



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA ISLA METEOROLÓGICA
URBANA**

Autor/a: Adrián Escudero Bahillo

Tutor/es/as: Isidro Alberto Pérez y María Ángeles García

Año 2025

ÍNDICE

Resumen/Abstract	Pág. 2
1. Introducción	Pág. 4
1.1. Objetivos	Pág. 5
1.2. Estructura	Pág. 5
2. Materiales y métodos	Pág. 6
3. Resultados	Pág. 9
3.1. Temperatura	Pág. 9
3.2. Humedad relativa	Pág. 13
3.3. Temperatura de rocío	Pág. 16
3.4. Concentración de vapor de agua	Pág. 20
3.5. Velocidad del viento	Pág. 25
4. Conclusiones	Pág. 29
Referencias	Pág. 31
Índice de tablas y figuras	Pág. 33
Material complementario	Pág. 35

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el análisis espacio-temporal de la isla meteorológica urbana (UMI) de la ciudad de Múnich (Alemania), entendida como el conjunto de modificaciones microclimáticas derivadas del entorno construido urbano en contraste con sus áreas rurales circundantes. El estudio se basa en los datos del proyecto alemán TRY Advancement, que ofrece promedios horarios, diarios y mensuales para el periodo 1995 a 2012 y se centra en 5 variables meteorológicas clave: temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío, concentración de vapor de agua y velocidad del viento.

Para ello, se realiza una acotación espacial en torno a la ciudad de Múnich y su entorno rural más próximo, seguida de un análisis doble: gráfico, mediante mapas de isolíneas construidos con el software “Surfer”, y numérico, a partir de promedios estacionales de distintas ubicaciones representativas del centro urbano y de la periferia rural. Los resultados evidencian la existencia persistente de una isla de calor urbana (UHI), caracterizada por temperaturas más altas en el centro de la ciudad durante todo el año. De forma complementaria, se observa una isla seca urbana (UDI), con niveles reducidos de humedad relativa y específica en la zona urbana, así como una reducción sistemática de la velocidad del viento, especialmente en áreas densamente edificadas.

En contraste, aunque el punto de rocío presentó durante la mayor parte del periodo unos valores más reducidos en el centro de la ciudad, este muestra patrones más variables, condicionados en mayor medida por factores meteorológicos puntuales y por la disposición concreta de las islas UHI y UDI. Aun así, los datos sugieren que la estructura urbana ejerce una influencia también sobre esta variable, aunque menos robusta que en el caso de la temperatura o la humedad relativa.

En conjunto, el trabajo concluye que Múnich presenta un microclima urbano más cálido, seco y con menor ventilación que sus alrededores rurales, con patrones constantes a lo largo de todo el periodo analizado. Este tipo de estudios permite comprender mejor las implicaciones físicas del entorno construido sobre el clima local y pone de manifiesto la relevancia de la planificación urbana como herramienta para mitigar los efectos del cambio climático a escala local.

Abstract

This TFG aims to carry out a spatio-temporal analysis of the Urban Meteorological Island (UMI) of the city of Munich (Germany), understood as the set of microclimatic modifications caused by the built urban environment in contrast to its surrounding rural areas. The study is based on data from the German TRY Advancement project, which provides hourly, daily and monthly averages for the period 1995 to 2012, and focuses on five key meteorological variables: air temperature, relative humidity, dew point temperature, water vapor concentration and wind speed.

A spatial delimitation is first established around the city of Munich and its nearby rural surroundings, followed by a dual analysis: graphical, using contour maps generated with the “Surfer” software, and numerical, based on seasonal averages calculated from representative locations within the urban core and rural periphery. The results show persistent evidence of an Urban Heat Island (UHI), characterized by consistently higher temperatures in the city center throughout the year. In addition, an Urban Dry Island (UDI) is observed, with lower relative and

specific humidity levels in the urban area, as well as a systematic reduction in wind speed, particularly in densely built-up zones.

In contrast, although the dew point temperature generally exhibited lower values in the city center throughout most of the study period, it displays more variable patterns, more strongly influenced by short-term meteorological conditions and the specific spatial configuration of the UHI and UDI. Nevertheless, the data suggest that urban structure also influences this variable, although to a lesser extent than temperature or relative humidity.

Overall, the study concludes that Munich exhibits an urban microclimate that is warmer, drier, and less ventilated than its rural surroundings, with stable patterns over the entire period analysed. This type of research contributes to a better understanding of the physical implications of the built environment on local climate and highlights the importance of urban planning as a tool for mitigating the effects of climate change at the local scale.

1. Introducción

En un contexto contemporáneo protagonizado por el calentamiento global y en el que las grandes ciudades cobran cada vez más protagonismo frente a la creciente despoblación de las áreas rurales es de gran interés en el ámbito de la física de la atmósfera el estudio de la climatología urbana. Las ciudades, al modificar profundamente el terreno y paisaje natural, generan unas condiciones climáticas particulares que distan de las que se dan en sus entornos rurales. Estas condiciones particulares se pueden englobar en la llamada isla meteorológica urbana (UMI), que no son más que el conjunto de efectos derivados de la urbanización que alteran distintas variables meteorológicas como la temperatura, la humedad, la dinámica del viento o el punto de rocío. Un análisis de estas alteraciones permite tener un mejor entendimiento de cómo las ciudades afectan al clima y ofrecer herramientas para mitigar su efecto sobre diversos ámbitos.

La manifestación más ampliamente estudiada de este fenómeno es la isla de calor urbana, o por sus siglas en inglés UHI (“Urban Heat Island”). Esta se caracteriza por unas temperaturas consistentemente más altas en el entorno urbano que en sus alrededores rurales producidas por numerosos factores como la absorción de la radiación térmica solar por parte de las superficies artificiales de la ciudad o la emisión antropogénica de calor. Si ha sido ampliamente estudiada es en gran parte por los efectos sobre la salud que tienen las altas temperaturas. En ese sentido, Zhao et al. (2018) estudiaron el impacto que tienen las olas de calor en la UHI, llegando a la conclusión de que durante estos periodos la isla de calor se amplifica aún más, incrementando el factor de riesgo para las personas que ello supone.

Pero en los últimos años, con la idea de aplicar ciertas medidas como la incorporación de zonas verdes o el uso de otros materiales de construcción para reducir los efectos del urbanismo sobre el clima, se han venido estudiando otros fenómenos. Fenómenos como la reducción de la humedad relativa y específica que se dan en los entornos urbanos por lo general (Huang et al., 2023; Yang et al., 2017), la UDI (“Urban Dry Island”) o isla urbana seca. De hecho, estudios más recientes apuntan en la dirección de que la UHI no es suficiente para analizar los impactos que tiene la ciudad sobre el clima y la población sino que hay tener en cuenta también la humedad. Chakraborty et al. (2022) analizaron en su trabajo cómo la menor humedad relativa y absoluta presente en las ciudades respecto a su periferia rural, causada principalmente por las mayores temperaturas y la menor evapotranspiración que se da en ellas, modera en gran medida al estrés térmico producido por la isla de calor, pudiendo llegar a reducirse hasta en un 10-15%. Estos resultados subrayan la necesidad de abordar el estudio de la UMI no solo desde el punto de vista térmico sino también higrométrico.

Otro aspecto clave de la UMI es la alteración de la dinámica del viento. En su estudio, Marucci y Carpentieri (2020), analizan mediante simulaciones y datos experimentales en túnel de viento, como las edificaciones urbanas afectan la estructura del viento, llegando a la conclusión de que los edificios, las calles estrechas y los distintos obstáculos ejercen una fricción mecánica. Esta fricción mecánica se traduce en una ralentización general del viento en la urbe, que reduce la ventilación y dispersión de contaminantes, y que refuerza las 2 islas anteriores al ser más difícil el intercambio de masas de aire más frías y húmedas de los alrededores.

En este contexto, la ciudad de Múnich representa un caso de estudio particularmente interesante. Con un clima centroeuropeo templado y una estructura urbana densa pero no masiva, Múnich permite examinar cómo se manifiestan las UMIs en ciudades de tamaño medio. Pese a la existencia de estudios relacionados con su isla de calor, no se ha realizado un análisis espacio-temporal conjunto que abarque simultáneamente variables higrométricas, térmicas y dinámicas durante un periodo prolongado.

Precisamente este Trabajo de Fin de Grado cubre esa parcela y centra el estudio en la ciudad de Múnich (Alemania) a través de una exploración de un conjunto de datos registrados entre los años 1995 a 2012. Para ello se lleva a cabo un análisis tanto espacial como temporal de 5 variables meteorológicas susceptibles de ser alteradas por el paisaje urbanístico como son la temperatura, la humedad relativa, la concentración de vapor de agua, el punto de rocío y la velocidad del viento, examinándolas en relación a 2 zonas: el centro de la ciudad y sus alrededores rurales.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es identificar, describir y explicar las diferencias espacio-temporales que definen la isla meteorológica urbana de Múnich. En particular, se pretende:

- Analizar la distribución espacial y temporal de variables meteorológicas clave en el entorno urbano.
- Evaluar la existencia de patrones estacionales o climatológicos en las magnitudes de la UMI.
- Determinar las distintas correlaciones que puedan existir entre las islas de las distintas variables.
- Ofrecer una interpretación físico-meteorológica de los resultados observados, basado en diversos artículos científicos contrastados.

1.2 Estructura

El documento está organizado en varias secciones. Tras esta introducción se presentan los materiales y datos usados así como los diversos métodos que se han utilizado para el tratamiento y análisis de ellos.

Seguidamente se presentan los datos ya tratados, ofreciendo una interpretación para cada una de las variables meteorológicas analizadas basada en esos datos y apoyándose en diversa bibliografía científica. Finalmente se presentan las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo, analizando de manera global los distintos resultados obtenidos y las correlaciones entre ellos, destacando las distintas implicaciones derivadas de este estudio.

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento de la climatología urbana en ciudades europeas medias y ofrecer un ejemplo de aplicación científica de datos meteorológicos a escala local.

2. Materiales y métodos

Para el análisis de la isla meteorológica urbana se ha hecho uso de la base de datos alemana del proyecto “TRY Advancement” (Krähenmann et al., 2016). Se trata de una base de datos que cubre toda la superficie de Alemania con una resolución espacial de 1 km. En esta base se encuentran almacenados desde 1995 hasta 2012 los valores promedios horarios, diarios y mensuales de distintas variables meteorológicas. Entre estas variables meteorológicas se encuentran las que son objeto de estudio en este trabajo: la temperatura, el punto de rocío, la humedad relativa, la concentración de vapor de agua en el aire a 2 metros del suelo y la velocidad del viento a 10 metros de la superficie.

El primer paso para el tratamiento de estos datos, dado que el estudio es sobre la isla meteorológica urbana de Múnich, fue restringir estos al área de dicha ciudad y sus alrededores rurales. Para ello se ha hecho una acotación espacial a las coordenadas geográficas de longitud entre 11,13 °E y 12,00 °E y latitud entre 47,92 °N y 48,35 °N. Así, se ha usado un programa en MatLab para hacer dicha restricción. El funcionamiento del programa no es otro que el analizar todos los datos de entrada y escribir en un archivo .dat solo aquellos cuyas coordenadas se encuentran dentro de las que se han marcado para el estudio de la ciudad de Múnich. Este archivo presenta 2 primeras columnas correspondientes a la longitud y a la latitud en formato decimal respectivamente y una tercera columna con el valor de la variable meteorológica en cuestión en ese punto geográfico.

En concreto los datos que se han usado como base son los promedios mensuales. Una vez tratados con el programa descrito para ajustarse a la urbe bajo estudio se han analizado de dos formas distintas.

Por un lado se han analizado numéricamente los datos a través de Excel. Para ello se han exportado al programa los promedios mensuales de todo el periodo del que se disponen los datos de las 5 variables meteorológicas bajo estudio. Con estos valores medios mensuales lo que se ha hecho en primer lugar es un cálculo del promedio anual de los 12 meses de cada año para cada punto de medición. Son estos datos anuales los que después se han usado en los mapas de isolíneas.

Por el otro lado se ha hecho un análisis más “gráfico” construyendo mapas de isolíneas. Esto se ha realizado a través del programa “Surfer”. El funcionamiento consiste principalmente en construir un mapeado de puntos, lo que se conoce como “grid” y que viene a ser una cuadrícula de datos, a través de una interpolación de los datos iniciales de entrada aportados. Es este “grid” el que se usa posteriormente para pintar el mapa con las isolíneas. Pero antes de esto se aplica un suavizado a los datos para evitar los bordes abruptos en las isolíneas y que se pueda apreciar mejor la forma de la isla meteorológica urbana (Fig. 1). Esto se hace reduciendo el número de nodos de la cuadrícula o lo que es lo mismo reduciendo el número de puntos que coge como referencia el programa para graficar el mapa. Una vez se tiene el “grid” suavizado se elabora el mapa de isolíneas y se aplica a este una escala de colores para mejorar la visualización de la forma de la isla meteorológica urbana.

Llegados a este punto, para poder diferenciar qué datos se encuentran en la ciudad como tal y cuales no, se han establecido los límites espaciales del área urbana (Fig 2.), los cuales sean incorporado directamente sobre los mapas anteriores para tener una visión más completa.

En segundo lugar, atendiendo a dicha delimitación y con el objetivo de hacer una estimación cuantitativa de la magnitud de la isla meteorológica urbana se han seleccionado 3 puntos distintos pertenecientes a suelo urbano como tal y otros 3 localizados en los alrededores rurales. Los puntos “urbanos” elegidos son (11,522 °E , 48,122 °N), (11,619 °E , 48,121 °N) y (11,579 °E , 48,196 °N) y los “rurales” (11,612 °E , 48,335 °N) , (11,197 °E , 47,921 °N) y (11,903 °E , 47,921 °N).

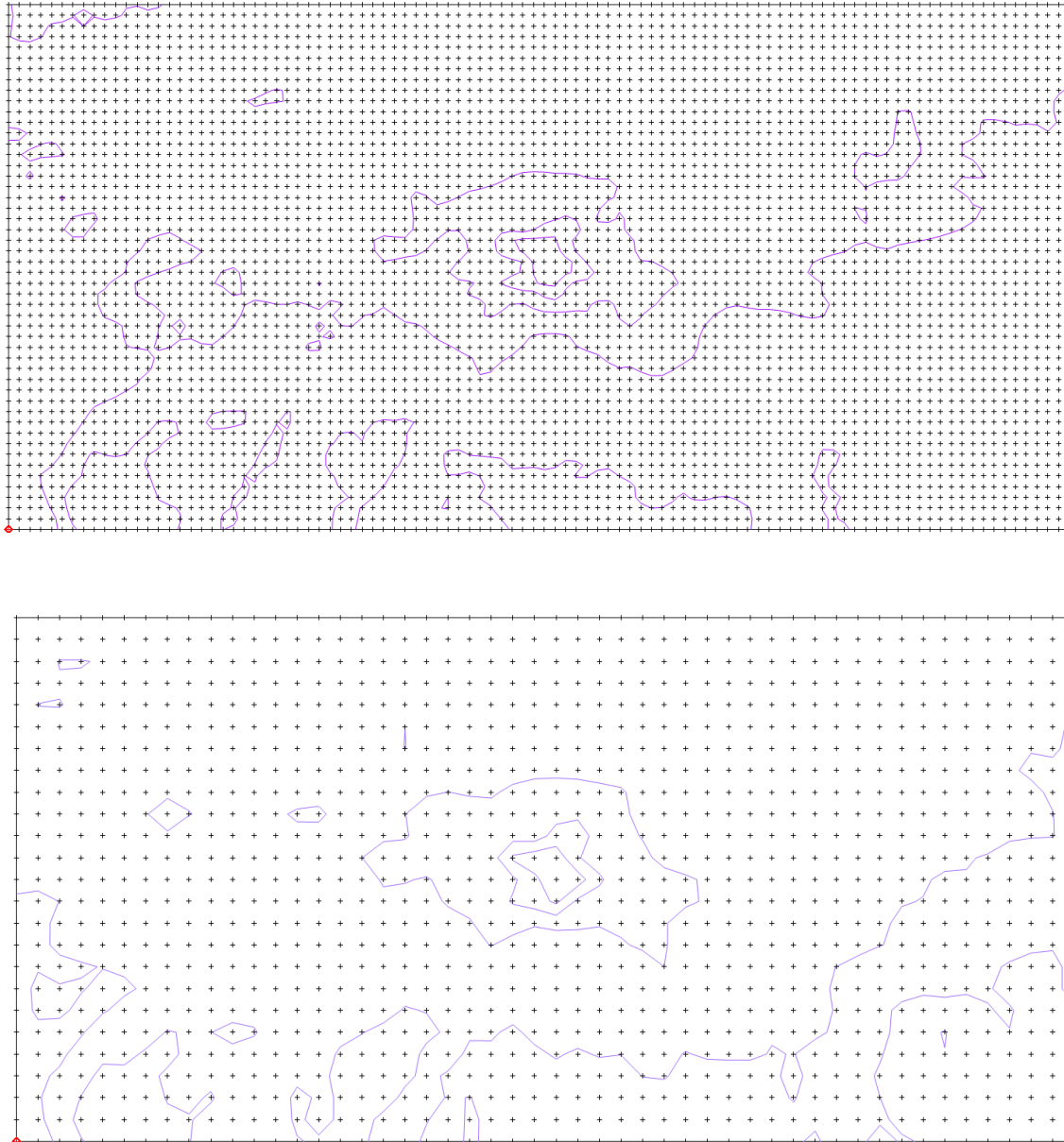


Figura 1: *Grid de 100x50 puntos (Arriba). Grid de 50x25 puntos (Abajo).*

Usando estos puntos se han efectuado los promedios urbanos (usando los valores de la variable correspondiente en los 3 primeros puntos mencionados anteriormente) y los promedios rurales (con los otros 3 puntos) de cada estación de cada año. Como los datos que se han usado son mensuales se han simplificado las estaciones de la siguiente manera: para el verano se han usado los datos correspondientes a junio, julio y agosto; para el invierno diciembre, enero y febrero; para la primavera marzo, abril y mayo y para el otoño septiembre, octubre y noviembre. Es por eso que de ahora en adelante cuando se hable de las estaciones del año no se está hablando de su periodo estricto sino de cada conjunto de 3 meses antes mencionado.

Todos estos valores medios (urbanos y rurales) finalmente se han graficado en función del tiempo (años) para cada estación y se ha efectuado una estimación lineal para ver su tendencia en aquellos casos en los que el coeficiente de correlación mostraba un valor tal que los resultados son significativos de acuerdo a los dieciséis grados de libertad presentes en el problema. De esta manera se puede observar de una manera más gráfica cual es la diferencia entre los datos de la ciudad y de su entorno, que no es otra cosa que la propia UMI, y cuál ha sido su evolución a lo largo del tiempo para cada variable.

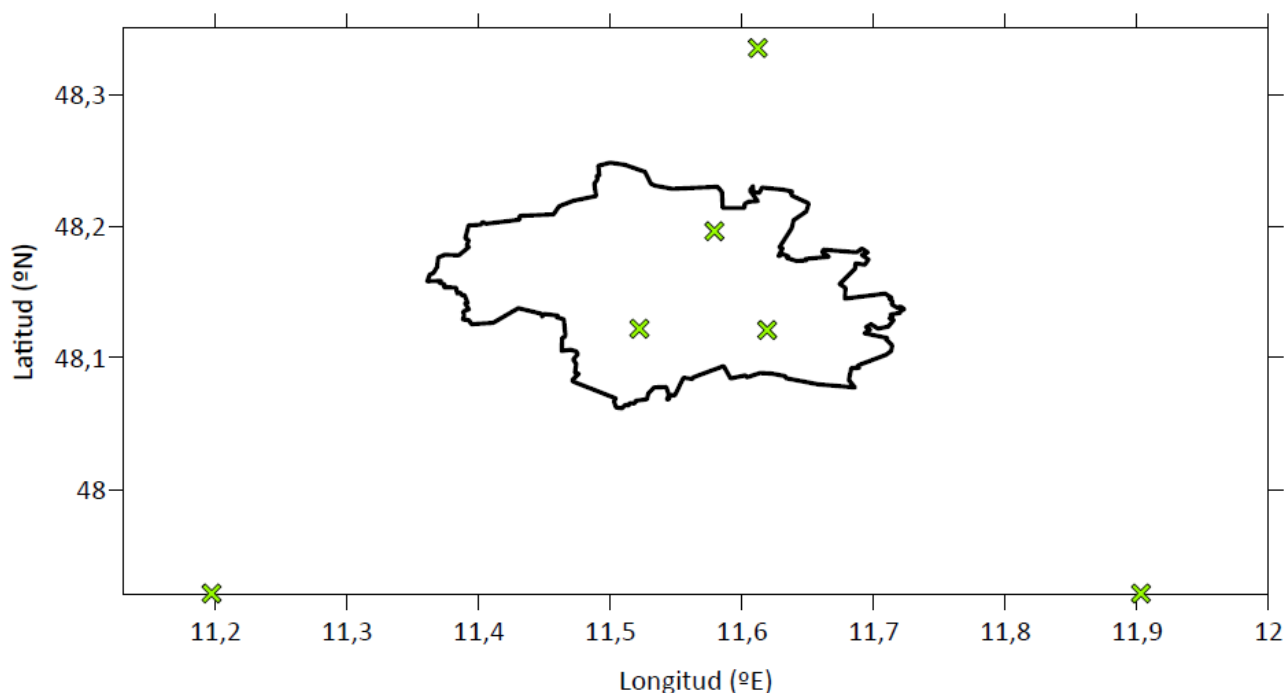


Figura 2. *Delimitación espacial de la ciudad de Múnic y puntos seleccionados para el centro y las afueras.*

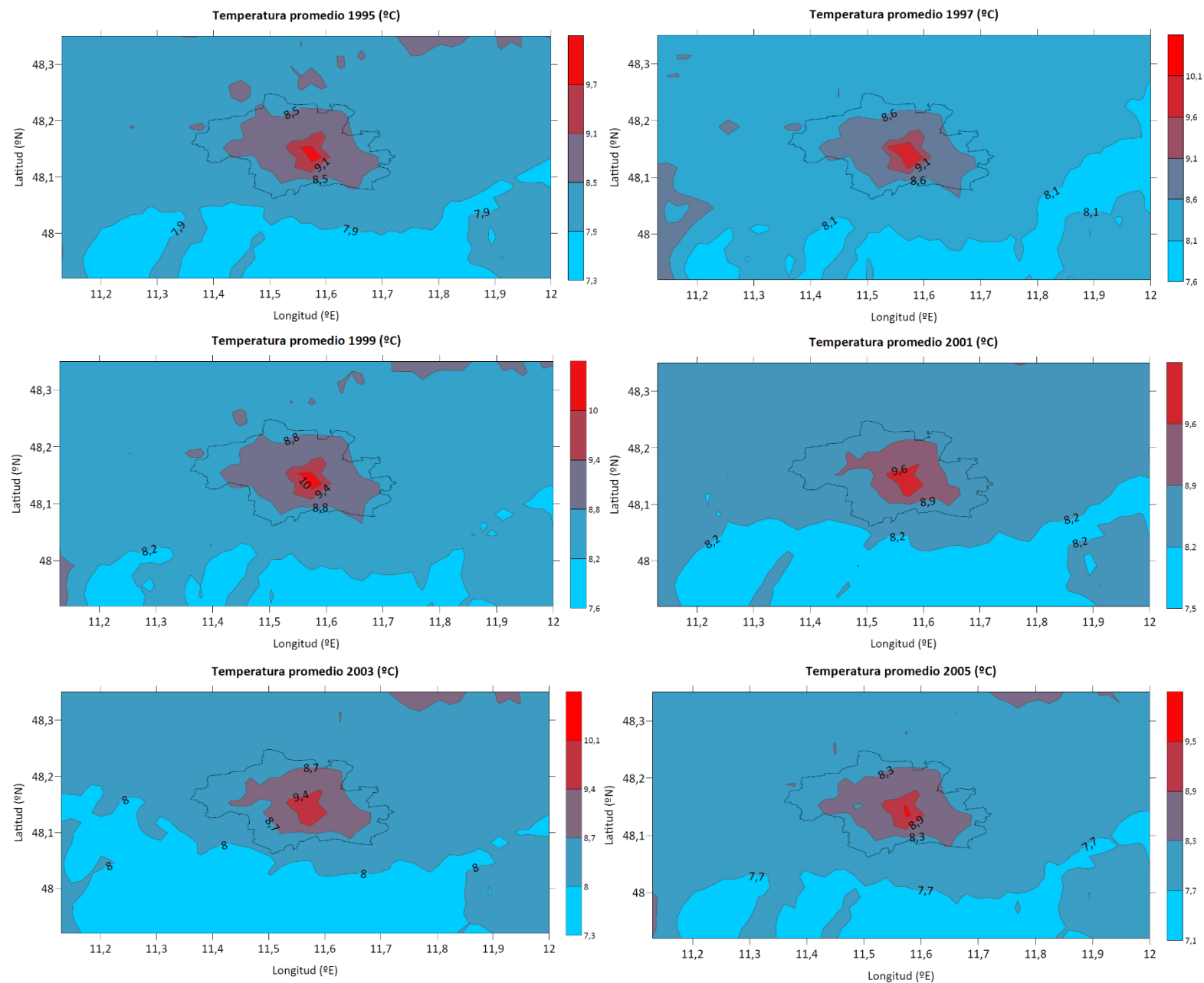
Asimismo, se ha hecho el ejercicio de cuantificar la magnitud de la isla calculando la diferencia entre el promedio mensual de los 3 puntos urbanos y los 3 rurales y de graficar esta diferencia en función del tiempo para analizar su evolución temporal.

Por último, se ha creado mediante la herramienta del modelo LCZ (“Local Climate Zones”) de Demuzere (2021) un mapa ajustado al rango espacial bajo estudio que detalla los distintos tipos de uso del suelo, distinguiendo entre distintos tipos de edificaciones residenciales, industrias, áreas más o menos boscosas, praderas o masas de agua. Cabe mencionar que si bien el mapa de uso de suelo se ha generado con datos de 2019, que está fuera del rango de estudio de este trabajo, resulta representativo usarlo en ciertas situaciones puesto que se entiende que no ha habido cambios significativos en las masas de agua de los lagos o en las zonas de bosque denso de la parte sur y que la poca evolución que haya habido sea la de una cierta expansión del área urbana.

3. Resultados

3.1. Temperatura

Empezando por la variable más ampliamente estudiada en cuanto a las islas meteorológicas se refiere se encuentra la temperatura. La temperatura del aire constituye la variable meteorológica más directamente asociada al fenómeno de la isla de calor urbana (Urban Heat Island, UHI), tanto por su accesibilidad en la medición como por la notoriedad de sus efectos en el entorno urbano. En el caso de Múnich, los datos extraídos del conjunto TRY Advancement permiten evidenciar con claridad la presencia persistente de una UHI durante el periodo 1995–2012.



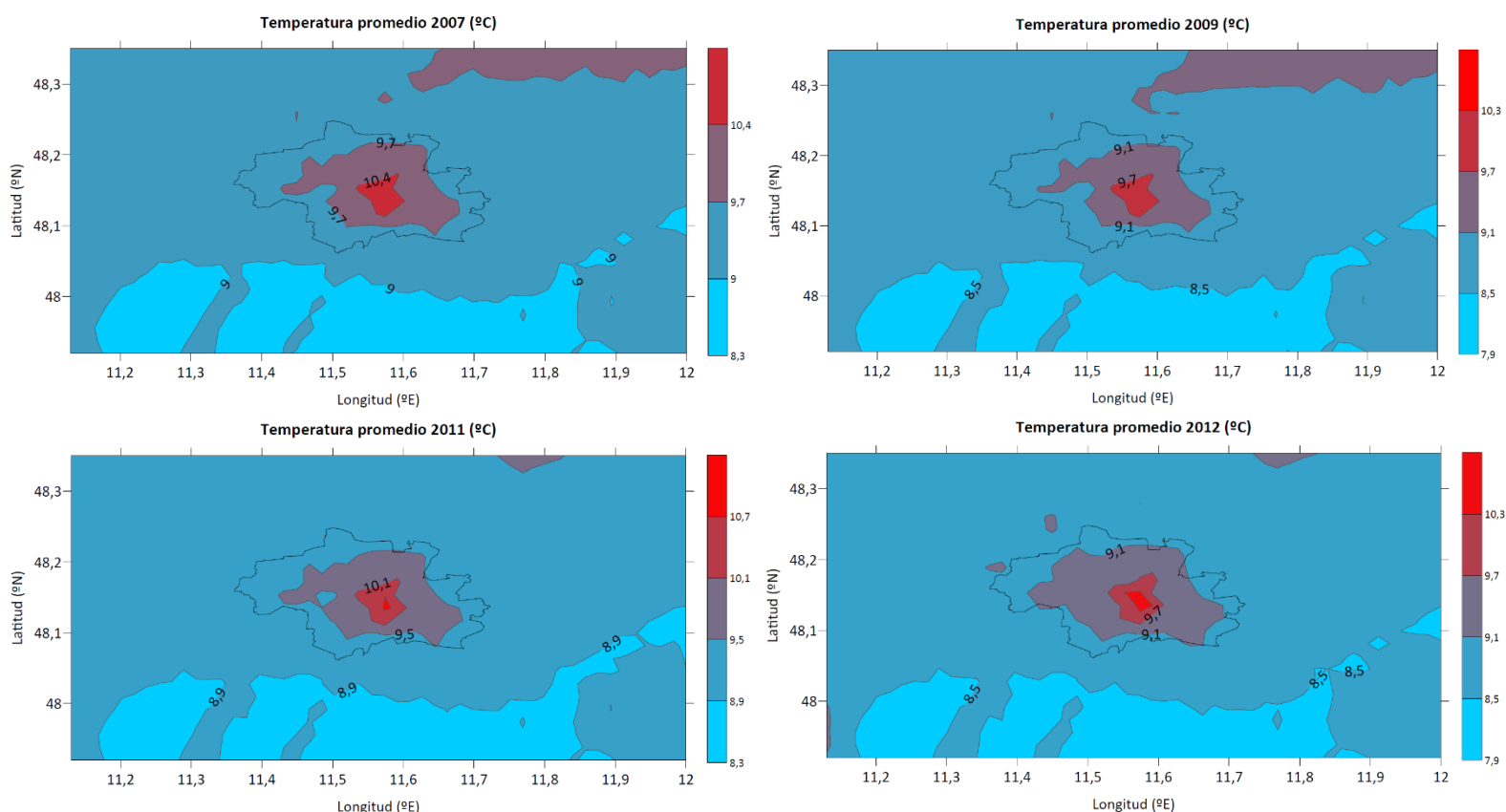


Figura 3. Mapas de isolíneas del promedio anual de la temperatura de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012.

Los promedios anuales del periodo 1995-2012 representados en los mapas de isolíneas (Fig. 3 y Fig. an. 1) muestran cómo el centro de la ciudad concentra los valores de temperatura más elevados, mientras que las zonas de la periferia albergan temperaturas más moderadas. Este patrón espacial se mantiene de manera consistente a lo largo del año y se debe a numerosos factores que se dan en los entornos urbanos como son un menor albedo y una mayor capacidad calorífica de los materiales típicamente usados en las ciudades (hormigón, asfalto...), el aporte de calor antropogénico producido por las propias actividades humanas que se desarrollan en las ciudades, una menor evaporación por la escasez de vegetación y fuentes de agua libre o la menor ventilación provocada por las edificaciones que dificulta el intercambio de masas de aire a distinta temperatura. Esto genera un almacenamiento térmico más eficiente durante el día que se libera lentamente durante la noche. Este efecto, estudiado por Oke (1982) y Stewart y Oke (2012), contribuye a mantener elevada la temperatura en el entorno urbano, incluso en ausencia de radiación solar directa.

Por otro lado, el análisis estacional (Fig. 4 y Tabla 1) permite corroborar la persistencia del fenómeno de la UHI a lo largo de las distintas estaciones. Como cabría esperar, los valores absolutos de temperatura más altos se dan durante el verano, tanto para las zonas rurales como para las urbanas, aunque el contraste entre ellas se mantiene más o menos constante y no varía de forma significativa entre estaciones. Es precisamente este hecho el que sugiere que el efecto de la isla de calor en Múnich no es algo únicamente estacional, sino que está más bien ligado a la estructura urbana como tal. Y cobra sentido esa ausencia de una variación estacional considerable entendiendo que gran parte de

las causas de la UHI, como son la emisión antropogénica de calor o el albedo urbano, no operan únicamente en verano sino que se mantienen el resto del año. Esto coincide con estudios recientes realizados en otras ciudades centroeuropeas como Viena o Berlín, donde se ha observado con simulaciones que la incorporación de zonas verdes y húmedas en la ciudad, entre otros elementos, amortigua el exceso de temperatura de estas (Müller et al., 2014; Žuvela-Aloise et al., 2016). Si bien para el otoño y el invierno las tendencias no son estadísticamente significativas por encontrarse los coeficientes de correlación de sus ajustes lineales fuera del rango aceptable, para el verano y la primavera sí se han podido encontrar unos resultados significativos al 5% y 10% respectivamente. Para el verano la tendencia hallada ha sido un crecimiento de $0,0526\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año para el centro y de $0,0593\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las afueras y en el caso de la primavera $0,0781\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el centro y $0,0838\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las afueras. En ambos casos el crecimiento temporal de la temperatura de las afueras es muy ligeramente superior al del centro, de milésimas de grado, lo que puede llegar a relacionarse con la expansión urbana a lo largo de los años hacia sus zonas rurales, aumentando la temperatura de estas.

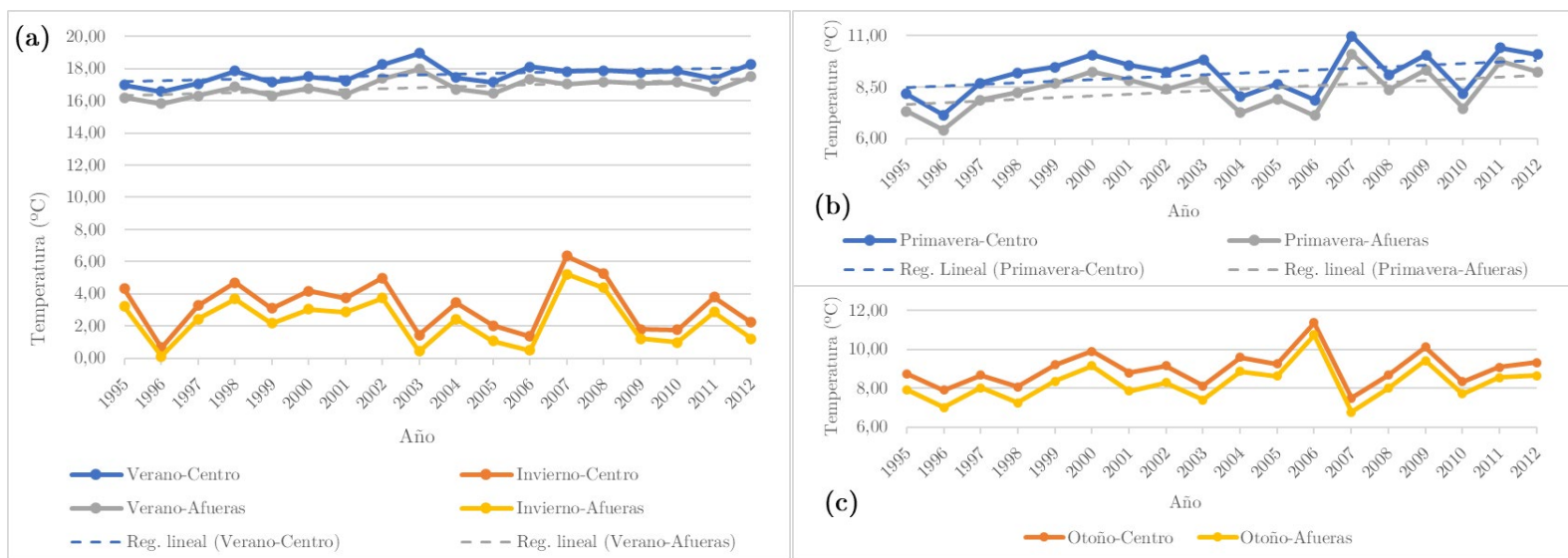


Figura 4. Evolución temporal de la temperatura media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: **(a)** invierno y verano, **(b)** primavera y **(c)** otoño.

De la Tabla 1 se extrae que la diferencia entre las áreas urbanizadas de la ciudad y los alrededores rurales ronda entre los $0,7$ y $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nuevamente, el hecho de que esta diferencia térmica se mantenga más o menos constante a lo largo de las estaciones refuerza la idea de que el fenómeno de la UHI, al menos para Múnich, está más ligado a factores propiamente urbanos y no es tan susceptible a los cambios climáticos entre estaciones.

Tabla 1. Temperatura promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras expresada en grados Celsius (°C).

AÑO	CENTRO				AFUERAS			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1995	4,32	8,16	16,99	8,73	3,20	7,31	8,10	7,93
1996	0,66	7,14	16,58	7,90	0,10	6,40	6,73	7,00
1997	3,27	8,70	17,08	8,67	2,43	7,88	8,54	8,01
1998	4,69	9,19	17,86	8,06	3,67	8,23	8,62	7,24
1999	3,08	9,48	17,16	9,19	2,17	8,68	8,58	8,37
2000	4,16	10,07	17,51	9,90	3,03	9,24	9,36	9,16
2001	3,75	9,57	17,24	8,79	2,85	8,82	8,19	7,84
2002	4,99	9,24	18,27	9,14	3,74	8,39	8,61	8,29
2003	1,44	9,83	18,96	8,12	0,42	8,87	7,74	7,40
2004	3,45	8,03	17,43	9,59	2,44	7,26	8,20	8,86
2005	2,03	8,66	17,16	9,24	1,06	7,92	7,99	8,61
2006	1,35	7,87	18,12	11,37	0,48	7,12	8,63	10,74
2007	6,34	10,98	17,82	7,49	5,22	10,10	9,13	6,77
2008	5,29	9,11	17,89	8,68	4,37	8,37	8,88	8,00
2009	1,79	10,07	17,76	10,12	1,21	9,32	8,71	9,42
2010	1,75	8,19	17,84	8,32	0,98	7,46	7,59	7,71
2011	3,79	10,40	17,37	9,09	2,86	9,74	9,11	8,54
2012	2,23	10,09	18,28	9,32	1,22	9,24	8,73	8,64

Como forma de cuantificar la magnitud de la UHI se ha efectuado la diferencia entre el valor promedio anual de la temperatura de los 3 puntos interiores (T_{centro}) y el promedio de los 3 puntos exteriores (T_{afueras}):

$$\text{Magnitud UHI} = T_{\text{centro}} - T_{\text{afueras}} \quad (1)$$

Con el objetivo de observar una posible relación temporal de esta magnitud de la isla de calor se ha graficado esta variable (Fig. 5) y se ha efectuado una regresión lineal, que en este caso es estadísticamente significativa al 10%.

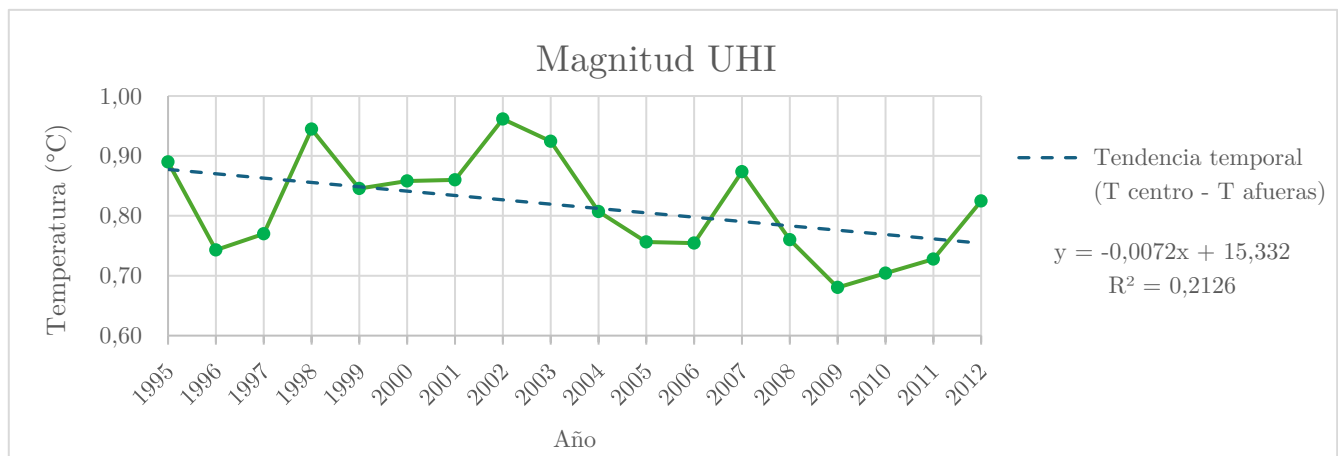


Figura 5. Valor anual de la variable “Magnitud UHI” de 1995 a 2012.

Se observa una ligera tendencia descendente a razón de $0,0072\text{ }^{\circ}\text{C}$ al año que refuerza la idea anterior de que conforme la ciudad crece hacia afuera, la diferencia entre la temperatura del centro y la de las afueras es cada vez menor. A pesar de eso, no hay una tendencia clara que permita vincular la UHI con otros factores globales sino que indica una cierta estabilidad en las causas de la formación de esa isla, que no es otra que la propia estructura de la urbe. No obstante sí se han producido ciertos picos máximos y mínimos, lo que sugiere que la isla térmica puede amplificarse o atenuarse bajo ciertas condiciones meteorológicas específicas, como veranos más cálidos o inviernos menos pluviosos, en los que la humedad o las precipitaciones, que son amortiguadores de la UHI, se reducen (Zhou et al., 2014).

En resumen, todos los datos son consistentes con la existencia de un sobrecalentamiento del núcleo urbano respecto a sus alrededores rurales sistemático y constante a lo largo de las estaciones y años analizados. Es este hecho el que permite extrapolar que cualquier cambio que se pueda producir en la magnitud de esta isla de temperatura dependerá más de las transformaciones que pueda experimentar el suelo urbano, como una expansión de la ciudad o un incremento de las zonas verdes dentro de ella, que de cualquier variación meteorológica interanual.

3.2. Humedad relativa

La distribución espacial y temporal de la humedad relativa en Múnich pone de manifiesto una estructura urbana diferenciada también desde este punto de vista, lo cual puede resultar menos evidente a simple vista que la temperatura, pero igual de relevante para caracterizar la isla meteorológica urbana. En el caso de Múnich, el análisis espacio-temporal revela una estructura característica inversa a la de la temperatura: las zonas urbanas presentan, en promedio, valores de humedad relativa más bajos que sus alrededores rurales tal y como se puede observar en los mapas de isolíneas anuales para el periodo bajo estudio (Fig. 6 y Fig. an. 3).

A este fenómeno de isla se le ha venido denominando como UDI (“Urban Dry Island”). Se puede observar en los mapas cómo los valores más bajos de humedad relativa se concentran en el centro de la ciudad, lo que corrobora el acierto a la hora de referirse a la isla de esta variable como “dry” (seca). Esta disminución de la humedad relativa en el centro urbano coincide perfectamente con la mayor temperatura observada también para estas zonas en el apartado anterior, puesto que la humedad relativa depende fuertemente de la temperatura. La capacidad de una masa de aire para retener vapor de agua (es decir, la presión de vapor o de saturación) aumenta exponencialmente con la temperatura, siguiendo la ecuación de Clausius-Clapeyron. Es por ello que a concentración de vapor de agua en el aire constante, una mayor temperatura implicará una humedad relativa menor, puesto que ese mismo aire es capaz de almacenar mayor cantidad de agua en estado gaseoso antes de alcanzar la saturación (100% de HR). En este sentido, todo parece indicar que una de las principales causas de esta UDI no es sino la propia existencia en primer lugar de una UHI y es que al incrementarse la temperatura del aire urbano, la humedad relativa disminuirá aunque el contenido absoluto de vapor se mantenga constante o incluso sea ligeramente superior. Esta relación inversa ha

sido ampliamente estudiada también en otras ciudades con climas templados como Pekín (Liu et al., 2009).

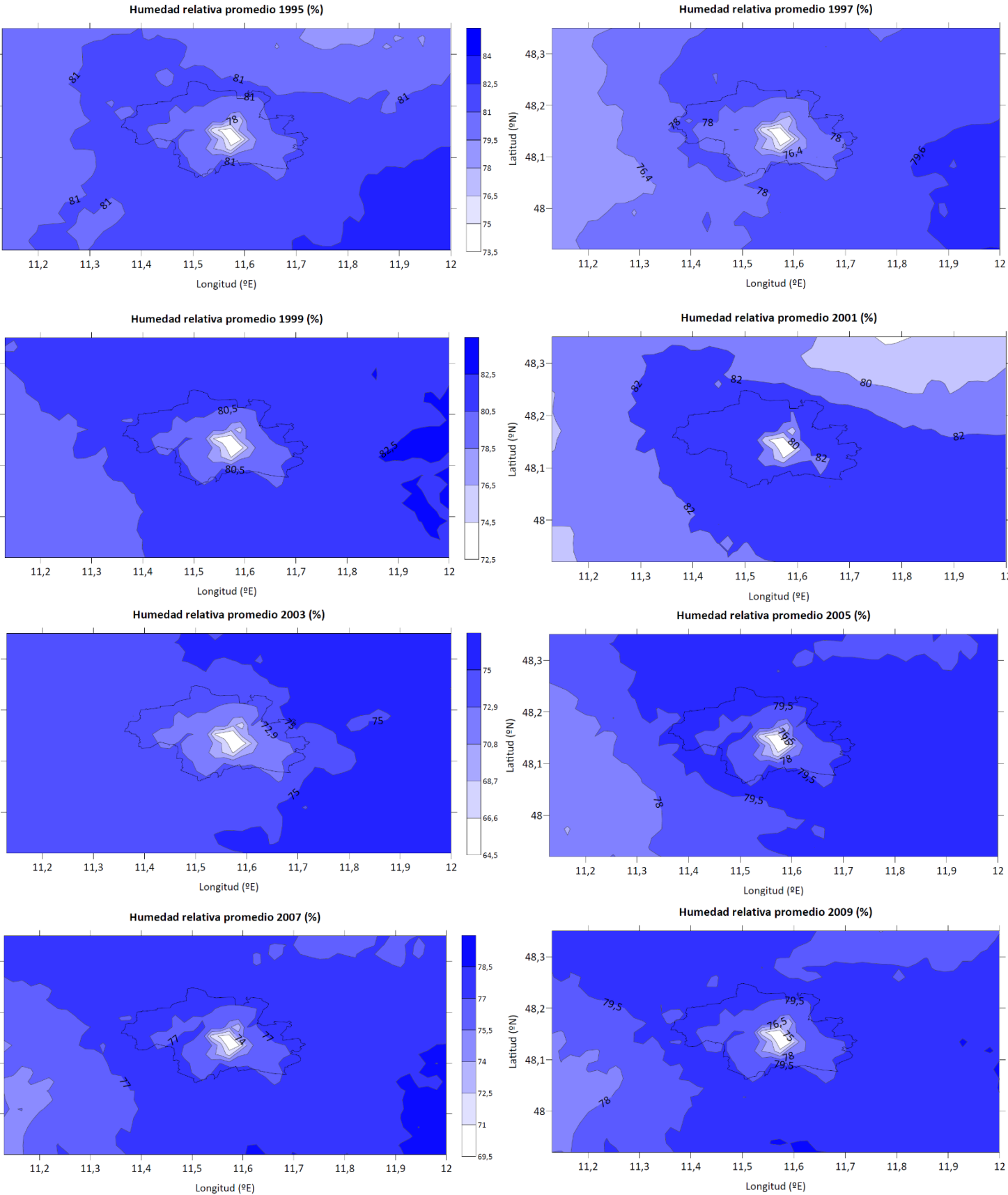


Figura 6. Mapas de isolíneas del promedio anual de la humedad relativa de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007 y 2009.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la humedad relativa no solo es dependiente de la temperatura sino que atendiendo a la propia definición de ella, que es la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que es capaz de retener a esa temperatura antes de alcanzar la saturación expresado como un porcentaje, es también dependiente de ese contenido absoluto de vapor de agua (también llamado humedad específica). Se verá más adelante, con el estudio efectuado para el punto de rocío y la concentración de vapor de agua, que esa humedad específica es también ligeramente inferior en las áreas urbanas, producido por diversos factores como una menor presencia de vegetación o de masas de agua en superficie. Esto refuerza la idea de que la isla de calor urbana no solo tiene un impacto directo en el aumento de temperatura sino que afecta a la aparición de un microclima caracterizado entre otras cosas por una reducción de la humedad relativa y del contenido de agua en el aire. Otros estudios similares realizados en otras ciudades han mostrado comportamientos análogos, con disminuciones significativas de la humedad relativa en áreas densamente urbanizadas (Cuadrat et al., 2015; Hage, 1975).

Haciendo un análisis estacional de la magnitud de esta isla urbana “seca” (Tabla an. 1) de manera análoga al efectuado con la temperatura se corrobora de manera general lo que ya se ve en los mapas, valores medios de humedad relativa más bajos en el centro urbano en todas las estaciones, pero también arroja algunos datos que resultan remarcables. En la representación gráfica de estos valores promedio estacionales (Fig. 7) se pueden observar ciertas anomalías en aquellos puntos en los que las líneas correspondientes a los valores del “centro” se sitúan por encima de los valores de las “afueras”.

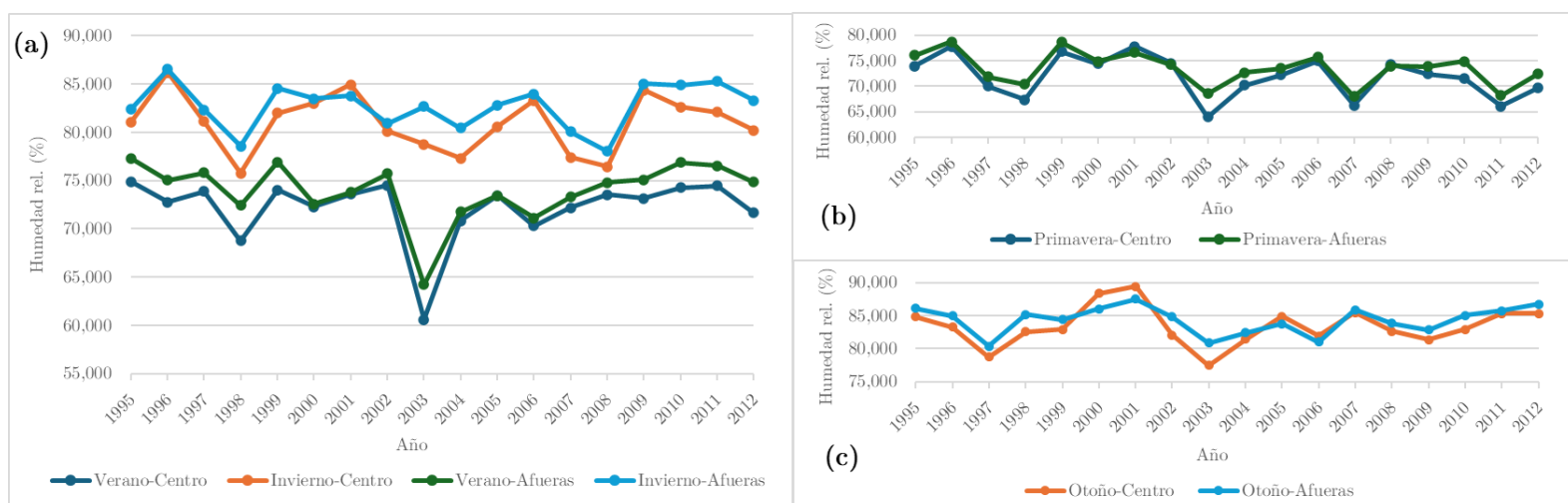


Figura 7. Evolución temporal de la humedad relativa media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño.

Pero estas anomalías no son anomalías reales si con ellas se entiende que en esos puntos no se está dando el fenómeno de isla. Los mapas de isolíneas restringidos a estos puntos mal llamados “anómalos” (Fig an. 2) siguen mostrando una forma de isla, con los valores mínimos en el centro de la ciudad. Esto es debido a la forma que ha adoptado la UDI en estos periodos concretos, con una concentración de los valores mínimos en el centro bastante compacta y una disposición de los valores máximos de la humedad inmediatamente contigua a estos y no necesariamente en los extremos del

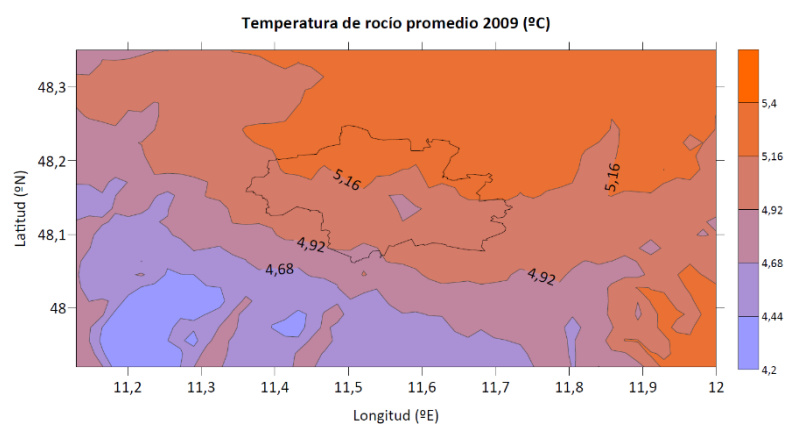
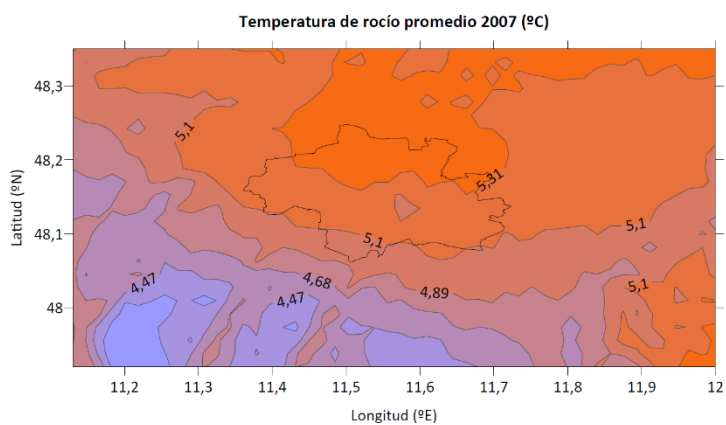
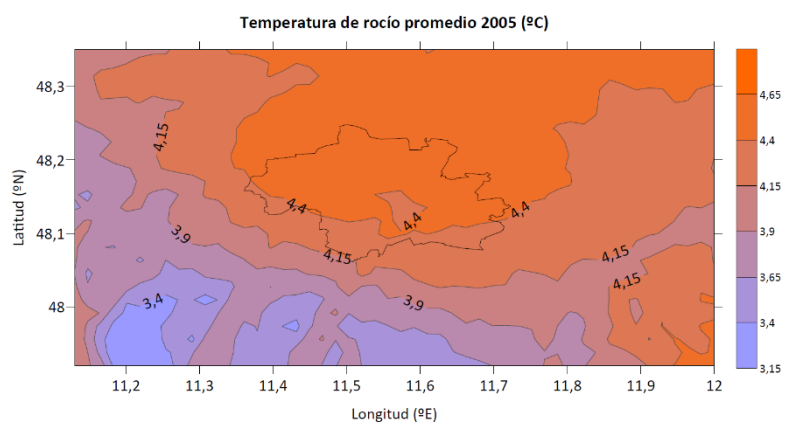
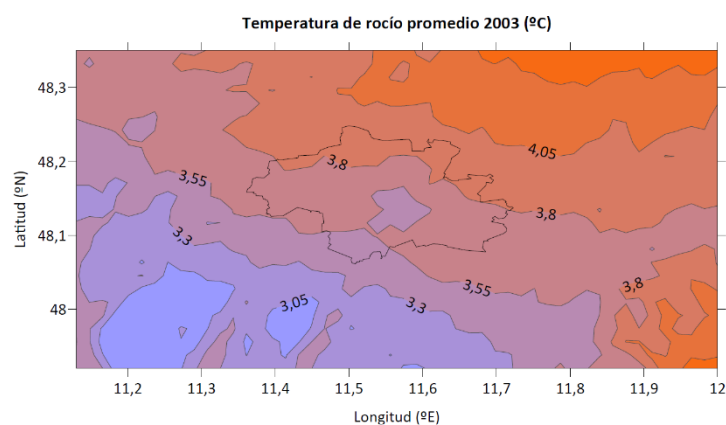
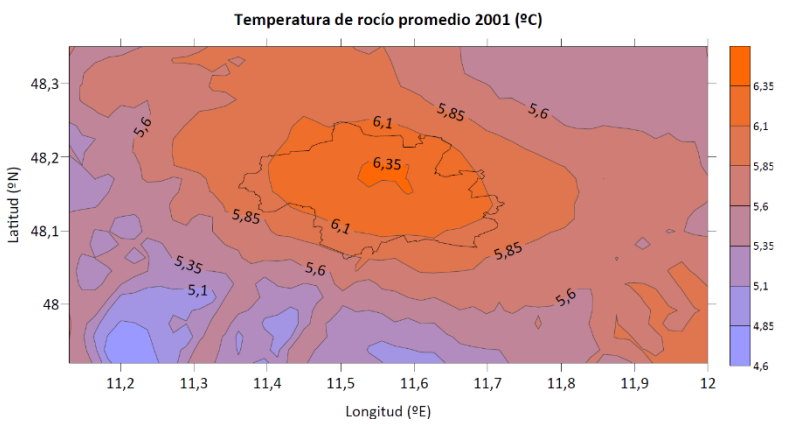
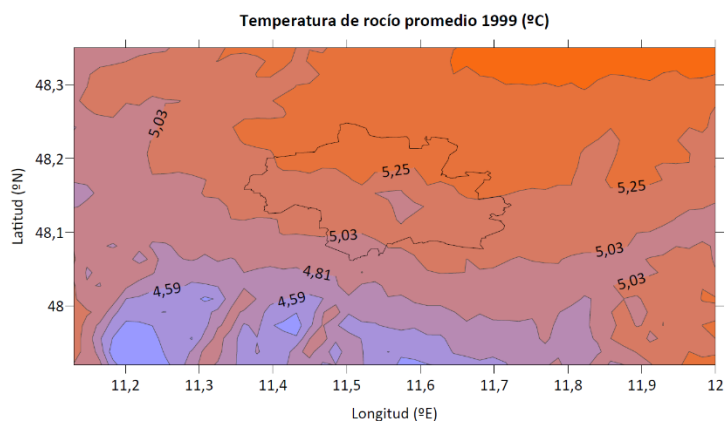
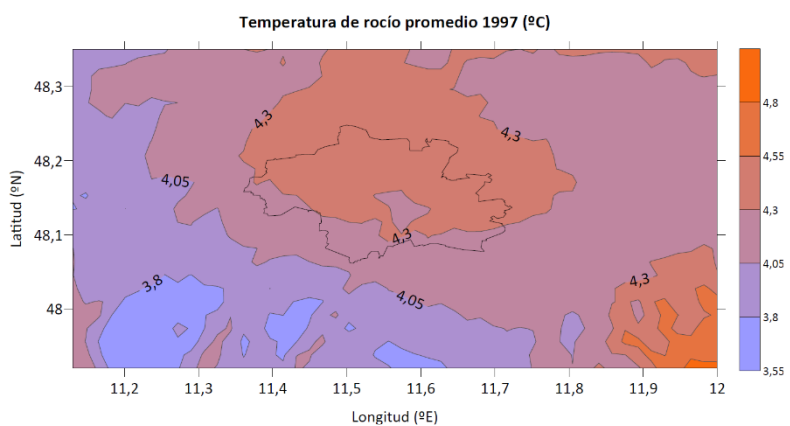
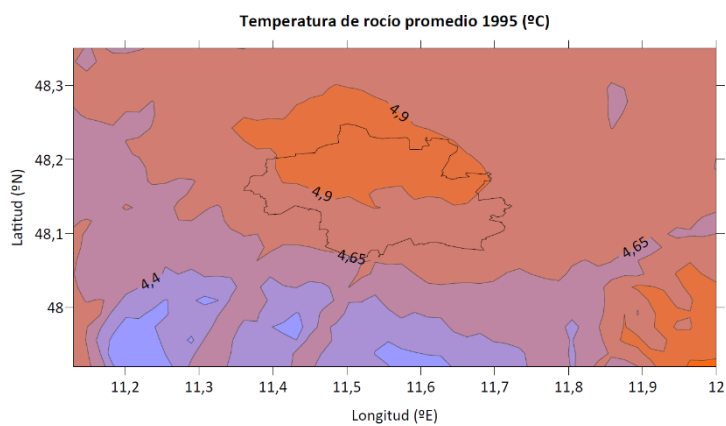
mapa espacial bajo estudio. Como el método usado para el cálculo de estos promedios en las afueras y en el centro se basa en la elección de 3 puntos más o menos céntricos correspondientes a la ciudad y otros 3 situados en los extremos correspondientes a las afueras, si se da una situación como la de este caso en la que hay valores máximos más o menos próximos a los puntos céntricos y en los puntos de las afueras no se están dando los valores máximos sino más bien intermedios, se puede llegar a las anomalías vistas ya que ni el promedio del “centro” representa el valor mínimo realmente ni el de las “afueras” el máximo. En este caso ambos promedios representan en realidad valores intermedios cercanos entre sí. Tan cercanos que si ocurre, por ejemplo, lo que se dio en otoño del 2000, de tener una pequeña concentración de valores de la humedad bajos (similares a los que se dan en la isla seca del centro) justamente en uno de los 3 puntos considerado como afueras (en concreto el punto 11,197 °E , 47,921 °N), se llegan a invertir los 2 promedios situándose la media del centro por encima de la de las afueras originando estas falsas anomalías.

Dejando de lado estos puntos, el comportamiento general es el de una isla seca urbana. En este caso no se ha podido analizar la tendencia con una regresión lineal porque no era estadísticamente significativa, ni siquiera al 10%, pero el hecho de que las diferencias se mantengan más o menos constantes a lo largo de las estaciones y de los años en el periodo 1995-2012 bajo estudio hace descartar la idea de que se pueda tratar de un fenómeno puntual. Durante el invierno, las condiciones frías y otros factores contribuyen a reunir los valores absolutos más altos de la humedad relativa de forma generalizada. Aun así el centro urbano continúa mostrando persistentemente valores de esta humedad ligeramente inferiores a los de sus alrededores, confirmando que la UDI no es tampoco un hecho estacional.

La constancia del gradiente higrométrico a lo largo del tiempo y de las estaciones sugiere que este componente de la isla meteorológica urbana es tan estructural como el térmico, de manera que depende mucho más del propio entorno urbano que de las condiciones climáticas específicas.

3.3. Temperatura de rocío

Ahora pasando a una variable cuya isla meteorológica urbana ha sido mucho menos estudiada que las 2 anteriores se encuentra la temperatura de rocío. Es posible que haya sido menos estudiada por sí sola ya que en realidad la temperatura de rocío, por definición, tiene una fuerte dependencia con la humedad relativa y la temperatura. Y así lo delatan los mapas para esta (Fig. 8 y Fig. an. 4) que muestran en la mayor parte de los casos también una pequeña isla urbana en el centro que concentra valores más bajos del punto de rocío que los que hay inmediatamente a su alrededor.



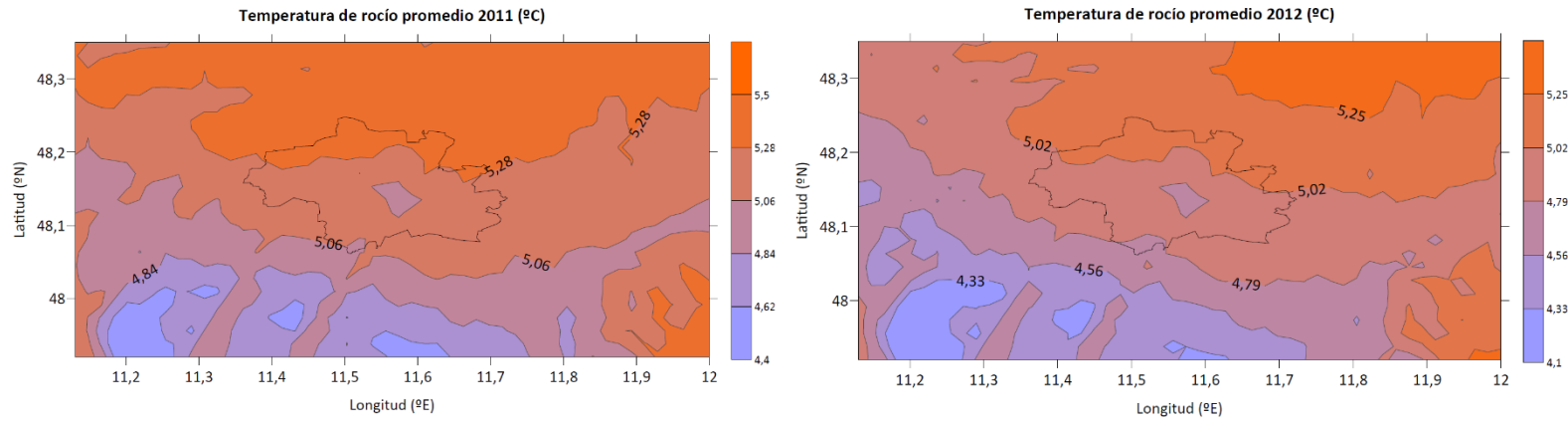


Figura 8. Mapas de isolíneas del promedio anual del punto de rocío de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012.

Este comportamiento general encaja con el esperado si se toma como referencia la aproximación encontrada por Lawrence (2005) para la dependencia del punto de rocío (T_d) con la temperatura (T) y la humedad relativa (RH):

$$T_d \approx T - \left(\frac{100 - RH}{5} \right) \quad (2)$$

Donde T_d y T están en grados Celsius y RH en tanto por ciento. Cabe recalcar como detalla en su propio trabajo Lawrence (2005) que esta fórmula es una aproximación, la cual se acerca más al comportamiento real para valores de la humedad relativa superiores al 50%. La representación de esta relación (Fig. 9) resulta de utilidad para analizar cuál debería de ser el comportamiento de la temperatura de rocío en función de los resultados hallados para las UHI y UDI.

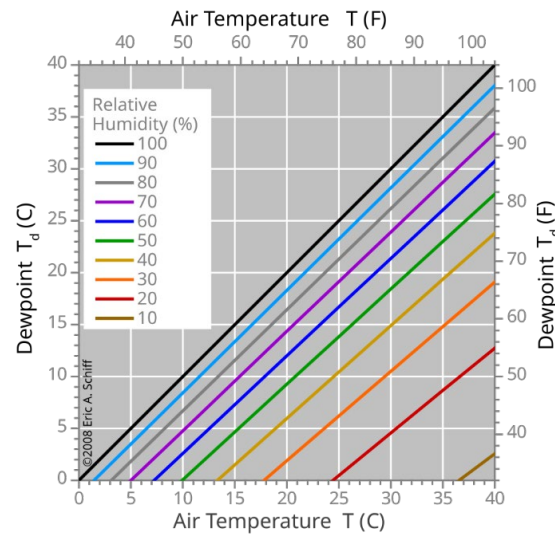


Figura 9. Dependencia del punto de rocío con la temperatura para distintos valores de la humedad relativa (Easchiff, 2008).

Observando esta gráfica se puede hacer el análisis cualitativo de que si la diferencia de temperatura entre el centro y las afueras no es muy grande comparada con la diferencia en la humedad relativa entonces para el punto de rocío se tendrá que hay valores más bajos en el centro que en las afueras. Definiendo ΔT_d , ΔT y ΔRH como la diferencia entre los valores de la isla central y los que están inmediatamente a su alrededor del punto de rocío, temperatura y humedad relativa, respectivamente, se tiene entonces que para la situación antes detallada $\Delta T_d < 0$. Así haciendo uso de la aproximación (Ec. 2) esto ocurre cuando:

$$\Delta T < \left(-\frac{\Delta RH}{5} \right) \quad (3)$$

Donde, tal y como se ha visto en los mapas para estas 2 variables, ΔT es siempre positivo puesto que hay una isla caliente central y ΔRH es siempre negativo puesto que lo que existe en este caso es una isla “seca”.

La situación contraria de tener una isla para el punto de rocío con valores más altos en el centro que en las afueras (es decir $\Delta T_d > 0$) se dará cuando:

$$\Delta T > \left(-\frac{\Delta RH}{5} \right) \quad (4)$$

Y finalmente cuando estos 2 términos de la desigualdad sean comparables entre sí esta teoría aproximada que se ha desarrollado anticipa que no debería de formarse isla, puesto que, en ese caso, $\Delta T_d \sim 0$.

Es por esto mismo que, aunque tal y como se ha visto anteriormente, siempre se tenga una UHI y una UDI la situación para la temperatura de rocío no tiene por qué ser siempre la misma, ya que esta no depende del signo de ΔRH y ΔT (que ya se ha visto que es siempre el mismo), sino de la relación entre las magnitudes de las islas de temperatura y humedad. Es decir, aunque para la humedad y la temperatura sí se forme isla (como se ha visto que ocurre), en función de la disposición espacial de los distintos valores, de la forma concreta de esas islas y de la diferencia de los valores entre el centro y los alrededores y como se distribuye espacialmente esa diferencia es posible que no se llegue a formar una isla cerrada como tal para el punto de rocío si todo lo anterior ha derivado en que:

$$\Delta T \sim \left(-\frac{\Delta RH}{5} \right) \quad (5)$$

Esto explica por qué no todos los años se observa el mismo comportamiento para el punto de rocío en cuanto a la isla como sí ocurría con las 2 variables anteriores.

Por otro lado, el estudio de la evolución temporal de los promedios estacionales (Fig. 10 y Tabla an. 2) muestra para casi todas las estaciones y años que los valores del centro se sitúan por encima de los de las afueras, comportamiento contrario al realmente observado de manera general en los mapas de isolíneas. La explicación de este suceso es la misma que se dio para los puntos mal llamados “anómalos” de la humedad relativa que se dieron en estas mismas gráficas. Y es que no hay que interpretarlo como errores sino como que la isla que se forma es tan compacta que los puntos definidos como centro no caen enteramente dentro de esta y que además está rodeada de valores máximos del punto de rocío, cayendo valores mínimos en los extremos de la acotación espacial estudiada.

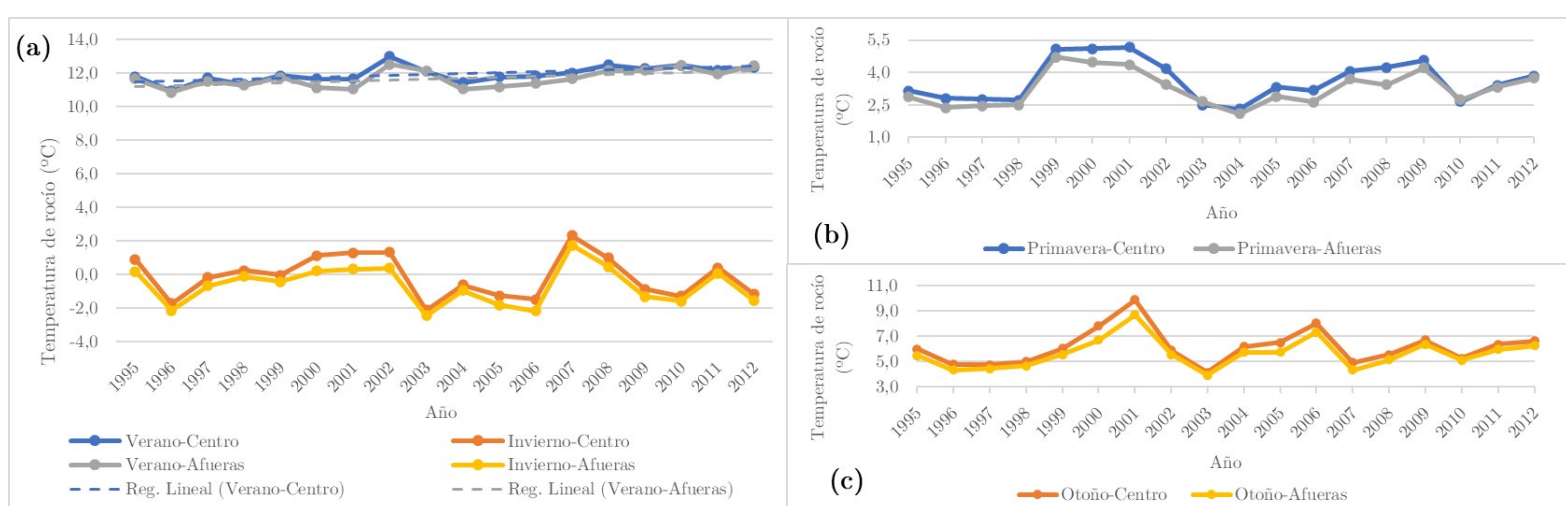


Figura 10. Evolución temporal de la temperatura de rocío media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: *(a)* invierno y verano, *(b)* primavera y *(c)* otoño.

Para el verano ha sido posible encontrar una tendencia ascendente, significativa al 5%, que indica que la temperatura de rocío de las afueras aumenta de media 3 milésimas de grado Celsius más al año que su homóloga del centro, haciendo la diferencia entre las 2 zonas cada vez más pequeña. Este resultado vuelve a evidenciar la expansión urbana a lo largo de los años.

Aunque estas gráficas no son útiles para determinar si se da o no isla y de qué manera, sí que lo son para observar que, en general, hay una concentración de valores más altos en la zona central del área bajo estudio y que los valores más bajos se encuentran en los límites. Además aporta la información de que ambos conjuntos de datos (centro y afueras) siguen la misma tendencia temporal. Es decir, reaccionan más o menos de la misma manera a las variaciones meteorológicas y ello se plasma en que las 2 curvas son aproximadamente paralelas entre sí, especialmente en el verano y el otoño. Además no se aprecia una clara tendencia ascendente o descendente global

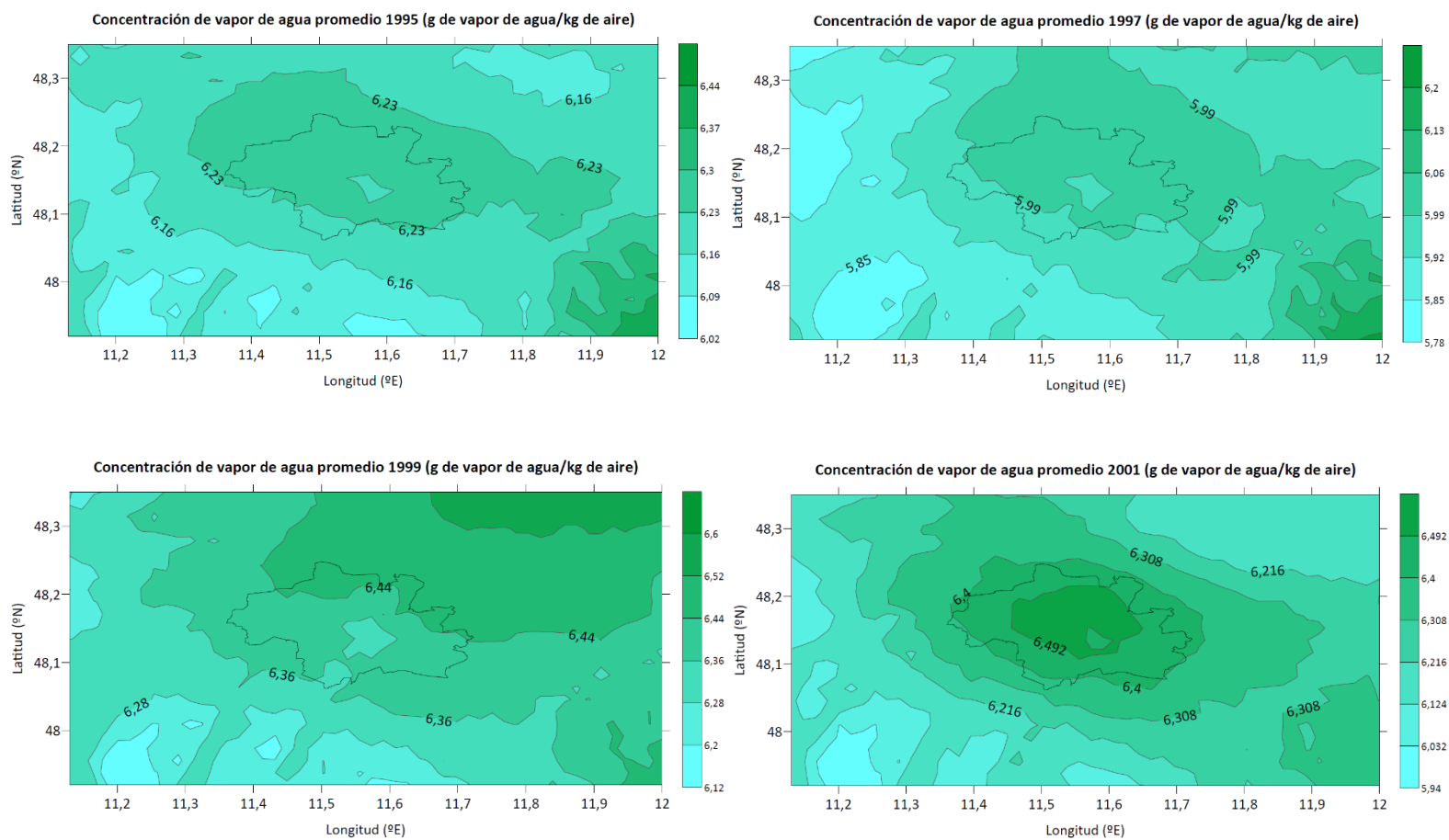
El hecho de que el comportamiento del punto de rocío en el entorno urbano no sea consistente a lo largo de todo el periodo como en los 2 casos anteriores permite deducir que la isla de esta variable es mucho más dependiente de la climatología concreta. Si bien en la mayor parte de los casos existe esa zona en el centro urbano con valores bajos del punto de rocío encerrada por otros más altos que permite inferir que sí que hay cierta influencia del paisaje urbanístico, también sugiere que esta relación no es tan robusta como lo era en el caso de la temperatura o la humedad relativa. Es por eso que, bajo ciertas condiciones meteorológicas, la influencia de la ciudad sobre el punto de rocío puede llegar a contrarrestarse.

3.4. Concentración de vapor de agua

La concentración de vapor de agua se encuentra íntimamente relacionada con las dos anteriores, la humedad relativa y el punto de rocío, y así lo refleja su análisis. Derivado de los datos entre 1995 y 2012, ofrece información clave sobre los contrastes higrométricos urbanos y rurales en Múnich. La representación espacial anual promediada (Fig. 11 y Fig. an. 5) muestra de forma clara un patrón en

el que las zonas más céntricas de la ciudad tienden a registrar valores más bajos de concentración absoluta de vapor de agua respecto a las áreas periféricas más próximas. En este caso, la isla urbana central recoge valores intermedios-bajos rodeada de otros más altos. El comportamiento es muy parecido al del punto de rocío en cuanto a que en esa isla central no se registran los valores mínimos ni la disposición espacial de la variable es concéntrica con un gradiente más o menos constante como ocurre con la temperatura y la humedad relativa.

Esta diferencia en la cantidad de vapor de agua se puede atribuir a diversos factores. Uno de ellos es el hecho de que los entornos urbanos, en general, se caracterizan tanto por la ausencia de masas de agua importantes como de superficies permeables, así como por una reducción de áreas verdes respecto a sus entornos rurales. Esto restringe en gran medida la evapotranspiración, que es el principal mecanismo por el cual se reintroduce en la atmósfera vapor de agua procedente de las masas de agua líquida de la superficie terrestre. Los materiales con los que se construyen los diversos elementos urbanos, como el asfalto o el hormigón, almacenan calor que ayuda a la evaporación (Oke, 1982), pero como no son capaces de retener ni liberar agua, no hay agua que evaporar, lo que se traduce en una isla urbana seca en términos absolutos.



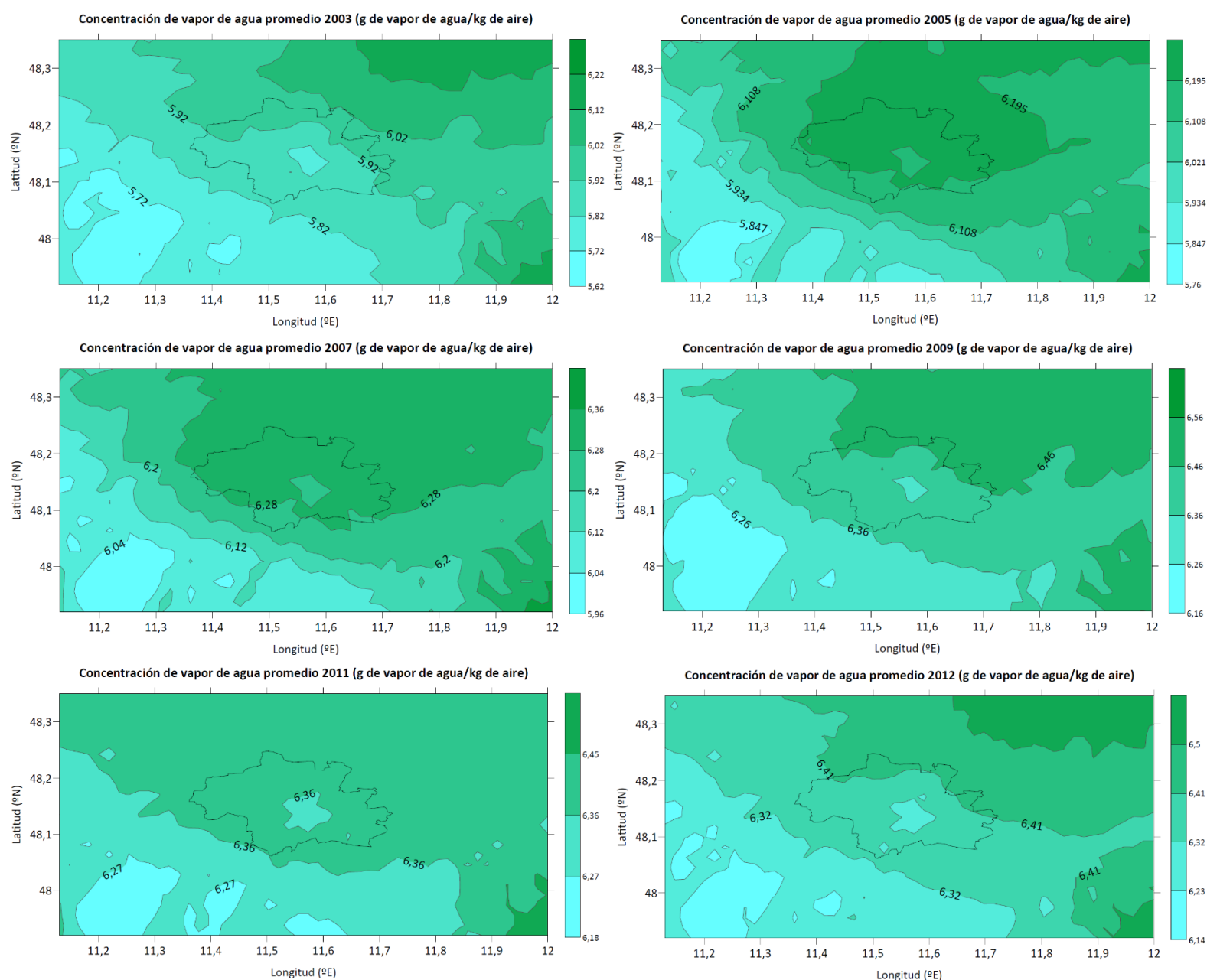


Figura 11. Mapas de isolíneas del promedio anual de la concentración de vapor de agua de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012.

Otro factor relevante es la reducción de la velocidad del viento en el centro urbano, tal como se verá en la siguiente sección. Esta disminución limita el transporte de masas de aire más húmedas desde zonas periféricas o rurales, contribuyendo a una atmósfera urbana más seca. Así, el aire se queda relativamente estancado y seco en el centro, especialmente durante periodos de estabilidad atmosférica.

Los promedios estacionales en las afueras y en el centro (Tabla 2) muestran en la mayor parte de los casos unos mayores valores de concentración en el centro que en las afueras.

Tabla 2. *Concentración de vapor de agua promedio estacional (g vapor de agua/kg de aire) en el centro de la ciudad y en sus afueras.*

AÑO	CENTRO				AFUERAS			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1995	4,66	5,33	9,38	6,54	4,52	5,28	9,37	6,38
1996	3,93	5,33	8,81	5,87	3,85	5,19	8,82	5,74
1997	4,31	5,13	9,29	6,00	4,20	5,06	9,21	5,97
1998	4,45	5,14	9,08	6,18	4,38	5,13	9,10	6,12
1999	4,43	6,06	9,37	6,64	4,35	5,97	9,38	6,52
2000	4,76	6,12	9,28	7,28	4,51	5,90	9,02	6,81
2001	4,71	6,11	9,31	6,87	4,44	5,79	9,00	6,38
2002	4,82	5,77	10,11	6,32	4,60	5,49	9,88	6,27
2003	3,91	5,24	9,51	5,64	3,89	5,32	9,61	5,62
2004	4,22	4,98	9,16	6,58	4,17	4,92	8,98	6,41
2005	4,14	5,52	9,36	6,84	4,02	5,39	9,10	6,52
2006	4,10	5,39	9,44	7,47	3,96	5,26	9,24	7,19
2007	5,04	5,63	9,49	6,01	4,90	5,52	9,33	5,83
2008	4,70	5,82	9,76	6,33	4,54	5,53	9,63	6,20
2009	4,24	5,86	9,68	6,78	4,18	5,78	9,68	6,71
2010	4,09	5,21	9,76	6,13	4,06	5,27	9,84	6,11
2011	4,53	5,39	9,61	6,73	4,48	5,39	9,56	6,61
2012	4,29	5,52	9,74	6,71	4,20	5,52	9,86	6,63

Así queda plasmado en la representación gráfica de estos datos (Fig. 12), donde las líneas correspondientes a las afueras, salvo en determinados años y estaciones, se sitúan por debajo de las líneas correspondientes a los valores del centro. Nuevamente, y tal y como ocurrió con el punto de rocío, los resultados que arroja este estudio no permiten evidenciar la existencia de la zona que se ha observado en los mapas, coincidente con los sectores más céntricos de la ciudad donde la concentración de vapor de agua es menor que en su periferia más próxima.

Y se puede hacer una deducción análoga a la que se hizo con el punto de rocío, y si bien no permite constatar la existencia de la isla urbana, sí es válida para extrapolar junto con lo observado en los mapas de isolíneas, que la distribución espacial no es concéntrica sino que en la isla los valores registrados son valores intermedios, que no mínimos, rodeados de valores mayores.

La evolución lineal para el verano ha arrojado un aumento de la humedad específica de 0,035 g/kg de aire por año para el centro frente a los 0,0378 g/kg de aire de las afueras. Es decir, hay una tendencia conjunta de crecimiento de la concentración de vapor de agua, al menos en verano, y dentro de ella, y tal y como se ha observado para la temperatura y el punto de rocío, un acercamiento paulatino de los valores de las afueras hacia los del centro. Esto no implica que la isla tienda a desaparecer sino que esta se puede estar expandiendo, de manera que los puntos considerados como afueras, con el crecimiento de la urbe, están cada vez más cerca de pertenecer a la ciudad y no al entorno rural.

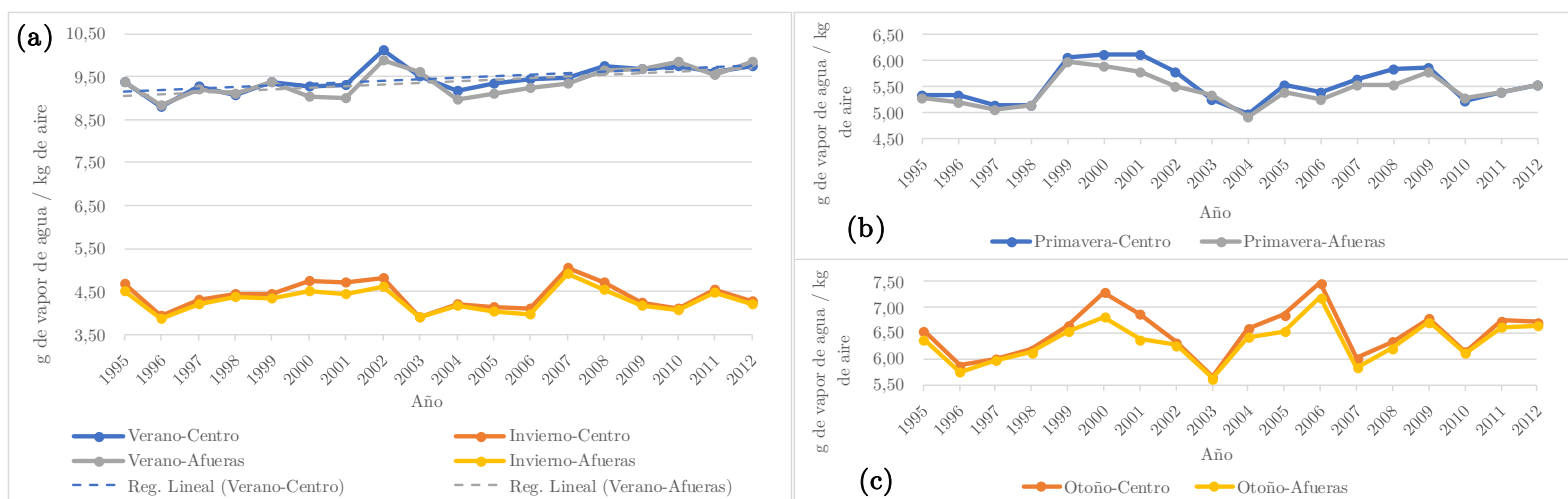


Figura 12. Evolución temporal de la concentración de vapor de agua media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño.

Además es útil también para concluir que en general los 2 conjuntos de datos (centro y afueras) siguen la misma tendencia y que en momentos más húmedos o más secos los promedios aumentan o disminuyen más o menos en la misma cantidad, así como para extraer que, por lo menos, en este periodo de 15 años no se aprecia una tendencia global en cuanto a la humedad específica se refiere sino que se mantiene oscilante con sus picos en torno a un valor medio.

Resulta de importancia recalcar que para esta variable los valores mínimos se han venido registrando mayoritariamente en la zona suroeste. Un breve análisis al tipo de terreno de la acotación espacial bajo estudio (Fig. 13) desvela en esta área la existencia de 2 masas de agua continental en forma de 2 lagos.

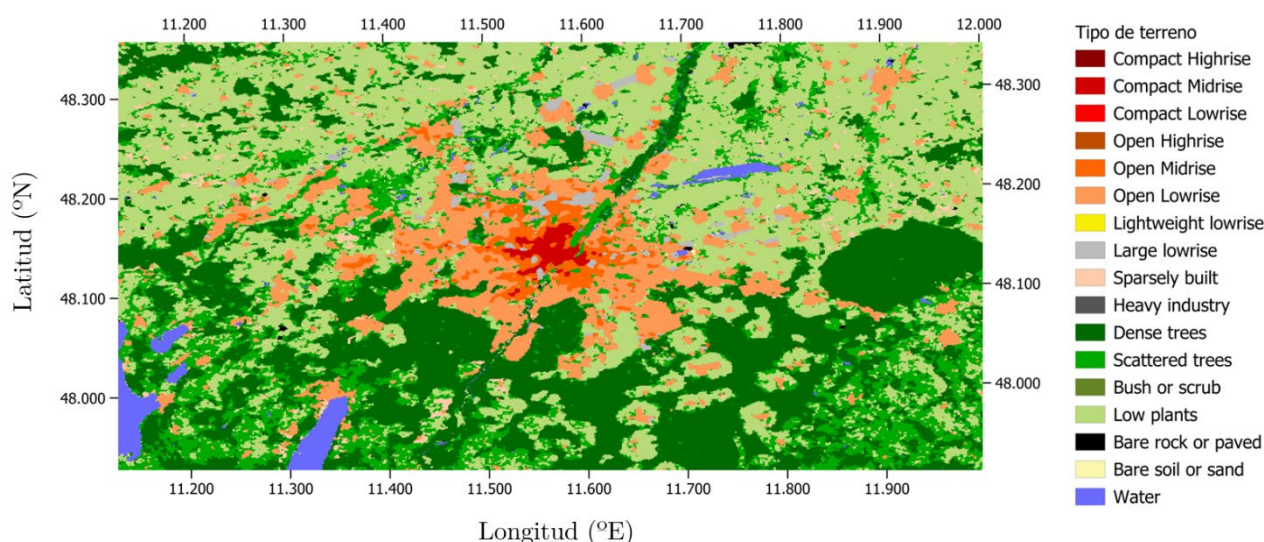


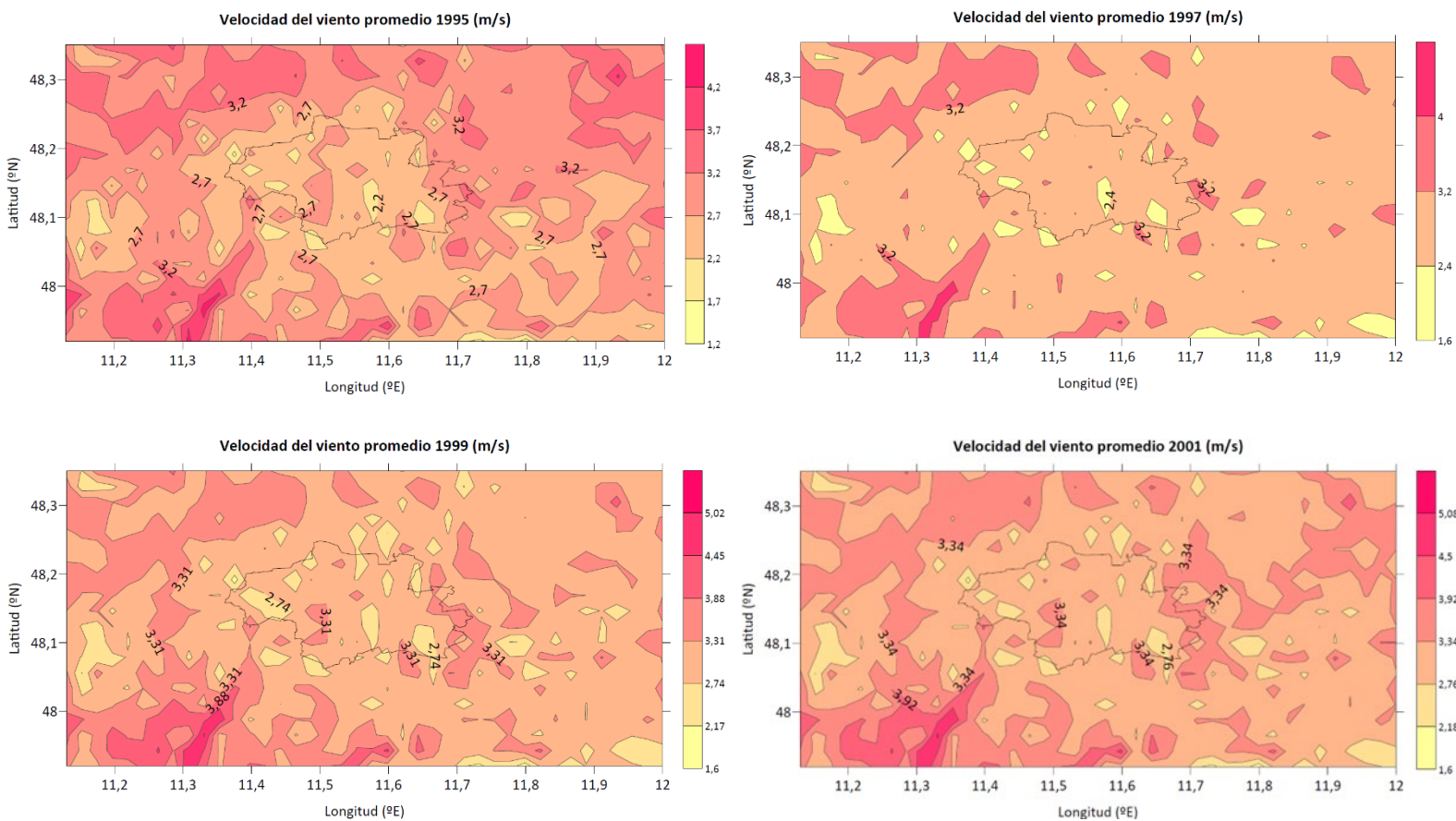
Figura 13. Mapa de Múnich con la clasificación por uso del suelo creado a partir de imágenes satelitales de 2019 mediante el modelo LCZ (Local Climate Zones) (Demuzere, 2021).

Este comportamiento, aunque en apariencia contraintuitivo dado que los lagos son fuentes de evaporación, puede explicarse por una combinación de factores termodinámicos y dinámicos locales. Uno de ellos es la propia temperatura, que como ya se ha visto, toma también valores mínimos en esta zona, y cuanto menor es la temperatura del aire menor es la capacidad de este para retener agua en forma de vapor.

3.5. Velocidad del viento

El último parámetro a analizar se trata de la velocidad del viento, medida a 2 m del suelo. Es de esperar que el paisaje urbano afecte de alguna manera a esta variable y de hecho así ocurre, tal y como reflejan los mapas de isotacas (Fig. 14 y Fig. an. 6).

En este caso los mapas de isotacas son mucho más difusos y presentan muchos más contornos y zonas que el resto de variables meteorológicas anteriores, hasta el punto de que resulta difícil encontrar un comportamiento de isla urbana. Aun así, se puede llegar a ver una pequeña isla en el centro del mapa en todos los casos que recoge los valores mínimos y también cómo el máximo de velocidad del viento se da de manera sistemática en los extremos del mapa, especialmente en la zona suroeste, y nunca en el área correspondiente a suelo urbano.



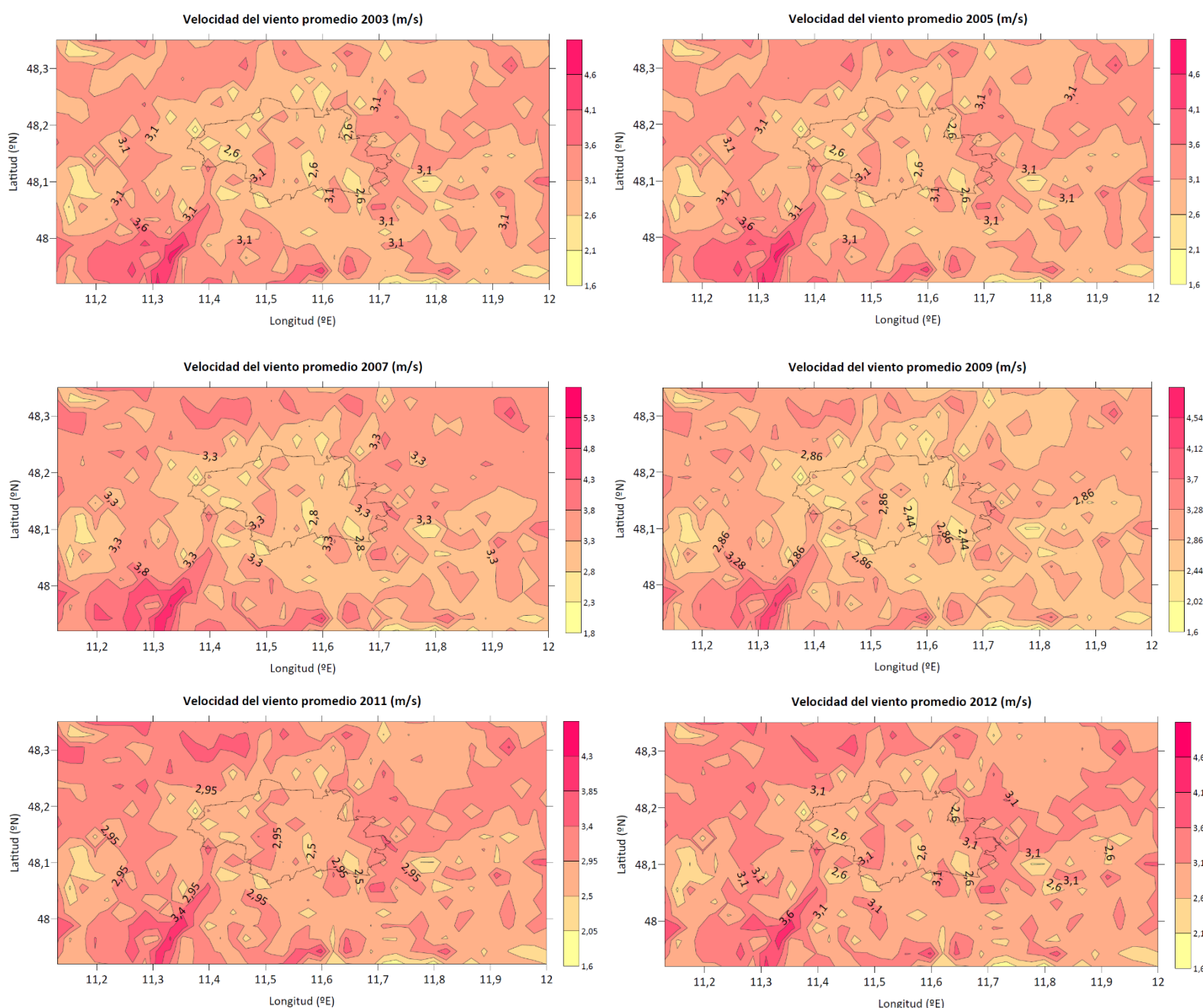


Figura 14. Mapas de isotacas del promedio anual de la velocidad del viento de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012.

Para comprender por qué estos mapas toman estas formas hay que tener en cuenta que la velocidad del viento, al contrario que el resto de variables, es altamente influenciada de manera local por el paisaje. Cuando el viento se encuentra un obstáculo como un edificio este se frena y cambia de dirección drásticamente, por lo que las edificaciones y orografía que tenga alrededor la estación en la que se realiza la medida afectarán en gran medida al resultado que se obtiene. Por ejemplo, es de esperar que la medida de la velocidad recogida por una estación que se encuentra en un espacio más abierto (como puede ser una plaza) sea completamente distinta a la recogida por una situada detrás de un edificio a resguardo de ese viento. Esto explica el porqué los mapas toman formas tan irregulares para esta variable.

La pequeña isla que se forma consistentemente durante todo el período resulta estar completamente incluida en la zona “Compact Midrise”, lo que parece indicar que cuanto más densidad de edificaciones hay y por lo tanto más laberíntico es el camino del viento, más se frena este. Este tipo de hechos han sido confirmados en otras ocasiones, como el trabajo desarrollado por Rotach et al. (2005) en el que se detalla cómo los distintos edificios, calles y alturas afectan en gran medida a la dinámica del viento.

Los datos por estaciones (Tabla 3) muestran en casi todos los casos una velocidad del viento promedio menor en el centro que en las afueras. Y así queda reflejado también en su representación gráfica (Fig. 15), donde las líneas de los datos del centro se sitúan por debajo de las correspondientes a las afueras para las 4 estaciones excepto para los veranos de 2010, 2011 y 2012.

Tabla 3. *Velocidad del viento a 2 m del suelo en m/s promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras.*

AÑO	CENTRO				AFUERAS			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1995	3,13	3,02	2,09	2,04	3,67	3,53	2,46	2,49
1996	2,11	2,11	2,17	2,50	2,56	2,49	2,52	2,88
1997	2,74	3,09	2,52	2,46	2,88	3,39	2,64	2,64
1998	2,94	3,24	2,69	3,30	3,22	3,52	2,86	3,67
1999	3,50	3,06	2,63	2,64	3,82	3,31	2,76	2,90
2000	3,46	3,26	2,81	2,53	3,73	3,53	2,93	2,78
2001	3,01	3,29	2,78	2,98	3,30	3,59	2,94	3,26
2002	3,79	3,12	2,72	2,98	4,14	3,38	2,91	3,34
2003	3,06	3,08	2,64	2,84	3,36	3,31	2,82	3,23
2004	3,46	2,98	2,86	3,03	3,85	3,21	3,11	3,37
2005	3,39	3,02	2,74	2,40	3,74	3,33	2,99	2,69
2006	2,87	3,48	2,83	2,79	3,21	3,89	3,09	3,14
2007	3,71	3,20	2,88	2,82	4,31	3,64	3,21	3,26
2008	2,94	3,39	2,52	2,52	3,38	3,84	2,77	2,83
2009	2,77	3,11	2,62	2,52	3,11	3,48	2,73	2,62
2010	2,91	3,27	2,76	2,78	2,98	3,34	2,74	2,87
2011	2,79	2,92	2,80	2,42	2,88	2,96	2,79	2,51
2012	3,51	2,79	2,81	2,41	3,64	2,80	2,79	2,47

Estas excepciones son falsas anomalías producidas por la forma concreta de la isla en esos periodos temporales y por el propio método usado para el estudio de esos promedios, de manera análoga a lo que ha pasado con la humedad relativa o la concentración de vapor. Y así se puede corroborar con los mapas de isotacas correspondientes a esos 3 veranos (Fig. an. 7), que muestran comportamientos muy parecidos al del resto de periodos temporales, con una pequeña zona en el centro del mapa con velocidades bajas y valores máximos en los extremos, especialmente en la zona suroeste de la región.

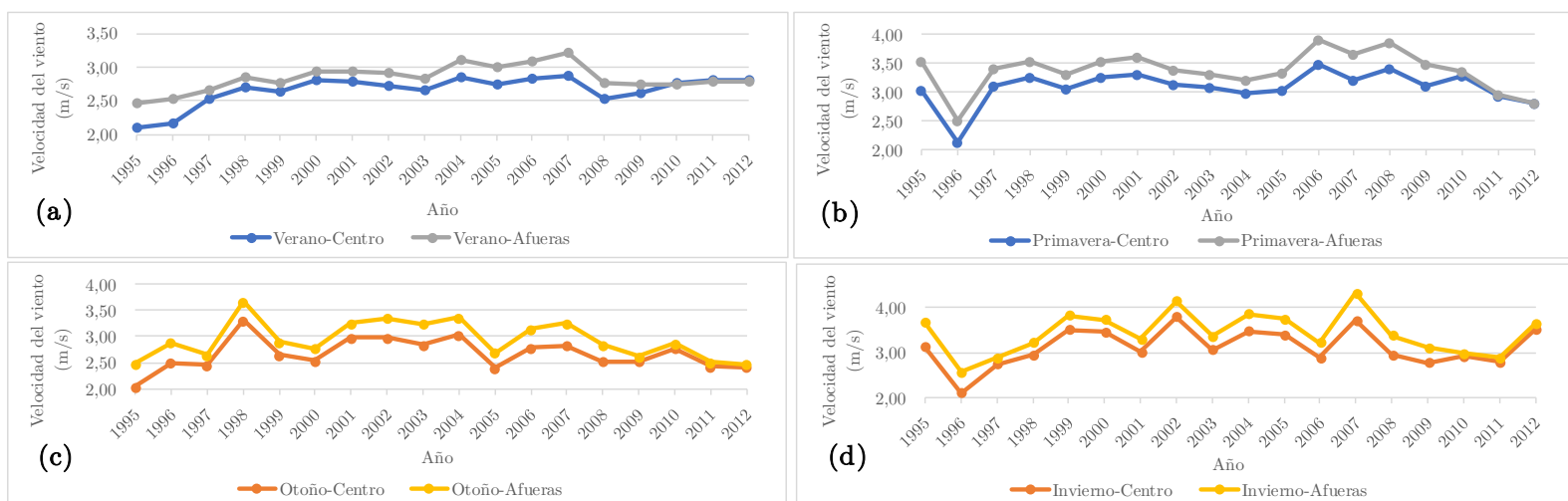


Figura 15. *Evolución temporal de la velocidad del viento media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) verano, (b) primavera, (c) otoño e (d) invierno.*

De esta evolución estacional también se extrae que las velocidades máximas se dan a lo largo del invierno y la primavera, mientras que el verano registra los promedios más bajos en términos absolutos. Esto resulta coherente si se atiende al clima que rige habitualmente en Europa Central, caracterizado por un mayor paso de frentes y borrascas durante el invierno que traen consigo aumentos en la velocidad del viento. Sin embargo, durante el verano es común que impere un tiempo estable asociado a anticiclones que no generan vientos excesivos. Y aún cuando se registran los valores mínimos de velocidad del viento, si bien hay un cierto debilitamiento de la magnitud de la isla urbana asociada a esta variable, el fenómeno producido por la urbe sigue siendo muy significativo. La diferencia media entre el centro de la ciudad y las afueras (donde se han excluido de este cálculo los 3 últimos años en los que se produjeron falsas anomalías) se sitúa en 0,36 m/s en invierno mientras que en verano alcanza los 0,22 m/s. Es decir, la diferencia es aproximadamente un 40% inferior durante los periodos de menor velocidad del viento con respecto a los periodos de máximos de esta.

Además, la menor velocidad del viento en el centro de la ciudad tiene también impacto en las otras variables estudiadas ya que como ejemplo, se reduce la capacidad de transporte de las masas de aire más húmedas del entorno rural hacia las zonas urbanas, lo que contribuye en parte al déficit de concentración de vapor de agua observado anteriormente en la ciudad (y, por ende, también en la humedad relativa y el punto de rocío).

En conclusión, los datos obtenidos para la ciudad de Múnich confirman que las construcciones artificiales de la urbe afectan de manera significativa a la velocidad del viento reduciéndola, lo que a su vez genera de manera inherente también un impacto en el resto de variables. El hecho de que este patrón se haya mantenido sólido durante todo el periodo temporal estudiado refuerza la idea de que el paisaje urbano no solamente afecta a la temperatura y la humedad del aire, sino también a su dinámica.

4. Conclusiones

El análisis espacio-temporal de la isla meteorológica urbana de Múnich realizado ha permitido identificar claras diferencias climáticas entre las zonas propiamente urbanas y sus alrededores rurales para las 5 variables meteorológicas clave estudiadas. Ha sido a través del tratamiento de los datos extraídos entre 1995 y 2012 que se han identificado los diversos rasgos que caracterizan el microclima urbano vinculado a la ciudad alemana.

En primer lugar, la temperatura del aire mostró inequívocamente una isla de calor (UHI) centrada en el núcleo urbano persistente durante todos los años y estaciones. Esta diferencia térmica respecto a los alrededores se ha visto que responde a numerosos factores vinculados a los entornos urbanos. El hecho de que gran parte de estos factores causantes sean características propias de la estructura explica por qué la UHI es más o menos constante a lo largo del año a pesar de las diferencias climáticas estacionales e interanuales.

En segundo lugar, tanto la humedad relativa como la específica, o lo que es lo mismo la concentración de vapor de agua en aire, presentaron también de manera consistente valores más bajos en el centro urbano, formando un microclima más seco en la ciudad, producido principalmente por lo enunciado antes, una escasez de vegetación y de masas de agua accesible así como las superficies permeables que caracterizan el suelo urbano, que reducen la evapotranspiración. En el caso de la humedad específica, la isla que se forma es mucho más pequeña que la de la humedad relativa y parece estar restringida únicamente a los sectores más céntricos de Múnich que según el modelo LCZ corresponde a la zona “Compact Midrise” (zona densa de edificaciones de mediana altura). Esta pequeñez no impide que ambas islas tengan el mismo comportamiento robusto a lo largo de las estaciones y años, tal y como ocurría con la temperatura, lo que implica que estas 3 variables están fuertemente ligadas a la estructura urbana y que las variaciones meteorológicas específicas no hacen variar significativamente la magnitud de sus islas.

Por otro lado, la situación para el punto de rocío fue algo distinta a la anteriores. La relación que se ha visto que guarda con la temperatura y la humedad relativa provoca que, aunque la UHI y la UDI tienen siempre el mismo comportamiento en el sentido de que el centro urbano es siempre más caliente y seco, no se pueda decir lo mismo del punto de rocío. Aunque durante la mayor parte de los años el centro urbano presentó valores más bajos de la temperatura de rocío, la isla en este caso puede anularse o incluso llegar a invertirse en función de la relación que exista entre las islas de temperatura y humedad. Es por eso que la isla del punto de rocío no está tan sólidamente ligada a la morfología urbana de manera que ciertas variaciones en las condiciones meteorológicas pueden enmascarar los efectos que tiene la ciudad sobre esta variable.

Por último, la velocidad del viento presenta una distribución espacial mucho más difusa y deslocalizada, producido principalmente por el gran impacto que tienen los distintos obstáculos en la dinámica del aire. Aun así, los resultados arrojan que de manera sistemática la velocidad del viento en las áreas de la ciudad es menor que en los extremos rurales del espacio estudiado. En cuanto a la variación estacional la diferencia es de hasta un 40% superior en invierno, cuando la velocidad media del viento absoluta presenta sus máximos. En resumen, la ciudad, con sus edificaciones y obstáculos artificiales, ejerce en general una fricción mecánica al viento, el cual ve reducida su velocidad.

En conjunto, el estudio de las 5 variables confirma la existencia para todas ellas, en mayor o menor medida, de diferencias notables entre el centro de la ciudad y sus entornos rurales. En términos generales la ciudad de Múnich es más caliente, más seca y menos ventosa que su periferia, en concreto en torno a 2,4 °C más caliente, 10,5% menos húmeda y la velocidad del viento es 0,31 m/s menor. Las propias islas de cada variable se retroalimentan unas a otras. La menor velocidad del viento dificulta el intercambio de masas de aire más húmedas y frías provenientes de la periferia, lo que amplifica la magnitud de la UDI y la UHI, puesto que el ambiente más seco y caliente de la ciudad se queda estancado en ella. Una menor cantidad de agua en el aire afecta al balance energético de la superficie urbana, favoreciendo mayores temperaturas. La acción combinada de una menor concentración de vapor de agua y una mayor temperatura genera una reducción de la humedad relativa.

En cuanto a la evolución temporal de estas islas, las regresiones que han mostrado resultados significativos parecen indicar una ligera expansión de la influencia de la isla hacia las áreas rurales, pero nada parece indicar que haya una tendencia clara de amplificación o debilitamiento significativo de estas en cuanto a su magnitud, aunque el periodo estudiado de dieciocho años puede ser insuficiente para observar una posible vinculación con fenómenos como el calentamiento global.

Por todo ello, se puede concluir que Múnich presenta de manera combinada una UMI persistente, una isla meteorológica urbana, que genera un microclima en las zonas céntricas de la ciudad, afectando no solo a las características térmica e higrométricas del aire sino también a su dinámica.

Referencias

- Chakraborty, T., Venter, Z. S., Qian, Y., Lee, X., 2022, Lower Urban Humidity Moderates Outdoor Heat Stress, *AGU Advances*, 3 (5), e2022AV000729, <https://doi.org/10.1029/2022AV000729>.
- Cuadrat, J. M., Vicente-Serrano, S., Saz, M. A., 2015, Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Frontiers in Earth Science*, 3, <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010>
- Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B., 2021, LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9:637455, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>.
- Easchiff, 2008, Graph of Dewpoint vs. Air Temperature at Varying Relative Humidities. Based on the Magnus-Tetens approximation., Own work, Commons Wikimedia.
- Hage, K. D., 1975, Urban-Rural Humidity Differences, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 14 (7), pp. 1277-1283, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1277:URHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1277:URHD>2.0.CO;2)
- Huang, X., Song, J., 2023, Urban moisture and dry islands: spatiotemporal variation patterns and mechanisms of urban air humidity changes across the globe, *Environmental Research Letters*, 18(10), 103003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acf7d7>.
- Krähenmann, S., Walter, A., Brien, S., Imbery, F., Matzarakis, A., 2016, *DWD Climate Data Center*, DOI:10.5676/DWD_CDC/TRY_Basis_v001.
- Lawrence, Mark G., 2005, The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86 (2), pp. 225-234, <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
- Liu, W., You, H., Dou, J., 2009, Urban–rural humidity and temperature differences in the Beijing area, *Theoretical and Applied Climatology*, 96, pp. 201-207, <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0024-6>.
- Marucci, D., Carpentieri, M., 2020, Stable and Convective Boundary-Layer Flows in an Urban Array, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 200, 104140, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104140>.
- Müller, N., Kuttler, W., Barlag, A.-B., 2014, Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effects on thermal comfort, *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0890-4>.
- Oke, T. R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., 2005, BUBBLE – an Urban Boundary Layer meteorology project, *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 231–261, <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0117-9>.

- Stewart, I. D., Oke, T. R., 2012, Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Yang, P., Ren, G., Hou, W., 2017, Temporal–Spatial Patterns of Relative Humidity and the Urban Dryness Island Effect in Beijing City, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56 (8), pp. 2221–2237, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0338.1>.
- Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J.W., Ebi, K.L., Bou-Zeid, E., Guan, K., Liu, X., 2018, Interactions between urban heat islands and heat waves, *Environmental Research Letters*, 13 (3), 034003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>.
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., Zhu, C., 2014, Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 152, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.017>.
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., Früh, B., 2016, Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, 135, 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>.

Índice de tablas

1. Temperatura promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras expresada en grados Celsius (°C)	12
2. Concentración de vapor de agua promedio estacional (g vapor de agua/kg de aire) en el centro de la ciudad y en sus afueras	23
3. Velocidad del viento a 2 metros del suelo en m/s promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras	27
Anexa 1. Humedad relativa (%) promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras . .	37
Anexa 2. Punto de rocío promedio (°C) estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras . . .	37

Índice de figuras

1. Grid de 100x50 puntos (Arriba). Grid de 50x25 puntos (Abajo)	7
2. Delimitación espacial de la ciudad de Múnich y puntos seleccionados para el centro y las afueras	8
3. Mapas de isolíneas del promedio anual de la temperatura de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012	9
4. Evolución temporal de la temperatura media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño	11
5. Valor anual de la variable “Magnitud UHI” de 1995 a 2012	12
6. Mapas de isolíneas del promedio anual de la humedad relativa de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007 y 2009	14
7. Evolución temporal de la humedad relativa media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño	15
8. Mapas de isolíneas del promedio anual del punto de rocío de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012	17
9. Dependencia del punto de rocío con la temperatura para distintos valores de la humedad relativa (Easchiff, 2008)	18
10. Evolución temporal de la temperatura de rocío media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño	20
11. Mapas de isolíneas del promedio anual de la concentración de vapor de agua de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012	21
12. Evolución temporal de la concentración de vapor de agua media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) invierno y verano, (b) primavera y (c) otoño	24
13. Mapa de Múnich con la clasificación por uso del suelo creado a partir de imágenes satelitales de 2019 mediante el modelo LCZ (Local Climate Zones) (Demuzere, 2021)	24
14. Mapas de isotacas del promedio anual de la velocidad del viento de los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012	25
15. Evolución temporal de la velocidad del viento media del centro de la ciudad y de las afueras de las diferentes estaciones: (a) verano, (b) primavera, (c) otoño e (d) invierno	28

Anexa 1. Mapas de isolíneas del promedio anual de la temperatura de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010	35
Anexa 2. Mapas de isolíneas del promedio estacional de la humedad relativa en los puntos temporales “anómalos”	36
Anexa 3. Mapas de isolíneas del promedio anual de la humedad relativa de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010	38
Anexa 4. Mapas de isolíneas del promedio anual del punto de rocío de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010	39
Anexa 5. Mapas de isolíneas del promedio anual de la concentración de vapor de agua de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010	40
Anexa 6. Mapas de isotacas del promedio anual de la velocidad del viento de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010	41
Anexa 7. Mapas de isotacas del promedio estival de la velocidad del viento en los puntos temporales “anómalos” de 2010, 2011 y 2012	42

Material complementario

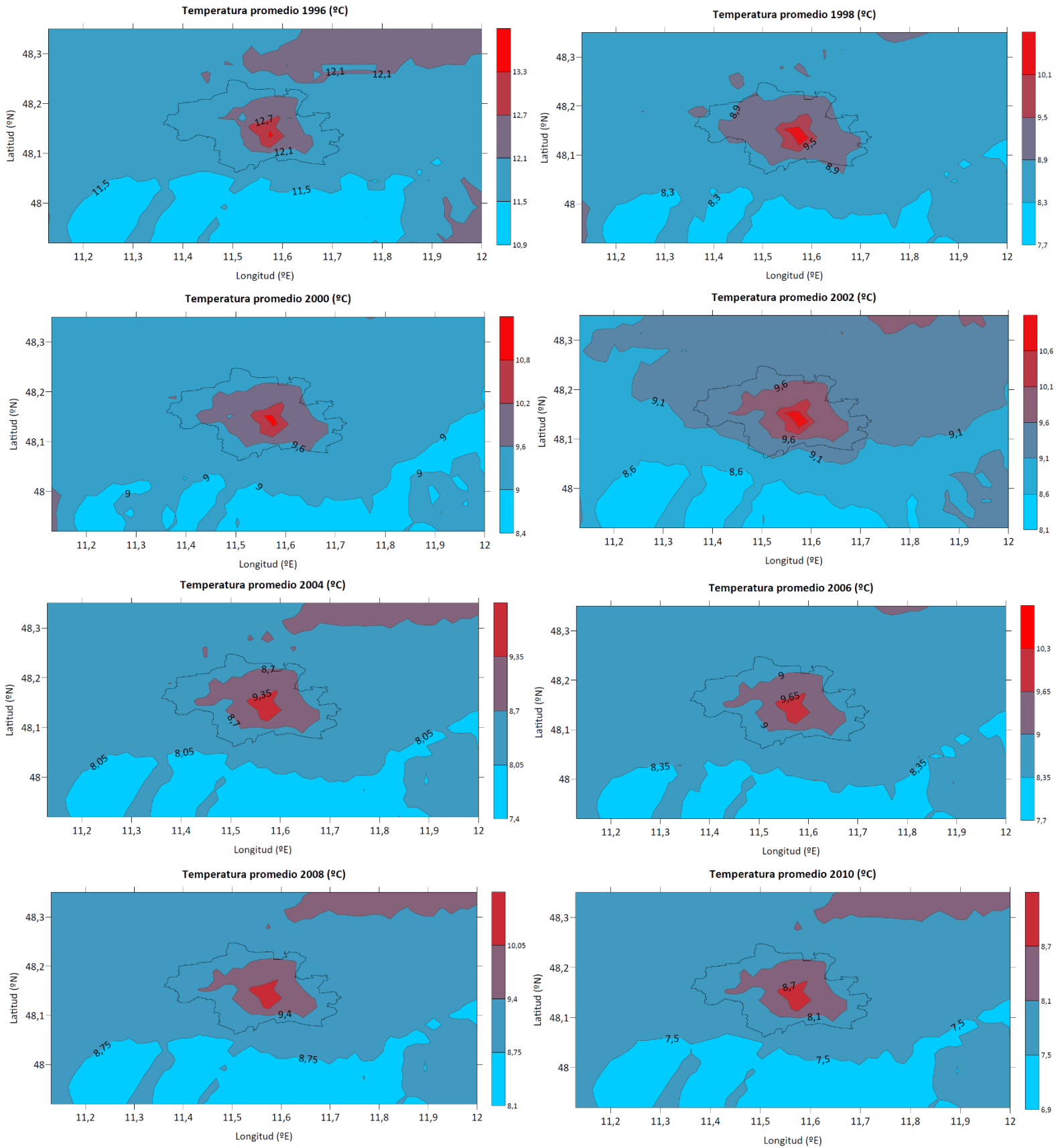


Figura anexa 1. Mapas de isolíneas del promedio anual de la temperatura de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010.

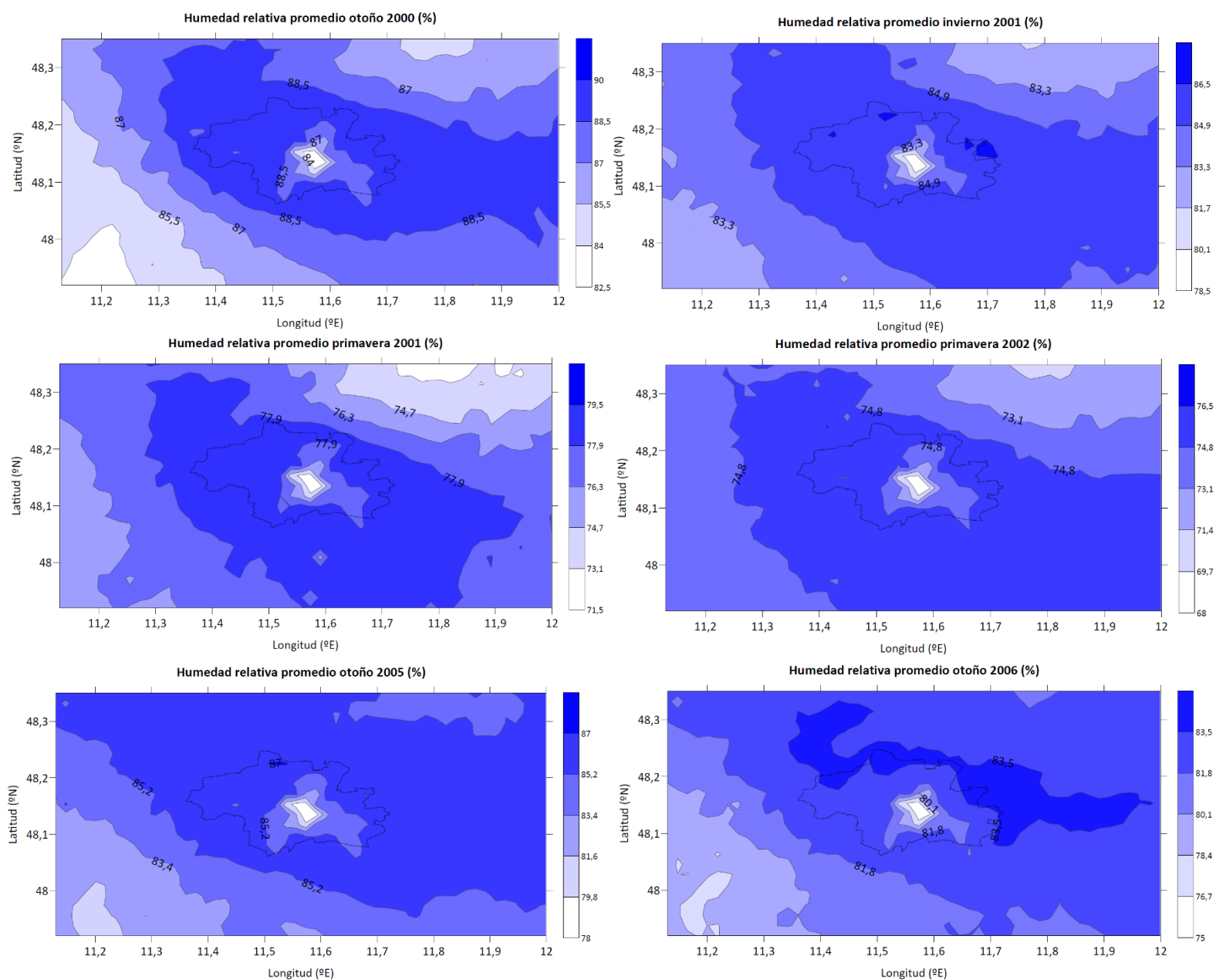


Figura anexa 2. Mapas de isolíneas del promedio estacional de la humedad relativa en los puntos temporales “anómalos”

Tabla anexa 1. *Humedad relativa (%) promedio estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras.*

AÑO	CENTRO				AFUERAS			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1995	81,044	73,971	74,905	84,821	82,393	76,086	77,329	86,077
1996	86,190	77,748	72,776	83,260	86,519	78,706	75,032	84,977
1997	81,105	69,959	73,877	78,718	82,320	71,811	75,807	80,369
1998	75,759	67,347	68,748	82,523	78,583	70,395	72,406	85,164
1999	82,014	76,751	74,015	82,930	84,547	78,636	76,902	84,361
2000	83,001	74,432	72,282	88,396	83,496	74,842	72,565	86,045
2001	84,935	77,754	73,583	89,409	83,790	76,588	73,773	87,539
2002	80,105	74,498	74,496	82,046	80,948	74,255	75,699	84,848
2003	78,733	63,917	60,606	77,463	82,667	68,563	64,218	80,842
2004	77,321	70,177	70,858	81,446	80,436	72,705	71,760	82,443
2005	80,593	72,160	73,429	84,878	82,796	73,507	73,426	83,732
2006	83,294	74,908	70,280	81,907	83,989	75,680	71,105	81,008
2007	77,419	66,240	72,167	85,459	80,055	67,949	73,281	85,877
2008	76,420	74,275	73,550	82,596	78,047	73,929	74,807	83,804
2009	84,379	72,363	73,140	81,334	85,039	73,865	75,073	82,808
2010	82,623	71,552	74,281	82,932	84,879	74,893	76,889	85,012
2011	82,107	66,053	74,476	85,350	85,252	68,137	76,548	85,766
2012	80,196	69,642	71,671	85,337	83,317	72,361	74,845	86,750

Tabla anexa 2. *Punto de rocío promedio (°C) estacional en el centro de la ciudad y en sus afueras.*

AÑO	CENTRO				AFUERAS			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1995	0,9	3,2	11,8	6,0	0,2	2,9	11,7	5,5
1996	-1,7	2,8	11,0	4,8	-2,2	2,4	10,9	4,3
1997	-0,2	2,8	11,7	4,7	-0,7	2,5	11,5	4,5
1998	0,3	2,7	11,3	5,0	-0,1	2,5	11,3	4,7
1999	0,0	5,1	11,9	6,0	-0,4	4,7	11,7	5,6
2000	1,1	5,1	11,7	7,8	0,2	4,5	11,1	6,7
2001	1,3	5,2	11,7	9,9	0,3	4,4	11,1	8,7
2002	1,3	4,2	13,0	5,9	0,4	3,4	12,5	5,6
2003	-2,1	2,5	12,1	4,1	-2,5	2,7	12,1	3,9
2004	-0,6	2,3	11,5	6,2	-1,0	2,1	11,1	5,7
2005	-1,3	3,3	11,8	6,5	-1,8	2,9	11,2	5,7
2006	-1,5	3,2	11,8	8,0	-2,2	2,6	11,4	7,3
2007	2,3	4,1	12,0	4,9	1,7	3,7	11,7	4,3
2008	1,0	4,2	12,5	5,6	0,5	3,4	12,2	5,1
2009	-0,9	4,6	12,3	6,7	-1,3	4,2	12,2	6,4
2010	-1,3	2,7	12,5	5,3	-1,6	2,7	12,4	5,1
2011	0,4	3,4	12,2	6,4	0,1	3,3	12,0	6,0
2012	-1,2	3,9	12,4	6,6	-1,6	3,7	12,5	6,3

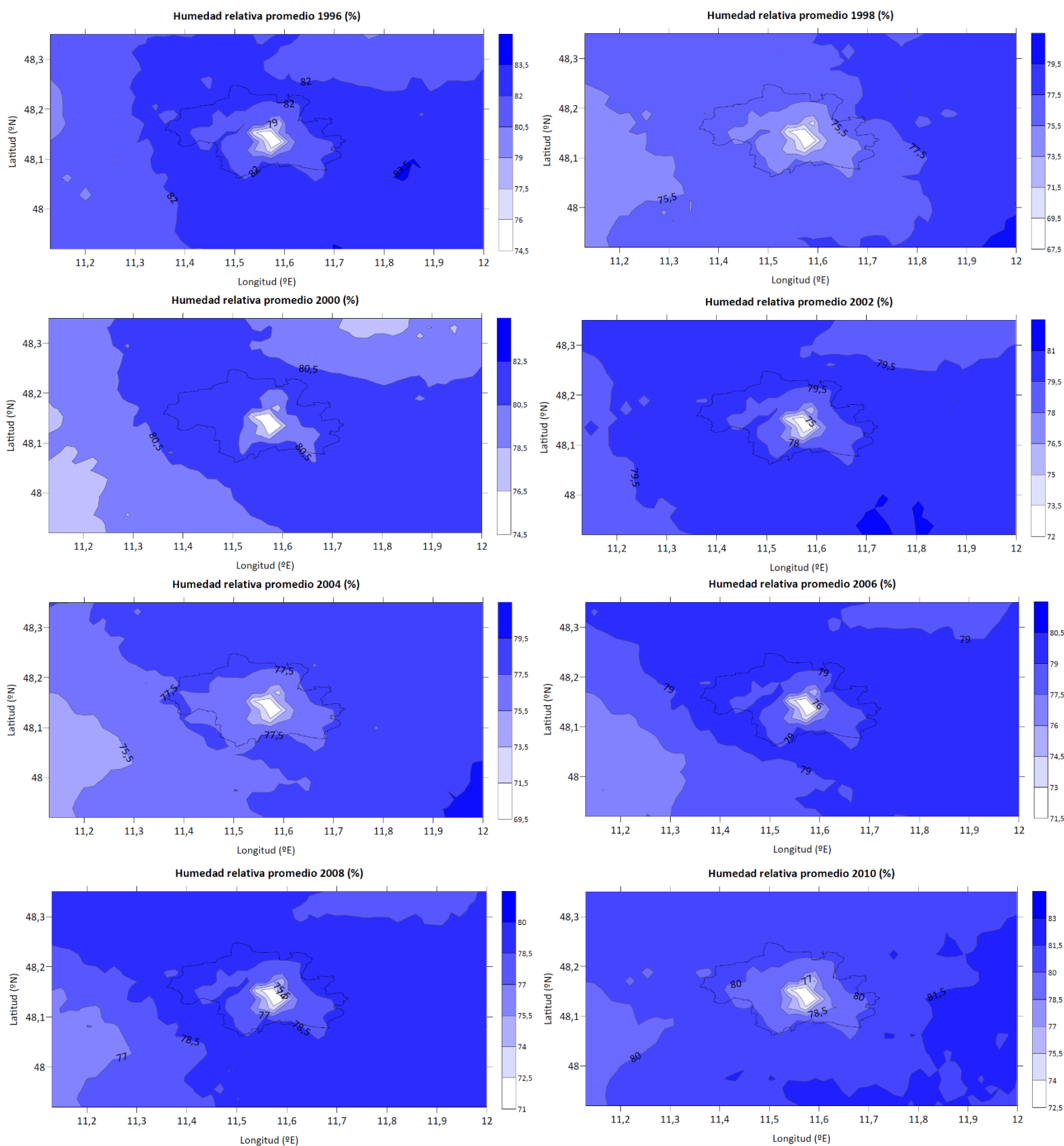


Figura anexa 3. Mapas de isolíneas del promedio anual de la humedad relativa de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010.

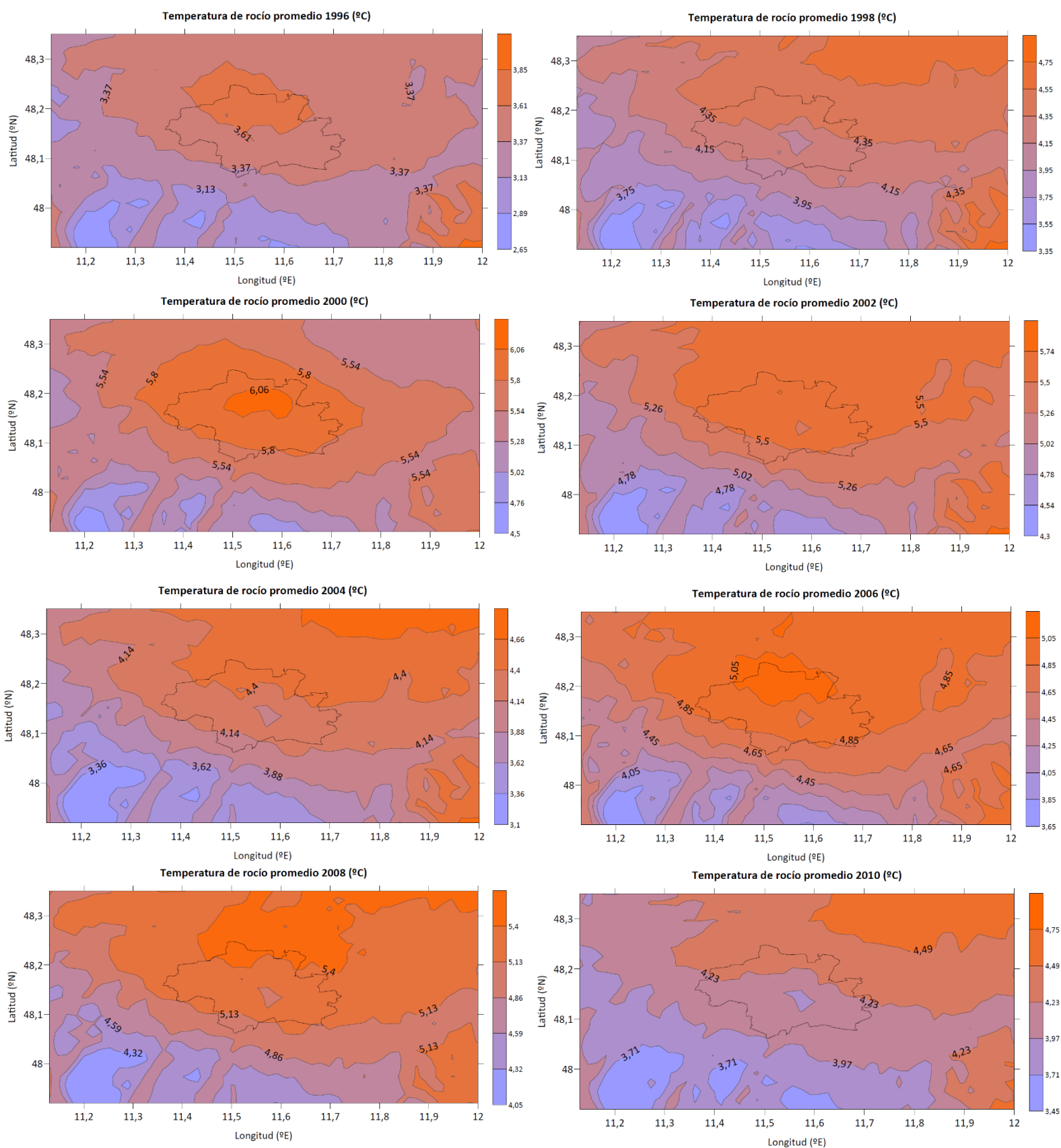


Figura anexa 4. Mapas de isolíneas del promedio anual del punto de rocío de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010.

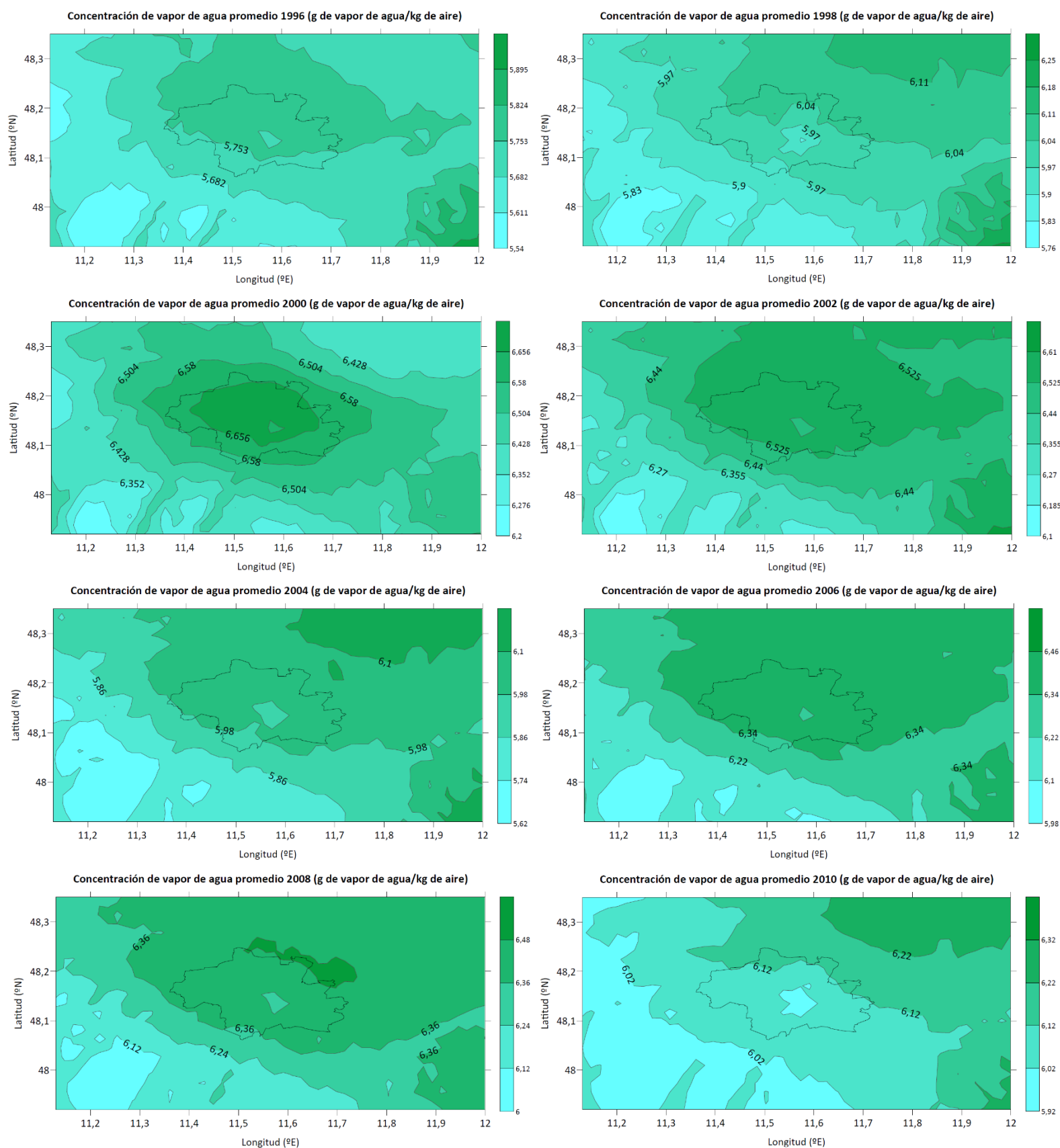


Figura anexa 5. Mapas de isolíneas del promedio anual de la concentración de vapor de agua de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010.

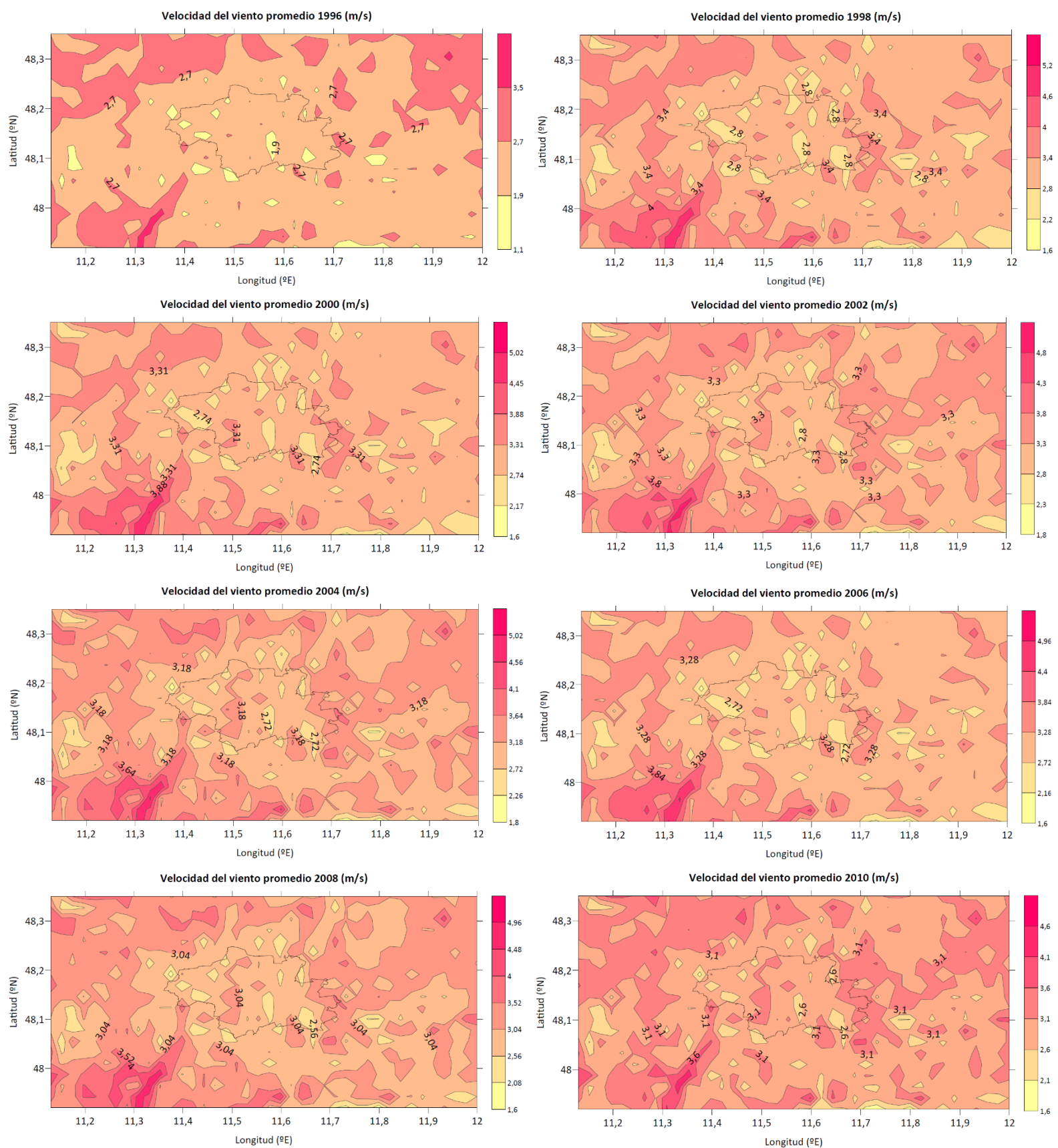


Figura anexa 6. Mapas de isotacas del promedio anual de la velocidad del viento de los años 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 y 2010.

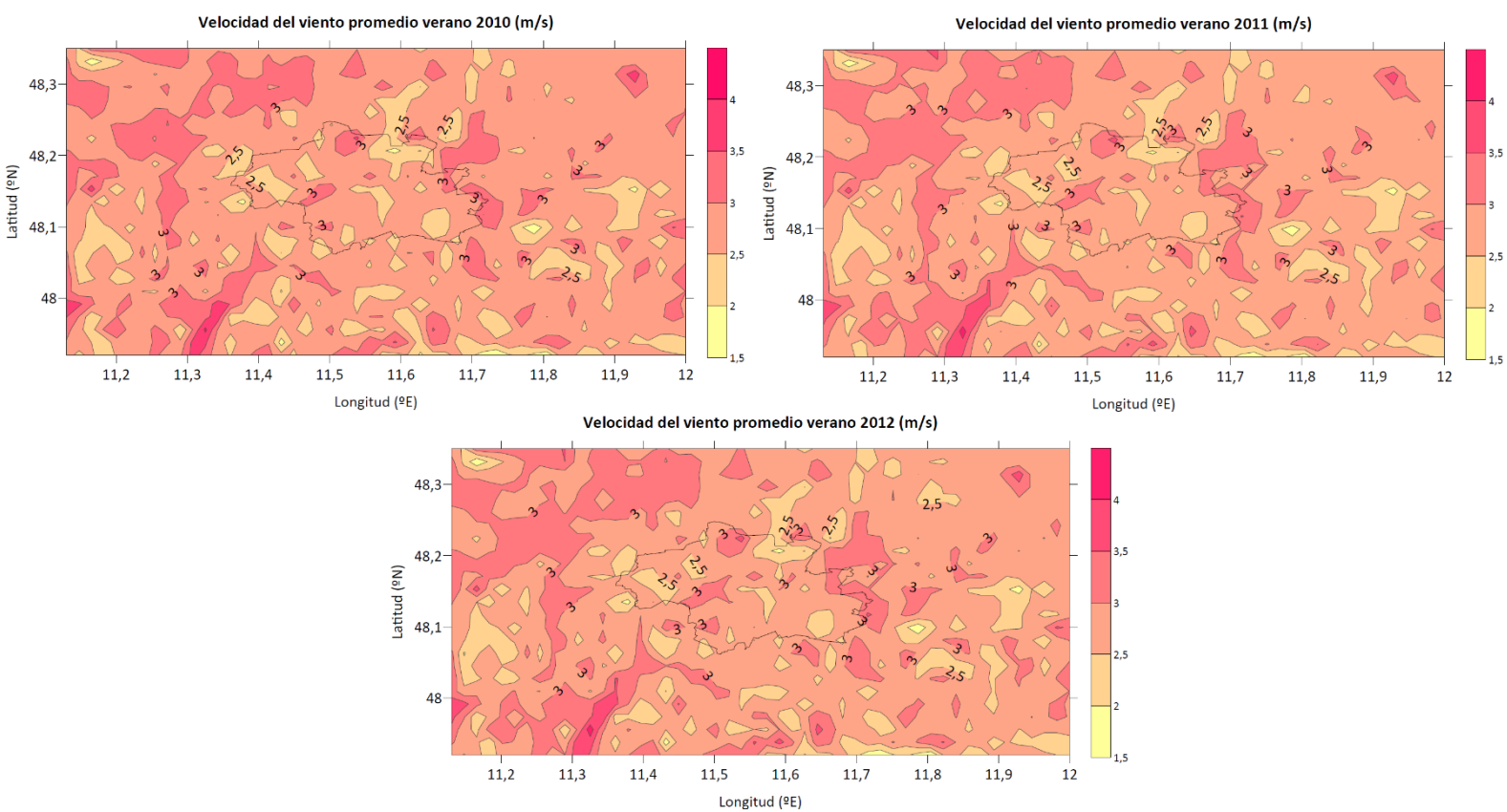


Figura anexa 7. Mapas de isotacas del promedio estival de la velocidad del viento en los puntos temporales “anómalos” de 2010, 2011 y 2012.