

# Interacciones multiescalares entre la estructura urbana y la atmósfera en el contexto de cambio climático (MULTIURBAN)

B. Sanchez<sup>1</sup>, J.L. Santiago<sup>1</sup>, **E. Rivas**<sup>1</sup>, C. Yagüe<sup>2</sup>, M. Sastre<sup>2</sup>, A. Martilli<sup>1</sup>, F. Martin<sup>1</sup>, S. German<sup>3</sup>, A. Boso<sup>3</sup>, C. Oltra<sup>3</sup>, M. Sánchez<sup>4</sup>, D. Argüeso<sup>5</sup>, R. Monjo<sup>6</sup>, D. Roye<sup>6</sup>, V. Cicuéndez<sup>7</sup>, P. Ortiz-Corral<sup>2</sup>, G. Maqueda<sup>2</sup>, R.M. Inclán<sup>1</sup>, S. Viana<sup>8</sup>, J. Carbone<sup>2, 9</sup> & C. Román-Cascón<sup>9</sup>

1 Unidad de Modelización Atmosférica, Departamento de Medio Ambiente, CIEMAT.

2 Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Universidad Complutense de Madrid.

3 Centro de Investigaciones Sociotécnica, Departamento de Medio Ambiente, CIEMAT.

4 Real Jardín Botánico, Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

5 Departamento de Física, Universitat de les Illes Balears.

6 Fundación para la investigación del Clima.

7 Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

8 Área de Modelización. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

9 Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, CEIMAR, Universidad de Cádiz



MULTIURBAN

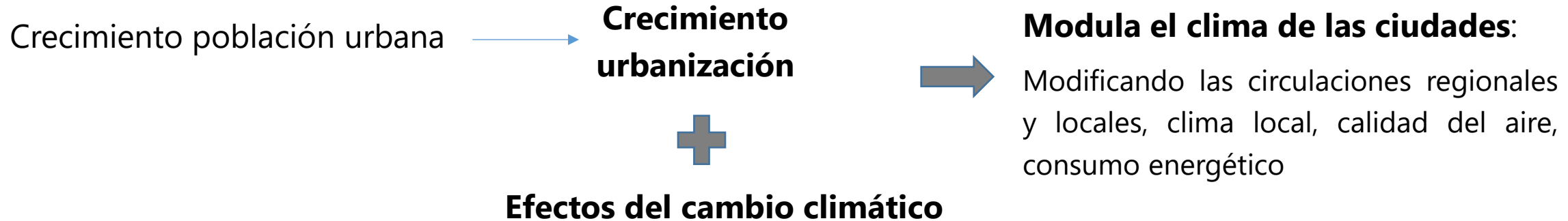
(PID2023-149246OB-C21 y PID2023-149246OB-C22).

Proyecto coordinado. “Proyectos de Generación del Conocimiento 2023

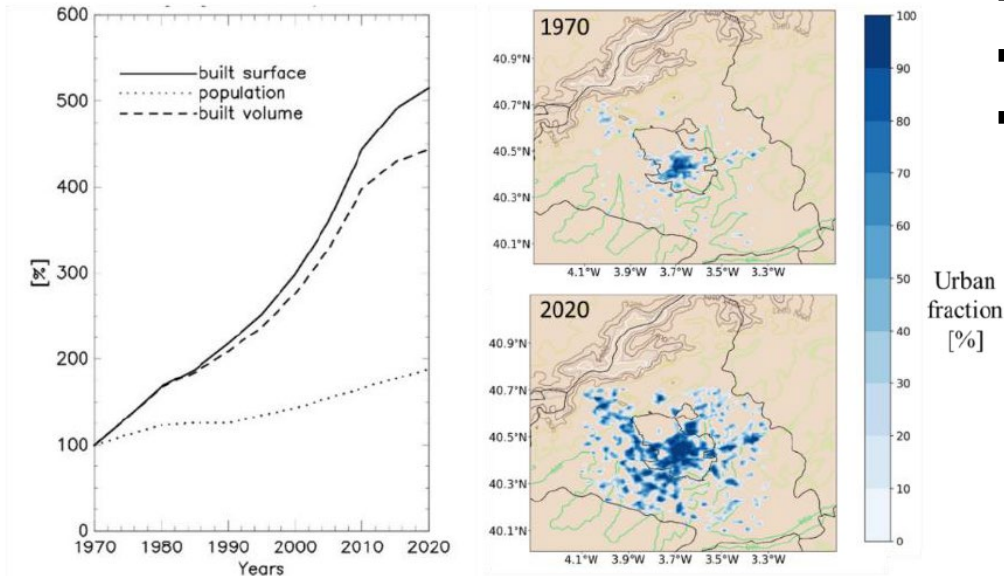
# Introducción



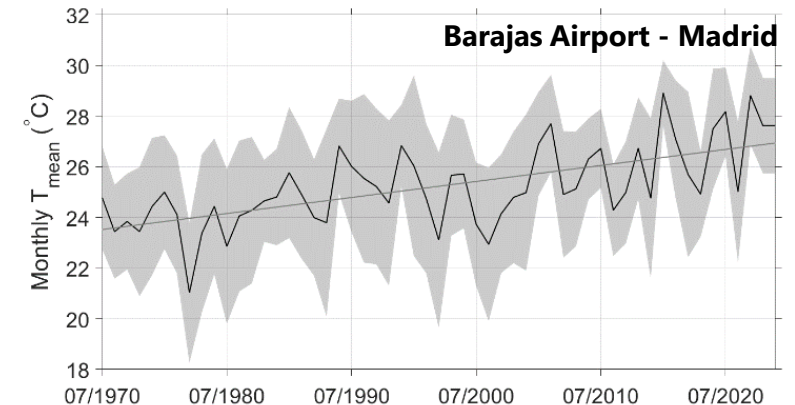
- Actualmente, más del 50 % población vive en ciudades.



- Madrid (1970-2020):



- Doble de población
- Área urbanizada ha crecido un factor 5
- Durante periodo de verano, temperatura media en julio ha crecido alrededor de 2°C en estación del Aeropuerto de Barajas.



# Objetivo del proyecto coordinado



***¿Cuál es el impacto de los cambios en la estructura urbana sobre las circulaciones mesoescalares y el microclima urbano en condiciones de clima pasado, presente y futuro?***

**Objetivo general:** proporcionar una mejor comprensión de los mecanismos responsables de los impactos de la estructura urbana sobre las circulaciones regionales y el microclima en Madrid, desde un enfoque de investigación multiescalar y en el contexto del cambio climático.

Se abordará desde una perspectiva multidisciplinar usando observaciones y modelización meteorológica a meso- y microescala combinado con estudios sociológicos que permiten comprender los impactos de estos procesos físicos sobre exposición y vulnerabilidad de la población al calor.

# **MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global**

**MULTIURBAN-I** investigará, mediante **modelización numérica a distintas escalas**, tanto la interacción entre la atmósfera y la estructura urbana, como las implicaciones de las **infraestructuras verdes** en el **clima local** y en el **confort térmico** de la población en el contexto del cambio climático.

## Primer objetivo:

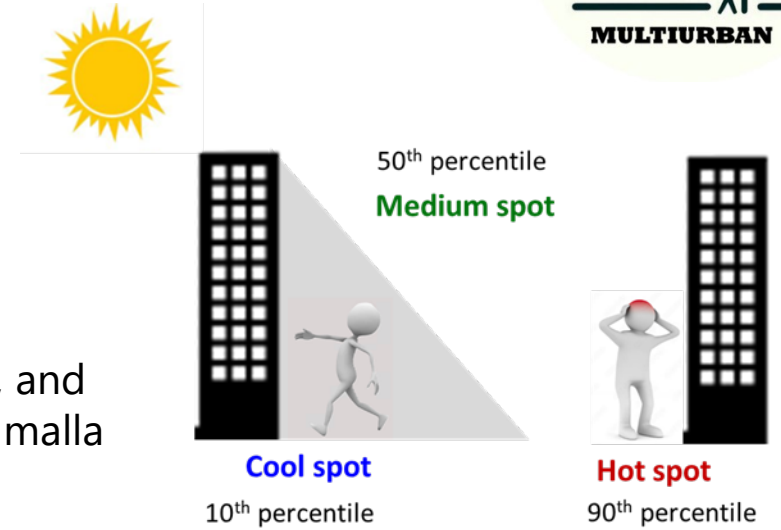
Cómo ha afectado la expansión urbana y la variabilidad del clima al estrés térmico de la población de las últimas décadas?

# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## Impacto de la expansión urbana en la temperatura y confort térmico

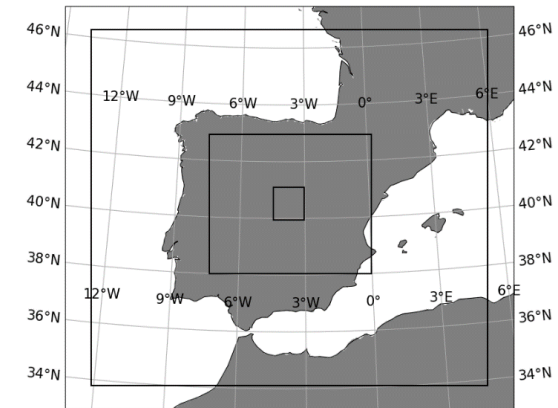
- Weather, Research and Forecasting (WRF) model
  - BEP-BEM urban scheme (Martilli et al., 2002; Salamanca & Martilli, 2010)
  - **WRF-comfort** parameterization (Martilli et al., 2024)
- Variabilidad subgrid del **índice UTCI** --> Cálculo de los percentiles 10<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup>, and 90<sup>th</sup> del índice UTCI en cada punto de malla



- 3 dominios de resolución espacial : 9 km, 3 km and 1 km
- Simulación del mes de verano de **JULIO**.

Se selecciona el año representativo de cada década en base a las observaciones de temperatura durante el mes de julio

- Escenarios simulados:
  - **Caso base**: Clima variable + expansión urbana desde 1970 a 2020 (Uhl et al., 2023)
  - **Escenario de expansión urbano**: Mismas condiciones meteorológicas de 1970 + expansión urbana variable

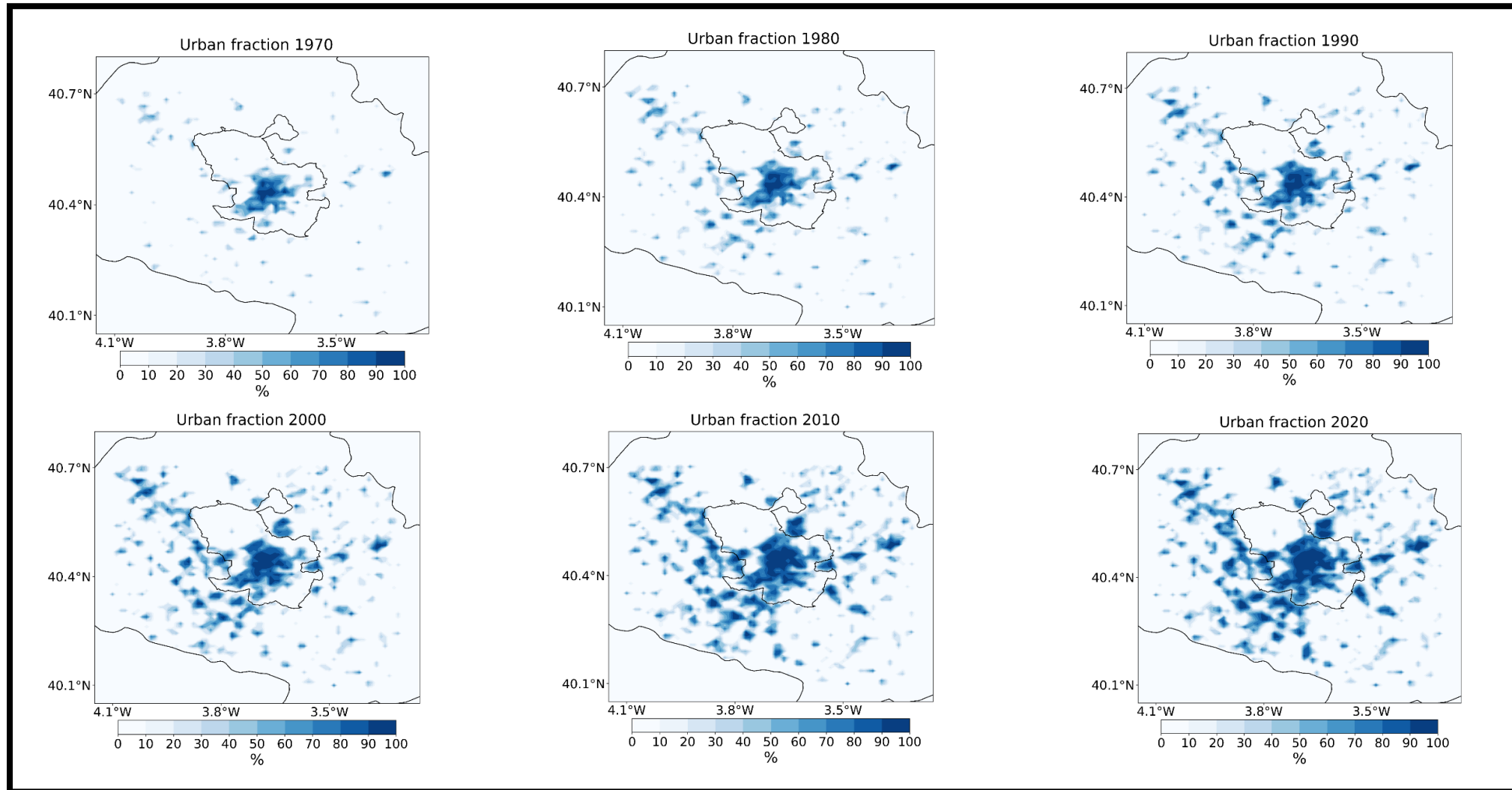


# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## Impacto de la expansión urbana en la temperatura y confort térmico

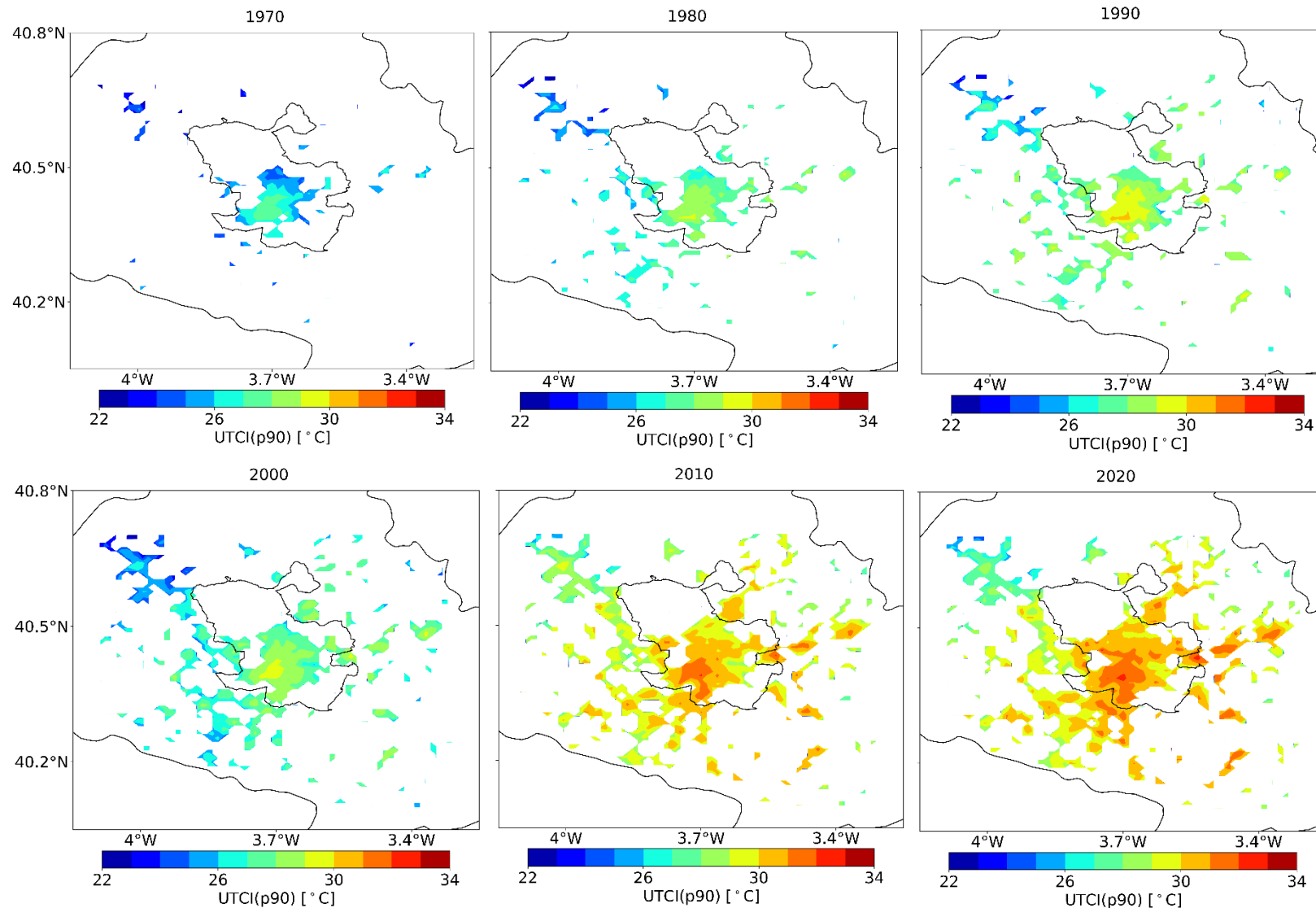
### Evolución de la fracción urbana en Madrid cada década desde 1970



# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## Base case. Monthly mean maps for the “hot spot”: UTCI (p90)



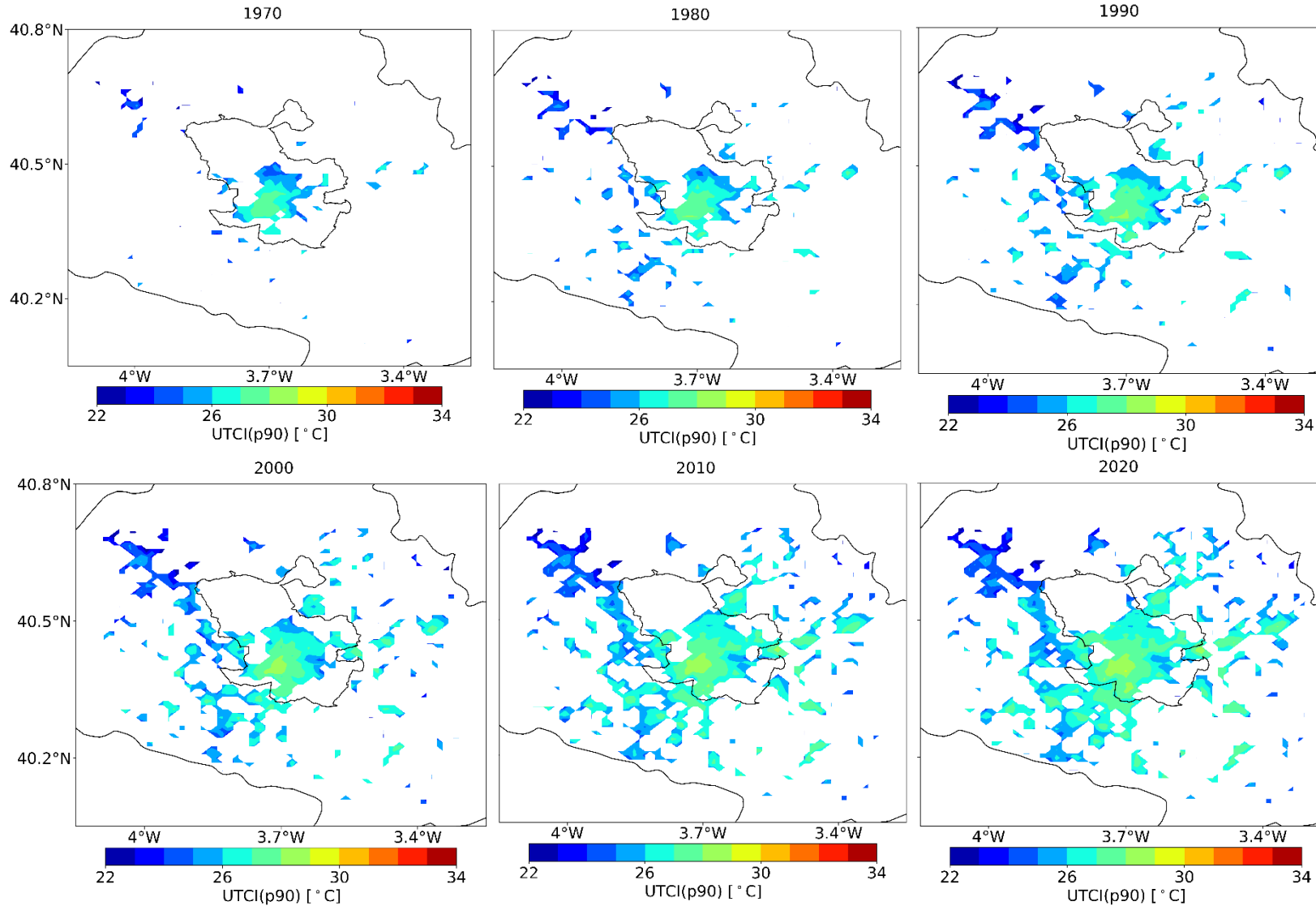
|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Extreme heat stress     | UTCI > 46 °C         |
| Very strong heat stress | 38 °C < UTCI < 46 °C |
| Strong heat stress      | 32 °C < UTCI < 38 °C |
| Moderate heat stress    | 26 °C < UTCI < 32 °C |
| No thermal stress       | 9 °C < UTCI < 26 °C  |

- Incremento significativo con el tiempo del índice UTCI
- Incremento del promedio espacial en el área de expansión urbana desde 1970:
  - 90<sup>th</sup> percentile (hot spot). 4.7 °C

# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## Urban expansion scenario. Monthly mean maps of UTCI (p90) – “hot spots”

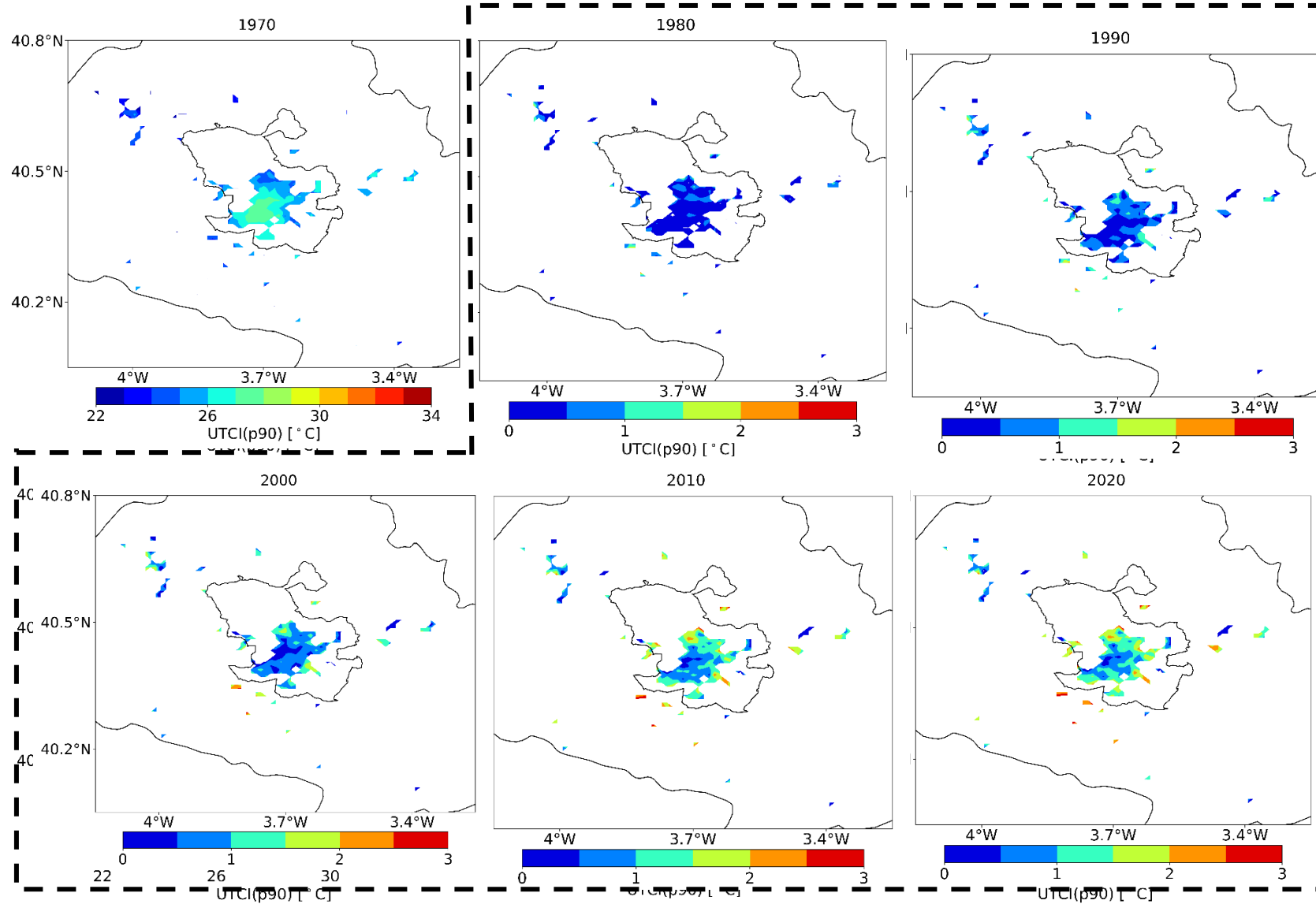


- Impacto de la urbanización menos pronunciado.
- Moderate heat stress (UTCI < 32 °C )

# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## Urban expansion scenario. Differences



- Impacto de la urbanización menos pronunciado.
- Moderate heat stress ( $UTCI < 32\text{ °C}$ )
- Menor incremento promedio debido a la expansión urbana
  - 90<sup>th</sup> percentile (hot spot).  $1.3\text{ °C}$
- Centro Ciudad – a pesar de no cambiar la zona urbana, UTCI aumenta debido a la expansión urbana de las zonas de alrededor.
- Incremento espacialmente irregular con el tiempo debido a la variabilidad de la morfología urbana dentro de la ciudad.

# Conclusions

- Evaluación del caso base. Buena aproximación del modelo a las temperaturas observadas --> Confianza suficiente en la configuración del modelo para usarlo sobre Madrid en escenarios futuros
- Aumento significativo de aproximadamente  $\sim 5^{\circ}\text{C}$  del índice de confort térmico en la ciudad de Madrid, siendo menos pronunciado debido a la expansión urbana,  $\sim 1,3^{\circ}\text{C}$ . --> La contribución del clima al aumento del UTCI es mayor que el impacto de la expansión urbana, aunque este último sigue siendo relevante.  
El desarrollo urbano (tasa de expansión + morfología urbana) desempeña un papel importante en la tendencia del análisis del confort térmico en las calles.
- Impacto significativo del tipo de morfología en los valores del UTCI -->

## Next steps...

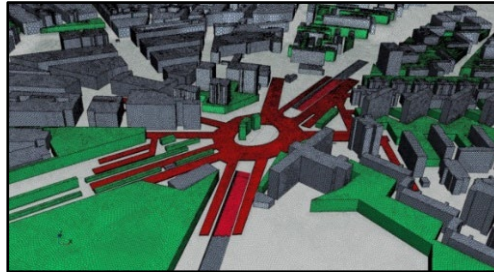
- Estudio de la variabilidad intraurbana del estrés térmico en escenarios futuros
- Evaluación del impacto de la vegetación urbana sobre el confort térmico

# Future research --> National Project MULTIURBAN

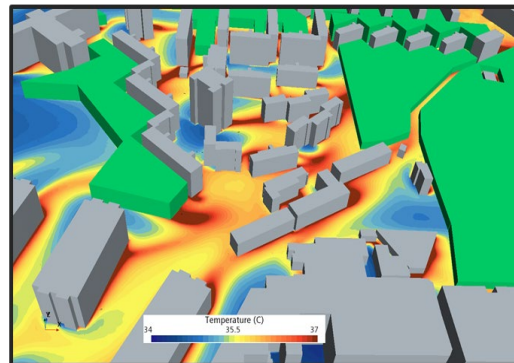
- Actual and future scenarios --> Evaluate local variability of the UTCI values using microscale simulations and observations



## Digital Twin



## Thermal comfort index



## Observations

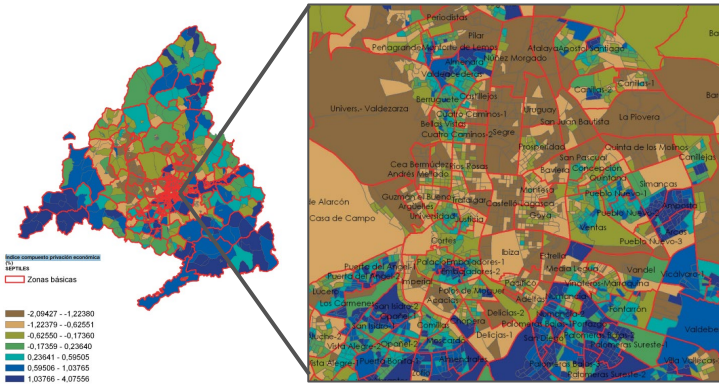


Source: The shade Lab website  
<https://shadelab.asu.edu/tools-data/>



## Future research --> National Project MULTIURBAN

- Estimate vulnerability heat maps and analyze heat exposure of pedestrian



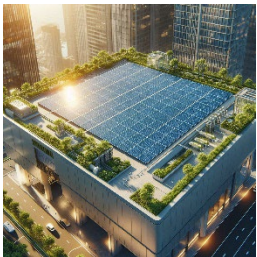
## Socio-economic map



## Surveys



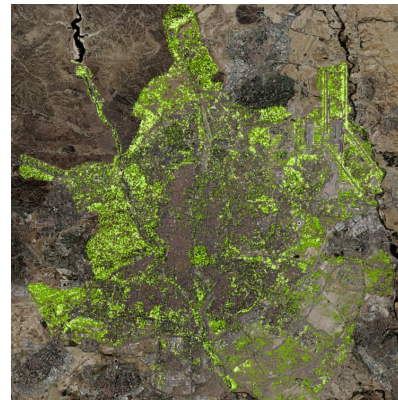
- Explore the impact of nature-based solutions and different heat mitigation strategies on thermal comfort index from a multiscale modeling perspective



## Street trees

## Green roofs

## Photovoltaic panels



## Mesoscale



## Microscale

# Proyecto coordinado:



**MULTIURBAN – I:** Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global  
(PID2023-149246OB-C21)

**IP1:** José Luis Santiago

Unidad de Modelización Atmosférica – UNIMA

**IP2:** Beatriz Sanchez



Universitat  
de les Illes Balears



**MULTIURBAN – II:**  
(PID2023-149246OB-C22)

Impactos de los flujos térmicos mesoescalares en la isla de calor urbana, la meteorología local y la calidad del aire en entornos complejos de la ciudad

**IP1:** Carlos Yagüe

Multiscale Atmospheric Processes in Meteorology and Climate

**IP2:** Mariano Sastre

METCLIM-UCM



# Gracias

## ¿Cuestiones?



**MULTIURBAN.** Proyecto coordinado.  
“Proyectos de Generación del  
Conocimiento 2023



**MULTIURBAN – I:**  
(PID2023-149246OB-C21)

[beatriz.sanchez@ciemat.es](mailto:beatriz.sanchez@ciemat.es)  
[jl.santiago@ciemat.es](mailto:jl.santiago@ciemat.es)

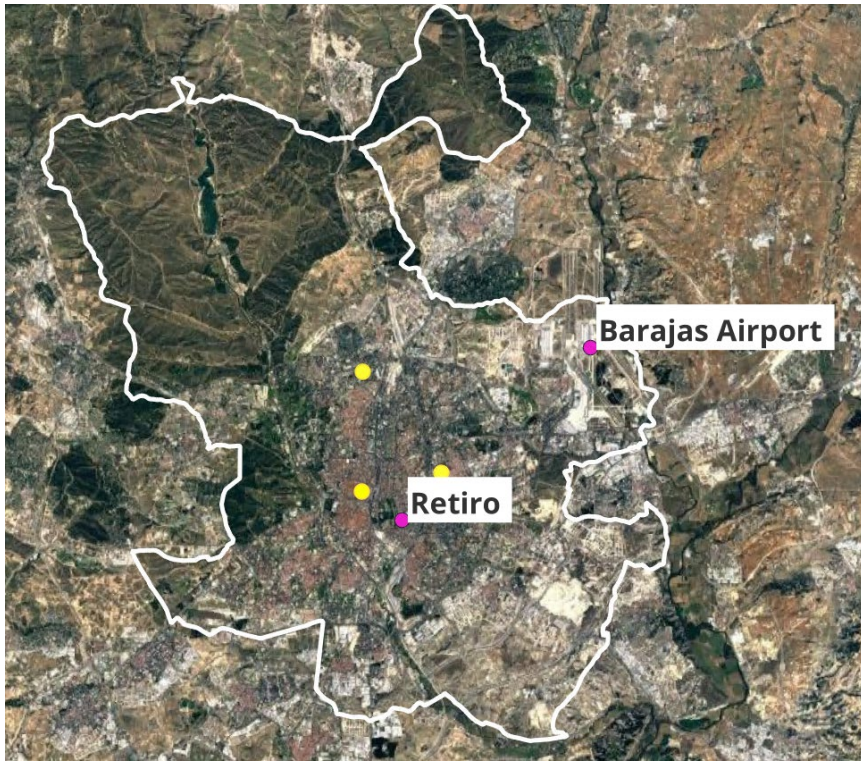


**MULTIURBAN – II:**  
(PID2023-149246OB-C22)

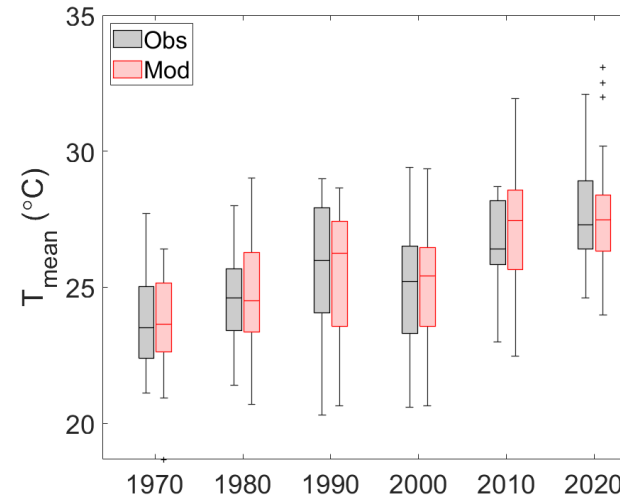
[carlos@ucm.es](mailto:carlos@ucm.es)  
[msastrem@ucm.es](mailto:msastrem@ucm.es)



# Evaluation with observations: 1970-2020

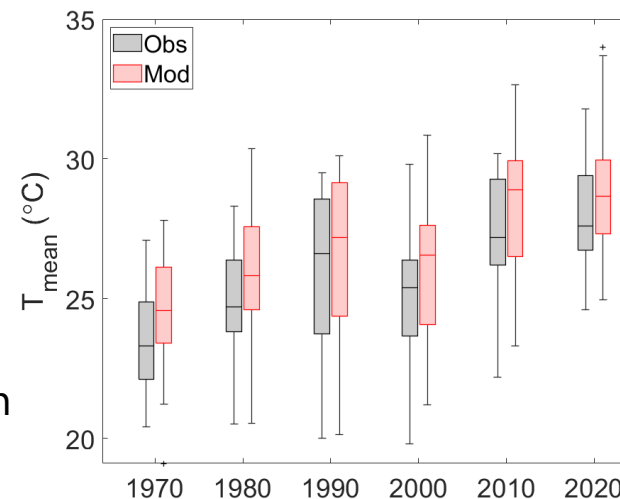


## Non-urban station (St1): Barajas Airport



| Barajas |      | 1970  | 1980  | 1990  | 2000  | 2010  | 2020  |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tmean   | RMSE | 1.02  | 0.86  | 0.65  | 0.72  | 1.23  | 1.06  |
|         | MB   | -0.14 | 0.14  | -0.05 | -0.11 | 0.55  | 0.08  |
|         | IOA  | 0.91  | 0.94  | 0.98  | 0.97  | 0.88  | 0.93  |
| Tmin    | RMSE | 1.33  | 1.46  | 1.31  | 1.36  | 1.49  | 1.81  |
|         | MB   | 0.04  | -0.10 | 0.27  | 0.68  | 0.01  | 0.06  |
|         | IOA  | 0.89  | 0.82  | 0.88  | 0.92  | 0.86  | 0.83  |
| Tmax    | RMSE | 2.01  | 1.51  | 1.96  | 2.75  | 1.39  | 1.88  |
|         | MB   | -1.65 | -1.33 | -1.86 | -2.60 | -0.67 | -1.79 |
|         | IOA  | 0.81  | 0.91  | 0.92  | 0.80  | 0.89  | 0.86  |

## Urban station (St2): Retiro



| Retiro |      | 1970 | 1980  | 1990 | 2000  | 2010  | 2020  |
|--------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| Tmean  | RMSE | 1.46 | 1.40  | 0.76 | 1.30  | 1.58  | 1.51  |
|        | MB   | 1.10 | 1.20  | 0.63 | 1.06  | 0.97  | 1.15  |
|        | IOA  | 0.86 | 0.89  | 0.98 | 0.93  | 0.86  | 0.88  |
| Tmin   | RMSE | 1.53 | 2.36  | 1.20 | 2.04  | 1.95  | 2.42  |
|        | MB   | 0.53 | 2.08  | 0.15 | 1.48  | 0.85  | 1.52  |
|        | IOA  | 0.86 | 0.67  | 0.95 | 0.84  | 0.82  | 0.74  |
| Tmax   | RMSE | 1.28 | 1.11  | 0.73 | 1.21  | 1.55  | 1.06  |
|        | MB   | 0.74 | -0.86 | 0.01 | -0.49 | -0.07 | -0.62 |
|        | IOA  | 0.91 | 0.95  | 0.99 | 0.95  | 0.88  | 0.94  |

- Daily  $T_{\text{mean}}$ ,  $T_{\text{max}}$  and  $T_{\text{min}}$
- Good agreement with observations: RMSE < 1.5 °C and IOA > 0.88
- Overestimation of  $T_{\text{min}}$  at the urban station

# MULTIURBAN – I: Modelización a multiescala de los impactos de la urbanización e infraestructuras verdes en el clima local y confort térmico desde la perspectiva del calentamiento global



## WP 1. Input data, development and simulation setups

Collecting data and pre-processing inputs for the WRF and CFD models, as well as of developing and evaluating the multiscale modelling system

## WP 2. Influence of urbanization on urban climate and outdoor thermal comfort at city scale

Explore the contribution of the historical urban development of Madrid over the global warming signal on the relevant meteorological variables and implications of urbanization and climate change on precipitation patterns and population thermal comfort across the city

## WP 3. Impact of green infrastructure on urban climate and thermal comfort

The impact of urban vegetation on microclimate and thermal comfort is difficult to estimate due to the multiscale complex interactions between urban elements and atmosphere

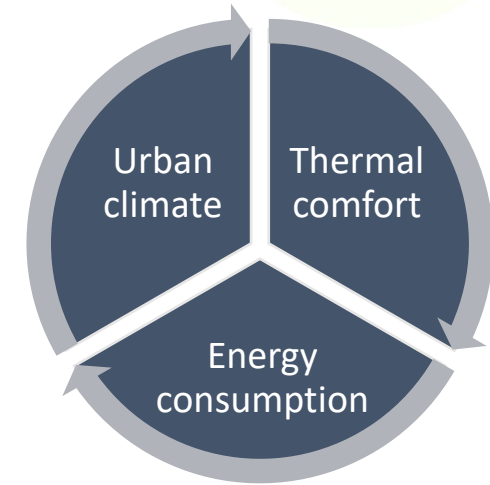
### Multiscale modelling system

## WP 4. Impact of heat mitigation strategies on local climate, thermal comfort and energy consumption in the context of the actual and future climate

A holistic approach to assess the impacts of different strategies to reduce urban overheating, improve population thermal comfort and reduce energy consumption based on numerical simulations over Madrid

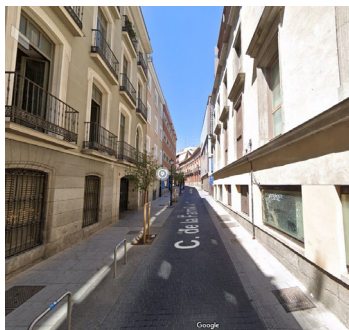
## WP 5. Pedestrian thermal exposure and heat vulnerability

Investigating the effects of urban climate on the local population and how the heat mitigation measures proposed in I-WP3 and I-WP4 might affect the vulnerability of the population and the thermal exposure of pedestrians



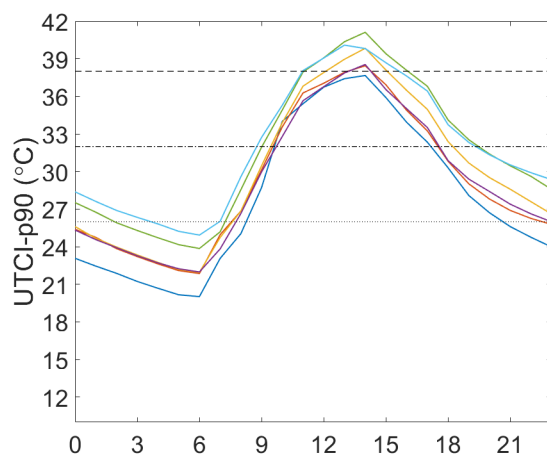
# Results. Diurnal cycle of UTCI (p90) values

P1



P1 – compact with  
no urban  
expansion

Base case



Very strong thermal

Strong heat stress

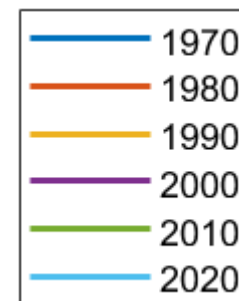
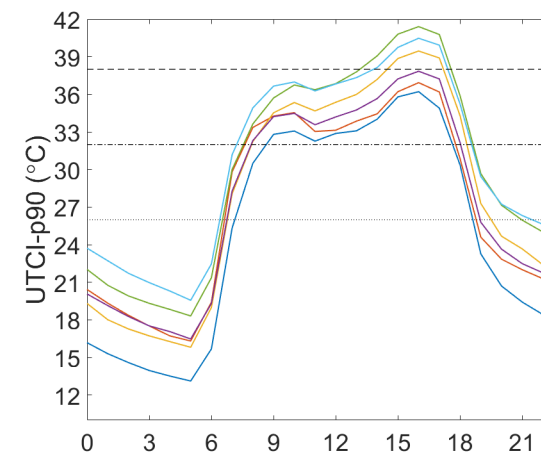
Moderate heat stress

No thermal heat stress

P3 – open  
with urban  
change



P3



- Differences in the UTCI patterns due to urban morphology
- **P1**: most of day shows a UTCI index above moderate heat stress range.
- **P3**: Pronounce increase of the UCTI, particularly during nighttime, however there are still more hours in a range of no thermal heat stress.