

# VIII SEMINARIO. SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA RED DE PARQUES NACIONALES



## Modelización en el ámbito de la calidad del aire

*David de la Paz, Rafael Borge,  
Juan Manuel de Andrés, Javier Perez*

*Laboratorio de Modelización Ambiental  
ETSI Industriales. Universidad Politécnica de Madrid*



POLITÉCNICA

[dpaz@etsii.upm.es](mailto:dpaz@etsii.upm.es)



**1. Introducción**

**2. Marco conceptual y sistema de simulación**

**3. Modelización regional (Madrid) de alta resolución**

**3a. Meteorología y concentraciones**

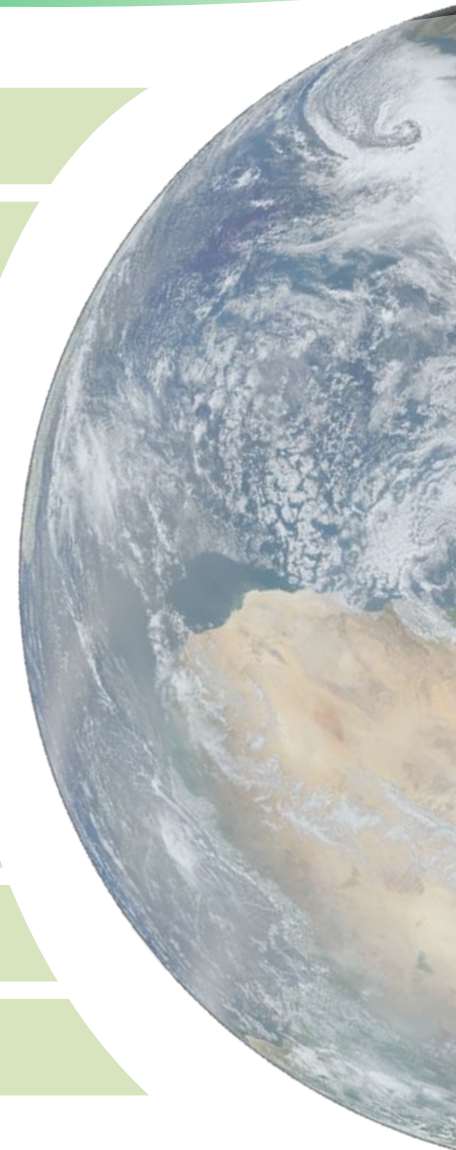
**3b. Efecto sobre los ecosistemas: Depósito de N y S**

**3c. Efecto sobre los ecosistemas: Ozono**

**3d. Análisis de contribución de fuentes**

**3e. Simulaciones climáticas**

**4. Conclusiones y líneas futuras**



- La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial
- OMS**, la contaminación atmosférica es responsable de 3,7 millones de muertes anuales. (WHO, 2014)
- OCDE**, el coste directo en EU 500.000 millones de € (en 2060 el 2% del PIB). (OECD, 2016)

- EEA, 2017**
- ICP (ICP forest)**  
GRUPOS DE TRABAJO  
SOBRE LOS EFECTOS DE LA  
C.A EN LOS ECOSISTEMAS

Principales  
efectos

**Acidificación**: Actualmente, el área con excedencias en los niveles críticos para ecosistemas terrestres y acuáticos en Europa es de un 9% y un 5%

**Eutrofización**: Se prevé que en 2020 el 55% de los ecosistemas terrestres europeos no estarán protegidos contra la eutrofización (deposito de N).

**Ozono**: Los niveles de O<sub>3</sub> han sido constantes durante los últimos 15 años, y los episodios intensos han disminuido, no obstante siguen siendo altos.



Necesidad de planes y medidas para la mejora de la calidad del aire con el propósito de minimizar los efectos de la contaminación

# 1. Introducción

Los estados miembros de la **UNECE** a través del **LRTAP** y la creación de grupos de trabajo (**ICP**) tratan de identificar y reducir el impacto que la contaminación atmosférica tiene sobre la salud y los ecosistemas



*“Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia”*

Ambos contempla el uso de **Técnicas de modelización** para el desarrollo de planes y políticas

## Directiva 2008/50/CE

Fija los objetivos y valores límite de los contaminantes

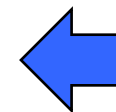
## Modelos de calidad del aire



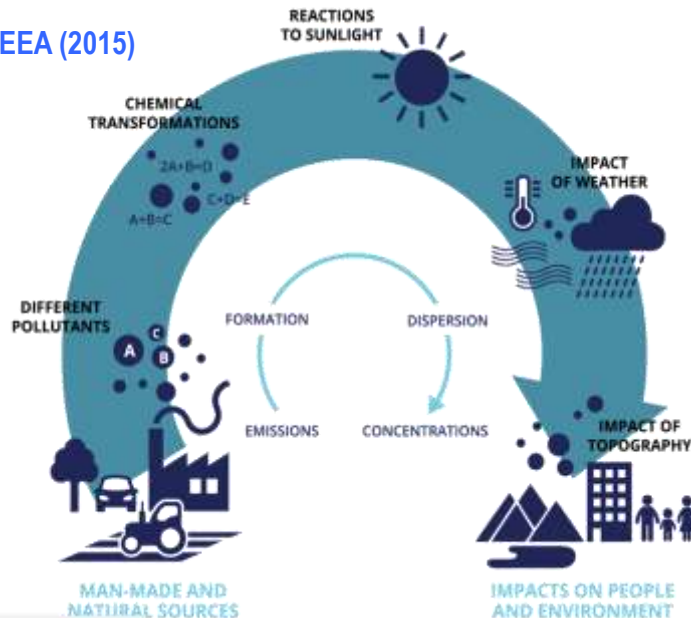
Integración de todos los procesos atmosféricos involucrados

Multi-Escala  
Multi-Contaminante

1. Emisiones
2. Meteorología
3. Química
4. Depósito



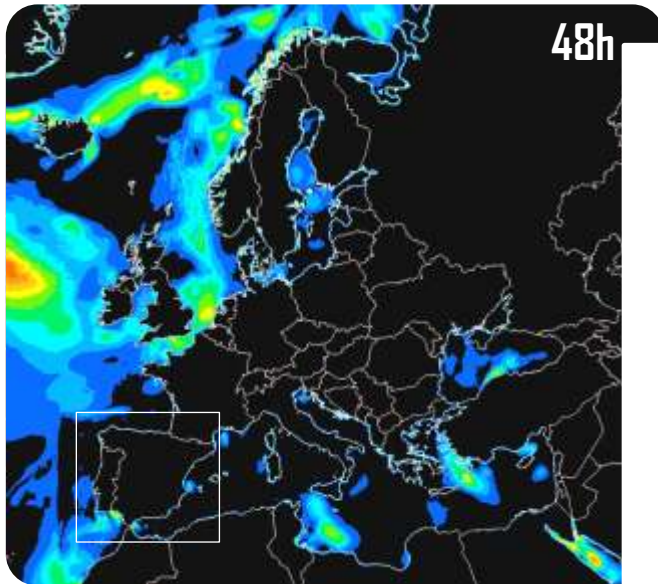
EEA (2015)



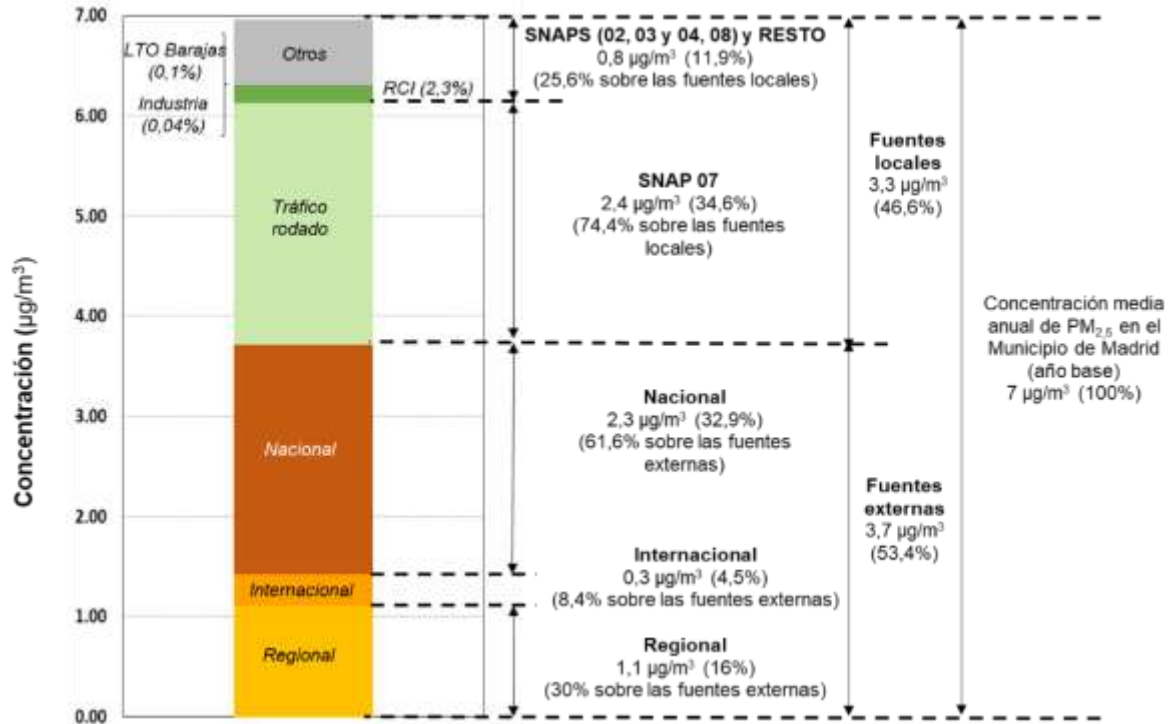


# 1. Introducción

## Aerosol Marino Europa 12 X 12 km



## Análisis de contribución de fuentes PM<sub>2,5</sub>

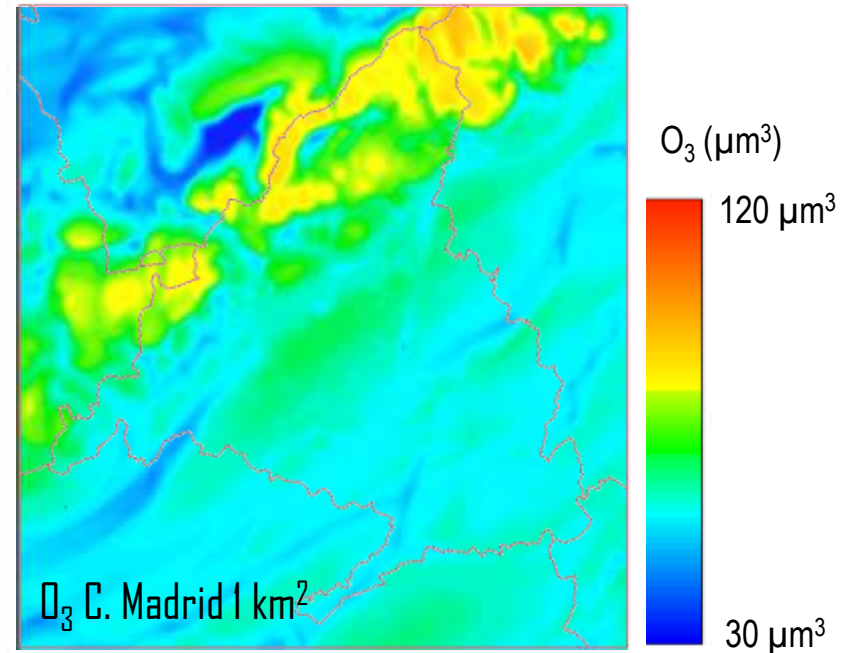
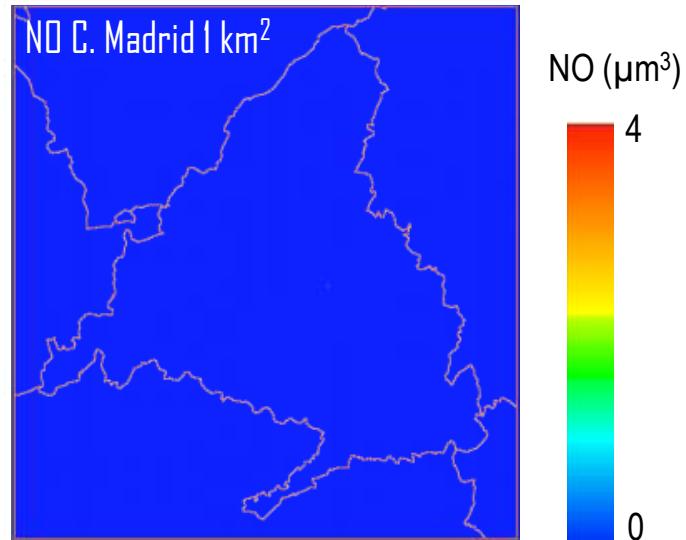
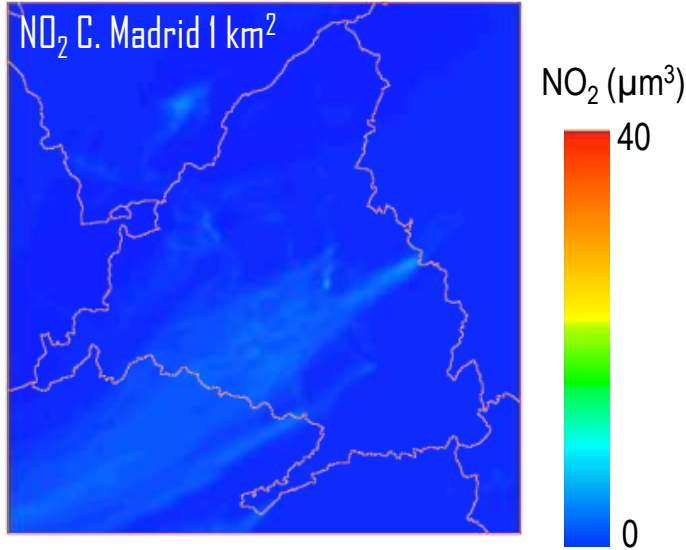


Multi-escala

# 1. Introducción

Interacción entre las distintas especies químicas.  
Ejemplo NO – O<sub>3</sub>

2016-07-14 00:00:00



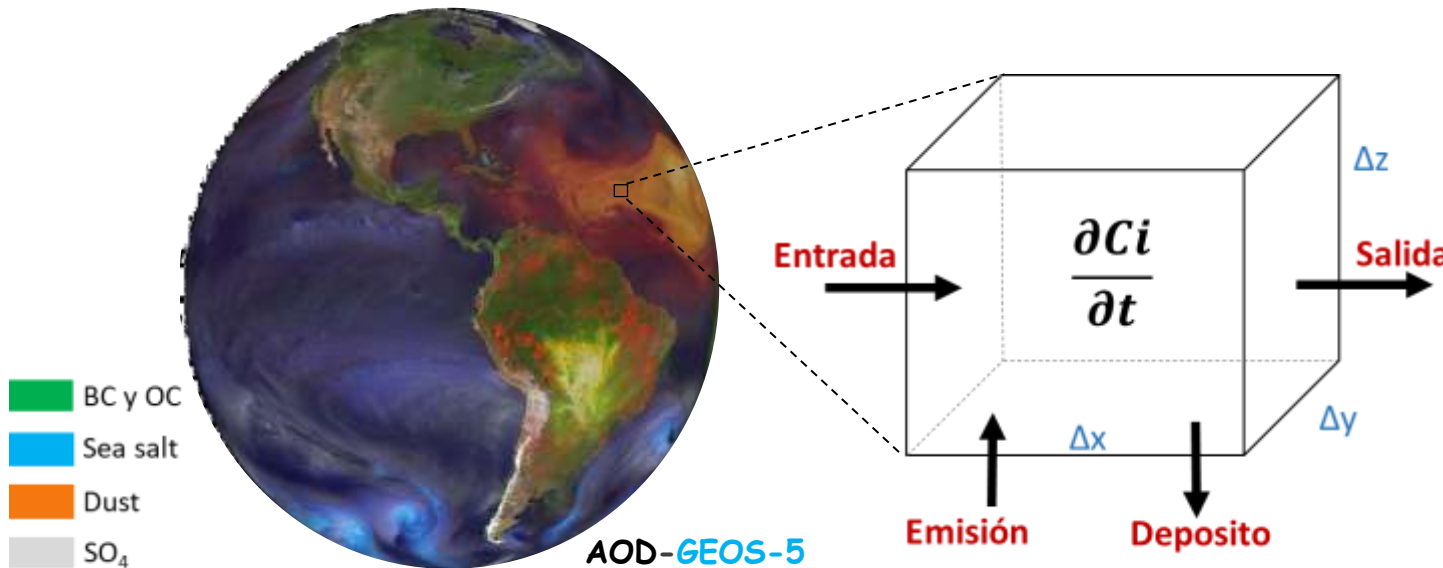
“Titraci3n”: proceso de eliminaci3n del ozono  
 $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$

Multi-contaminante

- La base conceptual de cualquier modelo de calidad del aire es la ecuación de conservación de masa, denominada **ecuación de advección-difusión**:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left[ \underbrace{\frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial C_i}{\partial y}}_{A_H} + \underbrace{\frac{\partial C_i}{\partial z}}_{A_V} \right] + \left[ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right)}_{D_H} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right)}_{D_V} \right] + R + E - D$$

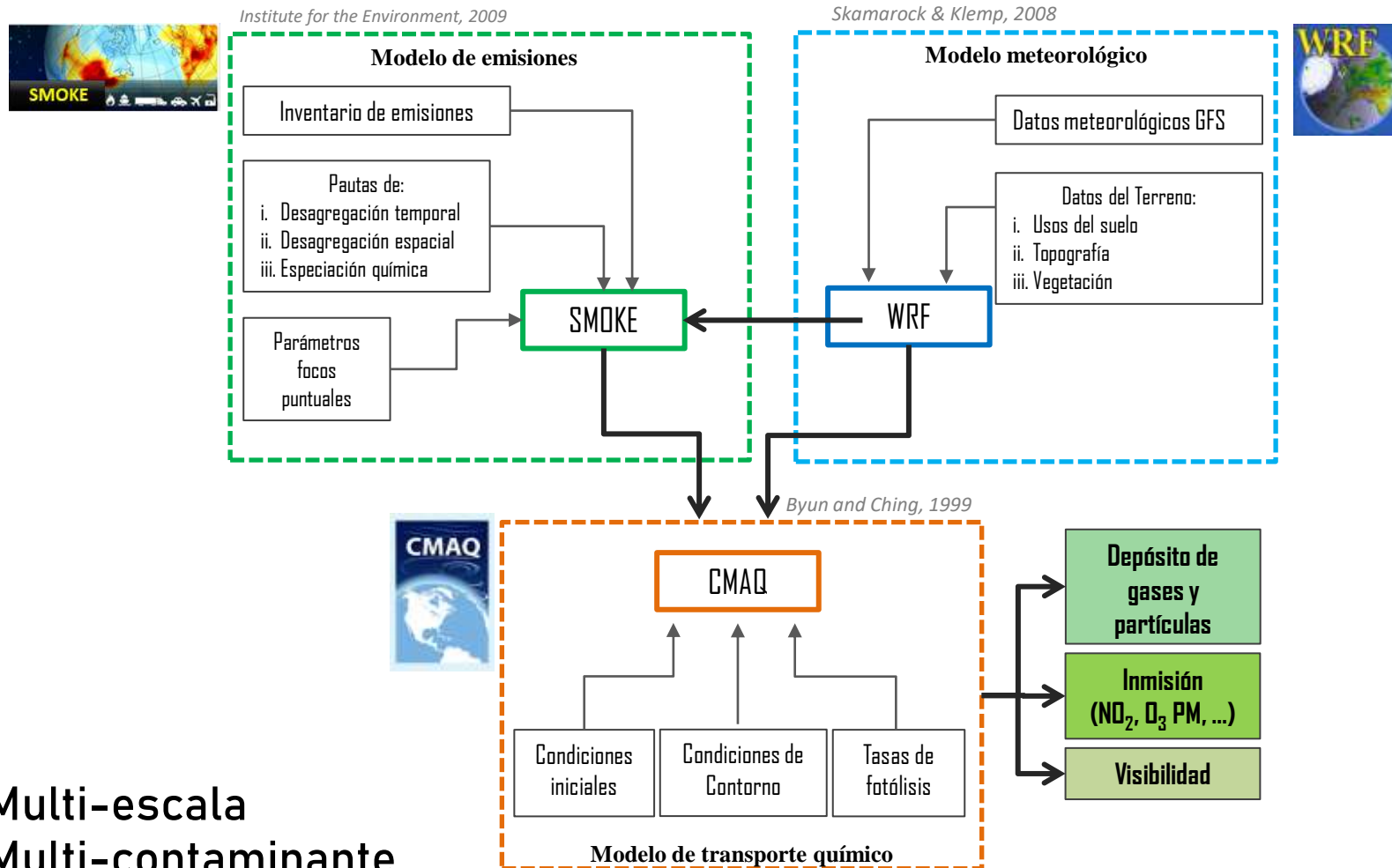
} I.C  
} B.C  
 Emisión  
 Reacción química  
 Deposito seco y húmedo



*“Integración de todos los procesos”*

- Sistema de simulación consta de tres modelos:

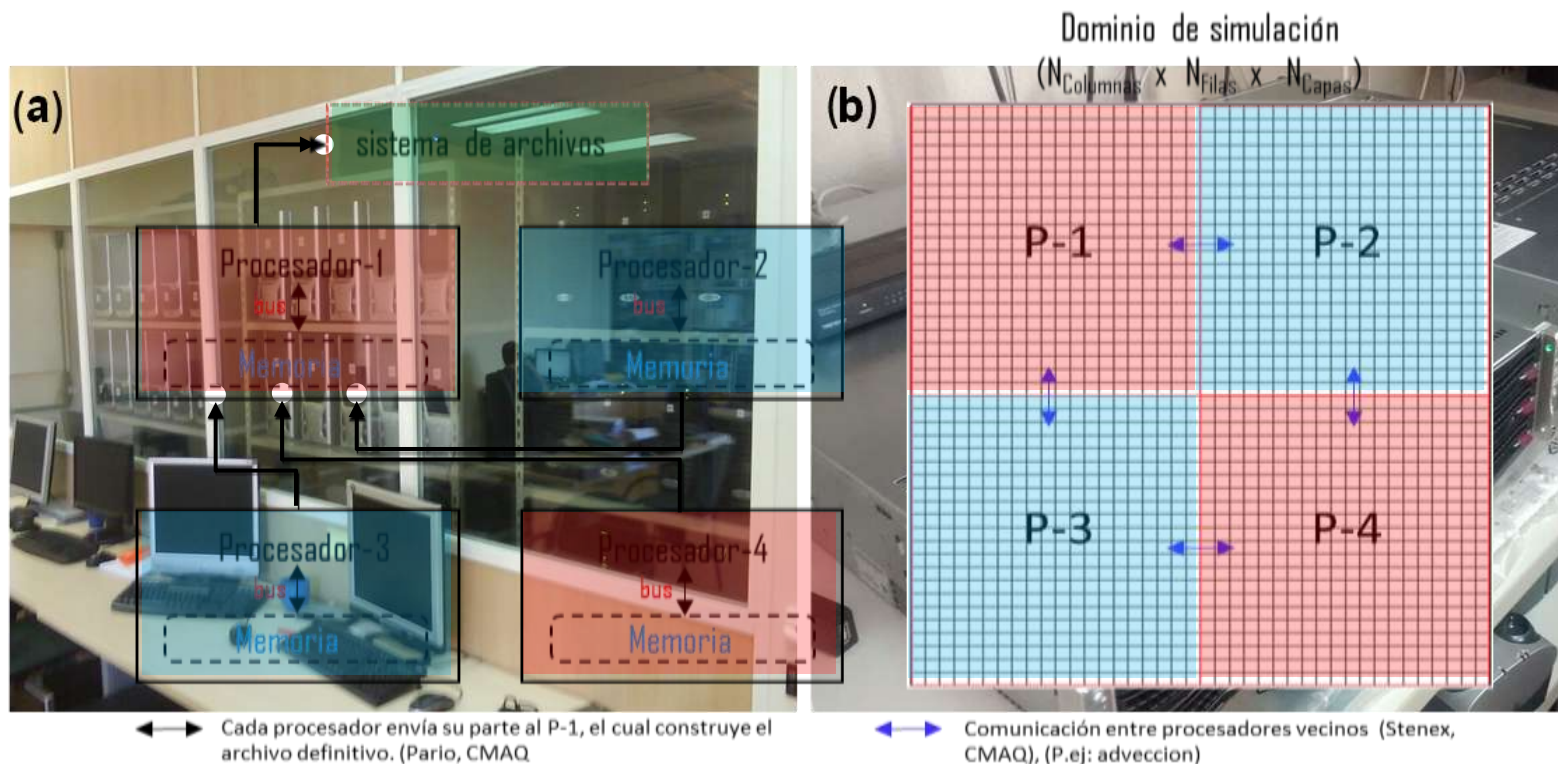
- **Modelo meteorológico – Modelo de emisiones – Modelo de Transporte químico**



**Multi-escala**  
**Multi-contaminante**

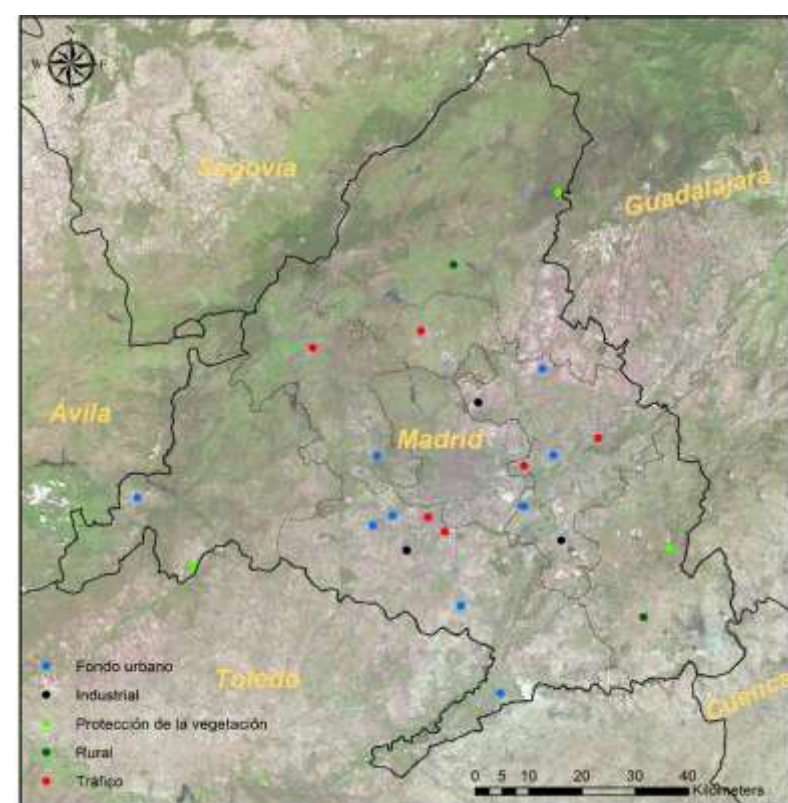


- Los tres modelos **WRF**, **SMOKE** y **CMAQ** son de código abierto
- Laboratorio de Modelización Ambiental
  - (a) 3 Clusters de 16 ordenadores (32p) y (b) 2 Clusters integrados con 8p cada uno
  - Técnicas de simulación en **paralelo**



- Ejecución del sistema de simulación de **WRF-SMOKE-CMAQ**,
- Se ejecutó **WRFv3.7.1**, julio de 2016 en la cuenca de Madrid (Campaña de O<sub>3</sub> **IDAEA-CSIC**)
- El dominio tiene **256x256** celdas y **35** niveles verticales  $\sigma$

- Se ha ejecutado el periodo del **12-18 julio de 2016** con el modelo de transporte químico **CMAQV5.2**, para el estudio de la formación de Ozono en el área de estudio
  - Las emisiones son las correspondientes al año 2015 (ultimo año disponible) con la versión de **SMOKE v3.6.5**
- 
- El mes de julio de 2016 está caracterizado por mes muy cálido (>2°C media), precipitación normal, y radiación solar normal.
  - Velocidad del viento bajas inferior a años anteriores, variando entre  $2,4 \text{ m s}^{-1}$  –  $1,6 \text{ m s}^{-1}$



- **Dirección del viento**, el modelo tiene un sesgo global 5°, y un IOA = 0.7
- **Velocidad del viento**, el modelo sobrestima ligeramente la velocidad del viento y IOA = 0.50
- **Temperatura** el modelo infraestima -0.1°C y tiene un IOA = 0.97
- En general, el modelo representa bien algunas de las variables más importantes relacionadas con la calidad del aire

**Dirección del viento**

Nombre	Tipo	n datos	MB (°)	ME (°)	IOA
El Atazar	Fondo Rural	937	-39.9	83.3	0.60
Guadalix de la Sierra	Rural	935	92.6	118.0	0.45
Orusco de Tajuña	Fondo Rural	956	-5.0	72.4	0.65
S. Martín Valdeiglesias	Rural	950	-17.6	75.8	0.68
Villa de Prado	Fondo Rural	944	40.0	72.6	0.71
Villarejo de Salvanés	Rural	958	-47.2	81.2	0.65
Algete	Suburbana	954	-7.3	55.0	0.73
Majadahonda	Suburbana	971	22.2	84.6	0.77
Rivas-Vaciamadrid	Suburbana	930	1.9	58.7	0.74
Valdemoro	Suburbana	963	12.5	55.1	0.79
Alcalá de Henares	Urbana	985	-0.7	63.9	0.71
Alcobendas	Urbana	958	-16.2	56.2	0.75
Alcorcón	Urbana	955	-19.7	51.4	0.80
Aranjuez	Urbana	936	11.8	76.0	0.70
Arganda del Rey	Urbana	940	-3.3	78.0	0.66
Collado-Villalba	Urbana	928	-26.6	94.2	0.56
Colmenar Viejo	Urbana	953	-18.8	65.4	0.71
Coslada	Urbana	925	-48.6	160.7	0.24
Fuenlabrada	Urbana	960	-4.2	48.9	0.80
Getafe	Urbana	948	-13.3	55.5	0.77
Leganés	Urbana	949	-21.2	56.9	0.78
Móstoles	Urbana	966	-8.5	53.5	0.78
Torrejón de Ardoz	Urbana	930	-11.6	58.3	0.75
<b>TOTAL</b>		<b>21831</b>	<b>-5.6</b>	<b>72.7</b>	<b>0.69</b>

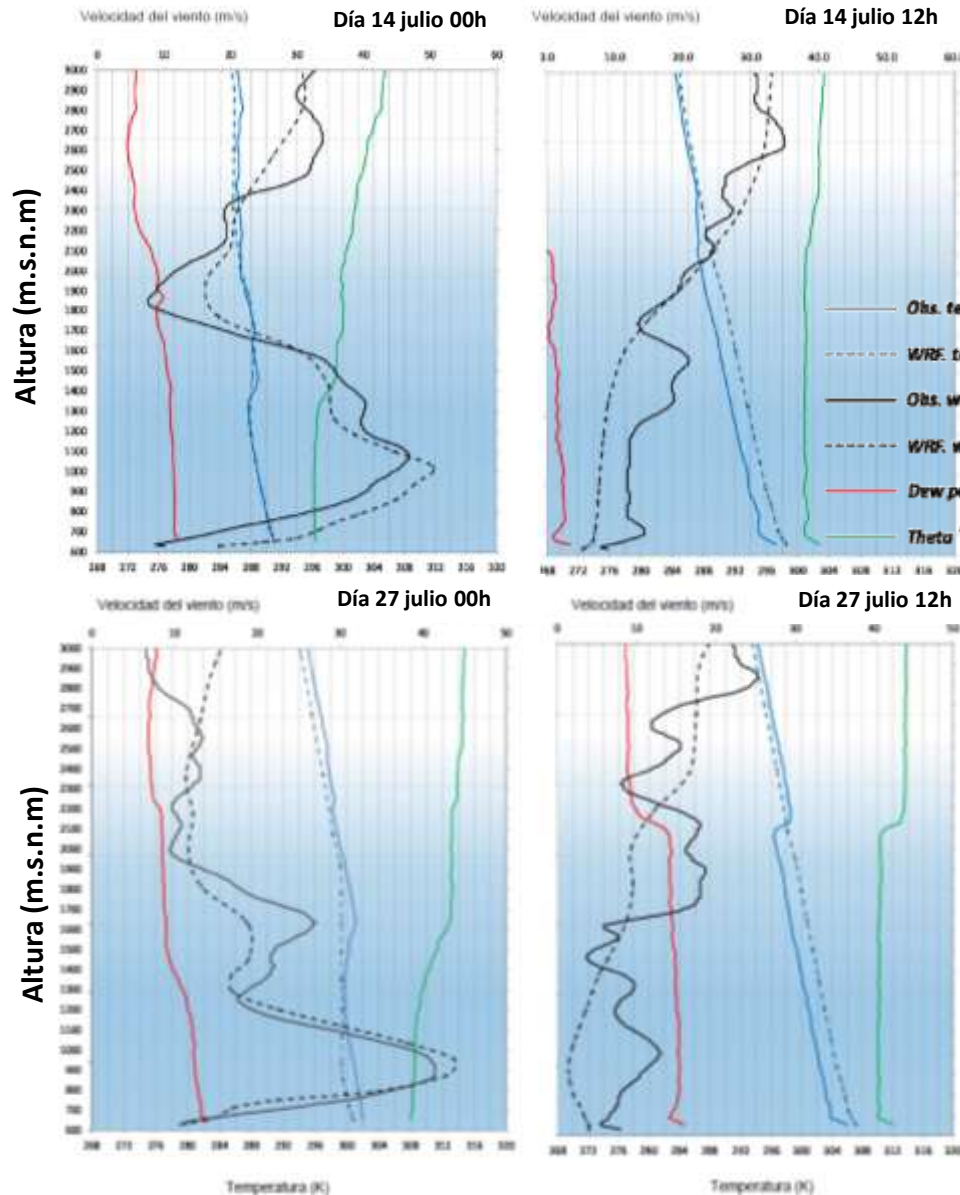
**Velocidad del viento**

MB (m/s)	ME (m/s)	IOA
1.3	1.7	0.47
1.6	1.7	0.56
1.1	1.8	0.71
1.9	2.0	0.48
1.8	2.1	0.52
2.5	2.6	0.32
2.0	2.2	0.55
0.3	1.3	0.64
0.8	1.4	0.65
2.5	2.5	0.37
1.5	1.6	0.46
1.2	1.4	0.59
1.6	1.7	0.46
1.8	1.9	0.42
1.8	2.0	0.49
1.0	1.3	0.63
1.4	1.6	0.54
1.9	1.9	0.36
1.2	1.5	0.46
1.9	1.9	0.34
2.0	2.0	0.32
1.9	1.9	0.39
1.2	1.4	0.59
1.6	1.8	0.50

**Temperatura**

MB (°C)	ME (°C)	IOA
0.7	1.2	0.97
-1.4	2.3	0.94
-0.6	1.3	0.97
-1.2	1.5	0.96
-0.3	1.4	0.97
-1.2	1.5	0.96
-1.3	1.6	0.96
0.4	1.0	0.98
0.3	1.2	0.98
-0.3	1.0	0.98
0.8	1.5	0.97
0.3	1.1	0.98
0.3	0.9	0.98
1.4	1.9	0.95
-0.7	1.3	0.97
0.5	1.8	0.94
0.0	1.0	0.98
-0.3	1.3	0.97
0.5	1.1	0.98
0.4	1.0	0.98
0.2	1.1	0.98
-0.3	1.1	0.98
-0.9	1.5	0.97
-0.1	1.3	0.97





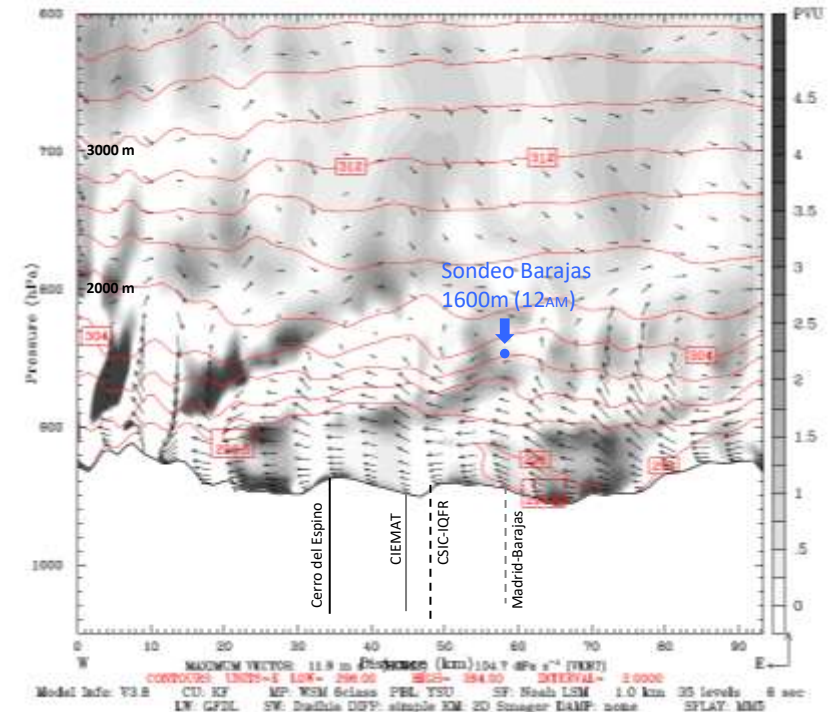
- Sondeo vertical en barajas a las 00h y 12h (local) para los días 14 y 27 julio de 2016
- Evaluación del modelo de la velocidad del viento y la temperatura en altura
  - A primera hora del día (00h) el modelo representa muy bien los cambios de velocidad del viento con la altura. Aunque sobrestima en superficie, especialmente el 14 julio
  - En cuanto a la temperatura el modelo representa bien su tendencia infraestimando ligeramente
  - A las 12h, Al modelo le cuesta más pronosticar ambas variables debido a procesos convectivos.
  - El modelo infraestima ligeramente la VV en superficie, pero en altura consigue seguir la tendencia.
  - En cuanto a la temperatura el modelo sobrestima ligeramente



Perfil transversal E-W

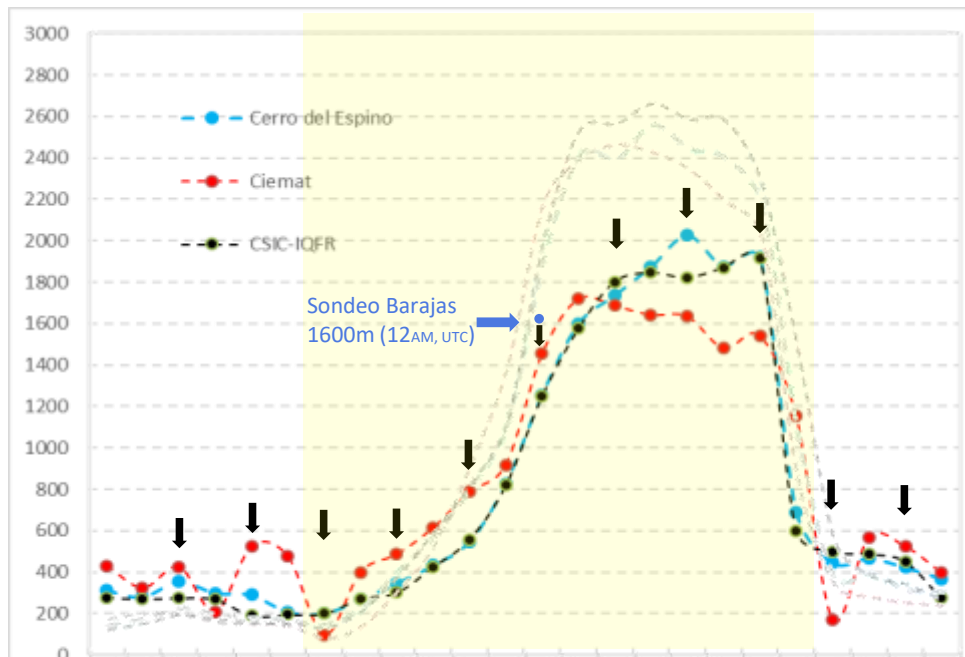
Día 14 julio

Fcst: 480.00 h      Valid: 0000 UTC Fri 15 Jul 16 (0200 LST Fri 15 Jul 16)  
 Potential vorticity      XY= 88.0.129.0 to 181.0.120.0  
 Potential temperature      XY= 88.0.129.0 to 181.0.120.0  
 Circulation vectors      XY= 88.0.129.0 to 181.0.120.0



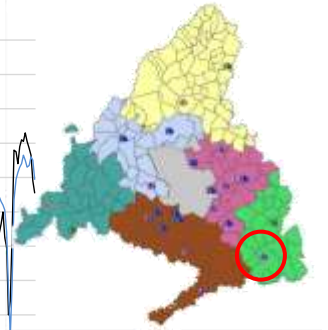
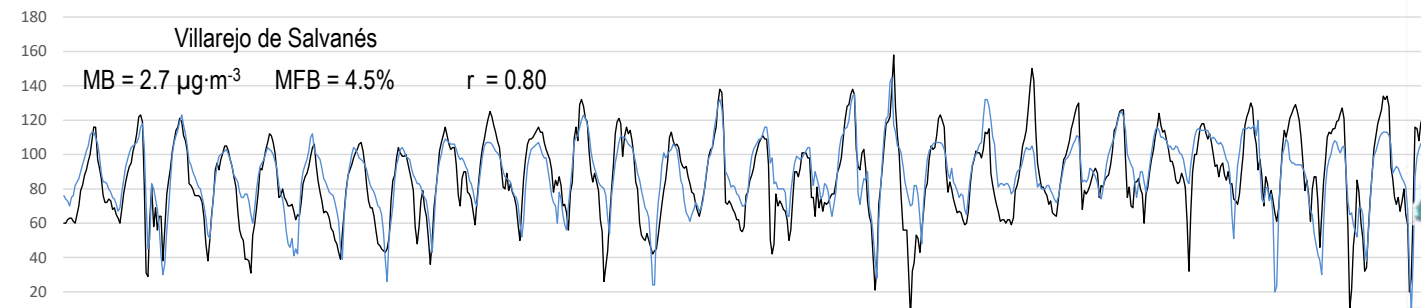
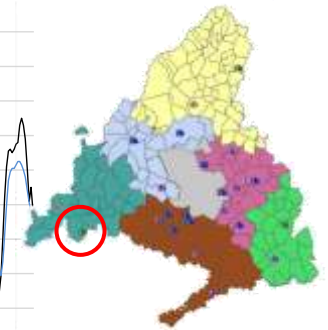
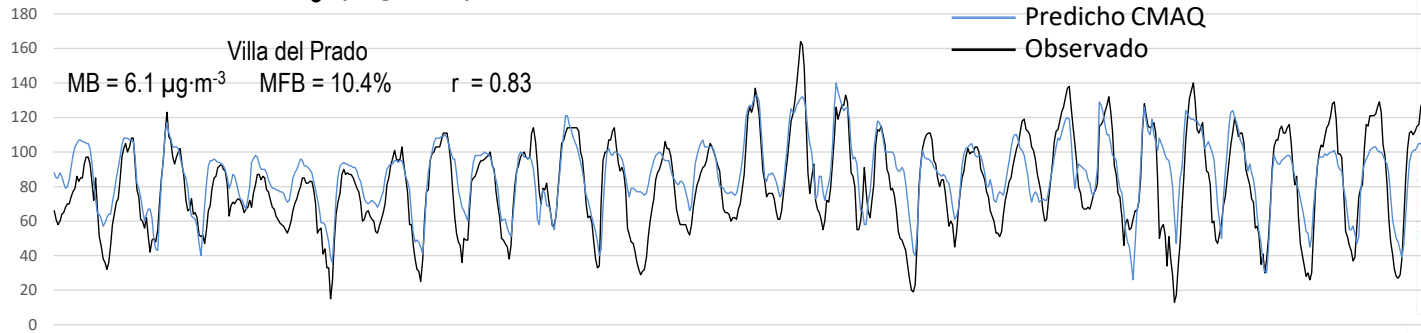
- La simulación realizada para el mes de julio de 2016 con una resolución de 1 km<sup>2</sup> indica que el modelo WRF es capaz de **reflejar razonablemente la dinámica atmosférica y puede usarse para investigar fenómenos meteorológicos**, y puede ayudar a explicar fenómenos de transporte de contaminantes a escala local - regional y continental

Altura de la capa mezcla día 14 de julio y el promedio diario durante la campaña

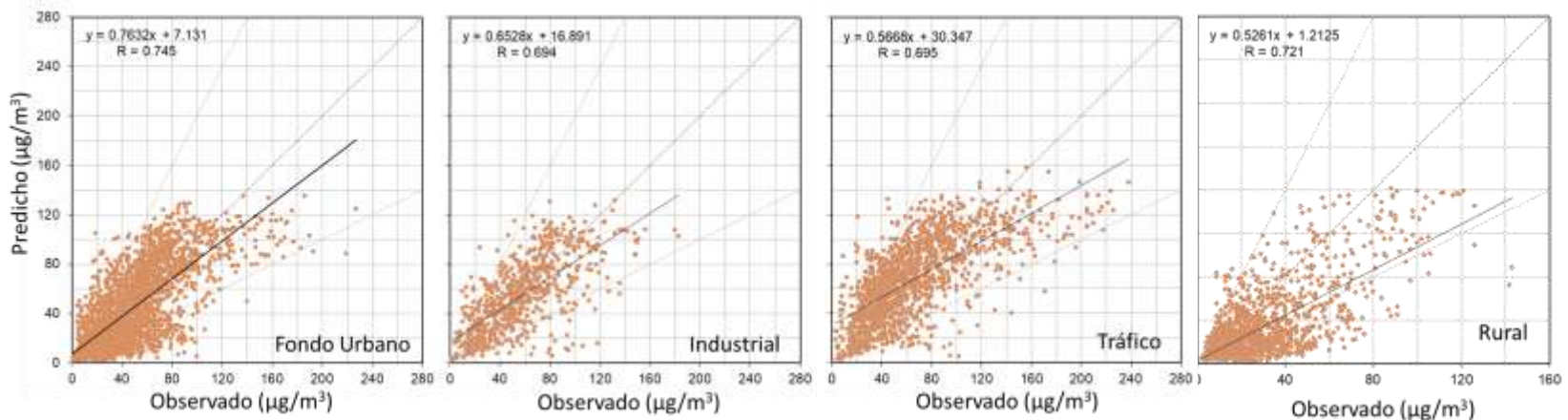




■ Series temporales O<sub>3</sub> (μg·m<sup>-3</sup>)



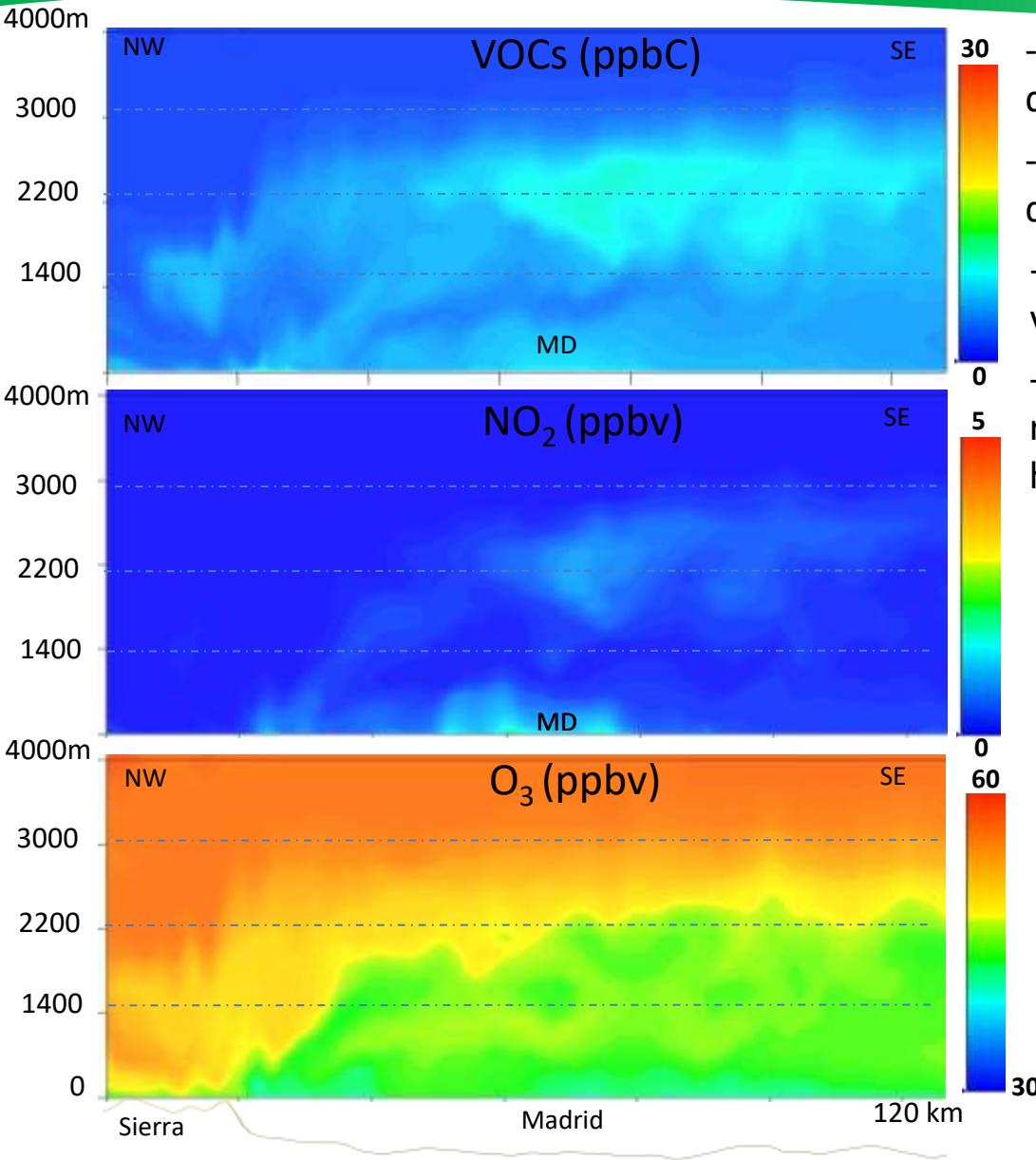
■ Diagrama de dispersión NO<sub>2</sub> (μg·m<sup>-3</sup>)



# 3. Modelización regional (Madrid) de alta resolución

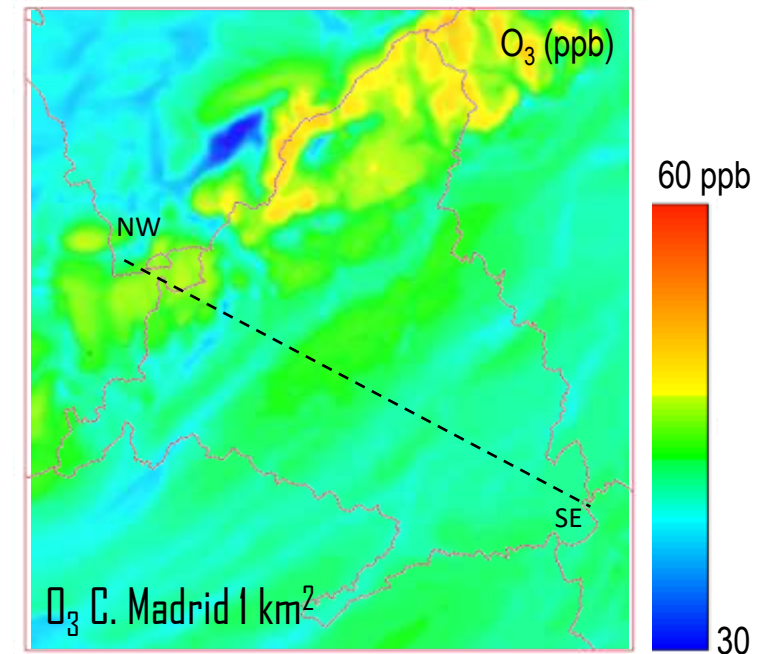


## Simulación calidad del aire



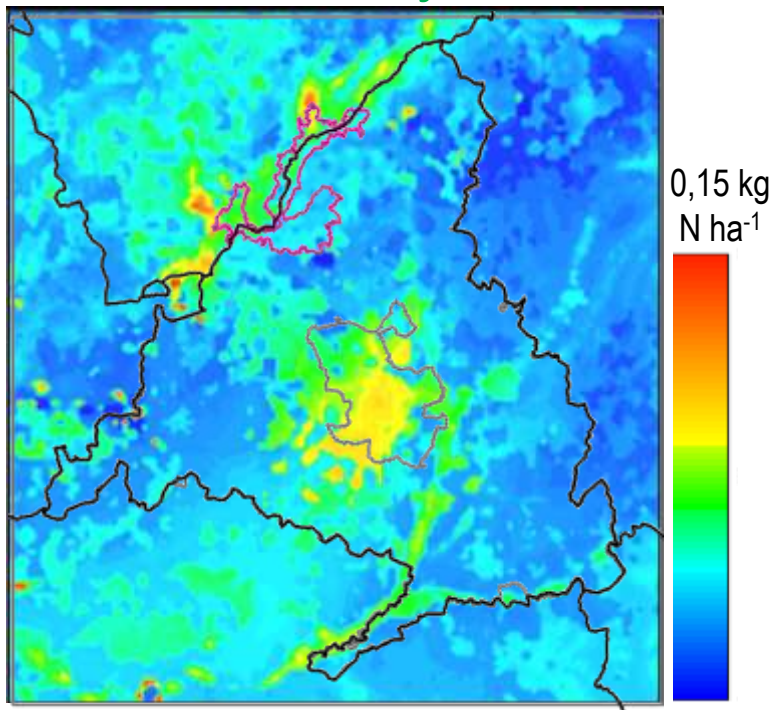
- **8:00h** Emisiones de VOCs y NO<sub>x</sub> en el centro de la ciudad. Titración Ozono.
- **12:00 h** Elevación de PBL, transporte vertical de precursores en altura. Formación de O<sub>3</sub>
- **18:00 h** Máxima PBLH (2000m), transporte vertical de precursores. Formación O<sub>3</sub> en altura
- **20:00 h** Caída de la PBL, formación de capas residuales de O<sub>3</sub> y precursores que se desplazan hacia el ESTE en altura, pueden fumarig superfr

2016-07-14 00:00:00 UTC

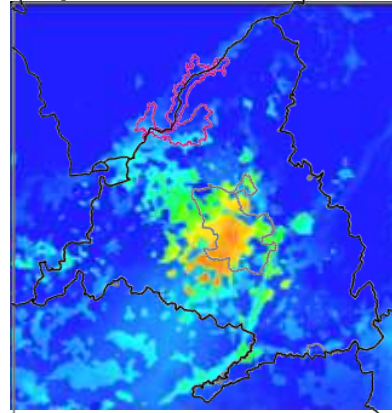


- **El deposito de N** produce perdidas en la biodiversidad, eutrofización de aguas y suelos, acidificación
- Este tipo de modelos permiten calcular el **deposito seco y húmedo de N** (oxidado y reducido) y de otras especies (gaseosas y partículas), con el objetivo de cuantificar la exposición
- Las **distintas formas del N**, con propiedades físicas y químicas generan un impacto distinto.

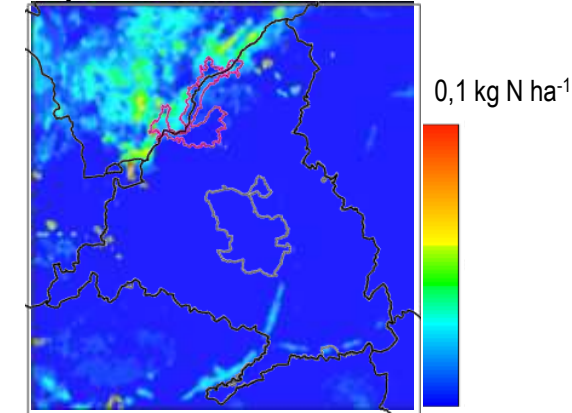
**Periodo 12-18 de julio 2016**



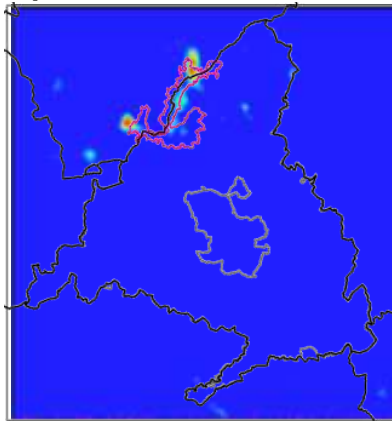
Deposito seco N Oxidado



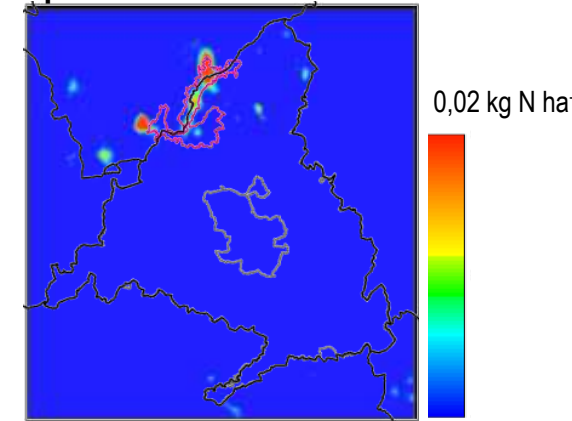
Deposito seco N Reducido



Depósito húmedo N Oxidado

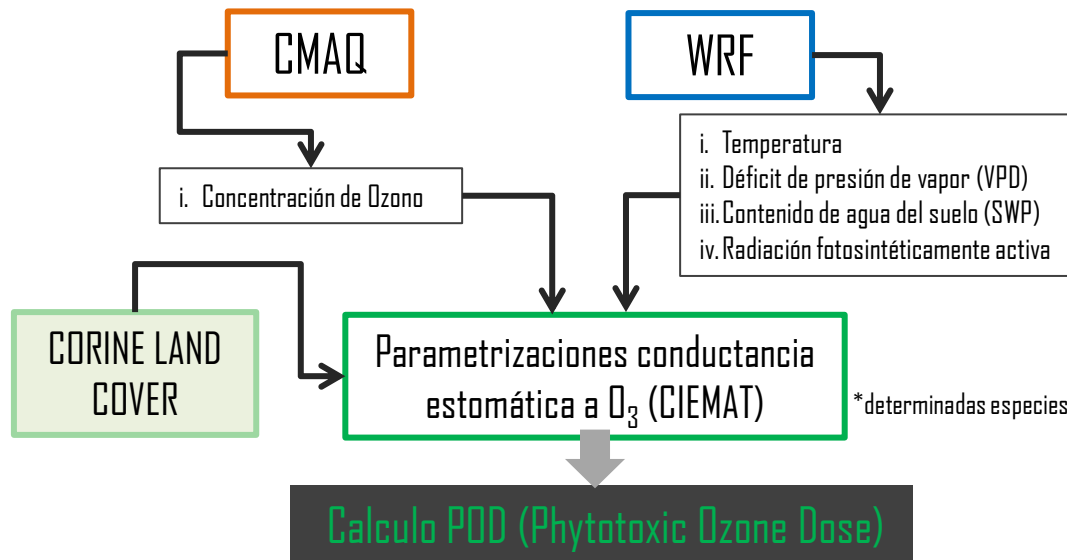
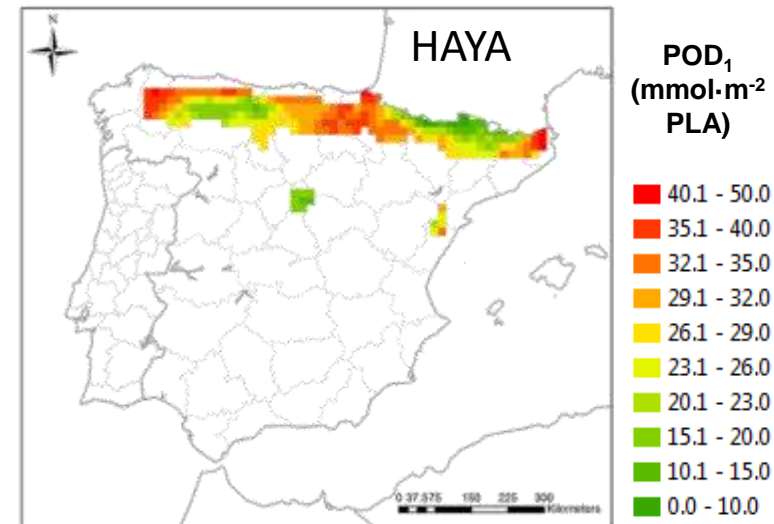
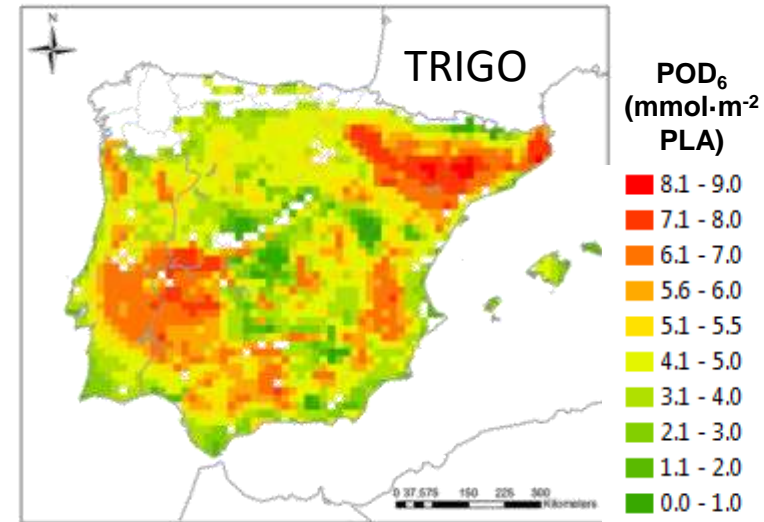


Deposito húmedo N Reducido





- Este tipo de modelos nos puede ayudar a evaluar los daños en la vegetación y en los cultivos asociado a **altos niveles de concentración de  $O_3$**
- Estimación de los niveles críticos basados en exposición (**AOT40**) y en flujos de ozono (**POD<sub>Y</sub>**) Phytotoxic Ozone Dose.
- Se ha desarrollado un modulo de efectos en ecosistemas junto con el **CIEMAT** basado en flujos de ozono



Nos permite evaluar el riesgo y cuantificar el efecto del  $O_3$  sobre la vegetación

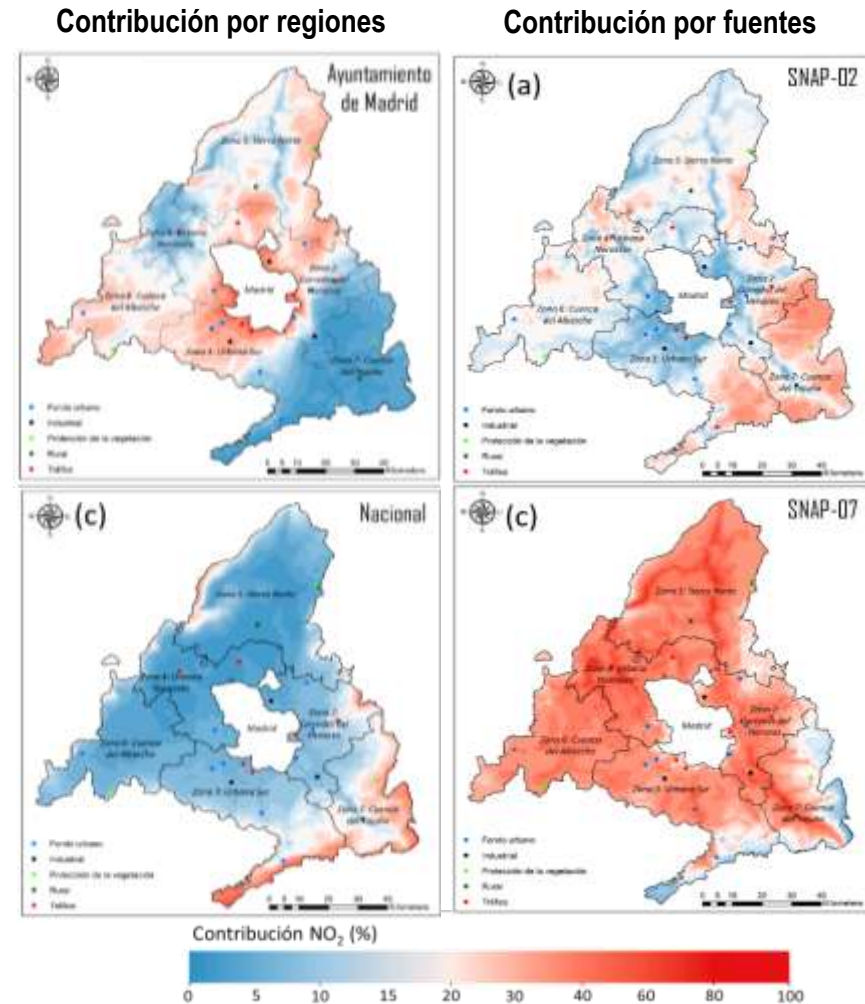
- Este tipo de modelos nos permite evaluar que actividad y/o región es la responsable de niveles altos de concentración mediante un **análisis de contribución de fuentes**
- También se puede realizar un **análisis de procesos** (advección, difusión, química gaseosa, emisión primaria, deposición, etc.) de las concentraciones modelizadas
- También se puede **evaluar la evolución química de las especies**, lo que permite evaluar también el origen de los contaminantes secundarios (Ozono)



Todas estas herramientas de diagnóstico nos permite determinar cuales son las fuentes, regiones y/o procesos responsables de la contaminación

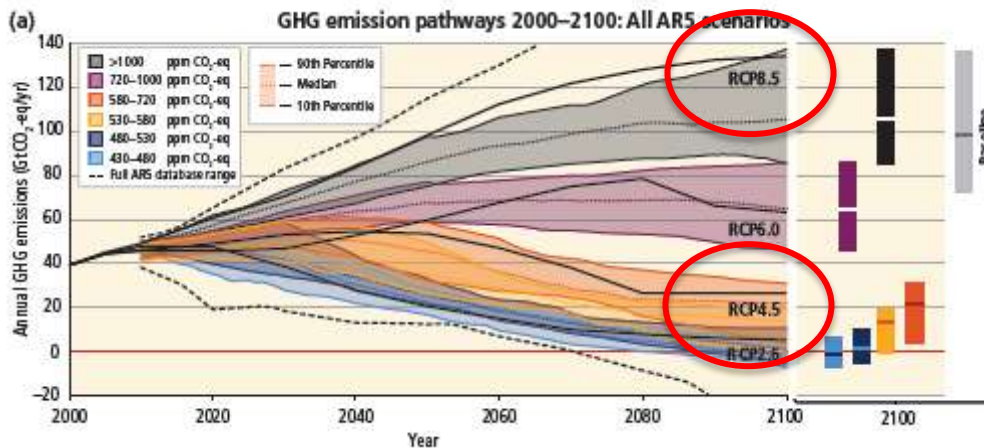


Nos puede ayudar a definir y desarrollar planes, políticas y estrategias de reducción





- Procedimiento de ***Dynamical Downscaling***, acoplamiento de un **Modelo Climático Global (GCM)** al sistema de simulación de la calidad del aire WRF-SMOKE-CMAQ
- En el siguiente ejemplo se ejecutaron (WRF/CMAQ) dos de las trayectorias mas probables de cambio climático **RCP4.5 y RCP8.5 para el año 2050**
- Se ejecutaron dos meses uno representativo invierno (Enero) y uno de **verano (agosto)**
- Lo resultados se compararon con un **escenario base 2007**
- Se utilizaron las mismas emisiones



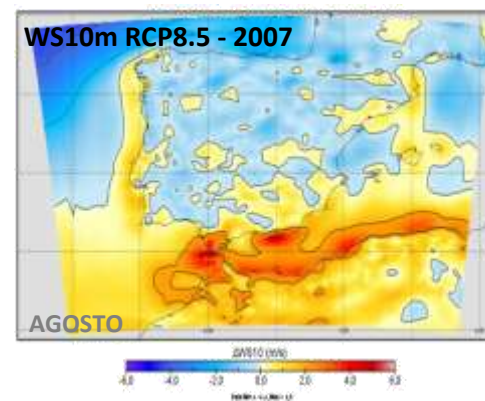
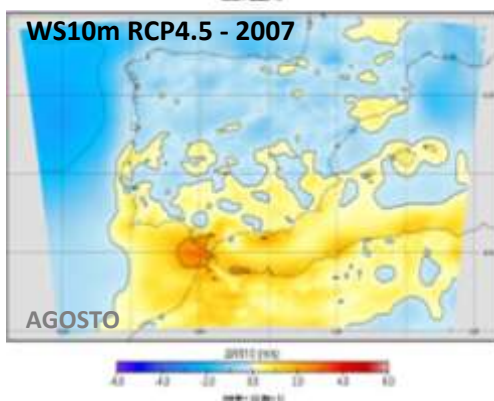
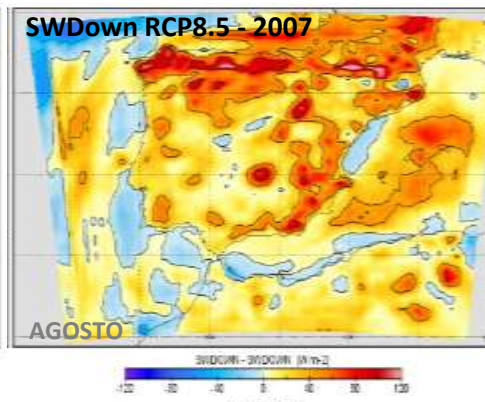
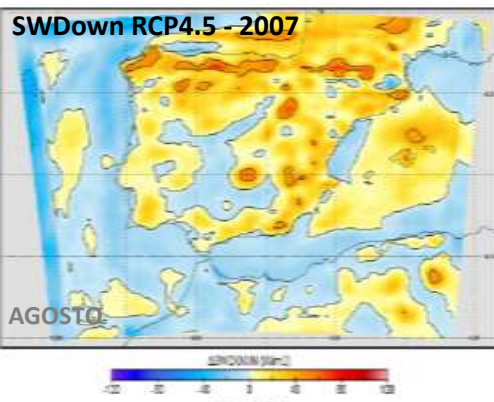
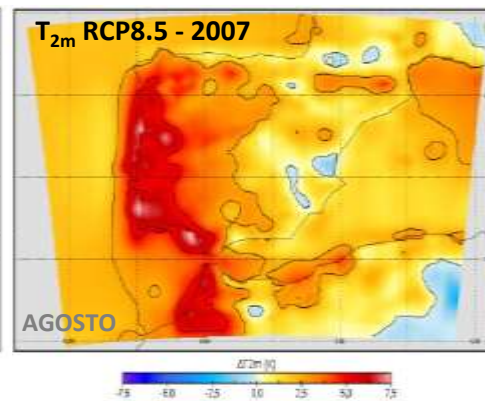
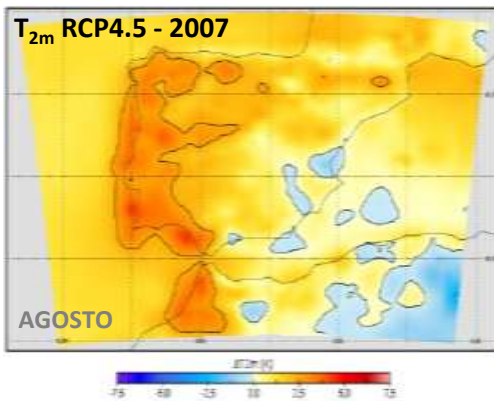
IPCC Fifth Assessment Report (AR5)

- Se analizaron variables relacionadas:
  - Meteorología:** Temperatura, precipitación, viento, PBLH y radiación
  - Calidad del aire:** O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>

# 3. Estudio troposférico en Madrid

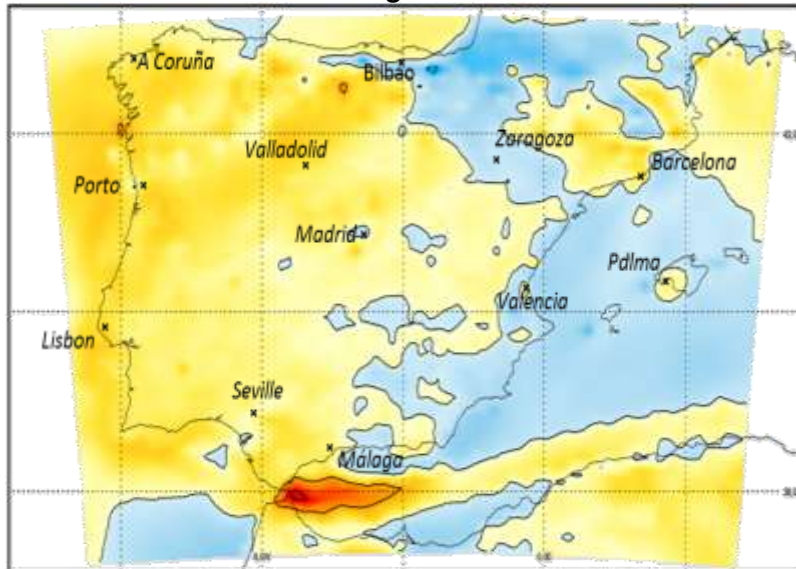
*Cambio climático*

- Temperatura:** el aumento para 2050 es más acusado en la mitad oeste. Para el caso **RCP8.5** los aumentos son de **5 a 7 °C** en toda la zona atlántica. Para el caso del **RCP4.5** se describe un patrón similar, con un aumento más moderado, de **3 °C**
- Radiación:** aumento generalizado de la radiación onda corta, más acusado en la mitad norte y zona mediterránea. **RCP8.5** con aumentos de **100-120 Wm<sup>-2</sup>**. Para **RCP4.5** el aumento es menor, disminuye en la región suroeste de la península
- WS a 10 m:** Las variaciones más grandes se dan en torno al estrecho y costa atlántica. Para el caso **RCP8.5** los aumentos son de **2 a 4 m s<sup>-1</sup>**. Para **RCP4.5** aumento mas moderado **1 m s<sup>-1</sup>** En el resto de la península disminuye ligeramente la velocidad del viento

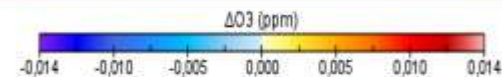
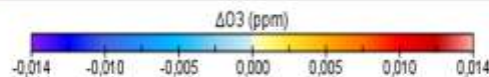
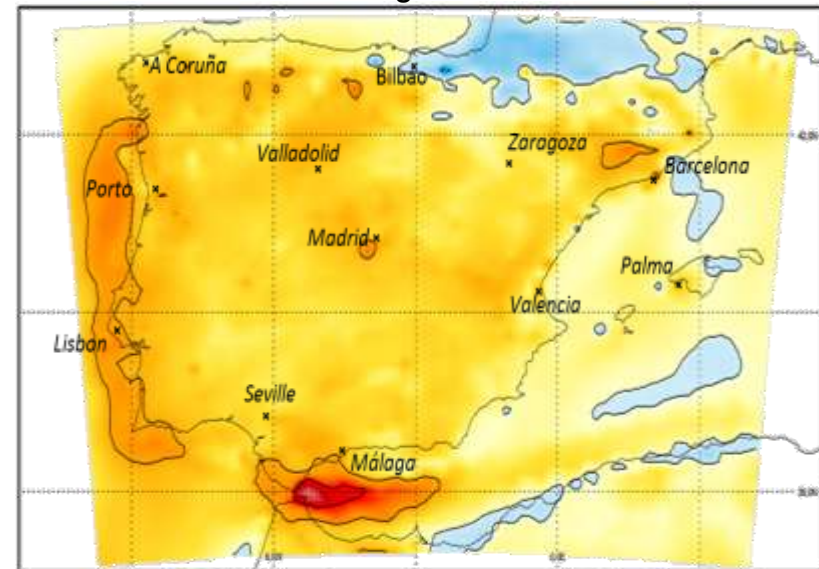


- Ozono:** Durante el mes de agosto se produce un aumento generalizado de los niveles de concentración de  $O_3$ , especialmente en el **RCP8.5**, donde el aumento como promedio en todo el dominio es de  $10 \mu\text{gm}^{-3}$ . En la trayectoria **RCP4.5**, el modelo predice menos Ozono

RCP4.5 – 2007 Average Concentration. Summer



RCP8.5 – 2007 Average Concentration. Summer



- Estas técnicas **Dynamical Downscaling** nos ayudan a comprender el impacto del clima en la meteorología y su influencia sobre los fenómenos de contaminación atmosférica local y regional



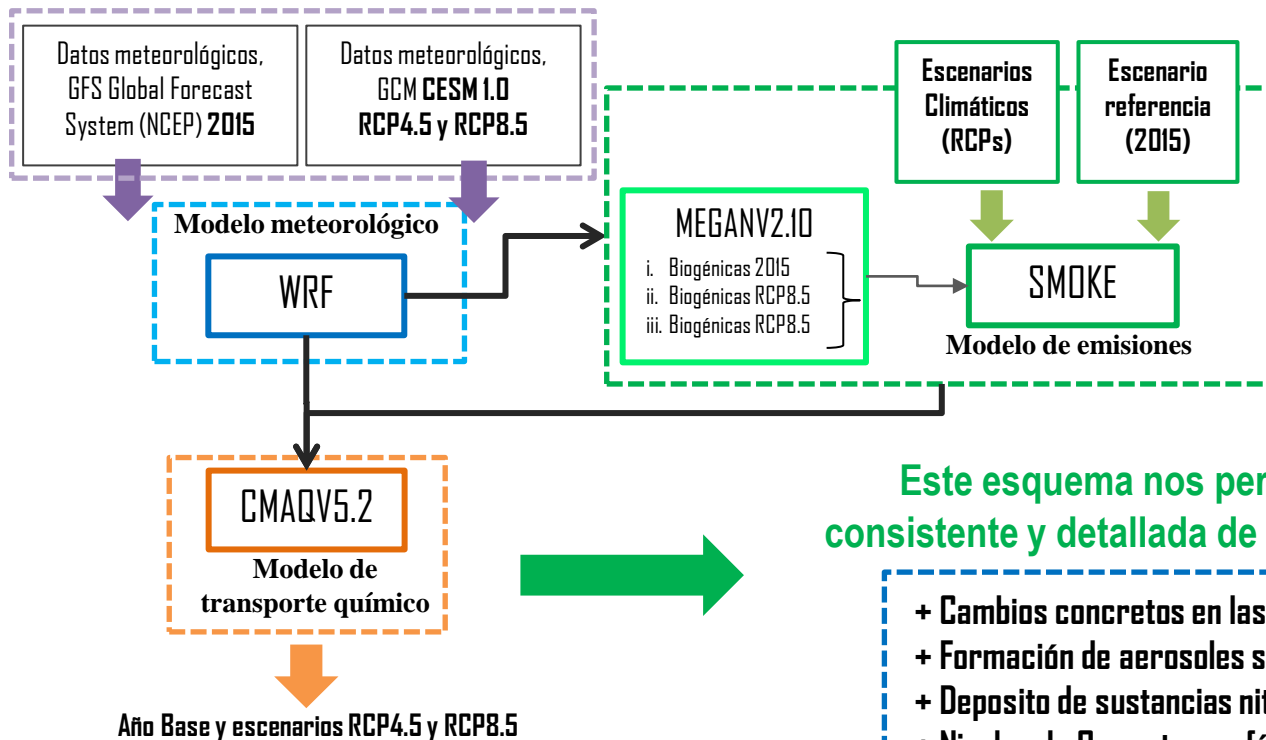
- La simulación realizada para el **mes de julio de 2016** indica que el modelo **WRF** es capaz de reflejar razonablemente la dinámica atmosférica y puede usarse para investigar fenómenos meteorológicos
- El modelo de transporte químico **CMAQ** captura razonablemente bien las tendencias de  $O_3$  y  $NO_2$  así como procesos de transporte complejos y la química atmosférica.
- Este tipo de modelos nos puede ayudar a evaluar los daños sobre la vegetación y en los cultivos asociado a altos niveles de concentración de  $O_3$  y el calculo del deposito de N y S sobre los distintos ecosistemas y bajo distintos escenarios de cambio climático
- Estos **sistemas de simulación** nos permite analizar, identificar y cuantificar todos los procesos involucrados en la contaminación atmosférica, ayudando a establecer **estrategias y planes** para reducir sus efectos dañinos sobre la salud y los ecosistemas

- Este tipo de modelos nos permite conocer la **influencia del cambio climático** sobre la meteorología, la calidad del aire y los efectos sobre la calidad ambiental de los distintos ecosistemas



## ACOPLAMIENTO GCM - RCM - MODULO EFECTOS ECOSISTEMAS

## Red de Parques nacionales



Este esquema nos permite tener una representación consistente y detallada de como el cambio climático afecta a:

- + Cambios concretos en las tasas de emisión de COV biogénicos
- + Formación de aerosoles secundarios
- + Deposito de sustancias nitrogenadas y azufre
- + Niveles de Ozono troposférico
- + Efectos sobre la vegetación



# Gracias por su atención

[dpaz@etsii.upm.es](mailto:dpaz@etsii.upm.es)

