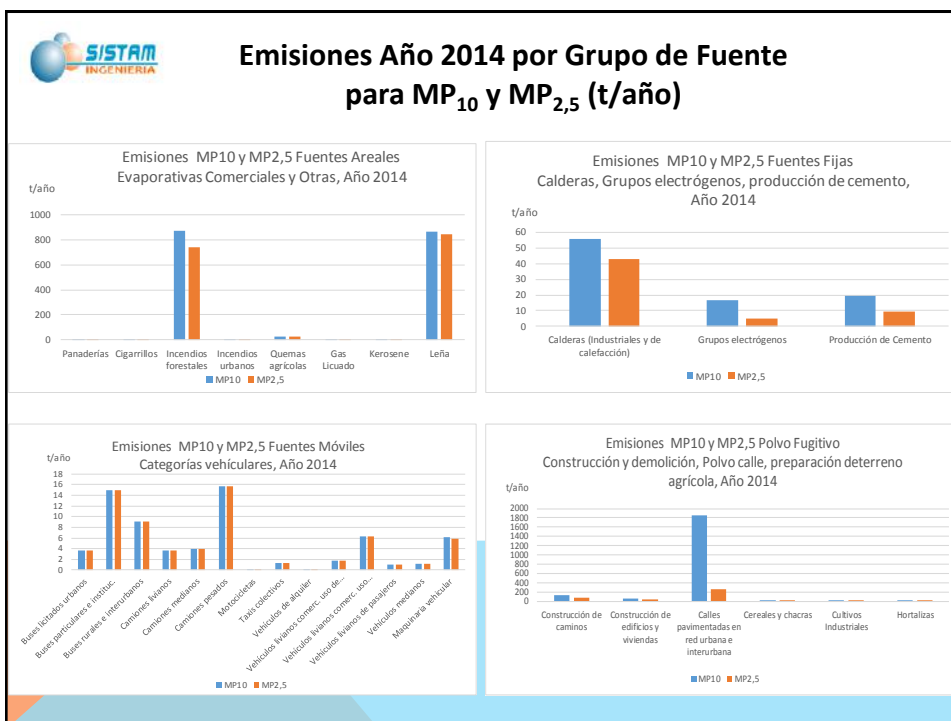
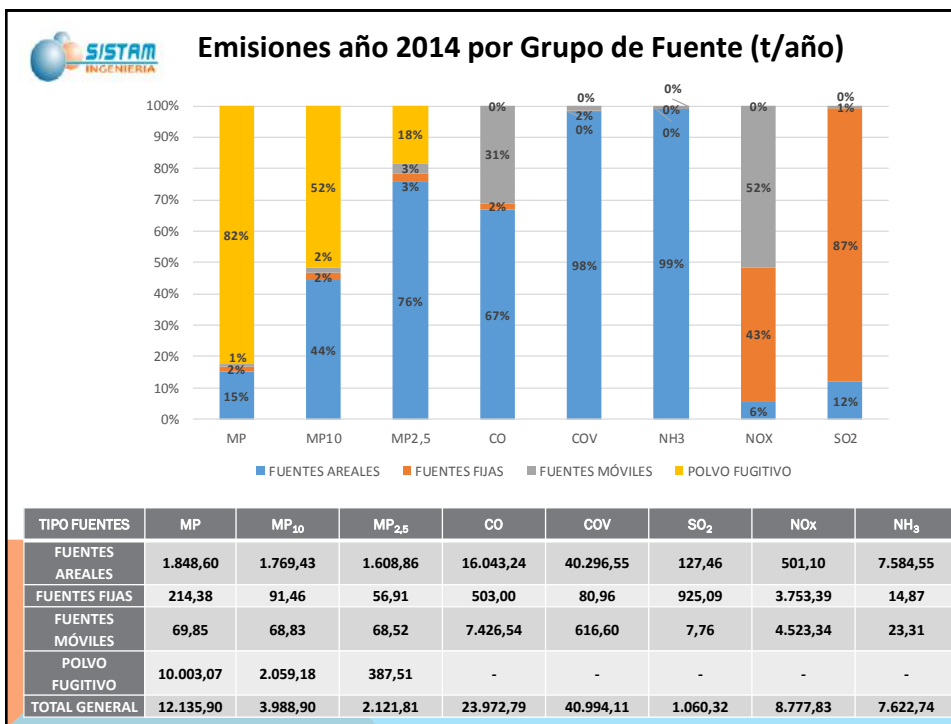
### Distribución de consumo de leña por rango de humedad (RH<sub>nk</sub>)

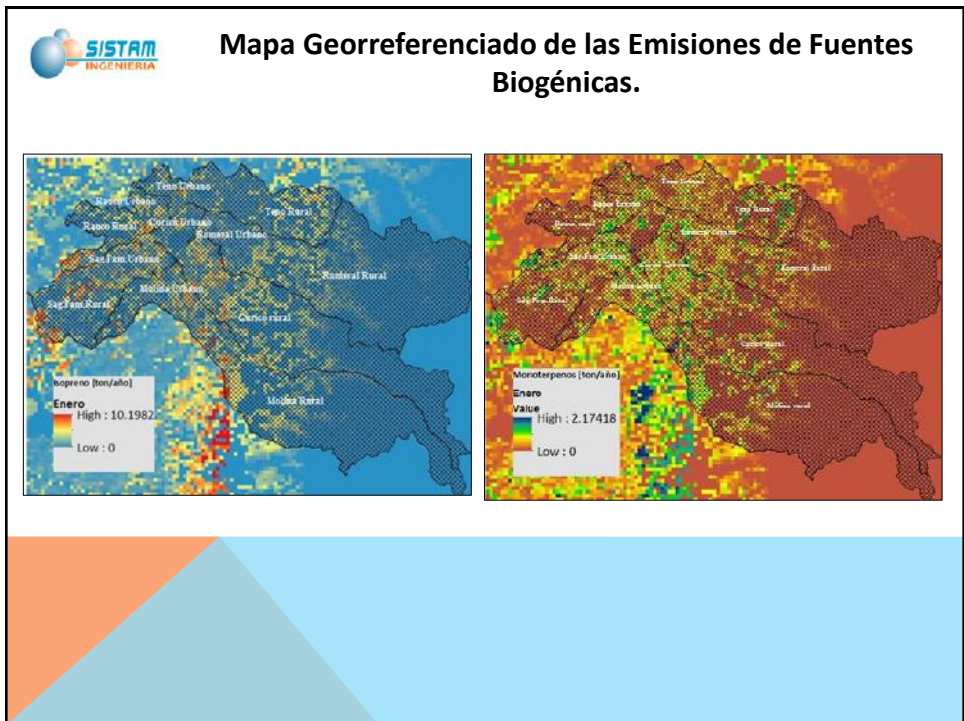
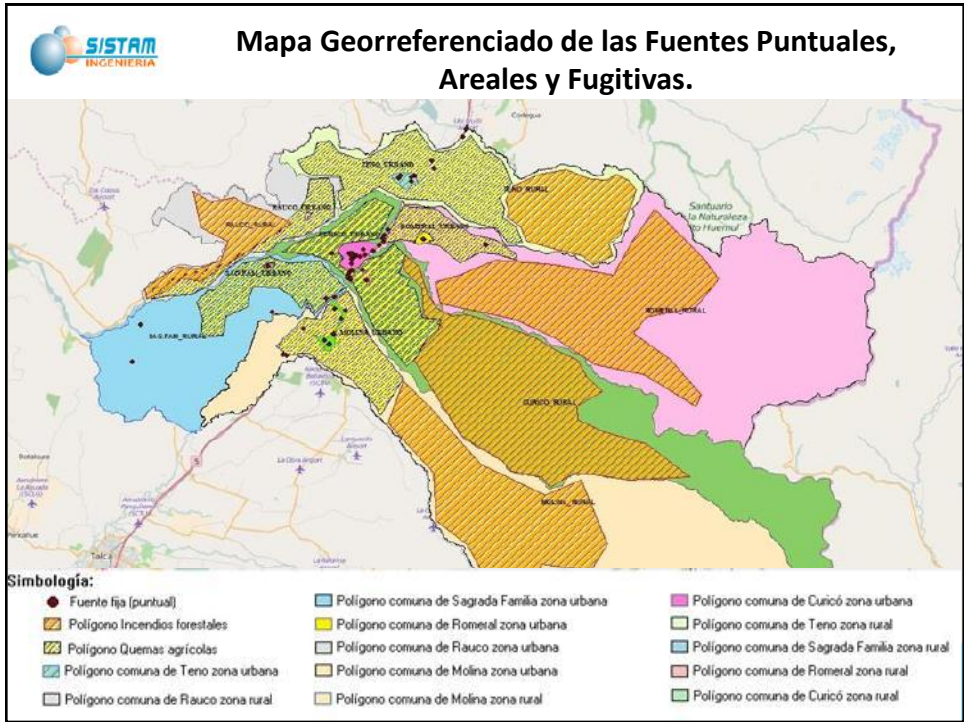
Humedad de la leña	Curicó	Molina	Rauco	Romeral	Sagrada Familia	Teno
Húmeda (> 30 %)	0,00%	0,35%	0,00%	0,00%	0,00%	8,86%
Seca (< 20 %)	96,87%	96,20%	95,35%	88,02%	86,47%	91,14%
Semí húmeda (20 % - 30%)	3,13%	3,45%	4,65%	11,98%	13,53%	0,00%
Total general	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

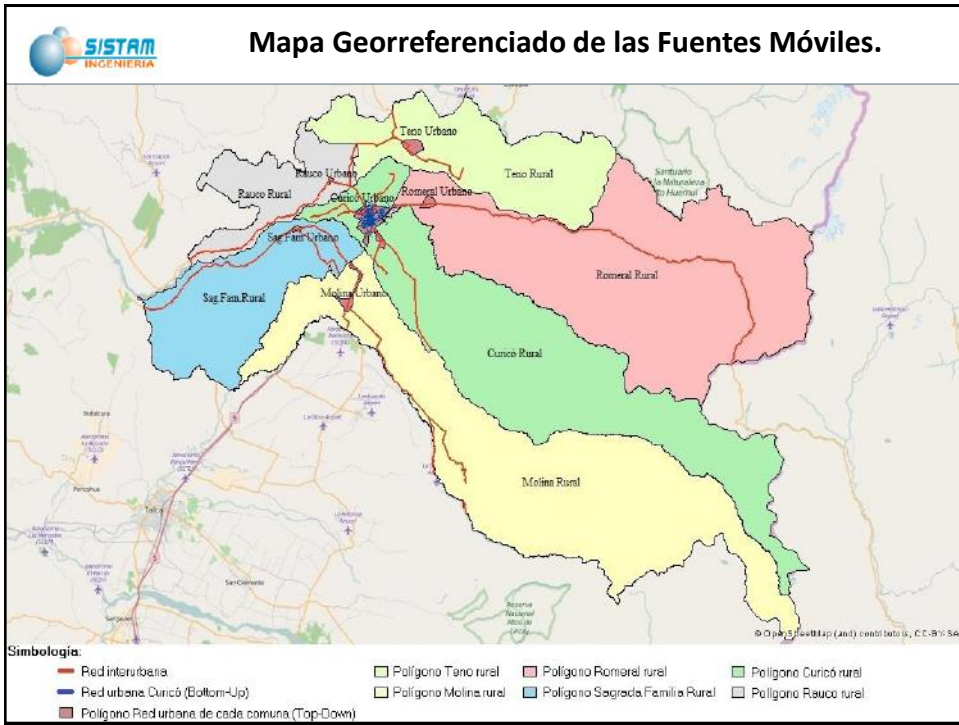
### Distribución de consumo de leña por tipo de artefacto (PDA<sub>jk</sub>)

Tipo de artefacto	Curicó	Molina	Rauco	Romeral	Sagrada Familia	Teno
Calefactores c/Tempador	68,76%	47,42%	32,22%	41,75%	50,27%	43,90%
Chimeneas	6,21%	1,49%	0,00%	3,42%	0,00%	0,00%
Cocinas	12,86%	20,71%	38,34%	26,59%	11,22%	9,38%
Salamandra	10,76%	25,89%	22,46%	28,24%	27,52%	46,20%
Otros (*)	1,41%	4,49%	6,97%	0,00%	11,00%	0,52%
No Consume	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Total general	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de leña









## Evaluación de Incertidumbre

- Metodología para evaluar la Incertidumbre (EPA)

		Clasificación Factor de Emisión				
		A	B	C	D	E
Clasificación Nivel de Actividad	A	A	A	B	B	C
	B	A	B	B	C	D
	C	B	B	C	D	E
	D	B	C	D	E	E
	E	C	D	E	E	E



## Evaluación de Incertidumbre Niveles de Actividad

- Ejemplo de Incertidumbre para Niveles de Actividad

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	Fuente de Niveles de Actividad	Calidad del nivel de actividad
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	Grupos electrógenos	Sistema de Declaraciones de Fuentes Fijas (F138 Web)	B
FUENTES AREALES	Combustión	Combustión externa residencial	Gas Licuado	Datos obtenidos del Informe Estadístico de combustibles (SEC) año 2014	B
			Kerosene	Datos obtenidos del Informe Estadístico de combustibles (SEC) año 2014	B
			Leña	Encuesta de consumo de leña comunas de Curicó, Tenó, Romeral, Rauco, Sagrada Familia y Molina	A
	Residencial	Evaporativas residencial	Solventes de uso doméstico	Datos obtenidos de la Proyección de población realizada por el INE para el año 2014	C
			Pintado arquitectónico	Datos obtenidos de la Proyección de población realizada por el INE para el año 2014	C
			Uso de Adhesivos	Datos obtenidos de la Proyección de población realizada por el INE para el año 2014	C
		Residencial de NH <sub>3</sub>	Datos obtenidos de la Proyección de población realizada por el INE para el año 2014	C	



## Evaluación de Incertidumbre Factores de Emisión

- Ejemplo de Incertidumbre para Factores de Emisión

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	Calidad del Factor de Emisión							
				MP	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	CO	COV	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión interna	Grupos electrógenos	B	B	B	B	B	B	B	C
	Procesos	Ind. de productos minerales	Producción de Cemento	B	B	B	B	B	B	B	C
FUENTES AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	Gas Licuado	B	B	B	B	B	B	B	B
			Kerosene	B	B	B	B	B	B	B	B
			Leña	B	B	B	B	B	B	B	B
		Evaporativas residencial	Solventes de uso doméstico	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
			Pintado arquitectónico	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
			Uso de Adhesivos	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
			Residencial de NH <sub>3</sub>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	C
Fugas residenciales de GLP	NA	NA	NA	NA	B	NA	NA	NA			



## Evaluación de Incertidumbre Emisiones

- Ejemplo de evaluación de las incertidumbres de las emisiones

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	incertidumbre Emisiones							
				MP	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	CO	COV	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
FUENTES FIJAS	Combustión	Combustión externa puntual	Generación eléctrica (Turbinas y Calderas de generación eléctrica)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
			Calderas (Industriales y de calefacción)	B	B	B	B	B	B	B	B
		Combustión interna	Grupos electrógenos	B	B	B	B	B	B	B	B
	Procesos	Ind. de productos minerales	Producción de Cemento	B	B	B	B	B	B	B	
FUENTES AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	Gas Licuado	B	B	B	B	B	B	B	B
			Kerosene	B	B	B	B	B	B	B	B
			Leña	A	A	A	A	A	A	A	A
		Evaporativas residencial	Solventes de uso doméstico	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
			Pintado arquitectónico	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
			Uso de Adhesivos	NA	NA	NA	NA	C	NA	NA	NA
Residencial de NH <sub>3</sub>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	C			
Fugas residenciales de GLP	NA	NA	NA	NA	B	NA	NA	NA			



## Crterios y Supuestos de Proyección de Emisiones Año 2030

- Crecimiento poblacional
- Crecimiento económico
- Crecimiento del parque vehicular

Comuna	Población 2014	Población proyectada a 2030
Curicó	142.662	169.964
Molina	42.128	60.659
Rauco	9.970	12.852
Romeral	14.983	19.160
Sagrada Familia	19.467	21.700
Teno	28.397	35.607
<b>Total</b>	<b>257.607</b>	<b>319.942</b>

Fuente: Proyecciones a partir de INE



## Crterios y Supuestos de Proyección de Emisiones Año 2030 Fuentes Fijas, Fuentes Móviles y Polvo Fugitivo

CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	CRITERIOS ESCENARIO CONSERVADOR	CRITERIOS ESCENARIO OPTIMISTA
Combustión externa puntual	Generación eléctrica (Turbinas y Calderas de generación eléctrica)	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años + Normas de emisión + Mejora tecnológica
Combustión interna	Calderas (Industriales y de calefacción)		
Ind. de productos minerales	Grupos electrógenos	Tasa de crecimiento anual de edificación INE de los últimos 5 años	Tasa de crecimiento anual de edificación INE de los últimos 5 años + Mejora tecnológica
Construcción de edificios	Producción de Cemento		
Construcción de caminos	Construcción de edificios y viviendas	Tasa de crecimiento anual obtenida de Informes Economicos Regionales INE de los últimos 4 años	Tasa de crecimiento anual obtenida de Informes Economicos Regionales INE de los últimos 4 años + Mejora tecnológica
Producción de áridos	Construcción de caminos	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años + Normas de emisión + Mejora tecnológica
Calles en red interurbana	Producción de áridos	Crecimiento Bianual de censos de vialidad MOP	Crecimiento Bianual de censos de vialidad MOP
Cereales y chacras	Calles pavimentadas en red urbana e interurbana	Variación de las superficies por tipo de cultivo según ODEPA de los últimos 10 años	Variación de las superficies por tipo de cultivo según ODEPA de los últimos 10 años + Mejora tecnológica
Cultivos Industriales	Cereales y chacras		
Hortalizas	Cultivos Industriales	Datos de plantas de revision tecnica de los últimos 5 años + vida util	Datos de plantas de revision tecnica de los últimos 5 años + vida util + normativas asociadas a tipos de vehículos y combustibles a partir de DS 211/1991, DSS4/1194 y DS 55/1994
Maquinaria vehicular	Hortalizas		
CCF6	Maquinaria agrícola	Tasa de crecimiento anual del parque vehicular INE de los últimos 7 años	Tasa de crecimiento anual del parque vehicular INE de los últimos 7 años + Mejora tecnológica
	CCF8		





## Crterios y Supuestos de Proyección de Emisiones Año 2030 Fuentes Areales (Residencial)

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	CRITERIOS ESCENARIO CONSERVADOR	CRITERIOS ESCENARIO OPTIMISTA	
FUENTES AREALES	Residencial	Combustión externa residencial	Gas Licuado	Variación de consumo residencial de GLP según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años	Variación de consumo residencial de GLP según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años + Mejoras Tecnológicas	
			Kerosene	Variación de consumo residencial de Kerosene según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años	Variación de consumo residencial de Kerosene según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años + Mejoras Tecnológicas	
			Leña	Proyección de población INE al año 2030 + tasa de recambio natural	Proyección de población al año 2030 + tasa de recambio natural + Mejora Tecnológica de los equipos + Mejora en la calidad de la leña (humedad) + Mejoras de las condiciones de operación + Mejoras Viviendas	
		Evaporativas residencial	Solventes de uso doméstico	Proyección de población INE al año 2030	Proyección de población INE al año 2030	Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (componentes en la elaboración de solventes)
			Pintado arquitectónico			Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (calidad de pinturas, nuevos componentes a base de agua o sustancias orgánicas, menos nocivas)
			Uso de Adhesivos			Proyección de población al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (componentes en la elaboración de adhesivos)
			Residencial de NH3			Proyección de población INE al año 2030 + Disminución de los residuos que no son tratados en PTAS
		Fugas residenciales de GLP	Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (calidad de conexiones de GLP)			



## Crterios y Supuestos de Proyección de Emisiones Año 2030 Fuentes Areales (Comercial)

GRUPO	SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	CRITERIOS ESCENARIO CONSERVADOR	CRITERIOS ESCENARIO OPTIMISTA
FUENTES AREALES	Comercia I	Evaporativas comercial	Distribución de combustible	Proyección de población INE al año 2030	Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas
			Lavasecos		Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (calidad de pinturas, nuevos componentes a base de agua o sustancias orgánicas, menos nocivas)
			Talleres de pintura		Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (mejor calidad de solventes y sellantes)
			Imprentas		Proyección de población INE al año 2030 + Mejoras Tecnológicas (mejor calidad de asfalto)
			Aplicación de asfalto		Variación de consumo comercial de GLP según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años
			Fugas comerciales de GLP		Variación de consumo de GLP según Informes Estadísticos de Combustibles, SEC, de los últimos 8 años + Mejoras Tecnológicas
		Rest. y comida rápida	Panaderías	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años	Tasa de crecimiento anual del índice del INACER de los últimos 5 años + Normas de emisión + Mejora tecnológica

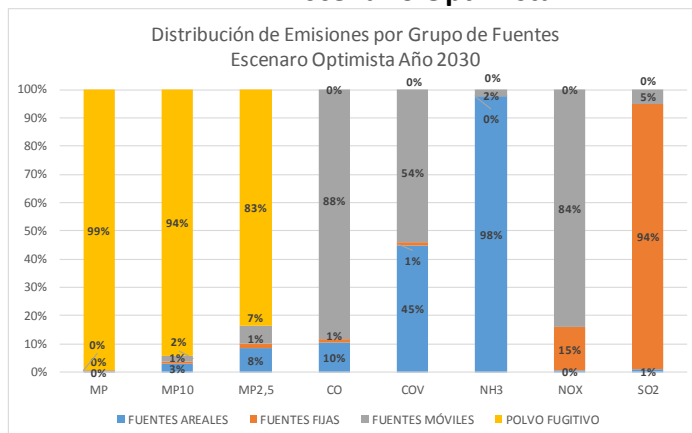


## Crterios y Supuestos de Proyección de Emisiones Año 2030 Fuentes Areales (Otras)

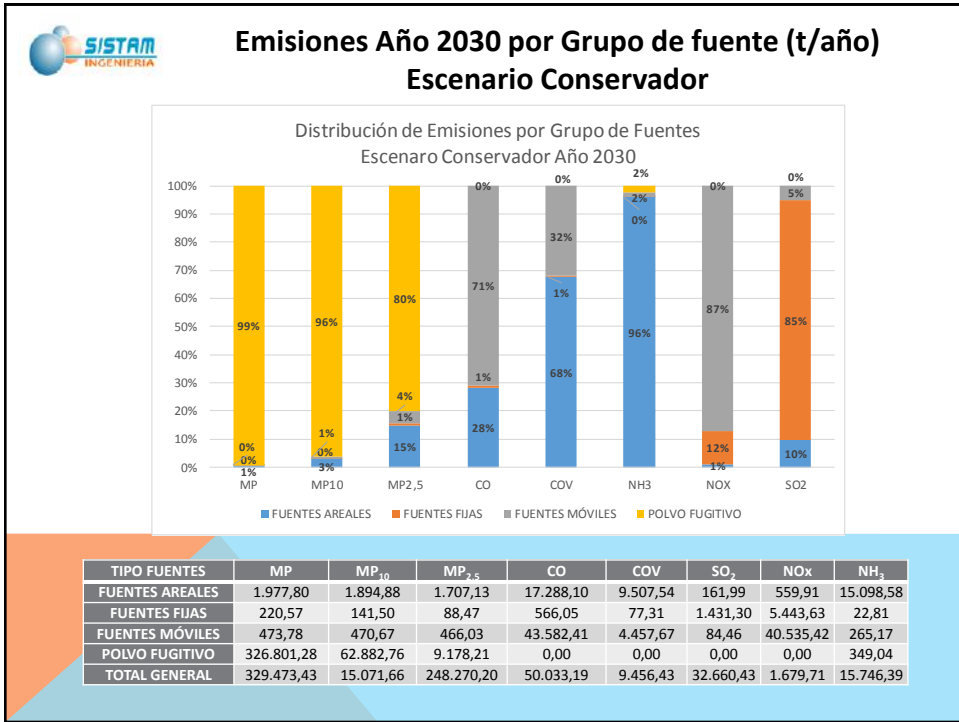
SUB-GRUPO	CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	CRITERIOS ESCENARIO CONSERVADOR	CRITERIOS ESCENARIO OPTIMISTA
Otras	Disposición de residuos	Plantas de tratamiento de aguas servidas	Proyección de población al año 2030 + estadísticas percapitas de consumo de agua (SISS)	Mejores tecnologías para tratamiento de aguas servidas (Reducción de 10 % en el factor de emisión) + Programas de incentivo para un mayor aprovechamiento hídrico (Reducción de 10 % en el consumo promedio por persona).
		Quemas agrícolas	Variación de Quemas según Reportes de CONAF, últimos 8 años	Variación de Quemas según Reportes de CONAF, últimos 8 años + Prohibición de quemas durante todo el año + medidas de abatimiento para evitar quemas
	Quemas	Incendios forestales	Variación de Incendios Forestales según Reportes de CONAF, últimos 8 años	Variación de Incendios Forestales según Reportes de CONAF, últimos 8 años, sin mejoras ya que son eventos espontáneos sin control
		Incendios urbanos	Variación de Incendios Urbanos según Reportes de Carabineros de Chile, últimos 5 años	Variación de Incendios Urbanos según Reportes de Carabineros de Chile, últimos 5 años + Mejora tecnológica (materiales de construcción)
		Cigarrillos	Proyección de población INE al año 2030	Proyección de población INE al año 2030 + Aumento del precio de cigarrillos + restricciones en lugares públicos
	Actividades agrícolas	Fertilizantes	Variación de las superficies por tipo de cultivo según ODEPA de los últimos 10 años	Variación de las superficies por tipo de cultivo según ODEPA de los últimos 10 años + Reducción en la utilización de fertilizantes sintéticos
	Crianza de Animales	Bovinos	Variación de número de bovinos según ODEPA e INE de los últimos 10 años	Variación de número de bovinos según ODEPA e INE de los últimos 10 años + Reutilización del estiércol
Cerdos				
Ovinos				
Aves				
Caprinos y Camelidos				



## Emisiones Año 2030 por Grupo de fuente (t/año) Escenario Optimista



TIPO FUENTES	MP	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	CO	COV	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
FUENTES AREALES	571,32	540,98	523,18	4.886,09	3.627,18	13,97	164,19	11.434,42
FUENTES FIJAS	212,20	140,41	88,09	566,05	77,31	1.417,44	5.438,97	22,72
FUENTES MÓVILES	420,01	417,48	413,51	41.106,73	4.377,85	76,97	29.768,54	261,17
POLVO FUGITIVO	189.515,86	17.763,38	5.146,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL GENERAL	190.719,40	18.862,25	6.171,27	46.558,87	8.082,34	1.508,37	35.371,70	11.718,31



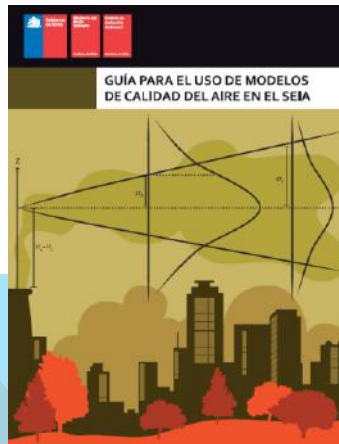
## Propuesta de delimitación de la zona saturada mediante el uso de herramientas de modelación de dispersión de contaminantes



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Metodología:

- La modelación se efectuó en base a las directrices de la “Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, 2012”.



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Elección del modelo:

- Siguiendo las directrices de la “Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, 2012” se utilizó sistema de modelación atmosférica “WRF – CALPUFF” para simular la dispersión de contaminantes en terreno complejo y emisiones relevantes a distancias de hasta aproximadamente 40 km.
- ✓ WRF: modelo de pronóstico meteorológico que simula campos de viento y temperatura en un dominio de modelación engrillado y tridimensional
- ✓ CALPUFF es un modelo que trata las emisiones como “puffs”, que se van desplazando a través de un campo meteorológico tridimensional



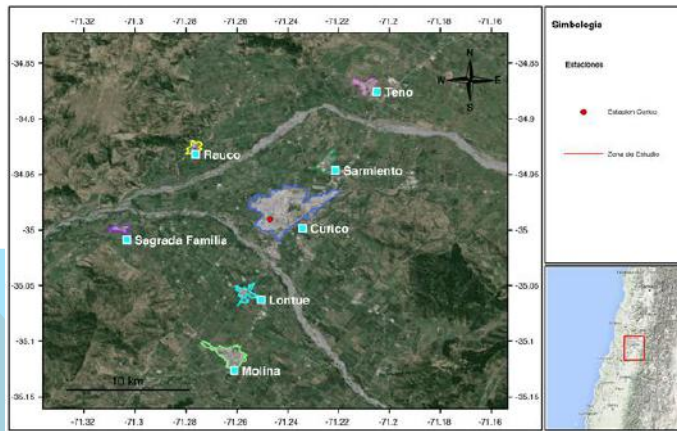
## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Dominio y período de modelación:

- El periodo de modelación es desde el 01 de enero de 2014 hasta el 31 de diciembre del 2014
- La Guía recomienda una extensión de 73 x 73 km para el dominio meteorológico y 62x62 km para el dominio de la dispersión.

### El Dominio incluye:

- Curicó: 1.328 Km<sup>2</sup>
- Molina: 1.552 Km<sup>2</sup>
- Raucó: 309 Km<sup>2</sup>
- Romeral: 1.597 Km<sup>2</sup>
- Sagrada Familia: 549 Km<sup>2</sup>
- Teno: 618 Km<sup>2</sup>



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

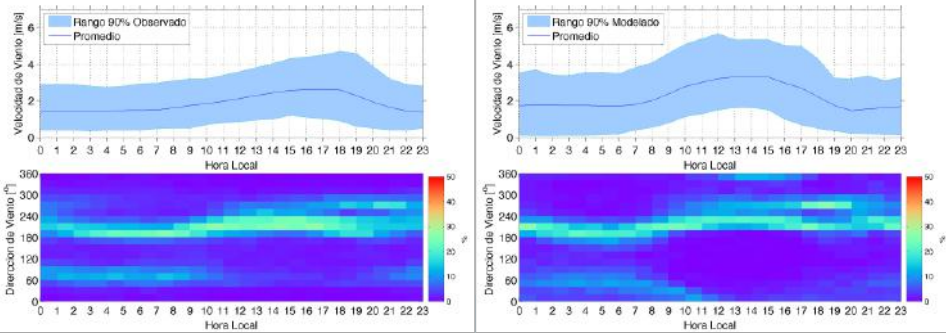
### Modelación meteorológica y evaluación:

- A través del modelo WRF, se simuló un año entero de meteorología representativo para la zona, para cubrir las escalas temporales más importantes de la variabilidad meteorológica (diaria y estacional).
- La meteorología es la que media entre las emisiones de contaminantes y sus respectivos impactos. Por tanto es fundamental una evaluación rigurosa del desempeño del modelo.
- Se utilizó la estación meteorológica de Curicó para su evaluación.



### Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Modelación meteorológica y evaluación: Ciclo Diario de Viento estación Curicó y Histograma de frecuencia de dirección de viento



**WRF**

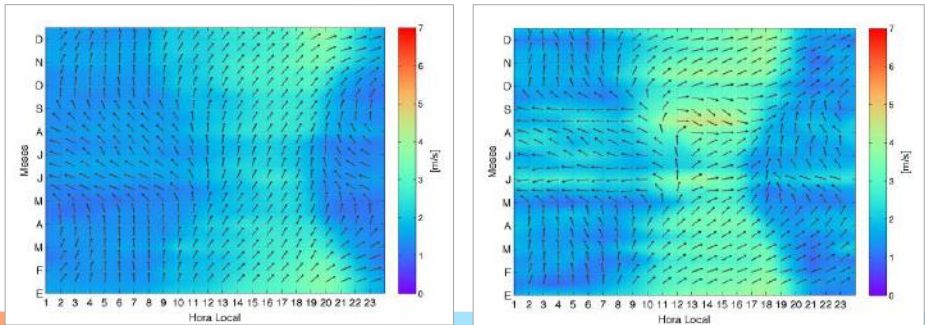
**Observado**

En general, el modelo WRF representa bien el ciclo diario de la velocidad de viento, mostrando máximos de la variable en el día y mínimos en la noche. También existe buena correspondencia en la magnitud del viento



### Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Modelación meteorológica y evaluación: Ciclo estacional del ciclo diario de viento (velocidad y dirección) para estación Curicó.



**WRF**

**Observado**

El modelo logra reproducir las componentes predominantes del viento durante el día y la noche, y también durante el cambio de estación.



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Emissiones para modelación Año 2014:

TIPO DE FUENTE	MP	MP10	MP2,5	CO	COV	NOX	SO2	NH3
Leña rural	3,7%	10,9%	20,0%	16,0%	3,9%	0,2%	0,3%	0,2%
Leña urbano	3,7%	10,8%	19,8%	15,7%	3,9%	0,2%	0,3%	0,2%
Incendios forestales	7,5%	21,9%	34,9%	34,3%	9,1%	4,1%	10,2%	0,0%
Resto Fuentes Areales	0,2%	0,7%	1,2%	1,0%	81,3%	1,2%	1,2%	99,0%
FUENTES FIJAS	1,8%	2,3%	2,7%	2,1%	0,2%	42,8%	87,2%	0,2%
FUENTES MÓVILES	0,6%	1,7%	3,2%	31,0%	1,5%	51,5%	0,7%	0,3%
Calles pavimentadas en red urbana	21,0%	12,3%	3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Calles pavimentadas interurbana	58,5%	34,1%	9,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Resto del polvo fugitivo	2,9%	5,3%	5,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Total general	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

### Emissiones para modelación Año 2014 sin incendios forestales:

TIPO DE FUENTE	MP	MP10	MP2,5	CO	COV	NOX	SO2	NH3
Leña rural	4,1%	14,0%	30,7%	24,3%	4,3%	0,3%	0,3%	0,2%
Leña urbano	4,0%	13,9%	30,4%	23,8%	4,3%	0,3%	0,3%	0,2%
Resto Fuentes Areales	0,3%	0,9%	1,8%	1,6%	89,4%	1,2%	1,3%	99,0%
FUENTES FIJAS	1,9%	2,9%	4,1%	3,2%	0,2%	44,6%	97,2%	0,2%
FUENTES MÓVILES	0,6%	2,2%	5,0%	47,1%	1,7%	53,7%	0,8%	0,3%
Calles pavimentadas en red urbana	22,7%	15,7%	5,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Calles pavimentadas interurbana	63,2%	43,7%	14,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Resto del polvo fugitivo	3,2%	6,7%	8,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Total general	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Emissiones para modelación:

- La modelación se limitó a la modelación de dispersión sin fotoquímica) por lo que sólo se consideraron los contaminantes MP10 y MP2,5 con el fin de delimitar la zona saturada por material particulado
- Fuente principal es la combustión de leña residencial
- No se incluyen incendios forestales en la modelación
- El modelo Calpuff distingue entre emisiones areales (cuyas ubicaciones se describen a través de polígonos), lineales y puntuales. Las fuentes areales en este caso son: incendios, agricultura, rurales, urbanos y leña. Las fuentes lineales son las móviles y las puntuales corresponden a las fuentes fijas.



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Simulación de Dispersión:

- Mediante la aplicación del modelo CALPUFF fue posible obtener las concentraciones de material particulado (MP10 y MP2,5), basándose en los campos de vientos generados por la modelación meteorológica realizada con WRF.

#### Concentraciones modeladas

Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]				
Estación Curicó	MP <sub>10</sub>		MP <sub>2,5</sub>	
	Promedio Anual	Percentil 98	Promedio Anual	Percentil 98
	50,2	121,4	32,4	81,5

Norma [%]				
Estación Curicó	MP <sub>10</sub>		MP <sub>2,5</sub>	
	Promedio Anual	Percentil 98	Promedio Anual	Percentil 98
	100,5	80,9	162,2	163,0



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Evaluación de Simulación de Dispersión:

Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]				
Estación Curicó	MP <sub>10</sub> MODELADO		MP <sub>10</sub> OBSERVADO	
	Promedio Anual	Percentil 98	Promedio Anual	Percentil 98
	50,2	121,4	54,0	132,0

Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]				
Estación Curicó	MP <sub>2,5</sub> MODELADO		MP <sub>2,5</sub> OBSERVADO	
	Promedio Anual	Percentil 98	Promedio Anual	Percentil 98
	32,4	81,5	27,0	85,0

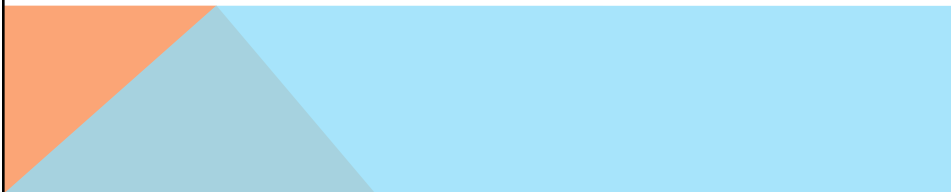




## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Evaluación de Simulación de Dispersión:

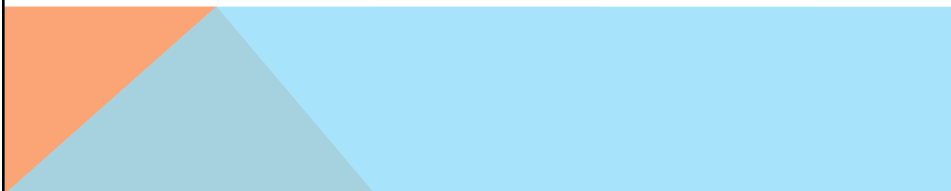
- Fuentes principales de incertidumbre: información de la meteorología (WRF) y emisiones (siempre alta)
- Otras consideraciones: la estación de Curicó esta ubicada dentro del polígono de máximas emisiones y existe un distribución no homogénea de las emisiones, también efecto local de fuentes cercanas a la estación.
- La diferencia se considera aceptable dentro del contexto que el fin de esta modelación es poder delimitar la extensión de la zona donde existen concentraciones significativas y que se debería declarar saturada



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

### Iso-líneas de concentración :

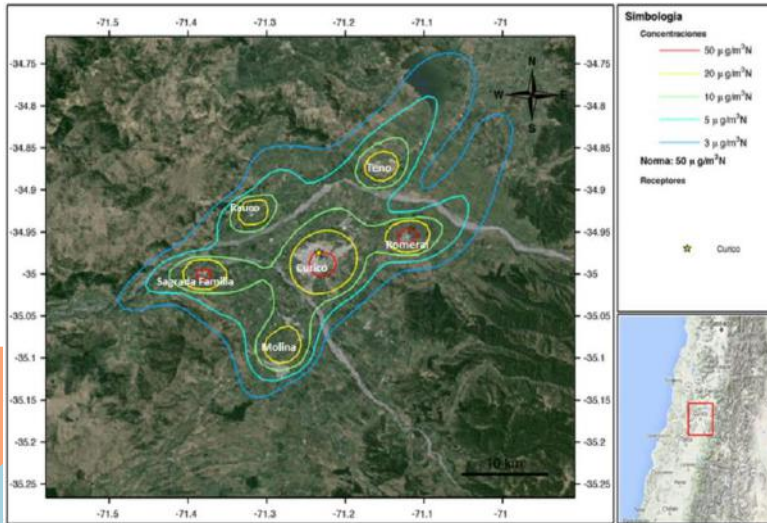
- Las Iso-concentraciones presentan patrones más bien circulares alrededor de los centros urbanos:
- ✓ La situación meteorológica que causa las mayores concentraciones es durante la tarde/noche con vientos débiles y una atmósfera estable. Estos vientos débiles hacen que no se generen patrones alargados
- ✓ Las fuentes que dominan por lejos son las que se ubican dentro de los límites urbanos. Y debido a que, tal como se mencionó en el punto anterior, los contaminantes se acumulan cerca de sus fuentes, son justamente estos centros urbanos que dominan también en esas figuras





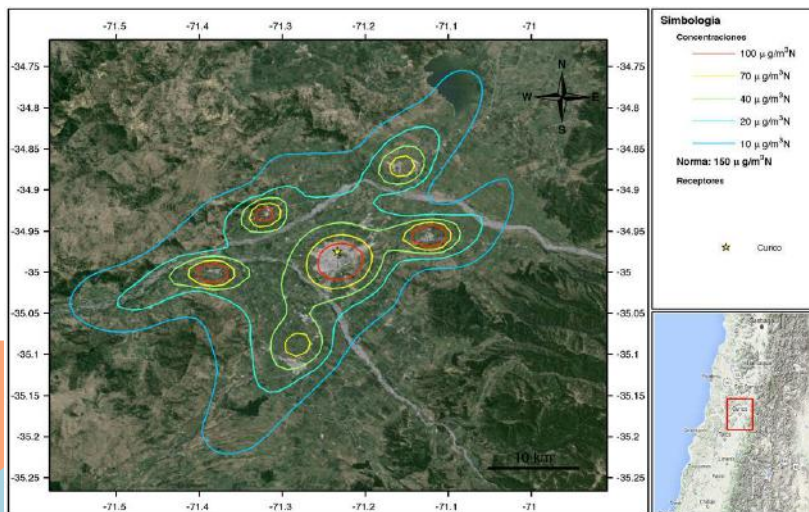
## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Iso-líneas de concentración promedio anual de  $MP_{10}$ :



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

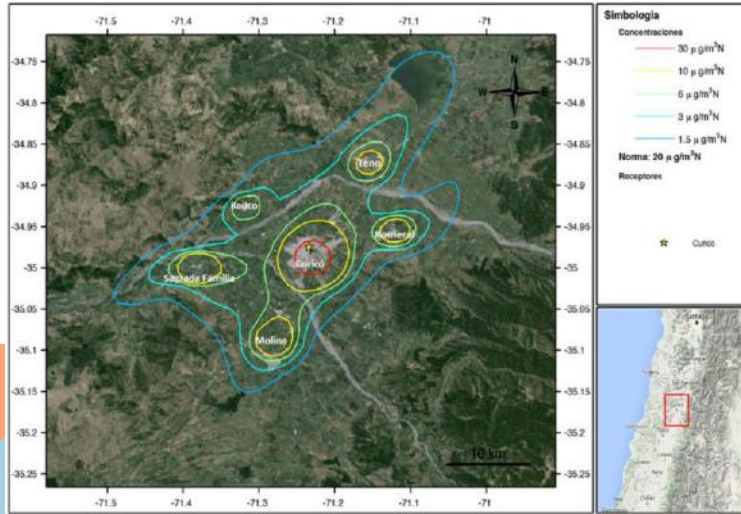
Iso-líneas de concentración percentil 98 diario de  $MP_{10}$ :





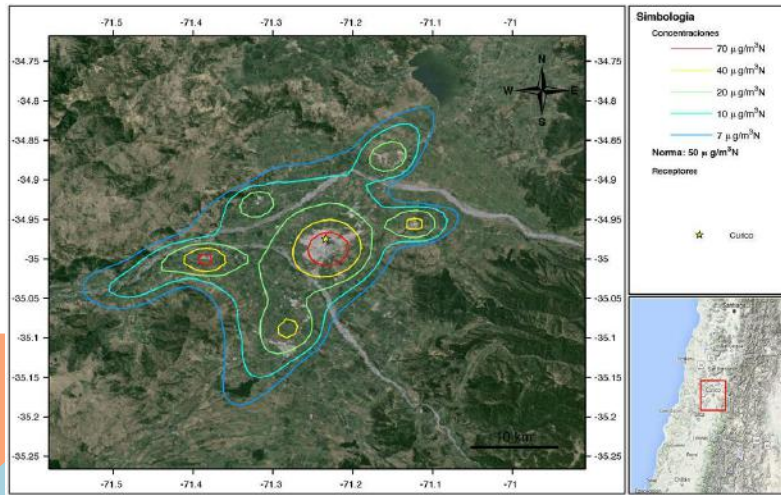
### Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Iso-líneas de concentración promedio anual de  $MP_{2,5}$ :



### Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Iso-líneas de concentración percentil 98 diario de  $MP_{2,5}$ :





## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

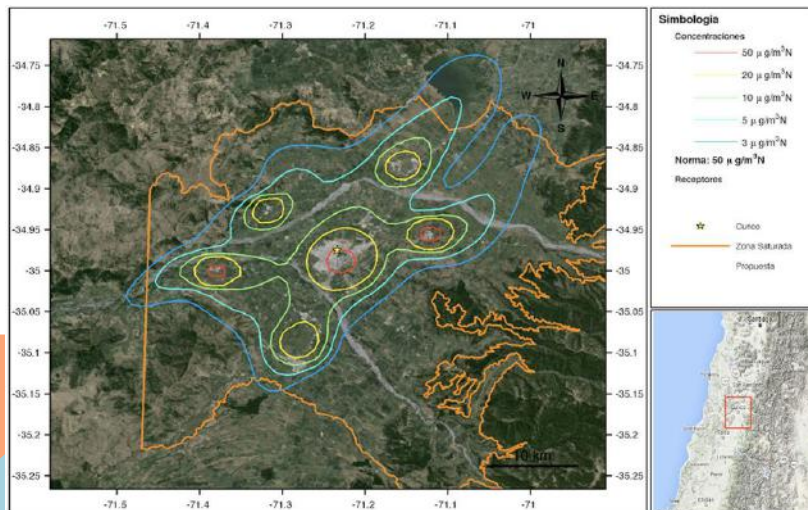
### Delimitación de zona saturada:

- Debido a que para MP10 como MP2,5 la extensión de las concentraciones es muy similar, se decidió proponer la delimitación de la zona saturada en ambos casos.
- Criterios:
  - ✓ Todos los centros urbanos importantes deben estar dentro de la zona
  - ✓ Las fuentes principales deben estar dentro de la zona
  - ✓ Limitar la zona a una provincia
  - ✓ Hacia el este y oeste no hay límites políticos razonables para la delimitación. En este sentido se ocupó una cota de 600 metros hacia el este y una línea recta hacia el oeste. Es evidente que estos límites son más bien arbitrarias y podrían ser modificadas si fuera necesario por algunas razones prácticas



## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

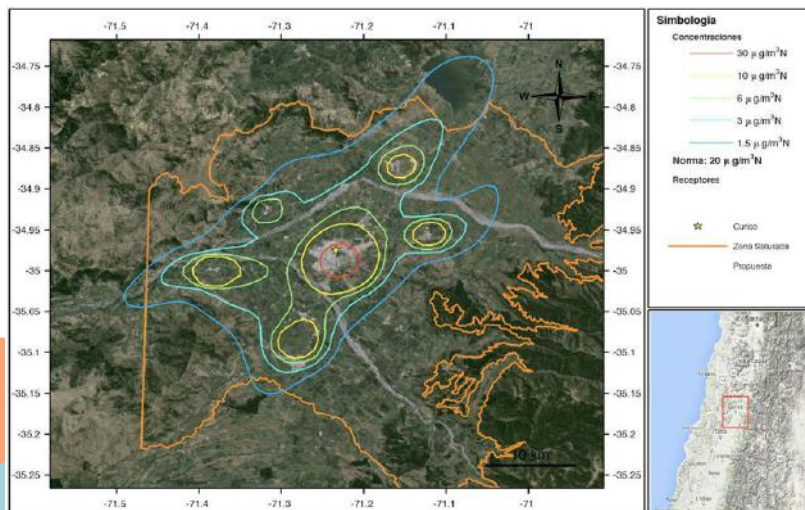
### Delimitación de zona saturada para MP<sub>10</sub>:





## Modelación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Delimitación de zona saturada para  $MP_{2,5}$ :



# FIN

**INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y  
MODELACIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS  
COMUNAS DE CURICÓ, TENO, ROMERAL,  
RAUCO, SAGRADA FAMILIA Y MOLINA, AÑO  
BASE 2014**

Talca, Junio del 2016

Jaime Escobar Melero, [jescobar@cl](mailto:jescobar@cl)  
Lincoln Norambuena Castro, [lnorambuena@sistam.cl](mailto:lnorambuena@sistam.cl)