



UNIVERSITAT<sub>DE</sub>  
BARCELONA

# Cubiertas urbanas y comportamiento térmico en escenarios de temperaturas extremas: del dato al geoservicio

Joan Gilabert Mestre



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution 4.0. Spain License.**

*Tesis doctoral*

**CUBIERTAS URBANAS Y COMPORTAMIENTO  
TÉRMICO EN ESCENARIOS DE TEMPERATURAS  
EXTREMAS:  
DEL DATO AL GEOSERVICIO**

Autor:

JOAN GILABERT MESTRE

Directores:

DR. JORDI CORBERA SIMON

DRA. MARÍA DEL CARMEN LLASAT BOTIJA



**UNIVERSITAT<sup>DE</sup>  
BARCELONA**

**CUBIERTAS URBANAS Y COMPORTAMIENTO  
TÉRMICO EN ESCENARIOS DE TEMPERATURAS  
EXTREMAS:  
DEL DATO AL GEOSERVICIO**

MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA  
UNIVERSIDAD DE BARCELONA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN FÍSICA

Autor:

JOAN GILABERT MESTRE

Directores:

DR. JORDI CORBERA SIMON

DRA. MARÍA DEL CARMEN LLASAT BOTIJA

Tutor:

DR. JOAN BECH RUSTULLET

DEPT. DE FÍSICA APLICADA

FACULTAT DE FÍSICA

BARCELONA, DICIEMBRE DE 2020



**UNIVERSITAT DE  
BARCELONA**





Esta tesis se ha desarrollado en el marco de un Programa de Doctorado Industrial, de la *Generalitat de Catalunya*, financiado por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (Expediente 2015 DI 0038) y se ha llevado a cabo entre el Grupo de Análisis de situaciones Meteorológicas Adversas (GAMA), del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Barcelona y la propia entidad financiadora dentro del grupo Centro de Soporte al Programa Catalán de Observación de la Tierra (CSPCOT).

También se ha basado parcialmente en el trabajo realizado bajo un contrato de investigador técnico dentro del marco de *European Research Council (ERC) Consolidator: Integrated System Analysis of Urban Vegetation and Agriculture* (818002-URBAG) dirigido por la Dra. Gara Villalba, ICTA-UAB.

Por último, la difusión del presente trabajo en congresos internacionales y nacionales y publicaciones también ha sido financiada por los proyectos españoles HOPE (CGL2014-52571-R) y M-CostAdapt (CTM2017-83655-C2-2-R) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Gobierno de España), y por el Instituto de Investigación del Agua de la UB (*Institut de Recerca de l'Aigua, IdRA*).





## AGRADECIMIENTOS



*Fer la tesi doctoral no va suposar una decisió fàcil.*

*Crec que tot va començar de ben petit, ara no recordo exactament quan, però va ser en una fira del llibre vell al Pax (el meu col·legi), allà vaig agafar un llibre sobre instruments meteorològics. A partir d'allí, el meu interès cap a la meteorologia va anar in crescendo com una simfonia de Beethoven. Preguntes com; per què el cel és blau, per què hi ha núvols o per què es mouen les fulles, eren pensaments que de petit em cridaven l'atenció. A partir d'aquí tot va anar fluint, les assignatures que més em motivaven eren les de naturals, les de física o les de geografia. Al insti (al Martí) sempre recordaré el treball de recerca que vaig fer sobre Canvi Climàtic i com el vaig gaudir.*

*Durant la carrera, anava escollint les assignatures més enfocades en aquest àmbit (sort que vaig agafar l'etapa pre-Bolonya!) però no va ser fins l'assignatura de Riscos Naturals, que impartia la Carme Llasat quan vaig decidir tirar-me a la piscina. Jo, que sóc bastant directe i nerviós, vaig contactar amb ella ràpidament i en pocs dies ja estava actualitzant bases de dades d'inundacions al despatx de la planta 7 (em recordava una pel·lícula ambientada a la URSS, amb aquells despatxos antics i de fons, amb els cascos, sonava Kraftwerk). Va ser aleshores, mentre anava cursant en paral·lel el Màster de Meteorologia quan vaig començar a aprendre'n més i a decidir*

*que volia quedar-me per allà (almenys una temporada), de totes maneres no veia clar el moment de fer una tesi, de fet anava a canviar d'aires (ja havia tirat el meu CV al Dechatlon) quan la darrera setmana, la Carme em va trucar i explicar que hi havia una oferta de tesi. La temàtica em va fer obrir els ulls i vaig decidir entrar en un camí d'entropia.*

*La Carme juntament amb el Jordi i l'Anna van plantejar-me una oferta molt llaminera de Doctorat Industrial, una col·laboració entre la universitat i el cartogràfic. Era una tesi on la teledetecció i el GIS eren una de les premisses per a poder-la fer. Jo que vinc de la geografia i no sóc físic (tot i estar-hi rodejat) em van fer aventurar cap aquesta via que ha arribat a complir cinc anys. Un camí de pujades i baixades, mentre escric això veig per la terrassa el Dragon Khan i és precisament la sensació que es té mentre fas el doctorat. Pujades i baixades, que finalment acaben compensant i marcant-te com a persona, en un sentit gairebé holístic.*

*Dit això, vull anomenar i perdoneu si em deixo algú (mai ha estat aquesta la meva intenció), totes les persones que han anat apareixent durant aquest camí de pujades i baixades.*

*En primer lloc vull agrair la confiança, ànims i molts moments viscuts al grup GAMA moltes gràcies per tot Carme. La Carme Llasat ha estat com una "mare" en aquest viatge que ha durat més de nou anys (des de que vaig entrar al grup), li vull agrair la paciència i la confiança que ha tingut en mi. En paral·lel vull agrair de la mateixa manera al "pare" de tot plegat l'altre codirector, el Jordi Corbera per fer-ho tot fàcil i per ser un artista en tots els sentits de la paraula, extrapolats tan nivell científic com en la vida mateixa. De la Carme en podria destacar moltes facultats però sobretot el control que té de cada situació, l'experiència, els contactes, la capacitat de correcció, la capacitat que té d'animar-te i defensar-te quan ho necessites són facetes que ajuden i molt. Del Jordi en destacaria també moltes coses positives però per sobre de tot la seva capacitat per tenir idees, de crear, de visualitzar o de confiar en tu. Ha estat molt fàcil gràcies a ells dos que han estat sobre meu en tot moment, són pacients.*

*Vull continuar agraint la Montse, Raül, Marco, Maria, Anna, Tomeu, Pere, Isabel i en general també a totes les companyes i companys i amics i amigues del DAM-nyam i del Departament, perquè sense elles y ells no hagués estat possible, des del Jordi o Gabi posant a punt el meu ordinador, fins a la Montse, Maria, Anna o Isabel pels bons moments viscuts i pel treball colze a colze amb tots els projectes compartits. Meravella de persones totes plegades.*

*També vull agrair de la mateixa manera, tota la gent del PCOT; Anna, Lúdia, Jordi, Vicent, Oscar, Fernando, Juanfer, Toni, Luca, Ramon, Ariadna i Assumpta per l'ajuda que m'han proporcionat i tots els skills que he après, gràcies a tots ells. Vull fer una especial menció a l'Anna Tardà que va ser una de les persones que més em va ajudar durant l'inici, quan més perdut anava i quan més falta em feia, sense ella aquest projecte tampoc hagués estat possible. Per acabar els "pecotaires" cal nomenar al Jordi Castellví, un bon amic que he fet durant el treball al carto; pels dinars al Institut del Teatre o els sushis en moments necessaris, per l'esbarjo a les escales de fora i per les cerveses a la Lola, gràcies!*

*També vull agrair al tercer vector que ha entrat més endavant i que m'ha finançat aquest darrer any, és l'equip d'URBAG, on m'hi sento molt a gust. Aquí vull agrair tota la confiança que la Gara m'ha proporcionat des que ens vam conèixer, és una persona incansable. A la vegada vull agrair al Sergi i el Ricard pel treball que hem fet conjuntament que ha comportat moltes hores de converses i entrebancs però que tan bé ha sortit. Mil gràcies a tots vosaltres.*

*Per acabar en aquest àmbit més científic voldria agrair també les col·laboracions que hem fet amb el grup que lidera el Joan Ballester a ISGlobal, en especial menció a l'Anna Deluca. A tots ells moltíssimes gràcies!*

*En l'àmbit més personal voldria començar agraint l'amor i confiança que sempre em dona la meva família. Els meus pares i la meva germana que sempre estan allà per qualsevol cosa, sempre ajudant en tot. Em sento molt estimat i afortunat i això és el que més feliç em fa. La meva família es bàsicament "la hòstia", així que els vull nombrar perquè és impagable: Padri l'artista de la família, Yuya, que ens va deixar l'any passat (-Yuya, ya he terminado, ahora ya podràs contar que tu nieto es doctor, se lo podràs decir a la Luna), Anne, Andrea, Elena; les millors cosines que es puguin tenir, Anne gràcies pels esmorzars de la recta final! Les meves tietes estimades la Pili, la Nanye i la Loreto i els meus tiets encantadors l'Arend i l'Andreu. Ah, i també l'Angel i el més nou a la família, el Quim. Gràcies per ser-hi sempre! L'altre puntal ha estat el meu amor, la Claudia que sempre m'aguanta les "xapes", els mals moments i també els millors. Amb tu tot és molt més fàcil, t'estimo.*

*Vull agrair també els que heu estat allà en tot moment, els amics de Barcelona; Trinomi, Mohamers (un recuerdo para Antonio!), ¡Fran gracias por la cover!, Geopunkis, Can Paradiso,*

*Sonars & HOC Radio i els de Tarraco; Pax i Nanitus, Jove i Azuneros (¡Jesusis, ya somos dos!).  
Per acabar vull anomenar-ne alguns en especial i en particular; el meu germà d'altre mare,  
l'Aparicio l'altre de Binomi, la Juani, la Mady, el Ben i el Toni, i el Pol, que tant m'ha ajudat en  
aquesta recta final. Ells em donen la vida i són els millors amics que un pot arribar a tenir, som  
una família.*

*Eternament agraït.*

## RESUMEN

Las tendencias de los episodios de temperaturas extremas en las ciudades están aumentando (en frecuencia, magnitud y duración) debido al cambio climático en interacción con el efecto urbano. Otro factor relevante es que más de la mitad de la población mundial reside actualmente en áreas urbanas y se espera que esta tendencia demográfica aumente hasta un 68% a mediados de siglo. Ante esta creciente urbanización, los posibles impactos del cambio climático en las zonas urbanas se han convertido en una de las principales preocupaciones y, a su vez, un reto.

Las morfologías urbanas y las propiedades térmicas de los materiales utilizados para construirlas son factores que influyen en la variabilidad climática espacial y temporal y se convierten en uno de los principales motivos de la singularidad urbana. El principal impacto en el microclima de las ciudades se caracteriza generalmente por el fenómeno de isla de calor urbano, que se refiere a que las áreas urbanas tienden a ser más cálidas que sus alrededores periurbanos y rurales, particularmente durante la noche, a consecuencia del calentamiento diferencial debido a su propia morfología y materiales. Se espera que el calentamiento global amplifique esta vulnerabilidad térmica, haciendo que los habitantes de las ciudades estén más expuestas a sufrir patologías asociadas a las elevadas temperaturas.

Barcelona y su área metropolitana constituyen un buen ejemplo de megaciudad costera mediterránea (ciudades portuarias con una población superior a 1 millón de habitantes) y ya están siendo gravemente afectadas por estos efectos de acumulación de calor y al mismo tiempo de contaminación lumínica, acústica y en particular la atmosférica asociada a la actividad socioeconómica en un ecosistema con muy alta densidad de población y movilidad.

El objetivo general de la tesis consiste en entender y modelizar la complejidad del comportamiento térmico urbano como herramienta de soporte a la toma de decisión. Una complejidad singular que modifica el clima provocando, en nuestras latitudes, una elevada vulnerabilidad a las altas temperaturas que se agravará debido al cambio climático global. Un segundo objetivo asociado al hecho de que se trata de un doctorado industrial, consiste en la

elaboración de productos en base a las propiedades térmicas de las cubiertas urbanas y a los distintos escenarios de temperatura, transferibles como geoservicio preoperacional o productivo al *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*.

En primer lugar, se presentan diferentes metodologías para evaluar el efecto urbano y periurbano sobre la exposición a temperaturas extremas en Barcelona. Para ello se parte de la clasificación de Zonas Climáticas Locales o *Local Climate Zones* (LCZ) como enunciado base. Las LCZ consisten en un sistema de estandarización propuesto por Stewart y Oke (2012) para áreas urbanas y periurbanas clasificadas según sus respuestas térmicas. Cada categoría o uso del suelo es medible y comparable a partir de una combinación de parámetros geométricos, térmicos, radiativos y metabólicos que la caracterizan. En esta clasificación, las propiedades definidas de cada uso del suelo están directamente ligadas a una perspectiva térmica que permite estudiar los efectos del clima urbano con más detalle espacial y temporal.

Las LCZ cartografiadas para nuestra región de interés, se introdujeron como entrada del modelo climático UrbClim, de alta resolución (100x100m), para crear series de temperaturas diarias (mediana y máxima) para el verano (1987-2016), con el fin de elaborar una cartografía de extremos asociada a las altas temperaturas. Utilizando la relación entre la mortalidad asociada a temperaturas elevadas y la distribución de la temperatura, se obtuvo la exposición al calor para cada LCZ que se combinó con datos poblacionales con el fin de crear mapas de vulnerabilidad climática. Todo ello se aplicó para el período climático observado y para finales de siglo 2071-2100 teniendo en cuenta los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

En segundo lugar, y aprovechando las cartografías obtenidas de las LCZ, el trabajo aquí presentado se centró en mejorar los estándares propuestos en el ADN de las LCZ de Stewart y Oke (2012). La finalidad era la de mejorar los parámetros de entrada del modelo de dosel urbano WRF BEP+BEM y así mostrar la efectividad de los techos fríos y la vegetación en la reducción de la temperatura en el Área Metropolitana de Barcelona. Para hacerlo posible, se creó un flujo de trabajo centrado en la obtención de parámetros urbanos tales como el consumo de energía de los edificios y el calor antropogénico generado por los sistemas de aire acondicionado, la geometría de los cañones de las calles y los edificios, así como las características de la superficie (por ejemplo, albedo, capacidad calorífica, emisividad, fracción urbana y de vegetación). Los métodos se



validaron para la ola de calor ocurrida en julio de 2015 durante la cual las temperaturas se mantuvieron entre 30 y 40°C durante cinco días consecutivos. Luego se simularon tres escenarios potenciales: 1) aumentando el albedo de cubiertas a 0.85 para ciertas clases urbanas, 2) aumentando el verde urbano en 255.64 ha adicionales de acuerdo con la propuesta del Plan Director Urbanístico de 2030 con dos esquemas de riego diferentes y 3) combinando las dos estrategias de mitigación (1 y 2). Los resultados, han permitido comprender muy bien el detalle del entramado urbano de nuestra región de estudio. Se han integrado en este estudio capas cartográficas de geoinformación que nos ha permitido comprender y modelizar íntegramente el comportamiento térmico, ya sea desde un enfoque climático o meteorológico. Gracias a estas mejoras en las cubiertas urbanas y sus propiedades, se ha podido caracterizar el entramado con el objetivo de poder hacer propuestas de mitigación y mejorar la resiliencia de la ciudad (disminuir su vulnerabilidad) en un entorno de cambio climático presente y futuro.

## LISTADO DE ACRÓNIMOS

<b>3D</b>	3 Dimensiones
<b>A0.55</b>	Escenario de Albedo a 0.85
<b>A0.70</b>	Escenario de Albedo a 0.85
<b>A0.85</b>	Escenario de Albedo a 0.85
<b>A0.85V5</b>	Escenario combinado de Albedo a 0.85 e Incremento de Vegetación con Riego a 5L
<b>AEMET</b>	Agencia Estatal de Meteorología
<b>AMB</b>	Área Metropolitana de Barcelona
<b>ARW</b>	Investigación Avanzada del WRF(Advanced Research WRF)
<b>AT</b>	Áreas de entrenamiento
<b>B</b>	Banda
<b>BEM</b>	Modelo de Energía del Edificio (Building Energy Model)
<b>BEP</b>	Parametrización del Efecto del Edificio (Building Effect Parameterization)
<b>BSC-CNS</b>	Centro de Supercomputación de Barcelona (Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación)
<b>CAT</b>	Cataluña
<b>CLC</b>	Corine Land Cover
<b>CMIP5</b>	Proyecto de Inter-comparación de Modelos de Clima Acoplados
<b>CVPI</b>	Índice de Personas Vulnerables al Clima (Climate Vulnerability People Index)
<b>ECMWF</b>	Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Medio Alcance
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency)
<b>ESA</b>	Agencia Espacial Europea (European Space Agency)
<b>ETM</b>	Mapeador Temático Plus (Enhanced Thematic Mapper Plus)
<b>EU</b>	Unión Europea (European Union)
<b>GEE</b>	Google Earth Engine
<b>GIS</b>	Sistema de Información Geográfico (Geographic Information System)
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
<b>GSD</b>	Resolución/Distancia de la Muestra de Tierra (Ground Sample Distance)
<b>HEI</b>	Índice de Exposición al Calor (Heat Exposure Index)
<b>HERMES</b>	Modelo de Emisiones de alta efectividad (High-Effective Resolution Modelling Emission System)
<b>HR</b>	Alta Resolución (High Resoluition)
<b>HVI</b>	Índice de Vulnerabilidad al Calor (Heat Vulnerability Index)
<b>HW</b>	Ola de calor (Heat Wave)
<b>ICGC</b>	Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña
<b>IDESCAT</b>	Instituto de Estadística de Cataluña (Institut d'Estadística de Catalunya)
<b>IMG</b>	Imagen
<b>INS</b>	Sistema de Navegación Inercial (Inertial Navegation System)
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<b>JJA</b>	Junio-Julio-Agosto
<b>K</b>	Coefficiente Kappa

<b>L6-L7-L8</b>	Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8
<b>LCLU</b>	Cubiertas de Suelo y Uso de Suelo (Land Cover Land Use)
<b>LCZ</b>	Zonas Climáticas Locales (Local Climate Zones)
<b>LiDAR</b>	Sensor láser de detección y rango de luz (Light Detection and Ranging)
<b>LST</b>	Temperatura de Superficie Terrestre (Land Surface Temperature)
<b>LWIR</b>	Onda Larga Infrarroja (Longwave Infrared)
<b>MB</b>	Bias Medio (Mean Bias)
<b>MCS</b>	Mapa de Cubiertas del Suelo
<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superficie
<b>MDT</b>	Modelo Digital del Terreno
<b>ModTRan5.0</b>	TRANsmitancia atmosférica de resolución espectral MODerada (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance)
<b>MSI</b>	Sensor Multi-espectral (Multi Spectral Sensor)
<b>MSS</b>	Escaner Multiespectral (Multispectral Scanner)
<b>NCVPI</b>	Índice Normalizado de personas vulnerables al clima (Normalized Climate Vulnerability People Index)
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
<b>NWIR</b>	Onda Cercana Infrarroja (Near Wave Infrared)
<b>OA</b>	Precisión General (Overall Accuracy)
<b>OLI</b>	Sensor Operacional de Imágenes
<b>OMM</b>	Organización Meteorológica Mundial
<b>ONU</b>	Organización de Naciones Unidas
<b>OT</b>	Observación de la Tierra
<b>PBL</b>	Capa Límite Urbana (Planetary Boundary Layer)
<b>PDU</b>	Plan Director Urbanístico
<b>PEC</b>	Partículas Elementales de Carbón
<b>PIB</b>	Producto Interior Bruto
<b>PM</b>	Partículas por Millón
<b>POC</b>	Partículas Orgánicas de Carbón
<b>PUCS</b>	Servicio Paneuropeo de Clima Urbano
<b>Px</b>	Percentil
<b>R</b>	Correlación de Pearson
<b>R5</b>	Caso de referencia con riego a 5L
<b>RCM</b>	Modelo Regional del Clima (Regional Climate Models)
<b>RCP</b>	Vías de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathway)
<b>RGB</b>	Rojo, Verde, Azul (Red, Green, Blue)
<b>RMSE</b>	Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error)
<b>ROI</b>	Región de Interés (Region Of Interest)
<b>RR</b>	Riesgo Relativo
<b>S2</b>	Sentinel 2
<b>SIOSE</b>	Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España
<b>SLC</b>	Escáner Corrector Lineal
<b>SLUCM</b>	Modelo de Una Sola capa de Dosel Urbano (Single Layer Urban Canopy Model )
<b>SMC</b>	Servicio Meteorológico de Cataluña (Servei Meteorològic de Catalunya)
<b>SNAP</b>	Nomenclatura Seleccionada para la Contaminación Atmosférica, (Selected Nomenclature for Air Pollution)
<b>SUHI</b>	Isla de Calor Urbana Superficial (Surface Urban Heat Island)

<b>SWIR</b>	Onda Corta Infrarroja (Short-Wave Infrared)
<b>T</b>	Temperatura
<b>TASI</b>	Generador de Imágenes de Espectrografía Térmica en el Aire (Thermal Airborne Spectrographing Imager)
<b>TIRO</b>	Televisión Satélite de Observación Infrarroja (Television Infrared Observation)
<b>TIRS</b>	Sensor Infrarrojo Térmico
<b>TKE</b>	Energía Cinética Turbulenta
<b>TM</b>	Mapeo Temático (Thematic Mapper)
<b>UA</b>	Atlas Urbano (Urban Atlas)
<b>UCM</b>	Modelo de Dosel Urbano (Urban Canopy Model)
<b>UHI</b>	Isla de Calor Urbana (Urban Heat Island)
<b>UMEP</b>	Predictor Multiescala en Zonas Urbanas (Urban Multi-scale Environmental Predictor)
<b>UTC</b>	Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time)
<b>V2</b>	Incremento de vegetación con riego a 2L
<b>V5</b>	Incremento de vegetación con riego a 5L
<b>VIS</b>	Visible
<b>VNIR</b>	Visible e Infrarrojo de Corto Alcance (Visible and Near-Infrared)
<b>WMS</b>	(Servicio de Mapeo Web) Web Map Service
<b>WRF</b>	Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (Weather Research and Forecasting model)
<b>WUDAPT</b>	Herramientas del Portal de Acceso y Bases de Datos Urbanas Mundiales (World Urban Database and Access Portal Tools)

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTADO DE ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 ESTADO DEL ARTE Y MOTIVACIÓN .....	2
1.2 UNA APROXIMACIÓN AL EFECTO DE ISLA DE CALOR URBANA EN BARCELONA.....	8
1.3 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
<i>1.3.1 Objetivos específicos.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.2 Estructura de la tesis .....</i>	<i>14</i>
<b>2. REGIÓN DE INTERÉS, DATOS Y MODELOS.....</b>	<b>16</b>
2.1. REGIÓN DE INTERÉS .....	17
2.2. DATOS.....	19
2.2.1. <i>Sensores Remotos.....</i>	<i>19</i>
<i>a) Teledetección por satélite.....</i>	<i>20</i>
<i>b) Teledetección Aerotransportada.....</i>	<i>26</i>
2.2.2. <i>Bases Cartográficas .....</i>	<i>31</i>
<i>a) Urban Atlas (2012).....</i>	<i>32</i>
<i>b) Mapas de Cubiertas del Suelo.....</i>	<i>34</i>
2.2.3. <i>Datos meteorológicos.....</i>	<i>35</i>
<i>a) Estaciones meteorológicas .....</i>	<i>35</i>
<i>b) Bases de datos de análisis y reanálisis meteorológicos .....</i>	<i>37</i>

2.2.4. Datos Socioeconómicos.....	38
2.3. MODELIZACIÓN CLIMÁTICA, METEOROLÓGICA Y CONTAMINACIÓN .....	39
2.3.1. Modelo UrbClim.....	40
2.3.2. Modelos EURO-CORDEX.....	41
2.3.3. Modelo Weather Research and Forecast (WRF).....	42
2.3.4. Modelo de emisiones: High-Res Elective Resolution Modelling Emission System HERMES v2 .....	44
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE LAS LOCAL CLIMATE ZONES (LCZ) .....</b>	<b>46</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	47
3.2. ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES O LOCAL CLIMATE ZONES (LCZ).....	49
3.2.1. Aplicación de la metodología WUDAPT para la caracterización del Área Metropolitana de Barcelona en Zonas Climáticas Locales (LCZ).....	52
3.2.2. Aplicación de la metodología basada en mapas de coberturas y usos del suelo para la caracterización del Área Metropolitana de Barcelona en Zonas Climáticas Locales (LCZ).....	62
3.2.3. Aplicación de la metodología WUDAPT y LCLU combinadas sobre la ROI.....	65
3.3. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS LCZ EN EL AMB .....	67
3.4. APLICACIÓN DE LAS LCZ A LA CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS LST.....	69
3.5. CONCLUSIONES .....	76
<b>4. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y LA VULNERABILIDAD AL CALOR A TEMPERATURAS EXTREMAS EN ECOSISTEMAS URBANOS UTILIZANDO LAS LCZ.....</b>	<b>79</b>
4.1. INTRODUCCIÓN.....	80
4.2. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A TEMPERATURAS EXTREMAS EN ECOSISTEMAS URBANOS UTILIZANDO LA CLASIFICACIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES (PERÍODO CLIMÁTICO PRESENTE).....	83
4.2.1. Caracterización climática .....	83
4.2.2. Caracterización térmica de las LCZ.....	87
4.3. ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN AL CALOR Y LA SENSIBILIDAD .....	91
4.3.1. Definición del índice de exposición al calor.....	91

4.3.2. Caracterización de las LCZ en función del índice de exposición al calor.....	93
4.3.3. Comparación de la distribución de temperatura a partir de las LCZ con las temperaturas observadas (evaluación de la relación LCZ-T).....	95
4.4. ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD FRENTE TEMPERATURAS EXTREMAS ..	97
4.5. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD FRENTE TEMPERATURAS EXTREMAS EN ECOSISTEMAS URBANOS EN ESCENARIOS FUTUROS .....	100
4.5.1. Cartografía de la exposición de Barcelona para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 durante el período 2071-2100.....	102
4.5.2. Análisis de las LCZ en la distribución geoespacial de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 .....	105
4.6. CONCLUSIONES .....	110
<b>5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA MORFOLOGÍA URBANA. ESCENARIOS DE MITIGACIÓN .....</b>	<b>115</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	116
5.2- CONFIGURACIÓN DEL MODELO WRF BEP+BEM.....	122
5.3- CASO DE ESTUDIO .....	127
5.4 ESCENARIOS DE MITIGACIÓN .....	130
5.4.1 Incremento de tejados fríos .....	130
5.4.2 Incremento de vegetación e irrigación.....	132
5.4.3 Escenario combinado.....	134
5.5 RESULTADOS .....	135
5.5.1 Modelización con tejados fríos (A0.85) .....	138
5.5.2 Modelización con incremento de vegetación e irrigación (V2 y V5) .....	142
5.5.3 Escenario combinado.....	146
5.5.4 Ahorro energético por estrategias de mitigación.....	150
5.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	150

<b>6. SERVICIOS DE GEOINFORMACIÓN: TRANSFERENCIA, EVALUACIÓN DEL PRODUCTO Y OTRAS FUNCIONALIDADES.....</b>	<b>158</b>
6.1 INTRODUCCIÓN.....	159
6.2 DISEÑO DEL FLUJO PRODUCTIVO DE GEOINFORMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS. ....	160
6.2.1. <i>Calculo de la Isla de Calor Urbana y obtención de mapas térmicos. ....</i>	<i>161</i>
6.2.2. <i>Implementación operacional para la obtención de las Local Climate Zones (LCZ) .....</i>	<i>171</i>
6.2.3 <i>Cálculo de los parámetros morfológicos de la ciudad. ....</i>	<i>183</i>
6.2.4 <i>Calculo de los parámetros radiativos de la ciudad. ....</i>	<i>187</i>
6.2.5 <i>Calculo de la permeabilidad e impermeabilidad.....</i>	<i>188</i>
6.2.6 <i>Procesado de las salidas del modelo Urbclim. ....</i>	<i>190</i>
6.3 ANÁLISIS DEL IMPACTO Y LOS BENEFICIOS DE LOS PRODUCTOS DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO .....	191
6.3.1 <i>Objetivo del producto.....</i>	<i>192</i>
6.3.2 <i>Trabajos a realizar .....</i>	<i>193</i>
6.3.3 <i>Potencialidades y análisis del impacto .....</i>	<i>194</i>
6.4 OTRAS UTILIDADES DE LAS LCZ: METODOLOGÍA DE DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE EMISIONES MEDIANTE LAS LCZ.....	195
6.4.1 <i>Justificación.....</i>	<i>195</i>
6.4.2 <i>Metodología.....</i>	<i>198</i>
6.4.3 <i>Aplicación al Área Metropolitana de Barcelona.....</i>	<i>205</i>
6.4.4. <i>Aportación de las LCZ a la desagregación espacial de emisiones.....</i>	<i>207</i>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>209</b>
7.1 RESULTADOS DE LA TESIS.....	210
7.2 CONCLUSIONES GENERALES.....	221
7.3 RETOS DE FUTURO .....	222
<b>ANEXO .....</b>	<b>223</b>



ANEXO 1 .....	224
ANEXO 2 .....	230
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>245</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte sobre los temas que se tratarán en la tesis. En el estado del arte aparecerán las motivaciones o déficits que actualmente existen en las temáticas expuestas. También se presenta, a modo de introducción, una primera aproximación de la isla de calor urbana en Barcelona que será la principal región de interés. Se finaliza con la descripción del objetivo general y de los objetivos específicos que se tratarán de resolver a lo largo de los siguientes capítulos, también se presenta la estructura que seguiremos durante todo el estudio. El subíndice del capítulo es el siguiente:

1.1 Estado del arte y motivación.....	2
1.2 Una aproximación al efecto de la isla de calor urbana a Barcelona.....	8
1.3 Objetivos y estructura de la tesis.....	11

## 1.1 Estado del arte y motivación

Más de la mitad de la población mundial reside actualmente en áreas urbanas y se espera que esta tendencia demográfica aumente hasta un 68% en 2050, según Naciones Unidas (UN, 2019). Ante esta creciente urbanización mundial, los posibles impactos del cambio climático en las zonas urbanas se han convertido en una de las principales preocupaciones. Algunos de estos impactos, que ya se han observado o estimado (Stott et al., 2004; Jacob y Winner 2009; Hunt et al., 2013; IPCC 2014; UNISDR, 2015) también en Cataluña (Llasat et al., 2012, 2014, 2016a; Gilabert et al., 2014; Gilabert y Llasat. 2018) y en zonas urbanas suficientemente preparadas para las inundaciones, como Barcelona (Llasat et al., 2016b; Cortès et al., 2017), son las altas temperaturas que se revelan como un fenómeno natural muy significativo y relevante.

El principal impacto en el microclima urbano se caracteriza generalmente por el fenómeno de isla de calor urbano o *Urban Heat Island* (UHI) (Oke, 1982; Moreno-García, 1994; Arnfield, 2003; Lehoczky et al., 2017), que se refiere a que las áreas urbanas tienden a ser más cálidas que sus alrededores periurbanos y rurales, particularmente durante la noche, a consecuencia del calentamiento diferencial experimentado debido a su propia estructura y materiales. Se espera que el calentamiento global amplifique la diferencia entre las temperaturas urbanas y rurales (Giorgi, 2006; McCarthy et al., 2010; IPCC 2014), haciendo que los habitantes de las ciudades sean más vulnerables a sufrir patologías asociadas a las elevadas temperaturas (Ingole et al., 2020). Una situación climática cálida (Meehl y Tebaldi, 2004), interactúa de forma no lineal con el efecto UHI para producir niveles extremadamente altos de estrés por calor sobre los ciudadanos. El efecto combinado de la UHI y el cambio climático también implican un desafío significativo para la sostenibilidad energética y diseño de las infraestructuras en los ecosistemas urbanos (Hunt y Watkiss, 2011). Por otro lado, la influencia del efecto de isla de calor aumenta las temperaturas dentro de la capa límite urbana (*Planetary Boundary Layer*, PBL) (Oke, 1982) definida como la parte inferior de la atmósfera cuyas características se ven afectadas por la morfología urbana. La presente urgencia de responder a estos impactos ha aumentado el enfoque a fin de comprender y modelizar los eventos de calor extremo en áreas urbanas.

El efecto UHI es un fenómeno bien estudiado que surge debido a múltiples causas, como la excesiva absorción de calor de los materiales de construcción, la geometría del dosel urbano, la disminución de la evapotranspiración, el calor antropogénico liberado o las emisiones de la industria y el transporte (Oke, 1982; Grimmond, 2007). Estos factores alteran el equilibrio energético de la superficie urbana, lo que implica flujos de calor sensible generalmente elevados, flujos de calor latente más bajos debido a la escasa evapotranspiración y flujos de calor antropogénicos considerables (como los sistemas de aire acondicionado) que luego se liberan por la noche (Harman y Belcher, 2006). Otros factores que controlan la intensidad de la UHI son la presencia del mar (Chen et al., 2011; Sharma et al. 2016); tipo de vegetación y cubiertas del suelo (Coseo y Larsen 2014; Imran et al. 2019); condiciones meteorológicas (Arnfield, 2003); y tamaño, morfología y densidad de la ciudad (Oke, 1973; Zhou et al., 2017). El balance energético de la superficie urbana impulsa no solo la evolución temporal de la UHI, sino también la evolución y la estructura vertical de la capa límite (Barlow, 2014). Los procesos que controlan la UHI actúan en un rango de escalas espaciales y temporales que abarcan la profundidad de la capa límite (Barlow, 2014). Además, la presencia de grandes elementos de rugosidad en la superficie ejercen un arrastre sobre el flujo del viento, provocando una gran dependencia espacial del mismo, junto con flujos turbulentos de calor, masa e impulso (Arnfield, 2003; Barlow, 2014).

Las alteraciones del entorno natural asociadas a la actividad urbana hacen que la variabilidad climática en los paisajes urbanos sea más compleja que en las zonas periurbanas y rurales. El Segundo Informe de Evaluación del Cambio Climático en las Ciudades de la Red de Investigación del Cambio Climático Urbano (ARC 3.2) (Rosenzweig et al., 2018), sitúa la tasa de aumento de temperatura anual media por década entre 0.1 y 0.5°C en el período 1961- 2010 en el promedio de las ciudades analizadas. Y se estima que la temperatura subirá entre 1.3 y 3°C hacia mediados del siglo XXI (2040-2070) y entre 1.7 y 4.9°C hacia finales (2070-2100).

Las olas de calor (*heat waves*, HW) son uno de los eventos meteorológicos más mortíferos y se espera que su frecuencia, intensidad y duración aumenten en el futuro debido al cambio climático (Ballester et al., 2009; Li y Bou-Zeid, 2013; De Jarnett y Pittman, 2017; Sheridan y Dixon, 2017). En consecuencia, los impactos en la salud relacionados representarán una preocupación emergente para la salud ambiental (Wolf y McGregor, 2013). Los episodios de

temperaturas extremas se intensifican especialmente en las ciudades a consecuencia de las propiedades intrínsecas y singulares anteriormente citadas (Stewart y Oke, 2012). Este efecto microclimático puede agravarse durante los veranos calurosos y las altas temperaturas pueden provocar estrés por calor (Guarino et al., 2014)

Históricamente, se ha publicado una cantidad considerable de investigaciones referentes a la problemática singular de las ciudades (Arnfield, 2003; Rizwan et al., 2008). Sin embargo, se han revelado inconsistencias metodológicas al comparar diferentes estudios, siendo la razón principal la falta de estandarización de las propiedades que afectan el comportamiento térmico urbano específico (Stewart, 2011). Para solucionar el problema, Stewart y Oke (2012) propusieron una nueva metodología denominada Zonas Climáticas Locales o *Local Climate Zones* (LCZ). La metodología consiste en un sistema de estandarización para áreas urbanas y también rurales clasificadas según sus respuestas térmicas. Se propone una clasificación con un total de 17 categorías de usos del suelo medibles y comparables basadas en una combinación de parámetros geométricos, térmicos, radiativos y metabólicos que caracterizan las áreas urbanas y periurbanas. En esta clasificación, las propiedades definidas de cada uso del suelo están directamente ligadas a una perspectiva térmica que permite estudiar los efectos del clima urbano con más detalle espacial y temporal (Bechtel et al., 2015). El entramado urbano construido está bien abarcado por el enfoque LCZ (Benzie et al., 2011; Inostroza et al., 2016) y gracias a las propiedades intrínsecas de cada categoría es posible caracterizar su temperatura (Skarbit et al., 2015; Geletič et al., 2016; Gilabert et al., 2020).

Desde la aparición de la metodología LCZ, el proyecto internacional *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) ha creado un portal con pautas basadas en datos de observación de la Tierra, con el objetivo de construir una base de datos mundial de cartografías de LCZ. Esta estandarización permite realizar comparaciones entre ciudades, al mismo tiempo que proporciona mejores datos para los modelos meteorológicos y climáticos (Brousse et al., 2016; Ching et al., 2018). Además la caracterización a partir de LCZ permite considerar métodos adaptativos proponiendo cambios hacia una planificación urbana más sostenible. Finalmente, las LCZ constituyen un estándar que abre las puertas a construir nuevas interrelaciones con el objetivo de crear métodos nuevos de sostenibilidad para disminuir la elevada exposición y

vulnerabilidad y, en consecuencia, mejorar la resiliencia a partir de posibles escenarios de mitigación.

Existen muchos enfoques sobre la definición del término vulnerabilidad (Cutter, 1996; UNISDR, 2009; Llasat et al., 2009). La más usual es la que considera la vulnerabilidad como la propensión de los seres humanos, sus medios de vida y sus bienes, a sufrir efectos adversos cuando se ven afectados por eventos peligrosos. La vulnerabilidad se relaciona con predisposición, susceptibilidad, fragilidad, debilidad, deficiencia o falta de capacidad, y todo ello favorece a los efectos adversos sobre los elementos expuestos (Thywissen, 2006).

La vulnerabilidad ante una situación específica, interactuando con un evento peligroso, o peligrosidad, generaría un determinado nivel de riesgo (Lavell, 2003; Cannon, 2006; Cutter et al., 2008). Por ejemplo, una población puede ser vulnerable a huracanes, pero no a deslizamientos de tierra. Desde la perspectiva del cambio climático, las condiciones ambientales básicas van cambiando progresivamente, y con ello se inducen nuevas condiciones de riesgo para la sociedad. Por ejemplo, eventos más frecuentes e intensos pueden introducir factores de riesgo en nuevas áreas, revelando una vulnerabilidad subyacente. De hecho, la vulnerabilidad está sujeta a las condiciones presentes de las comunidades que pueden estar expuestas en el futuro (Patt et al., 2005). Es decir, nuevas amenazas en áreas que no estaban sujetas previamente a ellas, generarán nuevas vulnerabilidades (Alwang et al., 2001; Cardona et al., 2003; López-Calva y Ortiz, 2008; UNISDR, 2009). El Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014) describe la vulnerabilidad como una función de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, como también lo reflejan, por ejemplo, McCarthy et al. (2001), Brooks (2003), Füssel y Klein (2006), y Brien et al. (2008). En ecosistemas urbanos, la vulnerabilidad térmica se entiende como una combinación de exposición al calor (en el caso de un enfoque a las elevadas temperaturas) y de sensibilidad (relacionada con la población y sus características).

El factor de exposición se refiere al inventario de elementos en un área en la que pueden ocurrir eventos peligrosos (Cardona, 1990; UNISDR, 2009). Por lo tanto, si la población no estuviera ubicada en entornos potencialmente peligrosos, no existiría riesgo potencialmente elevado. Si bien la literatura y el uso común a menudo confunden exposición y vulnerabilidad, son términos distintos. La exposición es un determinante del riesgo necesario, pero no suficiente. Es

posible estar expuesto, pero ser no vulnerable. Sin embargo, para ser vulnerable a un evento extremo, también es necesario estar expuesto. Es por ello por lo que tradicionalmente la exposición se encontraba incluida en la vulnerabilidad (UNISDR, 2009).

El uso del suelo y la planificación territorial son factores clave en la reducción de la vulnerabilidad. El entorno ofrece recursos para el desarrollo, al mismo tiempo que representa la exposición a condiciones peligrosas intrínsecas y fluctuantes.

La sensibilidad en cambio es la predisposición física de los seres humanos a verse afectados por un fenómeno peligroso debido a la falta de resistencia y predisposición a sufrir daños, lo que hace plausible que dichos sistemas, una vez impactados, colapsen o sufran daños y perjuicios importantes debido a la influencia de un evento de peligro.

Otro término ligado directamente a la vulnerabilidad es el referido a justicia climática que se centra en los impactos y la experiencia local, las vulnerabilidades no equitativas, la importancia de la comunidad en cuanto a su funcionalidad y demanda sobre una región heterogénea (Schlosberg et al., 2014).

Estos términos se pueden estudiar desde una perspectiva enfocada a las situaciones de temperaturas extremas en las ciudades (Gilabert et al., 2020). Las olas de calor y elevadas temperaturas, ligadas a la peligrosidad y asociadas a la tendencia positiva debida al cambio climático, crean un entorno de vulnerabilidad particular sobre el entramado urbano. En este caso la vulnerabilidad estará asociada a las características generales de la comunidad, la exposición al calor estará asociada a la población que vive en ella y la sensibilidad a las características de la propia población.

Existen numerosos estudios que analizan la vulnerabilidad y la exposición a escala urbana para episodios de calor extremo (Xu et al., 2012; Weber et al., 2015; Krstic et al., 2017; Eum et al., 2018), pero pocos se han estudiado desde una perspectiva que las relacione con las LCZ. Actualmente existen trabajos que caracterizan térmicamente las LCZ (Skarbit et al., 2015; Geletič et al., 2016; Verdonck et al., 2018) pero no se han realizado bajo un enfoque climático. Caracterizando las LCZ es posible poder correlacionarlas con los términos exposición, sensibilidad y, por consiguiente la vulnerabilidad, y nos permite, en definitiva, poder aplicar estrategias de mitigación frente a elevadas temperaturas.



Tal y como hemos comentado anteriormente, las LCZ también pueden ser de gran importancia como inputs de los modelos urbanos tanto meteorológicos como climáticos. Existen modelos que han adaptado su código para poder usar dicha clasificación. Este es el caso de los modelos WRF BEP+BEM (Martilli et al., 2016) o UrbClim (De Ridder et al., 2015) en los que, gracias al alto detalle de categorías urbanas, las ecuaciones se pueden resolver de forma más exacta y precisa. En este sentido, se resuelven problemas de escala y detalle que no incluyen otros modelos de dosel urbano muy utilizados en estudios de mitigación en ciudades, como el *Single Layer Urban Canopy Model* (SLUCM) (Sharma et al., 2016; Imran et al., 2019) o el Princeton UCM (Li et al., 2016; Jacobs et al., 2018).

En las últimas décadas, los modelos meteorológicos se han utilizado para investigar la dinámica de la atmósfera urbana y diferentes estrategias de mitigación para paliar las altas temperaturas (Salamanca et al., 2011, 2012; Fallmann et al., 2013; Li et al., 2014; Sharma et al., 2014, 2016, 2017; Jacobs et al., 2018; Imran et al., 2019). La integración de parametrizaciones del dosel urbano en modelos de mesoescala permite simular las características meteorológicas urbanas que ocurren a diferentes escalas espaciales (Chen et al. 2011; 2012).

Sin embargo, el desarrollo de modelos numéricos de alta resolución para simular la dinámica atmosférica urbana y UHI dependen de múltiples aspectos cuyas influencias no están suficientemente bien estimadas (Chen et al. 2011, 2012; Best y Grimmond 2014). Es necesario inicializar y ajustar numerosos parámetros para capturar las heterogeneidades espaciales de las áreas urbanas y maximizar la capacidad de estos modelos para simular la compleja dinámica de la meteorología urbana en cada región (Chen et al., 2011). Algunos de estos aspectos analizados hasta ahora con influencia en la ejecución del modelo son: la inicialización de la humedad y temperatura del suelo (Best y Grimmond 2014; Sharma et al., 2017); la parametrización del dosel urbano (Martilli 2002; Salamanca y Martilli 2010; Sharma et al., 2014; Teixeira et al., 2019; Huang et al., 2019); los parámetros del dosel urbano como propiedades de la superficie y los parámetros morfológicos de la ciudad (Sievers y Frü 2012; Chen et al., 2011, 2012; De Ridder et al. 2015; Nemunaitis-Berry et al. 2017); clasificación del uso de la tierra/cobertura del suelo (Stewart y Oke 2014; Brousse et al. 2016; Li et al., 2018); el esquema de la capa límite planetaria (Banks et al. 2015); la incorporación del riego (Vahmani y Hogue 2014), entre otros. Determinar la

contribución de estos aspectos en la confianza del modelo para simular, por ejemplo, la distribución de temperatura representa un reto en la mejora de las simulaciones de atmósfera urbana y poder proponer estrategias de mitigación, mejor adaptadas.

## 1.2 Una aproximación al efecto de isla de calor urbana en Barcelona

El clima de Barcelona se ve afectado por el efecto termorregulador del mar, que disminuye el rango de temperatura diaria y anual, especialmente durante el verano, cuando el efecto de la brisa marina es más fuerte. La brisa también mitiga las temperaturas en la capa límite durante la parte más calurosa del día, evitando el sobrecalentamiento de las superficies y contribuyendo así a reducir el efecto durante la noche (Salvati et al., 2017).

En las últimas décadas se han realizado varios estudios relacionados con el estudio de la isla de calor urbana de Barcelona. Estos, han registrado diferencias que superan los 6.5°C a través de observaciones de estaciones meteorológicas, del uso de transectos nocturnos o de la teledetección. Dichos estudios muestran que los valores máximos se producen en el período invernal, cuando el efecto UHI es más intenso (Ramos et al. 1990; Moreno-García 1994; Alamús et al. 2014; Langemeyer et al. 2020).

Moreno-García (1994), determinó una diferencia de temperatura UHI promedio de 2.6°C comparando las temperaturas mínimas diarias de dos estaciones (una en la ciudad y otra en un entorno periurbano) para los meses de verano para el período 1970-1984. García-Díez et al. (2016) obtuvieron valores similares al modelizar parte del verano de 2011, con una UHI nocturna de 2.5°C de media comparando observaciones de una estación rural (el Prat) y una urbana (Raval). Salvati et al. (2017), obtuvieron una diferencia de UHI entre 1.0°C y 2.0°C de media para los meses de verano comparando los datos observados de las estaciones del Raval y las estaciones del Aeropuerto del Prat para el año 2014. Finalmente, Martin-Vide y Moreno-García (2020) analizaron la intensidad media de la UHI de Barcelona, basada en las diferencias entre las temperaturas mínimas de dos estaciones para el período 2004-2013. La media de las diferencias entre temperaturas mínimas que registraron fue de 0.9°C y el valor más alto para las diferencias fue de 3.6°C.

En estos estudios las UHI nocturnas observadas tienen intensidades máximas entre 4°C y 5°C en algunas noches de verano (García-Díez et al. 2016; Gilabert et al., 2016; Martin-Vide y Moreno-García 2020).

Dado que esta tesis no se va a centrar estrictamente en el estudio del fenómeno de isla urbana (UHI) pero siendo conscientes de su relevancia en un trabajo sobre comportamiento térmico, se ha optado por analizarlo en este capítulo introductorio. Para ello se ha realizado el estudio comparativo entre la temperatura mínima diaria en una estación situada en una zona periurbana abierta (Aeropuerto del Prat) y la temperatura mínima diaria de una estación situada en el centro de Barcelona, en concreto al Raval, durante el periodo 2008-2015

	<b>Trend</b>	<b>m</b>	<b>MA</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>p-value</b>
<b>Diaria</b>	+	0,001	3,12	1,39	<0,0001
<b>Mensual</b>	+	0,016	3,13	0,75	<0,0001
<b>Primavera</b>	+	0,075	3,2	0,62	<0,0001
<b>Verano</b>	+	0,117	2,79	0,97	0,0004
<b>Otoño</b>	+	0,034	2,99	0,52	0,082
<b>Invierno</b>	+	0,034	3,71	0,4	0,027

Tabla 1.1 Estadísticos estacionales, mensuales y diarias entre las diferencias térmicas entre el Aeropuerto y el Raval.

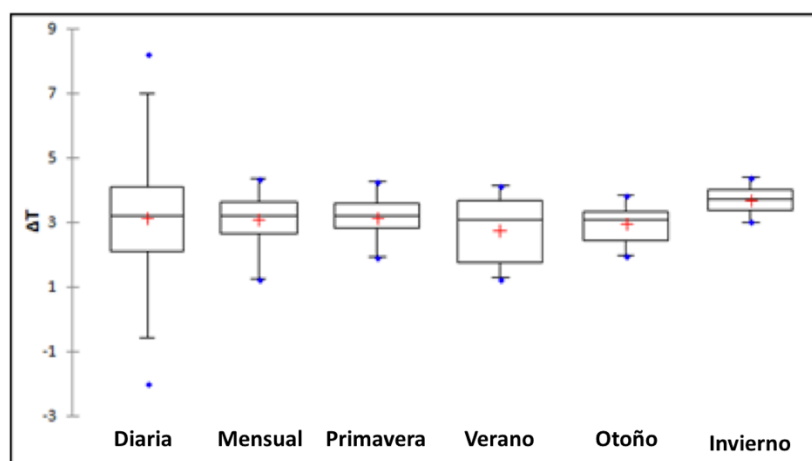


Figura 1.1. *Boxplots* estacionales, mensuales y diarias entre las diferencias térmicas entre el Aeropuerto y el Raval.

En la tabla 1.1 y figura 1.1 observamos como las diferencias son más elevadas durante el invierno, correspondiendo a los meses donde la isla de calor se acentúa más, con un valor mediano de 3.71°C. En cambio, el verano es la estación en la que las diferencias se acortan con un valor de

UHI de 2.79°C. Los resultados serían acordes con las publicaciones que se han llevado a cabo para nuestra área de estudio (ej: [Martin-Vide et al. 2015](#)). Pese a que la diferencia de temperaturas pueda parecer menor, sobre todo si coinciden con episodios extremos de temperatura, pueden afectar gravemente a la población ([Gilabert et al., 2020](#)). Es durante los veranos cuando se registrarán más noches tropicales y tórridas ([Pla Clima, 2018](#)) y es en estos momentos cuando se registran más episodios dañinos para la salud y el estrés de los ciudadanos.

A nivel de tendencias, se han ajustado para cada estación y para toda la serie completa y se ha observado que no se ajustan a una función de probabilidad normal. De este modo hemos aplicado el test no paramétrico de Mann Kendall ([Kendall, 1977](#)) para analizar las tendencias de dichas diferencias térmicas. Tal como nos describe la tabla 1.1 y la figura 1.1, observamos tendencias significativas al 95% y positivas de incremento de UHI, concluyendo que el efecto de UHI está aumentando, también acorde con los estudios citados en el apartado 1.1.

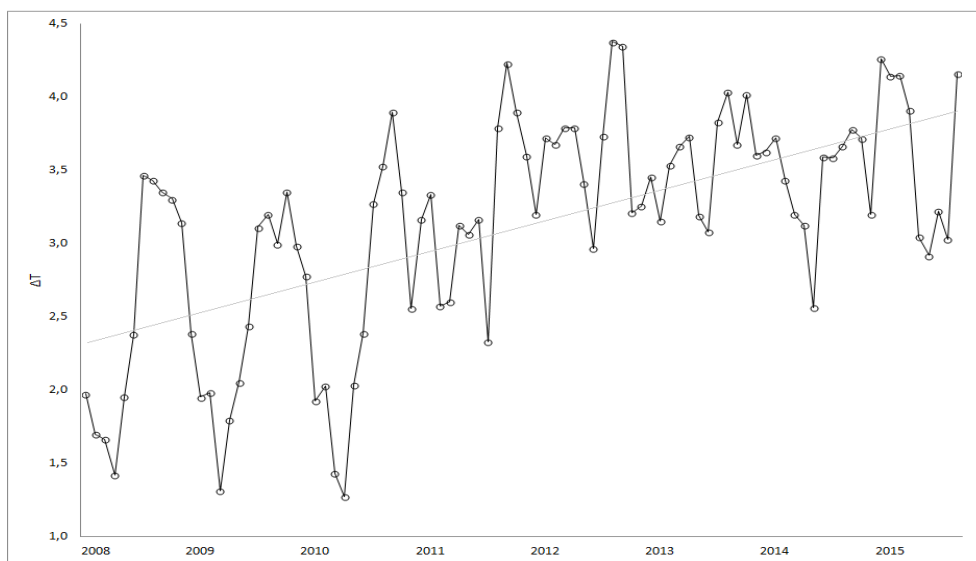


Figura 1.2 Tendencias anuales de diferencia de T entre Aeropuerto y Raval (2008-2015).

Además de este análisis estadístico, se presenta en este trabajo un estudio del comportamiento térmico sobre el ecosistema urbano de Barcelona, llevada a cabo mediante un vuelo con el sensor TASI (Sensor hiperspectral infrarrojo térmico) la noche del 20/02/2012 durante una campaña realizada por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) (fig 1.3). En este caso observamos diferencias por encima de 6°C, hallándose los máximos en los distritos con una morfología más densa, situados en el centro de la ciudad.

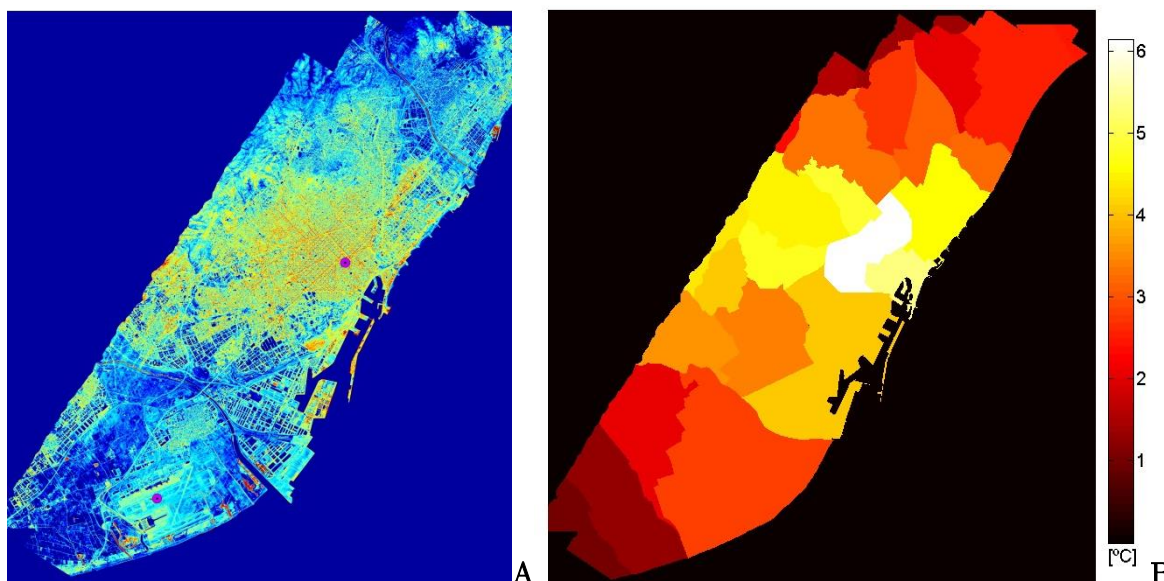


Figura 1.3 a) Imagen térmica TASI i b) UHI promedio por distritos. Vuelo realizado por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) la noche del 20/02/2012.

En conclusión, Barcelona se caracteriza por un efecto UHI con diferencias de temperaturas entre el centro de la ciudad y fuera de ella que van de los  $2.7^{\circ}\text{C}$  en verano a los  $3.7^{\circ}\text{C}$  en invierno (de promedio). Estas diferencias se van a ir agravando con el tiempo tal como ya se detecta en las tendencias y corrobora la bibliografía internacional, como el propio IPCC (2014). Sobre este problema se van a sumar las posibles variaciones en las LCZ siendo importante determinar aquellas medidas que van a contribuir positivamente a las condiciones de vida en la ciudad.

### 1.3 Objetivos y estructura de la tesis

Situados por tanto en perspectiva, sobre el comportamiento térmico de los ecosistemas urbanos, los factores potenciales que intervienen y sus impactos crecientes: La presente tesis se ha basado en ciertas hipótesis principales alcanzadas tras la experiencia y conocimiento de los investigadores, ya sea desde una perspectiva de observación de la Tierra, desde una perspectiva de modelización o desde ambas. En particular se va a tratar la complejidad del entramado urbano y el importante papel que juegan las cubiertas y otros factores antropogénicos. Una complejidad singular que modifica el clima provocando en nuestras latitudes una elevada vulnerabilidad a las altas temperaturas.

Sin embargo, todavía existe una falta de conocimiento de las dinámicas en todos los procesos e interacciones que se observan dentro de la capa límite urbana, tal y como se han ido explicando anteriormente. Fruto de estas limitaciones, enfocadas sobre todo al entramado urbano, en esta tesis doctoral se pretende, así mismo, avanzar sobre esta línea de investigación.

Dado que esta tesis es fruto de un doctorado industrial (DI) con el Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya, su objetivo persigue una aplicabilidad operacional. En esencia contempla la elaboración de una cadena de valor metodológica basada en la creación de flujos de trabajo (*workflows*) y programas que se puedan utilizar y replicar sobre productos cartográficos y de teledetección. La finalidad es la de mejorar la caracterización de una región urbana y periurbana (en este caso el área Metropolitana de Barcelona) aplicando propuestas de mitigación sostenibles ante el cambio climático. Desde una perspectiva de DI, la primera parte satisface a la empresa o entidad que financia, en este caso el ICGC. La segunda parte se enfoca principalmente en la investigación universitaria basada en el ejercicio de publicar y presentar resultados y metodologías obtenidas que pretenden ser aceptadas en la comunidad científica internacional.

Para ello es necesario entender y avanzar en el conocimiento del Área Metropolitana de Barcelona (aplicable en otras regiones del mundo), identificando el rol que tienen las cubiertas y las fracciones urbanas, así como su interrelación con las temperaturas extremas. La finalidad consiste en paliar dichos efectos mediante propuestas más sostenibles en un contexto de cambio climático. Sabiendo que todo ello, nos conduce a un gran reto a todos los niveles, no solo científicos sino también políticos y educativos.

### 1.3.1 Objetivos específicos

Basados en el objetivo principal relatado, se han establecido siete objetivos específicos:

1. Crear una cartografía de *Local Climate Zones* presente e histórica para el Área Metropolitana de Barcelona:
  - a) Mediante una propuesta metodológica internacional basada en observación de la tierra.

- b) Mediante una metodología propia aprovechando los datos de alta resolución que existen en nuestra región de interés.
2. Mejorar, mediante las cartografías creadas, la salida de modelos climáticos (en nuestro caso del UrbClim) y modelizar a alta definición el clima presente y futuro en nuestra región de interés. Caracterización de las LCZ desde una perspectiva climática.
  3. Caracterizar las *Local Climate Zones* a nivel térmico con la finalidad de poder estudiar la exposición y la vulnerabilidad al calor.
  4. Crear índices de exposición y vulnerabilidad combinando la caracterización térmica de las LCZ con una curva de riesgo de mortalidad asociada a temperaturas extremas y otras características socioeconómicas.
  5. Elaborar una metodología o flujo operacional de trabajo (*workflow*) para la preparación de inputs de alta resolución urbanos para la modelización mediante el modelo de acceso público WRF con el módulo de dosel urbano BEP+BEM.
  6. Proponer escenarios de futuro y estrategias de mitigación ante el aumento de temperatura para mejorar la respuesta térmica de nuestra área de estudio a partir de la modelización de un caso de estudio utilizando los inputs preparados en el objetivo específico 5.
  7. Elaborar *workflows* y programas de usuario para poder replicar los productos y cartografías con el objetivo de generar datos y geoservicios como herramientas de decisión y análisis aplicables a otros municipios y regiones.

Como ya se ha dicho, el presente estudio se ha llevado a cabo en el marco de Doctorado Industrial, entre el Grupo de Análisis de situaciones Meteorológicas Adversas (GAMA) del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Barcelona y el Centro de Soporte al Programa Catalán de Observación de la Tierra (CSPCOT) del Instituto Geográfico y Geológico de Cataluña (ICGC).

Un doctorado industrial consiste en un proyecto de investigación estratégico de una empresa que se desarrollará en colaboración con una universidad o un centro de investigación y que se

convertirá en el objeto de una tesis doctoral que permitirá al doctorando o doctoranda iniciar su formación y su futura carrera investigadora en un entorno dual, empresarial y académico.

El Plan de Doctorados Industriales es una iniciativa de la Generalitat de Catalunya con el fin de contribuir a la competitividad y la investigación de la industria en centros catalanes, con la finalidad de reforzar los instrumentos para captar el talento que genera el país y situar a los futuros doctores en condiciones de desarrollar proyectos de I+D+i en una empresa.

Esta iniciativa nace para dar respuesta al reto de transferir la tecnología y el conocimiento punteros y de impacto mundial que nuestro sistema universitario y de investigación ha sido capaz de generar en la última década y, en consecuencia, que dicha tecnología y conocimiento puedan revertir en el desarrollo económico y social de Cataluña.

Es por ello que este trabajo tiene como propósito lograr la aplicabilidad de los conocimientos obtenidos en el campo de la investigación y mejorar el servicio a nuestra sociedad. Por ello, los algoritmos y técnicas aquí desarrolladas se orientan para que sean fácilmente aplicados en la cadena operativa de generación de productos y servicios de geoinformación del ICGC. En este sentido, los análisis realizados en todos los capítulos se han realizado con herramientas de código abierto (R; Python; Fortran; QGIS; SAGA; GRASS; SNAP; WRF BEP+BEM *model*) a excepción de algunos tratamientos concretos con APIS o códigos comerciales (Matlab; ArcGIS; GeoView; UrbClim *model*).

### 1.3.2 Estructura de la tesis

Los diferentes objetivos enumerados anteriormente se irán resolviendo en los siguientes capítulos:

En el capítulo 2 se presenta la región de estudio que comprende principalmente el Área Metropolitana de Barcelona, y se explican los datos y modelos utilizados. En este trabajo se ha utilizado una cantidad de datos muy heterogéneos. En este sentido, se explican todos los datos relacionados con la teledetección y capas GIS, los datos meteorológicos y climáticos ya sean a partir de estaciones o reanálisis y los datos socioeconómicos. Finalmente se presentan los modelos utilizados.



---

El capítulo 3 se basa principalmente en la presentación, aplicación y validación de las metodologías de las *Local Climate Zones*.

El capítulo 4 se basa en la aplicación de las *Local Climate Zones* para hacer estudios de exposición y vulnerabilidad al calor extremo mediante datos climatológicos.

El capítulo 5 se centra en la mejora de las parametrizaciones de la morfología urbana para el modelo de dosel urbano WRF BEP+BEM y en la propuesta de escenarios de mitigación sobre un episodio de ola de calor.

El capítulo 6 se centra en la descripción de la cadena de valor, en la transferencia de conocimiento y la evaluación del geoservicio. Se trata de un capítulo enfocado a la importancia o diferenciación debida al marco de desarrollo de esta tesis como doctorado industrial.

El capítulo 7 recoge las conclusiones generales y específicas y líneas de trabajo futuro atendiendo a las nuevas oportunidades que tiene este trabajo desde una perspectiva de ordenación del territorio y de soporte de herramientas de decisión a políticas de acción climática.

# 2. REGIÓN DE INTERÉS, DATOS Y MODELOS

En este capítulo se presenta la región de estudio utilizada en el marco de todo el estudio, esta comprende la totalidad del Área Metropolitana de Barcelona así como sus alrededores, abarcando una superficie cuadrangular que será utilizada como dominio de referencia para los modelos meteorológicos y climáticos. A continuación se presentaran los datos empleados, basados en sensores remotos, bases de datos cartográficas, bases de datos y reanálisis climáticos, datos socioeconómicos y modelos meteorológicos, climáticos y de emisiones de contaminantes. El subíndice del capítulo es el siguiente:

2.2 Región de interés.....	17
2.3 Datos.....	19
2.4 Modelización climática, meteorológica y contaminación.....	39

## 2.1. Región de interés

La región de interés (ROI) que se ha establecido en este trabajo se ubica entre las coordenadas geográficas ( $41^{\circ}14'10''\text{N}$ - $1^{\circ}49'59''\text{E}$ ) y ( $41^{\circ}34'55''\text{N}$ - $2^{\circ}18'16''\text{E}$ ). La ROI comprende el Área Metropolitana de Barcelona (AMB), la segunda área metropolitana más importante de España y la sexta de Europa, con más de 3,200,000 habitantes según los datos abiertos del AMB ([www.amb.cat](http://www.amb.cat)) (fig 2.1)

El AMB y sus alrededores, está compuesta por el área municipal de la ciudad de Barcelona y 35 áreas municipales adyacentes. Está situada en el noroeste de la cuenca mediterránea y cubre un área de 636 km<sup>2</sup>. La ciudad de Barcelona (~ 1,600,000 habitantes) se encuentra en su centro, a caballo entre el río Llobregat (sur) y el río Besòs (norte), con la cordillera Litoral Catalana hacia el interior (oeste) y el mar Mediterráneo en la costa (este). La Sierra de Collserola (parte de la Cordillera Litoral Catalana), se encuentra hacia el noroeste de Barcelona, con una altitud máxima de 512m y con una alta densidad de cubierta forestal. Esta sierra suaviza la temperatura del entorno y genera fenómenos locales como puede ser la convección, también favorece a crear episodios de contaminación en Barcelona debido a su orografía (Soriano et al., 2001).

El AMB es geográficamente diversa y, como tal, presenta una gran cantidad de fenómenos meteorológicos locales. Como factor meteorológico más relevante tenemos el Mar Mediterráneo (un mar cálido), hecho que aporta humedad y actúa de potente efecto termorregulador. Las transiciones diurnas y nocturnas de la brisa marina mezcladas con el efecto de la Isla de Calor (UHI) causan una estructura compleja de la capa límite atmosférica, modificando la temperatura y la dispersión de contaminantes (Soler et al., 2011).

El clima Mediterráneo se caracteriza por inviernos suaves y secos y veranos cálidos (con una temperatura promedio de 25°C-27°C) acentuadas por la proximidad del mar, lo que resulta en una atmósfera húmeda y una marcada sensación de calor (Lionello et al., 2006). Durante el verano se registran situaciones anticiclónicas que pueden provocar intensas olas de calor acompañadas de elevadas concentraciones de contaminantes.

La precipitación total en Barcelona se encuentra alrededor de los 600mm por año. El otoño es la estación más húmeda y tiene una distribución de precipitaciones muy irregular, que pueden derivar en episodios de inundación urbana (Gilabert y Llasat, 2018; Cortès et al., 2018).

Para analizar el efecto de las altas temperaturas y aplicar el enfoque metodológico propuesto, se ha elegido dentro de la zona de interés el municipio de Barcelona, y se ha trabajado a una escala administrativa y espacial de vecindario. Barcelona se divide en 10 distritos, que se subdividen en 73 barrios. Cubre un área de 101km<sup>2</sup> y tiene una densidad de población de más de 15,000 hab/km<sup>2</sup>, más alta que Nueva York, Tokio o Nueva Delhi.

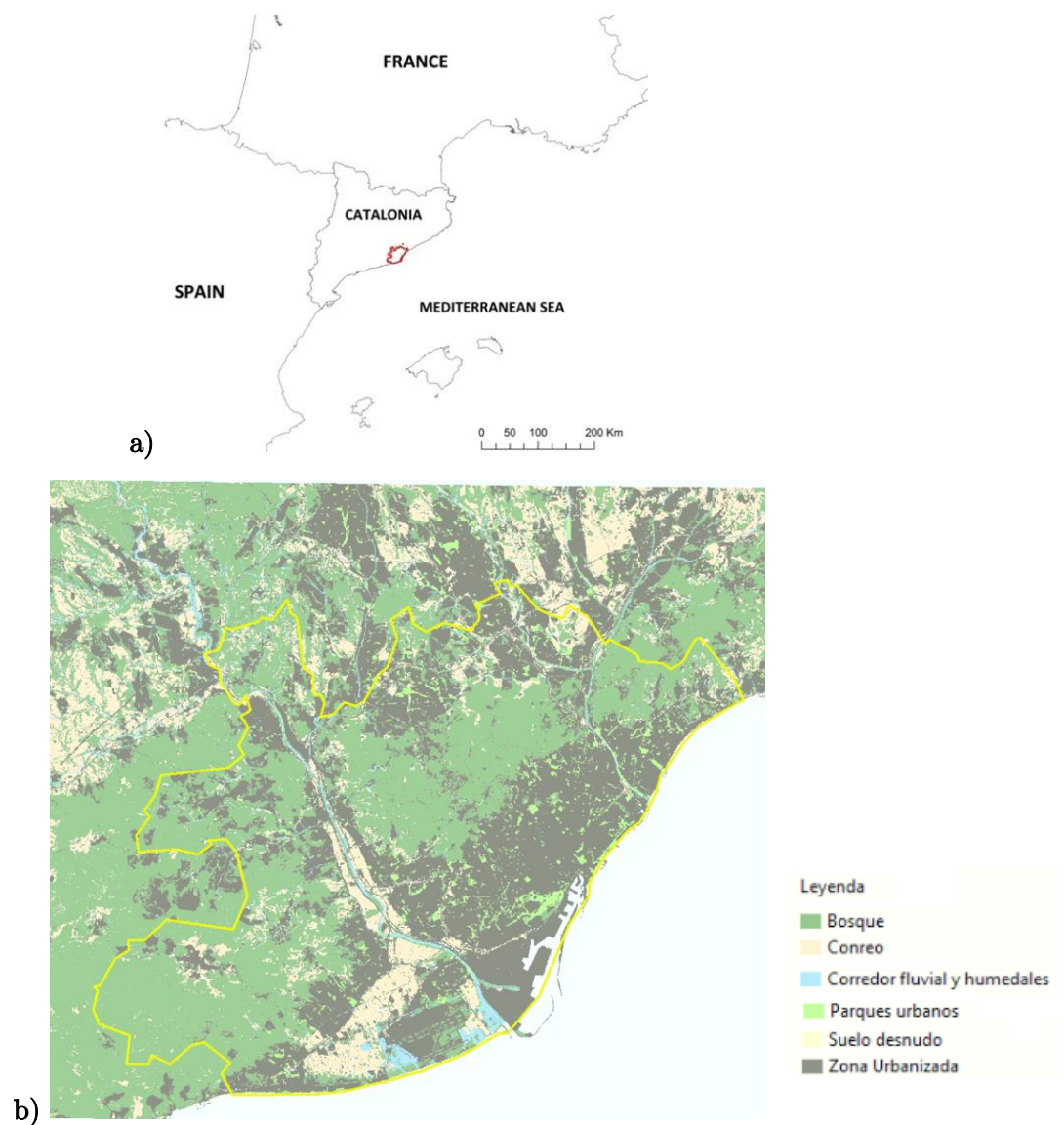


Figura 2.1. a) Ubicación del Área Metropolitana de Barcelona (AMB), b) Dominio 3 utilizado para ejecutar los modelos de dosel urbano. La línea amarilla marca el borde del AMB, mientras que la negra remarca el municipio de Barcelona.

## 2.2. Datos

Este apartado presenta una exhaustiva descripción de los distintos sensores remotos responsables de la captación de datos que transformaremos en geoinformación, bases de datos, cartografías y modelos utilizadas a lo largo de todo el trabajo. Para cada uno de ellos se describirán sus características principales así como la razón y el uso que se les ha dado, para comprender mejor el marco de las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos.

El apartado está organizado en cinco subapartados: sensores remotos (2.2.1), bases cartográficas (2.2.2), datos meteorológicos y socioeconómicos (2.2.3) y modelos climáticos, meteorológicos y emisiones (2.2.4).

### 2.2.1. Sensores Remotos

El estudio de la energía reflejada o absorbida a diferentes longitudes de onda por un objeto con el propósito de determinar sus propiedades se denomina comúnmente espectroscopia. Cada elemento posee una firma espectral característica, única como una huella dactilar, que permite identificarlo de forma unívoca. La teledetección es la técnica que nos permite adquirir un conocimiento sobre las propiedades de un cuerpo (firma espectral) sin un contacto directo (desde un sensor instalado en una plataforma a distancia del objeto a estudio), midiendo el espectro electromagnético que emite, refleja o dispersa. En el caso de que la plataforma de captación para llevar a cabo esta medida sea un avión o un satélite, se hablará de teledetección aerotransportada u espacial, respectivamente.

La detección remota es el proceso de detectar y monitorear las características físicas de una superficie al medir su radiación reflejada y emitida a una cierta distancia del área de interés. Los sensores remotos ópticos recogen la energía (radiancia) que se refleja desde la Tierra proveniente del Sol y a través de ellos se transforma en valores digitales. Mediante los sensores ópticos, los satélites y aviones toman imágenes de áreas de la superficie de la Tierra, a diferentes resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

En nuestro estudio se han utilizado datos de sensores aeroportados pertenecientes al Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC): LiDAR (sensor laser), TASI (sensor óptico en el espectro térmico), así como imágenes de satélite de las misiones internacionales Landsat y Sentinel, en el espectro óptico, que se explican a continuación.

### a) Teledetección por satélite

Para poder aplicar las distintas técnicas de clasificaciones y metodologías realizadas durante todo el trabajo y que han permitido elaborar las cartografías *Local Climate Zones*, entre otras (explicadas extensamente en los capítulos 3, 4, 5 y 6), se han utilizado los datos satélite de las misiones Landsat 5, 7 y 8 y Sentinel 2. El uso de un satélite u otro obedecerá a criterios de metodologías, temporalidad y/o resolución espacial de los datos.

Al mismo tiempo, las imágenes de satélite también se han utilizado para el cálculo de la temperatura de superficie (*Land Surface Temperature - LST*), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*), albedo y emisividad (variables que a lo largo de este trabajo de Tesis han sido utilizadas para completar los diferentes flujos metodológicos). A continuación, se resumen las características principales de los distintos satélites:

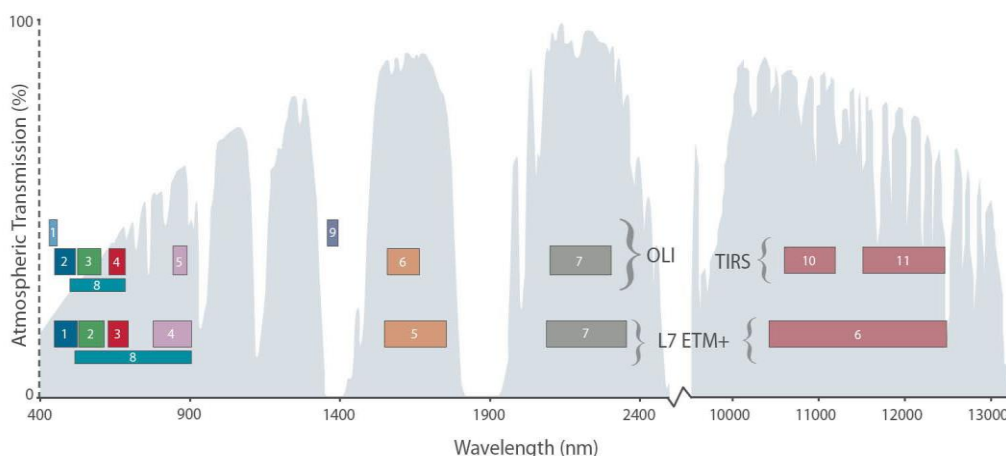


Figura 2.2. Bandas espectrales Landsat, (USGS, 2019)

- a) **Landsat 5:** El satélite Landsat 5 (L5) fue lanzado el 1 de marzo de 1984 y se ha convertido en el satélite de Observación de la Tierra que más tiempo ha estado

operativo. Fue dado de baja el 5 de junio de 2013. Sus aplicaciones se extienden a campos como la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos naturales.

El satélite tiene dos sensores: el Escáner Multiespectral (MSS) y el Mapeo Temático (TM). El sensor TM es un sensor de barrido multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS.

Opera simultáneamente en 7 bandas espectrales (fig 2.2 y tabla 2.1), de las cuales tres lo son en el rango espectral del visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo térmico. Las resoluciones espaciales (*Ground Sample Distance* - GSD) son de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo térmico.

Las escenas registradas por este sensor cubren una anchura (o *swath*) de 185km y un tiempo de revisita de 16 días.

b) **Landsat 7:** El satélite Landsat 7 (L7) fue lanzado el 15 de abril de 1999 y ha estado proporcionando datos durante 16 años.

Su sensor multi-espectral proporciona imágenes con resolución espacial (*Ground Simple Distance* - GSD) desde 15m hasta 60m y tiene un período de revisita de 16 días. El instrumento de observación de la tierra del Landsat 7 se denomina *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), una réplica mejorada del TM de su antecesor Landsat 5, ya que incluye una banda espectral (Banda Pancromática) con una resolución de 15m. También, cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y tiene una mayor resolución espacial de la banda térmica con 60m. Estos avances tecnológicos comportaron que, dentro de la comunidad científica en Observación de la Tierra, los datos del programa Landsat y en particular con Landsat 7 hayan sido una prioridad en la generación de cartografías térmicas hasta una escala 1:25,000, principalmente, en áreas rurales y ecosistemas naturales extensos.

Una imagen Landsat 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales (fig 2.2, tabla 2.1) que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento.

Problemas técnicos en el sensor, en concreto en el Escáner Corrector Lineal (SLC) a partir de mayo de 2003, han comportado que tan solo se hayan aprovechado el 70% de sus capacidades.

Bandas L5 y L7	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	GSD (m)
1 AZUL	0.45 - 0.52	30
2 VERDE	0.52 - 0.60	30
3 ROJA	0.63 - 0.69	30
4 INFRARROJO CERCANO (NIR)	0.77 - 0.90	30
5 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 1	1.55 - 1.75	30
6 TERMICA	10.40 - 12.50	60 * (30)
7 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 2	2.09 - 2.35	30
8 PANCROMÁTICA	0.52 - 0.90	15

Tabla 2.1. Descripción de las bandas Landsat 5 y Landsat 7.

c) **Landsat 8:** El satélite Landsat 8 (L8) fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es el de dar continuidad a las series, trabajos y operativas del programa Landsat. Es un satélite más completo que su antecesor, con funciones mejoradas para monitorizar la calidad del agua y nubes en altura (dicha información permite mejorar los modelos atmosféricos que se utilizaran para transformar la radiancia que llega al detector por la reflectividad de la superficie terrestre observada).

Landsat 8 está formado por dos sensores: el Sensor Operacional de Imágenes de tierra (OLI) y un sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

OLI es un sensor *push-broom*, con un telescopio de cuatro espejos y una cuantificación de 12 bits y recopila datos para bandas espectrales de infrarrojo visible, infrarrojo cercano de onda corta, con un resolución de 30m, así como una banda pancromática (bandas 1 a la 9) a 15m.



TIRS recopila datos en dos bandas espectrales estrechas en la región térmica (sus antecesores lo hacían en una única banda espectral ancha). Los datos TIRS de 100m de resolución, se co-registrarán con los datos OLI para crear productos de datos de 12bits corregidos en el terreno, radiométricamente y geoméricamente.

Landsat 8 proporciona por lo tanto 11 bandas de cobertura (fig 2.2., tabla 2.2) y tiene un período de revisita de 16 días para cualquier punto.

Bandas L8	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	GSD (m)
1 AEROSOLES	0.43 - 0.45	30
2 AZUL	0.45 - 0.51	30
3 VERDE	0.53 - 0.59	30
4 ROJA	0.64 - 0.67	30
5 INFRARROJO CERCANO (NIR)	0.86 - 0.88	30
6 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30
7 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30
8 PANCROMÁTICA	0.50 - 0.68	15
9 CIRRUS	1.36 - 1.38	30
10 INTRARROJA TÉRMICA (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
11 INFRARROJA TÉRMICA (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Tabla 2.2. Descripción de las bandas Landsat 8.

d) **Sentinel 2:** La misión de observación de la tierra Sentinel 2 (S2) es gestionada por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del programa *Copernicus* con la finalidad de realizar observaciones del planeta y dar servicios de seguimiento, gestión y evolución de los cambios en la corteza terrestre. Sentinel 2 está compuesto por dos satélites idénticos 2A y 2B, ambos trabajan en órbitas heliosíncronas a la misma altura para así ofrecer datos complementarios y prácticamente parejos radiométrica y geoméricamente, con lo que mejora el tiempo de revista a 5 días. El satélite 2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y el 2B en marzo de 2017.

La constelación actual Sentinel-2 embarca un sensor Multi-espectral (MSI). El MSI funciona pasivamente, al recoger la luz solar reflejada por la Tierra. Se adquieren nuevos datos en el instrumento a medida que el satélite se desplaza a lo largo de su trayectoria orbital. El haz de luz entrante se divide en un filtro y se enfoca en dos

conjuntos de planos focales separados dentro del instrumento; uno para bandas visibles y casi infrarrojas (VNIR) y otro para bandas infrarrojas de onda corta (SWIR). La separación espectral de cada banda en longitudes de onda individuales se logra mediante filtros de banda montados en la parte superior de los detectores. En la tabla 2.3 podemos ver las diferentes bandas.

Bandas S2	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	GSD (m)
1 AEROSOLES	0.43 – 0.45	60
2 AZUL	0.45 – 0.52	10
3 VERDE	0.54 – 0.57	10
4 ROJA	0.65 – 0.68	10
5 BORDE ROJO 1	0.69 – 0.71	20
6 BORDE ROJO 2	0.73 – 0.74	20
7 BORDE ROJO 3	0.77 – 0.79	20
8 INFRARROJO CERCANO (NIR) 1	0.78 – 0.90	10
8A INFRARROJO CERCANO (NIR) 2	0.85 – 0.87	20
9 VAPOR DE AGUA	0.93 – 0.95	60
10 CIRRUS	1.36 – 1.39	60
11 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 1	1.57 – 1.65	20
12 INFRARROJO ONDA CORTA (SWIR) 2	2.10 – 2.28	20

Tabla 2.3. Descripción de las bandas Sentinel 2.

#### e) Datos satélite utilizados

Introducidas las principales características de las plataformas utilizadas en este trabajo, mostraremos cuales han sido los datos/imágenes descargadas (tablas 2.4, 2.5 y 2.6) para generar las correspondientes cartografías temáticas y/o obtener los parámetros de entrada e interés para los modelos utilizados (descargados des de la página oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Para la generación de la cartografía temática LCZ:

Satélite	Fecha	Período de tiempo
LANDSAT 5	28/06/1987	Pre-Juegos Olímpicos
LANDSAT 7	10/08/2000	Pre-Fórum Universal de las Culturas
LANDSAT 8	20/02/2015	Presente
LANDSAT 8	17/06/2015	Presente
SENTINEL 2	30/11/2015	Presente

Tabla 2.4. Imágenes utilizadas para cartografiar los distintos mapas de LCZ.

Para la obtención de la LST:

ID	Satélite	Fecha	Hora (UTC)	Sol EL	Sol AZM
L5_1986	LANDSAT 5	1986/06/25	9:53:53	59.367	117.645
L5_1987	LANDSAT 5	1987/08/15	9:56:30	52.638	128.968
L7_2001	LANDSAT 7	2001/06/26	10:19:47	63.443	126.724
L5_2003	LANDSAT 5	2003/08/11	10:07:20	54.989	131.070
L8_2015	LANDSAT 8	2015/08/03	10:36:15	59.752	136.878
L8_2016	LANDSAT 8	2016/09/06	10:36:51	50.612	149.270

Tabla 2.5. Imágenes utilizadas para calcular la LST, se muestra el satélite usado, la fecha, la hora en UTC y la posición.

Para el cálculo de emisividad y albedo se eligió una imagen de cada mes sin nubes es por esta razón que no se pudo mantener un año constante y se usaron imágenes de diferentes años.

Satélite	Fecha
LANDSAT 5	11/1/19
LANDSAT 5	12/2/19
LANDSAT 5	16/3/19
LANDSAT 5	11/4/17
LANDSAT 5	5/5/14
LANDSAT 5	14/6/17
LANDSAT 5	6/7/19
LANDSAT 5	20/8/18
LANDSAT 5	21/9/18
LANDSAT 5	23/10/18
LANDSAT 5	21/11/17
LANDSAT 5	23/12/17

Tabla 2.6. Imágenes utilizadas para calcular la emisividad y el albedo anual, se han seleccionado una imagen sin nubes por cada mes entre el 2014 y el 2019.

## b) Teledetección Aerotransportada

Los sensores aerotransportados utilizados a lo largo de esta Tesis han sido el sensor óptico en el espectro térmico TASI y el sensor activo láser LiDAR. El TASI, nos permite obtener imágenes térmicas a una resolución espacial (según operativa de vuelo) inferior a los 4m, con lo que ha permitido poder analizar los efectos de isla de calor urbana con un detalle espacial muy elevado en nuestra zona de estudio, así como otros trabajos realizados en el ICGC durante el período del Doctorado Industrial (informes anexados). El sensor LiDAR, nos ha proporcionado el modelo digital del terreno y el modelo digital de superficie de toda la región de interés a una resolución espacial de 2m. Con esta información se han podido mejorar los inputs de los modelos climáticos y meteorológicos urbanos que se han empleado (descritos en la sección 2.4). El LiDAR también se ha tenido en cuenta en la elaboración de las LCZ ya que las categorías urbanas descritas en esta metodología se distinguen por la densidad de los edificios y sus características altimétricas.

Sensores:

- a) **TASI:** El *Thermal Airborne Spectrographing Imager* (TASI) es un sensor hiperspectral térmico aerotransportado fabricado por la empresa canadiense ITRES operativo en el ICGC desde el año 2009.

Los sensores hiperspectrales permiten la recuperación a distancia de información sobre la energía irradiada por un objeto en un elevado número de bandas espectrales contiguas (>30) con el objetivo de identificar los materiales que lo constituyen a través de su respuesta espectral. Esta se caracterizará por la absorción selectiva de la radiación incidente en función de las características moleculares de los materiales que lo constituyen. Dependiente de la zona del espectro electromagnético empleada para el estudio, se habla de radiación dentro del rango visible (VIS), el infrarrojo próximo (NIR), el infrarrojo medio (SWIR y MWIR) y al infrarrojo térmico (LWIR o TIRO), como se describe en la figura 2.3.

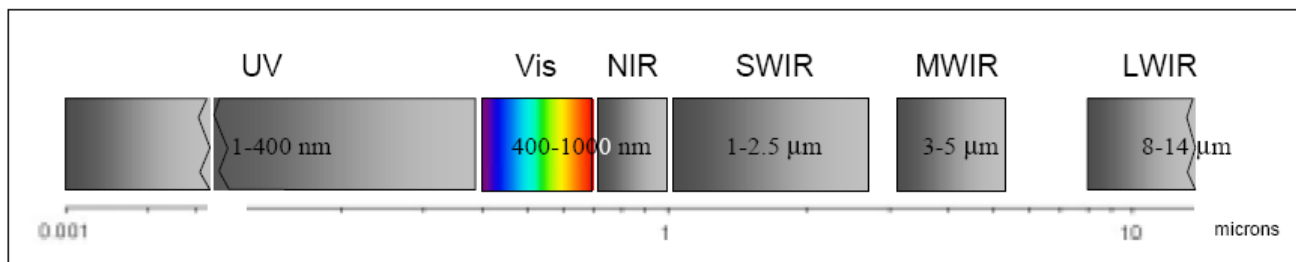


Figura 2.3. Descripción del espectro electromagnético cubiertos con sensores hiperespectrales.

El TASI adquiere información sobre la cubierta observada en 32 bandas dentro de la ventana espectral [8µm, 11.5µm] y en un campo de visión de aproximadamente 40° dividido en 600 píxeles nominales.

Las plataformas utilizadas para operar el sensor son el *Partenavia P-68* y el *Caravan*, los dos aviones no presurizados de los que dispone el ICGC. La altura máxima operativa con el TASI es de 3,200m con *Partenavia P-68*, y 4,100m con el *Caravan*, que se traducirá en una resolución espacial de los datos TASI de 4mx4m con el *Partenavia P-68* y de 5mx5m con el *Caravan* (más detalles técnicos en la tabla 2.7).

Sensor TASI			
	<i>GSD (m)</i>	<i>Anchura pasada (m)</i>	<i>Altura de vuelo (m)</i>
	0.5	300	412
	1	600	824
<b>Partenavia/</b>	1.5	900	1236
<b>Caravan</b>	2	1200	1648
	3	1800	2473
	4	2400	3297
<b>Caravan</b>	5	3000	4121

Tabla 2.7. Resolución espacial del sensor TASI en función de la altura de vuelo y de anchura de la pasada correspondiente.

En cuanto a las técnicas de procesado de los datos TASI, el ICGC ha desarrollado una cadena productiva que permite la recuperación de la temperatura absoluta y del espectro de emisividad a nivel de píxel. El primer paso de dicha cadena consiste en la estimación de la geometría de vuelo para determinar el ángulo de observación de cada punto de la imagen. Posteriormente, se procede a la estimación de las contribuciones atmosféricas en los diferentes canales hiperespectrales del sensor (32 en total) usando

radiosondeos lo más simultáneos posibles a la captura de datos, así como de perfiles atmosféricos dados por modelos climatológicos o estándares. La descripción de la atmósfera durante el proceso de adquisición es fundamental para el programa de simulación *MODerate spectral resolution atmospheric TRANSmittance* (ModTRan5.0), que devuelve una caracterización de la atmósfera en función de la longitud de onda. El paso final es la separación del parámetro de temperatura y del vector de emisividad, que resultan acoplados dentro de la ecuación de transferencia radiativa que describe los mecanismos de propagación de la radiación electromagnética al infrarrojo térmico. Para cumplir esta tarea, el ICGC dispone de dos técnicas, denominadas *Temperature (T) and Emissivity (E) Separation* (TES) y *Automatic Retrieval of Temperature (T) and Emissivity (E) using Spectral Smoothness* (ARTEMIS), la primera más adecuada para las superficies naturales y la segunda para los entornos artificiales (fig 2.4).

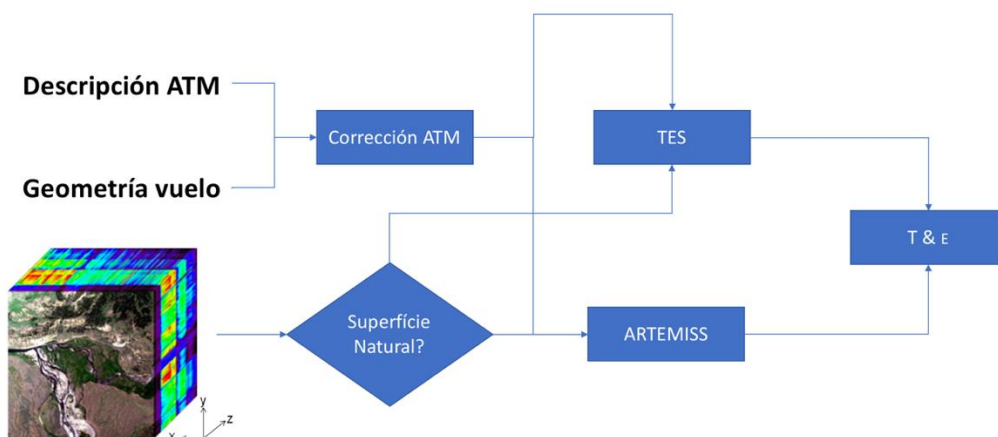


Figura 2.4. Cadena de procesado de los datos TASI para la recuperación de temperatura y emisividades.

En cuanto a la precisión del sensor TASI respecto a la recuperación de temperatura de la cadena de procesado de la ICGC es inferior a los 0.2K, si se dispone de un radiosondeo simultáneo al proceso de adquisición de los datos TASI. En cambio, puede llegar cerca del grado si se utilizan perfiles atmosféricos estándares o basados en modelos climatológicos, dependiendo de las diferencias entre las características estimadas y las condiciones locales reales de la atmósfera durante el vuelo.

Los datos TASI utilizados han sido los siguientes: Se ha trabajado con tres imágenes que han permitido estudiar con gran detalle la isla de calor urbana de una parte amplia del AMB. En el capítulo de introducción se han podido ver las imágenes que muestran la distribución térmica de la ciudad de Barcelona. Los vuelos para el área de Barcelona (fig 2.5) utilizados han sido:

Vuelo nocturno durante el día 20/02/2012 (GSD=4m)

Vuelo nocturno durante el día 26/09/2014 (GSD=4m)

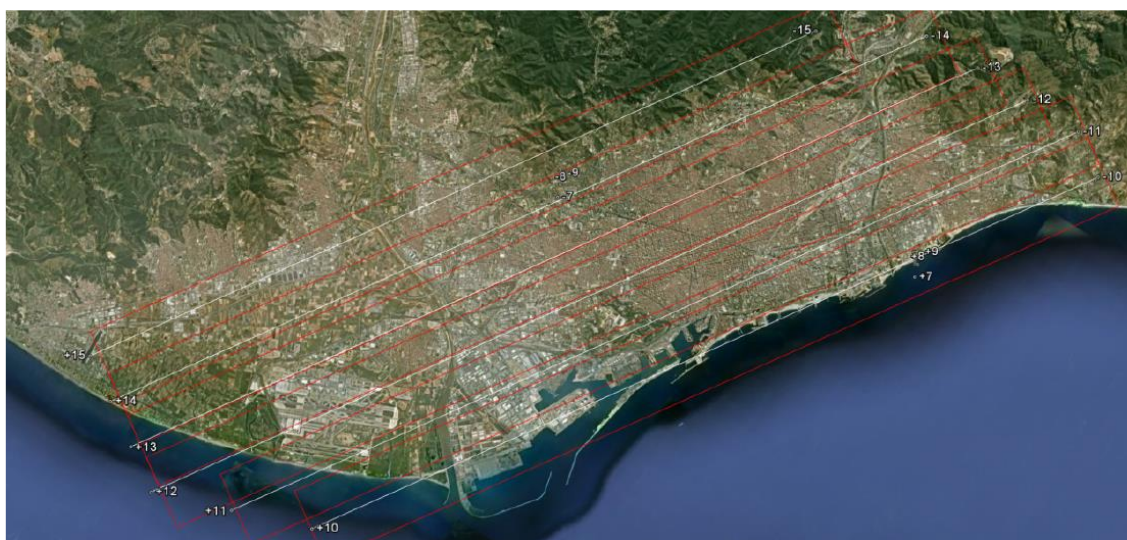


Figura 2.5. Plano de vuelo TASI 2012 i 2014 realizado por ICGC

b) **LiDAR:** El LiDAR (*Light Detection And Ranging*) es un sensor activo, ampliamente utilizado en Observación de la Tierra que aprovecha la luz láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de posición y altitud (X, Y, Z). El sistema o sensor LiDAR, empleado principalmente en aplicaciones de representación cartográfica tridimensional, está representando una alternativa rentable para las técnicas de topografía tradicionales como la fotogrametría a partir de imágenes ópticas. El LiDAR produce bases de datos de nubes de puntos masivos.

El LiDAR es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas de topografía específicas. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en el sensor. Estos receptores registran el tiempo

preciso desde que el pulso láser dejó el sistema hasta cuando regresó para calcular la distancia límite entre el sensor y el objetivo. Combinado con la información posicional (GPS e INS), estas medidas de distancia se transforman en medidas de puntos tridimensionales reales del objetivo reflector en el espacio del objeto.

Características principales captación LiDAR utilizados:

Densidad mínima: 0.5 puntos/m<sup>2</sup>.

Cobertura sobre Catalunya LiDAR\_CAT en:

1<sup>a</sup> cobertura: entre 2008 y 2011

2<sup>a</sup> cobertura: entre 2016 y 2017

La densidad de los bloques se calcula a partir de la superficie total del bloque y todos los puntos de retorno que captura el sensor. Se ha garantizado que el 95% de los bloques tengan una densidad mínima de 0.5 puntos/m<sup>2</sup>. El 5% restante se trata de bloques que cubren masas de agua o que se encuentran en la frontera con Aragón y Francia o en la costa. Con esta densidad se pueden derivar modelos digitales de elevaciones con un paso de malla de 2 m.

- **Modelo Digital del Terreno (MDT) de Cataluña:** Modelo de malla regular que contiene altitudes ortométricas distribuidas según una cuadrícula con un paso de malla de 2m. Se trata de una base ráster tridimensional de una superficie del terreno georreferenciado (X, Y, Z), incluye no solo las altitudes y elevaciones, sino también otros elementos geográficos de carácter natural.

*Web de descarga:*

<https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Descargas/Elevaciones/Modelo-de-elevaciones-del-terreno-de-2x2-m>

- **Modelo Digital de Superficies (MDS) de Cataluña:** Modelo de malla regular que contiene altitudes de toda la superficie distribuidas según una cuadrícula con un paso de malla de 2m. Se trata de una base ráster tridimensional de una superficie del terreno georreferenciado (X, Y, Z), incluye no solo las altitudes y elevaciones, sino también



otros elementos geográficos de carácter natural y en este caso también las edificaciones.

*Web de descara:*

<https://www.icgc.cat/es/Descargas/Elevaciones/Datos-lidar>

Ambos conjuntos de datos se han usado para conocer la altitud de los edificios de las zonas urbanas de nuestra área de estudio. Los datos usados han sido datos obtenidos desde los vuelos realizados por el ICGC durante los meses de agosto, setiembre y octubre de 2016. La nube de datos se ha tratado en formato ráster para poderse analizar, corregir y utilizar.

Para obtener los datos de las alturas de los edificios, normalizadas, se ha restado el MDT con el MDS y se acopló con la cartografía 1:5,000 proporcionado también por el ICGC. La finalidad era la de tener las alturas medias en bloques de edificios marcados por el mapa 1:5,000.

c) **Ortofoto 2015:** La ortofoto es un documento cartográfico en formato ráster elaborada por el ICGC que consiste en una imagen aérea vertical que ha sido rectificadas de tal manera que se mantiene una escala uniforme a toda la superficie de la imagen. Constituye una representación geométrica a escala de la superficie terrestre. Se trata de una ortofoto de 25 cm de resolución generada a partir de imágenes con una resolución de píxel variable según las zonas. La ortofoto en color (tipo OF-25C) aporta información de la zona visible del espectro electromagnético. Muestra la combinación de bandas RGB que corresponden a los canales Rojo, Verde y Azul, y su combinación que se denomina “color natural”.

El ICGC genera una ortofoto cada año con el sensor *Leica DMC 3*. En nuestro caso se ha usado la imagen de 2015 y se ha utilizado para validar bases cartográficas.

### 2.2.2. Bases Cartográficas

Para la generación de la cartografía temática LCZ también hemos seguido una metodología basada en la conversión de las leyendas de diferentes mapas de usos y cubiertas del suelo (*Land*

*Cover Land Use* - LCLU) como inicialmente el MCS-Cat (Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña, 2009) y actualizado con el MCS-AMB (Mapa de Coberturas del Suelo del Área Metropolitana de Barcelona, 2015). Ambos mapas tienen una alta resolución espacial y se han elaborado mediante el uso de la fotointerpretación por el Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (<https://www.creaf.uab.es/mcsc>). Disponen de una extensa y detallada clasificación de hasta 241 categorías de cubiertas descritas. La otra base cartográfica empleada ha sido el *Urban Atlas* (UA) (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>) que nos define de forma muy detallada los distintos usos y cubiertas del suelo urbano.

Es importante señalar que los datos de los mapas utilizados están reconocidos en las especificaciones INSPIRE (*D2.8.11.2 Data Specification on Land Cover*).

En este caso las bases cartográficas utilizadas se han seleccionado con el objetivo de crear un mapa resultante de LCZ de base vectorial/temática y de alta resolución (HR), donde a cada polígono que constituye el tejido urbano, se le atribuya una categoría de LCZ (Gilabert et al., 2016; 2020). Existen ejemplos parecidos en la literatura como el Mapa de LCZ de la Isla de París que trabaja a resoluciones espaciales similares (elaborado por el *Institute Aménagement et d'Urbanisme, Ile-de-France*).

#### a) **Urban Atlas (2012)**

Proporciona datos de usos y cubiertas del suelo comparables en toda Europa para Áreas Urbanas Funcionales (AUF), de más de 50,000 habitantes. El *Urban Atlas* (UA) es una iniciativa conjunta de la Dirección General de Política Urbana y Regional de la Comisión Europea y la Dirección General de Empresa e Industria en el marco del programa *Copernicus* de la UE con el apoyo de la Agencia Espacial Europea y la Agencia Europea de Medio Ambiente.

Constituye una combinación ideal de entidades para generar una base cartográfica que permite analizar cambios en las cubiertas y usos del suelo a una elevada resolución espacial, siguiendo una metodología coherente con las bases *Corine Land Cover* (CLC) (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>) o Sistema de Información sobre

Ocupación del Suelo de España (SIOSE) (<https://www.siose.es/>). Sus características principales son:

785 AUF que cubren EU28+AELC (28 países de la Unión Europea y de la Asociación Europea de Libre Comercio)

La nomenclatura incluye 17 clases urbanas con una resolución (GSD) de 0.25 ha y 10 clases rurales con GSD de 1ha.

La información aportada por el UA se basa en el procesado de datos obtenidos a través de teledetección y recursos como *Open Street Map* que dan, como resultado, un mapa de usos del suelo de una resolución espacial mayor al convencional CLC, pero sin llegar a ser tan compleja como la estructura de datos al nivel de SIOSE. Al igual que la nomenclatura de suelos de CLC, el UA discrimina los usos del suelo a través de un código numérico de leyenda y su correspondiente descripción (fig 2.6).

La cartografía del UA, junto a los archivos de simbología temática, se encuentra estructurada en diferentes capas temáticas basadas en usos del suelo, vegetación y edificación. La cartografía se encuentra centralizada desde la plataforma *Copernicus* pudiendo descargar independiente la siguiente relación de capas temáticas para cada país de la Unión Europea (<https://www.copernicus.eu/en>). En la figura 2.6 podemos ver una muestra del *Urban Atlas* para la región de Barcelona.

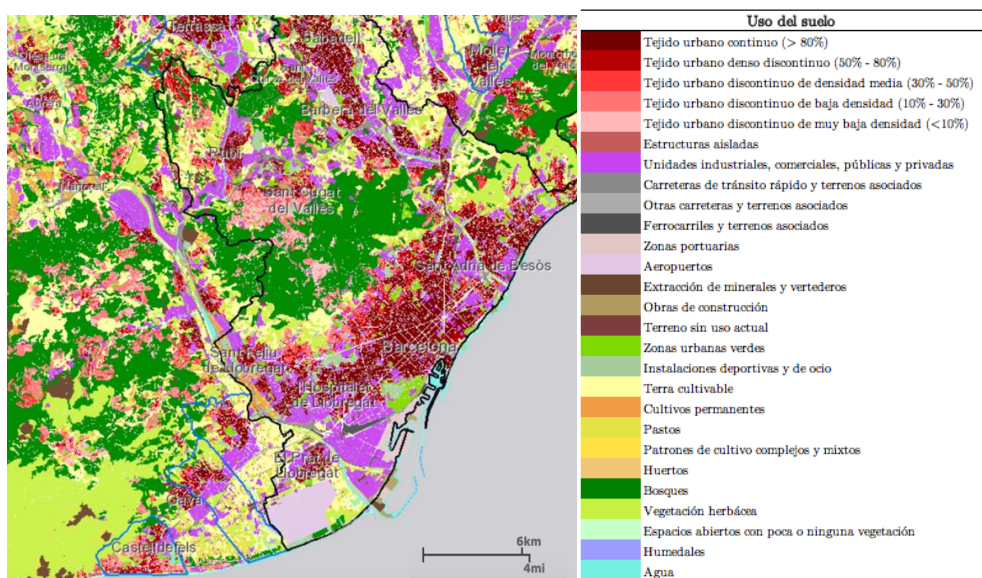


Figura 2.6. Urban Atlas 2012 de Barcelona y su conurbación.

## b) Mapas de Cubiertas del Suelo

El Mapa de Coberturas del Suelo de Cataluña (MCS-Cat) es una cartografía temática de alta resolución de los principales tipos de cubiertas del suelo (bosques, cultivos, zonas urbanizadas, etc.). La última versión de las cuatro ediciones del MCS-Cat del 2009, se realizó en el CREA, con la financiación de la *Generalitat de Catalunya*.

Gracias a las diferentes ediciones del MCS es posible saber, entre otras potenciales utilidades, si la superficie forestal aumenta o disminuye, o si la presión urbanística afecta a territorios no aptos para tales usos. En nuestro trabajo se ha utilizado inicialmente el MCS-Cat de 2009, pero se actualizó para el año 2015 gracias a una edición específica que se hizo des de el Área Metropolitana de Barcelona, siguiendo la misma metodología de fotointerpretación y leyendas.

El MCS-Cat/AMB tiene una leyenda jerárquica de 5 niveles. Para poder obtener una leyenda de este tipo, se parte de las categorías incluidas en los niveles superiores que son subdivisiones de las categorías de los niveles inferiores. El nivel jerárquico 5, con el que se ha trabajado, contempla un total de 241 categorías de uso del suelo y nos ha servido para distinguir la densidad de árboles y arbustos de las zonas naturales, zonas verdes interurbanas, etc. (ver características generales en la tabla 2.9), información de gran relevancia para una correcta categorización de las LCZ.

Cabe señalar que los niveles de leyenda 3 y 4 pertenecen a las categorías usadas en el CLC y el SIOSE respectivamente.

<b>Características</b>	<b>MCSC- 4 &amp; AMB</b>
Año	2009 – 2015 (AMB)
Escala ortofotos	1:2.500
Resolución (píxel)	0.25 m
Escala de trabajo	1:1.000
Infrarrojo color	Sí (ortofoto)
Superficie mínima captura	500 m <sup>2</sup>
Anchura mínima	10m
Categorías	241
Niveles leyenda jerárquica	5

Tabla 2.9. Características del Mapa de Cubiertas de Catalunya y del Área Metropolitana de Barcelona

### 2.2.3. Datos meteorológicos

#### a) Estaciones meteorológicas

Los datos de las estaciones meteorológicas utilizadas se han obtenido de la red de estaciones oficiales tanto del *Servei Meteorològic de Catalunya* (SMC) como de la Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET).

Para llevar a término la validación del modelo climático UrbClim se han utilizado los datos diarios de temperatura media de 5 estaciones con más de 10 años de datos obtenidos por AEMET (tabla 2.10, fig 2.8.). De esta forma se han podido obtener períodos climáticos suficientemente largos para poderlos comparar con los datos de reanálisis datos ERA-Interim, utilizados para correr el modelo UrbClim. Para la validación del modelo de temperatura/LCZ, se ha trabajado con los valores diarios medios de temperatura, de las estaciones meteorológicas de Barcelona.

ID	Estaciones	Serie	Años
1	Raval	1997-2016	19
2	Zona Universitaria	1997-2016	19
3	Fabra	1987-2016	29
4	Can Brúixa	1987-2015	28
5	Montjuïc	2004-2015	11

Tabla 2.10. Estaciones interurbanas utilizadas para la validación del modelo de Temperatura/LCZ (explicado de forma extensa en el capítulo 3).

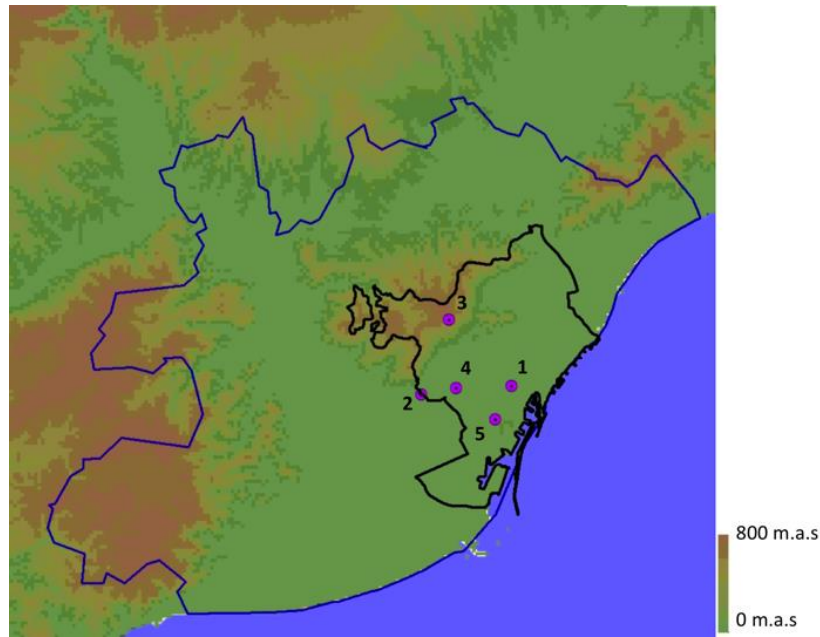


Figura 2.8. Mapa topográfico de las estaciones interurbanas utilizadas (puntos morados).

Para la validación del modelo WRF BEP+BEM se han utilizado los datos de observación del SMC. Se han seleccionado un total de 16 estaciones y el radiosondeo de Barcelona (tabla 2.11, fig 2.9).

Estaciones	T & H	Viento	Z (m)	LCZ
Vallirana			252	6
PNGarra			573	C
Castellbisbal			147	2
ObsFabra			411	A
Viladecans			3	D
VilanovaV			126	D
Badalona			42	2
Sabadell			258	D
ParetsV			123	2
ElPrat			8	D
SCugat			158	D
Zoo			7	B
Raval			33	2
ZUni			79	D
BocanaSud			3	E
ZALPrat			4	8

Tabla 2.11. Información de las estaciones usadas para validar el modelo WRF BEP+BEM (en verde se indica datos disponibles y en rojo no disponibles).

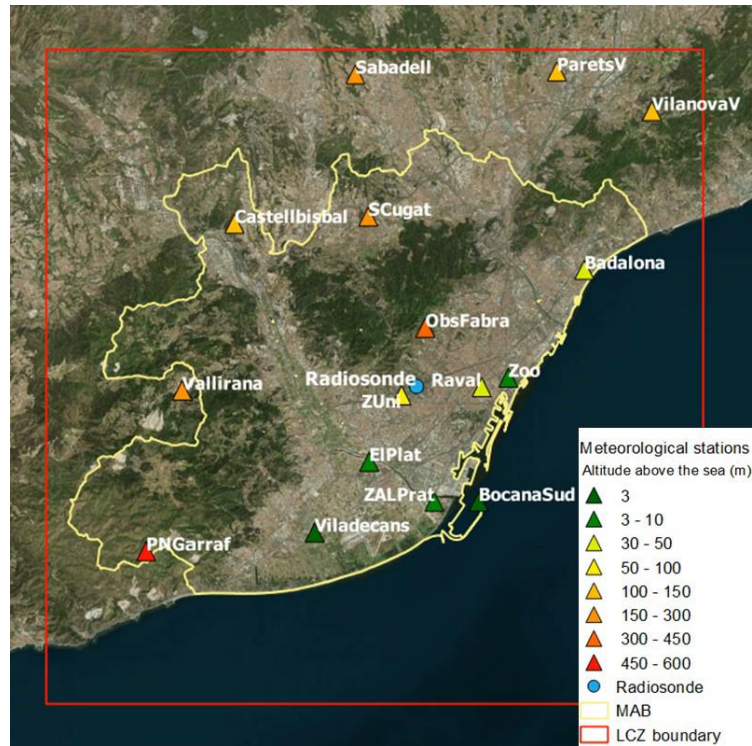


Figura 2.9. Mapa de las estaciones utilizadas para validar el modelo WRF BEP+BEM.

## b) Bases de datos de análisis y reanálisis meteorológicos

A continuación, se presentan los datos que han sido utilizados en la ejecución del modelo UrbClim: ERA-Interim y ERA5 ([www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)) para los casos de estudio simulados por el WRF-BEP/BEM.

- a) **ERA-Interim** es una base de datos de análisis atmosférico global desde 1979-2019 proporcionado por el ECMWF. El sistema de asimilación de datos utilizado para producir ERA-Interim se basa en una versión de 2006 del Sistema Integrado de Pronóstico (IFS) (Cy31r2). El sistema incluye un análisis variacional de 4 dimensiones (4D-Var) con una ventana de análisis de 12 horas. La resolución espacial del conjunto de datos es de aproximadamente 80 km (T255 espectral) en 60 niveles verticales desde la superficie hasta 0.1hPa (Berrisford et al. 2011).
- b) **ERA5** proporciona estimaciones horarias de una amplia variedad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. También lo proporciona el ECMWF. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 km y resuelven la atmósfera

utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km. ERA5- incluye información sobre incertidumbres para todas las variables con resoluciones espaciales y temporales reducidas (Hersbach et al., 2020).

Las actualizaciones mensuales de calidad garantizada de ERA5 se publican dentro de los 3 meses posteriores al tiempo real.

ERA5 combina grandes cantidades de observaciones históricas en estimaciones globales utilizando sistemas avanzados de modelado y asimilación de datos. Esta base de datos reemplaza a ERA-Interim que dejó de producirse el 31 de agosto de 2019.

ERA5 se ha utilizado para correr los dos casos de estudio seleccionados que se han modelizado con el modelo WRF.

#### 2.2.4. Datos Socioeconómicos

Como datos socioeconómicos se ha usado la base vectorial de población georreferenciada elaborada por el Instituto de Estadística de Cataluña (IDESCAT) que proporciona variables de sexo, edad, nacionalidad y lugar de nacimiento (del registro de población de Catalunya a 1 de enero de 2016) en una cuadrícula multiresolución (de 62.5m, 125m y 250m) compatible con el *grid* estándar europeo (<https://biblio.idescat.cat/publicacions/Record/21104>). La agregación se realiza con una estructura jerárquica conocida como *quadtrees*, es decir, los elementos de un nivel pueden tener como máximo cuatro descendientes. El proceso de subdivisión está determinado por la población y esto permite optimizar la resolución en función de la densidad, es decir, ofrecer más resolución en las zonas donde se encuentra una elevada densidad de población (Behnisch et al., 2013). La capa de puntos derivada de la geocodificación de las direcciones postales se agrega espacialmente utilizando un *quadtree* de resolución máxima 62.5m con un umbral mínimo de 17 habitantes (fig 2.10). Los casos en que la población es inferior a ese valor se produce una agregación a los niveles superiores de 125m o 250m. Para nuestro estudio solo ha sido necesario conocer la distribución geográfica de la población total.



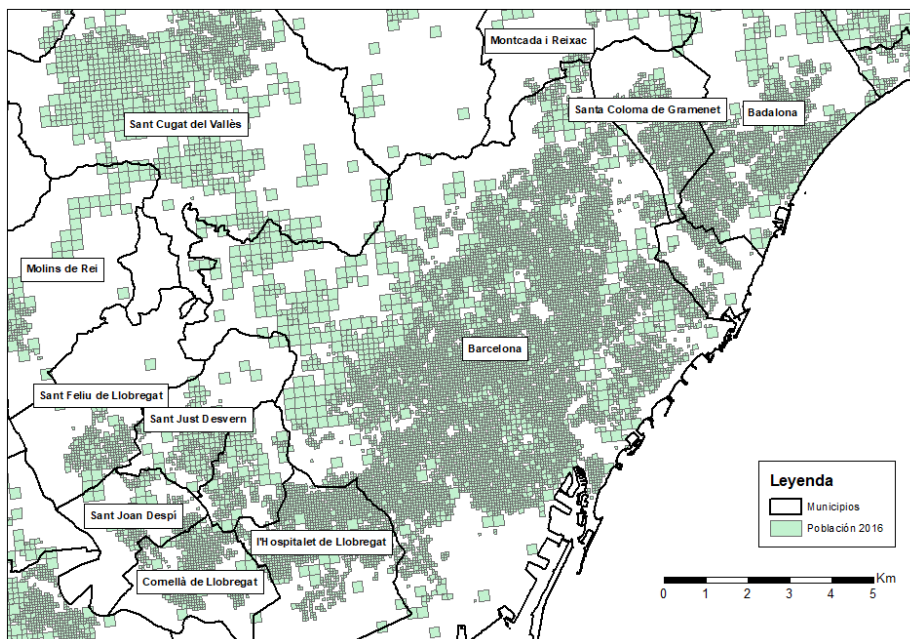


Figura 2.10. Distribución de la población de Catalunya de 2016 en algunos de los municipios del AMB. Visualización a escala 1:60,000.

Así mismo, se han utilizado datos de renta familiar por barrios de Barcelona del año 2015: Datos abiertos del Ayuntamiento de Barcelona, Oficina Municipal de Datos y presentada como Índice de Renda Familiar indexada fijando la media en base a 100 ([www.bcn.cat/](http://www.bcn.cat/)).

### 2.3. Modelización climática, meteorológica y contaminación

En este apartado se describirán genéricamente, los modelos que han permitido analizar el comportamiento térmico, desde un punto de vista climático o meteorológico (partiendo de casos de estudio concretos) y para analizar las emisiones de contaminación.

Para los estudios climáticos, se ha usado el modelo UrbClim, un modelo urbano diseñado específicamente para simular la distribución espacial de la temperatura a una resolución muy elevada. Con UrbClim se ha modelizado el clima pasado/presente (1987-2015) con datos de reanálisis ERA-Interim. Este período también se ha usado para validar y como control para poder modelizar el clima futuro usando datos de los modelos EURO-CORDEX teniendo en cuenta los RCP's 4.5 y 8.5 hasta el 2100.

Para los casos de estudio se ha usado el modelo WRF con el módulo acoplado BEP+BEM que permite aumentar la resolución a una escala urbana debido a que tiene en cuenta el esquema urbano en sus ecuaciones y datos de entrada. En el capítulo 5 se presentan los dos episodios de olas de calor modelizadas y cuales han sido las variables que se han usado y calculado para mejorar la resolución del modelo.

Para finalizar se han usado datos del modelo HERMES v.2 de emisiones, para hacer un estudio preliminar sobre desagregación de datos de emisiones 1x1km a 100x100m mediante el uso de las LCZ y la población georreferenciada.

### 2.3.1. Modelo UrbClim

UrbClim es un modelo climático urbano de dosel urbano (UCM) diseñado específicamente para simular la temperatura a una resolución espacial muy alta para lo que se refieren a este tipo de modelos, con un detalle de hasta 100 m (De Ridder et al., 2015). El modelo se fundamenta en un esquema de superficie terrestre con física urbana simplificada acoplada a una capa límite atmosférica 3D. UrbClim es más rápido computacionalmente (debido a la simplificación en sus ecuaciones) que los modelos climáticos de mesoescala de alta resolución en dos órdenes de magnitud (García-Díez et al., 2016), lo que hace posible hacer estudios relacionados con el cambio climático con un tiempo de computación significativamente más eficiente. UrbClim ha sido validado recientemente en varias ciudades europeas, incluida Barcelona (García-Díez et al., 2016). Actualmente, en el marco del proyecto del Servicio Paneuropeo de Clima Urbano (PUCS), se ha modelado el clima urbano hasta 2100, teniendo en cuenta diferentes Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), para observar las consecuencias del cambio climático a escala urbana. Barcelona, entre otras ciudades europeas, fue modelada en el marco de este proyecto, en concreto bajo la responsabilidad de VITO e ISGlobal.

El modelo UrbClim utiliza un esquema de transferencia de superficie terrestre y suelo-vegetación-atmósfera. Cada celda de la cuadrícula de superficie en el modelo está compuesta de porciones de vegetación, suelo desnudo y cubierta de superficie urbana, todas representadas mediante la cartografía de las LCZ (Gilabert et al., 2020). Se utiliza un conjunto de ecuaciones de transferencia, junto con los valores de parámetros apropiados de rugosidad, albedo, emisividad,

aerodinámica y térmica, para simular la transferencia de calor en cada celda de la rejilla de superficie. Las condiciones atmosféricas a gran escala se utilizan como condiciones de contorno laterales y superiores. El modelo de capa límite 3D representa una atmósfera simplificada utilizando las ecuaciones de continuidad para el momento horizontal, la temperatura potencial, la humedad específica y la masa.

Las simulaciones de UrbClim cubren un dominio espacial que contiene 401x401 puntos de cuadrícula horizontal a una resolución de 100m y 19 niveles verticales dentro de los 3 km inferiores de la troposfera. Los datos del modelo de conducción se actualizan cada 3 horas utilizando el reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011), que se ejecuta con una resolución espacial T255 (aproximadamente 70-80 km).

### 2.3.2. Modelos EURO-CORDEX

Modelos usados para calcular los escenarios de cambio climático usando los RCP's 4.5 y 8.5 hasta el 2100 (Jacob et al., 2014) y acoplados al modelo UrbClim.

Las simulaciones del modelo climático regional (RCM) de CORDEX para el dominio europeo (EURO-CORDEX) se realizan en dos resoluciones espaciales diferentes, la resolución general de CORDEX de 0.44 grados (EUR-44~50 km) y adicionalmente la resolución más fina de 0.11 grados (EUR-11~12.5km).

EURO-CORDEX es la rama europea de la iniciativa CORDEX y produce simulaciones climáticas conjuntas basadas en múltiples modelos dinámicos y de reducción de escala empírica-estadística, forzados por múltiples modelos climáticos globales de la Fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) hasta el año 2100. Se basan en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (RCP) correspondientes a la estabilización del forzamiento radiativo después del siglo XXI a  $4.5\text{W/m}^2$  (RCP4.5), aumento forzado radiativo de  $8.5\text{W/m}^2$  a fines del siglo XXI (RCP8.5), y pico forzado radiativo dentro del siglo XXI a  $3.0\text{W/m}^2$  y disminución posteriormente (RCP2.6, también conocido como RCP3-PD) (Nakicenovic et al., 2000; Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2011).

### 2.3.3. Modelo *Weather Research and Forecast* (WRF)

El modelo *Weather Research and Forecast* (WRF) versión 4 (Skamarock et al., 2019) es un sistema de predicción numérica de mesoescala de nueva generación diseñado para aplicaciones de predicción operativa y de investigación atmosférica (Michalakes et al., 2005). Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software. El modelo sirve una amplia gama de aplicaciones meteorológicas en escalas desde decenas de metros hasta miles de kilómetros.

El modelo WRF se fundamenta en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales de Euler no hidrostáticas, utilizando el esquema de integración de tiempo Runge-Kutta de tercer orden y discretizando los dominios espaciales y temporales. El dominio espacial 3D se divide en celdas de cuadrícula que están igualmente espaciadas horizontalmente (longitud y latitud) pero no verticalmente donde las coordenadas verticales se formulan utilizando una coordenada vertical de presión hidrostática

El sistema ARW WRF utiliza el escalonamiento de la cuadrícula Arakawa-C que define las variables de masa, termodinámicas, escalares o químicas que se ubicarán en el centro de las celdas, mientras que los componentes horizontales U (longitudinal) y V (latitudinal) del viento están definidos para que sea normal a las caras respectivas de las celdas de la cuadrícula (Skamarock et al., 2005).

#### *Módulos BEP+BEM:*

Los módulos BEP+BEM, que se pueden correr con ARW WRF, incluyen el dosel urbano (*urban canopy model*), aportando parámetros morfológicos urbanos (BEP, ej. geometría de los edificios) y características superficiales (BEM, ej. albedo, emisividad o fracción urbana).

Este módulo combinado BEP+BEM sigue la metodología de Martilli, et al. (2002) que trabaja con la versión estándar del BEP (*Multy-layer urban canopy model*) y la más reciente (Salamanca et al., 2011) que también incluye el BEM (*Indoor-outdoor exchange model*). El BEP (*Building Effect Parameterization*) considera la interacción entre construcciones y la capa límite atmosférica, incluyendo los efectos del movimiento vertical y horizontal, la energía cinética turbulenta y la temperatura potencial (fig 2.11). A la vez, se encuentra acoplado el BEM (*Building*

*Energy Model*), un modelo que mejora los resultados considerando más factores, como por ejemplo los aires acondicionados. De esto se resulta el modelo de dosel urbano acoplado BEP+BEM que fue añadido por primera vez al WRF V3.2 (Liao et al., 2014).

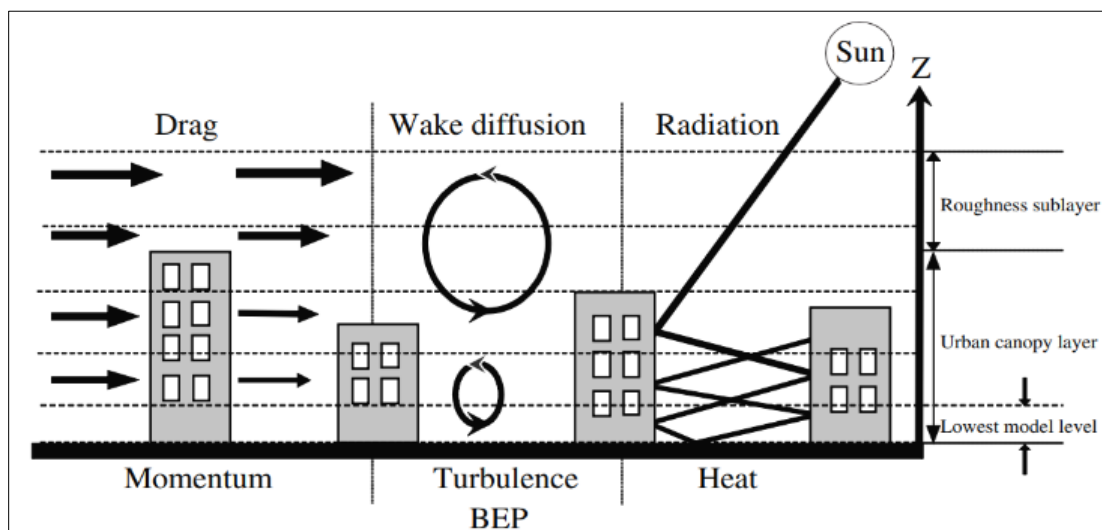


Figura 2.11. Esquema del funcionamiento del modelo BEP (Chen et al., 2011).

Este módulo tiene en cuenta efectos en la escala vertical (fachadas de los edificios) y la horizontal (techos y calles) que modifican aspectos del movimiento del aire (rozamiento), de la energía cinética turbulenta (TKE) y la temperatura potencial. La radiación incidente a los muros y carreteras tiene consecuencias como sombras, reflexiones y absorción (de onda corta y larga) que se tendrán en cuenta en este modelo.

Es por esto que el módulo BEP es capaz de ver efectos de isla de calor o inversiones térmicas producidas en las ciudades, a pesar de que la temperatura interna de los edificios la considera constante. Para mejorar esto, se generó el BEM (Salamanca y Martilli, 2010; Salamanca et al., 2010).

El BEM se desarrolló totalmente enlazado con el BEP y considera:

- Difusión de calor a través de los muros, techos y tierra.
- Transferencia de radiación a través de las ventanas.
- Intercambio de radiación de onda larga hacia el interior de los edificios.
- Generación de calor de las ciudades.

- Aires acondicionados, ventilación y calentamiento.

Así pues, el conjunto de los dos modelos WRF BEP+BEM ofrece una mejora significativa en cuanto a la modelización urbana. En esta Tesis se busca obtener la parte más contribuyente en estos flujos para ver hasta qué punto la modelización de dichos factores puede mejorar nuestros resultados. La finalidad es la de poder entender las dinámicas térmicas dentro del área de estudio y así poder mejorar, con propuestas más sostenibles, la distribución de temperatura. En este caso se ha simulado a una resolución de 1km en el dominio pequeño o tercer dominio (fig 2.8).

#### **2.3.4. Modelo de emisiones: *High-Selective Resolution Modelling Emission System* HERMES v2**

Modelo desarrollado por el Centro de Supercomputación de Barcelona (BSC-CNS). Los datos utilizados para desagregar emisiones se han recogido de las salidas del modelo *High-Selective Resolution Modelling Emission System* (HERMES) versión 2 (Guevara et al., 2013).

Las emisiones de contaminantes se realizan mediante un enfoque de arriba hacia abajo (*top down approach*) que consiste en reducir la escala de los inventarios de emisiones nacionales anuales a sectores específicos, como industrial, transporte, agricultura o residencial. Este enfoque es útil para crear archivos de emisiones regionales pero no es lo suficientemente realista para representar emisiones a escala local, porque la resolución (1x1km) del modelo es sensible a las variaciones espaciales y temporales. Las emisiones atmosféricas se clasifican en las categorías SNAP 1-11 (Nomenclatura seleccionada para la contaminación atmosférica, *Selected Nomenclature for Air Pollution*) según el sector de actividad. Los datos seleccionados para este estudio son SNAP 2, correspondiente a las emisiones de las plantas de combustión no industriales.

En este trabajo de Tesis hemos utilizado los datos del año 2015 del inventario de emisiones de Catalunya a una resolución espacial de 1x1km. Estas salidas del modelo almacenan datos multidimensionales que, en este caso, contiene diferentes contaminantes, los analizados en este trabajo serán: CO, NO, NO<sub>2</sub>, partículas de 2.5 micras (PM2.5), SO<sub>2</sub>, partículas orgánicas de carbón (POC) y partículas elementales de carbón (PEC). Cada archivo contiene los datos de todas las variables (contaminantes) de un día y las unidades son moles · s<sup>-1</sup> · 1km<sup>-2</sup> (para CO, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) o g · s<sup>-1</sup> · 1km<sup>-2</sup> (para las partículas como PM2.5, POC y PEC). Esta metodología solo se

puede aplicar en la categoría SNAP 2, correspondiente a emisiones de plantas de combustión no industriales. Se han utilizado, para desagregarlas, a resoluciones de 100x100m.

# 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS LOCAL CLIMATE ZONES (LCZ)

En este capítulo se presenta el sistema de estandarización para áreas urbanas, periurbanas y rurales frente a las respuestas térmicas de las cubiertas y usos del suelo llamada *Local Climate Zones*. Se explican las diferentes metodologías y validaciones propuestas y se analizan los pros y contras de cada una, así como las diferencias existentes entre ellas. A continuación se presentan los resultados de las diferentes cartografías analizando su evolución temporal a lo largo de los últimos 30 años desde una perspectiva geográfica. El capítulo concluye con la caracterización térmica de las LCZ sobre tres olas de calor registradas en el Área Metropolitana de Barcelona, a partir del análisis de la temperatura del suelo de los días que registraron las temperaturas más elevadas. El subíndice del capítulo es el siguiente:

3.1 Introducción.....	47
3.2 Zonas Climáticas Locales o Local Climate Zones (LCZ).....	49
3.3 Evolución temporal de las LCZ en el AMB.....	67
3.4 Aplicación de las LCZ a la caracterización de imágenes LST.....	69
3.5 Conclusiones.....	76



### 3.1. Introducción

Las alteraciones sobre los ecosistemas naturales debido a las actividades urbanas hacen que la variabilidad climática en las áreas metropolitanas conforme un sistema de interacciones más compleja que en las áreas periurbanas y rurales.

Los paisajes urbanos albergan más de la mitad de la población mundial y las proyecciones muestran que dos tercios de la población vivirán en ciudades en el horizonte 2050 (UN, 2015). Por lo tanto, las áreas urbanas están (y estarán) ciertamente más expuestas y son más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático, bajo un modelo que se caracteriza por ser poco sostenible con los ecosistemas y entornos circundantes.

Existen muchos factores que influyen sobre la variabilidad climática en las áreas urbanas ya sea desde un punto de vista espacial o temporal, como por ejemplo la presencia de zonas verdes o el ciclo diurno de la brisa si estamos en una ciudad costera. También hay que tener en cuenta otros factores muy importantes como son las distintas morfologías urbanas y las diferentes propiedades térmicas de los materiales de construcción. Estos también condicionan la variabilidad tanto a nivel de microescala, como a nivel de mesoescala si la ciudad es suficientemente grande (Geletič et al., 2016; Li et al., 2016).

El comportamiento térmico de los ecosistemas urbanos se caracteriza por presentar temperaturas superiores a sus zonas circundantes o rurales, debido principalmente a las propiedades físicas, radiativas y térmicas de los usos de suelo que la conforman (Li et al., 2018; Xiao et al., 2018) tal y como se ha comentado en la introducción. El fenómeno que describe la temperatura del aire o del suelo como más elevada en las áreas urbanas que en sus alrededores se le conoce como efecto de isla de calor urbano (*Urban heat Island* - UHI) (Oke, 1988; Rizwan et al., 2008) dónde en algunas ciudades, en las que se incluye Barcelona, puede llegar a superar los 6.5°C de diferencia (López Gómez y García, 1993; Moreno-García, 1994; Gedzelman et al., 2003; Lauwaet et al., 2015). La UHI contribuye notablemente al calentamiento y al incremento de la intensidad de las olas de calor (McCarthy et al., 2010; Zhao et al., 2018; Jiang et al., 2019).

El término de UHI se empezó a discutir por primera vez en la década de los años 40 (Balchin y Pye, 1947). Históricamente, se ha publicado una considerable cantidad de investigaciones sobre este fenómeno (por citar algunas, Oke 1982; Lo et al., 1997; Arnfield, 2003; Voogt y Oke, 2003; Chen et al., 2006; Mirzaei y Haghighat, 2010). Sin embargo, se han revelado ciertas inconsistencias metodológicas al comparar diferentes estudios de climatología urbana. Una de las principales razones ha sido la falta de estandarización para la estima de las propiedades que afectan el comportamiento térmico urbano (Stewart, 2011). Partiendo de esta premisa, ha surgido una nueva metodología conocida como *Local Climate Zones* o Zonas Climáticas Locales (LCZ) (Stewart y Oke, 2012), que establece un sistema de estandarización para áreas urbanas, periurbanas y rurales frente a las respuestas térmicas de las cubiertas y usos del suelo. Las LCZ permiten hacer comparaciones entre ciudades o en la misma ciudad a lo largo del tiempo. También constituyen una buena herramienta para alimentar los modelos climáticos y meteorológicos debido que conforman cartografías que describen más detalladamente los usos del suelo desde una perspectiva física, térmica, radiativa y metabólica del entramado urbano. Finalmente, un buen conocimiento del comportamiento térmico de los ecosistemas urbanos resulta ser fundamental para promover acciones de planificación, mitigación y adaptación en las grandes ciudades. De esta manera, se le facilita al planificador y climatólogo una herramienta que permite mejorar la gestión y evaluación de los resultados sobre medidas y políticas de sostenibilidad y resiliencia en dichas áreas metropolitanas.

Este capítulo se divide en dos bloques que a su vez se subdividen en diferentes apartados. En el primer bloque (apartado 3.2 y sus subapartados) se presentan las diferentes metodologías desarrolladas para la caracterización del Área Metropolitana de Barcelona mediante LCZ. Las primeras cartografías presentadas se basan en la aplicación de la metodología internacional WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tools*) sobre varias imágenes de satélite con diferente resolución temporal. A continuación, se presenta una segunda metodología desarrollada durante la tesis doctoral basada en el aprovechamiento de los mapas de alta resolución de usos del suelo y el modelo 3D de la ciudad mediante datos LiDAR disponibles para el AMB. Por último, se presenta una capa que fusiona ambas técnicas y que será la utilizada como entrada para los modelos climáticos y meteorológicos usados en los siguientes capítulos de la tesis.

El segundo gran bloque está compuesto por los apartados 3.3 y 3.4, donde se presentan los resultados de las diferentes cartografías y se analiza la evolución de los cambios de los usos del suelo a lo largo de los últimos 30 años (período pre olímpico, 1987; período pre Foro de las Culturas, 2000; y período actual, 2015) desde una perspectiva geográfica. El capítulo concluye con una primera caracterización térmica de las LCZ sobre tres olas de calor registradas en el AMB, a partir del análisis de la temperatura del suelo (LST) de los días que registraron la temperatura más elevada en cada una de las olas de calor seleccionadas.

### **3.2. Zonas Climáticas Locales o *Local Climate Zones* (LCZ)**

Las LCZ proponen una categorización de los usos del suelo en 17 categorías cuantificables, basadas en una combinación de parámetros geométricos, térmicos, radiativos y metabólicos que caracterizan las áreas urbanas, periurbanas y también rurales (fig 3.1). La utilización de esta clasificación tiene una doble ventaja, en primer lugar, se trata de una metodología aplicable a cualquier área metropolitana del mundo, por lo que es un método de estandarización que permite hacer comparaciones entre ciudades. En segundo lugar, también proporciona mejores datos de entrada para los modelos meteorológicos y climáticos urbanos (Brousse et al., 2016; Ching et al., 2018). La parametrización -modelización del entorno construido (Benzie et al., 2011; Inostroza et al., 2016) queda bien recogida en el enfoque de las LCZ y, junto con los factores sociodemográficos (Nayak et al., 2018), nos permite desarrollar una óptima distribución geoespacial de la exposición al calor (Dickson et al., 2012; Drobinski et al., 2014), tal y como podremos ver en el desarrollo de este capítulo.

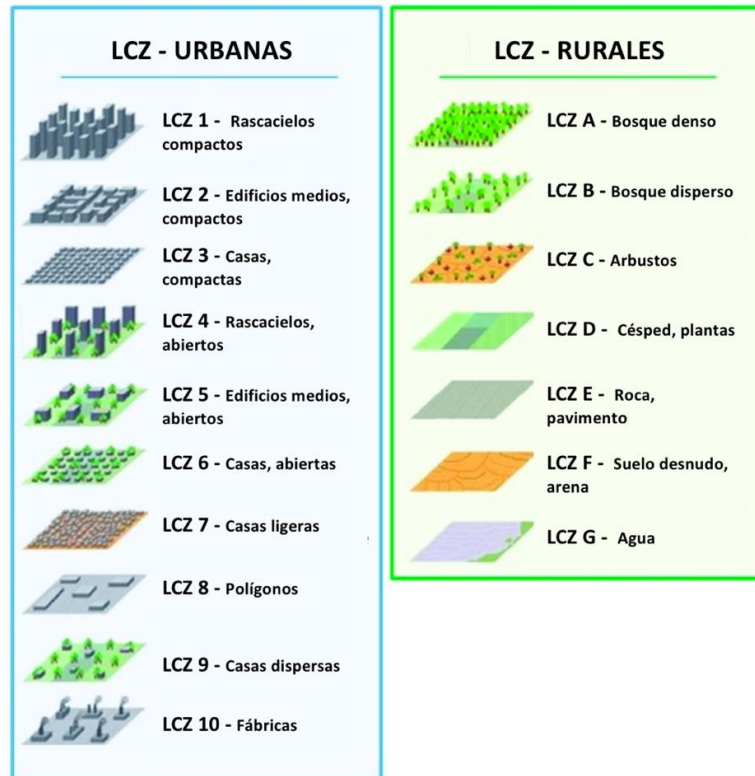


Figura 3.1 Categorías LCZ (Stewart y Oke, 2012), esquema propio basado en Taubenböck et al. (2020).

LCZ	<i>Sky view</i> factor	Espaciado entre edificios/arboles	Fracción edificios	Fracción impermeable	Fracción permeable	Altitud edificios	Rugosidad del terreno
1	0.2-0.4	>2.0	40-60	40-60	<10	>25	8
2	0.3-0.6	0.75-2.0	40-70	40-70	<20	10-25	6-7
3	0.2-0.6	0.75-1.5	40-70	40-70	<30	3-10	6
4	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	20-40	30-40	>25	7-8
5	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	20-40	20-40	10-25	5-6
6	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-40	30-60	3-10	5-6
7	0.2-0.5	1.0-2.0	60-90	60-90	<30	2-4	4-5
8	>0.7	0.1-0.3	30-50	30-50	<20	3-10	5
9	>0.8	0.1-0.25	10-20	10-20	60-80	3-10	5-6
10	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-30	40-50	5-15	5-6
A	<0.4	<0.1	<10	<10	>90	3-30	8
B	0.5-0.8	0.25-0.75	<10	<10	>90	3-15	5-6
C	0.7-0.9	0.25-1.0	<10	<10	>90	<2	4-5
D	>0.9	<0.1	<10	>90	>90	<1	3-4
E	>0.9	<0.1	<10	<10	<10	<0.25	1-2
F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<0.25	1-2
G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	-	1

Tabla 3.1 Valores de propiedades geométricas y de cobertura de superficie para zonas climáticas locales. Todas las propiedades no tienen unidades, excepto la altura de los elementos de rugosidad (m).

<b>LCZ</b>	<b>Admitancia</b>	<b>Albedo</b>	<b>Calor antropogénico</b>
<b>1</b>	1500-1800	0.1-0.2	50-300
<b>2</b>	1500-2200	0.1-0.2	<75
<b>3</b>	1200-1800	0.1-0.2	<75
<b>4</b>	1400-1800	0.12-0.25	<50
<b>5</b>	1400-2000	0.12-0.25	<25
<b>6</b>	1200-1800	0.12-0.25	<25
<b>7</b>	800-1500	0.15-0.35	<35
<b>8</b>	1200-1800	0.15-0.25	<50
<b>9</b>	1000-1800	0.12-0.25	<10
<b>10</b>	1000-2500	0.12-0.20	>300
<b>A</b>	desconocido	0.10-0.20	0
<b>B</b>	1000-1800	0.15-0.25	0
<b>C</b>	700-1500	0.15-0.30	0
<b>D</b>	1200-1600	0.15-0.25	0
<b>E</b>	1200-2500	0.15-0.30	0
<b>F</b>	600-1400	0.20-0.35	0
<b>G</b>	1500	0.02-0.10	0

Tabla 3.2 Valores de propiedades térmicas, radiativas y metabólicas para zonas climáticas locales (LCZ). Todos los valores son representativos de la escala local.

Existen diversas aproximaciones para la realización de una cartografía de LCZ, ya sea desde un enfoque *bottom up* o *top down* (Lelovics et al., 2014; Mitraka et al., 2015; Brousse et al., 2016; Wang et al., 2018). Cada LCZ está definida por 10 variables (geométricas, radiativas y metabólicas), que fueron testadas y estandarizadas por Stewart y Oke (2012). En las tablas 3.1 y 3.2, se muestra el ADN que contiene cada LCZ según Stewart y Oke (2012), en el que hicieron un estudio muy completo con caracterizaciones de diferentes ciudades heterogéneas y repartidas por el mundo. La finalidad era obtener una generalización de diferentes propiedades físicas, radiativas, térmicas y metabólicas basadas en umbrales aplicables a todas las ciudades. En definitiva, cada LCZ tiene una serie de propiedades intrínsecas que serán muy útiles para la alimentación de los modelos climáticos y meteorológicos que utilizan dosel urbano.

Dada que la principal ventaja de las LCZ es su aplicación universal, el proyecto internacional *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) ha creado un portal/repositorio que aporta las herramientas y directrices que permiten generar cartografías de LCZ a partir de datos de observación de la Tierra mediante satélite y compartirlas. Actualmente, la cartografía validada

disponible para Barcelona en el proyecto WUDAPT es la realizada en el contexto de esta Tesis. Ésta, fue realizada siguiendo las directrices y controles de calidad recogidos en el proyecto y fue aceptada y publicada (<https://wudapt.cs.purdue.edu/>).

Para llevar a cabo las cartografías de LCZ se han utilizado diferentes metodologías y adaptaciones con la finalidad de encontrar la que mejor se adapta a la caracterización del AMB. Cada metodología se recoge extensamente en el capítulo 6, en el que se presentarán los programas y diagramas de flujo operacionales (*workflows*) que se han creado para automatizar y cartografiar las LCZ. Paralelamente se ha hecho un manual y un repositorio de todos los programas y *workflows* confeccionados a lo largo del proyecto para el *Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya* (ICGC), con la finalidad de poder replicar las diferentes cartografías y métodos de la forma más automatizada posible y atendiendo a que esta tesis es fruto de un Doctorado Industrial realizado con el ICGC. A continuación, se presentan las 3 metodologías explicadas desde una perspectiva teórica en detrimento de una explicación más centrada en la aplicación, que se puede encontrar en el capítulo 6.

### **3.2.1. Aplicación de la metodología WUDAPT para la caracterización del Área Metropolitana de Barcelona en Zonas Climáticas Locales (LCZ)**

La metodología internacional WUDAPT consiste en la propuesta para cartografiar LCZ más extendida y más ampliamente utilizada a nivel internacional. El repositorio del proyecto recoge más de 100 ciudades compiladas de todo el mundo. Al mismo tiempo existe una gran cantidad de trabajos publicados que avalan esta metodología presentada inicialmente en el artículo base de Bechetel et al. (2016) y que podemos encontrar descrita en el propio portal WUDAPT (<http://www.wudapt.org/>).

En el marco de este estudio se ha realizado la cartografía LCZ para Barcelona, bajo los requisitos de validación necesarios y descritos en las especificaciones del proyecto WUDAPT, quedando así recogida de forma oficial en su portal (Gilabert et al., 2020).

Se han realizado un total de 5 mapas de LCZ utilizando WUDAPT con ciertas adaptaciones en el *workflow* debido que algunos datos iniciales parten de fuentes diferentes a las estrictamente propuestas en el método de Bechtel et al. (2015).

La metodología WUDAPT se basa en aplicar una clasificación supervisada mediante un algoritmo de *machine learning* conocido como *Random Forest* (Breiman, 2001) sobre imágenes del satélite de observación de la Tierra Landsat 8. Una clasificación supervisada se define como un proceso en que píxeles de identidad conocida, ubicados dentro de áreas de entrenamiento (AT), se utilizan para clasificar píxeles de identidad desconocida. Esta clasificación se subdivide en 3 etapas genéricas:

- a) *Definición de las áreas de entrenamiento*: se seleccionan superficies de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés (en nuestro caso se seleccionarán diferentes categorías de LCZ) delineándolas sobre la imagen digital bajo formas de rectángulos o polígonos cuyos datos numéricos quedan archivados. Para realizar la selección, es necesario tener un conocimiento previo y de pericia del área de estudio. En nuestro caso las AT se apoyaron en la fotointerpretación sobre ortofotos del ICGC. Una vez que se dispone de un conjunto de AT significativo, se debe tratar de adjudicar cada uno de los píxeles de la escena a alguna clase.
- b) *Selección del algoritmo de clasificación*: Existen diferentes algoritmos que se aplican sobre las zonas de entrenamiento y actúan como generalizador. En este caso se aplica el ya citado y ampliamente conocido *Random Forest*. La razón de usar este algoritmo es que se obtienen los mejores resultados en la validación del modelo (Bechtel y Daneke, 2012; Bechtel et al., 2015) y es el que, en definitiva, propone WUDAPT. De esta manera se objetiviza el método haciéndolo comparable entre distintas ciudades. El algoritmo *Random Forest* crea un conjunto de clasificadores estructurados (llamados árboles) y permite generalizar la clase más popular (Breiman, 2001). Es excelente para aplicarlo en clasificaciones supervisadas y en términos de eficiencia informática, ya que puede manejar grandes conjuntos de datos juntamente con sus características. Para cada árbol, se extrae una muestra de *bootstrap* del AT. Dado que una parte del AT se deja para cada árbol, se puede entregar una estimación de

error imparcial fuera del conjunto (*bagging*) con la clasificación. También puede variar la cantidad de árboles y la cantidad de características usadas para cada conjunto.

- c) *Validación del modelo*: se ha usado una validación cruzada mediante los coeficientes *Kappa* (K) y *Overall Accuracy* (OA) a partir de una matriz de confusión creada para cada mapa de LCZ (los índices y la matriz se explican detalladamente en el capítulo 6). Una matriz de confusión consiste en una herramienta fundamental en la evaluación y de veracidad de un algoritmo de clasificación, ya que dará una mejor idea de cómo se está clasificando dicho algoritmo. Se trata de hacer un conteo de los aciertos y errores de cada una de las clases en la clasificación, así se puede comprobar si el algoritmo está clasificando mal las clases y en qué medida. A partir de las AT se ha utilizado un enfoque de validación cruzada automatizada en la resolución de cuadrícula original de 100 m, que emplea el método de remuestreo *bootstrap* (Bechtel et al., 2015; Kaloustian y Bechtel, 2016). El *bootstrapping* (Efron y Tibshirani, 1993) se basa en aplicar un esquema de muestreo aleatorio para estimar las medidas de precisión de una muestra dada, la AT, y controlar la consistencia y estabilidad de los resultados. En nuestros mapas, se han evaluado un total de  $N=25$  *Random Forest* diferentes, aplicados y evaluados, cada uno utilizando el 50% de los polígonos etiquetados (AT identificadas o asociadas a una determinada LCZ) para el entrenamiento del algoritmo (por categoría) y el 50% restante para las pruebas de validación (Test Áreas). Para cada ejecución se han usado dos medidas de concordancia: el coeficiente K que se basa en comparar la concordancia observada en un conjunto de datos, respecto a la que podría ocurrir por mero azar. Si K es cero, significa que la concordancia observada coincide con la que ocurriría por puro azar. Valores positivos señalan mayor concordancia que la que se esperaría por puro azar. Si el resultado fuera 1, se trataría de una concordancia perfecta. Si K toma un valor negativo, significa que hay discordancia, que podría llegar hasta -1, lo que señalaría una discordancia total entre las dos clasificaciones o evaluaciones. A partir de 0.6 el índice indica que hay una buena concordancia y es un valor óptimo y aceptable según las directrices de WUDAPT. La segunda medida de concordancia es el OA que mide



la precisión total de la clasificación. Los valores se distribuyen entre el 0 y el 1. Cuanto más cerca del 1 se encuentre el valor indicará más concordancia y menos azar.

En este estudio se han clasificado un total de 5 imágenes de satélite de observación de la Tierra (ver en la tabla 2.4, capítulo 2) pertenecientes a diferentes períodos históricos relevantes. Entre ellas, se observan cambios significativos en la planificación urbana y en las construcciones de nuestra región de interés, especialmente en la ciudad de Barcelona. Para los dos primeros períodos elegidos se ha aplicado la metodología WUDAPT adaptada a imágenes Landsat 5 (L5) y Landsat 7 (L7).

El primer mapa hace referencia al período pre-olímpico (fig 3.3), un período anterior a los grandes cambios que experimentó el entramado urbano de Barcelona para los Juegos Olímpicos de 1992. La imagen de referencia corresponde al 28/06/1987.

La segunda imagen de referencia corresponde al 10/08/2000 y fue captada por el satélite Landsat 7 (fig 3.3). La imagen pertenece al período pre-Foro Universal de las Culturas, y se ha escogido porque pertenece a un estadio intermedio entre el período pre-olímpico y el año de referencia. Además, antes de la inauguración del Foro Universal de las Culturas, Barcelona experimentó ciertos cambios en el entramado urbano, como la construcción del Parc del Fòrum, un espacio público de grandes dimensiones situado en la desembocadura del Río Besós.

La tercera (fig 3.3), cuarta y quinta imágenes hacen referencia al período reciente. En este caso se trata de imágenes recogidas en diferentes períodos de tiempo de 2015, y de esta forma observar si la estacionalidad o el tipo de satélite causan modificaciones en el resultado final, ya que una de las imágenes pertenece al satélite Sentinel 2.

La metodología aplicada para ambos períodos históricos consiste en una adaptación a la aproximación WUDAPT. Dado que el *workflow* original estaba pensado para hacerlo en períodos actuales, y con Landsat 8 (L8), ha sido necesario efectuar algunas modificaciones para aplicarlo a otros satélites como los L5 y L7, así como el más reciente, Sentinel 2 (S2) (fig 3.2).

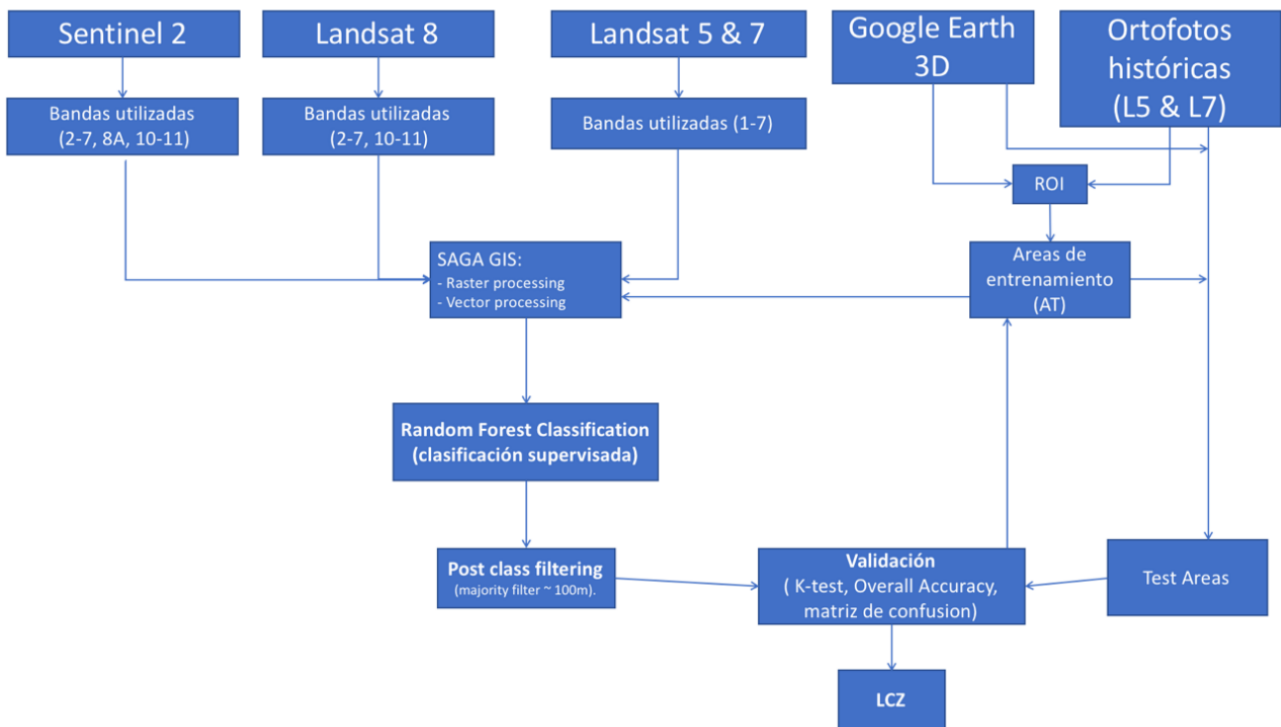


Figura 3.2 *Workflow* para cartografiar LCZ aplicando la metodología WUDAPT a datos de observación de la Tierra para Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2.

Para la selección de las AT en el primer *dataset* temporal de este estudio, se partió de ortofotos históricas accesibles a través de los servicios *Web Map Services* (WMS) del ICGC. Se trata de fotografías aéreas en blanco y negro dónde se les acopló información del catastro para deducir la altitud de los edificios (en el catastro se puede filtrar el número de plantas y la edad del edificio) para poder distinguir las diferentes categorías de LCZ urbanas. Este trabajo previo de fotointerpretación y delimitación de las AT se realizó con el soporte del software libre QGIS (en el capítulo 6 se explica de forma detallada como elaborar de forma óptima las AT).

Fotointerpretar sobre ortofotos históricas de peor resolución espacial que las actuales (radiométricas) comporta un aumento de la confusión debido a que es más complicado poder delimitar e interpretar algunas zonas. Como se podrá ver más adelante, en la LCZ de 1987, la LCZ 9 perteneciente a edificación muy dispersa se confunde frecuentemente con la categoría LCZ A (bosque) o en menor medida con la LCZ 6 (edificación dispersa).

Se han usado todas las bandas espectrales de L5 y L7 para ejecutar el algoritmo *Random Forest* (desde la banda 1 a la 7) a excepción de la banda 8 pancromática, que es la única con una resolución diferente al resto de bandas. Igual que con Landsat 8, la banda pancromática no se usa

para caracterizar y entrenar el algoritmo. En este sentido se han elegido las mismas bandas que se incluyen en L8. La diferencia es que en el caso de L8 se le añadirá otra banda térmica.

Para las 3 imágenes del período reciente se han seleccionado dos imágenes L8 y una imagen S2. La finalidad era comprobar si se observaban cambios en la clasificación al usar meses de estaciones diferentes. A pesar de algunos pequeños cambios sobre categorías naturales/rurales, no se han observado cambios significativos entre ellas y mucho menos en las categorías urbanas que representan las zonas de mayor interés en este trabajo.

Las AT para las imágenes más actuales (2015) se han realizado siguiendo el *workflow* propuesto en el proyecto WUDAPT. Éste consiste en fotointerpretar mediante las ortofotos de alta resolución y color que *Google Earth Pro* tiene incluidas, georreferenciadas y acopladas a un modelo 3D del entramado urbano. Al acoplar las dos bases, podemos diferenciar las distintas altitudes de los edificios con lo que facilita el trabajo de fotointerpretar y por lo tanto delimitar las AT.

Para las imágenes L8 se han usado las bandas 2-7, 10 y 11 (Bechtel et al., 2015) obviando la banda 9 que ayuda a diferenciar nubes tipo cirrus y la banda 8 pancromática que mantiene una resolución diferente al resto. Para la imagen S2, se han adaptado las bandas que tiene con las que dispone L8; en este caso se han seleccionado las bandas 2-8A y las 10 y 11. Al tener resoluciones distintas (S2 ofrece bandas a 10 y 20 m de resolución espacial) se han homogeneizado re-escalando las bandas 2, 3 y 4 a 20m, en un paso previo a la aplicación del algoritmo *Random Forest*.

Las AT representan aproximadamente el 10% del total de la superficie de nuestra zona de referencia. Cabe destacar que las LCZ 1, 3, E y 7 (la 7 tan solo en el caso de las históricas) son zonas singulares. Por esta razón, clasificaremos estas zonas de acuerdo con nuestra pericia, siendo zonas muy puntuales que no se validarán.

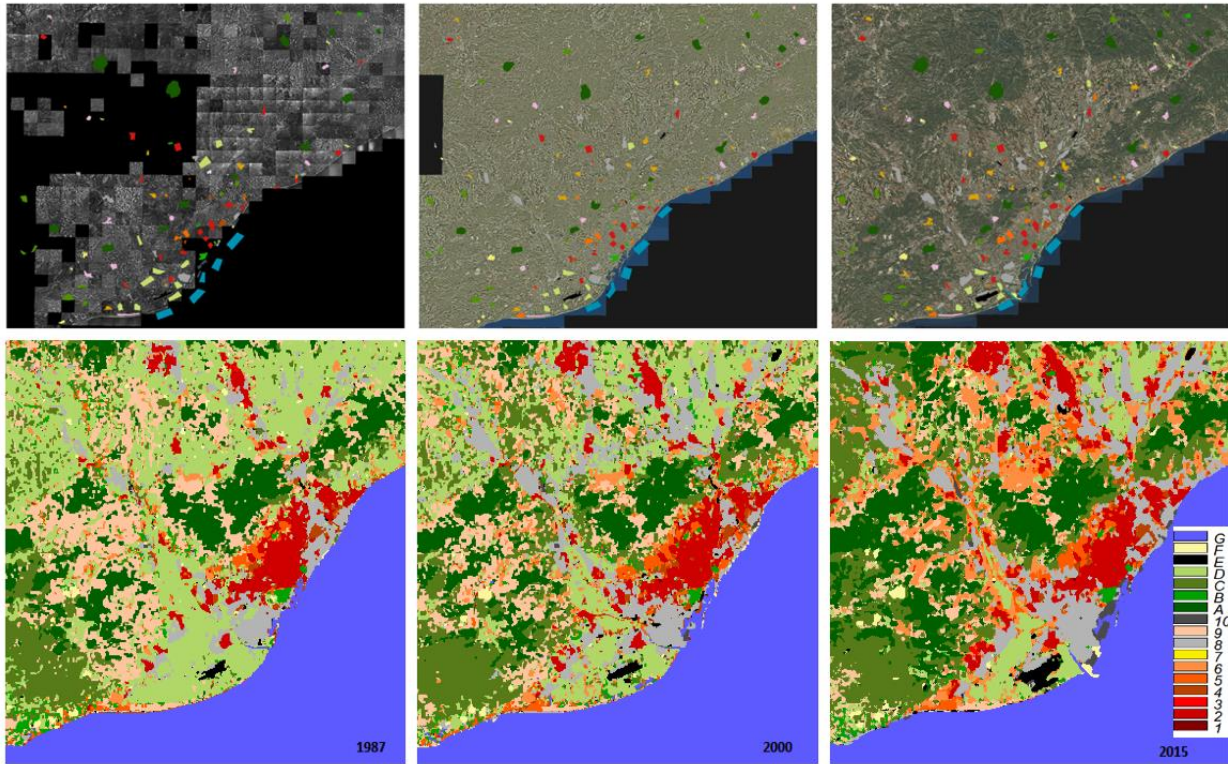


Figura 3.3 a) Áreas de entrenamiento sobre las ortofotografías 1987, 2001 y 2015 (de izquierda a derecha) b) LCZ WUDAPT 1987, 2000 y mayo 2015.

Se han utilizado un total de 121, 160 y 162 AT para la imagen de 1987, 2000 y 2015 respectivamente (fig 3.3a) para hacer las LCZ (fig 3.3b).

Como se ha comentado anteriormente, se han usado dos tipos de indicadores para hacer la validación del modelo. Los índices asociados a dichos indicadores se basan en la evaluación de la confusión de la propia clasificación supervisada.

Para las 5 imágenes el nivel de correlación de la confusión ha sido superior (90%) por lo tanto, se tratará la validación de los parámetros de confusión de una forma general, categoría por categoría exceptuando, como se ha comentado anteriormente, las categorías 1, 3, 7 y E que ocupan áreas inferiores al 1% del mapa.

LCZ	LCZ confusión		% de confusión
2	8	-	13%
4	5	8	20%
5	6	-	30%
6	5	2	16%
8	10	C	21%

LCZ	LCZ confusión		% de confusión
<b>9</b>	6	A-C-D	25%
<b>10</b>	8	-	20%
<b>A</b>	C	-	2%
<b>B</b>	C	-	10%
<b>C</b>	A	D	6%
<b>D</b>	C	6	13%
<b>F</b>	8	-	12%
<b>G</b>	-	-	0%

Tabla 3.3 Matriz de confusión de las principales LCZ en el global de los 5 mapas. Se han seleccionado las categorías que observan cambios significativos.

En la tabla 3.3 podemos observar las principales confusiones existentes al aplicar el método *Random Forest*. Se observa una mayor confusión entre las categorías urbanas que entre las categorías naturales o rurales. Este hecho es debido a que es más fácil poder clasificar las extensas áreas naturales (más homogéneas y con unas características geométricas y radiométricas más fáciles de distinguir entre ellas) que las zonas urbanas (más heterogéneas).

La LCZ 2 que representa la segunda categoría urbana más representativa en cuanto a superficie (10%), es la que responde mejor al algoritmo a pesar de confundirse en algunos casos con la LCZ 8 (la más representativa), asociada a polígonos industriales. La categoría que registra mayor confusión es la LCZ 5, descrita por edificios no compactos, una categoría que se localiza principalmente en zonas de transición entre LCZ 2 y LCZ 6 y que representan tan solo el 3.5% del área total. La categoría urbana que más superficie ocupa, la LCZ 8 (17%) se confunde principalmente con la LCZ 10 conformada por superficies industriales; ambas categorías son difíciles de diferenciar ya que la estructura, material de construcción y color (factores determinantes en la aplicación del *Random Forest* sobre imágenes de satélite de observación de la Tierra) son muy similares. Otra categoría relevante a nivel de superficie es la LCZ 9 descrita por casas muy dispersas. Esta categoría se confunde con la LCZ 6 (casas dispersas) y con diferentes categorías naturales. La LCZ 9 consiste en la superficie más compleja de identificar y entrenar debido que está a caballo entre estas categorías que la confunden y es difícil de generalizarla. En la cartografía LCZ de 1987 se observa como la LCZ 9 ocupa un área muy representativa. Si bien es verdad que en el 1987 las urbanizaciones eran menos densas, el modelo sobrestima la superficie.

Para todos los mapas de LCZ (exceptuando 1987) se obtienen valores por encima de los 0.6 en el índice K y por lo tanto registran resultados óptimos para su uso. El mapa de 1987 presenta un valor de 0.58 en el índice K, debido a la sobrestimación de la LCZ 9. La dificultad debido a la baja resolución espacial de la ortofoto en blanco y negro supuso que las AT fueron más complicadas de etiquetar lo que ha condicionado la validación, presentando así los peores resultados.

Con respecto al índice OA los valores son óptimos para todas las cartografías superando el 0.8 (fig 3.4, tabla 3.4), en este caso el mapa LCZ de 1987 sigue representando el peor resultado, seguido por la LCZ del año 2000.

En la cartografía de LCZ del año 2000 las AT se hicieron sobre una ortofoto de menor resolución espacial que las actuales (2015). La resolución de la ortofoto condiciona la calidad de la fotointerpretación que será más o menos óptima según que ortofoto se use como base. Así mismo, las dos cartografías históricas han partido de imágenes L5 y L7 con menos bandas y menor resolución espacial que L8 o S2. Ambos factores han sido condicionantes para que las dos cartografías representen los índices de validación más bajos, pero suficientemente óptimos para poder ser usadas.

En las 3 imágenes de 2015 la que ha presentado mejores resultados ha sido la imagen L8 de mayo de 2015, aun así, las 3 imágenes han experimentado valores óptimos y similares, con una correlación en el porcentaje de categorías superior al 0.98. Probablemente la imagen de mayo de 2015 con un Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) superior a la imagen de febrero y a la imagen de noviembre, ha sido determinante para que presentara el mejor de los resultados, debido a que la vigorosidad de la vegetación puede ayudar a diferenciar mejor las distintas categorías naturales y ayudar a hacer un entrenamiento más eficaz. De todos modos, las diferencias son poco significativas y los resultados muy parecidos, por lo tanto podemos concluir que las cartografías se mantienen casi constantes a nivel estacional en nuestra región de interés. No pasaría lo mismo a nivel de albedo o emisividad, si los calculamos separadamente mediante imágenes de satélite, como se analizará más adelante.

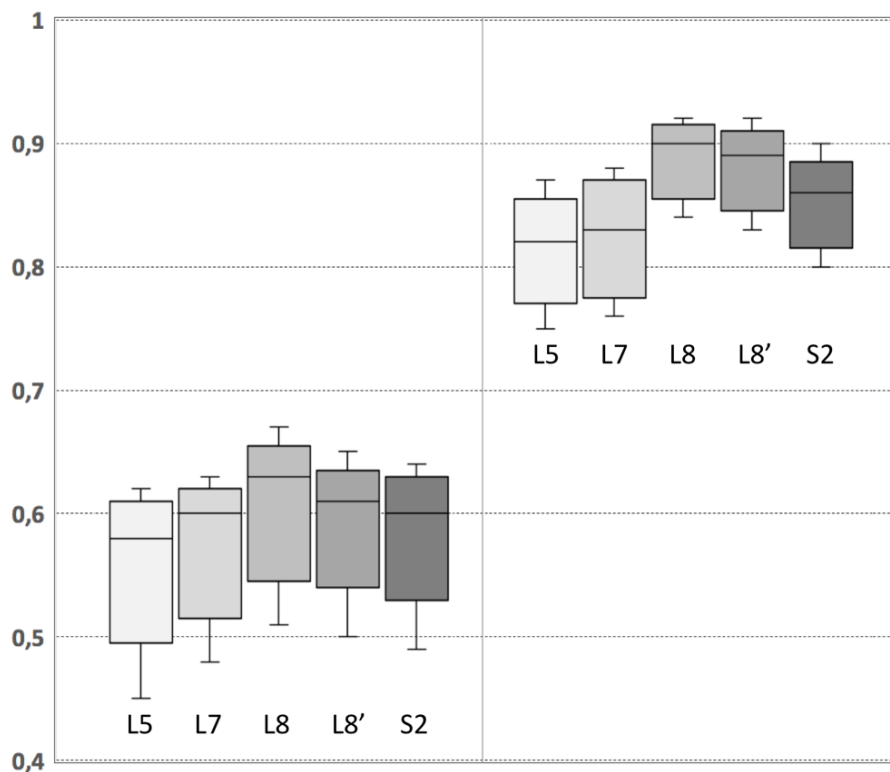


Figura 3.4 Validación para cada una de las cartografías, Coeficiente Kappa y Overall Accuracy.

Imagen	K	OA
L8_2015_mayo	0.62	0.9
L8_2015_febrero	0.61	0.89
S2_2015_noviembre	0.6	0.86
L7_2000_agosto	0.6	0.83
L5_1989_junio	0.58	0.82

Tabla 3.4 Valores medios de los índices de concordancia para cada LCZ.

En este subapartado, esencialmente metodológico, no se analizarán y evaluarán los cambios en los usos del suelo, así como las superficies que las ocupan. En el subcapítulo 3.3 se evaluará, desde una perspectiva geográfica la evolución de los usos y cubiertas del suelo de los años comprendidos entre 1987-2015, así como las diferencias entre las 3 cartografías de 2015.

### 3.2.2. Aplicación de la metodología basada en mapas de coberturas y usos del suelo para la caracterización del Área Metropolitana de Barcelona en Zonas Climáticas Locales (LCZ)

Para la región administrativa de la AMB (con una fuente de datos más extensa y detallada que otras regiones), se ha utilizado una segunda metodología basada en datos de cubiertas y usos del suelo (*Land Cover Land Use*, LCLU). Esta cartografía parte de la reclasificación de las definiciones de los diferentes usos y coberturas del suelo de los mapas de alta resolución existentes en el AMB. Las LCLU se combinaron con datos LiDAR del MDS restándole el MDT, permitiendo diferenciar la altitud de los edificios y poder clasificar las categorías que dependen de la variable vertical. Existen otros estudios que utilizan metodologías similares para mostrar LCZ más detalladamente, como los de Geletič y Lehnert (2016) o Skarbit et al. (2017).

El método LCLU se basa en combinar diferentes mapas de LCLU. En concreto, para nuestro estudio, se ha utilizado el Mapa de Cubiertas de Cataluña (MCS-Cat), que utiliza una clasificación extensa de hasta 241 categorías y el *Urban Atlas* (UA). El primer mapa temático se utilizó para definir las diferentes tipologías de cobertura rural y vegetal ya que incluye la densidad de la vegetación. El segundo (UA) distingue 20 categorías de áreas urbanas y las clasifica entre distintas tipologías de tejido urbano incluyendo la densidad de edificios, por lo que nos ha sido muy útil para diferenciar todas las categorías urbanas descritas en las LCZ.

Cada categoría de LCLU se ha reclasificado mediante un script de *Phyton* (explicado en el capítulo 6 sección 6.2.2) que correlaciona las 20 categorías urbanas (combinadas con datos LiDAR) en las 10 categorías urbanas que propone las LCZ y las categorías rurales y naturales del LCLU-Cat entre las 7 categorías naturales/rurales propuestas en las LCZ (ver tablas 3.5 y 3.6). En este sentido se generalizan y simplifican los mapas basándonos en las descripciones recogidas por las LCZ.



Categorías Urban Atlas	LCZ
Tejido urbano continuo	1, 2 or 3
Tejido urbano denso discontinuo	4, 5 or 6
Tejido urbano discontinuo de densidad media	5 or 6
Tejido urbano discontinuo de baja densidad.	6
Tejido urbano discontinuo de muy baja densidad	6
Estructuras aisladas	9
Unidades industriales, comerciales, públicas y privadas	1-6
Carreteras y calles	E (105)
Otros caminos y terrenos asociados	E
Ferrocarriles	E
Zona portuaria	E
Aeropuerto	E
Extracción de minerales	E
Sitios de construcción	E
Terreno sin uso actual	F
Verde Urbano	B or D
Instalaciones deportivas	D
Huertos urbanos	B
Zonas de vegetación herbácea	B (102)

Tabla 3.5 Conversión *Urban Atlas* a LCZ urbanas.

Categoría MCS-Cat	LCZ
Bosque denso	A
Bosque claro	B
Matorral	C
Humedales	G
Prados y herbazales	C
Zonas quemadas	C
Improductivo natural	F
Agua	G
Conreos	D
Improductivo artificial	N

Tabla 3.6 Conversión MCS-Cat a LCZ naturales.

El mapa LCZ resultante es una cartografía temática de formato vectorial de alta resolución (fig 3.5), en el que a cada polígono que forma el tejido urbano se le atribuye una categoría LCZ (Gilabert et al., 2016). Existen diferentes ejemplos similares en la literatura, como el mapa LCZ para Île-de-France ([www.institutparisregion.fr](http://www.institutparisregion.fr)), o el mapa LCZ-LCLU de Viena (Hammerberg et al., 2018).

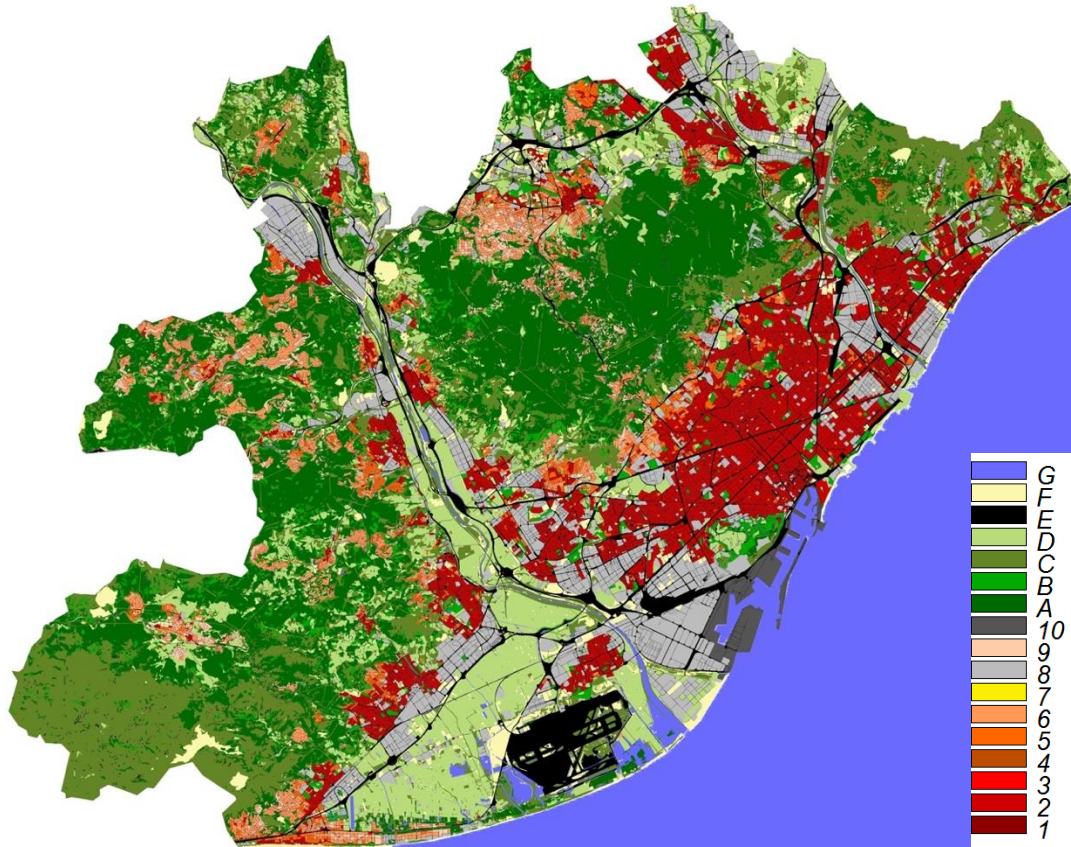


Figura 3.5 Mapa LCLU- LCZ vectorial de alta resolución.

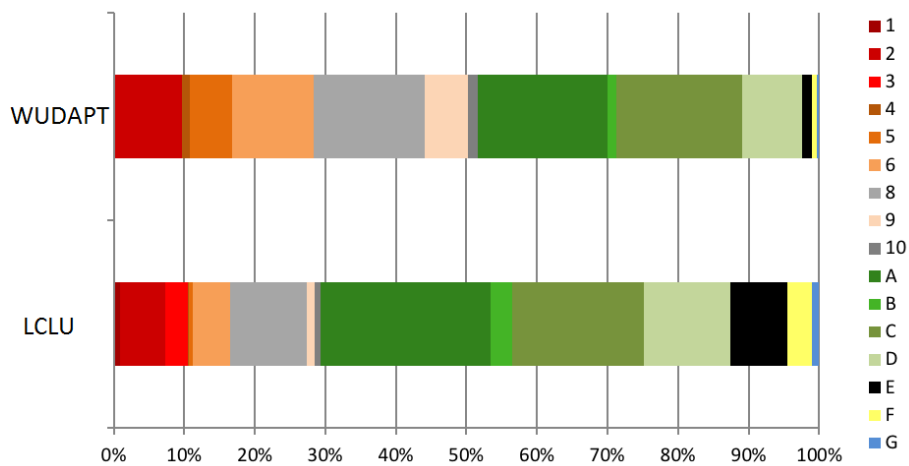


Figura 3.6 Diferencias entre las superficies de LCZ usando WUDAPT y LCLU.

La figura 3.6 muestra las diferencias entre la cobertura total de cada LCZ obtenida utilizando el método LCZ-LCLU y utilizando WUDAPT (para el AMB). En el enfoque WUDAPT, el 53.6% de la superficie del AMB consiste en áreas urbanas (LCZ 1-10), mientras que bajo el método LCZ-LCLU, el mismo tipo de cobertura ocupa solo el 37.3%. Esto se debe al hecho de que el método basado en áreas de entrenamiento (WUDAPT) se genera a una resolución espacial de

100 m, y el proceso de interpolación requerido resulta de generalizaciones. Esto conlleva que las áreas de tamaño relativamente pequeño queden englobadas por categorías que agrupan más píxeles (formato ráster del método WUDAPT) por lo que muchas áreas pequeñas sumadas pueden llegar a representar áreas significativas. En ambos métodos, podemos observar que la categoría de bosque natural (LCZ A) es la más común, representando el 24.1% y el 18.4% de nuestra zona de estudio, respectivamente. Esto se debe al hecho de que el AMB incluye el Parque Natural de Collserola en la Cordillera Litoral. La siguiente clasificación más común es LCZ C, que corresponde a matorrales y arbustos. Las LCZ urbanas más comunes incluyen polígonos industriales (LCZ 8), áreas con edificios densos de menos de 25m de altura (LCZ 2) y categoría LCZ 6, que consiste en edificaciones de altura media poco densos.

### 3.2.3. Aplicación de la metodología WUDAPT y LCLU combinadas sobre la ROI.

La última aproximación presentada fusiona dos técnicas de mapeo. Para la región administrativa del AMB (con una fuente de datos más extensa y detallada espacialmente) se ha usado la metodología basada en datos LCLU que parte de la reclasificación de las leyendas de los usos del suelo de los distintos mapas de alta resolución existentes y la metodología WUDAPT basada en datos satélite.

El mapa de LCZ vectorial del AMB, se rasterizó a una resolución de 100 m. Para el área no perteneciente al AMB, se acopló la cartografía de LCZ WUDAPT basada en datos satélite de mayo de 2015, la capa que más buenos resultados experimentó en la validación. En este último mapa se ha corregido y mejorado la exactitud y la delimitación de las LCZ. Esto ha sido posible acoplando un mapa de población y una ortofoto de alta resolución. Gracias a ambas capas se ha podido discernir y corregir ciertas categorías LCZ. A partir de la capa de población, podemos saber si hay o no hay población y en definitiva si hay edificaciones. Nos será muy útil para mejorar y disminuir la confusión entre categorías urbanas poco densas y categorías rurales.

El mapa de población consiste en una capa vectorial multiresolución que contiene información de la población y densidad de viviendas. Por consiguiente, nos indica espacialmente dónde existen *Urban Climate Zones* (LCZ 1-6 y 9) y nos ayuda a corregir las posibles confusiones que WUDAPT puede tener al aplicar la clasificación supervisada. La ortofoto acoplada permite

corregir las categorías y las delimitaciones entre ellas y definir con más exactitud el área exterior a los bordes administrativos del AMB hechos con la técnica de teledetección. El método seguido se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.7.

El mapa resultante ha sido el que finalmente se ha utilizado en los capítulos 4 y 5 como input para los modelos UrbClim y WRF BEP+BEM (fig 3.8).

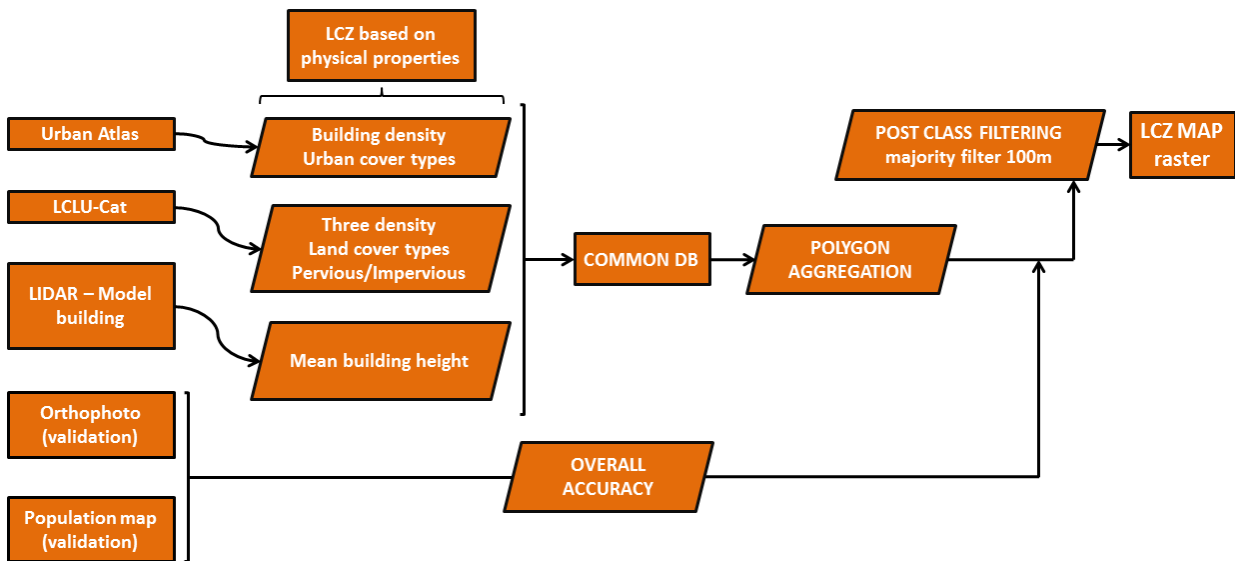


Figura 3.7 Flujo de trabajo utilizado para obtener el modelo LCZ LCLU+WUDAPT.

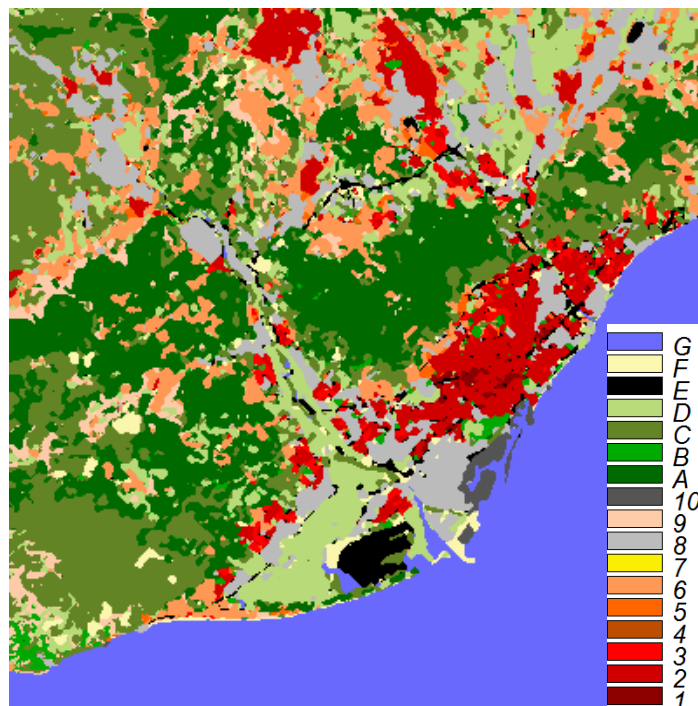


Figura 3.8 Cartografía de las LCZ por combinación de LCLU+WUDAPT.

### 3.3. Evolución temporal de las LCZ en el AMB

El análisis de la evolución de las LCZ con el método WUDAPT, a una resolución espacial de 100m, muestra los cambios registrados entre 1987, 2000 y 2015. En la figura 3.9 se observan los cambios que Barcelona y sus alrededores han experimentado a lo largo de 30 años. El mapa de 1987 nos muestra una radiografía de la Barcelona pre-olímpica dónde predomina la LCZ D (con un 29% de toda la superficie terrestre) principalmente compuesta por superficies agrícolas. Con el transcurso del tiempo se han ido abandonado estas superficies debido al exodo rural que se acentuó durante los años 90, suponiendo en la actualidad, una superficie de tan solo el 8%. La categoría LCZ D se transformó en bosque (que ha incrementado un 4% su superficie, LCZ A) debido al abandono de tierras. En los casos donde la tierra era edificable se substituyeron por áreas industriales o urbanizaciones. Se puede observar también como ha ido cambiando la desembocadura del río Llobregat y cómo ha crecido y se ha industrializado el puerto. La figura 3.10 muestra los cambios en porcentaje de cobertura de las diferentes LCZ para 1987 (L5), 2000 (L7) y 2015 (L8 y S2). La industria y los polígonos, que pertenecen a las LCZ 8 y LCZ 10 han incrementado su superficie al doble (del 7% al 14%). Por lo que respecta a la categoría LCZ 2, la más significativa en cuanto a zona urbana compacta dentro de la ciudad de Barcelona, no registra muchos cambios (un incremento de aproximadamente un 2%) ya que la ciudad no ha podido crecer en extensión horizontal debido a la orografía cerrada que presenta. De todos modos, el incremento de la LCZ urbanas en general, se ha dado en las ciudades circundantes (las superficies urbanas han crecido un 10% respecto al año 1987). Se experimentan muchos cambios de una categoría LCZ 9 conformada por áreas urbanas poco densas a categorías un poco más compactas (LCZ 6), debido al crecimiento y establecimiento de urbanizaciones consolidadas durante los últimos 10 años. Durante los últimos años se ha observado una disminución de la población de Barcelona que se ha reubicado hacia zonas situadas a los alrededores. Otro de los factores a destacar es el crecimiento de las zonas asfaltadas LCZ E debido al crecimiento del aeropuerto y la construcción de un aeródromo y un circuito de carreras después de las Olimpiadas.

También se pone de manifiesto como las categorías LCZ A y LCZ C han aumentado en detrimento del abandono de cultivos, probablemente asociado al exodo rural de los años 90. En

cuanto a la categoría F, relacionada con el suelo desnudo, canteras y playas, se ha mantenido bastante constante.

Queremos destacar, aunque no se visualice propiamente en las figuras 3.9 y 3.10, debido a que el área es irrelevante, que se han marcado pequeñas zonas de categoría LCZ 7 (asociadas a barraquismo) en el mapa de 1987. Antes de las Olimpiadas aún existían zonas de barraquismo en Barcelona a pesar de que las áreas son pequeñas en relación a toda la superficie estudiada.

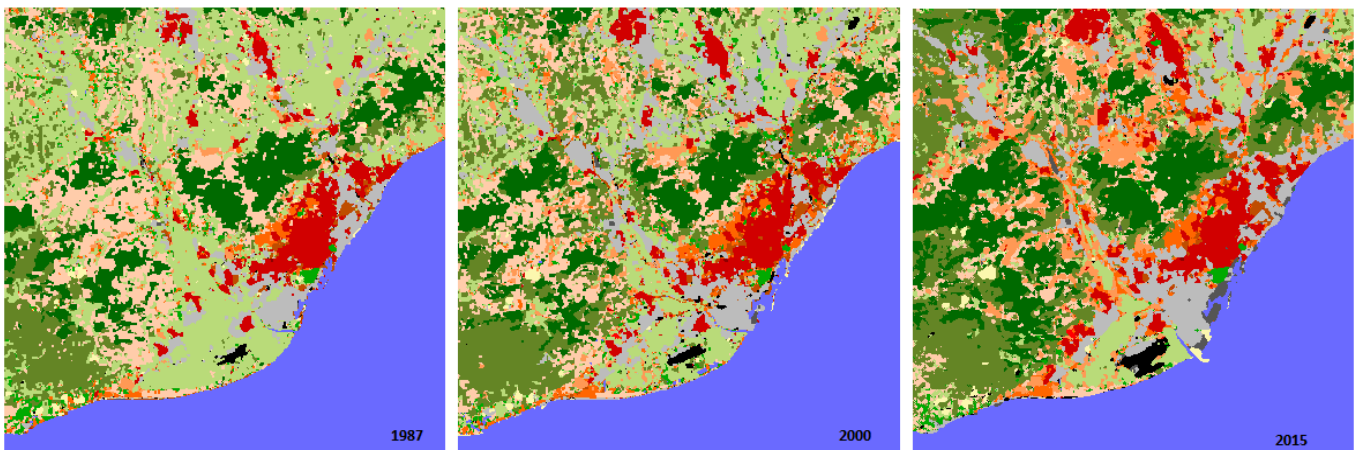


Figura 3.9 LCZ WUDAPT, cartografías 1987, 2000 y mayo 2015.

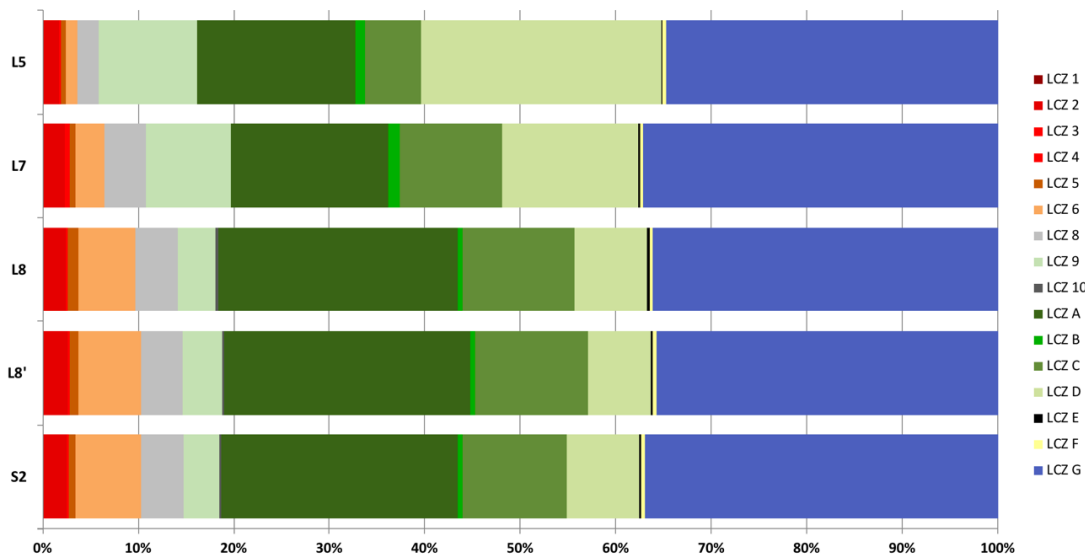


Figura 3.10 Superficies de LCZ para cada uno de las 5 imágenes utilizadas mediante el método WUDAPT.

### 3.4. Aplicación de las LCZ a la caracterización de imágenes térmicas LST

Las LCZ también se pueden utilizar como aproximación a la distribución de temperatura superficial del suelo (*Land Surface Temperature*, LST). En base a los trabajos de Skarbit et al., (2015), Gémes et al., (2016) y Geletič et al., (2016), se han caracterizado las LCZ en los diferentes períodos temporales, que hemos reproducido, a partir de las LST de diferentes días asociados a olas de calor y asociados a los tres períodos temporales estudiados.

Las LST se han derivado usando imágenes L5 y L8, si bien es cierto que la temperatura diurna del aire dista de la temperatura en superficie (influenciada por factores radiativos y morfológicos), las imágenes de satélite (que como sistema de observación de la Tierra desde el espacio están midiendo la temperatura de las superficies) representan una alternativa de datos muy estimable debido a la cobertura espacial y temporal que tienen en comparación a una red de estaciones urbanas acompañadas de un método de interpolación.

En este apartado hemos seleccionado 3 fechas relacionadas con altas temperaturas registradas en Catalunya. Se han escogido 3 días calurosos y sin nubes (uno para cada período de tiempo cartografiado) basándonos en la documentación oficial de AEMET donde hay registradas las olas de calor a nivel español desde 1975 hasta 2016. Cabe destacar que dos de las fechas se relacionan con dos olas de calor muy severas y que afectaron extensamente a toda Europa como la ola de calor de 2003 y la de 2015 (que estudiaremos extensamente en el capítulo 5).

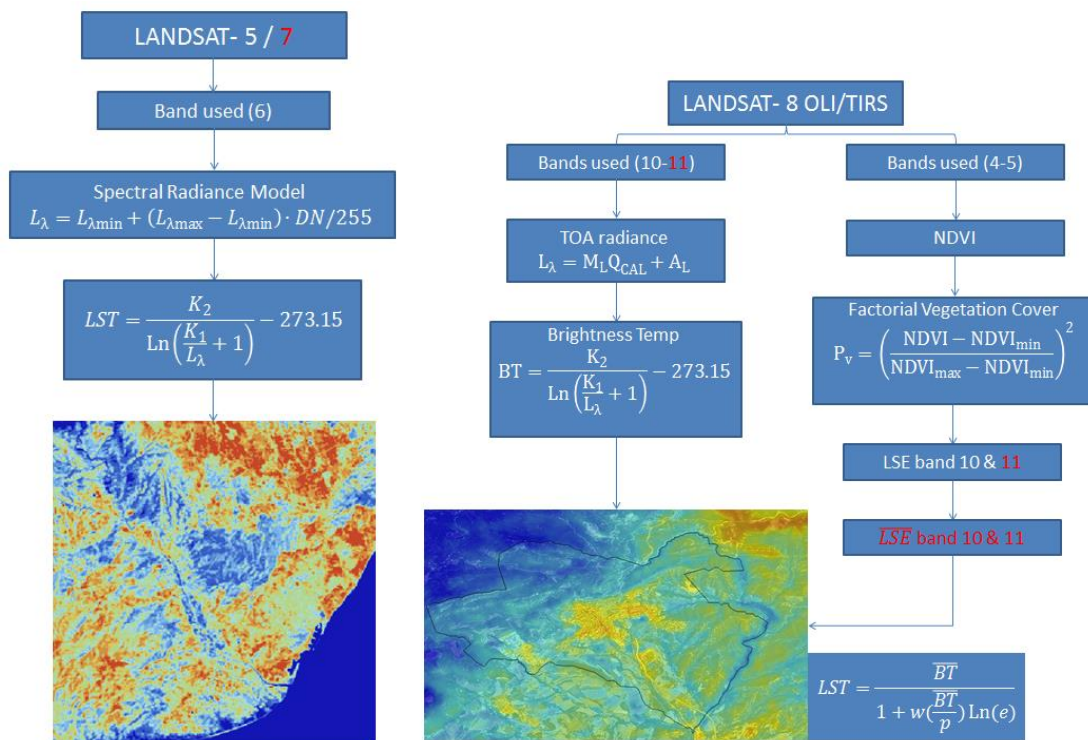
En el caso del AMB, se considera ola de calor cuando se superan los 33.1°C durante tres o más días consecutivos asociado al percentil 98. Actualmente, se registra un total de una ola de calor cada 4 años en término medio, pero según el escenario más alarmista correspondiente al RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*), se calcula que se puede llegar hasta un total de 4-5 olas de calor cada año para el período 2071-2100 (Pla Clima, 2018). En nuestro caso, tan solo hemos seleccionado días concretos con temperaturas elevadas y hemos calculado la LST registrada durante la mañana (tabla 3.7).



ID	Satélite	Fecha	Hora (UTC)	Sol EL	Sol AZM
L5_1987	LANDSAT 5	1987/08/15	9:56:30	52.638	128.968
L5_2003	LANDSAT 5	2003/08/11	10:07:20	54.989	131.070
L8_2015	LANDSAT 8	2015/08/03	10:36:15	59.752	136.878

Tabla 3.7 Imágenes usadas para la obtención de la LST

La LST ha sido obtenida mediante imágenes L5 y L8. Para ello se han usado diferentes metodologías descritas en el *workflow* de la figura 3.11. Para L5 se ha usado el modelo de radiancia espectral. Para el L8 se ha seguido una metodología recomendada por el *United State Geological Survey* (USGS), entidad responsable de la gestión de los datos del programa Landsat. Ambas técnicas se explican extensamente en el capítulo 6 ya que se han elaborado dos programas que automatizan el cálculo de la LST.

Figura 3.11 *Workflows* para la obtención de LST utilizando L5 y L8

Una vez calculada la LST a 30m de resolución espacial (en origen el canal térmico está a 60m) se ha re-escalado con una interpolación de media ponderada y se ha normalizado tipificando las variables, permitiendo una comparación independiente de la unidad de medida.



Para hacer los cálculos estadísticos relacionando las LCZ con la LST se han vectorizado las cartografías de las LCZ y se ha hecho una estadística zonal con los ráster conformados por las LST. Dado que estamos trabajando con temperaturas de superficie, la influencia del tipo de material y características del suelo, capacidad de retención y albedo es mucho mayor que la temperatura a 2m.

Como podemos ver en la figura 3.12, las LST de los días pertenecientes al año 1987 y al año 2003 registraron temperaturas muy elevadas, con máximos superiores a los 40°C. En particular lo observamos en la imagen de 2003 en la parte NE de la imagen que coincide con una zona interior con menor efecto marítimo y a la vez coincidente con un uso del suelo de polígonos industriales, con unas propiedades térmicas muy favorables a la captación y acumulación de calor.

Observamos como el centro de Barcelona no coincide con el máximo de temperatura debido a que las propiedades de los materiales más favorables a retener calor se hallan en las zonas más industrializadas situadas en la periferia. Las imágenes LST de 1987 y 2003 presentan temperaturas más homogéneas y existe menos gradiente. Esto es debido a que las altas temperaturas fueron muy constantes durante varios días, y al mantenerse la temperatura elevada durante muchos días, provocó que las temperaturas presentasen un gradiente menos elevado. Podemos observar como la temperatura media se mantiene entorno a 35°C (la imagen no se ha registrado durante el máximo térmico ya que el paso de los satélites en nuestra franja se sitúa entre las 9 y las 11 de la mañana), y por lo tanto son situaciones de calor bastante marcado. En el caso de la imagen de 2015, pertenece a un período también muy caluroso, pero no se registró durante los días concretos de ola de calor (las temperaturas máximas se registraron durante el mes de julio, tal y como veremos en el capítulo 5). Podemos ver que se registra un mayor gradiente y por consiguiente puede establecerse una mayor correlación con los usos del suelo y se pueden caracterizar mejor que en las otras imágenes, que presentan resultados más homogéneos a nivel térmico.

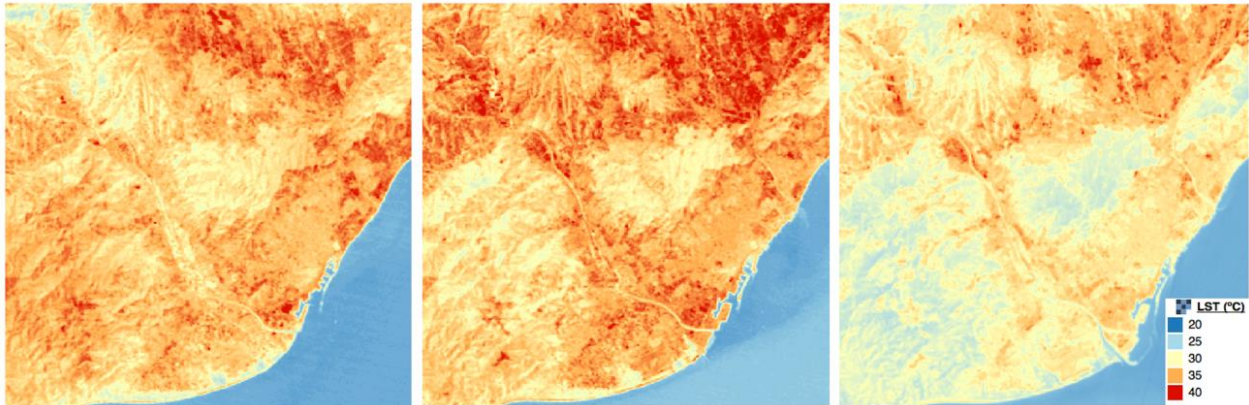


Figura 3.12 Mapas de LST para 1987 (Landsat 5), 2003 (Landsat 5) y 2015 (Landsat 8) obtenidos mediante el uso del *workflow* de la figura 3.11

En este apartado hablaremos de las superficies o categorías LCZ más significativas desde una perspectiva areal, aunque en los gráficos podemos observar el comportamiento de todas las LCZ por separado. La figura 3.12 representa la distribución de temperatura de superficie (LST) durante los 3 períodos de tiempo analizado, correspondiente a días con temperaturas elevadas o muy elevadas. Las temperaturas más frecuentes oscilaron entre los 30 y 35°C para toda las LCZ.

Si analizamos las LCZ urbanas podemos observar como en el caso de las LCZ 2 que representan las áreas más comunes de vivienda para la población, las temperaturas para los episodios más calurosos (1987 y 2003) son más elevadas. Para el episodio de 2015, relativamente menos caluroso las frecuencias de los intervalos de temperatura más altos presentan resultados más suaves, resultados que se asemejan a los ya analizados en el estudio de Skarbit et al. (2015). El mismo comportamiento lo encontramos para la LCZ urbana que más ha crecido a lo largo del tiempo, la LCZ 8, para la que el perfil de la distribución es muy parecido al de la LCZ 2 pero con temperaturas relativamente más elevadas. Debido a las propiedades características (materiales metálicos u oscuros, que retienen el calor), las temperaturas se sitúan por encima de los 35°C en los dos casos más cálidos. Otra explicación de por qué las frecuencias relativas de altas temperaturas en las LCZ 2 y 8 (para el episodio 2015) son menores, puede deberse a que al crecer en superficie también crea más heterogeneidad térmica debido a otros factores geográficos influyentes. Para el caso de otras categorías relevantes como la LCZ 6 y la LCZ 9 observamos que las frecuencias son muy parecidas y recogen las temperaturas más bajas (fig 3.14) dentro de las áreas urbanas. Esto es debido a la baja densidad de edificios y a la presencia de vegetación.

En cuanto a las LCZ asociadas a cubiertas naturales o rurales, las temperaturas diurnas registradas son un poco más bajas o incluso bastante más bajas, como en el caso de la LCZ A perteneciente a bosques (fig 3.14). En las categorías A y C, pertenecientes a bosques de árboles o arbustos, las frecuencias son muy parecidas para las tres olas de calor, y por lo tanto podemos considerar que tienen un comportamiento muy homogéneo en todos los casos. Para las LCZ D relativas principalmente a las áreas rurales, hay un comportamiento de doble pico ya que, además de la disminución temporal de su superficie, existen zonas alteradas debido a cultivos forzados (invernaderos) y otras alteraciones que afectan sobre el perfil. También lo observamos en el *boxplot*, donde el diagrama de cajas es más alargado y los percentiles 25 y 75 se alejan más de la mediana.

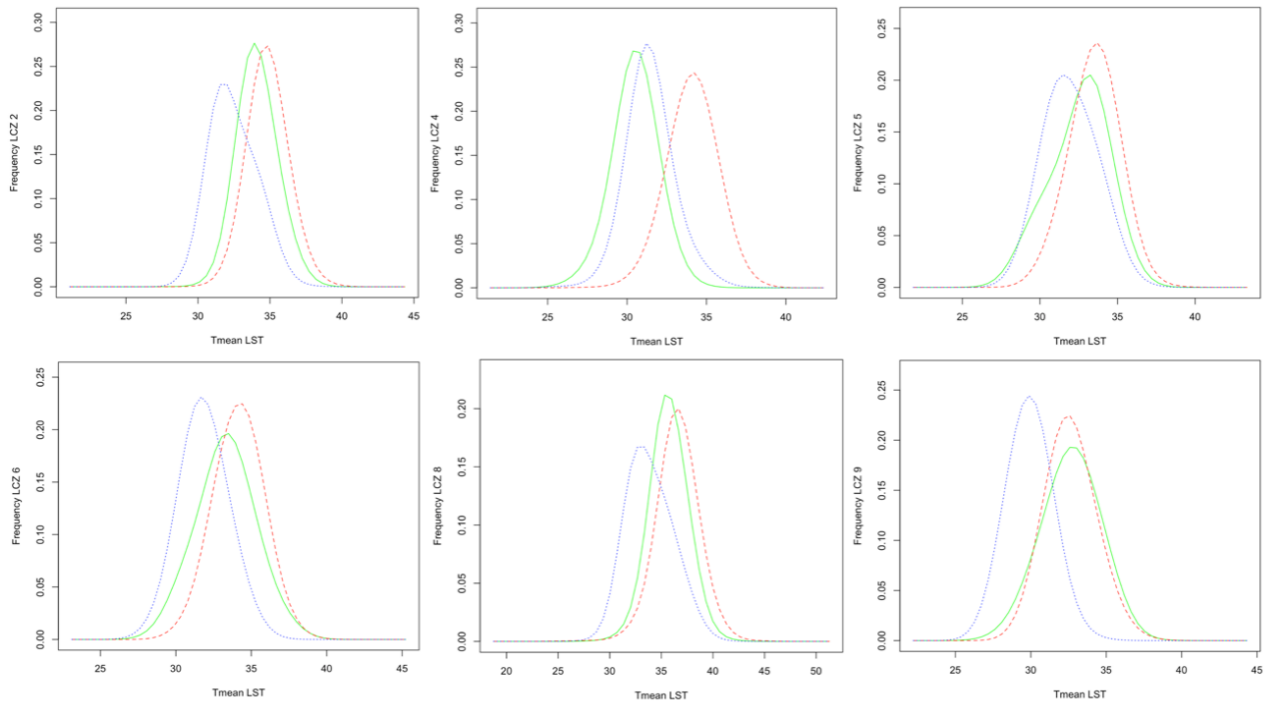


Figura 3.13 Distribución de frecuencias de la LST para cada uno de los períodos estudiados, 1987 (verde), 2003 (rojo), 2015 (azul)

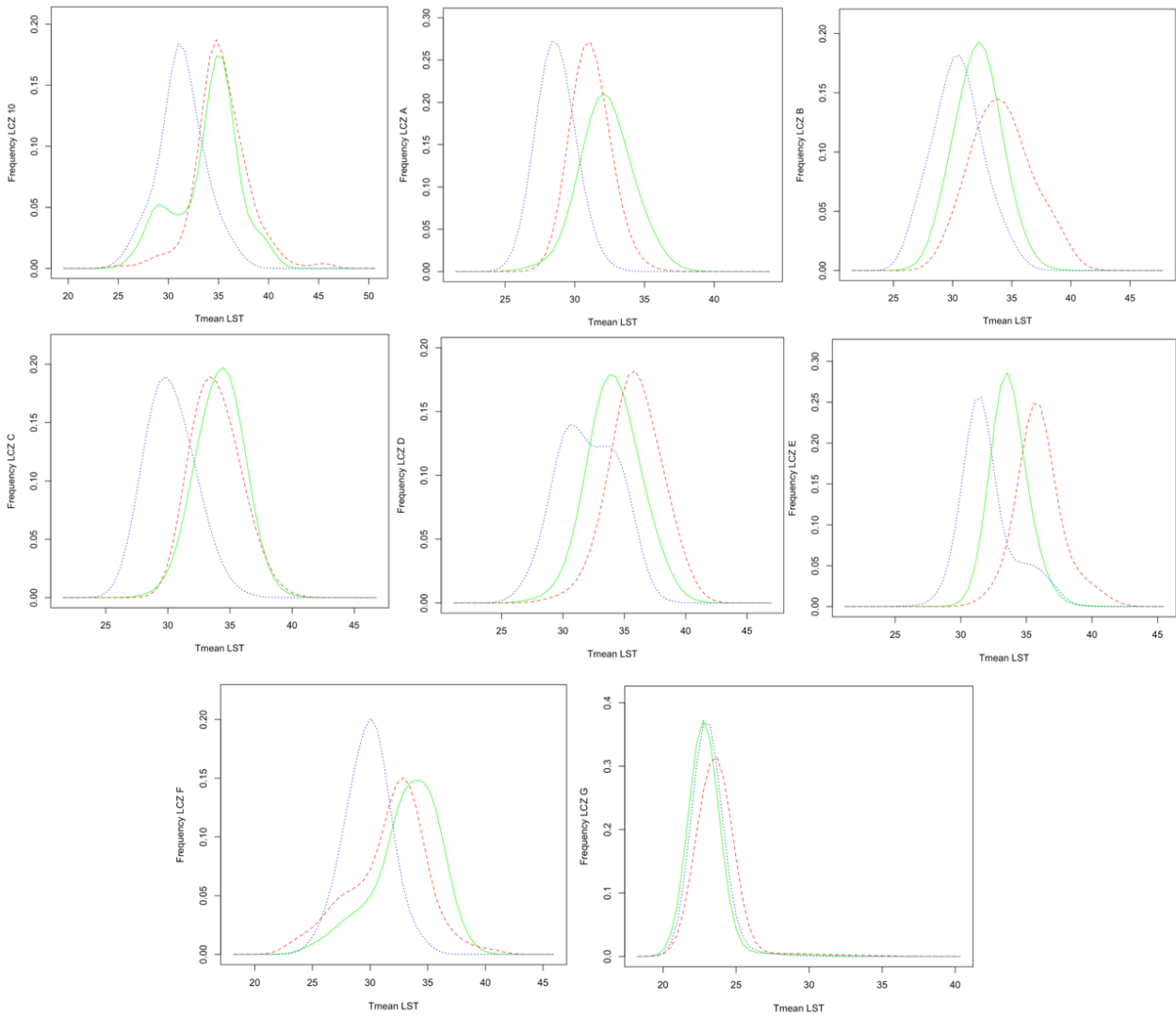


Figura 3.13 Distribución de frecuencias de la LST para cada uno de los períodos estudiados, 1987 (verde), 2003 (rojo), 2015 (azul) (Cont.).

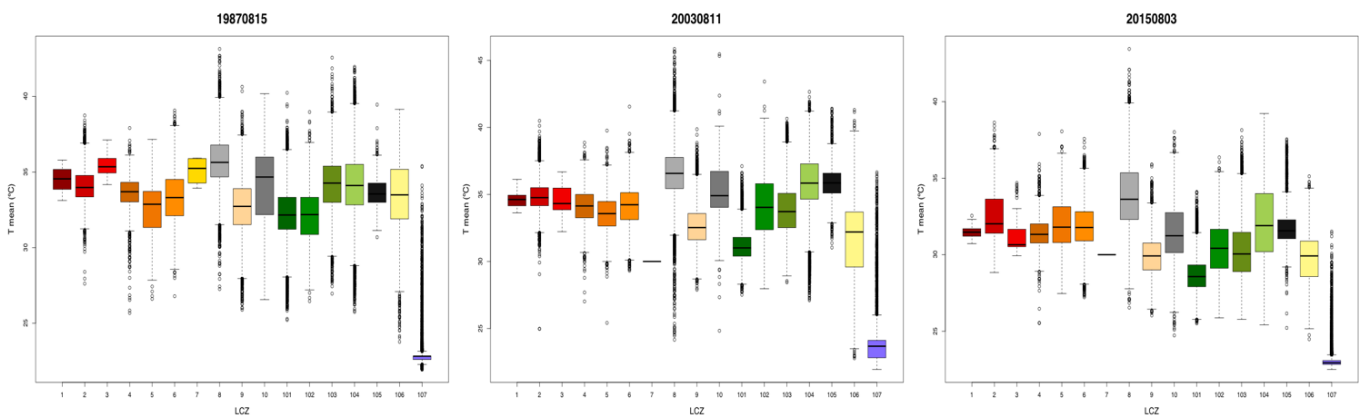


Figura 3.14 *Boxplots* para la caracterización térmica de la LCZ para las diferentes LST calculadas (1987, 2003 y 2015) 101=A, 102=B, 103=C, 104=D, 105=E, 106= F, 107=G.

En la figura 3.15 se muestra la temperatura media de cada LCZ para los tres periodos de estudio tratados conjuntamente. Observamos como las LCZ urbanas juntamente con la LCZ E (descrita por superficies asfaltadas o rocosas) son las que mantienen temperaturas más elevadas, destacando, por encima de todas ellas, la LCZ 8. Al tratarse de LST y no de temperatura del aire, el perfil que se muestra en la figura 3.15 además de ser un resultado destacado del trabajo, resulta coherente. En el siguiente capítulo, se caracterizarán las LCZ a partir de la temperatura del aire a 2m, obtenidas a partir de las salidas del modelo climático UrbClim y se observarán algunos cambios, aunque ciertos patrones serán muy parecidos. Es importante destacar también las elevadas temperaturas de las zonas rurales o cultivadas debido que durante el día también almacenan y generan mucho calor. Estos resultados son parecidos a otros estudios como el ya citado de Geletič et al. (2016).

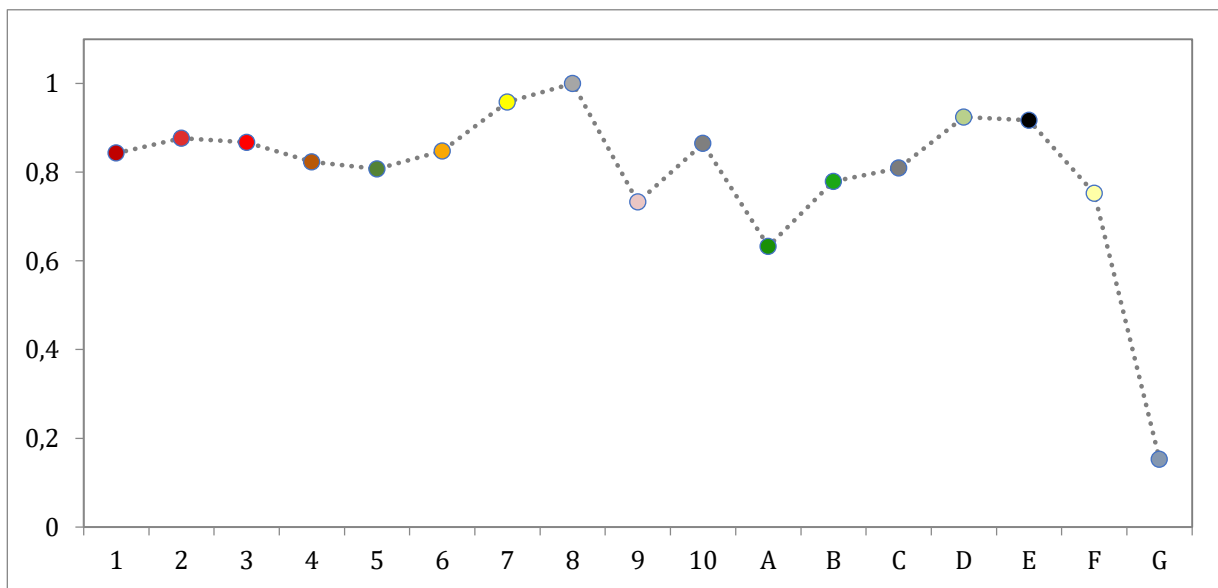


Figura 3.15 Perfil térmico medio normalizado de cada LCZ para el promedio de las 3 LST juntas.

### 3.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado las metodologías y los resultados de las cartografías que se han diseñado como base de referencia a lo largo de los diferentes capítulos de la tesis. Se han explicado las diferentes metodologías para construir la cartografía de Zonas Climáticas Locales (LCZ), una cartografía que establece un sistema de estandarización para áreas urbanas, periurbanas y rurales frente a las respuestas térmicas de las cubiertas y usos del suelo. En este sentido esta nueva cartografía propuesta por Stewart y Oke (2012) establece un estándar de leyenda de usos del suelo enfocado a las áreas urbanas muy detallado y con muchas características generalizadas desde una perspectiva física, radiativa, térmica y metabólica. Ésta cartografía aporta un sistema de estandarización del comportamiento térmico urbano, así como una herramienta para mejorar los inputs de los modelos climáticos y meteorológicos urbanos.

Existen diferentes propuestas metodológicas para realizar estas cartografías. En este capítulo se exponen dos metodologías: la primera basada en el diagrama de flujo propuesto por el proyecto internacional WUDAPT y la segunda es una propuesta metodológica propia que permite realizar la cartografía con una resolución mayor que la WUDAPT.

En este capítulo se han elaborado un total de seis cartografías utilizando la metodología WUDAPT, que hemos adaptado a diferentes satélites (WUDAPT solo contempla Landsat 8 en su propuesta).

Los resultados de la validación del método internacional WUDAPT, adaptado a diferentes imágenes históricas y presentes usando diferentes satélites, han sido óptimos con valores superiores a los  $K=0.6$  exceptuando la imagen L5 con un valor de  $K=0.58$ . Los índices de la validación más favorables han sido para las imágenes L8 para el período presente debido que las AT (áreas de entrenamiento) se han podido representar mejor. Cabe destacar que las zonas urbanas e industriales han crecido el doble en un período de 30 años, debido al éxodo rural durante el transcurso de este período.

En el segundo método el área de estudio ha sido mapeada integrando dos técnicas, la LCLU basada en mapas de uso del suelo y el WUDAPT. El LCLU (metodología GIS) se ha aplicado al Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y el WUDAPT a toda la región (dentro y fuera) del

AMB. El mapa WUDAPT adolece de una menor de caracterización de diferentes tipos de áreas urbanas, comparando con la aproximación LCLU. Consecuentemente, cuando los datos requeridos estén disponibles, es mejor aplicar la metodología LCLU que WUDAPT. Si comparamos la metodología WUDAPT con la LCLU, observamos que el método WUDAPT sobreestima en un 16% las áreas urbanas e industriales, debido que el nivel de resolución espacial es menor y el método de interpolación o generalización no es tan preciso.

Se han calculado la temperatura superficial del suelo para 3 imágenes pertenecientes a tres olas de calor y se han caracterizado las LCZ a partir de las temperaturas obtenidas. Se ha hecho para el período preolímpico, prefórum y para el período presente.

Observamos como las LCZ urbanas son las que mantienen temperaturas más elevadas, destacando, por encima de todas ellas, la LCZ 8. Al tratarse de LST y no de temperatura del aire, los perfiles que muestran las temperaturas para cada LCZ son coherentes con las propiedades intrínsecas de cada una de ellas tal y como también observaremos en el siguiente capítulo. Los valores se encuentran por encima del 1°C de diferencia respecto zonas urbanas densas (ej. LCZ 2), más de 2°C respecto zonas urbanas poco densas (ej. LCZ 5) y más de 3°C respecto parques urbanos o zona natural periurbana (ej. LCZ B).

Los resultados obtenidos y documentados en este apartado nos sitúan ante la posibilidad de una caracterización óptima de las LCZ, tal y como veremos en los capítulos posteriores. En este trabajo se han cartografiado las LCZ bajo una ventana temporal histórica, obteniendo cartografías diferentes que pueden ser útiles como input de modelos ya sea para replicar casos de estudio pretéritos o actuales.

También resultará de utilidad cuando se precise replicar situaciones sinópticas en distintos tipos de entramado y observar las diferencias entre las distintas cartografías. Desde este enfoque puede ser muy eficaz para un planificador que elabore estrategias de sostenibilidad, como un geoservicio de soporte a la toma de decisiones.

Caracterizando las LCZ mediante una imagen de temperatura del pasado y derivando las características a las LCZ presentes, podemos observar si en el escenario actual, nuestra ROI absorbería o no más temperatura. Con este estudio inicial, podemos deducir que nuestro ámbito geográfico de estudio (AMB) ha ido creciendo en entramado urbano e industrial en detrimento de

las zonas rurales y naturales, lo que ha comportado que las temperaturas sean más elevadas en el presente que en períodos pretéritos tan solo por el cambio de los usos del suelo y no tan solo por el aumento de temperaturas debido al cambio climático. Por esta razón, es necesario entender muy bien cómo se caracterizan térmicamente los usos y cubiertas del suelo. Esto nos ayudará a comprender qué respuesta térmica tiene el entramado urbano y a su vez nos ayude también a obtener mejores resultados en la modelización climática urbana. En los capítulos siguientes se abordarán todas estas cuestiones.



# 4. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y LA VULNERABILIDAD AL CALOR A TEMPERATURAS EXTREMAS EN ECOSISTEMAS URBANOS UTILIZANDO LAS LCZ

Las tendencias de los episodios de temperaturas extremas en las ciudades están aumentando. La morfología urbana y las propiedades térmicas de los materiales son factores que influyen en la variabilidad climática y se convierten en uno de los principales motivos de la singularidad climática de las ciudades. En este capítulo las LCZ se introdujeron como entrada del modelo UrbClim de alta resolución para crear series de temperaturas diarias (mediana y máxima) para el verano durante el período 1987 a 2016 y para el período 2071-2100 (usando el RCP 4.5 y el RCP 8.8), con el fin de crear una cartografía de extremos. Usando la relación entre la mortalidad por altas temperaturas y la distribución de temperatura, se obtuvo la exposición al calor de cada LCZ para los diferentes períodos. Los resultados metodológicos del trabajo muestran la mejora obtenida cuando se mapearon las LCZ y una metodología para obtener la exposición y vulnerabilidad a altas temperaturas de las diferentes LCZ en áreas urbanas y periurbanas para el período presente y el período futuro. El subíndice del capítulo es el siguiente:

4.1 Introducción.....	80
4.2 Evaluación de la exposición a temperaturas extremas (presente).....	83
4.3 Análisis de la exposición al calor y la sensibilidad.....	91
4.4 Elaboración de cartografía de vulnerabilidad frente temperaturas extremas.....	97
4.5 Evaluación de la exposición a temperaturas extremas (período 2071-2100).....	100
4.6 Conclusiones.....	110

## 4.1. Introducción

Las áreas urbanas son ecosistemas particularmente sensibles al aumento de las temperaturas (Pachauri et al., 2015). Las olas de calor y el registro de altas temperaturas forman parte de uno de los fenómenos climáticos de mayor incidencia en la mortalidad de la población y se espera que su frecuencia, intensidad y duración aumenten debido al calentamiento global (Li y Bou-Zeid, 2013; DeJarnett y Pittman, 2017; Sheridan y Dixon, 2017) con especial incidencia en las ciudades debido al efecto de isla de calor urbano (UHI) y a la mayor concentración de población. En consecuencia, los impactos relacionados con la salud representan un problema emergente en la esfera de la salud ambiental (Wolf y McGregor, 2013; Ingole et al., 2020).

Aunque las LCZ se diseñaron originalmente para describir las características radiativas de las diferentes cubiertas y usos del suelo, su aproximación las hace de especial interés en el estudio de la exposición al calor en condiciones climáticas adversas. A pesar de que hay numerosas publicaciones que estudian el riesgo, la exposición y la vulnerabilidad a escala urbana para eventos de calor extremo (Xu et al., 2012; Weber et al., 2015; Krstic et al., 2017; Eum et al., 2018), pocos estudios lo han hecho desde una perspectiva de LCZ (eg. Stewart et al., 2014; Skarbit et al., 2015; Geletič et al., 2016; Verdonck et al., 2018).

Este capítulo tiene como objetivo evaluar la vulnerabilidad frente altas temperaturas utilizando la clasificación LCZ en una región metropolitana costera del Mediterráneo, concretamente Barcelona dónde ya se ha caracterizado, la cartografía de LCZ, en el capítulo anterior. Barcelona constituye un buen ejemplo de una megaciudad costera mediterránea (ciudades portuarias con una población superior a 1 millón en 2005) (Hanson et al., 2011) que pueden verse gravemente afectadas por los impactos del cambio climático. En efecto, el aumento anual de la temperatura media en la cuenca del Mediterráneo es más alto que el promedio mundial (1.5°C por encima de 1880-1899 en 2018) y podría estar por encima de los 2.2°C en 2040 sin medidas efectivas de mitigación (Diffenbaugh et al., 2007; Lionello et al., 2014; Cramer et al., 2018; MedECC, 2019). Los efectos directos sobre la salud producidos por el aumento de la frecuencia y la intensidad de las olas de calor y las noches tropicales se verán amplificadas por el

efecto de isla de calor urbano, particularmente importante en Barcelona (Baccini et al., 2011; Martin-Vide y Moreno-García, 2020). Asociado a este aumento de temperatura y teniendo en cuenta los escenarios de aumento del nivel del mar y las medidas de adaptación actuales, las ciudades en el Mediterráneo representarán la mitad de las 20 ciudades globales con el mayor aumento en daños anuales, en promedio (Hallegatte et al., 2013)

Si bien existe una amplia gama de definiciones para el término vulnerabilidad que depende de diferentes factores físicos y sociales (Cutter, 1996; Cutter et al., 2000; UNISDR, 2009; Llasat et al., 2009; Nakamura y Llasat, 2017), en el contexto de este estudio y de los estudios de climatología urbana, la vulnerabilidad se entiende como una combinación de exposición al calor atendiendo a las características morfológicas de la ciudad y su entorno, y la sensibilidad a la temperatura atendiendo a la población expuesta (Wolf y McGregor, 2013; Bao et al., 2015).

En este capítulo, se presenta una propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad y la exposición al calor (Vicedo-Cabrera et al., 2014; Lowe et al., 2015; Alvarez-Pedrerol et al., 2017) de las áreas urbanas y periurbanas causadas por los efectos de las altas temperaturas utilizando el marco de las LCZ como cartografía base. Para ello, la cartografía de LCZ se ha combinado con un modelo que muestra la relación entre mortalidad y exposición a las altas temperaturas propuesto en el trabajo de Achebak et al. (2018). La cartografía base de LCZ ha sido la realizada en el apartado 3.3 basada en la combinación de los métodos LCZ-LCLU y WUDAPT (fig 3.8).

Para asociar las LCZ con la distribución de temperaturas en verano (entendido como los meses junio-julio-agosto, JJA), se han modelizado las temperaturas diarias medias y máximas y la temperatura del punto de rocío usando el modelo UrbClim (De Ridder et al., 2015) de alta resolución espacial (100m) para el período comprendido entre 1987 y 2016. Utilizando el modelo que relaciona la mortalidad debida a las altas temperaturas y la distribución de temperaturas, se ha obtenido la exposición al calor para cada categoría de LCZ.

Una vez caracterizados los usos del suelo (LCZ) según su exposición a la temperatura, se ha acoplado la sensibilidad, considerada la población potencialmente más afectada (edades más vulnerables y sectores de la población más empobrecida). De esta manera se han obtenido mapas de vulnerabilidad, enfocados desde una perspectiva de justicia climática, para las distintas distribuciones de temperatura de verano 1987-2016 y para la ciudad de Barcelona.

Finalmente, se han caracterizado las LCZ sobre mapas de temperatura a partir de las salidas obtenidas del modelo UrbClim sobre escenarios futuros (2071-2100), usando como referencia los escenarios basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (*Representative Concentration Pathway*, RCP) 4.5 y 8.5. De este modo se modeliza el aumento de temperatura y se relaciona con el factor de exposición al calor.

Este capítulo representa una propuesta de partida para nuevas líneas de investigación, con tres objetivos principales:

- a) poder simular cambios en las cubiertas urbanas y su impacto en los potenciales cambios en la exposición al calor dicho a las altas temperaturas sin, tener que recurrir a modelos climáticos;
- b) reducir la escala de las salidas de temperatura de los modelos urbanos a resoluciones inferiores a 100m utilizando la cartografía vectorial LCZ;
- c) aplicar esta metodología a escenarios de cambio climático futuros.

Para la descripción y muestra de los resultados de dicha propuesta, este capítulo se ha estructurado en dos subapartados generales:

- 4.2. Evaluación de la exposición al calor por temperaturas extremas, en el período climático presente, en ecosistemas urbanos utilizando la aproximación LCZ y la relación con la mortalidad. Primero se efectúa la caracterización climática de la distribución de temperatura media y extrema en Barcelona a partir de los resultados del modelo UrbClim. En segundo lugar, se desarrolla una metodología para la caracterización térmica de las LCZ. En tercer lugar, se definen los umbrales de exposición al calor basados en el modelo epidemiológico de temperatura-mortalidad propuesto por Achebak et al. (2018). Esta primera parte del capítulo, concluye con la definición del índice de exposición al calor y la agregación de la sensibilidad de la población sobre los mapas de exposición al calor con el fin de obtener la vulnerabilidad.
- 4.3. Evaluación de la exposición al calor para temperaturas extremas, en escenarios futuros, en ecosistemas urbanos utilizando la aproximación LCZ y partiendo de que sigue siendo válida la relación con la mortalidad. Es decir, en un escenario futuro sin

nuevas medidas de adaptación y mitigación. En este caso no se le agregará la sensibilidad, debido que es una variable desconocida, por lo tanto, los mapas resultantes serán de exposición al calor y no de vulnerabilidad.

## 4.2. Evaluación de la exposición a temperaturas extremas en ecosistemas urbanos utilizando la clasificación de Zonas Climáticas Locales (período climático presente).

### 4.2.1. Caracterización climática

Para realizar la caracterización climática se llevaron a cabo simulaciones para el período 1987-2016 mediante el modelo UrbClim que, en nuestra área de interés, comprende 401x401 píxeles de cuadrícula horizontales a una resolución de 100m (40x40km aproximadamente) y 19 niveles verticales dentro de los 3 km inferiores de la troposfera. Cubre toda el área geográfica del Área Metropolitana de Barcelona, incluidas las ciudades vecinas, que presentan así mismo altas densidades de población (fig 4.1).



Fig 4.1. Dominio utilizado para ejecutar el modelo UrbClim. La línea gris marca el borde del AMB, mientras que la línea negra muestra el municipio de Barcelona. Los números indican las estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar la relación LCZ-T.

Los datos del modelo UrbClim se van generando cada 3 horas utilizando el reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011), que se ejecuta a una resolución espacial para nuestra región de interés que representa aproximadamente 70-80km. El modelo UrbClim aplica un *downscaling* directo desde ERA-Interim a nuestro dominio.

A pesar de subestimar la temperatura hasta 2°C en las máximas, el modelo mejora y reduce la sobreestimación hasta más de 1°C si se usan las LCZ en detrimento del Corine Land Cover. Esto se debe a que UrbClim contempla no solo más heterogeneidad de superficies urbanas, sino que permite entrar las propiedades térmicas, radiativas y metabólicas propuestas por Stewart y Oke (2012).

Se han modelizado las distribuciones climáticas de la temperatura media diaria, la temperatura máxima y la temperatura del punto de rocío para todos los meses de verano (JJA). La temperatura del punto de rocío se ha utilizado para calcular el índice HUMIDEX que describe la sensación térmica conocida comúnmente como temperatura de bochorno y consiste en combinar la temperatura sensible ( $T_{mean}$ ) y la temperatura del punto de rocío ( $T_{dew}$ ) (Masterton y Richardson, 1979) además constituye un buen indicador de estrés térmico (1).

$$HUMIDEX = T_{mean} + 0.5555 \left[ 6.11 e^{5417.7530 \left( \frac{1}{273.16} + \frac{1}{273.15 + T_{dew}} \right)} - 10 \right] \quad (1)$$

El modelo UrbClim utiliza un esquema de transferencia de suelo-vegetación-atmósfera diseñado para tratar con superficies urbanas. Cada celda de la cuadrícula de superficie en el modelo está descrita en esta tesis mediante la cartografía LCZ, generada bajo la aproximación LCLU+WUDAPT

Las salidas del modelo consisten en datos de resolución diaria para los veranos (JJA) comprendidos entre 1987 y 2016. A partir de estas salidas, se han calculado los valores climáticos para las diferentes distribuciones propuestas o percentiles: P50, P75, P90, P95 y P99 píxel a píxel, que permiten evaluar las condiciones medias y extremas del verano.

La variable seleccionada para realizar la metodología propuesta ha sido la temperatura media diaria, ya que el modelo que relaciona la temperatura y la mortalidad que hemos utilizado, se basa en la relación mortalidad y temperatura media diaria. En cualquier caso, también se han generado los datos resultantes para la temperatura máxima diaria y el valor medio diario de

HUMIDEX. Barcelona tiene una humedad relativa normalmente notable durante los meses de verano, lo que significa que la sensación térmica puede aumentar, como se muestra en la figura 4.2.

Como podemos ver en la figura 4.2 existe un patrón de distribución espacial muy similar para todas las distribuciones. Las temperaturas más bajas se localizan en el área más remota de la costa y próxima a la montaña (fig 4.1) y se asocian principalmente con las categorías LCZ A y LCZ 9 (que cubren principalmente áreas de bosques o edificios de muy baja densidad). También se pueden observar efectos de enfriamiento en los parques más importantes de la ciudad, así como en el paseo marítimo, debido al efecto de la brisa marina (si bien el modelo UrbClim subestima el efecto de la brisa marina en Barcelona, (García-Diez et al., 2016)). Las temperaturas más altas se encuentran en el centro de la ciudad debido al efecto de isla de calor y tienen una tendencia a aumentar en dirección noreste debido al aumento de la densidad de edificios y al menor efecto termoregularizador del mar.

Se observa que en el percentil P99 (ola de calor consolidada) de HUMIDEX, se llega a alcanzar el equivalente a una temperatura de bochorno en la mayor parte de la ciudad próxima a los 39°C. Sin tener en cuenta el efecto de la humedad, la temperatura media en la mayor parte de la ciudad supera los 30°C para el percentil 99, en tanto que en el percentil 50 se superan los 25°C en toda la ciudad con excepción de la zona más próxima a la montaña. Cuando se habla de temperatura media, las máximas diarias superan los 30°C en toda la ciudad en el percentil 90, y los 27°C en el percentil 50, de nuevo con la excepción de los barrios colindantes a la Sierra de Collserola. En el caso de las 3 olas de calor analizadas en el capítulo anterior, se englobarían en una distribución superior al percentil 95.

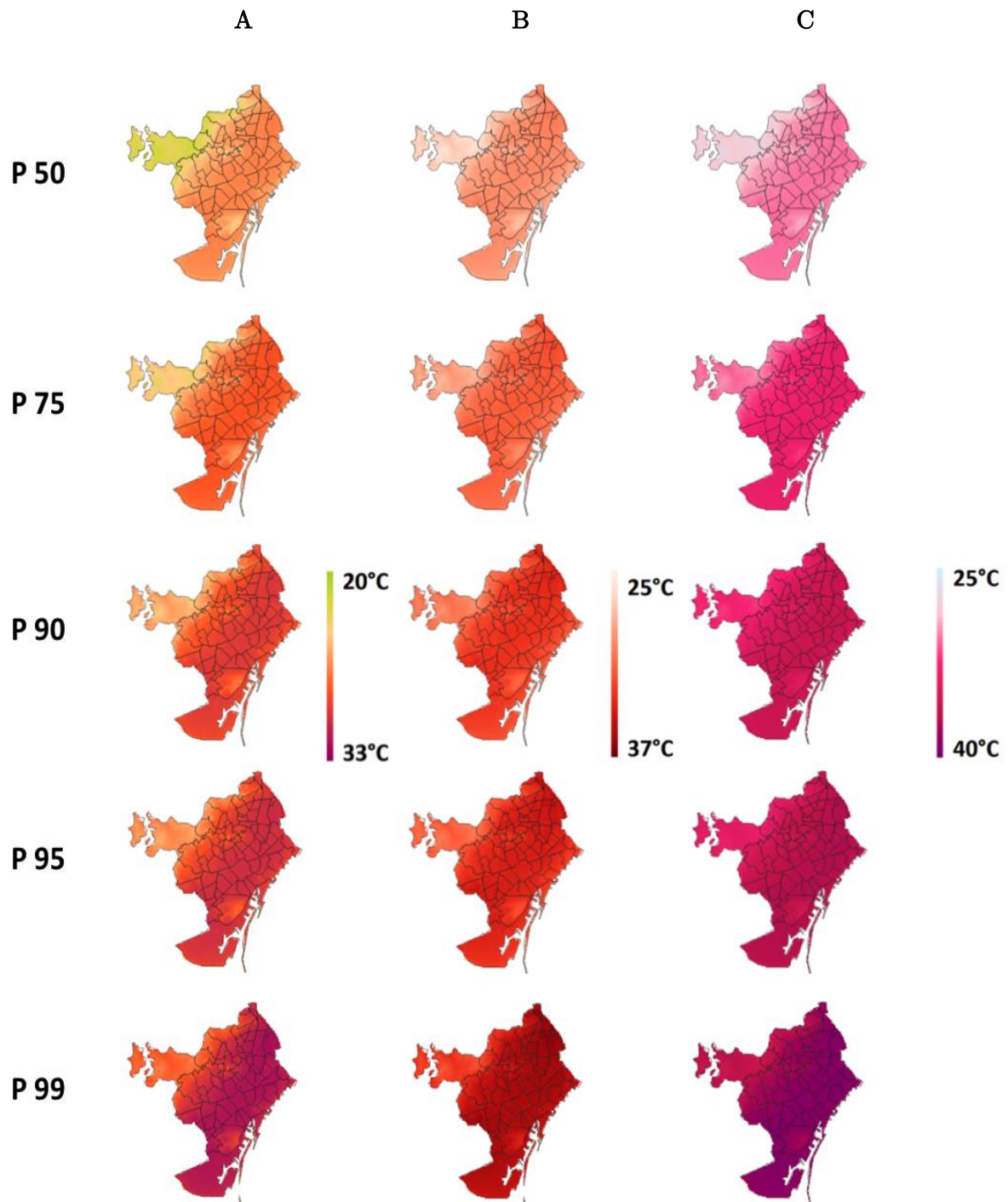


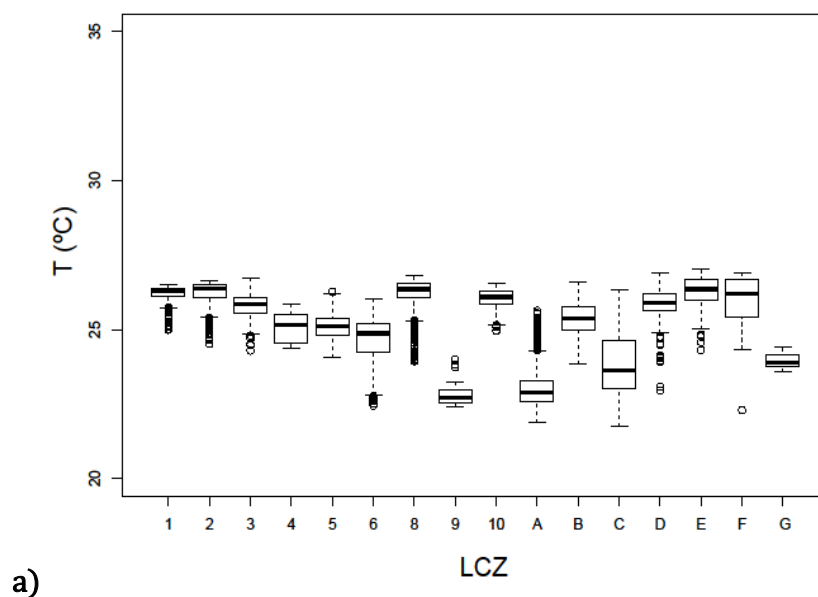
Figura 4.2 Condiciones climáticas en verano modelizadas con el UrbClim (1987-2016): A) HUMIDEX, B) Temperatura máxima diaria, C) Temperatura media diaria para las diferentes distribuciones (P50, P75, P90, P95 y P99).

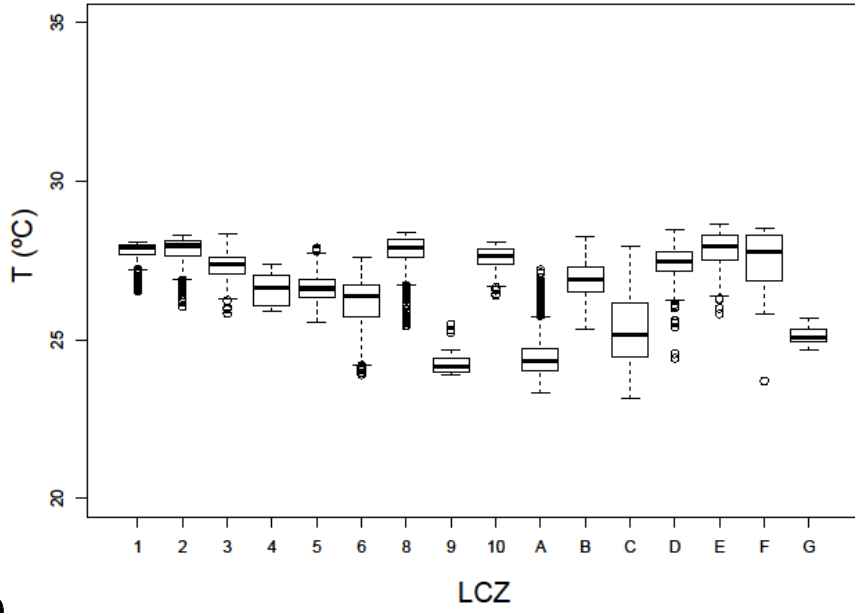


#### 4.2.2. Caracterización térmica de las LCZ

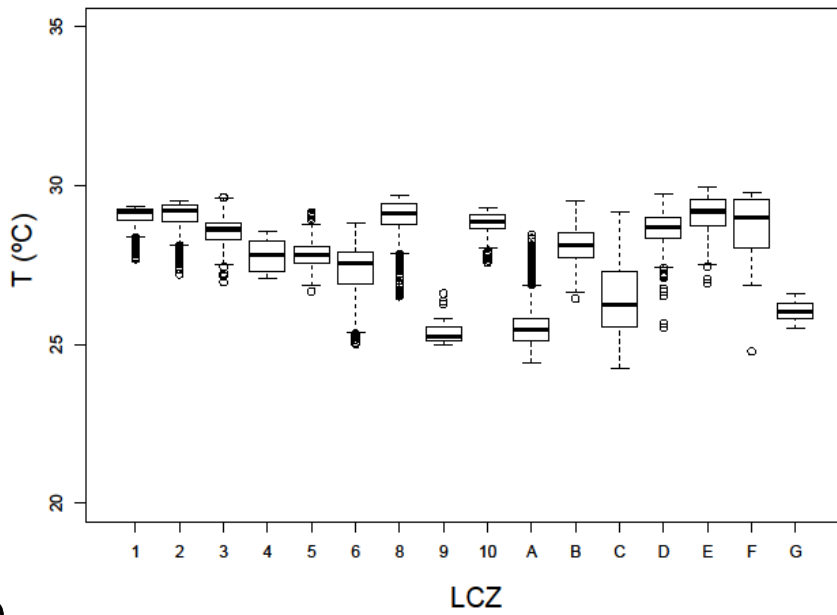
En este apartado, el objetivo es el de relacionar cada LCZ con un comportamiento térmico que la caracterice. En primer lugar, analizamos la respuesta térmica de la LCZ (relación LCZ-T) utilizando las distribuciones de altas temperaturas obtenidas en el análisis climático (fig 4.2). Seguidamente, analizamos las curvas de densidad de probabilidad para cada LCZ, que permitirán calcular la normalidad de ellas. Sobre esta base, a cada LCZ se le otorgará una distribución de temperatura para cada escenario definido por los percentiles anteriores.

En la figura 4.3 se observa que las LCZ 2, E, 1 y 8, registran las temperaturas más elevadas. Estas LCZ en términos generales corresponden a las categorías con una alta admitancia y alta impermeabilidad correspondientes a las zonas urbanas o con actividad industrial más representativas (Stewart y Oke, 2012). En contraste, las temperaturas más bajas se localizan en las LCZ 9, A, C y G, que se corresponden con áreas boscosas y parques situados en las afueras de la ciudad. Por otro lado, los cultivos y suelos desnudos muestran un comportamiento muy variable, ya que durante el día tienden a ser superficies que almacenan y retienen mucho el calor, mientras que durante la noche su comportamiento registra temperaturas por debajo del promedio de la muestra. Estas superficies se caracterizan por registrar una elevada oscilación térmica diaria dado el marcado contraste entre el día y la noche.





b)



c)

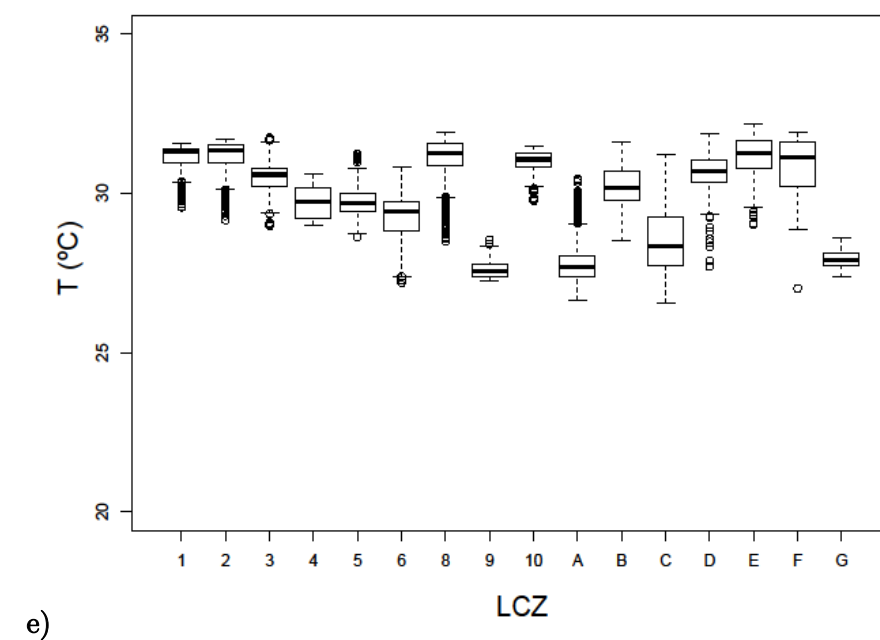
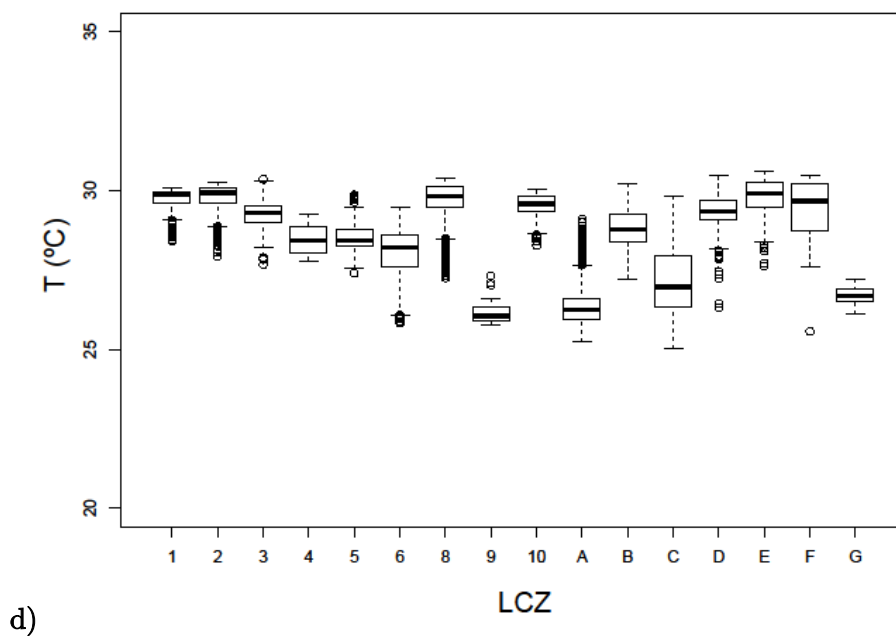


Figura 4.3. *Boxplots* para la caracterización térmica de la LCZ para diferentes distribuciones: a) P50, b) P75, c) P90, d) P95 y e) P99.

En los resultados de la tabla 4.1 se observa cómo, cuanto más extremo es el percentil, mayor es la desviación estándar, tal y como se esperaría en este tipo de distribuciones climáticas de extremos. Además, las desviaciones más marcadas corresponden a las categorías C y F, que representan áreas boscosas, arbustibas o zonas desnudas y que muestran una mayor oscilación

térmica diaria (tal y como se ha comentado anteriormente). Así mismo, se constata como la categoría C está muy influenciada (en el caso de Barcelona) por la orientación geográfica y la compleja orografía de la región. Esto es debido a que hay zonas ubicadas en partes sombreadas relativas a los valles, mientras que otras zonas están en las partes más soleadas, lo que conlleva un impacto directo en los valores de la desviación estándar. En el caso de la categoría C, observamos que corresponde a un uso o cubierta del suelo que no es muy representativo en términos espaciales en nuestra área de estudio (zona dominada por arbustos-matorrales).

<b>LCZ</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>	<b>P90</b>	<b>P95</b>	<b>P99</b>
<b>1</b>	0.301	0.325	0.349	0.363	0.419
<b>2</b>	0.356	0.379	0.396	0.401	0.475
<b>3</b>	0.450	0.468	0.486	0.489	0.552
<b>4</b>	0.528	0.530	0.535	0.522	0.569
<b>5</b>	0.467	0.488	0.504	0.500	0.541
<b>6</b>	0.821	0.841	0.872	0.843	0.804
<b>8</b>	0.465	0.499	0.527	0.531	0.580
<b>9</b>	0.456	0.474	0.461	0.441	0.379
<b>10</b>	0.319	0.338	0.339	0.338	0.322
<b>A</b>	0.686	0.712	0.725	0.705	0.649
<b>B</b>	0.554	0.580	0.603	0.616	0.641
<b>C</b>	1.090	1.128	1.168	1.128	1.088
<b>D</b>	0.550	0.572	0.596	0.586	0.612
<b>E</b>	0.530	0.561	0.599	0.595	0.678
<b>F</b>	0.848	0.918	0.960	0.955	0.978
<b>G</b>	0.224	0.265	0.297	0.294	0.289

Tabla 4.1 Desviaciones estándar para las diferentes categorías de LCZ en los percentiles de temperatura media analizados.

Para cada LCZ se ha aplicado el teorema del límite central, aplicable para un gran número de observaciones como en nuestro caso (el número de muestras  $n > 1000$  para cada LCZ), con el objetivo de conocer si las distribuciones de las LCZ cumplen una normalidad en su distribución. Al ser  $n$ , un número de observaciones mayor que 1000 en la mayoría de LCZ, no podemos aplicar un test paramétrico o no paramétrico y por esta razón se aplica tal generalización. La mayoría de las distribuciones se asemejan a una curva gaussiana al 95% de significatividad (exceptuando la C, la F y la 6 debido a la alta oscilación diurna que tienen estas superficies). Atendiendo a este comportamiento en las distribuciones se aplicó un test ANOVA (de análisis de varianza o

factorial), el resultado del cual nos permitió afirmar que las características y condiciones medias microclimáticas de cada LCZ son significativamente diferentes entre ellas.

### 4.3. Análisis de la exposición al calor y la sensibilidad

#### 4.3.1. Definición del índice de exposición al calor

Para la definición del índice, se ha procedido a reclasificar los mapas de temperatura media diaria para los diferentes percentiles teniendo en cuenta el impacto que pueden tener en la salud, concretamente en el aumento de la mortalidad. Este proceso se ha llevado a cabo utilizando los resultados basados en el estudio de Achebak et al. (2018), en el que se utilizó un modelo exponencial que explica la relación a corto plazo entre la temperatura diaria de verano y los datos de mortalidad por enfermedades cardio-respiratorias en Barcelona para el período 1980-2015 (fig 4.4). Basándonos en esta curva podemos definir de forma objetiva umbrales que relacionen la exposición al calor en función del aumento del riesgo relativo de mortalidad debido a la temperatura.

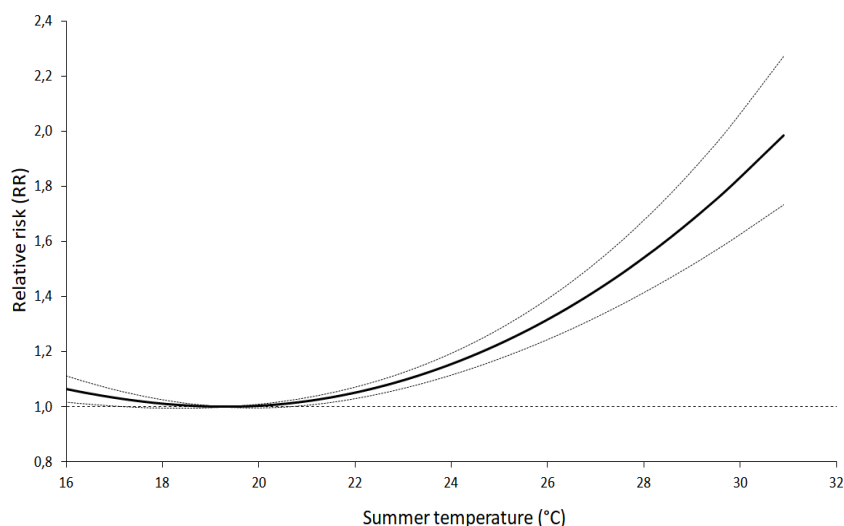


Figura 4.4. Curva de riesgo relativo (RR) basada en la mortalidad relacionada con la temperatura media diaria de verano (JJA) en Barcelona para el período 1980-2015 (Achebak et al., 2018).

Para una mejor comprensión de la curva que se representa en la figura 4.4 se propone un ejemplo: Una  $RR=1.15$  significa que el riesgo relativo de mortalidad es un 15% más alto en

comparación con una temperatura óptima de referencia (es decir, temperatura de mortalidad mínima, cuando  $RR=1$ ). Los riesgos son estadísticamente significativos cuando el límite inferior es mayor que 1.

<b>RR</b>	<b>HEI</b>	<b>°C</b>
1.0	<b>1</b>	18 -20
1.2	<b>2</b>	20 -24.7
1.4	<b>3</b>	24.7 -26.9
1.6	<b>4</b>	26.9 -28.5
1.8	<b>5</b>	28.5 -29.8
2.0	<b>6</b>	29.8 -31.1
>2.0	<b>7</b>	>31.1

Tabla 4.2. Umbrales de temperatura asociados a la exposición térmica causados por las altas temperaturas en base a la figura 4.3. El índice de exposición al calor (HEI) es asignado a cada rango de temperatura.

La tabla 4.2 ha sido construida para intervalos RR de 0.2 (20%). Cada intervalo RR se ha asociado a un índice de exposición al calor (*Heat Exposure Index* - HEI) que incluye el intervalo de temperatura basado en el modelo exponencial para Barcelona (fig 4.4). Desde un valor igual a 1 que representaría las condiciones óptimas, que en el caso de Barcelona estaría entre 18 y 20°C, hasta un valor de 7, para temperaturas superiores a 31.1°C. El valor de HEI=1 se consideró el umbral inferior y en el caso de Barcelona, este valor se supera en los percentiles superiores o iguales a P50. En este estudio se asume que la curva de riesgo relativo (RR) es aplicable en todo el ámbito geoespacial del área a estudio (Achebak et al., 2018).

La figura 4.5 muestra los mapas de distribución del HEI para los diferentes percentiles. Esta reclasificación convierte los mapas de temperatura extrema, o mapas de peligrosidad, en mapas de exposición al calor. Se puede observar cómo el HEI es más bajo en áreas con topografías de mayor altitud y en parques interurbanos. Cuando se supera el P90, el valor de HEI supera el nivel 5 para la mayor parte del tejido urbano de la ciudad, lo que conllevaría un aumento del riesgo relativo de mortalidad del 80%. Obsérvese que el percentil 50 ya muestra un aumento de riesgo relativo de mortalidad respecto a una hipotética situación base de 20°C, del 40%.

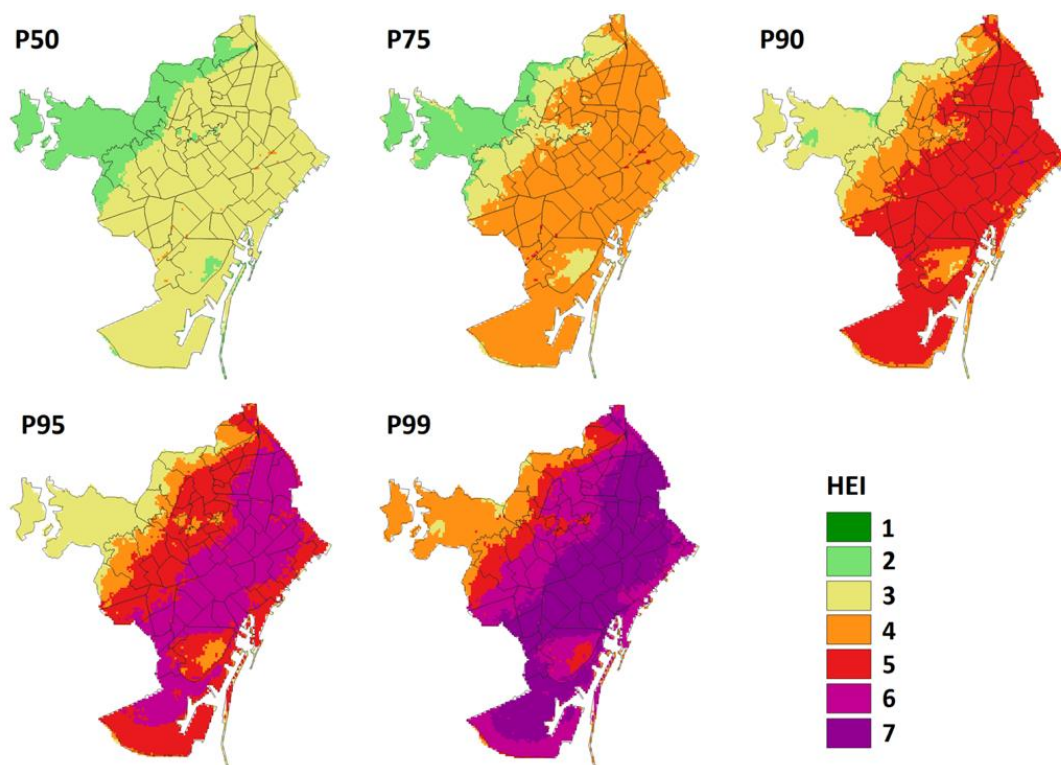


Figura 4.5. Mapas de HEI para las diferentes distribuciones de probabilidad propuestas (P50, P75, P90, P95 y P99) a partir de las salidas de temperatura media del UrbClim.

#### 4.3.2. Caracterización de las LCZ en función del índice de exposición al calor

La figura 4.6 muestra el comportamiento promedio de las LCZ para los diferentes percentiles de temperatura (P50, P75, P90, P95, P99). Los valores correspondientes a la mediana y a los percentiles 25 y 75 de cada LCZ (para cada escenario de probabilidad) resultarán muy útiles para la elaboración de mapas de exposición al calor en función de las propiedades térmicas de la LCZ ya que hemos podido ver que cada LCZ tiene características singulares.

Conocer la distribución de temperatura, para cada categoría LCZ y escenario, nos permite representar el impacto de posibles modificaciones en la morfología urbana, al substituir usos o cubiertas del suelo en el mapa vectorial LCLU-LCZ y extrapolar la LCZ a temperatura o exposición.

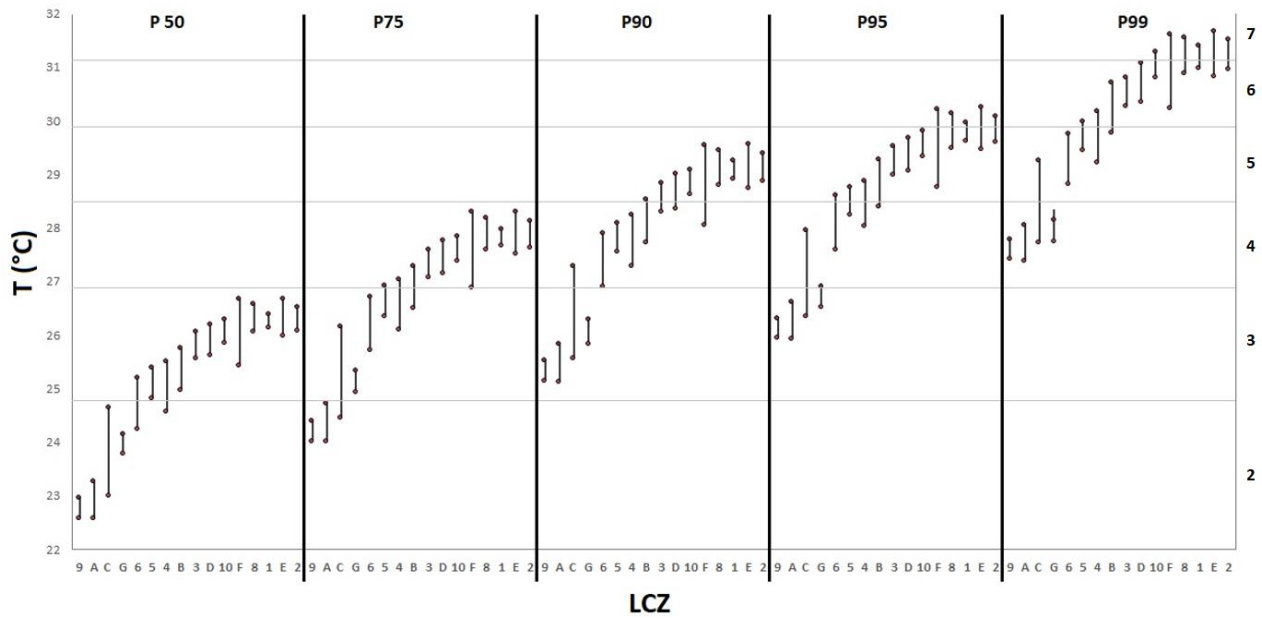


Figura 4.6. Caracterización de cada LCZ en base a la temperatura media diaria (1987-2016) y al valor del HEI para cada escenario de probabilidad. Cada barra incluye la muestra de valores comprendidos entre P25 y P75, alrededor de la mediana para cada LCZ. Las líneas horizontales grises son los diferentes escenarios de HEI (2 a 7).

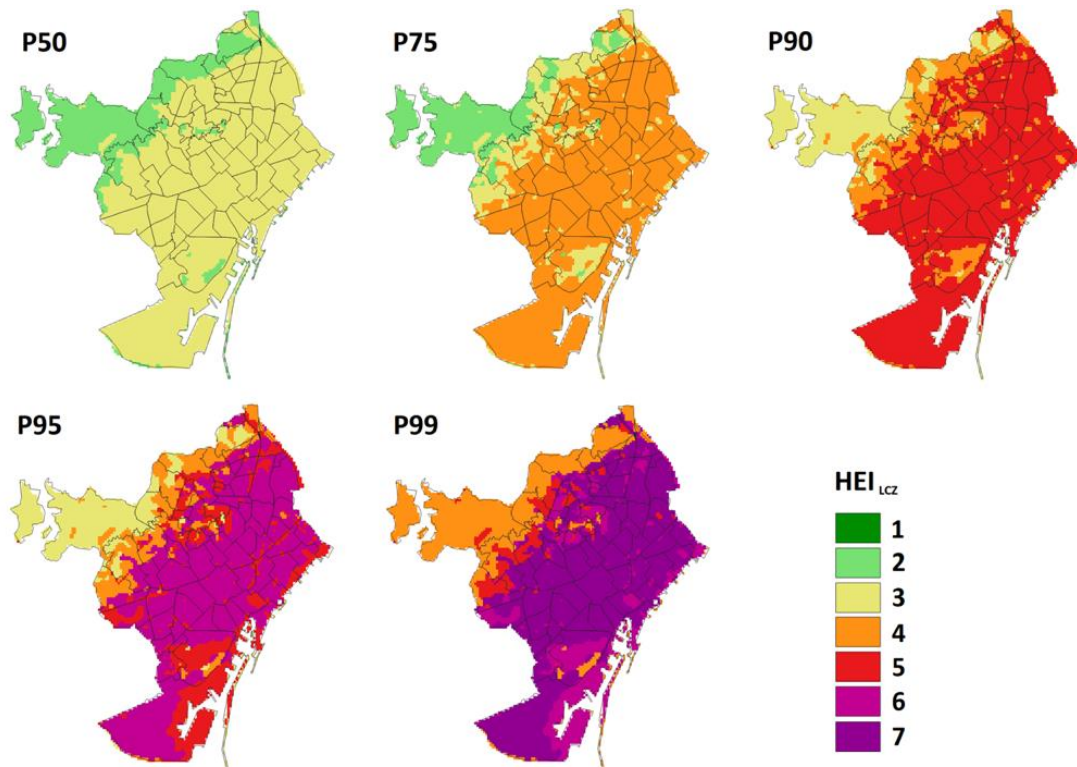


Figura 4.7. Índice de exposición al calor (HEI) en base a la caracterización térmica de las LCZ para diferentes percentiles (LCZ-T) como se muestra en la Tabla 4.2.



Como se ha explicado en los apartados anteriores, se han definido siete rangos de temperatura de acuerdo con diferentes umbrales de riesgo relativo (tabla 4.2.) establecidos por la curva exponencial basada el estudio de Achebak et al. (2018) (fig 4.4.). La caracterización térmica asociada a las diferentes categorías de LCZ permite, tal y como se muestra en la figura 4.6, representar mapas HEI asociados a las altas temperaturas para diferentes escenarios probabilísticos. Se utilizan las LCZ como base, sin necesidad de disponer (otra vez) de salidas de modelos climáticos. En el escenario correspondiente al percentil 75, la temperatura implicaría una relación de aumento del riesgo relativo de mortalidad del 60%. Para el percentil 90 el aumento representaría el 80%.

#### **4.3.3. Comparación de la distribución de temperatura a partir de las LCZ con las temperaturas observadas (evaluación de la relación LCZ-T)**

Los resultados de la relación LCZ-T, así como los resultados del modelo UrbClim, se han comparado con la distribución de temperatura obtenida de series de más de 10 años para cinco estaciones meteorológicas (tabla 2.10 en el capítulo 2 de datos) ubicadas en diferentes LCZ dentro del municipio de Barcelona. Se han analizado diferentes medidas estadísticas de comparación y el RMSE (raíz de error cuadrático medio – *Root Mean Square Error*) (tablas 4.3. y 4.4.). Partiendo de UrbClim como un modelo ya validado para la ciudad de Barcelona en el trabajo de García-Díez et al. (2016), la tabla 4.3 nos muestra como las diferencias y el RMSE, en valor absoluto, son inferiores a 1.5°C, por lo que en el marco de este trabajo se asume como suficientemente óptimo y aplicable. En todos los casos las diferencias son iguales o inferiores a 0.5°C para el percentil de 50, y también para el percentil de 75, con la excepción de la estación del Raval, que se encuentra en la parte más céntrica de la ciudad, en el tejado de la Facultad de Geografía e Historia. También debe tenerse en cuenta que una observación puntual no es lo mismo que una observación areal de 100x100m, y este hecho es particularmente significativo cuando la estación meteorológica está rodeada de edificios.

	<b>DIST</b>	<b>OB</b>	<b>UC</b>	<b>LCZ-T</b>	<b>OB-UC</b>	<b>OB-LM</b>
<b>1-Raval (LCZ 2)</b>	P50	25.6	26.1	26.1	0.5	0.5
	P75	26.8	27.6	27.6	0.8	0.8
	P90	27.8	28.9	28.9	1.1	1.1
	P95	28.5	29.6	29.6	1.1	1.1
	P99	30.2	31.1	30.9	0.9	0.7
<b>2-ZU (LCZ C)</b>	P50	24.5	24.7	24.6	0.2	0.1
	P75	25.8	26.2	26.2	0.4	0.4
	P90	26.6	27.3	27.3	0.7	0.7
	P95	27.2	28.1	27.9	0.9	0.7
	P99	28.5	29.5	29.2	1	0.7
<b>3-Fabra (LCZ A)</b>	P50	23.1	23.1	22.9	0	-0.2
	P75	24.6	24.7	24.3	0.1	-0.3
	P90	25.9	25.8	25.5	-0.1	-0.4
	P95	26.5	26.6	26.2	0.1	-0.3
	P99	27.3	27.5	27.7	0.2	0.4
<b>4-C. Brúixa (LCZ B)</b>	P50	25.2	26.1	25.4	0.9	0.2
	P75	26.8	27.6	26.9	0.8	0.1
	P90	27.9	28.9	28.1	1	0.2
	P95	28.6	29.6	28.8	1	0.2
	P99	30	30.9	30.2	0.9	0.2
<b>5-Montjuïc (LCZ B)</b>	P50	24.8	25.2	25.0	0.4	0.2
	P75	26.3	26.8	26.5	0.5	0.2
	P90	27.3	28	27.7	0.7	0.4
	P95	27.8	28.6	28.4	0.8	0.6
	P99	29.1	30.1	29.8	1	0.7

Tabla 4.3. Temperatura para cada percentil y estación meteorológica observada (OB), modelada por UrbClim (UC) y estimada a partir de la distribución de temperatura (se toma el valor de la mediana) para cada LCZ. La diferencia entre ellos también se muestra. Todos los valores están expresados en grados centígrados (°C).

<b>Relación LCZ-T</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>	<b>P90</b>	<b>P95</b>	<b>P99</b>
<b>Subestima</b>	284	671	1711	2789	2289
<b>Buena relación</b>	9687	8762	8175	6316	6823
<b>Sobreestima</b>	247	785	332	1103	1106
<b>% correcto</b>	95	86	80	62	67
<b>RMSE</b>	0.23	0.38	0.45	0.62	0.58

Tabla 4.4. Número de píxeles donde el HEI obtenido a través del modelo LCZ-T (Figura 4.6.) subestima, sobreestima o coincide con la HEI proporcionada por el UrbClim (Figura 4.4.) para los diferentes escenarios. El porcentaje de coincidencias y RMSE también se muestran.

En segundo lugar, se hace una comparación entre las cartografías de HEI construidas directamente a partir de las temperaturas proporcionadas por las salidas del modelo UrbClim (fig 4.5) y las construidas tomando la mediana de la distribución de temperaturas para cada tipo de LCZ (relación LCZ-T) y presentadas en la figura 4.7. Los resultados son óptimos ya que las concordancias entre píxeles son superiores al 80% para los percentiles P50, P75 y P90, y superiores al 60% en todos los casos (tabla 4.4).

#### 4.4. Elaboración de cartografía de vulnerabilidad frente temperaturas extremas

Para obtener niveles reales de vulnerabilidad, es necesario tener en cuenta la vulnerabilidad de la población a las altas temperaturas. Para ello, se ha definido un Índice de Población Vulnerable al Calor (*Climate Vulnerable People Index* - CVPI), que tiene en cuenta la proporción de la población mayor de 64 años y menor de 2 años. Estos dos grupos de edad fueron elegidos como los sectores de la población más vulnerables al calor. El CVPI se define en la ecuación (2) y se basó en el índice de envejecimiento clásico, siendo  $P_x$  la población afectada según el subíndice establecido (edad).

$$CVPI = \frac{P_{>64} + P_{<2}}{P_{total}} \cdot 100 \quad (2)$$

La figura 4.8 muestra que los valores más altos de CVPI se sitúan en los barrios periféricos. Aun así, Barcelona es una ciudad con cifras de población de envejecimiento que se sitúan entre moderado y alto en comparación con otras ciudades. Las zonas con valores CVPI más bajos coinciden con los barrios cercanos al mar.

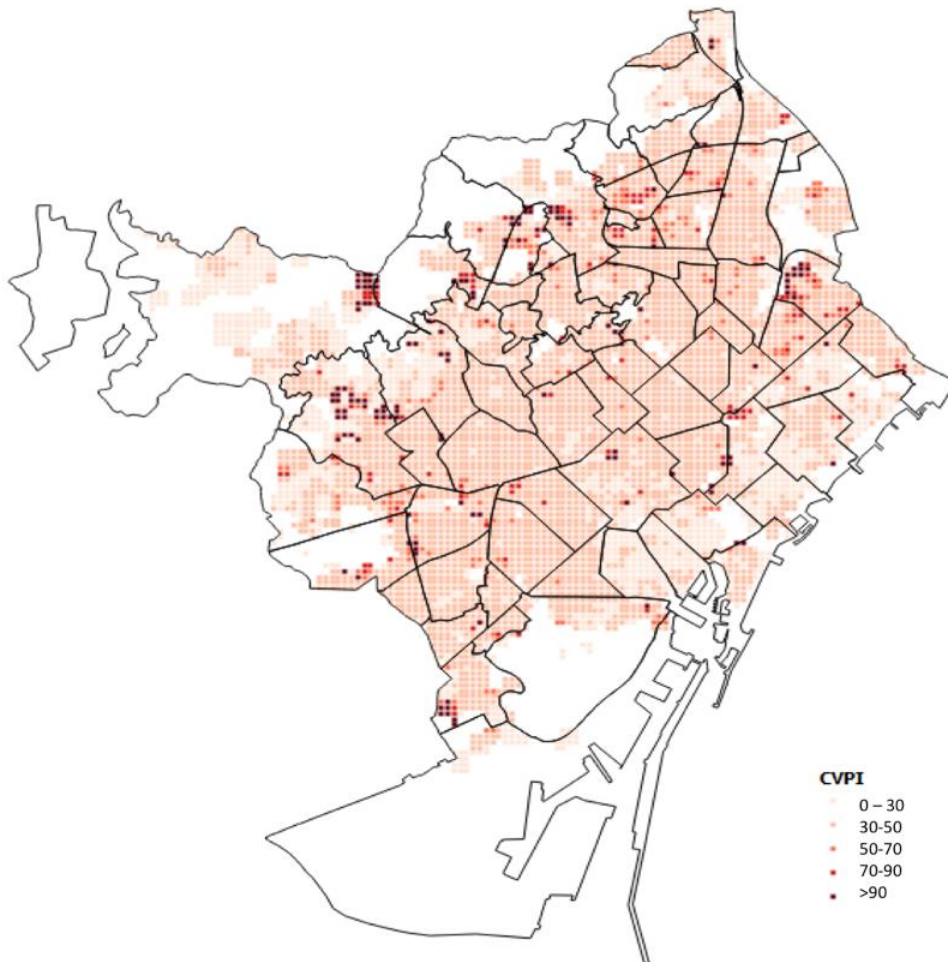


Figura 4.8. Índice CVPI en Barcelona, las líneas negras nos delimitan los barrios.

Este índice se integró con las coberturas HEI (fig 4.6), teniendo en cuenta que las zonas consideradas como población vulnerable ( $CVPI > 70$ ) serían aquellas en las que más del 70% de la población se encuentra dentro de grupo de riesgo. A partir de esta premisa, se ha creado el Índice de Vulnerabilidad al Calor, (*Heat Vulnerability Index*, HVI), (ecuación 3) que integra la exposición al calor y la sensibilidad mediante una simple normalización del CVPI (NCVPI) en base a 1. En este caso los valores de HVI se corresponderían a los propuestos anteriormente con el HEI, pero en este caso al sumar un valor 1 dependiendo de NCVPI, el HVI incrementaría en una categoría más, debido a los efectos integrados relacionados con la población sensible (ver ecuación 3).

Para complementar la visión o distribución geoespacial, se han señalado sobre el mapa (fig 4.9) los barrios con renta familiar per cápita más bajos ( $< 36.6$  miles €, considerados bajos según el IDESCAT en el año 2015) y por lo tanto las regiones consideradas más empobrecidos de la

ciudad. Ello nos permitirá tener una visión desde un enfoque conocido como justicia climática. Este se centra en los impactos y la experiencia local, las vulnerabilidades no equitativas y a la importancia de la comunidad en cuanto a su funcionalidad y demanda, en este caso, enfocada al efecto que el clima tiene sobre una región heterogénea (Schlosberg et al., 2014). En la figura 4.9 se integran parámetros socioeconómicos con los parámetros físicos de exposición y esto nos permite ubicar las áreas más vulnerables y desiguales (*hotspots*).

$$\text{HVI} = \text{HEI} [1 - 7] + \text{NCVPI} \begin{cases} = 0 & \text{CVPI} < 70\% \\ = 1 & \text{CVPI} \geq 70\% \end{cases} \quad (3)$$

También se han integrado los límites administrativos (unidad barrio) con el valor de renta familiar per cápita más bajo. Observamos que, en Barcelona, las áreas con mayor vulnerabilidad se encuentran en los barrios situados al noreste de la ciudad, cerca de la cuenca del río Besós, con una población bastante mayor y una renta familiar per cápita muy baja. Un poder adquisitivo bajo, dificulta la capacidad de implementar acciones resilientes o medidas de adaptación, como desplazamiento a segundas residencias, uso del aire acondicionado, entre otras. Además, por lo general, estas zonas también están relacionadas con viviendas de baja calidad en términos de eficiencia energética o densidad de personas por unidad habitacional. Desde un punto de vista urbanístico, estas superficies disponen de una menor cobertura de superficies verdes, y consecuentemente de enfriamiento de las temperaturas o “refugio” climático.

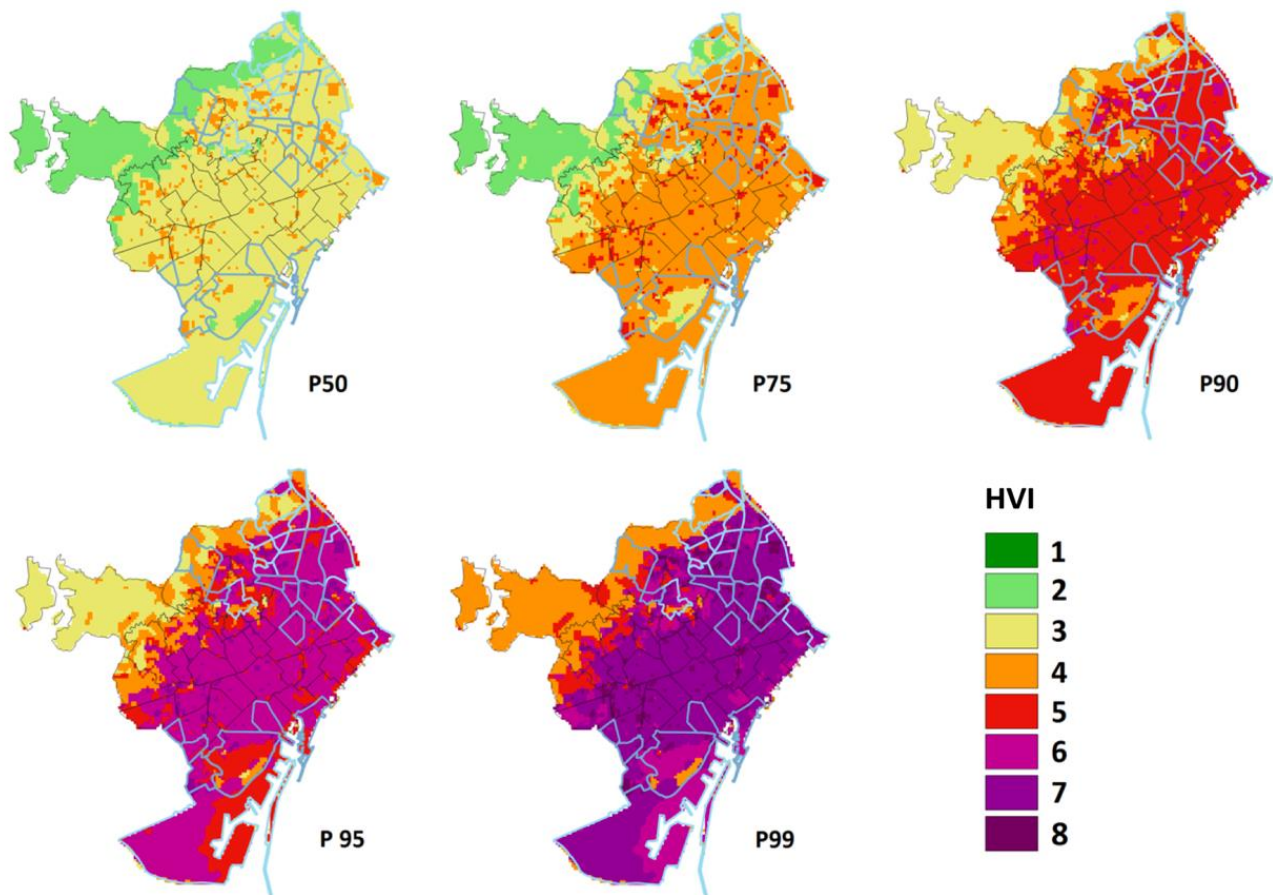


Figura 4.9. Mapa de vulnerabilidad climática (HVI); Integración del NCVPI y la renda familiar per cápita (polígonos remarcados en azul).

Para los escenarios con una temperatura media diaria superior al percentil 90 ( $> 28.5^{\circ}\text{C}$ ), el riesgo relativo (RR) de mortalidad es superior a 1.8 para toda la ciudad a excepción de la parte colindante al Parque Natural de Collserola, con poblaciones menos densas y con un poder adquisitivo más elevado.

#### 4.5. Evaluación de la exposición y vulnerabilidad frente temperaturas extremas en ecosistemas urbanos en escenarios futuros

En este apartado hemos trabajado con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (fig 4.10), aplicando la misma metodología para las salidas del modelo UrbClim. El RCP 4.5 consiste en un escenario de estabilización en el que el forzamiento radiativo total se estabiliza poco después de 2100, sin exceder el nivel objetivo de forzamiento radiativo a largo plazo pactado en los acuerdos

de Paris (Smith y Wigley 2006; Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009). Pertenece a una de las vías más optimistas y supone que las emisiones de gases de efecto invernadero se estabilizarán alrededor del 2040 y luego disminuirán al cabo de algunas décadas. Los autores afirman que si el planeta mantiene las emisiones a RCP 4.5, con toda seguridad nos mantendremos por debajo de un aumento de 2°C de calentamiento global.

El escenario RCP 8.5 se caracteriza, en cambio, por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo, representativo de escenarios descritos en la literatura científica que conducen a altos niveles de concentración de éstos (Riahi et al., 2007).

Las simulaciones llevadas a cabo se han basado en aplicar un *downscaling* estadístico de todos los datos del modelo climático global (CMIP5) y de los modelos climáticos regionales (EURO-CORDEX) disponibles. Se ha establecido un control de calidad y se ha utilizado un conjunto o *ensemble* de datos. Así mismo se ha corregido la perturbación de las series de tiempo históricas según el método *quantile delta perturbation*, un método que permite corregir los sesgos sistemáticos en múltiples cuantiles de la distribución de las salidas de las simulaciones.

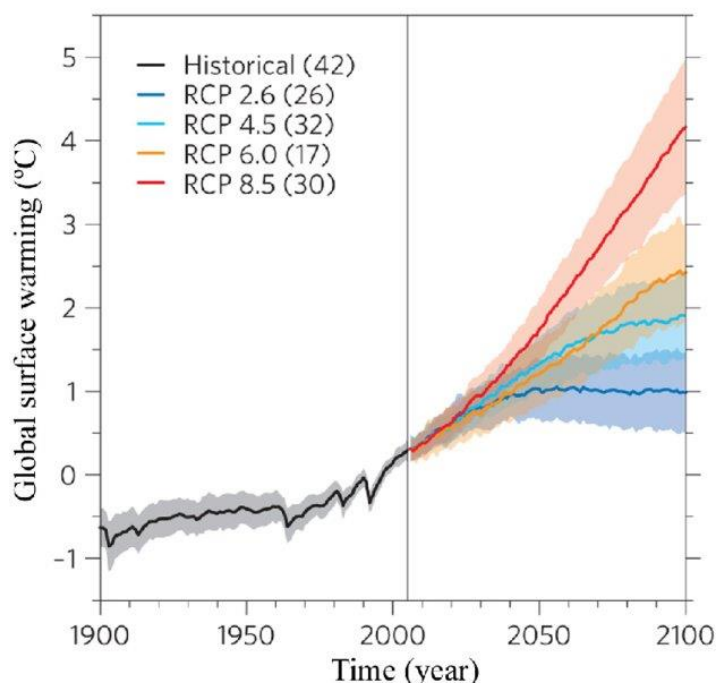


Figura 4.10. Aumento de la temperatura global utilizado en el IPCC-AR5 presentado por los modelos RCP. Los valores entre paréntesis representan el número de modelos climáticos globales de cada simulación (Knutti y Sedláček, 2013)

Una vez obtenidos los datos simulados a una resolución diaria para todos los períodos climáticos, en este estudio se ha seleccionado el período climático 2071-2100, obteniendo al mismo tiempo las distribuciones P50, P75, P90, P95 y P99, igual que en el apartado anterior. Se ha escogido el período climático 2071-2100 por ser donde las diferencias de los registros de las temperaturas y su potencial distribución espacial puede resultar más marcada y favorecer así el análisis comparativo con el período de referencia. El objetivo de este trabajo de tesis se centra fundamentalmente en el ámbito de la teledetección y la caracterización geoespacial de las LCZ y en menor medida a realizar un análisis en profundidad de la modelización climática que se acepta como correcta a partir de las publicaciones de García-Diez et al. (2016) o Ingole et al. (2020).

#### **4.5.1. Cartografía de la exposición de Barcelona para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 durante el período 2071-2100**

El Tercer Informe sobre el Cambio Climático Cataluña, en el que se han considerado entre otras las salidas del modelo EuroCORDEX, muestra un aumento de temperatura anual de 1,4°C (con una variabilidad comprendida entre 0,9°C y 2°C) en la región litoral, en la que se ubica Barcelona, para el período 2031-2050 en comparación con el período 1970-2000 (Calbó et al, 2016). Es muy probable, como se verá más adelante, que en el caso de Barcelona, este aumento sea superior. Por otro lado, un aumento de más de 1°C implicaría un aumento mínimo de un factor 1 en el índice HEI.

En las figuras 4.11 y 4.12, se muestran los mapas de distribución HEI según los umbrales propuestos en el apartado anterior para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 en el período 2071-2100.

La reclasificación (ver apartado 4.3.1) consiste en convertir los mapas de temperatura extrema o mapas de peligrosidad en mapas de exposición al calor. Como hipótesis de partida consideramos que las medidas actuales de adaptación no se alteran (*business as usual*). Esto significa que tanto las medidas de alerta temprana, las medidas de mitigación o adaptación y la componente de salud no varían y se mantienen constantes (a la vez que se mantiene constante la morfología de la ciudad, ya que en el modelo UrbClim las simulaciones se han hecho con los mismos inputs urbanos). Como apunte relacionado, en el capítulo 5 se modelizará una ola de calor



y en este caso se aplicarán medidas de adaptación y mitigación donde se modificará la morfología urbana a través de las LCZ para ver sus efectos.

Partiendo de esta premisa, observamos como el HEI es menor en áreas con topografías de mayor altitud o en parques interurbanos, tal y como también se ha observado para el período de referencia o reciente.

En la distribución P90 y para el escenario RCP 4.5, el valor de HEI supera el nivel 6 para la mayor parte del tejido urbano de la ciudad y para el RCP 8.5 a partir del P75 se supera el nivel 6 que está asociado a un  $RR=2$ , lo que comporta que el riesgo relativo de mortalidad es un 100% superior en comparación al RR óptimo de temperatura media diaria que se encuentra entre los 18 y 20°C.

Observamos un patrón geoespacial similar si comparamos los mapas RCP 4.5 y RCP 8.5, aunque existen diferencias; en concreto en la transición entre HEI 4 y 5 en el P75 del RCP 4.5 i el P50 del RCP 8.5. La distribución de la mediana del escenario RCP 8.5, asociada a la distribución considerada la más frecuente, se asemeja a la distribución P75 del escenario RCP 4.5. El patrón se repite; la distribución P90 del RCP 4.5 se asemejará a la distribución P75 en el RCP 8.5. Coincidiendo la distribución más extrema del escenario RCP 4.5 con la P95 del escenario RCP 8.5.

En las distribuciones asociadas a situaciones de olas de calor, consideradas las distribuciones P95 y P99, observamos que el índice HEI de valor 7 es el mayoritario y cubre prácticamente toda la ciudad.

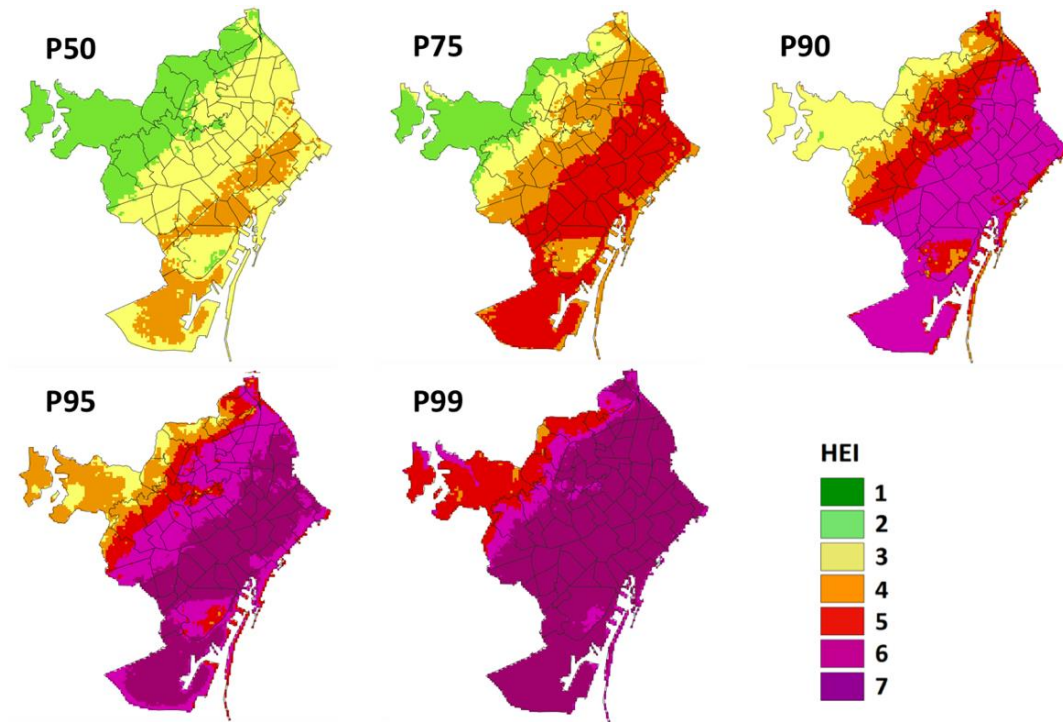


Figura 4.11. Mapas de HEI para las diferentes distribuciones de probabilidad propuestas (P50, P75, P90, P95 y P99) en el escenario RCP 4.5 y periodo 2071-2100.

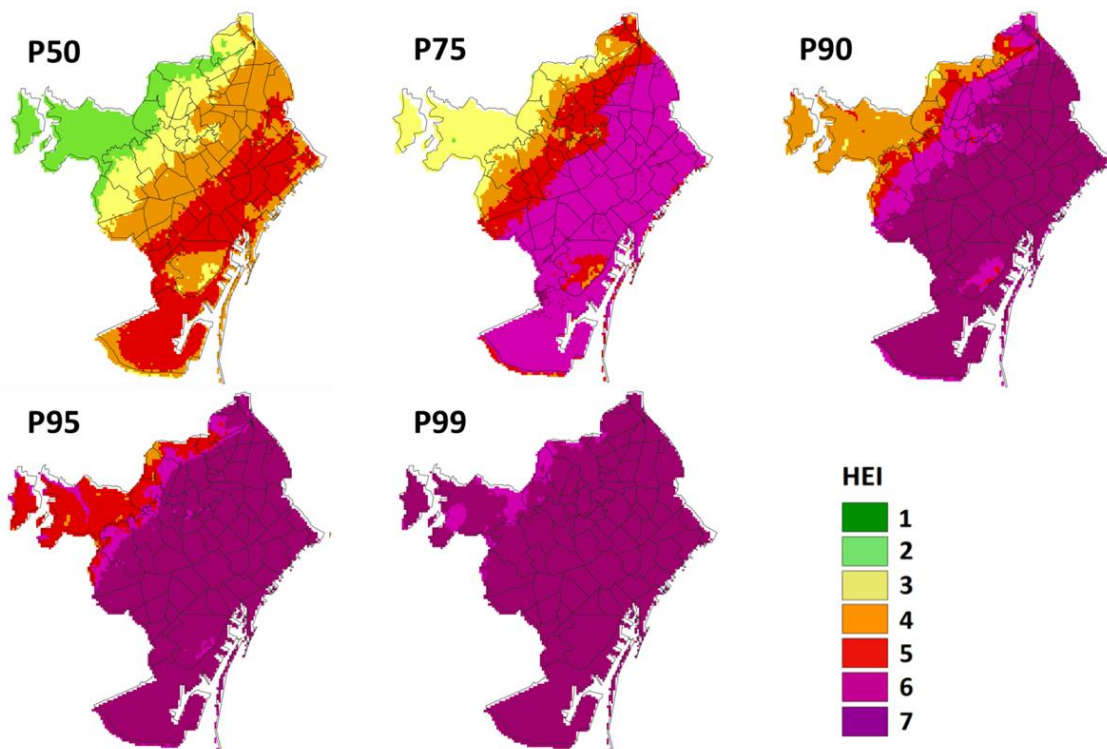


Figura 4.12. Mapas de HEI para las diferentes distribuciones de probabilidad propuestas (P50, P75, P90, P95 y P99) en el escenario RCP 8.5 y periodo 2071-2100).

#### 4.5.2. Análisis de las LCZ en la distribución geoespacial de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran como las LCZ E, 2, 1, 8 y 10 son las que registran valores de temperatura más elevados. En este sentido, observamos que la caracterización o respuesta térmica de cada LCZ ha experimentado algún cambio con respecto a los resultados obtenidos para el período observado o presente (1987-2015). Es interesante destacar que las dos LCZ que describen temperaturas más elevadas coinciden con las LCZ 2 y 10 referidas a actividades industriales. Esta apreciación tiene su coherencia, sobre todo en el caso del RCP 8.5, dónde las emisiones y los procesos industriales se aceleran. Las tipologías LCZ 2 y 1 que cubren la mayor parte del entramado urbano de la ciudad son las categorías urbanas residenciales que experimentan mayor retención de calor, lo que también se destaca en el período observado. Las temperaturas de las cinco categorías que retienen más temperatura oscilan entre los 26°C en la distribución P50 y más de 31°C para el P99 en el escenario RCP 4.5. Para el RCP 8.5, la temperatura registra más de 27°C para la distribución P50 y más de 34°C para el P99. Las LCZ que registran temperaturas más elevadas coinciden, en términos generales, con las categorías con una alta admitancia, baja permeabilidad y mayor generación de calor antropogénico (Stewart y Oke, 2012). En contraposición, las temperaturas más bajas corresponden a las LCZ 9, A, C, 6 y 5, descritas como superficies boscosas o arbustivas y parques situados a las afueras de la ciudad o categorías basadas en casas dispersas o muy dispersas con un alto grado de vegetación a su alrededor. En nuestra área de estudio se corresponde a zonas situadas en la parte alta de la ciudad donde además el gradiente altitudinal también ayuda a que la temperatura disminuya. Por otro lado, los cultivos y la tierra desnuda muestran un comportamiento muy variable, ya que durante el día tienden a ser superficies que almacenan y retienen mucho el calor. Durante la noche, en cambio, su comportamiento registra temperaturas por debajo del promedio de la muestra y es por ello que hay más dispersión y el rango entre percentiles es mayor. Este hecho también se ha observado en los resultados para el período observado y para el estudio preliminar mostrado en el capítulo 3.

Las distribuciones y la caracterización de las temperaturas para ambos RCP's son semejantes. La diferencia se basa en que el RCP 8.5 registra temperaturas mayores que el RCP 4.5, del orden de 2-3°C de temperatura, siendo la diferencia menor en los percentiles más elevados. En las figuras 4.13 y 4.14 se observa que para el P95 del escenario RCP4.5 y para el P90 del

escenario RCP 8.5, todas las categorías de LCZ se corresponden con un aumento del riesgo de mortalidad del 60%. En el RCP 8.5, el riesgo de mortalidad para el percentil 50, es decir, la situación media, aumenta en un 40% con excepción de las superficies arbóreas 9 y A.

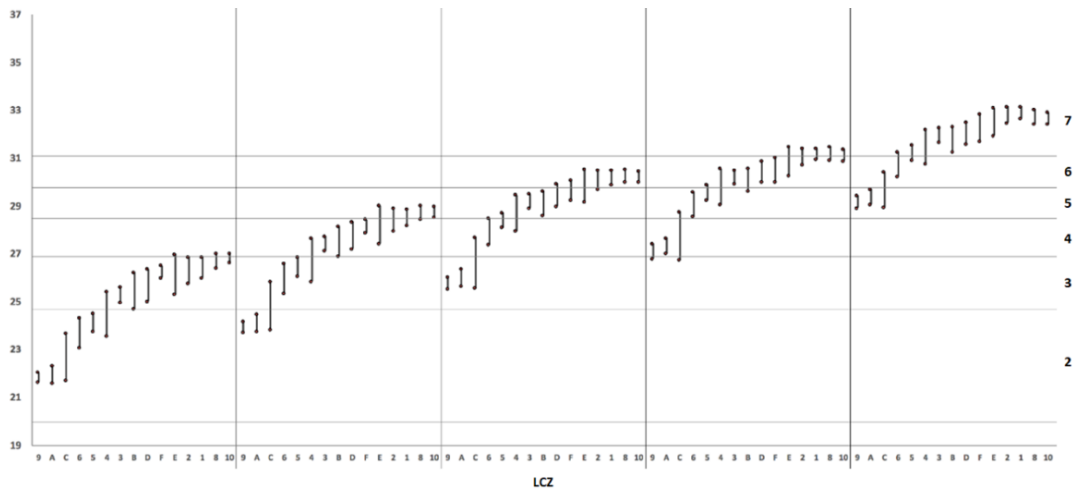


Figura 4.13. Caracterización de cada LCZ en base a la temperatura media diaria (2071-2100) para cada distribución de probabilidad y para el escenario RCP 4.5. Las columnas con las diecisiete distribuciones se corresponden con los percentiles 50, 75, 90, 95 y 99, respectivamente. Las líneas de cada categoría de LCZ muestran la distribución de temperaturas comprendidas entre P25 y P75, alrededor de la mediana. Las líneas horizontales grises son los diferentes escenarios de HEI (2 a 7).

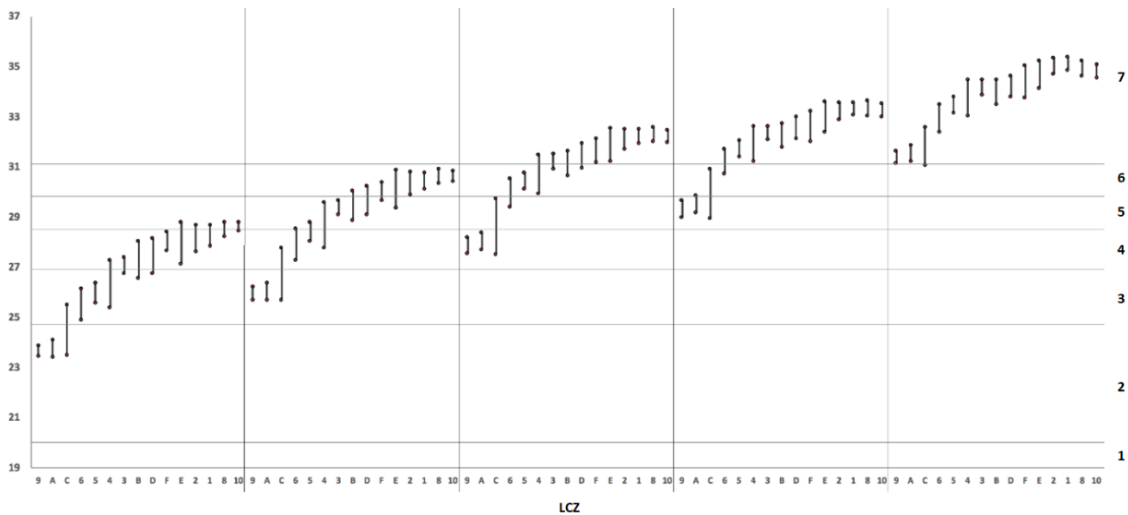


Figura 4.14. Caracterización de cada LCZ en base a la temperatura media diaria (2071-2100) para cada distribución de probabilidad y para el escenario RCP 8.5. Las columnas con las diecisiete distribuciones se corresponden con los percentiles 50, 75, 90, 95 y 99, respectivamente. Las líneas de cada categoría de LCZ muestran la distribución de las temperaturas comprendidas entre muestra P25 y P75, alrededor de la mediana para cada LCZ. Las líneas horizontales grises son los diferentes escenarios de HEI (2 a 7).

Finalmente se han obtenido los mapas basados en la caracterización o comportamiento térmico de las LCZ tal y como se ha procedido en el escenario observado. Generar esta cartografía resulta de gran utilidad si queremos analizar los cambios que puede conllevar una planificación urbana en diferentes zonas y minimizar los efectos de exposición al calor. De esta forma se hace factible, utilizando el mapa de LCZ - LCLU vectorial, hacer un mapa de exposición al calor de alta resolución. Para gradientes altitudinales más elevados y situados fuera del centro de la ciudad las temperaturas (por LCZ) seleccionadas corresponderían a las situadas en el percentil 25 (de las figuras de caracterización 4.12 y 4.13) mientras que para las temperaturas más céntricas y más afectadas por la UHI se seleccionarían temperaturas (por LCZ) situadas en el P75, y para el resto las temperaturas situadas en el percentil 50. Gracias a esta caracterización podemos obtener una herramienta que represente mapas de alta resolución que nos ayudarían a diseñar una ciudad más resiliente con una menor exposición al calor.

Como podemos observar en las siguientes figuras 4.15 y 4.16 que relacionan las LCZ-T con el HEI, los resultados son muy parecidos a las salidas del modelo. Cabe destacar que en el RCP 8.5 la distribución más extrema abarcaría toda la ciudad con un HEI=7, superando en todo el municipio temperaturas medias diarias superiores a los 31°C, esta situación conllevaría a noches tórridas con temperaturas superiores a los 25°C en todas las LCZ de la ciudad. Es durante la noche cuando el nivel de estrés térmico es más elevado y más peligroso en términos de patologías cardiovasculares y respiratorias. Para las distribuciones de probabilidad más extremas, el riesgo de mortalidad debido a las temperaturas extremas estaría registrando un aumento del 100%, lo que significaría que sin tener en cuenta medidas de adaptación y mitigación el número de fallecidos asociados a altas temperaturas se podría duplicar.

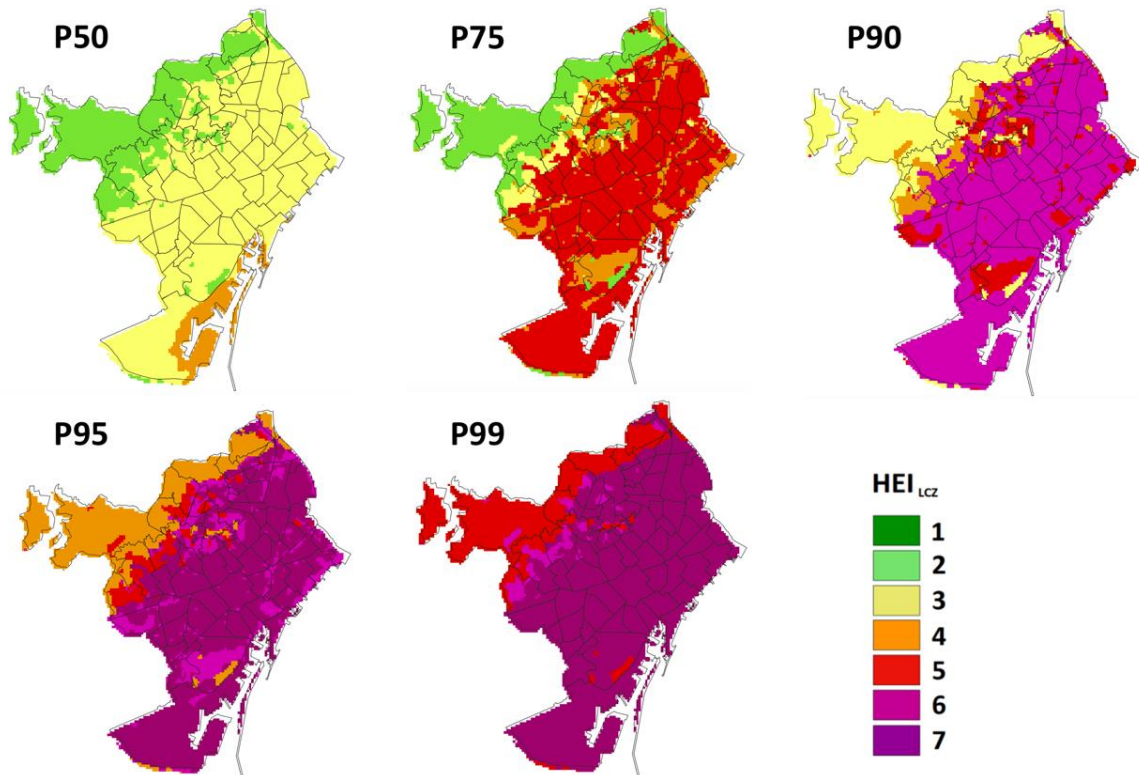


Figura 4.15. Índice de exposición al calor (HEI) en base a la caracterización térmica de las LCZ para diferentes percentiles (LCZ-T) para el escenario RCP 4.5.

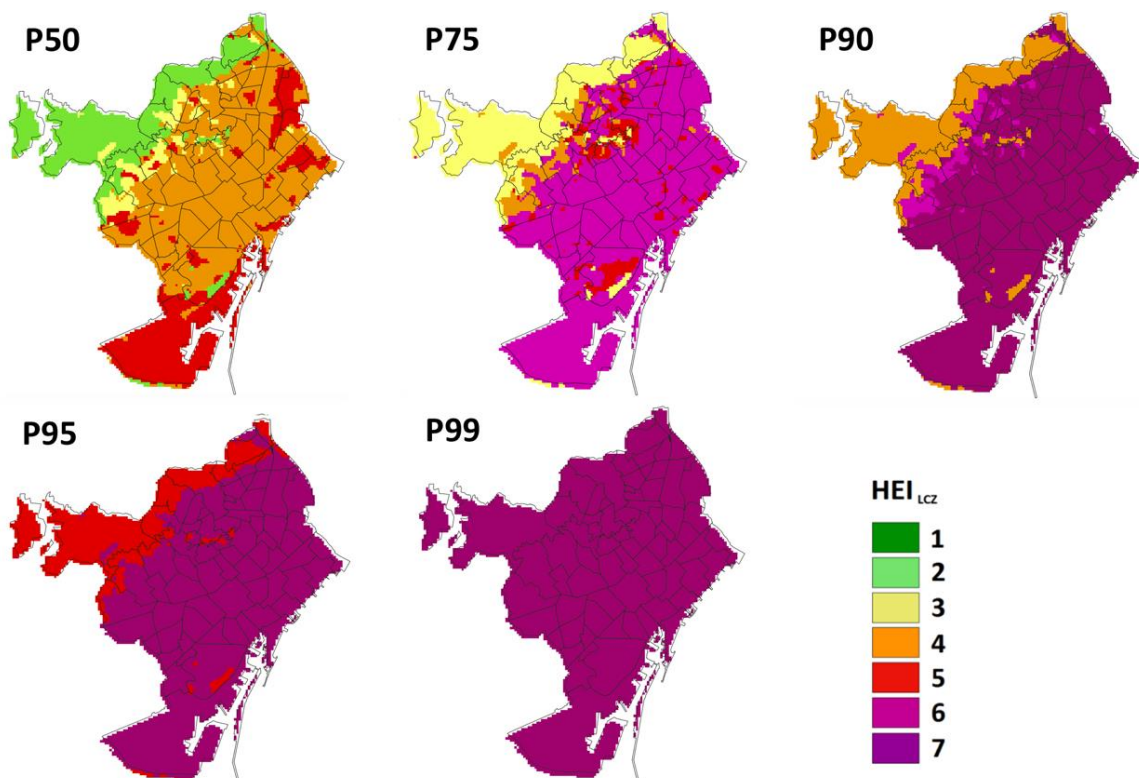


Figura 4.16. Índice de exposición al calor (HEI) en base a la caracterización térmica de las LCZ para diferentes percentiles (LCZ-T) para el escenario RCP 8.5.

Si comparamos dichos mapas con el mapa de la figura 4.7 referente al período 1987-2015, observamos que el índice de exposición se mantiene un punto o dos por debajo que los mapas referentes al RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. En este sentido las distribuciones P90 y P95 del período de referencia se asemejan a las distribuciones P75 y P90 en el escenario RCP4.5 y el P50 y el P75 del RCP 8.5. Por ejemplo, el P99 del período observado, atribuida a un episodio consolidado de ola de calor, sería una distribución de P75 en el escenario RCP8.5, lo que nos informa del incremento de olas de calor en este período futuro y este escenario concreto.

Para las distribuciones referentes a la mediana P50, el RCP 4.5 se asemejan al P50 1987-2015, aunque hay alguna superficie con HEI=4 que implica un RR de mortalidad del 60% superior al RR óptimo 1. En el caso del RCP 8.5, la distribución P50 perteneciente a la más frecuente implica que el RR es superior al 60% o incluso al 80% con respecto al valor de RR óptimo o de menos riesgo relativo.

Podemos observar como el nivel de exposición HEI se eleva en 1 o 2 puntos con respecto al caso observado (1987-2015). Estamos hablando de diferencias de temperatura que pueden superar hasta los 1.5°C en el escenario RCP 4.5 o los 3.5°C en el escenario RCP 8.5 (fig 4.17), estos valores transformados en exposición pueden llegar a comportar cambios muy significativos en el aumento del riesgo de mortalidad, ya que el modelo en que se basan los umbrales es exponencial.

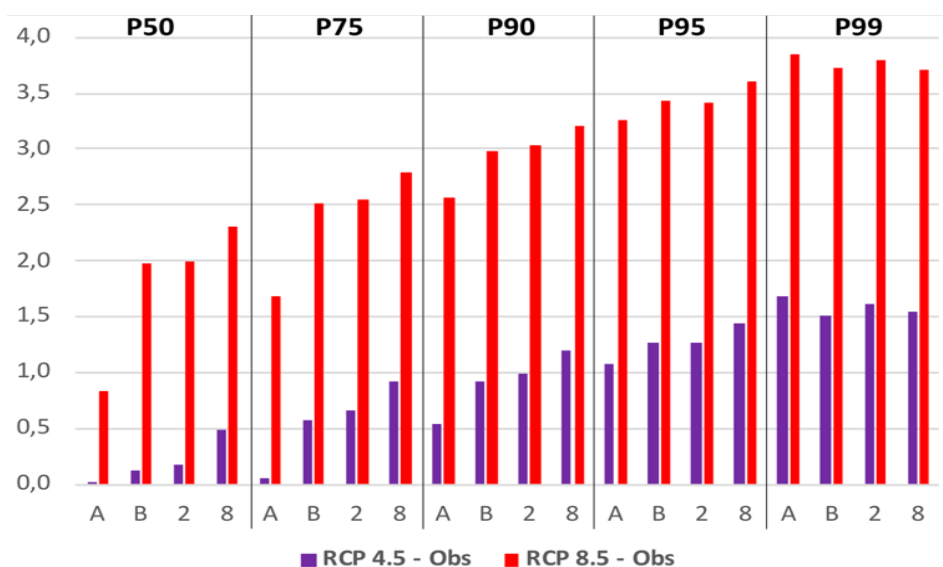


Figura 4.17. Diferencia de temperatura para las categorías A (bosque/parque), B (parque urbano), 2 (edificios residenciales más representativos en Barcelona), 8 (polígonos industriales) entre los escenarios (2071-2100) y el período de referencia (1987-2015) para las diferentes distribuciones.



## 4.6. Conclusiones

A lo largo de este capítulo, se ha propuesto una metodología para caracterizar la distribución de la temperatura media diaria para las diferentes LCZ en diferentes escenarios. Esta caracterización se ha realizado para los meses de verano (JJA) y se han obtenido los percentiles climáticos para el período 1987-2016 a una resolución espacial de 100m en la ciudad de Barcelona. Se ha hecho lo mismo para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y para el período 2071-2100.

Aunque otros autores ya han trabajado estableciendo relaciones entre el comportamiento térmico y los usos y cubiertas del suelo (Stewart et al., 2014; Skarbit et al., 2015; Geletič et al., 2016; Verdonck et al., 2018), generalmente se han aplicado sobre imágenes de satélite tal y como se ha analizado y documentado en el capítulo 3. El análisis del comportamiento térmico de las LCZ, usando estaciones meteorológicas también lo encontramos en los trabajos de Alexander y Mills (2014) y Kotharkar y Bagade (2018). Dichos autores, han trabajado con series climáticas puntuales. La ventaja de la metodología propuesta en este capítulo es que la caracterización de las LCZ se ha hecho en base a las salidas de un modelo climático para un período climático de 29 años y para todo el tejido de la ciudad y también para los últimos 30 años de finales de siglo. Cabe destacar que también existen estudios que caracterizan las LCZ utilizando resultados de modelos meteorológicos urbanos (Beck et al., 2018; Geletič et al., 2018; Unger et al., 2018; Kwok et al., 2019; Aminipouri et al., 2019), pero pocos de ellos lo hacen con salidas climáticas que abarcan un período temporal muy largo.

En términos de usos y cubiertas del suelo, las LCZ A y C, que pertenecen a las categorías más representativas en cuanto a ocupación espacial, muestran las temperaturas más bajas, de acuerdo con la mayoría de los estudios realizados (por ejemplo, Geletič et al., 2016). En nuestro caso, la categoría C muestra un rango intercuartil más amplio que los otros tipos. Esto se debe a que esta categoría se encuentra en diferentes altitudes a lo largo de la Cordillera Costera Catalana y en áreas con diferentes orientaciones respecto al sol. En cuanto a la categoría B, atribuida a la mayoría de los parques interurbanos, mantiene temperaturas inferiores a las de las zonas urbanas circundantes.



Las temperaturas medias diarias más elevadas del verano en Barcelona se concentran a lo largo de las LCZ 2, E, 1, 8 E y 10, siendo las categorías 2, 1 y E las más representativas en la cobertura urbana del centro de la ciudad. Con respecto a LCZ 8 y 10, estas son zonas que tienden a registrar altas temperaturas debido a la naturaleza de las actividades y materiales en sus cubiertas (en la mayoría de los casos, estructuras metálicas). La LCZ urbana con las temperaturas más bajas es la 9, poco representativa dentro del municipio de Barcelona y que a su vez se encuentra principalmente en zonas de la Cordillera Costera catalana y por lo tanto el nivel altitudinal también se debe considerar. La LCZ 6 presenta también bajas temperaturas, aunque en extensión son inferiores a las superficies más densas. La LCZ 6 se encuentra principalmente en los barrios más alejados de la costa y más cerca de la montaña. Estos barrios tienen un mayor porcentaje de cobertura verde urbana, edificios menos densos y una renta familiar per cápita más alta. Las diferencias pueden llegar a superar los 5°C entre las zonas peri urbanas naturales y las zonas urbanas más expuestas. Entre categorías urbanas observamos que desde una perspectiva climática las diferencias entre áreas densas y menos densas llegan a los 2°C de diferencia.

En este capítulo hemos introducido el Índice de Exposición al Calor (HEI), que evalúa el aumento del riesgo de mortalidad como consecuencia de la exposición al calor en base al modelo propuesto por Achebak et al. (2018) que nos relaciona la mortalidad causada por la insuficiencia cardiorrespiratoria con los efectos de las altas temperaturas. Este índice, se ha asociado a cada LCZ a partir de la correlación que hemos establecido entre LCZ y comportamiento climático, lo que nos permite mapear la exposición reclasificando los valores de temperatura media en base al modelo exponencial señalado. La comparación, entre los mapas HEI elaborados directamente a partir de los resultados de temperatura producidos por el modelo UrbClim y los producidos a partir de la cartografía LCZ, muestra una correcta concordancia para simular los escenarios de los distintos percentiles de temperatura. Observamos que el modelo explica aproximadamente el 90% de la exposición al calor frente temperaturas elevadas para las distribuciones P50, P75 y P90 y es menos preciso para los percentiles P95 y P99, explicando más del 60%. El modelo puede llegar a sobreestimar alrededor de 1°C para las distribuciones consideradas extremas. Para los percentiles P50, P75 y P90 el valor es inferior a 0.5°C.

Finalmente, se le ha acoplado el Índice de Población Vulnerable al Clima (CVPI) que nos facilita la detección de las zonas con población más sensible al efecto de las altas temperaturas. Al mismo tiempo se han destacado los barrios con una renta familiar per cápita baja o muy baja. De esta forma se han acoplado ambas variables obteniendo un mapa de vulnerabilidad (HVI) con una resolución de 100m dónde se pueden observar las zonas más endebles clasificadas como *hotspots*.

En conclusión, este modelo basado en la caracterización de la temperatura promedio para cada LCZ, nos permite modelizar escenarios de usos y cubiertas urbanas y analizar su efecto, permitiendo así una planificación urbana más sostenible. La ventaja de la metodología propuesta es que permite obtener una distribución de exposición al calor para las temperaturas de aplicando el modelo de distribución de temperatura asociado a cada LCZ (LCZ-T). También resulta útil para realizar cambios en los usos y cubiertas del suelo sobre la cartografía y, en consecuencia, observar los cambios en la exposición al calor asociada, siendo una herramienta potencial para la estima de soporte de decisión urbanística. Otra posibilidad es poder separar los niveles de exposición al calor en un mapa LCZ con resoluciones espaciales más elevadas que el propio modelo utilizado, aplicando un *downscaling* o desagregación espacial mediante la relación LCZ-T.

Para los escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5 se ha aplicado la misma metodología que para el caso 1987-2015. Como hipótesis de partida se ha considerado que las medidas actuales de adaptación no se alteran (*business as usual*), esto significa que tanto las medidas de alerta temprana, las medidas de mitigación y la componente de salud no varían y se mantienen constantes igual que la planificación urbana. Partiendo de esta premisa se ha podido aplicar la misma metodología para poder realizar mapas de exposición basados en el modelo de riesgo relativo de mortalidad. De esta manera se han comparado los mapas de exposición frente a temperaturas extremas entre el período actual y el período climático referente a finales de este siglo (2071-2100). Se ha escogido este período donde las diferencias de los registros de las temperaturas y su potencial distribución espacial puede resultar más marcada y favorecer así el análisis comparativo con el período de referencia.

Se ha observado que el HEI es menor en áreas con topografías de mayor altitud o en parques interurbanos, tal y como también se ha destacado en el período de referencia o observado. También

se puede ver un patrón geoespacial similar si comparamos los mapas RCP 4.5 y RCP 8.5. Las distribuciones y la caracterización de las temperaturas entre RCP's son semejantes, las diferencias entre ellos son del orden de 2-3°C. La distribución de la mediana del escenario RCP 8.5 asociada a la distribución más frecuente se asemeja a la distribución P75 del escenario RCP 4.5. El patrón se repite, la distribución P90 del RCP 4.5 se asemejará a la distribución P75 en el RCP 8.5. Coincidiendo la distribución más extrema del escenario RCP 4.5 con la P95 del escenario RCP 8.5.

En las distribuciones asociadas a situaciones de olas de calor, consideradas las distribuciones P95 y P99, observamos que el índice HEI de valor 7 es el mayoritario y cubre prácticamente la totalidad de la ciudad incrementando el riesgo relativo de mortalidad más de un 100% en comparación al período óptimo HEI=1, que no se encuentra en ninguna distribución.

En referencia a la caracterización, las dos LCZ que describen temperaturas más elevadas coinciden con las LCZ 8 y 10 que describen actividades industriales en detrimento de las categorías 2 y E (pertenecientes a entramado urbano) para el período observado. Esta apreciación es coherente en el caso del RCP 8.5, en que las emisiones y los procesos industriales se aceleran. En contraposición, las temperaturas más bajas corresponden a las LCZ 9, A, C, 6 y 5, asociadas a superficies boscosas, arbustivas y parques situados a las afueras de la ciudad o categorías basadas en casas dispersas o muy dispersas con un alto grado de vegetación a su alrededor. Podemos concluir que, para los escenarios de cambio climático estudiados, la caracterización o comportamiento térmico de las LCZ se mantiene más elevado pero con un patrón muy similar al período observado.

Cabe destacar que en el RCP 8.5 la distribución más extrema abarcaría toda la ciudad con un HEI=7, superando en todo el municipio temperaturas medias diarias superiores a los 31°C, esta situación conllevaría a noches tórridas con temperaturas superiores a los 25°C en todas las LCZ de la ciudad. Es durante la noche cuando el nivel de estrés térmico es más elevado y más peligroso en términos de patologías cardiovasculares y respiratorias.

Si comparamos los mapas 2071-2100 con el observado 1987-2015, vemos que el índice de exposición se mantiene un punto o dos por debajo. El P99 del período presente, que sería la distribución más parecida a un período de ola de calor, constituiría la distribución de P75 en el

escenario RCP8.5, esto nos informa del incremento de olas de calor en este período futuro y este escenario concreto.

Para las distribuciones referentes a la mediana P50, el RCP 4.5 se asemeja bastante al P50 1987-2015, aunque hay alguna superficie con HEI=4 que implica un RR de mortalidad del 60% superior al RR óptimo 1. En el caso del RCP 8.5, la distribución P50, perteneciente a la más frecuente, implica que el RR es superior al 60% o incluso al 80% con respecto al valor de RR óptimo o de menos riesgo relativo.

Generar una cartografía HEI resulta de gran utilidad si queremos analizar los cambios que puede conllevar hacia una planificación que permita minimizar los efectos de exposición al calor. Gracias a esta caracterización podemos obtener información geoespacial de alta resolución, vectorial, que nos ayudará a diseñar una ciudad menos expuesta a los impactos del calor.

# 5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA MORFOLOGÍA URBANA. ESCENARIOS DE MITIGACIÓN

En este capítulo, se busca determinar los potenciales efectos en un sistema urbano al aplicar varias estrategias de mitigación para las olas de calor y la isla de calor urbana. Se ha hecho teniendo en cuenta las interacciones entre las cubiertas del suelo con la capa límite, así como la morfología, el clima y la geografía específica de la ciudad. En este capítulo se ha trabajado con una metodología para obtener una descripción de la superficie urbana muy detallada con la finalidad de aplicarla como input del modelo meteorológico urbano WRF BEP+BEM. Se han diseñado diferentes estrategias de mitigación como la aplicación de tejados fríos y/o incrementando el verde e irrigación urbana. La finalidad es observar los cambios y la efectividad de cada estrategia frente la ola de calor de julio de 2015. El subíndice del capítulo es el siguiente:

5.1 Introducción.....	116
5.2 Configuración del modelo WRF BEP+BEM.....	122
5.3 Caso de estudio.....	127
5.4 Escenarios de mitigación.....	130
5.5 Resultados.....	135
5.6 Discusión y conclusiones.....	150

## 5.1. Introducción

La intensidad y frecuencia de los episodios de temperatura extrema han aumentado en todo el mundo en las últimas décadas y se espera que continúen aumentando hasta finales de siglo (Kyselý, 2010; Holtanová et al., 2014; Pachauri et al., 2015; Lhotka y Kyselý., 2015).

Las olas de calor (*Heat Waves* – HW) representan uno de los fenómenos meteorológicos más mortíferos y se espera que su frecuencia, intensidad y duración aumenten en el futuro debido al cambio climático global (Pachauri et al., 2015). Las HW consisten en un período prolongado de estrés por calor que causa modificaciones temporales en el estilo de vida y pueden conllevar consecuencias adversas para la salud de la población afectada (Robinson, 2001). Existen numerosas definiciones de ola de calor; la Organización Meteorológica Mundial (OMM) la define como aquel período que supera el percentil del 90% de la temperatura media durante al menos cinco días consecutivos, aunque también acepta que algunas regiones utilicen distintas definiciones (es decir, cinco días con temperaturas máximas superiores a 35°C o tres días con temperaturas máximas superiores a 40°C). En nuestra región de estudio, el *Servei Meteorològic de Catalunya* (SMC) define HW si se supera el percentil 98 durante al menos 3 días. Las olas de calor aumentan el estrés por calor, especialmente en las personas vulnerables (Ward et al., 2016) y aumenta la mortalidad relacionada con el calor (Smid et al., 2019; Ingole et al., 2020).

En Europa, la ola de calor de 2003 en la que el continente sufrió uno de los períodos de calor más dañinos produjo más de 70,000 muertes asociadas (Li y Bou-Zeid, 2013), durante el verano de 2010 en Rusia y Europa del Este otra ola de calor produjo 50,000 muertes además de numerosos incendios y un período de sequía muy grave (Barriopedro et al., 2011; Schneidereit et al., 2012). Durante el verano de 2015, gran parte de Europa se vio afectada por varios episodios extraordinarios, donde la mayoría de los índices térmicos registraron valores récord (Hoy et al., 2017). Al mismo tiempo, las altas

temperaturas obligaron a la población a usar el aire acondicionado, lo que provocó un gran consumo de electricidad. En España, por ejemplo, durante la primera semana de julio de 2015, la electricidad aumentó un 8% en comparación con el consumo normal del mes, según la Red Española de Electricidad en su informe de 2015. El calor del mes de julio provocó que la climatización doméstica superara al consumo del sector industrial.

Los episodios de ola de calor se intensifican aún más en las ciudades debido a una acumulación excesiva de calor causada por materiales de construcción, una falta de vegetación y espacios verdes y/o una falta de espacios abiertos que facilitan la liberación de calor residual del aire acondicionado entre otros (Tan et al., 2010; Stewart y Oke, 2012). Este efecto microclimático puede agravarse durante los veranos calurosos y las altas temperaturas pueden provocar estrés por exceso de calor sobre los ciudadanos (Guarino et al., 2014). El efecto isla de calor urbano (UHI) se refiere a este fenómeno en el que existen temperaturas más altas en las áreas urbanas en comparación con las áreas rurales y periurbanas circundantes (Oke 1982; Moreno-García 1994; Arnfield, 2003). Es por ello por lo que, en las regiones urbanas, las HW a menudo ven amplificadas por el efecto UHI. Los impactos asociados con los efectos de UHI incluyen el confort térmico, la salud, el uso de agua y energía y la contaminación del aire (Santamouris, 2014). Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), una ciudad de 1 millón de habitantes puede aumentar la temperatura media entre 1°C y 3°C con respecto a su zona circundante periurbana o natural por dicho efecto (Wong et al. 2013).

Actualmente, el paisaje urbano alberga a más de la mitad de la población mundial y las proyecciones indican que para el 2050 los sistemas urbanos crezcan para concentrar el 68% de la población mundial y llegar a los 6.300 millones de habitantes (UN, 2015). Una situación similar ocurre en la Unión Europea, donde actualmente el 75% de la población reside en ciudades, y se espera que crezca hasta llegar al 82% en 2050 (Guerreiro et al., 2018; Habitat, 2013). La creciente urbanización acompañada de una tendencia del envejecimiento de la población está intensificando los impactos de las olas de calor, y existe una necesidad urgente de implementar medidas de mitigación y técnicas para reducir el estrés por calor (Luber and McGeekin, 2008; Li y Norford, 2016).

Durante las últimas décadas se han propuesto y desarrollado diferentes estrategias para reducir el efecto de la UHI y las HW, bien con el uso de materiales reflectantes para incrementar el albedo, llamada estrategia de implementación de tejados fríos (Synnefa et al., 2008; Campra et al., 2008; Oleson et al., 2010; Campra, 2011; Yang et al., 2015; Li et al., 2016; González et al., 2019), la implementación de cubiertas verdes que contribuyen a una reducción de la temperatura, y en menor medida, de la contaminación del aire, así como a la absorción de dióxido de carbono por fotosíntesis (Getter y Rowe, 2006; Mentens et al., 2006; Takebayashi y Morivama, 2007; Rowe y Getter, 2015; Li et al., 2014; Sharma et al., 2016), o el aumento de espacios urbanos verdes e/o irrigados (Fallmann et al., 2013; Feyisa et al., 2014; Demuzere et al., 2014; Yu et al., 2018). Si bien todas estas estrategias reducen el calor sensible disponible, los mecanismos de enfriamiento de la vegetación (cubiertas verdes, así como parques y jardines) son diferentes al de los tejados fríos entendidos como la instalación de superficies reflectantes. La existencia de vegetación y riego provoca un aumento de la evapotranspiración y, en consecuencia, un aumento del consumo de calor latente. Por tanto, se dispone de menos energía de calor sensible, lo que provoca una reducción de la temperatura que puede contribuir sustancialmente a la reducción del efecto isla de calor urbano (Qiu et al., 2013). Por otro lado, un techo frío aumenta el reflejo de la radiación solar incidente (en áreas urbanas) al reducir la radiación neta total (Li et al., 2014). En consecuencia, los techos fríos no acumulan tanto calor durante el día, requiriendo menos aire acondicionado y reduciendo el UHI durante el día y también por la noche (Akbari et al., 2001).

Un techo frío es un sistema de tejado que se caracteriza por una alta reflectancia solar y una alta emisión de infrarrojos térmicos. Estas dos propiedades influyen en la disminución de la temperatura de una superficie (Bretz y Akbari, 1997; Synnefa y Santamouris, 2012). Un techo frío es aquel que tiene un albedo superior a 0.65 según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Se ha demostrado que aumentar el albedo de las superficies en las ciudades es una estrategia eficaz de mitigación del calor (Gago et al. 2013). Además de ser una estrategia de implementación simple, las superficies de los tejados de todo el mundo representan aproximadamente el 20% del total en las ciudades (Akbari et al. 2009). En estudios de modelización para las ciudades



de Nueva York o Atenas, se ha observado que al aumentar el albedo de los tejados en una décima, la temperatura puede disminuir entre  $0.02^{\circ}\text{C}$  y  $0.41^{\circ}\text{C}$  (Millstein y Menon, 2011; Santamouris, 2014; Sharma et al, 2016). Li et al. (2014) mostraron reducciones en las temperaturas cercanas a la superficie de las áreas metropolitanas de Baltimore-Washington de  $0.05^{\circ}\text{C}$ ,  $0.23^{\circ}\text{C}$  y  $0.37^{\circ}\text{C}$  con respecto a los techos convencionales para albedos de 0.5, 0.7 y 0.9, respectivamente.

Se ha demostrado que el aumento del verde urbano produce un enfriamiento significativo, según el tipo de vegetación y el tamaño de la cubierta vegetal como parques urbanos (Bowler et al., 2010; Gago et al., 2013). Algunos estudios han comprobado que en función del tamaño, la disminución de temperatura puede afectar hasta 1km de radio (Upmanis et al., 1998), y hasta registrar  $4^{\circ}\text{C}$  menos que si no hubiera dicha cubierta vegetal (Eliasson, 1996). Las simulaciones han indicado que la disminución de la fracción urbana puede conducir a una disminución significativa de la temperatura durante la noche. Por ejemplo, Jacobs et al. (2018) observaron una reducción de las temperaturas nocturnas de  $1.5^{\circ}\text{C}$  cambiando la fracción de vegetación urbana del 27% al 40% en la ciudad de Melbourne. En otro estudio, cuando la fracción de vegetación se incrementó de 27% a 50%, encontraron que las noches se enfriaban del orden de  $1.98^{\circ}\text{C}$  (Papangelis et al. 2012). También es importante la forma en que se distribuyen los parques, influyendo sobre su efectividad para el control del clima porque la disposición de los espacios verdes afecta la distribución de la temperatura superficial. Tener muchos espacios verdes pequeños no es lo mismo que tener pocos, pero más grandes. En el primer caso, el impacto potencial en el confort térmico puede resultar más significativo (Bowler et al., 2010).

Los estudios que evalúan el impacto de estas estrategias de mitigación urbana desde un enfoque de metabolismo sistémico carecen de la resolución temporal y espacial necesaria para comprender las interacciones entre la atmósfera urbana y el uso y cubierta urbana (Susca, 2012; Perotti y Iuorio, 2019; Susca y Pomponi, 2020). Muchos estudios dirigidos a analizar estrategias de mitigación frente HW se han realizado a escala de edificio o barrio (Jaffal et al., 2012; Zinzi y Agnoli, 2012), y los resultados no pueden

extrapolarse para determinar los efectos para toda la ciudad debido a su elevada heterogeneidad (Cadenasso et al., 2007; Li et al., 2014; Geletič et al., 2016).

Se ha realizado un número limitado de estudios que determinan los efectos de estas estrategias para toda un área metropolitana, teniendo en cuenta su geografía, clima y heterogeneidad. Millstein y Menon (2011) estudiaron los efectos del aumento del albedo en las ciudades de EE.UU. y encontraron una reducción de temperatura entre 0.11 y 0.58°C durante el verano en la mayoría de las ciudades. Sin embargo, no incluyeron un modelo de dosel urbano (*Urban Canopy Model* – UCM). Varios autores han demostrado que una buena representación de la UCM permite simular con precisión la variabilidad de temperatura en el área urbana (Salamanca et al., 2012; De Ridder et al., 2015; Li et al., 2018), y el efecto de estrategias de mitigación aplicadas a las ciudades (Li et al., 2014; Yang et al., 2015; Jacobs et al., 2018; Imran et al., 2019; Zonato et al., 2020).

Para adaptarse a esta heterogeneidad de la superficie urbana y su impacto en la distribución de la temperatura, proponemos utilizar un modelo meteorológico junto con un modelo de dosel urbano (Li et al., 2014).

En este capítulo, se busca determinar los potenciales efectos en un sistema urbano completo de diversas estrategias de mitigación de HW y UHI teniendo en cuenta las interacciones entre los usos y cubiertas del suelo y de los tejados con la atmósfera urbana, así como la morfología, el clima y la geografía específica de la ciudad.

En el marco de esta tesis doctoral pudimos trabajar sobre un tejido urbano de gran detalle gracias a la alta resolución de la fracción urbana y la cartografía de usos del suelo urbano trabajados y citados en capítulos anteriores. Estos fueron inputs del UCM utilizado tal y como se ha hecho de forma similar en otros estudios recientes como el de Brousse et al, (2016) y el de Ribeiro et al, (2020). Los cambios en el albedo (cubiertas frías) se pudieron realizar a través de las *Local Climate Zones* (Stewart y Oke, 2012), considerando un total de 11 clases urbanas. Al mismo tiempo, los cambios en el incremento del verde urbano se han basado en planes urbanos reales que la AMB quiere implementar a medio plazo. El modelo utilizado nos ha permitido aplicar cambios georeferenciados con la fracción urbana dando como resultado un modelo más efectivo y

una mejora en los detalles a la hora de investigar y modelizar propuestas específicas de planificación y mitigación urbanas. En este sentido, se resuelven problemas de escala y detalle que no incluyen modelos de dosel urbano utilizados en otros estudios (y que se han ido citando anteriormente) de mitigación, como el *Single Layer Urban Canopy Model* – SLUCM (Sharma et al., 2016; Imran et al., 2019) o el *Princeton UCM* (Li et al., 2016; Jacobs et al., 2018) y se resuelven los problemas que plantean los estudios de metabolismo entre la interacción de la atmósfera y los usos del suelo. Aun así, este capítulo se basa en un solo caso de estudio que puede conllevar ciertas limitaciones a la hora de hacer generalizaciones. Sería necesario hacer más simulaciones en el futuro para poder hacer propuestas más consistentes sobre el territorio.

Para mejorar estas limitaciones, hemos utilizado el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) con el *Building Effect Parameterization* (BEP) de la UCM y el *Building Energy Model* (BEM) (Martilli 2002; Salamanca y Martilli, 2010; Salamanca et al., 2010) que nos ha permitido simular varias estrategias de mitigación para el Área Metropolitana de Barcelona (AMB). El modelo BEP captura superficies urbanas en tres dimensiones y considera los edificios como sumideros y fuentes de calor, impulso y energía turbulenta, mientras que BEM parametriza el calor antropogénico liberado desde el interior de los edificios a la atmósfera exterior junto con el consumo de energía térmica del edificio. El modelo fue utilizado en concreto para simular la ola de calor que afectó sobre el AMB y gran parte de Europa durante el mes julio de 2015. La presencia de una cresta anticiclónica situada en las Azores, junto con la irrupción de aire muy cálido del norte del Sahara provocó que la temperatura media diaria superara 33.1°C durante más de 3 días consecutivos (superando el percentil 98 de temperatura máxima diaria en los meses de verano de los últimos 30 años; definición establecida por el Servicio de Meteorología de Cataluña).

Se han diseñado un total de 7 simulaciones:

- a) *Aumento del albedo de los tejados a 0.85 (A0.85)*
- b) *Aumento del albedo de los tejados a 0.70 (A0.70)*
- c) *Aumento del albedo de los tejados a 0.55 (A0.55)*

- d) *Aumento del verde urbano (V2)*
- e) Aumento de la irrigación urbana (R5)
- f) *Aumento del verde urbano con aumento de irrigación (V5)*
- g) *Combinación albedo de los tejados a 0.85 e incremento de verde urbano e irrigación. (A0.85V5)*

De estas 7 simulaciones, se muestran en primer lugar las simulaciones a), d), f) y g). Se analizan los impactos y el comportamiento térmico de los cuatro escenarios y se comparan con el caso real previamente validado. Las simulaciones complementarias b), c), e) se muestran en el apartado de discusión y conclusiones.

El capítulo está organizado de la siguiente manera: la Sección 5.2 presenta brevemente los dominios, la configuración WRF BEP+BEM, datos de observación y métodos de validación; en la sección 5.3 se hace un breve análisis climático de las olas de calor en Barcelona y se presenta el caso de estudio; los escenarios de mitigación se describen en la sección 5.4; la sección 5.5 muestra los resultados (validación, caso real y escenarios); y la sección 5.6 se centra en la discusión con las simulaciones complementarias y conclusiones.

## 5.2- Configuración del modelo WRF BEP+BEM

En este estudio se ha utilizado el modelo WRF versión 4.0 (Skamarock et al., 2019) junto con el modelo de dosel urbano BEP+BEM (Salamanca et al., 2010). WRF consiste en un sistema numérico de predicción atmosférica utilizado para pronósticos regionales e investigación atmosférica, que resuelve las ecuaciones de Euler no hidrostáticas utilizando coordenadas verticales de seguimiento del terreno (Skamarock et al., 2019). La combinación WRF BEP+BEM se ha evaluado previamente y se ha utilizado para la simulación de meteorología urbana, mostrando una buena concordancia con los datos observados frente a otras parametrizaciones urbanas y para diferentes regiones urbanas (Salamanca et al., 2011, 2012; Sharma et al., 2014). La configuración WRF para este

estudio consta de 3 dominios anidados bidireccionales con una resolución horizontal de 9km (150 x 145), 3km (118 x 118) y 1km (121 x 121), respectivamente (el último dominio será el utilizado por BEP+BEM) tal y como observamos en la figura 5.1. Los dominios se han seleccionado para incluir todas las características geográficas con una influencia sinóptica o regional en la meteorología del AMB. El dominio mayor cubre toda la Península Ibérica y el norte de África. El dominio medio contiene todo el territorio catalán y se extiende en el norte sobre los Pirineos orientales. El dominio interno cubre la provincia de Barcelona que contiene el AMB en la costa este. El modelo se implementa con 57 capas verticales basadas en la presión que van desde la superficie hasta la parte superior a 50hPa, con los primeros 16 niveles entre los 100m y los siguientes 36 manteniéndose por debajo de los 1.5km inferiores para tener una mejor representación de los flujos verticales dentro de la capa límite urbana.

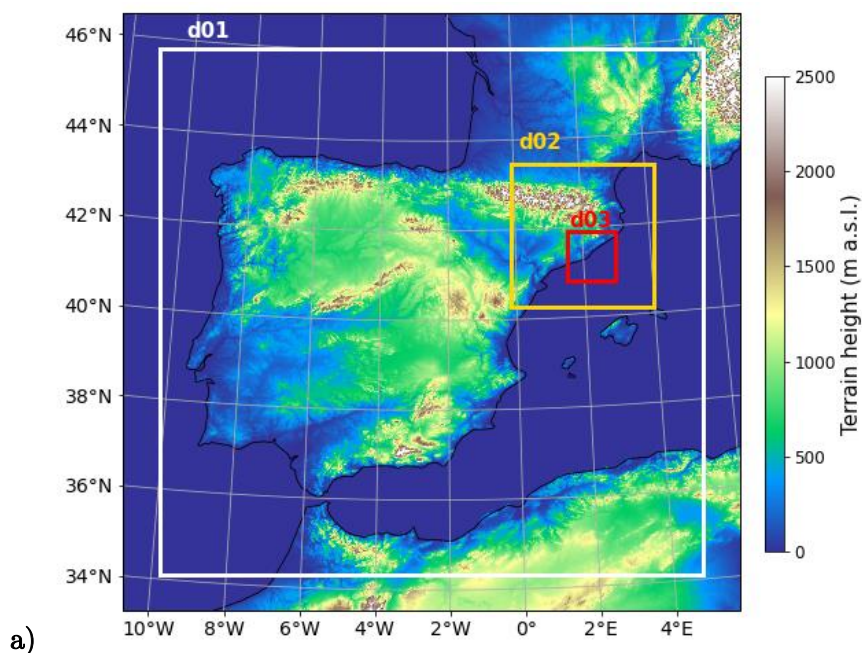


Figura 5.1. a) Dominios utilizados en el WRF.

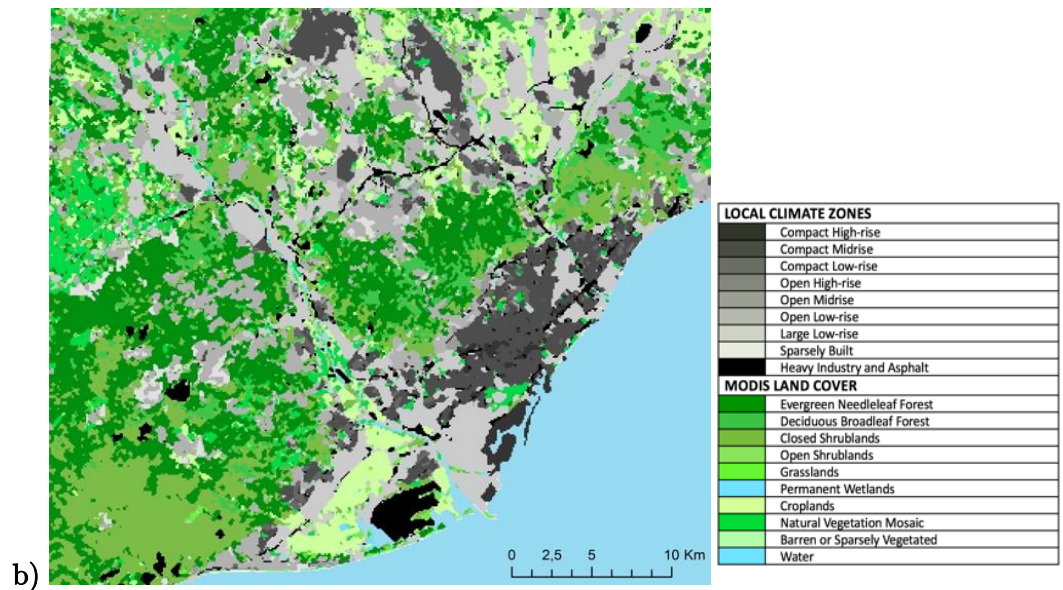


Figura 5.1 b) Región utilizada para el WRF BEP+BEM (Local Climate Zones + MODIS Land Cover)

(Cont.).

Las condiciones iniciales y de contorno se tomaron del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Medio Alcance (ECMWF) ERA5 con una resolución horizontal de 31km y una separación de 6 horas para las condiciones de los límites laterales (Hersbach et al., 2020). Cabe destacar que la temperatura de la superficie del mar se actualiza diariamente con datos ERA5.

El modelo WRF incluye múltiples esquemas de parametrización para representar procesos físicos: microfísica, radiación, convección de cúmulos, física de superficie y capa límite urbana (PBL). Los esquemas de parametrización elegidos para este estudio han sido seleccionados de varias pruebas de sensibilidad. Las opciones físicas para las simulaciones en este estudio incluyen: (1) el esquema WRF *Single-Moment* 6-class (Hong and Lim, 2006) para microfísica; (2) el esquema RRTMG (Iacono et al., 2008) para radiación de onda corta y onda larga; (3) el esquema de Kain-Fritsch (Kain, 2004) (solo para el dominio más externo) para la parametrización de cúmulos; (4) el Noah Land Surface Model (Chen y Dudhia, 2001) de 4 capas para superficies no urbanas y (5) el esquema Bougeault-Lacarrère (PBL) scheme (Bougeault y Lacarrere 1989); y el esquema de similitud Monin-Obukhov con la longitud de rugosidad térmica de Zilitinkevich para

la capa superficial. El esquema urbano BEP+BEM solo se activa para el dominio interno y urbano.

Para la clasificación de usos del suelo y cubiertas (LCLU), el modelo WRF se ha adaptado siguiendo las indicaciones de Martilli et al. (2016) y el proyecto WUDAPT para trabajar con las LCZ urbanas (Brousse et al., 2016; Gilabert et al., 2020). Como ya se ha demostrado en capítulos anteriores las LCZ establecen un marco para clasificar diferentes áreas urbanas en un rango de valores para múltiples geometrías, cubiertas de superficie, térmicas, radiativas y metabólicas para cada LCZ (Stewart y Oke, 2012). La clasificación LCZ para la región AMB y sus alrededores es la que se ha presentado en la figura 3.8 del capítulo 3, siendo la metodología combinada la que se ha utilizado como base (Gilabert et al., 2020). En este estudio, solo se han usado las LCZ urbanas (LCZ 1-10) y la LCZ E (roca desnuda o pavimentada, reformulada como asfalto), completando la clasificación de las áreas rurales con la clasificación *Corine Land Cover* 2018 (CLC). El CLC se reasigna de sus 44 clases originales a las 16 clases de la clasificación MODIS *Land* y 4 clases de LCZ, que pueden ser utilizadas por el modelo WRF (Figura 5.1).

El esquema BEP+BEM necesita múltiples parámetros urbanos para definir las propiedades geométricas, térmicas, radiativas y de actividad humana de cada clase de uso del suelo urbano. Las propiedades radiativas de los tejados de edificios se han calculado utilizando imágenes Landsat. Para el cálculo del albedo, se seleccionaron 12 imágenes (una para cada mes) sin nubes y se calculó el promedio anual. Se han utilizado imágenes Landsat 5 (30x30 m) y se ha seguido la metodología propuesta por Liang (2001) que se puede ver en el capítulo 6 (apartado 6.2.4). Por último, el valor medio de albedo se ha calculado para cada LCZ, permitiendo que los valores se puedan incluir dentro del modelo WRF BEM+BEM. Por otra parte, los valores de emisividad se han calculado siguiendo la metodología de Ndossi y Aydan (2016) basada en datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que se relatava en el capítulo 6 (apartado 6.2.4). En el caso de los parámetros geométricos como la altitud y los anchos de los edificios, los anchos de las calles o las fracciones construidas y de vegetación no se han definido para cada LCZ, sino que se han introducido directamente para las celdas de la



cuadrícula WRF que se encuentran dentro de nuestra región de interés. Nuestra región, está completamente integrada dentro del dominio interno y contiene todos los términos municipales del AMB.

Por un lado, los mapas de altura de edificios y muros parten de los datos de las coberturas LiDAR: del Modelo Digital de Superficies y Modelo Digital del Terreno con una resolución o tamaño de malla de 2m, del ICGC. Una vez generado el mapa de altura de los edificios, se aplicó un algoritmo que permite generar las alturas y superficies de las paredes (Lindberg et al., 2018). Estas cartografías de morfología urbana se tratan posteriormente mediante la metodología propuesta por Pappaccogli et al. (2017), que segmenta la información en un histograma de alturas de edificios y calcula los llamados parámetros lambda ( $\lambda$ ): (1)  $\lambda_P$  es la superficie del techo dividida por la superficie total y (2)  $\lambda_B$  es el resultado de la suma de la superficie de la pared y la superficie del techo dividida por la superficie total. Ambos parámetros se introducen posteriormente en el BEP+BEM (metodología extendida explicada en el capítulo 6 apartado 6.2.3).

Por otro lado, la fracción urbana se ha obtenido utilizando el NDVI de datos de Landsat 8 (Vermote et al., 2016). Una vez creado el mapa, reclasificamos los valores de NDVI según la clasificación propuesta por el ICGC (Alamús et al., 2018) dónde: NDVI  $< 0$ , representa agua o cubierta artificial,  $0 < \text{NDVI} < 0.2$ , representa suelo desnudo y vegetación muerta,  $0.2 < \text{NDVI}$  representa toda la vegetación (en diferentes intensidades). Se ha demostrado que el NDVI es un buen indicador para diferenciar las áreas urbanas de las áreas con vegetación, especialmente en nuestras latitudes y para las áreas metropolitanas (Yuan y Bauer, 2007). Con esa información, es posible generar un mapa de 30x30m de fracción urbana donde los valores de NDVI  $< 0.2$  consisten en fracción urbana y NDVI  $> 0.2$  se consideran como fracción de vegetación.

El resto de los parámetros urbanos se han ajustado utilizando diferentes supuestos para ser lo más representativos posible para cada LCZ. Para tener en cuenta el calor antropogénico liberado por los sistemas de aire acondicionado de los edificios, la opción de aire acondicionado del esquema BEP+BEM se ha activado en todo momento para



todas las LCZ urbanas, excepto la LCZ E, con una temperatura interior optima de 21.5°C, y un rango de confort de 3.5°C y 75% de eficiencia térmica.

La validación se ha realizado calculando diferentes estadísticos comunes: la desviación (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson un, siguiendo las ecuaciones 1, 2 y 3 siguientes:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

donde  $M_i$  denota la salida del modelo para una variable específica,  $O_i$  dato observado,  $\bar{O}$  y  $\bar{M}$ , los valores promedio y N el número de píxeles para cada salida temporal.

### 5.3- Caso de estudio

En el marco de esta Tesis, hemos utilizado la definición de ola de calor del SMC porque la mayoría de los resúmenes y estudios climáticos producidos en nuestra región trabajan con esta definición y se ajustan de mejor forma. En este caso, la temperatura máxima diaria durante una ola de calor debe, durante al menos tres días consecutivos, superar el percentil 98 de la serie de verano en una estación o más. En el caso de Barcelona el valor es de 33.1°C según la climatología de los últimos 30 años (Pla Clima, 2018).

En los últimos 11 años (2009-2019) se han registrado un total de 5 olas de calor en la ciudad de Barcelona, si partimos de la definición de SMC (tabla 5.1). Después de analizar las temperaturas máximas diarias de ellos, el episodio de julio de 2015 ha sido seleccionado porque registró valores muy elevados que no solo afectaron Barcelona, sino que constituyó un período muy cálido en toda la Península Ibérica, así como en gran parte de Europa central. Se ha considerado la ola de calor más longeva de España tal y como podemos observar en la figura 5.2. Cabe destacar, que la evolución de las olas de

calor en España para el período 1975-2018 muestra que han aumentado en frecuencia, intensidad y duración de acuerdo con las observaciones del IPCC (2014).

HW	Días consecutivos
20/08/12-23/08/12	5
04/07/15-07/07/15	3
02/08/17-05/08/17	3
30/07/18-08/08/18	8
26/06/19-30/06/19	3

Tabla 5.1. Olas de calor (HW) de los últimos 10 años en la ciudad de Barcelona y número de días consecutivos basados en 5 estaciones meteorológicas: Raval, Zúñivarsitaria, Obs.Fabra, Zoo, Can Bruixa.

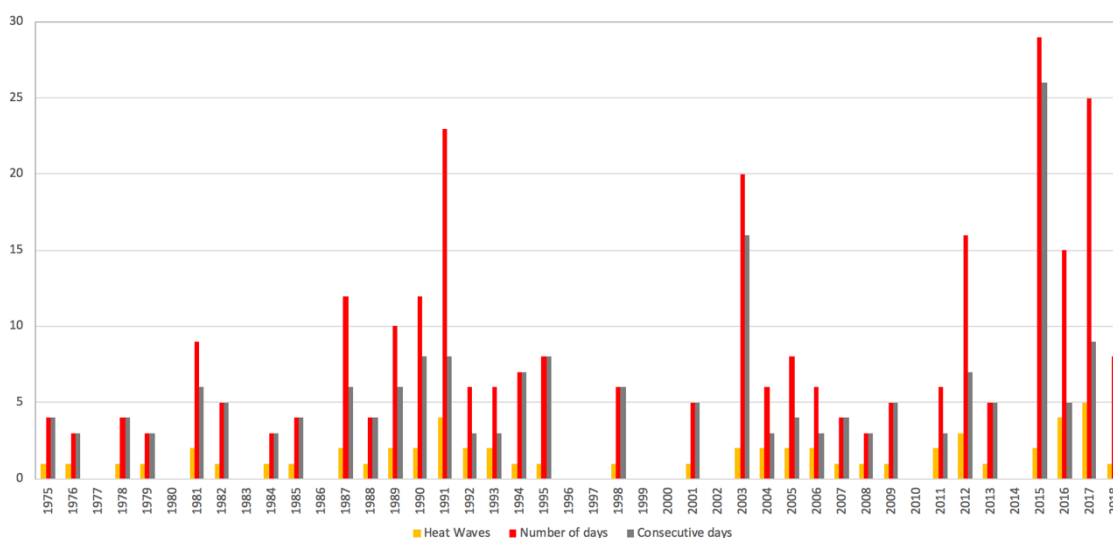


Figura 5.2 Número de HW, número de días y máximo de días consecutivos del HW en España (1975 – 2018). Basado en datos de AEMET, 2018.

El mes de julio de 2015 comenzó con la llegada de una masa de aire muy cálida procedente del norte de África y la presencia de una dorsal anticiclónica muy clara sobre Europa. La subsidencia causada por el anticiclón en las capas medias y altas de la atmósfera favoreció la estabilidad y el aumento de la temperatura. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el episodio ocurrió unos días después del solsticio de verano, cuando la radiación solar incidente es más intensa y los días aún son muy largos. Además, las nubes eran muy escasas, lo que permitió que la temperatura diurna alcanzara valores extraordinarios.

La configuración atmosférica se caracterizó por la presencia de un área de bajas presiones cerca de las Islas Británicas que se unió a la dorsal anticiclónica, favoreciendo el flujo del sudoeste que afectó a la Península Ibérica, especialmente en su fachada mediterránea (SMC, 2015)(fig 5.3). El mapa de 850hPa representa un buen indicador de este tipo de situaciones y se utiliza también como uno de los indicadores de peligrosidad de incendios forestales. Se puede observar que los valores más altos (coloreados en rojo intenso) se extienden a través de la mitad oriental de la Península, registrando valores superiores a 26°C a este nivel (aproximadamente 1500m). Esta situación estable se mantuvo durante todo el mes, causando récords en un tercio de las estaciones en el territorio catalán (con valores superiores a los 40 °C en algunas de ellas). La situación de ola de calor se mantuvo durante un total de 3 días en Barcelona pero durante todo el mes se registraron temperaturas máximas por encima de 30°C, noches tropicales (por encima de 20°C) y en algunos casos (especialmente en el centro) noches tórridas (por encima de 25°C).

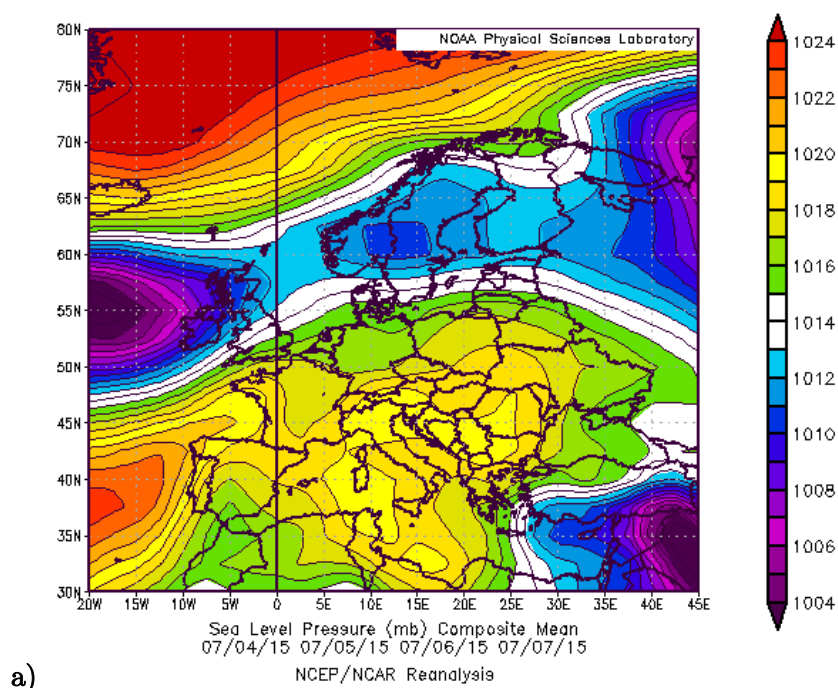


Figura 5.3 Mapas sinópticos de: a) Presión a nivel del mar (hPa), media compuesta de los 3 días consecutivos con  $T_{max} > 33.1^{\circ}\text{C}$ .

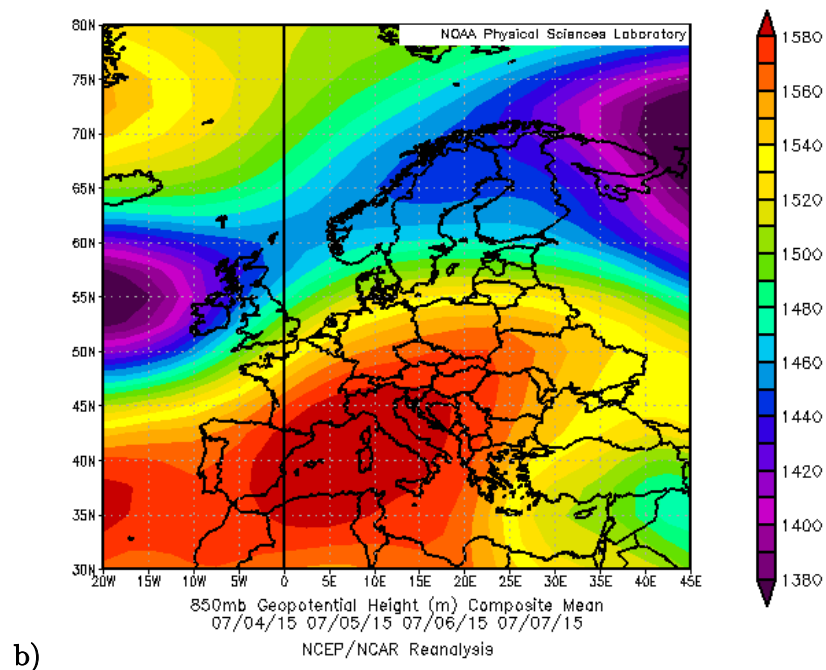


Figura 5.3' Mapas sinópticos de: b) 850 altura geopotencial (m), media compuesta de los 3 días con  $T_{max} > 33.1^{\circ}\text{C}$ . Fuente de datos: Proyecto 20th Century Reanalysis (Cont.).

## 5.4 Escenarios de mitigación

### 5.4.1 Incremento de tejados fríos

Observamos que en nuestra región de estudio los albedos medios registrados son bajos, en torno a 0.14-0.15, muy por debajo de los valores considerados como cubiertas frías ( $< 0.65$ ). En este caso, la estrategia de mitigación a tener en cuenta ha sido “pintar” los tejados de blanco. La tabla 5.2 muestra los valores de albedo actuales y el propuesto, así como las superficies de los tejados ocupados para cada LCZ. Estos últimos, se han calculado utilizando valores obtenidos con LiDAR y la cartografía 1:5000.

LCZ	% Área	Total de tejado por edificio (%)	ALBEDO ( $\alpha$ )		
			Landsat 8 promedio 2015	Stewart & Oke	Escenario A0.85 y A0.85V5
<b>LCZ 1</b>	0.41	46.17	0.15	0.1-0.2	0.85
<b>LCZ 2</b>	7.36	48.30	0.15	0.1 -0.2	0.85
<b>LCZ 3</b>	1.60	39.43	0.15	0.1-0.2	0.15
<b>LCZ 4</b>	0.02	4.34	0.14	0.12- 0.25	0.85
<b>LCZ 5</b>	0.68	15.12	0.15	0.12- 0.25	0.85
<b>LCZ 6</b>	8.33	11.88	0.14	0.12- 0.25	0.14
<b>LCZ 8</b>	11.96	30.35	0.16	0.15- 0.25	0.85
<b>LCZ 9</b>	2.24	2.20	0.13	0.12 – 0.25	0.13
<b>LCZ 10</b>	0.71	10.75	0.16	0.12 – 0.2	0.16
<b>LCZ E</b>	2.61	6.80	0.16	0.15 – 0.3	0.16
<b>Rural/Natural</b>	64.08		0.14	0.1 – 0.35	0.16
<b>Agua</b>	26.9*		0.09	0.02 – 0.1	0.09

Tabla 5.2 % de superficie por LCZ, albedo anual en Barcelona, umbrales de albedo propuestos por Stewart y Oke (2012) y valores de albedo para el escenario de mitigación. *Nota:* % del área de LCZ y cubiertas naturales sin tener en cuenta los cuerpos de agua. \*% de la superficie total de la ROI.

Para los escenarios de mitigación de tejados fríos, los valores de albedo se han elevado hasta los 0.85 para diferentes LCZ como se ha hecho en estudios anteriores (ej. Sharma et al., 2016). Se ha aplicado la técnica de aumento del albedo para las LCZ 1-2-4-5-8. Estas LCZ pertenecen a edificios residenciales y polígonos industriales, caracterizados por tejados planos y de más fácil instalación. Para el resto de categorías, pertenecientes a casas unifamiliares consideradas LCZ 3, 6 y 9 se han pasado por alto, al entender que es más difícil instalar tejados fríos debido a la arquitectura de éstas. Entendemos que la intensidad del albedo disminuirá dependiendo del tiempo dado y que el material puede deteriorarse y ensuciarse, en este sentido, se propone un escenario A0.85 y dos escenarios complementarios de 0.70 (A0.70) y 0.55 (A0.55) a consecuencia del deterioro de la superficie. De esta forma, se puede estudiar la influencia de transición, pasando de un albedo alto a un albedo por debajo del valor de definición del tejado frío (A0.55). Los subescenarios se tratarán en el apartado de discusión de este capítulo.

### 5.4.2 Incremento de vegetación e irrigación

Se trabaja con la hipótesis en primer lugar de incrementar la vegetación manteniendo la irrigación por superficie (V2) y en segundo lugar se supone que aumenta no tan solo el verde sino la irrigación por superficie (V5).

Para desarrollar escenarios de crecimiento de verde urbano, primero tenemos que considerar el área metropolitana en tres usos de suelo: fracción urbana, suelo desnudo (superficie permeable sin construir y sin verde) y fracción de cubierta vegetal.



Figura 5.4. Fracción urbana (rosa), fracción vegetal (verde), basadas en la reclasificación del NDVI. Las áreas rojas son el incremento de zonas verdes basadas en los Planes Directores Urbanísticos del Área Metropolitana de Barcelona.

La fracción urbana y la fracción de vegetación se calcularon a una resolución de 30m a partir de imágenes NDVI calculadas con datos Landsat 8. La clasificación basada en los valores del NDVI ha sido la siguiente: fracción urbana donde el valor del NDVI es menor a 0.2 y vegetación/suelo desnudo donde el valor del NDVI es mayor que 0.2.

La figura 5.4 muestra un mapa de la fracción urbana y la fracción de vegetación para julio de 2015 (durante la ola de calor) con los nuevos parques y corredores verdes

(en rojo) diseñados por el Plan Director Urbanístico del AMB. Cada parcela urbana LCZ tiene una fracción permeable y una fracción impermeable. El porcentaje de la fracción impermeable o urbana se ejecutará con el BEP+BEM, y el porcentaje restante considerado permeable se ejecutará con el modelo Noah (para áreas naturales o rurales) configurando el 30% de suelo desnudo dentro de la fracción de vegetación total. La fracción de suelo desnudo se ha calculado a partir de la diferencia entre los valores máximos anuales del NDVI de 2015 y los del NDVI de julio de 2015. De la diferencia entre las dos capas, nos proporcionará las áreas de suelo desnudo (considerando que las del mapa NDVI máximo anual eran vegetación y en el del NDVI julio 2015 eran fracción urbana). Esta relación incluida en el modelo entre el porcentaje de suelo desnudo, vegetación y fracciones urbanas se puede ver en los datos de la tabla 5.3 en base a los mapas reclasificados.

El escenario de mitigación consiste en incrementar la cobertura vegetal atendiendo a los objetivos establecidos por el Plan Director Urbanístico del AMB (<https://urbanisme.amb.cat/en/home>) (PDU) y el Plan de Cambio Climático de Barcelona (Pla Clima, 2018). Estas políticas proponen varias estrategias de ecologización: la implementación de corredores verdes para conectar varias áreas de la ciudad densamente pobladas, así como la creación de 6 parques urbanos y corredor verde, agregando 255.64 ha de verde para el 2030 (fig. 5.4). Para calcular la nueva fracción de vegetación, asumimos que la morfología urbana (edificios y ancho de calles) permanece igual, pero aumentamos el tamaño de la loseta con vegetación en la celda de la cuadrícula.

El caso de referencia considera un riego diario de 2l/m<sup>2</sup> de 4:00 a 5:00 UTC, teniendo en cuenta los informes de riego disponibles del Ayuntamiento de Barcelona (Ajuntament de Barcelona, 2013). En este apartado se ha considerado un escenario aumentando el verde urbano (V2) y otro aumentando el riego y el verde (V5) que es el que se tratará de forma más recurrente durante los resultados junto con el escenario de aumento de verde sin riego (debido que es la propuesta real establecida por el Área Metropolitana de Barcelona). Se ha modelizado un último escenario aumentando tan solo la irrigación (R5) que se discutirá en el apartado final del capítulo.

Fracciones	Área	Caso de referencia	de Tejados fríos A0.85	Incremento verde (V2-5)	Combinado (A0.85V5)
Fracción urbana del LCZ urbanas	275km <sup>2</sup>	53.06	53.06	48.68	48.68
Fracción verde dentro de las LCZ urbanas	169km <sup>2</sup>	32.54	32.54	35.92	35.92
Suelo desnudo dentro de las LCZ urbanas	75km <sup>2</sup>	13.95	13.95	15.40	15.40
Área total de LCZ urbanas	519km <sup>2</sup>	-	-	-	-
Área total vegetal no consideradas dentro las LCZ urbanas	925km <sup>2</sup>	-	-	-	-
Área total de la ROI	1444km <sup>2</sup>	-	-	-	-

Tabla 5.3 Porcentaje de fracción de vegetación, fracción urbana y suelo desnudo. Caso de referencia y escenarios.

El riego se ha aumentado hasta los 5l/m<sup>2</sup> durante el mismo período de tiempo. El aumento de riego favorece la reducción de temperatura, como se verá en los resultados posteriores.

### 5.4.3 Escenario combinado

La última propuesta se basa en unir ambos escenarios descritos en los subapartados anteriores A0.85 y V5. Este escenario se ha considerado, atendiendo por una parte que son compatibles y aplicables al mismo tiempo. Por otra parte ambas iniciativas forman parte de las posibles estrategias de mitigación documentadas por su implementación en la zona de interés.

Cabe señalar que en este escenario combinado el reverdecimiento de los tejados no se ha considerado.



## 5.5 Resultados

Antes de analizar los resultados en los escenarios de mitigación propuestos, se presentan los resultados de la validación del caso de estudio referente a la ola de calor de julio de 2015.

La figura 5.5 muestra el RMSE, el BIAS y la correlación UN del caso de referencia en comparación con las estaciones meteorológicas seleccionadas (presentadas en el capítulo 2 fig 2.9). La validación cruzada se ha realizado con diferentes indicadores y se ha calculado sobre el promedio total de días simulados. También se ha hecho una distinción día/noche y por LCZ, así como la separación por estaciones meteorológicas consideradas urbanas y rurales.

Las simulaciones comienzan a las 00:00 UTC el 24 de junio de 2015 y terminan a las 00:00 UTC el 7 de julio de 2015, utilizando las primeras 24 horas como *spin-up*. Por lo tanto, la simulación cubre 12 días de estudio y uno de *spin-up*, siendo los días 10, 11 y 12 los focalizados en los resultados y pertenecientes a la ola de calor (4 al 6 de julio de 2015). Para hacer la validación, se ha discutido todo el período simulado, del 25-06-2015 al 6-07-2015.

En la siguiente sección, nos focalizaremos en la temperatura y en menor medida en la humedad relativa. Para referirnos a la temperatura, la llamaremos temperatura del aire a 2m solo para seguir con el estado del arte actual, pero entendemos que se trata de una temperatura representativa cerca de la superficie, en lugar de la temperatura del aire estrictamente a 2m.

Observamos una fuerte correlación positiva (0.9 para la temperatura y 0.8 para la humedad relativa) entre las observaciones y los resultados del modelo (fig 5.5). En cuanto a la temperatura, no observamos una diferencia significativa en el RMSE y R para el horario diurno y nocturno y urbano/rural, con 1.5 ° C para el RMSE y 0.9 para R. Sin embargo, un BIAS negativo (-0.3°C) se observa durante el día en contraste con un sesgo positivo (0.6-0.9°C) durante la noche, lo que conforma un sesgo positivo (0.3°C) durante todo el día. El BIAS negativo durante la noche podría estar relacionado con problemas

en la parametrización de la humedad del suelo. En general, sobre las estaciones rurales, el modelo presenta unos resultados ligeramente mejores con menor BIAS, especialmente durante la noche, y mayor R en comparación con las estaciones urbanas, lo que podría deberse a la alta heterogeneidad del área urbana. Este resultado es similar a otros estudios (ej. [Jacobs et al., 2018](#); [Ribeiro et al., 2020](#)). Por otro lado, en cuanto a la humedad relativa, el modelo presenta errores que oscilan entre el 8-16% siendo los más altos recogidos durante la noche. Se observa un sesgo negativo durante todo el día (-4%) y especialmente durante la noche, alcanzando el -9% para las estaciones rurales. Los sesgos de humedad relativa pueden estar relacionados con sesgos encontrados, por ejemplo, en la temperatura, pero tienen valores no tan buenos porque los patrones de superficie y los ciclos día/noche no se resuelven tan bien como con las temperaturas ([Jiménez-Esteve et al., 2018](#); [Jandaghian et al., 2018](#); [Ribeiro et al., 2020](#);) )

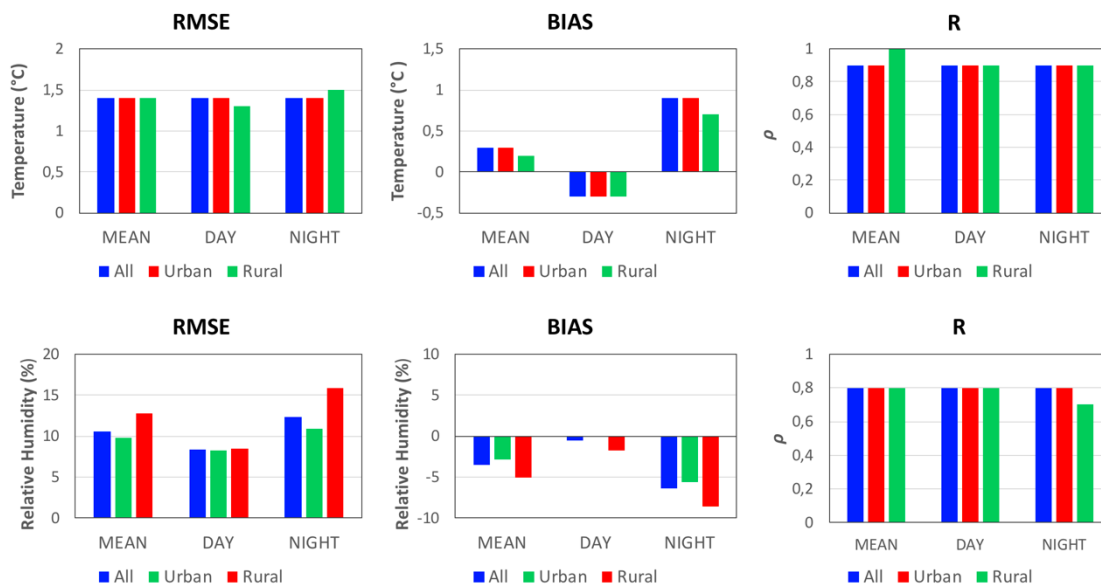


Figura 5.5 Resumen de los índices de validación (RMSE, BIAS y R) para temperatura y humedad relativa diferenciando (el total del día, día y noche)

Bajo el análisis y discusión que se ha presentado, el modelo se ha utilizado como caso de referencia y se usa en la comparación con cada escenario propuesto de mitigación. En la figura 5.6 podemos ver cómo las temperaturas máximas superan los 35°C durante el día. Esto se sucede en las zonas más interiores del área de estudio, donde hay menos influencia termorreguladora del mar. Se registra un máximo de alrededor de 34-35°C en

el centro de la ciudad de Barcelona. Esta temperatura máxima puede ser superior a los 4°C en comparación con un área periurbana como el aeropuerto del Prat. Durante la noche, el fenómeno UHI se maximiza, intensificando las diferencias hasta valores de 5°C. Durante el día, las temperaturas más bajas oscilan entre los 28°C y los 30°C y se ubican en áreas con vegetación más abundante o áreas con mayor altitud donde el gradiente vertical es más influyente. Durante la noche, las temperaturas más bajas oscilan alrededor de los 23°C y la máxima registrada en el centro de Barcelona es de 29.9°C (es por la noche cuando las temperaturas más altas de toda el área de estudio ocurren en Barcelona). Las temperaturas mínimas nocturnas registradas se consideran todas tropicales ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) y para la mayoría de las áreas urbanas del AMB las temperaturas registradas se consideraron tórridas ( $>25^{\circ}\text{C}$ ). Estas temperaturas tan elevadas y consistentes durante toda la noche debido al efecto de UHI en los centros urbanos, son consideradas un factor de riesgo para la salud de las personas, ya que la población está completamente expuesta y es durante la noche cuando existen más problemáticas derivadas ya que dificulta el descanso (Tan et al., 2010).

En términos del viento como agente regulador, podemos observar los efectos de la brisa diurna, con viento débil (alrededor de 10 km/h), y una brisa nocturna que apenas existe. La estabilidad fue muy marcada como se discutió en el análisis sinóptico. El nivel de humedad relativa durante el día estuvo entre 30-40%, lo que indica que la temperatura de bochorno fue 1-2°C (en algunas áreas) más elevada que la temperatura del aire seco en algunos casos (Rothfus et al., 1990). Este hecho aumenta los problemas de estrés debidos al calor ya que la temperatura experimentada por el cuerpo es la que se relaciona con la temperatura de bochorno. Durante la noche, la humedad aumentó del orden de un 10%, pero la temperatura disminuyó, lo que se tradujo en una temperatura de bochorno aproximadamente igual que la temperatura del aire seco.

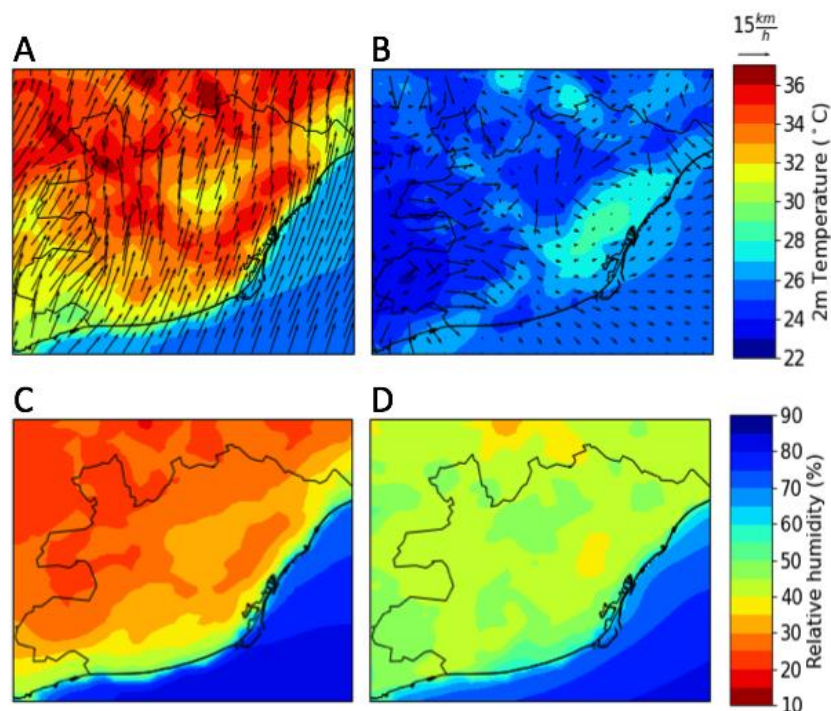


Figura 5.6 Valores promedio de tres días de HW (4-7 julio 2015): a) Temperatura y dirección del viento a 2m durante el día (valor medio diurno), b) Temperatura y dirección del viento a 2m durante la noche (valor medio nocturno), c) RH durante el día, d) RH durante la noche. Obtenidos de la simulación del caso de referencia.

Escenarios	$\Delta T_{media}$	$\Delta T_{media}$	$\Delta T_{media}$	MAX (°C)	MAX (°C)	MAX HW (°C)	MAX HW (°C)
	total (°C)	Día (°C)	Noche (°C)				
Referencia	29.43	32.36	26.5				
A0.85	-0.41	-0.57	-0.24	-3.83	-1.63	-1.79	-0.63
V2	-0.14	-0.15	-0.17	-1.70	-1.24	-0.72	-0.41
V5	-0.41	-0.53	-0.29	-2.46	-1.90	-1.03	-1.18
A0.85V5	-0.8	-1.09	-0.51	-4.73	-1.91	-2.37	-1.18

Tabla 5.4 Resumen de valores de los escenarios con respecto al caso de referencia.

### 5.5.1 Modelización con tejados fríos (A0.85)

En este apartado nos centraremos en el escenario de tejados fríos (A0.85). En el apartado 5.6 de discusión y conclusiones se comentará el efecto que tendría sobre albedos menores. En este escenario, la radiación neta se reduce considerablemente durante el día debido al aumento del albedo, lo que favorece un enfriamiento significativo de la ciudad durante el día. Durante la noche, en cambio, los resultados son menos notables porque

no hay radiación de onda corta y el albedo no hace efecto. Sin embargo, existe un efecto derivado del albedo ya que observamos también una disminución leve de la temperatura debido al menor almacenaje de calor, provocando una disminución (aunque menos importante) durante la noche (Li et al., 2014).

Se ha estimado una reducción máxima de 1.63°C y 3.83°C durante la noche (5:00 UTC) y el día (13:00 UTC), respectivamente. Las reducciones medias de la temperatura urbana son de 0.57°C y 0.24°C (tabla 5.4). Estas diferencias se representan en la figura 5.7, y representan las reducciones el día y la noche.

Durante el día, las reducciones máximas de los picos afectan las áreas densamente urbanizadas en el centro de la ciudad donde el área total de los tejados es más alta debido a la compacidad y, por lo tanto, más áreas de superficies se ven afectadas por el aumento de albedos. En la figura 5.7, se puede ver que el efecto de la leve brisa marina (generalmente al mediodía) extiende el efecto de los tejados fríos por advección al área rural del interior y áreas urbanas no modificadas. Durante la noche, como ya se ha comentado, las diferencias de temperatura son menos pronunciadas, con descensos alrededor de 0.4°C.

La aplicación de cubiertas frías en edificios urbanos y polígonos industriales provoca una reducción significativa de la temperatura, aunque de forma heterogénea, ya que existe una variabilidad tanto temporal (día/noche) como espacial (morfologías urbanas y rurales). La heterogeneidad de la superficie hace que el albedo afecte de manera diferente según la densidad de edificaciones que tenga cada LCZ (fig 5.9). Este efecto de los tejados fríos se amplifica con las superficies más densas y compactas (LCZ 1- LCZ 2- LCZ 8) con diferencias de temperatura superiores a 1.5°C en detrimento de los edificios más dispersos (por ejemplo, la LCZ 5) con descensos de temperatura en torno a 0.8°C.

Con respecto a la humedad relativa (fig 5.8), ya se ha discutido su mayor incertidumbre. Dicho esto, conviene señalar que esta incertidumbre aumenta en mayor medida durante el día en que el efecto del albedo es mayor. Este aumento se debe a una disminución en la altura de la capa límite (PBL), causada por la disminución de los flujos de calor sensible turbulento de las áreas urbanas. Cuanto mayor sea la disminución del

calor sensible, menor será la altitud de la capa límite y habrá menos mezcla turbulenta. La disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa pueden influir en el aumento de la temperatura de bochorno. Sin embargo, no será significativo en la región de nuestro estudio dado que, en el escenario, la humedad relativa no aumenta más del 1.5% si se compara con el caso de referencia (la diferencia es mayor durante el día que durante la noche). Durante la noche el aumento de humedad es menor y no afectará sobre la temperatura de bochorno. Además, el viento también disminuye, pero de manera irrelevante.

La figura 5.10 muestra cómo el aumento del albedo aumenta la radiación reflejada de onda corta y por tanto la radiación neta disminuye, provocando una disminución de la temperatura con un máximo registrado al mediodía. Esto provocará una disminución de la temperatura sensible, como ya se ha relatado. Hacia el mediodía se puede observar una leve disminución del flujo de calor latente, lo que posiblemente podría explicarse por el mencionado aumento de la humedad del aire, que limita la evapotranspiración de las zonas urbanas permeables por la disminución del gradiente de presión de vapor.

Observamos también en la figura 5.10, una disminución del flujo de radiación neta durante las horas diurnas con un pico de reducción de  $77\text{W}/\text{m}^2$  a las 12:00 UTC, y que corresponde al incremento de la reflectividad de las azoteas de los edificios. Este incremento de la reflectividad hace disminuir la absorción de radiación de onda corta con la correspondiente disminución de temperatura en superficie. Debido a esto, se observa que la disminución del flujo de radiación neta hace disminuir principalmente el flujo de calor sensible entre la superficie y la atmósfera, con un pico de reducción de  $88\text{W}/\text{m}^2$  también a las 12:00 UTC. Aun así, este escenario también afecta indirectamente a la componente latente del balance energético haciendo que disminuya con un máximo de  $5\text{W}/\text{m}^2$ . La reducción del flujo de calor sensible desde las azoteas de los edificios limita el crecimiento por convección de la capa límite, que en casos de cielo abierto y periodos de gran radiación aumenta hasta pasado el mediodía por los movimientos verticales de aire caliente de la superficie. Esto se manifiesta en una PBL más baja, como se puede ver en la figura 5.11 con una diferencia máxima de 168m respecto al escenario de referencia,

y correspondientemente, menos levantada de mezcla para distribuir de forma uniforme la temperatura potencial, humedad y momento, incrementando ligeramente los valores en superficie. Finalmente, la reducción de la temperatura de la superficie de los tejados de los edificios hace que menos energía se transfiera en forma de calor a capas más internas de los materiales urbanos, el que se ve reflejado en un pico de reducción del flujo de calor sensible de  $28\text{W}/\text{m}^2$  a las 8:00 UTC.

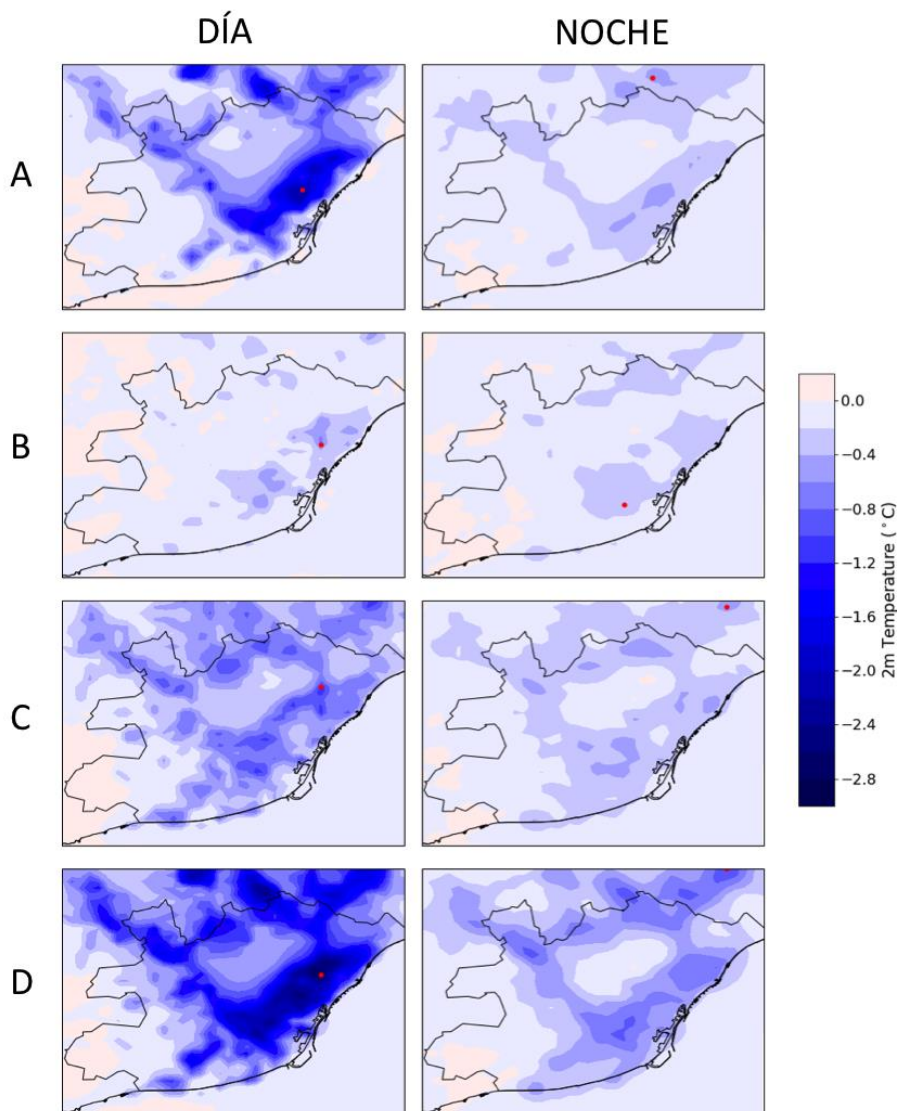


Figura 5.7 La diferencia de temperatura a 2m entre el caso de referencia y los escenarios: a) A0.85, b) V2 c) V5 y d) A0.85V5. La temperatura de 2 m es la temperatura promedio durante el día y durante la noche) para los tres días más calurosos de la simulación de ola de calor.



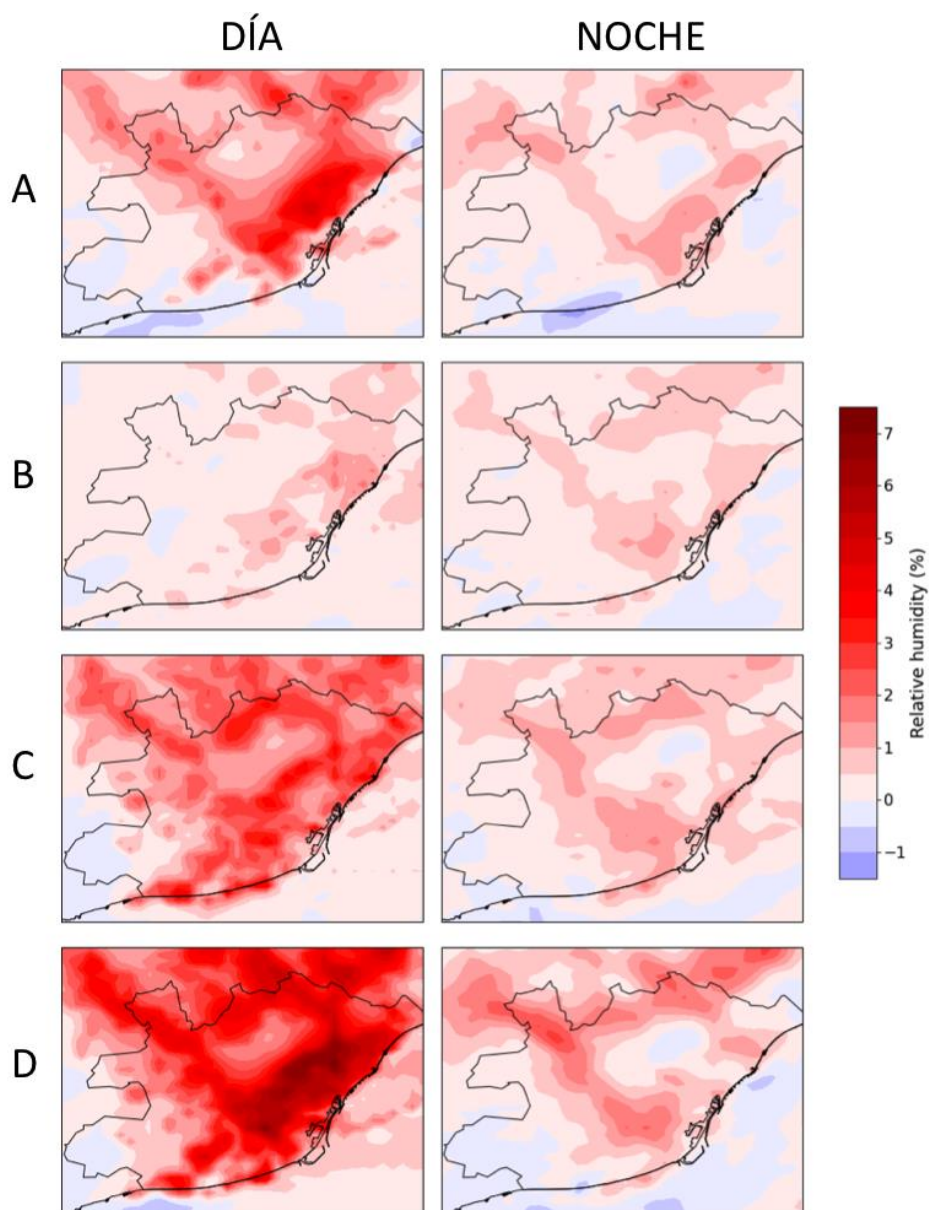


Figura 5.8 La diferencia de humedad relativa entre el caso referencia y los escenarios: a) A0.85, b) V2 c) V5 y d) A0.85V5. La humedad relativa promedio durante el día y durante la noche para los tres días más calurosos de la simulación de ola de calor.

### 5.5.2 Modelización con incremento de vegetación e irrigación (V2 y V5)

En este subapartado nos centraremos en dos escenarios: el escenario de incremento de vegetación basado en los planes directores urbanísticos del Área Metropolitana de Barcelona y el escenario de vegetación con incremento de riego. En el apartado 5.6 de discusión y conclusiones se comentará el efecto que tendría sobre un hipotético



incremento de riego sin aumento de verde, para poder ser comparados y discutidos entre ellos.

Al reemplazar las áreas impermeables con superficies verdes propuestas por el Plan Director Urbanístico del AMB, se reduce la capacidad de almacenamiento térmico de la superficie de la ciudad. Como podemos ver en la figura 5.8a, la temperatura disminuye en ambos escenarios. Los dos, muestran aproximadamente un aumento del 4% en el área de superficie verde sobre área urbana, como se explica en la sección 5.

El simple aumento de la irrigación provoca que el proceso de evapotranspiración influya sobre el aumento el calor latente en detrimento del calor sensible. Este proceso provoca una disminución de la temperatura media. Hemos estimado una reducción máxima de temperatura de 1.90°C a 2.46°C durante la noche (4:00 UTC) y el día (15:00 UTC), respectivamente (tabla 5.4) para el escenario V5.

Las reducciones de temperatura promedio son de 0.53°C a 0.29°C, mostradas en la figura 5.7, respectivamente. En el escenario V2, la disminución promedio de la temperatura en todas las áreas urbanas durante los tres días de ola de calor es de 0.14°C. Por la noche, la disminución es ligeramente mayor (0.17°C). Estos pequeños cambios en la temperatura cercana a la superficie en comparación con la modificación del albedo pueden explicarse debido al bajo impacto de la modificación de la fracción urbana y la baja disponibilidad de humedad del suelo para la evapotranspiración. En este escenario, se obtienen mejores resultados durante la noche a diferencia de los otros escenarios cuyos efectos son mayores durante el día. Como hemos explicado es durante la noche cuando las altas temperaturas causan problemas de salud más graves. La figura 5.7 muestra cómo la disminución de la temperatura se ubica alrededor de las áreas donde se han producido los cambios más significativos en el aumento de la vegetación.

En el escenario V5 donde el riego ha aumentado en 3l/m<sup>2</sup> con respecto al caso de referencia (por tanto, un total de 5l/m<sup>2</sup>), obtenemos resultados más favorables en términos de reducción de temperatura. El aumento de riego provoca que el proceso de evapotranspiración aumente el calor latente en detrimento del calor sensible (fig 5.10). Este proceso provoca una disminución de la temperatura promedio en todas las áreas

urbanas de nuestra región de interés de hasta  $0.27^{\circ}\text{C}$  (con respecto a V2). Observamos temperaturas inferiores a  $1.6^{\circ}\text{C}$  en comparación al caso de referencia. En este escenario, a diferencia de V2, las diferencias más notables en la disminución de la temperatura son durante las horas diurnas, porque el proceso de evapotranspiración ocurre durante el día cuando hay radiación incidente de onda corta. La reducción de la temperatura se encuentra en las áreas circundantes de los centros urbanos porque es imposible reemplazar o aumentar estas áreas con vegetación. Por lo tanto, para áreas urbanas más densas, la advección debida a la suave brisa marina del aire más frío de las áreas verdes circundantes puede reducir la temperatura en áreas no modificadas.

La humedad relativa (fig 5.8) también aumenta más durante el día y puede alcanzar un 2.1% más (en promedio en toda nuestra área de estudio). La capa límite también disminuye con respecto al caso de referencia y, por lo tanto, también afecta el aumento de la temperatura promedio (fig 5.11).

Como se muestra en la figura 5.10, el flujo de radiación neta para ambos escenarios (V2 y V5) es ligeramente positivo con respecto al caso de referencia, con un aumento más notable en V5. Esto se explica por la reducción de la radiación de onda larga emitida debido a una temperatura más baja de la superficie. Este factor es insignificante durante el día en detrimento de los flujos de radiación de onda corta en comparación con el escenario de referencia.

Para el calor latente (fig 5.10), que en el caso de V5 aumenta con un máximo registrado a las 12:00 UTC, debe tenerse en cuenta que este aumento del calor latente por evapotranspiración como resultado del riego, produce una disminución de la temperatura sensible. Durante el día, la capa de mezcla es más grande y necesita una mayor reducción en el flujo sensible para disminuir la temperatura (fig 5.10). Esto se debe a que se distribuye prácticamente de manera uniforme en la capa de mezcla. Por otro lado, durante la noche la capa límite es más baja. Esto se debe a una pequeña reducción en el flujo sensible que permite una reducción considerable de la temperatura ya que no hay tanto aire dentro de la capa límite. En cuanto a la evolución temporal en la figura 5.9, vemos cómo LCZ 2 registra las mayores diferencias de temperatura. Para

V5 (incremento de verde y riego), el efecto máximo de reducción térmica se registra entre 10:00-11:00 UTC, mientras que para V2 (incremento de verde) es más temprano. Por otro lado, refiriéndonos a LCZ 6 y áreas naturales, vemos que las diferencias son casi inexistentes porque para la LCZ 6 no hay intervenciones de aumento de la vegetación, ya que constituyen áreas menos densas con más mezcla de superficie vegetal.

Para el caso de los escenarios V2 y V5 se observan mecanismos de enfriamiento diferente entre ellos. El incremento en la disponibilidad de agua en las capas superficiales y/o el incremento de la vegetación permiten aumentar la evapotranspiración, ya sea evaporación directa del suelo o transpiración a través de la vegetación, aumentando los flujos de calor latente, con picos de  $12.5\text{W/m}^2$  a las 10:00 UTC y  $78\text{W/m}^2$  a las 13:00 UTC, por los escenarios V2 y V5, respectivamente (fig 5.10). Debido a que la variación del flujo de radiación neta es mucho menor que el aumento del calor latente, el flujo de calor sensible, sobre todo, y el calor almacenado en capas internas del suelo disminuyen, lo que hace disminuir la relación de *Bowen* (cociente entre el flujo sensible y el latente) comportando un enfriamiento radiativo. En el caso del escenario V2, a diferencia del escenario V5, el impacto se ve en una mayor disminución de flujo de calor sensible en la hora de mayor incremento de calor latente, en comparación con la disminución del flujo de calor sensible. Esto implica que el mayor impacto en la temperatura se vea durante la noche en vez del día, puesto que hay un menor calor retenido en las capas más internas del suelo que es liberado a la atmósfera. Hay que remarcar también, que en estos dos escenarios se observa un aumento ligero del flujo de radiación neta, provocado en parte por la disminución del albedo al estar el suelo húmedo y también debido a la disminución de la temperatura en superficie del suelo que afecta al balance de intercambio de radiación de onda larga.

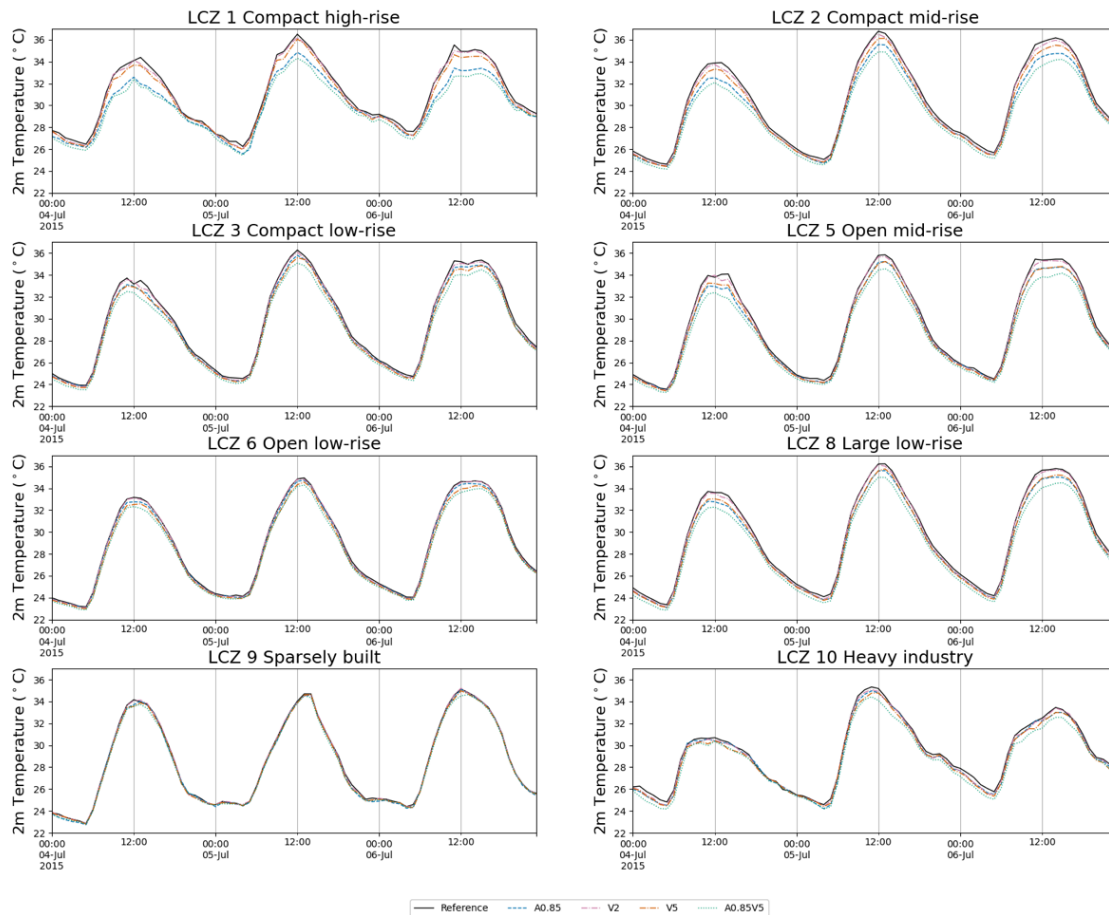


Figura 5.9 Perfil temporal de tres días HW basado en las diferentes LCZ para el caso de referencia, A0.85, V2, V5 y A0.85V5.

### 5.5.3 Escenario combinado

En este caso, se ha elegido una combinación de los escenarios más óptimos; uniendo A0.85 (albedo medio de 0.85) y V5 (incremento de vegetación+riego de  $5l/m^2$ ). Por lo tanto, es el escenario más eficiente ya que se obtienen los mejores resultados de mitigación (fig 5.7). El escenario A0.85V5 muestra que se complementan muy bien entre sí. Durante el día, los dos escenarios son muy eficientes, aunque destaca el A0.85 como el más eficiente. Además, el escenario A0.85 ayuda a reducir la temperatura en las zonas centrales y densas de las áreas urbanas, como se mencionó anteriormente. El escenario V5 ayuda a reducir la temperatura en zonas de nueva construcción ubicadas en zonas más periféricas. Es por esta razón que la complementariedad entre los dos escenarios conduce a los mejores valores de reducción térmica en términos de mitigación.

Este escenario combinado es importante porque los escenarios A0.85 y V5 reducen las temperaturas en diferentes momentos del día, por lo que la acción combinada da como resultado un período de tiempo más largo con temperaturas más bajas.

Aplicando el escenario combinado hemos estimado una reducción máxima de 1.91°C y 4.73°C durante la noche 22:00 UTC y el día 13:00 UTC, respectivamente (tabla 5.4). Las reducciones de temperatura promedio son 1.09°C y 0.51°C, mostradas en la figura 5.7, respectivamente. Este es el resultado de la combinación de los dos efectos: albedo y evapotranspiración. Durante la noche el efecto es menor, siendo el efecto de la vegetación más efectivo que el del albedo. En este escenario, la capa límite también es menor con respecto al caso de referencia y al resto de escenarios. Por tanto, habrá una mayor concentración de humedad (fig 5.8), con un aumento del 3.5%. Este aumento también ayudará a disminuir el calor sensible, ya que la retención de humedad hace que la atmósfera se sature y dificulte los procesos de evapotranspiración.

Los perfiles temporales (fig 5.9) muestran una disminución máxima en la LCZ 2 con diferencias durante el máximo 12.00 UTC de hasta 2°C y hasta 0.5°C durante la madrugada. Esta disminución menos pronunciada también se observará en los casos, por ejemplo de las LCZ 8 o LCZ menos densas donde las diferencias serán más pequeñas, registrando valores máximos de alrededor de 0.5°C. La LCZ 2 presenta un flujo de radiación neta mayor que todas las LCZ analizadas, debido que tiene más superficie de captación y un flujo de radiación neta superior, en cambio la LCZ 8 tiene una relación tejado/superficie menor aparte de ser menos compacta y tener edificios más anchos. En el caso de la LCZ 9 no hay efecto de reducción de temperatura, debido que son regiones donde tampoco se alteró el albedo y además pertenecen a partes más alejadas de la zona urbana y, por lo tanto, del posible efecto *buffer* de categorías como la LCZ 2 o LCZ 8. Para el caso de las LCZ 10, es parecido al de las LCZ 6, no se les ha alterado el albedo pero son zonas próximas a las LCZ 8 ya que son fábricas rodeadas en muchos casos por polígonos industriales.

En cuanto a los flujos (fig 5.10), vemos cómo la diferencia de radiación neta es negativa con respecto al caso de referencia, pero no en exceso ya que el escenario V5 la

ralentiza. También observamos cómo el calor sensible disminuye bruscamente porque el calor latente es muy alto. Estos máximos se registran durante el mediodía, cuando los procesos de enfriamiento son más activos. Durante la noche, la temperatura muestra una disminución promedio de 0.8 a 1°C. Esta disminución es notable ya que puede favorecer positivamente la disminución de los problemas de salud relacionados con el calor, ya que es de noche cuando estos problemas son más relevantes.

Se observa una reducción de temperatura proporcional a la suma de los dos escenarios anteriormente mencionados debido a que los dos mecanismos no se contrarrestan prácticamente entre ellos al afectar diferentes procesos en superficie. En este escenario se observa un pico de reducción del flujo de calor sensible de  $158\text{W}/\text{m}^2$  a las 12:00 UTC correspondiente al periodo de máxima insolación solar (fig 5.10). Aun así, observamos un aumento en el flujo de radiación neta respecto al escenario A0.85 durante los máximos de radiación solar (a las 12:00 UTC) debido a los procesos antes mencionados; una mayor absorción de radiación corta debido a la ligera disminución del albedo y una disminución de emisión de onda larga debido a la disminución de la temperatura en superficie. También observamos una disminución del pico de flujo de calor latente respecto al escenario V5 debido a la disminución de la capa límite, que logra una diferencia media máxima de 283m, con el consecuente incremento de la humedad en superficie que limita la evapotranspiración (fig 5.11).

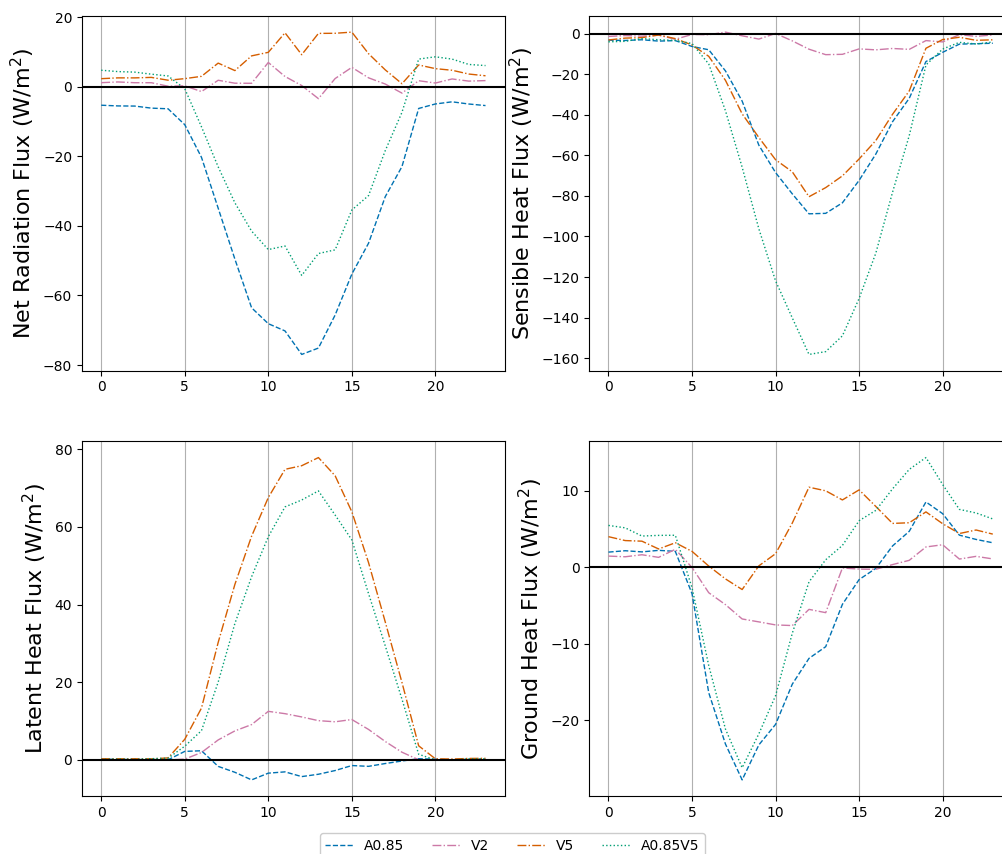


Figura 5.10 Promedio respecto el caso de referencia de tres días de HW en balance energético: flujo neto de radiación (*net radiation flux*); flujo de calor sensible (*sensible heat flux*); flujo de calor latente (*latent heat flux*) y flujo de calor del suelo (*ground heat flux*).

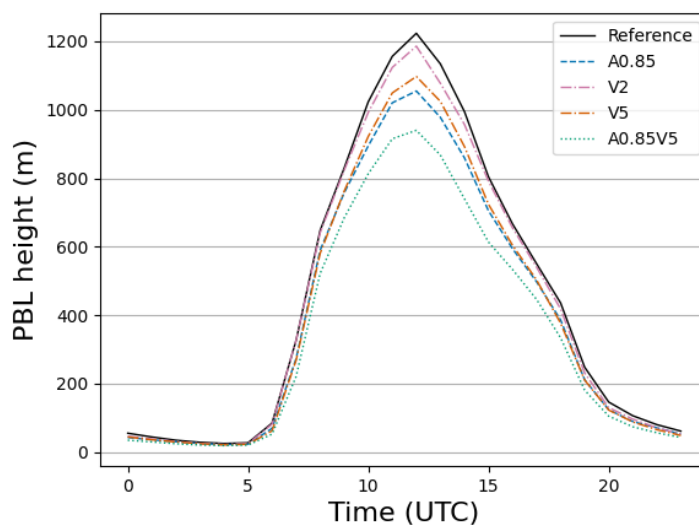


Figura 5.11 Altitud de la capa límite para el caso de referencia y los diferentes escenarios A0.85, V2, V5 y A0.85V5.

### 5.5.4 Ahorro energético por estrategias de mitigación.

El efecto de enfriamiento de los escenarios, comportará entre otros un menor uso de aire acondicionado, lo que conllevará a una nueva reducción de las temperaturas al liberarse menos calor antropogénico a la atmósfera. Aunque la contribución del uso reducido de aire acondicionado a temperaturas más bajas no es muy importante, los ahorros de energía sí lo son y en consecuencia el ahorro en toneladas de CO<sub>2</sub> enviadas a la atmósfera. La figura 5.12 muestra cómo este efecto es más significativo para el escenario combinado a las 16:00 UTC, cuando hay una reducción del 23% del consumo de energía de aire acondicionado. En promedio el consumo eléctrico de los 3 días de HW fue de 58.3GWh lo que supone una reducción del 25% en el combinado, un 16% por tejado frío, 9% incremento de vegetación, 10% incremento vegetación y riego.

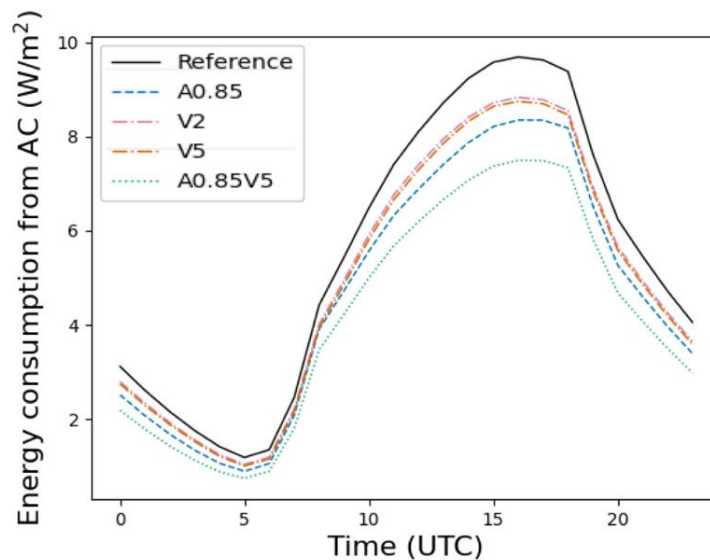


Fig. 5.12 Perfil medio diario de flujo de calor antropogénico debido a unidades de aire acondicionado en área urbana de AMB.

## 5.6. Discusión y conclusiones

Este capítulo presenta diversas estrategias de mitigación del aumento de temperatura en una ciudad ante un contexto de ola de calor: tejados fríos aumentando albedo, incremento del verde urbano y del riego, y una combinación de ambas.



En este apartado de discusión y conclusiones se comentan y comparan los escenarios propuestos con otras las simulaciones complementarias. De este modo se derivará una mayor rigurosidad y conocimiento ante las estrategias de mitigación presentadas.

En el caso de las simulaciones de tejados fríos, se han hecho dos simulaciones complementarias; disminuyendo la intensidad del albedo a 0.70 y 0.55, entendiendo que con el transcurso del tiempo el material y el color se van deteriorando. La simulación a 0.55 quiere mostrar resultados con albedos no considerados tejados fríos ( $>0.65$ ). En el escenario A0.70 y A0.55 la diferencia máxima se localiza en el mismo intervalo de tiempo que el escenario A0.85, con diferencias inferiores al  $1^{\circ}\text{C}$  en las zonas urbanas. La diferencia térmica va disminuyendo del orden de  $0.4^{\circ}\text{C}$  entre A0.85-A0.70 y A0.70-A0.55, por lo tanto, con el paso de los años si no hay ninguna intervención la temperatura irá tendiendo hacia el escenario de referencia (fig 5.13). Durante la noche, tal y como hemos comentado, las diferencias de temperatura son menos acusadas con disminuciones entre  $0.4^{\circ}\text{C}$  en el A0.85 y de  $0.2^{\circ}\text{C}$  en el escenario A0.55. Los patrones de comportamiento de las simulaciones A0.55 y 0.70 son similares, pero con intensidades de enfriamiento inferiores al escenario planteado A0.85.

Podemos concluir que la estrategia combinada es más efectiva durante el día, puesto que la capacidad de almacenar calor en una superficie blanca será menor que en otras superficies que lo absorben más. En este sentido, observamos reducciones de hasta  $3.8^{\circ}\text{C}$  durante el día y  $1.6^{\circ}\text{C}$  durante la noche. Durante la noche el enfriamiento es menos efectivo, de todos modos la radiación de ola larga será menor y por tanto también lo será el enfriamiento (fig 5.14). En término medio, la reducción de temperatura para toda la región de estudio es de  $0.6^{\circ}\text{C}$  durante el día y  $0.2^{\circ}\text{C}$  durante la noche.

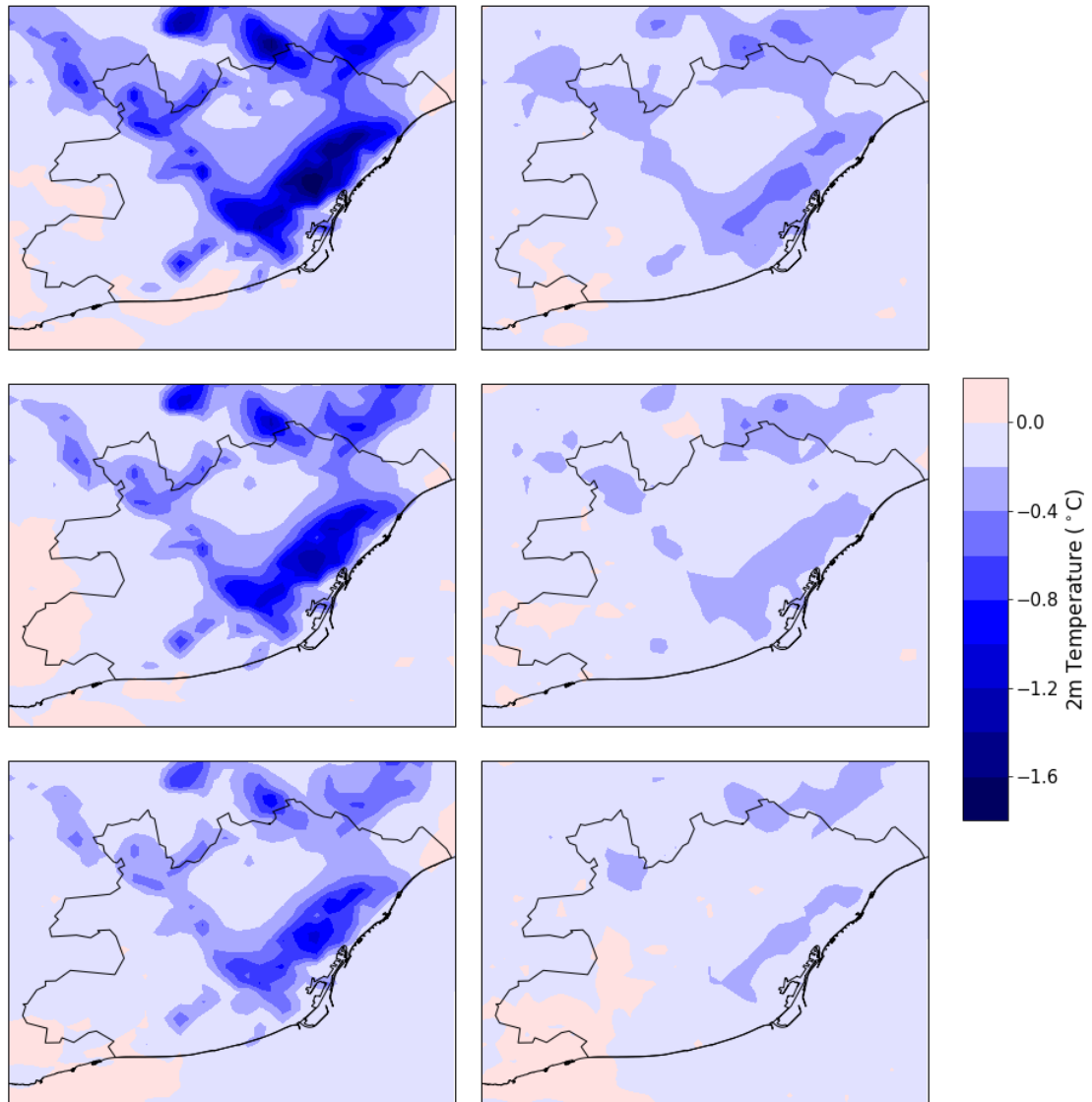


Figura 5.13 Diferencias entre el caso de referencia y A0.85, A0.70 y A0.55 (de arriba un): a) Temperatura 2m durante el día (izquierda) durante la noche (derecha)

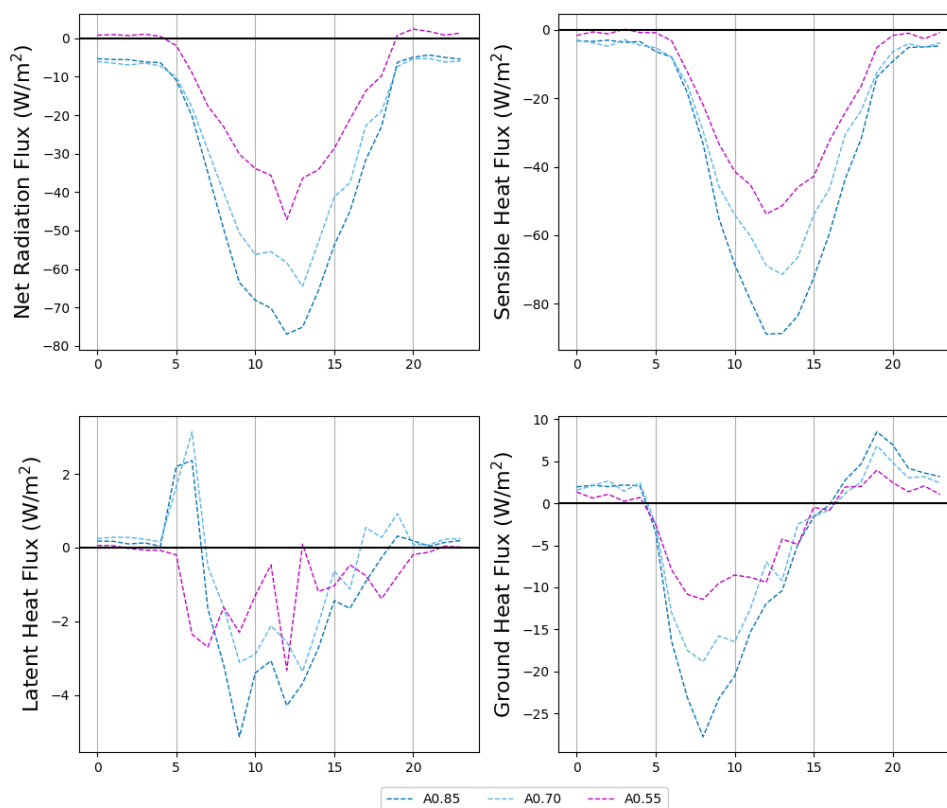


Figura 5.14 Promedio respecto al caso de referencia de tres días de HW en balance energético para los escenarios de techados fríos: (a) flujo neto de radiación; (b) flujo de calor sensible; (c) flujo de calor latente (d) flujo de calor del suelo.

Haciendo referencia al escenario de mitigación presentado donde se incrementa el verde urbano y el riego en  $3\text{l/m}^2$ , se ha hecho una simulación complementaria incrementando el verde pero manteniendo el riego constante a  $2\text{l/m}^2$  (V2) tal y como está definido el caso de referencia, así como una simulación incrementando el riego  $3\text{l/m}^2$  pero manteniendo constante el verde actual (R5). Podemos observar como en el primero de los casos V2, la temperatura se reduce menos que en el escenario propuesto V5. Esto es debido que el riego provoca un aumento de calor latente en detrimento del calor sensible y provoca una reducción del calor, no solo por el propio incremento de verde (fig 5.16). En este caso observamos que, sin alterar el riego, el enfriamiento más efectivo será durante la noche (el único de todos los escenarios estudiados). En todo caso, las diferencias entre ambos escenarios y en término medio son de  $0.5^\circ\text{C}$  durante el día y de  $0.2^\circ\text{C}$  durante la noche (fig 5.15). En cuanto a la simulación de incremento de riego sin aumentar el verde, observamos como los resultados son más efectivos durante el día en

---

comparación al escenario V2. En este caso nos encontramos alrededor de  $0.1^{\circ}\text{C}$  más eficiente en término medio. Será durante la noche cuando el enfriamiento será más efectivo en el escenario V2 que en el de incremento de riego sin verde R5. Alrededor de las zonas donde se ha incrementado el verde, las diferencias pueden llegar a  $0.7^{\circ}\text{C}$ . En conclusión, podemos decir que ambos escenarios aportan características de enfriamiento diferentes: en el escenario V2 nos ayuda a enfriar la temperatura durante la noche y en el escenario V5 observamos más eficiencia durante el día.

En el Área Metropolitana de Barcelona, el sistema de riego está contemplado en los parques y por tanto sería en estas zonas donde se podría adaptar la estrategia conjunta y más efectiva, que puede llegar a hacer disminuir la temperatura hasta  $2.46^{\circ}\text{C}$ . En términos medios, observamos disminuciones por toda el área de estudio de hasta  $0.5^{\circ}\text{C}$  durante el día y  $0.3^{\circ}\text{C}$  durante la noche.

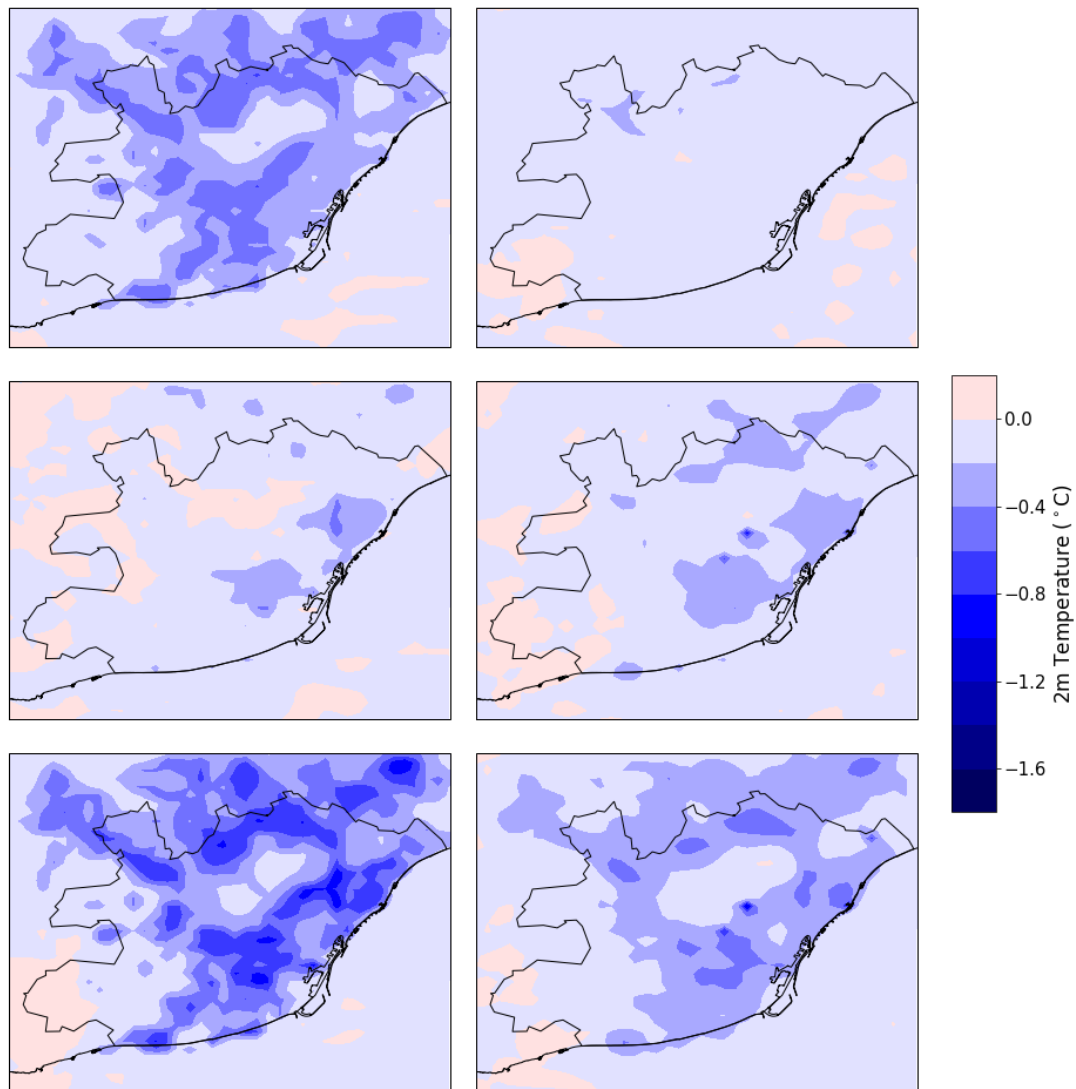


Figura 5.15 Diferencias entre el caso de referencia y, R5, V2 y V5 (de arriba un): a) Temperatura 2m durante el día (izquierda) durante la noche (derecha)

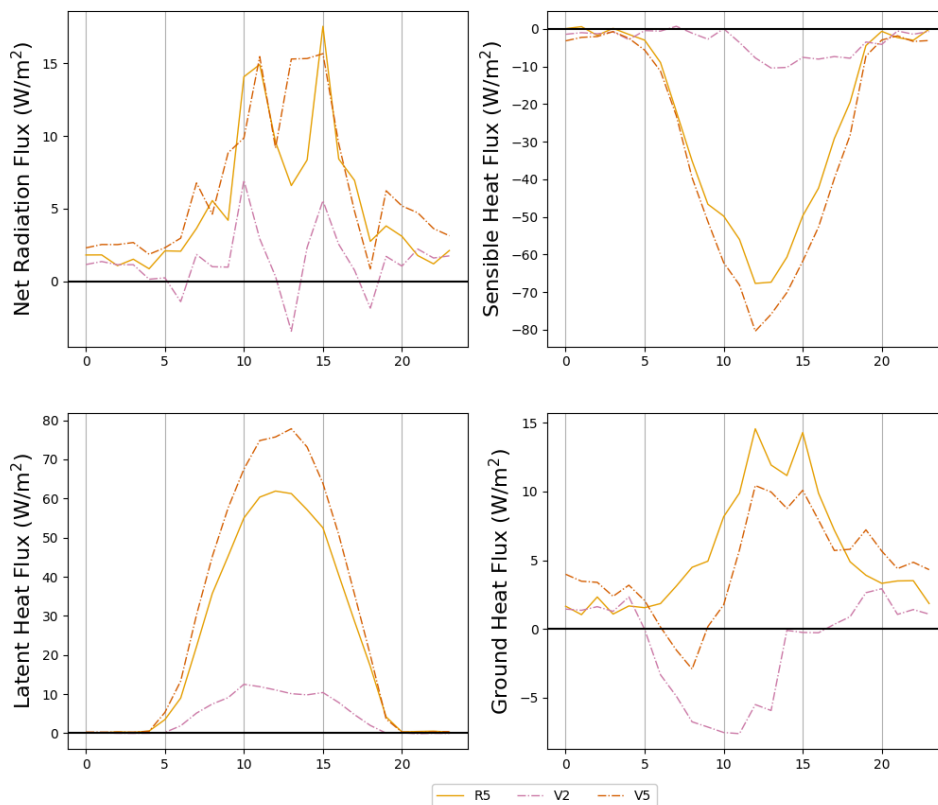


Figura 5.16 Promedio respecto al caso de referencia de tres días de HW en balance energético para los escenarios de incremento de verde e irrigación: (a) flujo neto de radiación; (b) flujo de calor sensible; (c) flujo de calor latente (d) flujo de calor del suelo.

Por último, el escenario más efectivo en cuanto a disminución de la temperatura es el definido por la estrategia de mitigación de tejados fríos y el de incremento de verde urbano y riego (A0.85V5). Este último, diseñado como la suma de los dos escenarios previos, acabará representando la mejor estrategia con disminuciones de temperatura muy significativas. Se han observado reducciones máximas de hasta  $4.7^{\circ}\text{C}$  durante el día y de  $1.9^{\circ}\text{C}$  durante la noche con una reducción media en toda la región de estudio de  $1.9^{\circ}\text{C}$  durante el día y  $0.5^{\circ}\text{C}$  durante la noche.

Además de documentar en detalle la efectividad de las estrategias de mitigación, en este capítulo se han resuelto limitaciones de detalle y escala. Se ha trabajado con un modelo WRF BEP+BEM que permite incluir una resolución muy elevada de las características urbanas de la ciudad y su interacción con la capa límite. Estas características han permitido simular un caso de estudio con errores RMSE por debajo del  $1.5^{\circ}\text{C}$  y de BIAS por debajo del  $0.5^{\circ}\text{C}$  y como consecuencia han permitido diseñar

---

planes de mitigación sobre el entramado urbano. Estos planes de mitigación se han podido acoplar de forma muy realista debido al alto detalle que se ha conseguido gracias también a la colaboración con el área Metropolitana de Barcelona que nos ha proporcionado los Planes Directores Urbanísticos que quiere aplicar. Es por esto por lo que los resultados no son experimentos ni diseños hipotéticos, sino que se basan en estrategias predefinidas.

Este capítulo nos da resultados muy aproximados y realistas de las estrategias de mitigación de temperatura que se pueden aplicar en el área Metropolitana de Barcelona. Al mismo tiempo la metodología que se ha aplicado en la preparación de las simulaciones para incluir el entramado urbano de alta resolución dentro del modelo, puede ser replicada en otras regiones y estudios. De cara a un trabajo futuro se está mejorando la resolución espacial de 1km llegando a los 333m para poder aprovechar más el detalle que se consigue del entramado urbano.

Las herramientas aportadas y analizadas en este capítulo representan un óptimo punto de partida y de generación de utilidad en la toma de decisiones en la organización y diseño para poder realizar estrategias de sostenibilidad y resiliencia frente al cambio climático que se incrementará en las ciudades debido a una alta y creciente exposición.

# 6. SERVICIOS DE GEOINFORMACIÓN: TRANSFERENCIA, EVALUACIÓN DEL PRODUCTO Y OTRAS FUNCIONALIDADES.

En este capítulo se enfoca la componente más operacional de un doctorado industrial. Partiendo de esta premisa, este último capítulo se descompone en tres apartados, el primero está enfocado a la transferencia de conocimiento y se basa en la documentación y flujo de trabajo creados para la replicación de procesos explicados en los capítulos anteriores. La finalidad es la de obtener un repositorio para producción de servicios cartográficos y temáticos desde una perspectiva climática. El segundo apartado se enfoca en la evaluación del producto de geoservicio. Y el tercer apartado se centra en la aplicación de la metodología de las LCZ en otros ámbitos no directamente relacionados con el comportamiento térmico, en este caso para la desagregación de datos espaciales de un modelo de emisiones. El subíndice del capítulo es el siguiente:

6.1 Introducción.....	159
6.2 Diseño del flujo productivo de geoinformación y tratamiento de datos.....	160
6.3 Análisis del impacto y los beneficios de los productos.....	191
6.4 Otras utilidades de las LCZ.....	195



## 6.1 Introducción

La tesis que aquí se presenta se enmarca en el programa de Doctorados Industriales diseñados por la Generalitat de Cataluña. Su finalidad tiene un cariz más práctico y con un objetivo específico que consiste en el de realizar una parte productiva y de transferencia de conocimiento hacia la entidad financiadora.

El elemento esencial del proceso de Doctorado Industrial es el proyecto de investigación de la empresa o institución en la que el doctorando desarrolla su formación investigadora, en este caso el *Institut Catogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) en colaboración con una universidad o centro de investigación en este caso la *Universitat de Barcelona*, y que es objeto de un proyecto de tesis doctoral. Los doctorados industriales actúan, de este modo, como puentes de transferencia de conocimiento y contribuyen a estrechar las relaciones entre el tejido industrial de Cataluña y las universidades y los centros de investigación.

Partiendo de esta premisa, este capítulo se divide en tres partes. Las dos primeras están sujetas a la producción y transferencia de conocimiento realizadas a lo largo del doctorado. El primer apartado (6.2) constituye un repositorio de las metodologías a nivel técnico, *workflows* y programas derivados de todo el estudio que se ha llevado a cabo en el marco de la tesis doctoral. Éstos se han implementado en diversos casos de estudio urbano en el ICGC con el objetivo de replicar las metodologías y poderlas aplicar en el territorio como un producto de uso y servicio para la sociedad. Esta transferencia se ha completado y se ha creado un repositorio de proyectos y programas para el ICGC. Es por ello que dentro del propio capítulo se ha optado por mostrar las operativas necesarias para su implementación. En el segundo apartado (6.3) se genera un análisis del impacto y los beneficios de los productos realizados gracias a la transferencia de conocimiento y que se han utilizado para hacer estudios de comportamiento térmico en otros municipios de Cataluña. Como ejemplo se anexa un estudio elaborado durante la Tesis para la localidad de Berga, siendo una realidad geográfica diferenciada con respecto a la ciudad

de Barcelona. Mientras se desarrollaba el Doctorado Industrial se diseñó un proyecto de sostenibilidad urbana en el ICGC dónde se analizaban los comportamientos térmicos, energéticos o de tipología de cubiertas entre otros productos, con la finalidad de realizar informes destinados al análisis de la sostenibilidad, a escala municipal. En el tercer apartado (6.4) se presenta una metodología basada en las *Local Climate Zones* desde una perspectiva no directamente climática. Se trata de un estudio que consiste en desagregar y aplicar un *downscaling* sobre salidas del modelo de emisiones de contaminación HERMES versión 2 (Guevara et al., 2013) a partir de las LCZ y una malla georreferenciada de datos poblacionales, con el objetivo de poder ampliar los usos de las LCZ y los productos de sostenibilidad con los que trabaja el ICGC.

## 6.2 Diseño del flujo productivo de geoinformación y tratamiento de datos.

Los sistemas de observación de la Tierra ofrecen una visión repetitiva, sinóptica y, por lo tanto, privilegiada del territorio. Las ventajas que una plataforma a cierta altura nos puede ofrecer han sido explotadas desde plataformas aéreas, durante más de un siglo. Relativamente reciente es el uso operacional de los sistemas satelitales. Hoy en día, el rango de resoluciones espectrales, espaciales y temporales proporcionadas por las plataformas de observación de la Tierra representa una ecuación de uso y aplicabilidad que se extiende a sistemas ópticos, térmicos o activos, como sistemas LiDAR o radares, y nos permiten acercarnos mejor al conocimiento del territorio, a la gestión de sus recursos, a los impactos, y a los cambios que producen.

La provisión de productos y servicios de geoinformación como herramientas para la ayuda a la toma de decisiones es un reto clave y a tal efecto y como uno de los objetivos principales de esta Tesis, se ha desarrollado la implementación operacional de sus resultados a través de un proceso de documentación y transferencia que seguidamente se relata.

Bajo el objetivo de facilitar la industrialización y transferencia de conocimiento hacia la empresa (en este caso ICGC) en la implementación de productos y servicios

focalizados en climatología urbana y observación de la tierra. Se ha llevado a cabo un trabajo de documentación donde se explican los pasos a nivel técnico y en algunos casos también los principios teóricos para recrear y realizar diferentes cartografías y metodologías que se han empleado en el contexto de la tesis doctoral. Esta tiene como objetivo investigar los ecosistemas urbanos desde una perspectiva holística a nivel climatológico y meteorológico utilizando como base la cartografía temática y la observación de la Tierra, así como los datos observacionales y salidas de modelos climáticos como el UrbClim y la preparación de los inputs WRF BEP+BEM.

A continuación, se exponen las principales fases o puntos principales de esta implementación de la que parte el trabajo de industrialización-documentación. El capítulo está pensado para que pueda ser tratado como una unidad independiente por el ICGC, por lo que no extrañe que en algún punto se vuelvan a definir conceptos que ya habían sido tratados, pero el los que se ha considerado necesario para poder comprender después la metodología propuesta.

### **6.2.1. Calculo de la Isla de Calor Urbana y obtención de mapas térmicos.**

La isla de calor urbana (UHI) es el microclima que se genera como consecuencia directa de la urbanización del territorio. Matemáticamente se expresa como la diferencia entre la temperatura urbana y la temperatura rural o peri-urbana de alrededor (cercana a la ciudad). Los efectos de UHI se incrementan durante la noche y son más notables durante el invierno.

Las alteraciones del medio producidas directamente por la ciudad son:

- a) Mayor almacenamiento de calor debido a las propiedades de los materiales de construcción
- b) Producción de calor antropogénico
- c) Disminución de la evaporación
- d) Menor pérdida de calor sensible

- e) Aumento de la absorción de la radiación solar, debido a la morfología urbana.
- f) Disminución de la irradiación nocturna por su bajo factor de visión del cielo (*Sky View Factor*).
- g) Reemisión hacia la superficie, de una mayor parte de la radiación de onda larga debido al aumento de gases de efecto invernadero, especialmente CO<sub>2</sub>.

Existen diferentes enfoques para calcular el efecto de la isla de calor urbana: una perspectiva clásica basada en dos estaciones meteorológicas, una metodología basada en transectos y la última basada en sensores aerotransportados y/o satélites.

b) **Metodología clásica mediante dos estaciones.**

La metodología clásica para estimar el efecto de la UHI se basa en el método de diferencias térmicas entre dos observatorios, uno urbano y el otro periférico, comparables (misma altitud, misma distancia aproximada a la costa, etc.). En este caso la resolución espacial es muy deficitaria debido a que el estudio se basa en tan sólo dos puntos. Es por ello por lo que se debe dar más énfasis a la resolución temporal. De este modo, se pueden hacer estadísticas de la isla de calor a nivel climático (varios años de datos analizados), ya sea desde una perspectiva estacional, mensual y/o diaria. Una buena representación cuantitativa y cualitativa de la UHI se puede hacer mediante diagramas *boxplots* (fig 6.1), que nos darán información sobre su distribución en cuantiles. También se pueden representar histogramas y curvas de densidad que nos permitirán observar la distribución de las diferencias térmicas.

Otra aproximación de análisis temporal es la de hacer un estudio de tendencias. En este caso, la prueba más utilizada es el test no paramétrico de Mann Kendall al 95% y/o 99% de significatividad (Kendall, 1977). En este trabajo se ha utilizado el lenguaje R, concretamente el paquete Kendall (Función: *MannKendall function*).

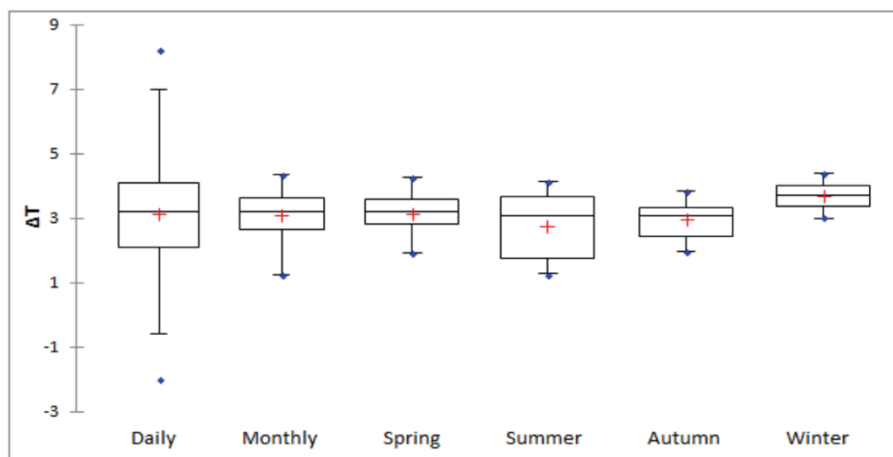


Figura 6.1 Diferencias térmicas entre dos estaciones Raval y Aeropuerto del Prat 2008-2016 (para el estudio de la UHI en Barcelona), representado mediante *boxplots* por estaciones.

### b) Metodología basada en transectos

El método de transectos urbanos se realiza mediante el uso de termohigrómetros digitales conectados a un vehículo. El termohigrómetro es un sensor que mide la temperatura y la humedad a tiempo real mientras el coche está en movimiento. Para esta metodología se diseñan unos transectos o rutas representativas que irán transcurriendo por diferentes zonas significativas del área de estudio (el número de transectos dependerá del detalle y de la dimensión de la zona urbana). El transecto debe cubrir también zonas circundantes del núcleo urbano, a fin de que se pueda calcular el efecto de UHI (fig 6.2).

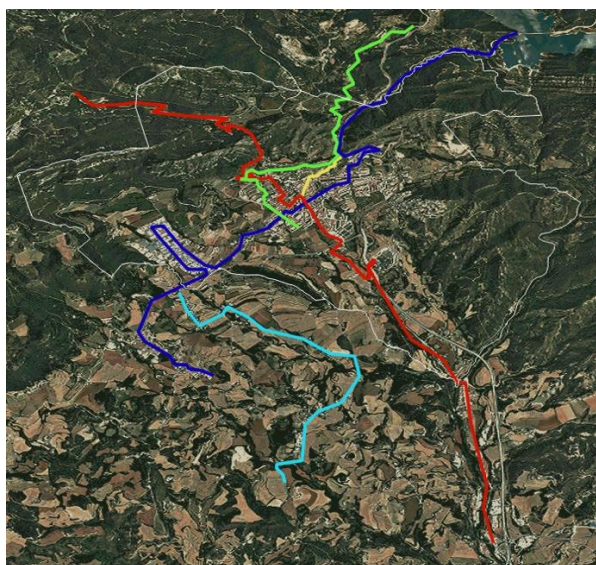


Figura 6.2 Transectos diseñados para el estudio ICGC de la UHI de la ciudad de Berga, en el marco de esta Tesis.

Una vez se recorren las rutas y se anotan los datos (se establecen diferentes puntos de medida en cada transecto), se procesan en una hoja de cálculo y se dibujan los perfiles térmicos (fig 6.3). Esta metodología se desarrolla durante la noche y bajo la premisa inicial de que las temperaturas se toman en el espacio temporal menor posible para que sean comparables entre ellas. Durante el día el intercambio radiativo es muy variable y no existe una homogeneidad suficiente para realizar una comparación de datos adecuada a nivel temporal.

La temporalidad en el método de transectos no suele ser demasiado óptima ya que tener muchas rutas hechas requiere un esfuerzo temporal muy elevado. La resolución espacial es mejor que el método clásico, pero no cubre toda la región de interés. Aun así es posible hacer mapas interpolados con la finalidad de cubrir toda el área de estudio.

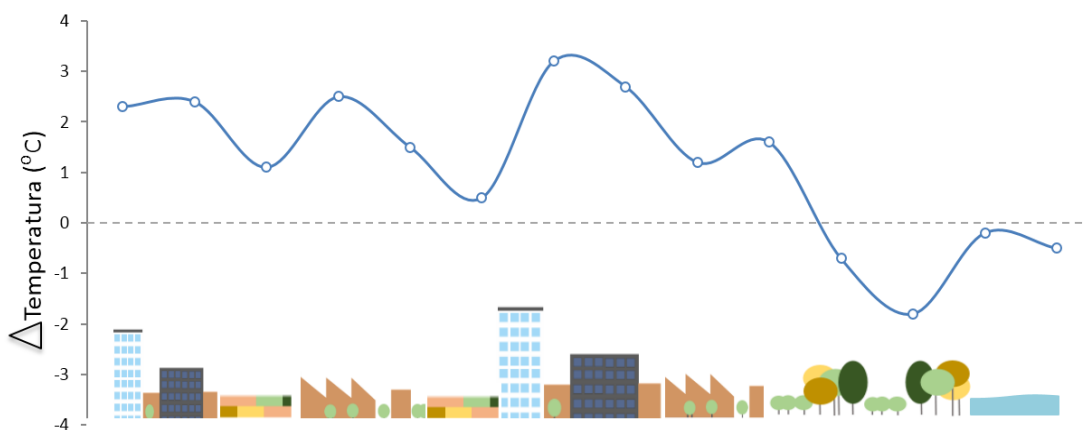


Figura 6.3 Ejemplo del perfil térmico del transecto verde realizado en la ciudad de Berga el día 12/11/2018.

### c) Metodología basada en sensores aerotransportados

Esta metodología es la que más interés tiene en el ámbito de las competencias en la generación y uso de datos cartográficos y de observación de la Tierra. Las imágenes que se usan y se tratan provienen del sensor aerotransportado del ICGC hiperespectral térmico TASI. El cálculo de la UHI que se aplica es la diferencia de temperatura media de un área (polígono) significativa rural o peri-urbana que ocupa un conjunto de píxeles, y la diferencia con el resto de píxeles.



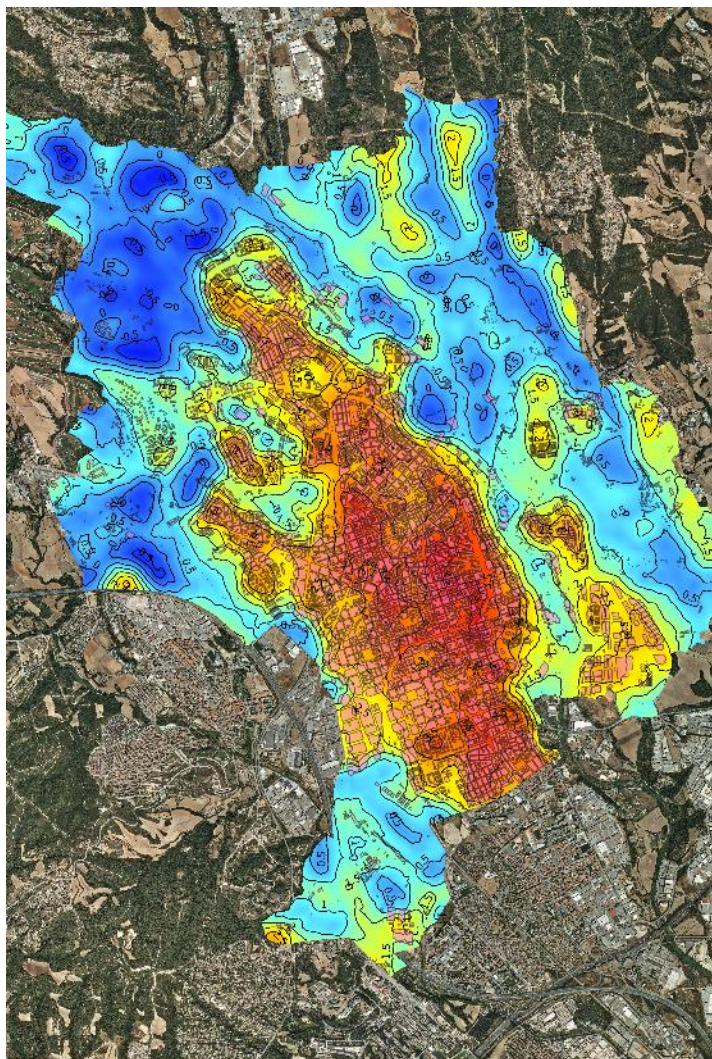


Figura 6.4 Cartografía temática térmica de la Isla de calor registrada en Sabadell a partir de los datos del sensor TASI (ICGC) el día 15/12/2017.

En este caso, la resolución temporal es muy alta, ya que, como ejemplo en una ciudad como Sabadell, se logra capturar los datos TASI en menos de una hora y con una resolución espacial operativa a partir de los 1.5-2m. De todos modos, hay que apuntar que en esta metodología resultan tan críticos los condicionantes temporales en la toma de datos, ya que su finalidad es la de conocer el comportamiento térmico y su estructura/forma sobre la superficie: “qué dibujo tiene la isla de calor” (fig 6.4). La configuración geoespacial de la UHI no suele cambiar significativamente, ya que depende de las variaciones a gran escala y esta variación será notable a lo largo de los años cuando la ciudad haya experimentado cambios relevantes en sus usos del suelo y coberturas. Lo que puede variar de forma más significativa podría ser la diferencia térmica de la UHI,

según la hora y el día del año que se haya muestreado. Hay que tener en cuenta que la temperatura dada por TASI o sensores aerotransportados hace referencia a la temperatura de la superficie (LST) y no a la temperatura del aire, que registran las estaciones meteorológicas o los modelos. Es por ello, que la terminología que se utiliza no es la de UHI sino la de SUHI (Sobrino et al., 2020) (*Surface Urban Heat Island*). Estos dos términos se asemejan más durante la noche cuando la temperatura del aire y la de la superficie son prácticamente las mismas, debido al equilibrio radiativo (los vuelos TASI se realizan alrededor de las 00:00 hora local).

Por otra parte, existen municipios donde el ICGC no puede realizar vuelos debido a problemas orográficos y/o meteorológicos, óptimos para la captura de datos TASI. Como consecuencia, una de las soluciones alternativas pasa por la utilización de imágenes de satélite que también permiten realizar el cálculo de la LST a una resolución de 100m, aunque se podrá hacer una interpolación y suavización posterior. En el apartado siguiente se presenta como obtener la SUHI mediante el tratamiento de imágenes Landsat 8 y Landsat 5 y 7.

- *Obtención de la temperatura de superficie con Landsat 8*

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que se ha implementado y documentado para la obtención de la temperatura de superficie (LST) a partir de imágenes Landsat 8 de forma operacional para el ICGC, en el marco de esta Tesis Doctoral (fig. 6.5), así como el programario asociado (fig. 6.6 y 6.7). El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) recomienda que no se utilice la banda 11 debido a problemas en su funcionamiento interno. De todos modos se ha dejado en el diagrama ya que en algunos estudios y trabajos se ha considerado oportuno hacer el promedio de las bandas 10 y 11.



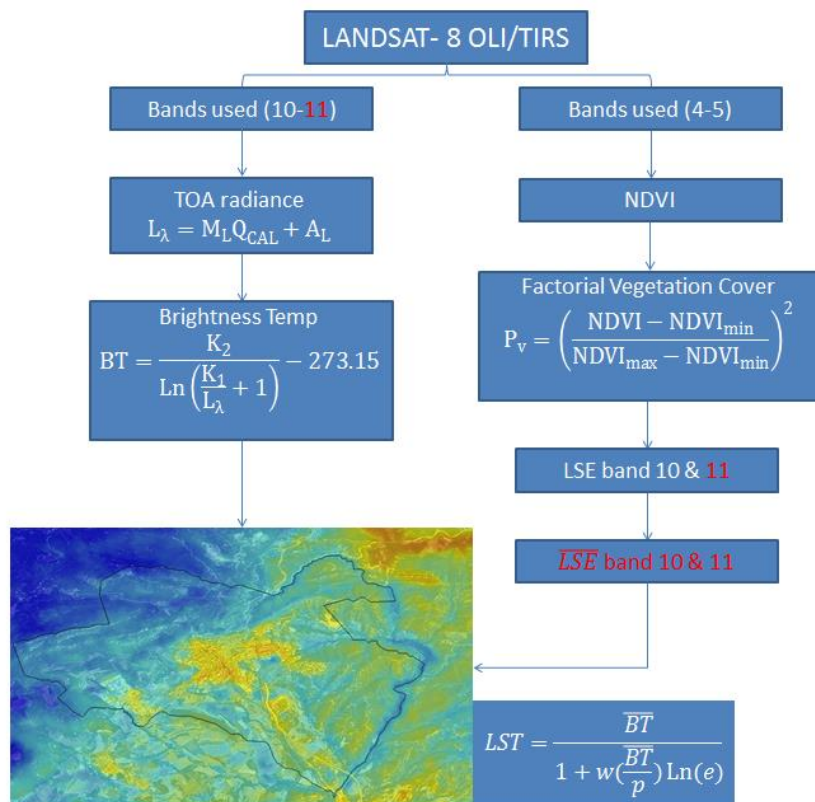


Figura 6.5 Workflow para calcular la temperatura superficial utilizando datos satélite Landsat 8.

Aplicación sobre Berga.

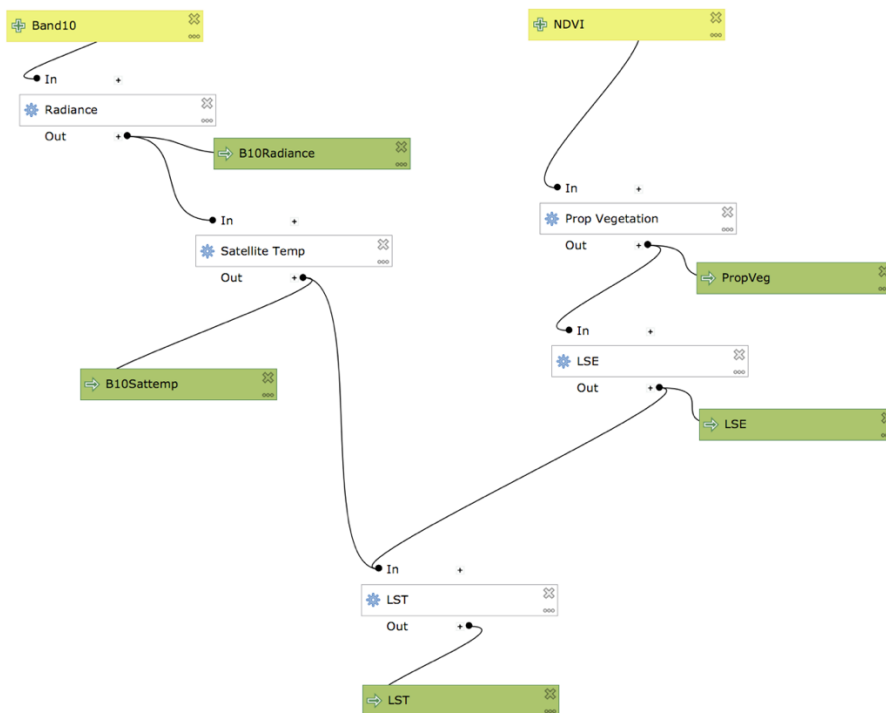


Figura 6.6 Programa modelo de construcción para calcular la temperatura superficial utilizando Landsat 8.

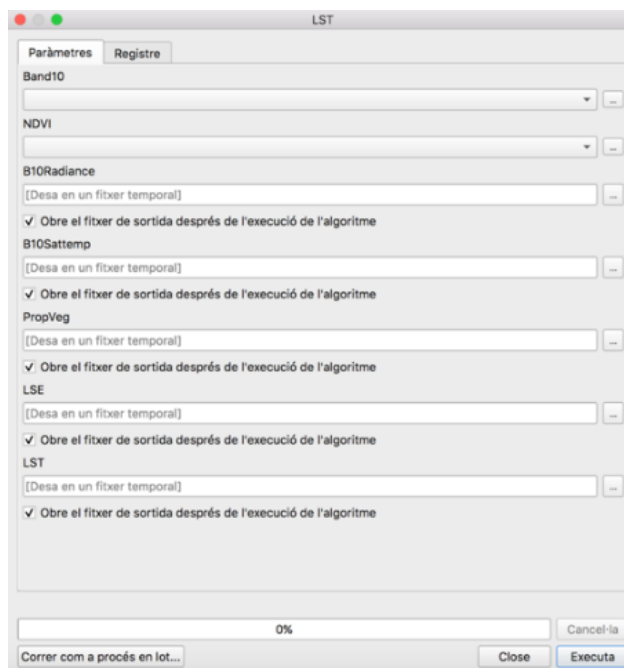


Figura 6.7 Macro generada para entrar los datos en el programa que permite calcular la temperatura superficial utilizando Landsat 8.

El cálculo de la LST se ha hecho a partir de imágenes Landsat 8, archivo *Python, Model Builder*. Ejecutable desde QGIS (*Toolbox*). Se debe entrar la Banda 10 y el NDVI. Previo al cálculo es necesario recortar la ROI de la imagen y calcular el NDVI. Si no se dispone de un ejecutable como el anterior, se puede usar la calculadora ráster de cualquier GIS y a partir de las siguientes expresiones, calcular la LST. Los pasos a seguir son:

- $(0.0003342 * \text{Band10@1}) + 1$
- $(1321.08 / \ln((774.89 / \text{Radiance}) + 1)) - 273.15$
- $(\text{NDVI@1} - 0 / 0.7 + 0)$ . *\*\*valores mínimos i màximos medios de Catalunya.*
- $(0.004 * \text{Prop Vegetation@1}) + 0.986$
- $\frac{\text{SatelliteTemp@1}}{1 + (\text{Band10@1} * (\text{SatelliteTemp@1} / 14380) * \ln(\text{LSE@1}))}$

- Obtención de la temperatura de superficie LST vía LANDSAT-5/7

Para las imágenes Landsat 5 y 7 se usa el mismo algoritmo. Cabe destacar que el Landsat 7 desde el año 2003 tiene problemas y la imagen sale recortada. Es por ello que se recomienda usar el Landsat 5 o Landsat 8 para las imágenes más actuales. El flujo de trabajo del proceso queda descrito en la figura 6.8 y los programas en las figuras 6.9 y 6.10.

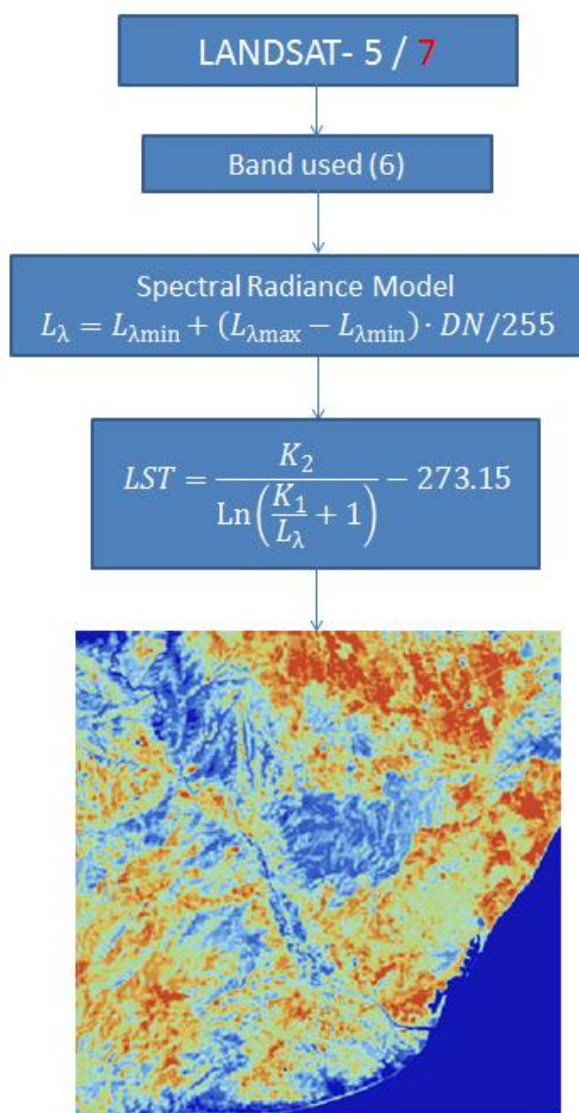


Figura 6.8 Workflow para calcular la temperatura superficial utilizando Landsat 8

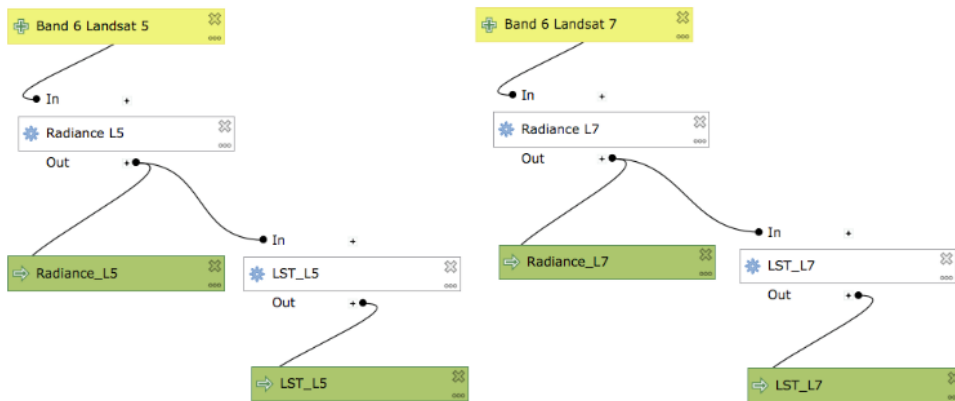


Figura 6.9 Programa modelo de construcción para calcular la temperatura superficial utilizando Landsat 8.

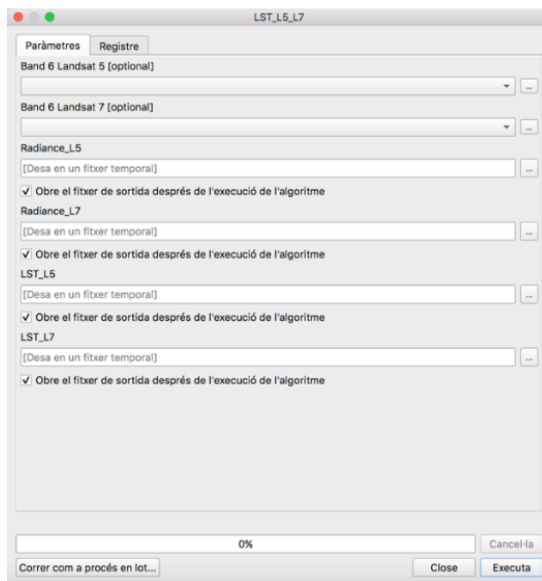


Figura 6.10 Macro generada para entrar los datos en el programa que permite calcular la temperatura superficial utilizando Landsat 8.

El cálculo de la LST por imágenes Landsat 5 y 7 se desarrolla a partir de un Archivo *Python, model Builder*. Ejecutable desde QGIS. Se debe entrar la Banda 6. Ejecutable desde QGIS (*Toolbox*).

Si no se dispone de un ejecutable como el anterior, se puede usar la calculadora ráster de cualquier GIS y mediante las siguientes expresiones expuestas, calcular la LST. Los pasos a seguir son:

**L5**

- $((15.30-1.238)/255-1)*("Band\ 6\ Landsat\ 5@1"-1)+1.238$
- $(1260.56/\ln(607.76/("Radiance\ L5@1"+1)))-273.15$

**L7**

- $((15.303-1.238)/255-1)*("Band\ 6\ Landsat\ 7@1"-1)*1.238$
- $(1282.71/\ln(666.09/("Radiance\ L7@1"+1)))-273.15$

**6.2.2. Implementación operacional para la obtención de las *Local Climate Zones* (LCZ)**

A continuación, se describe como realizar la operativa para la obtención de las *Local Climate Zones* bajo tres metodologías distintas utilizadas a lo largo de la tesis doctoral. Si bien en el capítulo 3, se han analizado y evaluado dos de las tres metodologías explicadas a continuación, en este apartado nos centraremos en la configuración de las tres técnicas desde el punto de vista operativo paso a paso, con el principal objetivo de poder ser replicado.

**a) Local Climate Zones Metodología WUDAPT***- Aplicación del algoritmo:*

En este apartado se explicará cómo realizar el mapa de LCZ siguiendo la metodología propuesta en el proyecto internacional WUDAPT. La metodología diseñada por Bechtel et al. (2015), se basa en aplicar una clasificación supervisada a partir de imágenes de satélite. En concreto e inicialmente, la metodología estaba pensada para hacerse mediante Landsat 8, aunque la hemos adaptado también para otros satélites como Sentinel 2, Landsat 7 y Landsat 5, donde tan sólo cambian las bandas de entrada.

A continuación, se vuelve a representar el diagrama de flujo basado en la metodología WUDAPT y que hemos adaptado para otros satélites (fig 6.11). Para poder hacer las cartografías de forma automática también se ha desarrollado un programa con código *Python* que permite automatizar los procesos y realizar iteraciones.

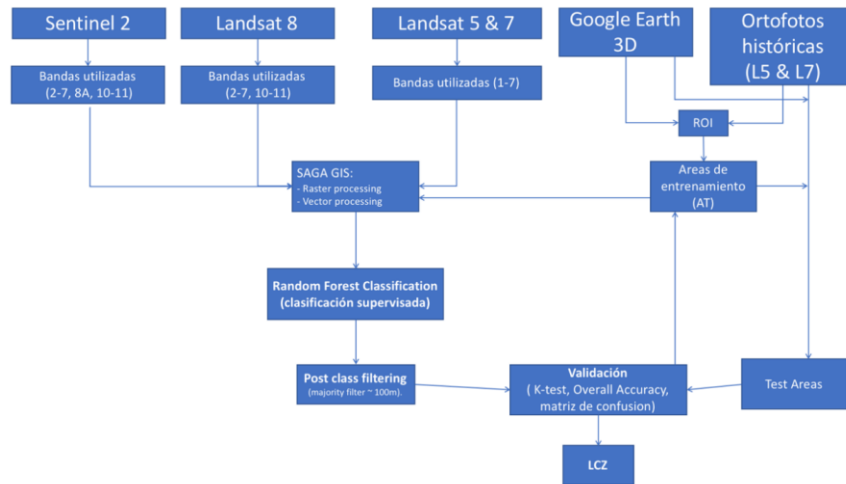


Figura 6.11 *Workflow* para calcular las *Local Climate Zones* mediante Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2.

El primer paso para el cálculo de las LCZ es el de seleccionar una región de interés (ROI). Se trata de hacer un *plot* en forma rectangular que sirva de ROI donde se incluirán sus zonas circundantes (zonas periurbanas y zonas rurales). Para ello se deberá crear un polígono kml (basado en el metalenguaje XML, que se utiliza para representar datos geográficos en tres dimensiones) utilizando *Google Earth*. Se recomienda que sea un cuadrado/rectángulo ya que en muchos casos la cartografía se usará sobre un modelo meteorológico o climático que trabaja en dominios basados en dimensiones cuadrangulares o rectangulares.

Dentro de la ROI crearemos las áreas de entrenamiento (*Training Areas, AT*), una serie de polígonos/marcas que servirán para entrenar el algoritmo de similitud que generalizará toda la ROI en LCZ. Las áreas de entrenamiento deben representar un número específico y significativo de las diferentes LCZ que hay en nuestra zona de estudio y servirán para crear de forma automática toda la capa de LCZ. Para crear unas áreas de entrenamiento óptimas, se recomienda conocer la zona de estudio. El ráster resultante de las LCZ al nivel que se propone, generalmente tendrá una resolución de unos 100-200m. Por esta razón, nuestras áreas de entrenamiento deberán ser polígonos de aproximadamente 50-200m.

Para crear una correcta área de entrenamiento, se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios (fig 6.12):

- Cada área de entrenamiento debe estar separada espacialmente de otra al menos 100m.
- Se reservarán unas áreas de prueba o áreas test para validar el modelo obtenido a partir de las AT. Normalmente la validación se hace con la mitad de las zonas aplicadas en el algoritmo. Por ejemplo, para las LCZ que hemos creado para el Área Metropolitana de Barcelona, se usaron 180 áreas de entrenamiento y 90 áreas test, que sirvieron para validar el modelo.
- Aproximadamente un 10% de la superficie de la ROI serán superficies o polígonos de entrenamiento (fig 6.13).

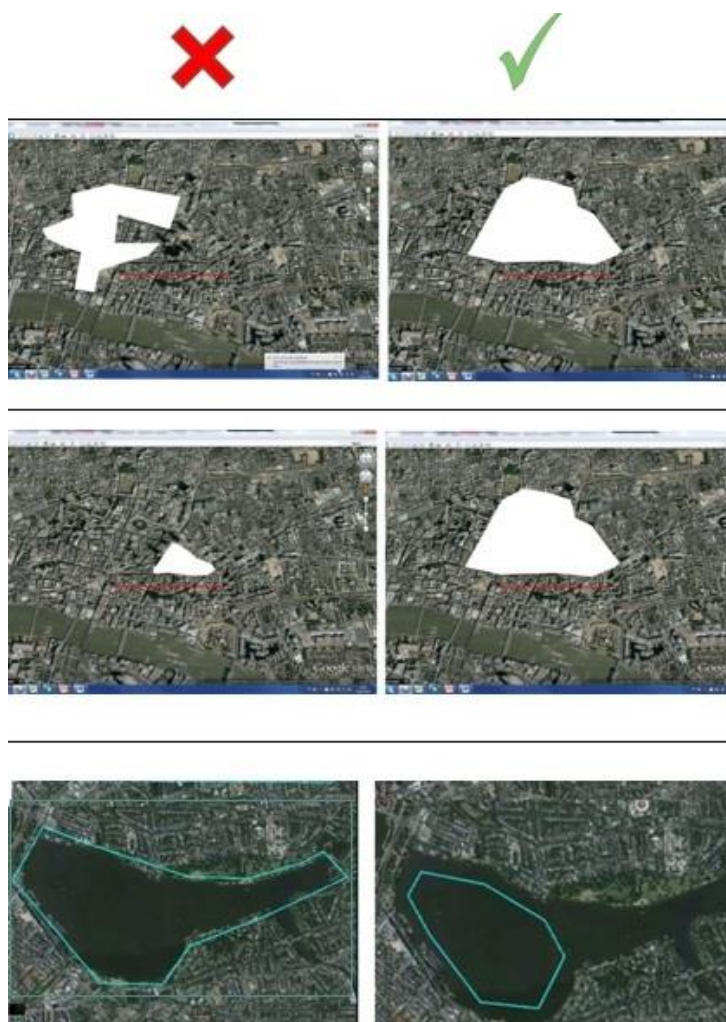


Figura 6.12 Realización incorrecta y correcta de zonas de entrenamiento.

Cada área de entrenamiento se guardará con el nombre de la categoría de la LCZ en carpetas dentro de *Google Earth*, tal y como vemos en la siguiente figura:



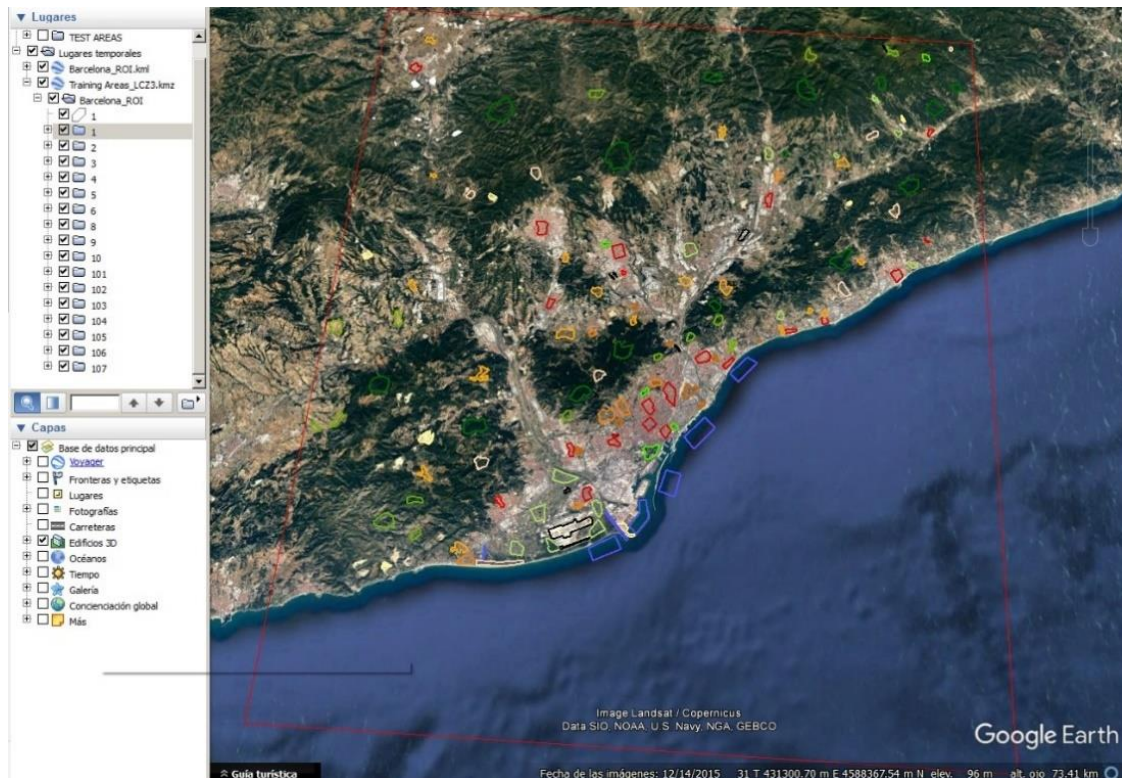


Figura 6.13 Zonas de entrenamiento generadas para Barcelona mediante *Google Earth Pro*.

Mediante la API SAGA (también incluida dentro de las librerías QGIS) deberán realizarse 7 pasos con el fin de obtener las LCZ. Éstos son:

- i) Importar las imágenes (las bandas especificadas): *Geoprocessing*> *File*> *GDAL / OGR*> *GDAL: Import Raster*. Seleccionaremos las bandas y deseleccionar la opción *Transformation*.
- ii) Importe las bases vectoriales (AT y ROI) en formato KML: *Geoprocessing*> *File*> *GDAL / OGR*> *ORG: Import Vector Data*. En la opción “*Geometry Type*” cambiaremos la porción por defecto y seleccionaremos *wkbPolygon*.
- iii) Uniremos las AT (la ROI no): *Geoprocessing*> *Shapes*> *Construction*> *Merge Layers*. Las opciones deben estar ambas seleccionadas.
- iv) Proyectaremos las bases vectoriales (ROI y AT): *Geoprocessing*> *Projection*> *Coordinate Transformation (Shapes list)*. En la opción “*Loaded Grid*” seleccionaremos las bases que queremos georreferenciar mediante las proyecciones que tienen las imágenes Landsat.



- v) Con la ROI, cortaremos la imagen Landsat para quedarnos con la zona que queremos: *Geoprocessing* > *Shapes* > *GIRD* > *Spatial Extent* > *Clip Grid with Polygon*. Recortaremos todas las bandas que tendremos que seleccionarlas.
- vi) Remuestrear/INTERPOL en 100m la imagen Landsat ya que las LCZ trabajan en esta resolución espacial. Si quisiéramos mejorar la resolución podríamos optar a otras resoluciones o incluso no cambiar la resolución: *Geoprocessing* > *Grids* > *Grid Systems* > *resampling*. Se cambia el tamaño de celda (*cellsize*, que está en metros) y se seleccionan todas las bandas y el tipo de interpolación que será la de *Mean Value*.
- vii) Aplicamos el algoritmo que permitirá hacer la cartografía de las LCZ: *Geoprocessing* > *Imagery* > *Clasificación* > *Random Forest* (Vigra). Seleccionamos las TA y las bandas que se han marcado para hacer la clasificación. Las opciones y parámetros serán: *Label Field: Source*, *Use label as Identifier* (activado), *Tree Count 32*, *Sample with Replacement* (activado), *Minimum Node Split Size 1*, *Features per node* (activado), *Stratification* (none).

A continuación, se muestra el modelo en base *Python* que permite entrar las variables necesarias y ejecutar dicho proceso mediante QGIS (fig 6.14). Se necesita tener instaladas librerías de GDAL y SAGA.

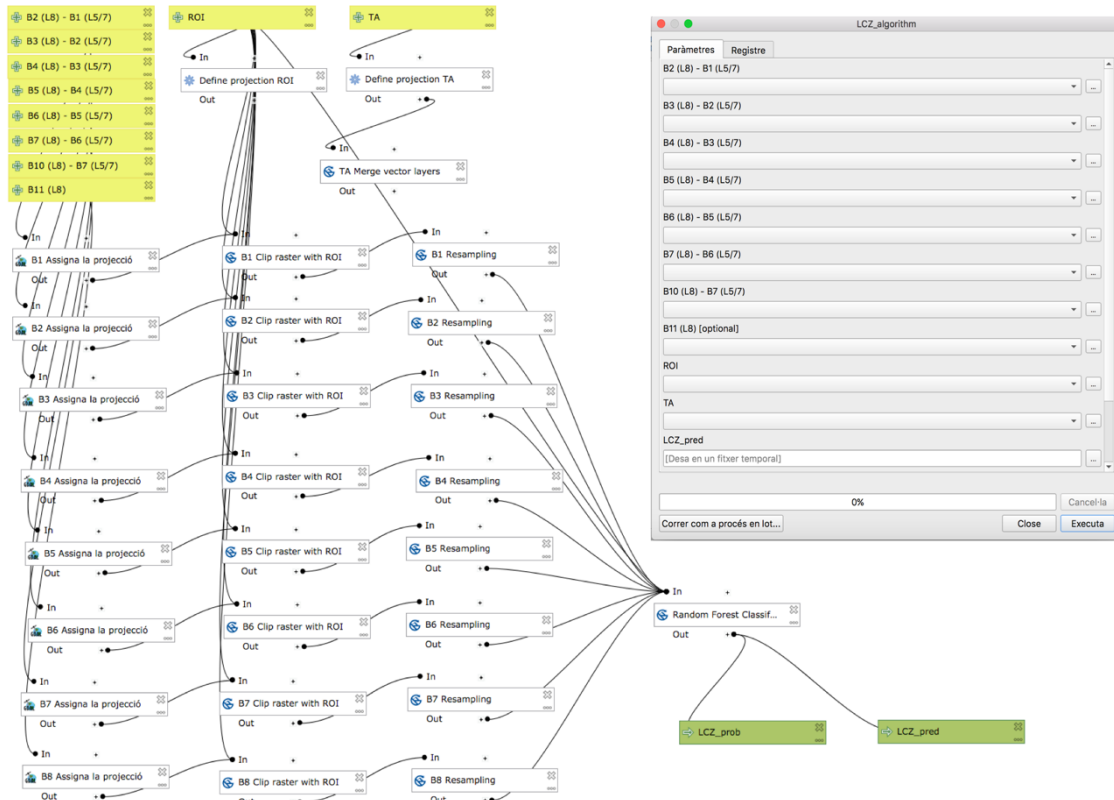


Figura 6.14 Programa modelo de construcción para calcular las Local Climate Zones i macro para introducir los datos/imágenes iniciales.

Cálculo de las LCZ para un Landsat 8, 5 i 7: Archivo *Python, model Builder*. Ejecutable des de QGIS (Toolbox). En este ejecutable, se cargan las bandas del satélite y mediante un *workflow* se ejecutan los 7 pasos comentados anteriormente, las operaciones que permiten convertir la combinación de bandas en una cartografía LCZ.

#### - Validación de las LCZ:

La validación del modelo se lleva a cabo a partir de la matriz de contingencia y dos índices de concordancia, el coeficiente Kappa (K) y el *Overall Accuracy* (OA). Se ha elaborado una hoja de cálculo bajo el nombre de *LCZ\_lev0\_validation.xlsx*. Se ha diseñado para que, entrando los datos o valores en la matriz de contingencia, se calculen automáticamente los índices.

#### *Los índices quedan definidos como:*

- Coeficiente Kappa (K): mide el grado de concordancia de las evaluaciones nominales u ordinales realizadas por múltiples evaluadores cuando se

evalúan las mismas muestras (1), valores de menos de 0.4 son valores bajos o justos de concordancia, hasta 0.6 el valor es moderado. Más de 0.6 el valor es bueno.

$$K = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)} \quad (1)$$

Donde Pr(a) es el acuerdo observado relativo entre dos observadores y Prun la probabilidad hipotética del acuerdo según el azar.

- *Overall Accuracy (OA)*: Medida de la precisión total de la clasificación (2).

$$OA = \frac{\sum x_{i=i'}}{\sum TA} \quad (2)$$

Donde x(i) es el número de píxeles que tiene cada categoría específica.

Se validan las LCZ a partir de la matriz para las áreas de entrenamiento (AT) y las Test Áreas. Actualmente el portal WUDAPT ofrece un repositorio con más de 90 ciudades de todo el mundo para poder descargarlas. En este portal, la referencia LCZ de Barcelona es la que se ha realizado en el contexto de este doctorado industrial y que ha sido también validada posteriormente, con un método de *bootstrapping* (Bechtel et al., 2016).

A partir del mapa de población del IDESCAT, 2012, se ha corregido la capa WUDAPT. De esta forma si el modelo no lo ha considerado LCZ urbana pero el mapa del IDESCAT registra población en dicha área, se cambiará la categoría y, viceversa, una LCZ urbana que no registra población pasaría a ser rural. Estos cambios se realizan mediante el *plugin* QGIS de reclasificación ráster y una ortofoto que validara la nueva categoría.

#### b) *Metodología LCLU Local Climate Zones.*

La segunda metodología que se ha implementado de forma operacional se basa en realizar una reclasificación de las categorías de los datos disponibles que se tiene sobre el territorio. En nuestro caso, Barcelona dispone del *Urban Atlas* (UA) y el Mapa de Usos del Suelo de Cataluña (MCS-Cat versión AMB, 2015). Además de tener los datos de los

vuelos realizados con el sistema LiDAR por el ICGC, que permiten tener un modelo de elevaciones de edificios a una resolución de 2m de píxel.

Esta metodología, permite mejorar el anterior método ya que las bases de datos parten de resoluciones más altas. La reclasificación se hará a partir de la conversión de la leyenda de ambas bases de datos asociadas a las cartografías. A partir de la descripción que hace cada una de las fuentes sobre cada una de sus categorías, es posible distinguir entre las diferentes LCZ. Una vez diferenciadas estas primeras LCZ, se acoplará la diferencia de altitud entre MST-MDT, sobre esta primera reclasificación para acabar de distinguir las categorías que se diferencian por su altitud.

A continuación, se presentan las tablas que permite correlacionar las categorías de las cartografías *Urban Atlas* con las *Local Climate Zones* urbanas (tabla 6.1) y las categorías del MCS-Cat/AMB (usando la leyenda 5 o la leyenda 1F, que contempla la densidad de vegetación y su tipología) para las zonas naturales (tabla 6.2).

<b>Categorías Urban Atlas</b>	<b>LCZ</b>
Tejido urbano continuo	1, 2 or 3
Tejido urbano denso discontinuo	4, 5 or 6
Tejido urbano discontinuo de densidad media	5 or 6
Tejido urbano discontinuo de baja densidad.	6
Tejido urbano discontinuo de muy baja densidad	6
Estructuras aisladas	9
Unidades industriales, comerciales, públicas y privadas	1-6
Carreteras y calles	E (105)
Otros caminos y terrenos asociados	E
Ferrocarriles	E
Zona portuaria	E
Aeropuerto	E
Extracción de minerales	E
Sitios de construcción	E
Terreno sin uso actual	F
Verde Urbano	B or D
Instalaciones deportivas	D
Huertos urbanos	B
Zonas de vegetación herbácea	B (102)

Tabla 6.1 Conversión *Urban Atlas* a LCZ urbanas.

Categoría MCS-Cat	LCZ
Bosque denso	A
Bosque claro	B
Matorral	C
Humedales	G
Prados y herbazales	C
Zonas quemadas	C
Improductivo natural	F
Agua	G
Conreos	D
Improductivo artificial	N

Tabla 6.2 Conversión MCS-Cat a LCZ naturales.

Para fusionar las cartografías se parte de dos bases vectoriales diferentes. Primero se deben ensamblar las categorías que nos interesan del MCS-Cat sobre el *Urban Atlas*, en este caso todo lo que corresponde a bosque según densidad de árboles (-A, alta -B, media y -C, arbustos). Una vez se ha hecho la fusión vectorial y se ha homogeneizado la nueva base de datos en una única capa (*shape*), ya podemos hacer la reclasificación. Existen diferentes formas de reclasificar las categorías. Proponemos dos métodos:

Desde la propia base de datos asociada al *shape* o capa vectorial, ordenar las categorías del *Urban Atlas* y del MCS-Cat y construir una nueva columna con el código de les LCZ.

Haciendo un script Python con la reclasificación. Cada código del UA o del MCSC retorna una categoría de LCZ. Ejemplo: elif CODE = CODI UA o MCSC return = CODI LCZ

Una vez se crea la lista de reclasificación se carga en un GIS y el propio programa aplicará dicha reclasificación.

Por último, se puede hacer una unión de las dos capas (*Common DB*). El resultado es el de una cartografía LCZ en formato vectorial (shp) donde es posible cargar el ADN de las LCZ propuestas por Stewart y Oke (2012) o las corregidas para nuestra ROI y poder representar el parámetro que se desee (por ejemplo, el *Sky View Factor* o la permeabilidad del suelo). Al tener una resolución geoespacial de tanto detalle, la finalidad

de esta capa puede aplicarse en otros estudios de planificación urbana, estudios de vulnerabilidad y ordenación del territorio detallados o inclusive hacer un *downscaling* o desagregación de un modelo climático a partir de la caracterización térmica de las LCZ (tal y como se indica en el capítulo 4).

La limitación principal de la metodología basada en el *Urban Atlas*, es que sólo se puede aplicar sobre el Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y zona circundante ya que está pensada para las grandes zonas urbanas europeas (con bases de datos más detalladas). Es por ello por lo que sólo se dispondrá de una parte de la zona de estudio. En este sentido la delimitación del *Urban Atlas* es administrativa y no se delimita pensando para que sea utilizada en un modelo meteorológico o climático.

Para hacerlo factible, el último proceso para tener una capa, con las mismas características de detalle espacial es la de rasterizar a 100m la capa vectorial y acoplarla sobre la capa WUDAPT (*merge raster*). De este modo dispondremos de una capa donde la zona urbana partirá de una metodología más ajustada y con unos índices de detalle más apropiados que los contornos de la ROI que pertenecerán a WUDAPT (fig 6.15).

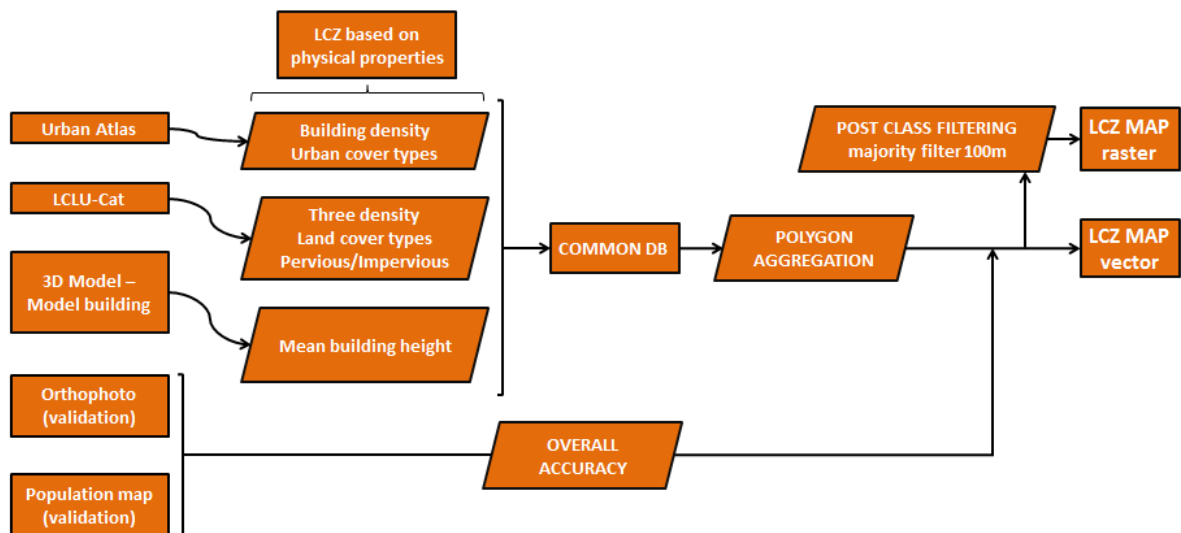


Figura 6.15 Flujo de trabajo utilizado para obtener el modelo LCZ LCLU+WUDAPT.

La metodología operacional, es adaptable a nuevas o futuras capas actualizadas de mapas de cubiertas que se puedan generar, como es el caso del actualizado para el mapa de cubiertas del AMB de 2015.

c) *Obtención de las LCZ con Google Engine*

*Google Earth Engine* (GEE) es una plataforma para el análisis científico que permite la visualización de conjuntos de datos geoespaciales. GEE almacena imágenes de satélite, las organiza y las pone a disposición para la extracción de datos a escala global. El archivo público de datos incluye imágenes históricas que se remontan a más de 40 años y se recopilan imágenes de forma diaria. Las imágenes pueden ser tratadas para diferentes funcionalidades debido al amplio abanico de herramientas y procesos que se pueden programar.

En nuestro caso obtendremos las LCZ a partir de una clasificación supervisada mediante Landsat 8 (aunque podemos seleccionar otros satélites), tal y como también se ha hecho siguiendo el método WUDAPT. Los pasos a seguir serán:

- Obtener una cuenta de *Google Engine*.
- Entrar a [explorer.earthengine.google.com](http://explorer.earthengine.google.com)
- Introducir en el buscador el tipo de satélite que queremos, en nuestro caso: *Landsat 8 –Day TOA Reflectance Composite*. Se nos cargará en la columna izquierda y podremos seleccionar el día que queremos. Si nos acercamos a la ROI que queremos, nos aparecerá la imagen del día en cuestión.
- Seleccionamos las bandas de interés. En este caso, está limitado a 3 bandas máximo, seleccionaremos las más adecuadas para hacer este tipo de estudio que son las B6, B5 y B4, consideradas las bandas más importantes RGB para poder aplicar la clasificación supervisada. En el botón *Custom* seleccionamos *Stretch 100%* y de este modo veremos la imagen de la mejor forma posible.
- Ahora se creará una máscara sobre la imagen Landsat con la ROI. Hay una opción para cargar la ROI o sino se puede dibujar sobre la imagen.
- Pulsamos sobre *Add Computation* y *Apply Mask*. Seleccionaremos la imagen Landsat y las bandas que queremos recortar.

- Dibujamos la máscara o cargamos nuestra ROI. En la opción *Mask* seleccionaremos *Drawn Rectangle*, en caso de que la queramos dibujar.
- Añadiremos un paso más en este proceso (*add step*) que será *Extract Mask*. En el apartado *Image*, seleccionaremos la opción *Apply Mask*.
- Una vez tenemos la máscara preparada volvemos a crear: *Add Computation* y *Apply Mask*. Seleccionamos la imagen satélite. *Mask*: Raster. A Raster: Seleccionamos nuestra área de estudio (la máscara).
- En la pestaña *visualization*, seleccionamos las bandas del inicio (B6, B5, B4), aplicamos el recorte y guardamos.
- Ya tenemos los datos preparados para empezar a aplicar la clasificación supervisada sobre nuestra ROI.
- Para aplicar la clasificación supervisada, necesitamos hacer o cargar las zonas de entrenamiento. En GEE existen dos formas de generarlas:
- Dibujar las zonas de entrenamiento usando puntos y/o polígonos con una herramienta propia del GEE (1).
- Exportar las zonas mediante una tabla de fusión, esto nos permitiría exportar un shape hecho anteriormente (2).
- Para el caso (1), nos saldrá un menú en la columna izquierda llamado Clases. Es aquí cuando iremos marcando las categorías de usos del suelo que queramos (ya sea usando puntos o polígonos) y crearemos la leyenda.
- Una vez terminadas de definir las clases, aplicamos el algoritmo *Random Forest* a una resolución de 100 m sobre la zona de estudio recorte (la única que tendremos seleccionada).
- Una vez representada, si vamos en el menú, a la capa encontraremos una matriz de confusión que nos hace la validación.
- La capa y la matriz de validación se pueden exportar y cargar en un GIS.



Si queremos cargar unas áreas de entrenamiento previamente hechas con *Google Earth* (donde vemos también el modelo 3D de la ciudad y podemos diferenciar más fácilmente categorías), se debe exportar la capa vectorial mediante *Google Fusion Table*.

Dado un archivo *shapefile* con todas las geometrías e información geográfica pertinentes, el *shape* puede ser importado en Google Earth Explorer mediante la creación de una *Fusion Table*.

- Desde la dirección “fusiontables.google.com”, se importa el *shape* con la opción de cargar (en este caso un archivo *shape*) desde un ordenador local.
- Una vez cargado, se verá la tabla de atributos de archivo vectorial replicada en la tabla de fusión.
- En la URL (fusiontables.google.com ) hay un identificador, la referencia de la tabla de fusión. Copiar este código. En la pestaña *earth explorer* hay una opción *add* fecha (a la izquierda) (+). Seleccione la tabla de fusión desde el *toolbox* que aparece.
- Posteriormente, las columnas estarán disponibles para seleccionarlas y para clasificarlas, con la posibilidad de mapear las clases en el *Earth Explorer*.

Este método no se ha replicado en el contenido de esta tesis doctoral, pero en el marco del doctorado industrial se ha dirigido un trabajo de máster que comparó las tres técnicas presentadas para el área metropolitana de Oslo. Una de las ventajas de esta última metodología es la velocidad y automatización en la cual se puede realizar la cartografía con unos índices de validación bastante óptimos sin llegar a ser tan buenos como los WUDAPT debido a la limitación del uso a 3 bandas espectrales en las imágenes.

### **6.2.3 Cálculo de los parámetros morfológicos de la ciudad.**

En este apartado se presentan los procesos utilizados para crear cartografías temáticas, asociadas a variables morfológicas y radiativas del AMB, que principalmente han servido para mejorar los inputs de los modelos meteorológicos y climáticos urbanos utilizados. Algunas de estas variables configuran el ADN de las LCZ y servirán para

mejorar la propuesta genérica basada en los umbrales que Stewart y Oke (2012) que hacen para todas las ciudades a nivel de catálogo.

Mediante los datos LiDAR, podemos calcular diferentes indicadores que nos pueden ser de gran utilidad para conocer y entender el comportamiento físico urbano.

A partir de los datos de las altitudes de los edificios realizados por el LiDAR, podemos iniciar en las siguientes fases, la obtención de variables que mejoran los inputs de los modelos meteorológicos urbanos:

Los parámetros físicos que se calculan a partir del modelo 3D de la ciudad junto con las LCZ son:

Fracción urbana del tejado de los edificios: en un píxel dado indica cuanta fracción de tejado hay. Lambda P.

Fracción urbana de la superficie de los edificios: en un píxel dado indica cuanta fracción de superficie de las fachadas hay. Lambda B.

Fracción urbana general: en un píxel dado indica cuanta fracción urbana hay, sumando calles y tejados. Su inversa es la fracción vegetal. Lambda U.

Histograma de altitud de los edificios.

Estos parámetros serán utilizados como inputs para el módulo urbano BEP+BEM del WRF. A continuación se relatan las fases principales del proceso:

b) *Fase QGIS:*

Se parte de una cartografía vectorial generada a partir de las coberturas LiDAR del ICGC que en nuestro caso sería “LiDAR\_CAT2”, el cual contiene información de las alturas de los edificios de la ROI.

Se filtra la información incorrecta (altitudes no coherentes por encima del valor máximo, altitudes negativas...). Desde la tabla de atributos se eliminan los valores inferiores de 0 metros y aquellos superiores a la altura del edificio más alto de la ciudad (ej. En Barcelona 150 metros).

Una vez realizado, se convierte esta capa vectorial en una capa ráster (rasterizar), a una resolución espacial de 5 metros.

A continuación, se hace una reclasificación por alturas, asignando cuatro nuevos grupos:

- 1.- Edificios inferiores a 3 metros
- 2.- Edificios que varían entre 3 y menos de 10 metros
- 3.- Edificios que varían entre 10 y menos de 25 metros
- 4.- Edificios de 25 metros o más

Esto se lleva a cabo mediante la opción “calculadora ráster”, introduciendo una expresión como la siguiente:

```
("Nom_del_mapa"<3)*0+(("Nom_del_mapa">=3)AND("Nom_del_mapa"<10))*1+(("Nom_del_mapa">=10)AND("Nom_del_mapa"<25))*2+(("Nom_del_mapa">=25))*3
```

A continuación, se utiliza el modelo UMEP (Lindberg et al., 2018), un programa externo descargable en la librería QGIS.

Con el UMEP se realiza el cálculo de *185eep height* y *185eep aspect* (mediante datos LiDAR) y también tiene la opción de calcular el *Sky View Factor*, estas dos primeras capas son necesarias para procesar posteriormente el código MATLAB para transformar estos datos cartográficos en información útil para el WRF.

Una vez generados los dos primeros parámetros mencionados, se procede a calcular la fracción urbana de nuestra capa, partiendo del mapa de las LCZ (a 100m de resolución).

Para ello, debemos tener en cuenta la clasificación de LCZ. En este caso, se puede aplicar la aproximación que se muestra en la tabla 6.3.

LCZ	Fracción Urbana
1, 2, 3, 8, 10, 105	100%
4, 5, 6	70%
9	50%
101, 102, 103, 104, 106	0%

Tabla 6.3 Fracciones urbanas por LCZ

Cada zona tendrá asignado un porcentaje urbano que va desde el 0% (nada urbanizado) al 100% (totalmente urbanizado). Se ha asignado un porcentaje del 70% en las zonas “*open high-rise*”, “*open midrise*” y “*open low-rise*” y un 50% a “*sparsely built*”.

Estos porcentajes se asignarán mediante una reclasificación de esta capa LCZ, donde se asignarán los valores en tanto por 1 (0, 0.5, 0.7 y 1).

$$\begin{aligned}
 & (“Nom\_del\_mapa”=101)*0+(“Nom\_del\_mapa”=102)*0+(“Nom\_del\_mapa”=103)*0+(“Nom\_del\_mapa”=104)*0+(“Nom\_del\_mapa”=106)*0+(“Nom\_del\_mapa”=1) *1+(“Nom\_del\_mapa”=2)*1+(“Nom\_del\_mapa”=3)*1+(“Nom\_del\_mapa”=8)*1 \\
 & +(“Nom\_del\_mapa”=10)*1+(“Nom\_del\_mapa”=105)*1+(“Nom\_del\_mapa”=4)*0.7 \\
 & +(“Nom\_del\_mapa”=5)*0.7+(“Nom\_del\_mapa”=6)*0.7+(“Nom\_del\_mapa”=9)*0.5
 \end{aligned}$$

Paralelamente se genera una cuadrícula de una resolución espacial de 500m, donde se calculará esta fracción urbana. Con el objetivo de generar la capa *Urban Fraction* se hará con la función “Análisis ráster – estadísticas de zona”.

En este paso se introduce como capa vectorial la cuadrícula y como capa ráster la reclasificación que hemos hecho con los porcentajes asignados a cada LCZ. La estadística que se pedirá que se calcule es la media. Al final tendremos generado un ráster de una resolución de 500m con un porcentaje urbano en tanto por 1.

b) *Fase MATLAB:*

En esta fase se obtendrán parámetros característicos de las LCZ a partir de datos de geoinformación y su tratamiento bajo un programa desarrollado en código Matlab. Se parte del código del archivo con nombre *urbparm\_city.m* (código desarrollado por Pappaccogli et al. (2017) mejorado y modificado para la ciudad de Barcelona). En este código hay que modificar los siguientes parámetros:

Hay que introducir los rásters anteriormente creados y definirlos como tal a lo largo de todo el código.

Se añade la salida en formato texto (.txt) de los archivos que posteriormente se necesitarán para tratar con Fortran (en el caso de querer utilizar los datos como input del modelo WRF).

Una vez realizado este paso, el programa devuelve las representaciones de las lambdas que se están buscando junto con la representación de la fracción urbana.

Archivos/capas resultantes:

Lambda p = superficie tejado/superficie total de\_LCZcell

Lambda b = superficie total muro/ superficie \_total\_of\_LCZcell

Lambda u = superficie área tejado + superficie \_calle/  
superficie \_total\_of\_LCZcell

h = Altura media (histograma hi = (mx, my, mi) for each cell.

Obtenidos estos archivos, es muy importante añadir una nueva carpeta en el directorio donde se está trabajando que tenga el nombre “histograma”. Dentro hay que introducir todas las salidas en formato texto (.txt) que leerá el código Fortran. El código hecho en *Fortran* elaborado por Martelli, (2002) convierte estos datos en ficheros en formato binario que es la forma de lectura que tiene el WRF BEP+BEM.

#### 6.2.4 Calculo de los parámetros radiativos de la ciudad.

##### a) *Albedo*

En este subapartado se explica cómo se calcula el albedo mediante la combinación de bandas espectrales, en este caso, Landsat 5. El resultado es una cartografía del albedo de onda corta siguiendo la metodología propuesta por Liang (2001).

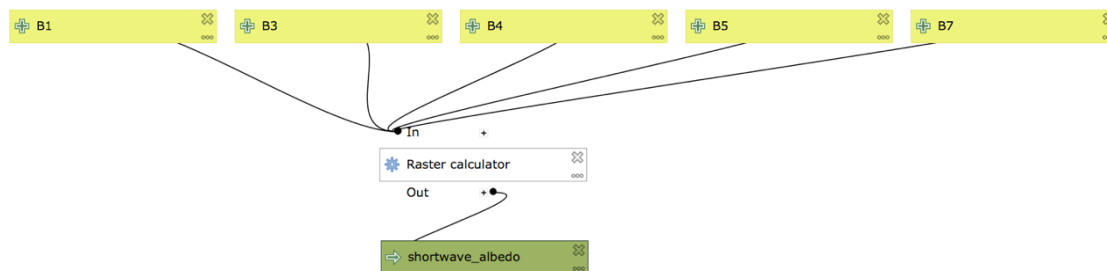


Figura 6.16 Programa modelo para el cálculo del albedo.

Calculadora ràster:

$$0.356*B1 + 0.13*B3 + 0.085*B5 + 0.072*B7 - 0.0018 / 0.356 + 0.13 + 0.085 + 0.072$$

Siendo Bx las bandas espectrales del satélite usado.

b) *Emisividad*:

En este apartado, se explica cómo convertimos las imágenes de satélite en imágenes de emisividad siguiendo la metodología propuesta por Ndossi y Aydan (2016). El código que se ha propuesto se basa en una reclasificación de los valores NDVI de la imagen. Para ello, deberemos convertir la imagen a valores de NDVI, mediante las bandas 4 y 5 en el caso de trabajar con Landsat 8. También se puede calcular el NDVI con otros satélites o a partir de sensores aeroportados. Una vez se obtiene la imagen NDVI, se sustituye en el código siguiente (IMG = NDVI) y se ejecuta (con el GIS) la siguiente expresión:

Con("IMG" < -0.185, 0.995, Con(("IMG" >= -0.1852) & ("IMG" < 0.157), 0.970, Con(("IMG" >= 0.157) & ("IMG" <= 0.727), 1.0094 + 0.047 \* Ln("IMG"), Con("IMG" > 0.727, 0.990))))

### 6.2.5 Calculo de la permeabilidad e impermeabilidad

En este subapartado, explicamos cómo convertimos un mapa de usos y cubiertas del suelo en un mapa de permeabilidad (fig. 6.17). La metodología de reclasificación es aplicable a cualquier mapa de usos. En nuestro caso, se ha partido de los Mapas de

Cubiertas y Usos del Suelo de Cataluña (todas las ediciones, para ver su evolución), y se han llevado a cabo las siguientes fases o tareas:

Se parte del nivel de leyenda de 24 categorías urbanas que tienen todas las ediciones.

Posteriormente, se deciden las consiguientes reagrupaciones para hacer los mapas de permeabilidad/escorrentía.

Las 24 categorías iniciales se han reclasificado en 7 categorías finales siguiendo las tablas de escorrentía para diferentes periodos de retorno propuestas por Ven Chow et al. (1988).

En estas tablas aparecen los coeficientes de escorrentía (en tanto por 1).

El coeficiente nos indicará el agua que circulará por encima cada una de las superficies. Finalmente se calcula el coeficiente medio para cada municipio.

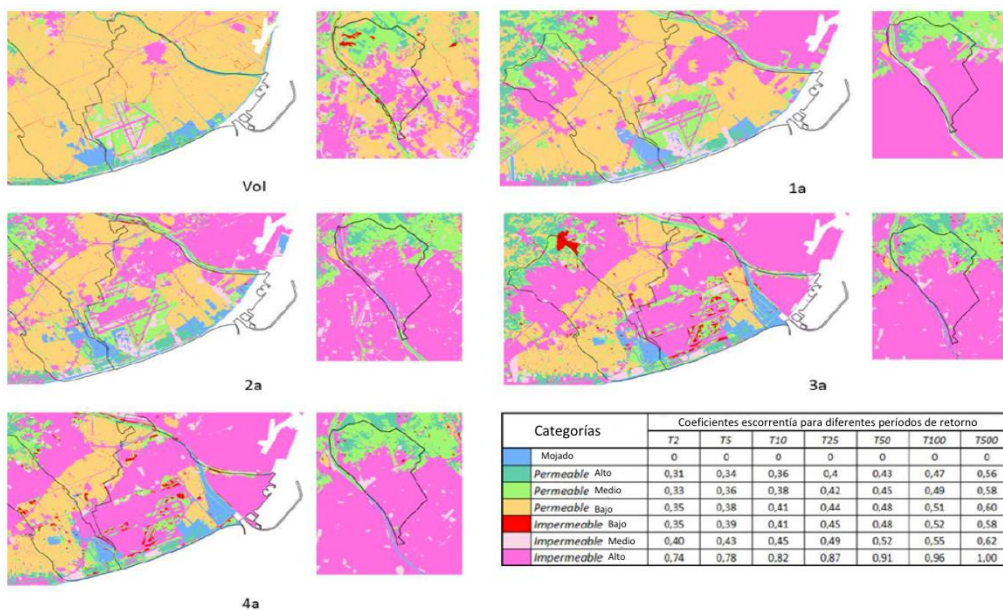


Figura 6.17 Mapas de permeabilidad basados en los MCS-Cat (METROBS, 2015).

Este producto se preparó inicialmente para el proyecto del AMB, METROBS 2015, y se reutilizó para corregir parámetros de permeabilidad definidos en el ADN de las LCZ.

### 6.2.6 Procesado de las salidas del modelo Urbclim.

Toda la información de metadatos (datos de series climáticas desde 1986 hasta 2100) se encuentra en formato Excel en el archivo: ProcesDades\_urbclim.xlsx. Para el procesado de las salidas del modelo UrbClim se han diseñado las siguientes tareas:

Cargamos el fichero (.nc) en un GIS para extraer las características de la imagen.

Qué variables hay, el nombre que tienen.

Cargamos en el programa Geoview y guardamos el xml.

Separamos los ficheros en traspaso y normal.

A continuación, generamos un xml por cada salida del modelo (cada año).

Renombramos de .nc a .raw y convertimos de .raw a .tif mediante una aplicación que se llama ICCImagedatatypechange.exe que se llama desde un bate raw2tif.bat (la lista se procesa con do\_raw2tif.bat). Con esto generamos los .tif anuales de las salidas.

Analizamos qué bandas de la imagen .tif pertenecen al verano y para cada variable. Explicado en la hoja Excel.

Se hace una unión con el fin de adjuntar todos los años por períodos. En nuestro caso, de cada 30 años.

A continuación, creamos unos archivos de opciones (.txt) que da los parámetros de ejecución del programa de nombre test.exe. I se aplicará un programa que calculará las estadísticas, y por tanto resumirá las 2700 bandas (los 30 años los veranos) en 7 bandas (cada una perteneciente a un cálculo estadístico, en este caso percentiles y la desviación estándar).

En el do\_STS se escriben las OPT creadas y se llama el programa. Se cargará el programa hecho en *Python* para hacer un *flip* vertical y con la xml, podremos dar las coordenadas que queremos.



### **6.3 Análisis del impacto y los beneficios de los productos de comportamiento térmico**

Encontrar soluciones de planificación y diseño para reducir el calor excesivo en los ecosistemas urbanos es un desafío clave y debe incluir un diseño inteligente en el desarrollo urbano sostenible. Soluciones de diseño adecuadas son fundamentales para lograr los beneficios que pueden aportar las estrategias orientadas a crear ciudades sostenibles, y en esta tesis se muestra que el concepto LCZ, entre otros, consisten en una poderosa herramienta de planificación para identificar y desarrollar formas y paisajes urbanos sostenibles.

Las estrategias de mitigación de las temperaturas extremas y los efectos de isla de calor urbana tienen la naturaleza de un proceso de toma de decisiones y las LCZ deben participar de cerca en este proceso, proporcionando una base para la participación de diferentes actores e indicadores urbanos. El paradigma sintetizador que proporciona el enfoque LCZ y las estrategias de mitigación de las altas temperaturas y la isla de calor urbana en las ciudades, precisan de forma prioritaria de tales plataformas colaborativas.

Estas plataformas requieren el desarrollo de productos y servicios geográficos para un mejor análisis y evaluación del clima urbano y planificación espacial para ajustar las estrategias a los contextos socioeconómicos, ecológicos y de gestión de la ciudad.

Los aspectos técnicos como la magnitud espacio-temporal, medidas, modelos y simulaciones se vuelven primordiales pero el éxito y la usabilidad de las LCZ y las estrategias de mitigación dependen en gran medida de plataformas factibles, viables y deseables basadas en geoinformación fácil de usar y explotar. El uso práctico es un objetivo primordial para conseguir el compromiso y la participación de todos los actores; academia, ciudadanía, sector público y privado (modelo 4 hélices).

En este apartado se muestran las principales características técnicas y temáticas que se derivan del GIS desarrollado para este proyecto sobre la isla de calor urbana de la ciudad de Sabadell, y que nos permiten descubrir técnicamente y en términos de impacto y beneficios de un nuevo producto de cartografía temática para el ICGC. La

ficha técnica se divide en: objetivo del producto, usuarios potenciales, trabajos a realizar, beneficios del usuario final.

En los anexos, se adjunta también el informe del producto de sostenibilidad que se ha elaborado a lo largo del Doctorado Industrial. El informe es en este caso sobre la ciudad de Berga, una ciudad pequeña del interior dentro de un conjunto orográfico complejo.

### **6.3.1 Objetivo del producto**

Creación de nueva cartografía urbana que aporte información de la capacidad térmica de las cubiertas que conforman la ciudad, para poder buscar soluciones que ayuden a paliar el riesgo y la vulnerabilidad con respecto al fenómeno de isla de calor urbana y calor extremo y encontrar nuevas formas de urbanización a partir de dicha información, que conlleven mayor resiliencia a las zonas densamente urbanizadas.

Los usuarios potenciales son las agencias públicas y privadas, agentes de planificación urbana, Departamentos de Territorio y Sostenibilidad, empresas públicas y privadas de construcción de infraestructuras o promotores inmobiliarios, entre otros.

El producto consiste en un visor QGIS e INSTAMAPS con todas las capas georreferenciadas en este caso LCZ, imágenes térmicas, y capas de geoinformación disponibles de fracción urbana; características de los tejados, idoneidad energética o contaminación lumínica. El objetivo consiste en poder analizar los diferentes tipos de cartografías temáticas y o cruzar diferentes capas con el fin de observar correlaciones y generar nuevo conocimiento. El visor se acompaña de un informe elaborado por el ICGC analizando las principales características del estudio y resultados.

### 6.3.2 Trabajos a realizar

Sobre el ámbito de estudio, en el caso tipo que se expone el término municipal de Sabadell, se realizan las siguientes tareas:

- a) Vuelo nocturno con el sensor térmico TASI del ICGC con una resolución espacial de 3 metros.
- b) Procesamiento de los datos con el fin de obtener los productos del punto 6.2 de este documento.
- c) Obtención de las LCZ a partir de imágenaría satélite (WUDAPT) y análisis en particular de la introducción de datos Sentinel 2 (LCZ\_0).
- d) Caracterización de las LCZ en función de la temperatura.
- e) Caracterizadas las LCZ, cruce con otras capas de geoinformación: cubiertas y usos del suelo, cubiertas verdes (NDVI).
- f) Integración en un entorno abierto de análisis y gestión geográfica QGIS
- g) Visualización herramienta web de geoinformación de los resultados-STORYMAPS-INSTAMAPS (figs 6.18 y 6.19)

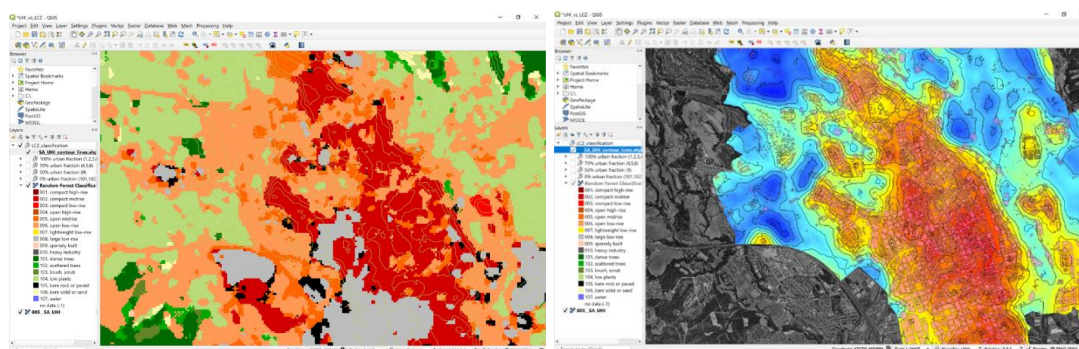


Figura 6.18 Ejemplos de la integración en la herramienta de análisis de geoinformación abierta QGIS de los resultados operacionales sobre Sabadell

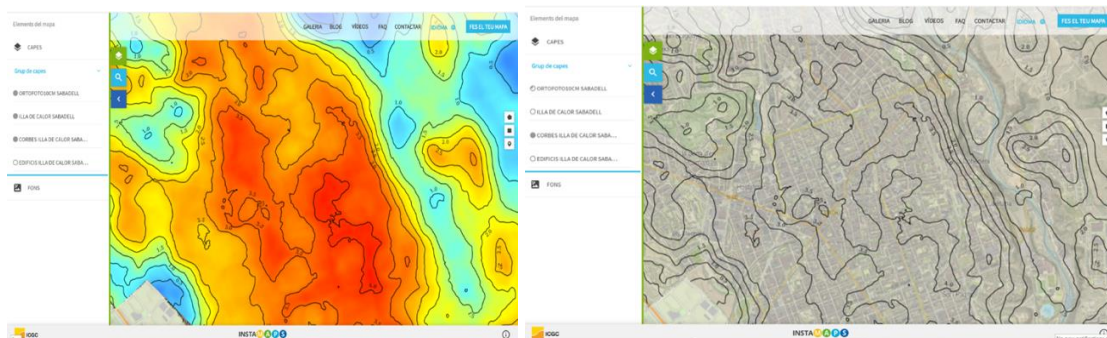


Figura 6.19 Ejemplos de la integración en la herramienta web STORYMAPS-INSTAMAPS de los resultados operacionales sobre Sabadell.

### 6.3.3 Potencialidades y análisis del impacto

En este apartado se ha elaborado una aproximación descriptiva y cuantitativa de los principales elementos que se han tenido en consideración para estimar el valor, contribución directa e indirecta que la implementación de las LCZ en términos operacionales como producto y servicio contratable (tabla 6.4).

<p><b>INPUTS</b></p>	<p>Costes Personal: 3500 €                  Otros costes directos: 9000 €                  Subcontratación: 0 €                  Costes Indirectos: 3125 €</p>
<p><b>OUTPUTS</b></p>	<p>Ortoimagen de radiancia en formato Geotiff, del sensor térmico utilizado. En el caso de utilizar el sensor hiperespectral, en vez de uno bolometrico, se daría la imagen en 16bits en los 32 canales espectrales del instrumento TASI.                  Imagen de temperaturas en el rango dinámico del instrumento térmico en formato Geotiff.                  Máscaras vectoriales de edificios y calles a partir de bases topográficas (escalas 1:5.000 i 1:1.000).                  Segmentación vectorial de las diferentes zonas a partir de los rangos o isolíneas de diferencias de temperatura respecto a la referencia que se define previamente. Esta información se podrá usar directamente en un GIS.                  Informe final con los resultados obtenidos.                  LCZ nivel 0 en formato ráster                  Proyecto QGIS con las capas térmicas LCZ nivel 0 integradas con la capa de verde urbano.                  Informe final donde se documentarán los resultados finales, la metodología empleada, el análisis de las relaciones entre las categorías de las LCZ y la temperatura en verso a los datos de estaciones meteorológicas y la información hiperespectral TASI y en particular del análisis del impacto de la vegetación en el comportamiento térmico.</p>
<p><b>OUTCOMES</b></p>	<p>Localizar las zonas más vulnerables ante situaciones de ola de calor, para activar medidas de mitigación y adaptación.                  Realizar inventario de zonas donde la administración pública debe actuar con prioridad para atajar problemas sociales y de salud derivados del aumento de la temperatura urbana.                  Mezclando datos socioeconómicos se pueden localizar las zonas de riesgo socioeconómico.                  Generación de nueva actividad económica en el nuevo diseño urbano.</p>

<b>IMPACTO</b>	Pobre 2 Medio 2.5 Bueno 3 Muy bueno 4 Excelente 5 - Localizar las zonas más vulnerables ante situaciones de ola de calor. (Puntuación 5.0 – peso del indicador 35%) (Puntuación 4.5 – Peso del indicador 30% ) - Mezclando datos socioeconómicos se pueden localizar las zonas de riesgo socioeconómico. (Puntuación 4.0 – Peso del indicador 25%) - Empresas privadas valorar beneficios de localizaciones. (Puntuación 3.0) – Peso Indicador 10%)  <b><i>IMPACTO valor = 4.4/5</i></b>
----------------	--

Tabla 6.4 Estimación del valor de la implementación directa e indirecta de las LCZ y productos derivados.

En el caso de los *inputs*, se ha efectuado una primera cuantificación, en el escenario de un vuelo hiperespectral térmico y generación de los outputs especificados para un ecosistema urbano tipo y se ha aplicado un *flate rate* del 15% para el cálculo de los costes indirectos.

## 6.4 Otras utilidades de las LCZ: Metodología de desagregación espacial de emisiones mediante las LCZ.

### 6.4.1 Justificación

Las ciudades tienen un fuerte impacto sobre el clima en una jerarquía de escalas que se extiende desde la microescala (por ejemplo, la calle), la meso-escala (ciudad y alrededores) hasta la macro-escala (regional) (Brousse et al., 2016). En estos impactos se incluyen el efecto de la isla de calor urbana y los problemas de calidad del aire. Muchos de estos cambios tienen efectos perjudiciales directos e indirectos sobre la salud, el suministro de agua o el consumo de energía (Tan et al., 2010; Salamanca et al., 2012; Alvarez et al., 2017).

Los procesos que dan lugar a los efectos del clima urbano pueden vincularse a aspectos relacionados con la morfología y usos del ecosistema urbano. El esquema urbano describe aspectos de la cobertura superficial como sería por ejemplo la fracción

impermeable, los materiales de construcción utilizados (características térmicas y/o radiativas) o la morfología tridimensional como; las alturas de los edificios, las alturas de los árboles o el ancho de las calles. La función urbana describe las actividades en las ciudades que se sustentan en la producción de energía y el consumo y transformación de materiales y agua, lo que genera, como consecuencia, desperdicios (Brousse et al., 2016). La forma y la función están fuertemente correlacionadas y producen un paisaje urbano heterogéneo que habitualmente se representa utilizando mapas de coberturas del suelo. Sin embargo, existe una gran variación en la información disponible sobre las ciudades (tanto en términos de cobertura, escala y consistencia) representa un impedimento para el progreso en los estudios climáticos urbanos. Respondiendo a tales problemáticas, las LCZ establecen un sistema de estandarización de las zonas urbanas y también rurales donde cada categoría está descrita por parámetros geométricos, térmicos, radiativos y metabólicos que constituirán un mapa más detallado y más real donde los modelos meteorológicos y climáticos podrán representar de forma más óptima los resultados de sus salidas (Ching et al., 2018).

La urbanización, es decir, la transformación del paisaje natural en paisajes urbanos antropogénicos ha generado muchas consecuencias que han sido y son estudiadas extensamente y gran parte del conocimiento adquirido se ha codificado en una variedad de modelos de clima urbano. Estos modelos varían en su enfoque y sofisticación, pero todos requieren descripciones numéricas (parámetros) del carácter físico del paisaje urbano para simular el efecto de la urbanización (Santiago et al., 2017; Wang et al., 2018). Algunos de estos parámetros son la superficie pavimentada, las áreas planificadas de los edificios, sus cubiertas y dimensiones entre otros elementos de rugosidad. Estos modelos se anidan en modelos de mayor escala que permiten interacciones entre diferentes procesos atmosféricos.

A pesar de que las áreas urbanas solo cubren el 2% de la superficie de la Tierra, son las responsables de entre el 40% y el 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Habitat, 2013). Por este motivo, las acciones para mitigar el cambio climático residen, en gran parte, en las ciudades y es donde se deben aplicar. La

ampliación de la cobertura verde urbana se propone como una estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático no solo para reducir los gases de efecto invernadero sino también para reducir la isla de calor urbana y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. A pesar de que hay estudios que abalan que las infraestructuras verdes tienen efectos beneficiosos en la salud (Dadvand et al., 2018) y sus efectos en la isla de calor urbana. Existe una fuerte dependencia en el tipo de cubierta verde, el clima de la región y en consecuencia los impactos y beneficios cuantitativos y cualitativos, particularmente en la calidad del aire (Zölch et al., 2016).

Para llenar este nivel de incertidumbre, se utilizan metodologías punteras como el modelo numérico de clima químico. Estos modelos, entre otros datos, requieren la entrada de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes antropogénicas y biogénicas a una alta resolución temporal y espacial. Por el momento, los inventarios de emisiones están disponibles en una resolución de hasta 1x1km en Cataluña. Sin embargo, hay que mejorar la resolución del modelo para cuantificar el efecto de las infraestructuras verdes (que podrían ser áreas relativamente pequeñas, tales como cubiertas verdes y parques) y, consecuentemente de las emisiones.

Actualmente los inventarios de emisiones proporcionadas por el Centro de Supercomputación de Barcelona (BSC) tanto a nivel estatal como local (de Catalunya) están a una resolución espacial de 1km<sup>2</sup> y se obtienen a través del modelo HERMES v2.0 (Guevara et al., 2013). No se puede cuantificar ni cualificar la eficacia de las infraestructuras verdes respecto la posible reducción de los niveles de contaminantes atmosférico, que provienen de la combustión doméstica, si las emisiones están a una escala espacial de 1 km ya que, en los entornos urbanos de nuestra zona de interés, las zonas verdes son generalmente áreas relativamente pequeñas. Por lo tanto, es necesario crear una metodología que permita desglosar espacialmente las emisiones en función de la densidad de población y el uso del suelo (Maes et al., 2009).

El objetivo de este apartado es crear una metodología para desglosar las emisiones de combustión doméstica a una resolución geoespacial de 100x100m sobre el ecosistema urbano de Barcelona a partir del inventario de emisiones proporcionado por el BSC. A

partir de la interrelación de las LCZ y una matriz de población ambas a resoluciones de 100m ha sido posible desarrollar una metodología de *downscaling* de las emisiones (en este caso domésticas, pero aplicables a otras tipologías).

Existe una necesidad de cualificar la eficacia de las infraestructuras verdes en entornos urbanos respecto la posible reducción de los niveles de contaminantes atmosféricos para dotar a la administración de suficiente información y poder mejorar las políticas de gestión y planificación urbana. Por lo tanto, es necesario obtener un inventario de emisiones a una escala con una resolución más precisa para que se puedan aplicar modelos urbanos.

### 6.4.2 Metodología

Con la combinación de los datos proporcionados por la capa de las LCZ y la capa de densidad de población se pueden localizar las áreas residenciales (marcadas en rojo en la figura 6.20). Estas áreas son las que generan las emisiones de combustión doméstica y, dependiendo de la densidad de edificios, la intensidad de emisión es variable. La densidad de edificios se puede identificar con la capa de las LCZ: de la LCZ 1 hasta la LCZ 9 se caracterizan las diferentes zonas residenciales que puede haber en las áreas urbanas y que, por tanto, son fuente potencial de emisión de gases de combustión interna.

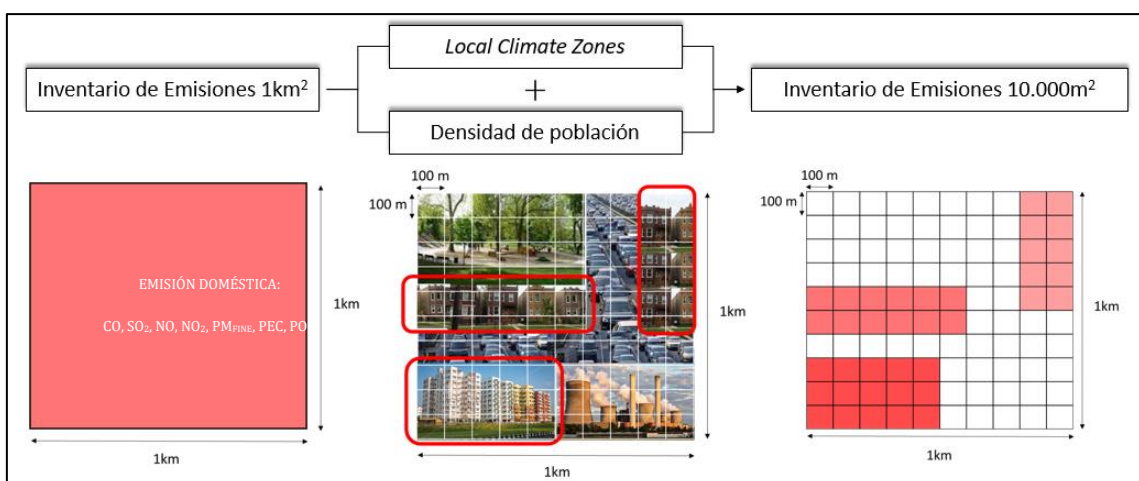


Figura 6.20 Esquema básico de la metodología para mejorar la resolución de las emisiones.



b) *Creación de la cuadrícula 100x100m*

Primero es necesario crear una cuadrícula (*grid*) de 100x100m de nuestra área de estudio que corresponde al área toda nuestra ROI. Este proceso se ha realizado con la herramienta de ArcMap *Create Fishnet*. Dentro de cada cuadrícula de la *grid* de 100x100m hay que incorporarle la correspondiente información de población y LCZ con el siguiente procedimiento:

Unión espacial cuadrícula – LCZ: con la herramienta *Spatial Join* (ArcMap) unimos las propiedades de la capa de las LCZ con la cuadrícula creada anteriormente y, de esta forma, conseguimos conocer qué categoría de LCZ tiene cada una de las celdas de la *grid* de 100x100m.

Calcular densidad población: la capa de población georreferenciada viene dada por *grids* de diferentes tamaños, por eso es necesario calcular la densidad de población (población/área) a través del *Field Calculator* d'ArcMap.

Unión espacial cuadrícula – población: con la herramienta *Spatial Join*, repetimos el proceso) con la *grid* resultante de dicho apartado y la capa de población.

Calcular población por cada celda: a través del *Field Calculator*, multiplicamos la densidad de la población de la *grid* resultante del apartado anterior) con el área de cada celda y obtenemos el número de habitantes en cada celda de 100m x 100m.

Calcular peso de población por cada LCZ: este cálculo se realiza a través de una hoja Excel y solo se tienen en cuenta de la LCZ 1 hasta la LCZ 9, que son las clases que describen las áreas residenciales. Con la capa resultante del apartado anterior), obtenemos el total de población y clase de LCZ por celda. Se calcula primero el total de población de cada LCZ y después se hace una ratio entre el total. Esta ratio (que nombramos *Peso\_LCZ*) nos indica el peso que tiene la población por cada clase de LCZ, por ejemplo, en este caso, el 70,69% de la población está localizada en la LCZ2 (tabla 6.5).

LCZ	Población	PESO_LCZ	% PESO_LCZ
LCZ 1	199.586	0,0424	4,24%
LCZ 2	3.027.027	0,6424	64,24%
LCZ 3	354.855	0,0753	7,53%
LCZ 4	01.753	0,0004	0,04%
LCZ 5	122.525	0,0260	2,60%
LCZ 6	420.602	0,0893	8,93%
LCZ 7	00.000	0,0000	0,00%
LCZ 8	560.304	0,1189	11,89%
LCZ 9	25.582	0,0054	0,54%
<b>TOTAL</b>	<b>4.712.234</b>	<b>1</b>	<b>100%</b>

Tabla 6.5. Peso de población por cada LCZ.

Unión espacial con grid de emisiones 1km<sup>2</sup>: El último paso para completar esta cuadrícula es conocer el número de celdas de 100x100m de cada LCZ que hay dentro de una celda de emisión 1x1km. Primero es necesario realizar un *Spatial Join* con una capa de emisión para obtener la cantidad de celdas que hay de una misma LCZ dentro de las dimensiones de 1km<sup>2</sup>. Por ejemplo, la celda de emisión 1 del contaminante CO, la componen un total de 144 celdas de 100x100m de las cuales 12 son LCZ 1, 36 LCZ 2, 33 LCZ 3, 46 LCZ 5, 19 LCZ 6, 4 LCZ 8, 4 LCZ B y 16 LCZ D (fig 6.21). El cálculo se realiza a través de Excel y se incorpora a la capa de la *grid* 100x100m junto con toda la información calculada anteriormente. A la capa final resultante se le da el nombre de *completed\_net100m*.

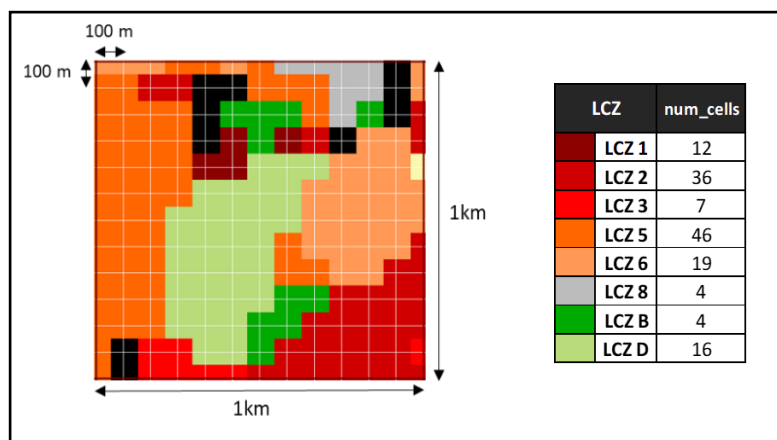


Figura 6.21 Ejemplo del cálculo del número de celdas por celda de emisión 1km<sup>2</sup> de la grid *completed\_net100m*.

b) *Desagregación de emisiones 1x1km a 100x100m*

Combinando la capa *completed\_net100m* con cada variable de emisión del inventario podemos obtener las emisiones en las celdas de 100m x 100m focalizadas en las áreas fuentes de emisión doméstica (LCZ 1 hasta LCZ9). El procedimiento es el siguiente:

Transformación de la capa de emisiones: el primer paso es conseguir una capa de emisiones manejable ya que en ArcMap no es posible trabajar directamente con archivos *NetCDF*, pero sí que existen diferentes herramientas que permiten convertirlo en ráster o *Feature Layer*.

Con la herramienta *Make NetCDF to Feature Layer*, podemos transformar los archivos NetCDF en una capa de puntos (hay que seleccionar la variable, es decir, el contaminante).

El sistema de coordenadas de estos archivos y, por consecuencia, de la capa resultante del punto 1 es el *World Geodetic System 1984*. Mediante la herramienta *Project* cambiamos el sistema de coordenadas al *European Terrestrial Reference System 1989* ya que todas las anteriores capas se encuentran en esta proyección.

A partir de la capa de puntos creamos una capa ráster (herramienta *Point to Raster*) y mediante el *clip* cortamos el área de estudio.

Generamos una cuadrícula de 1x1km e incorporamos la información de la capa resultante del punto 3: extraemos el valor del contaminante de cada celda mediante la herramienta *Raster to Point* (el resultado es una capa de puntos), creamos una cuadrícula de 1km<sup>2</sup> de área y, a través de un *Spatial Join* con la capa resultante del *Raster to Point*, obtenemos una *grid* de la emisión del contaminante de 1x1km de resolución (capa de polígonos).

Unir cuadrícula 100x100m con la emisión: con un *Spatial Join* entre la cuadrícula resultante del apartado (*completed\_net100m*) y el polígono de emisión

obtenido en el anterior punto 4, incorporamos la información del valor de emisión de escala  $1\text{km}^2$  a la *grid* de  $100\times 100\text{m}$ .

Calcular el valor de emisión por cada celda de  $100\times 100\text{m}$ : primero, en la tabla de atributos, hay que añadirle un campo que nombraremos “*contaminante*”\_100m2. A través del *Field Calculator* realizaremos la siguiente operación:

$$E_{\text{Cont.cell1}} = \frac{E_{1\text{km}} * \text{PESO}_{\text{LCZ}}}{\text{num\_cells}} * \text{Area}_{\text{cell1}}$$

Siendo:

- $E_{\text{Cont.cell1}}$  = valor de la emisión resultante de cada celda.
- $E_{1\text{km}}$  = valor de la emisión a escala  $1\text{km}^2$
- $\text{PESO}_{\text{LCZ}}$  = peso de la población por cada LCZ.
- $\text{num\_cells}$  = número de celdas de cada LCZ dentro de una emisión de  $1\text{km}^2$ .
- $\text{Area}_{\text{cell1}}$  = el área de una celda de  $100\times 100\text{m}$  que siempre es  $10.000\text{m}^2$ .

Solo las celdas con las LCZ de la 1 hasta la 9 (áreas urbanas) obtendrán resultado ya que el resto tiene un peso igual a 0. Por lo tanto, redistribuiremos la emisión de  $1\text{km}^2$  a las celdas de  $10.000\text{m}^2$  según la población y el número de celdas de cada LCZ dentro de un mismo valor de emisión a  $1\text{km} \times 1\text{km}$  (fig 6.22).

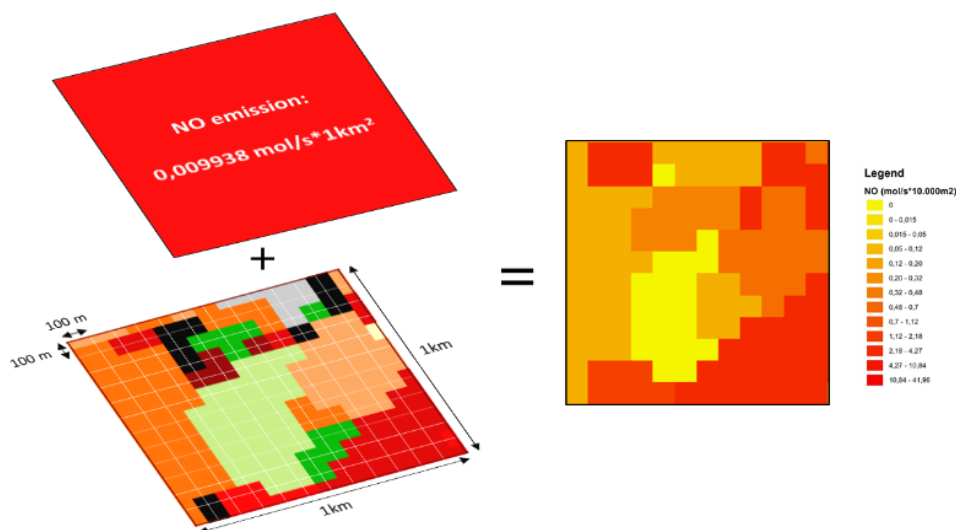


Figura 6.22 Ejemplo de la desagregación de una celda de emisión NO de  $1\text{km}^2$  a  $10.000\text{m}^2$ .

c) *Implementación*

Para simular situaciones atmosféricas de emisiones domésticas es necesario introducir datos de emisiones diarias para un mes, varios meses o incluso años. Como se ha descrito anteriormente, cada fichero de emisión representa un día (24 horas) y contiene información de varios contaminantes, si se requiere mejorar la resolución espacial del inventario de todo un año, es decir, repetir manualmente el proceso para 365 ficheros con sus respectivas variables podría llevar muchísimo tiempo. Para ello se ha desarrollado un *script Python* que itera y automatiza el procedimiento. No es necesario crear una cuadrícula de 100x100m cada vez que se desagregue una emisión, la misma creada en el punto 3 servirá para todo el proceso. La figura 6.23 muestra gráficamente el proceso de iteración de diferentes *inputs* (archivos .nc y sus variables) y *outputs* (un *Feature Class* para cada fichero *NetCDF* (.nc) y cada contaminante).

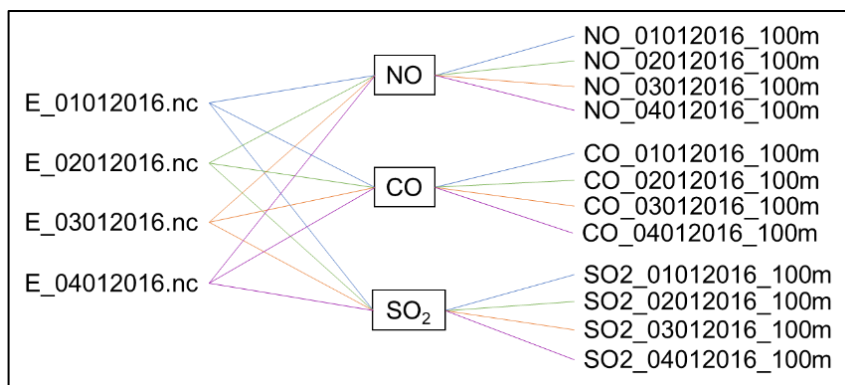


Figura 6.23 Ejemplo de iteración archivos NetCDF y sus variables.

El script completo sólo funciona en el programa de ArcMap. Seguidamente se detalla alguna de las partes del script más relevantes:

Importar los paquetes de *arcpy* y establecer el directorio (*path*) donde irá a buscar los archivos .nc y donde situará los outputs resultantes. Primero hay que crear una carpeta “Emisiones” e incluir los archivos .nc y la *grid* completed\_net100m.shp. Si el script es utilizado en otros ordenadores, se deben cambiar estas path acorde al directorio donde se cree la carpeta EMISIONES ‘.

Es necesario crear una geodatabase (path2) e importar la grid añadida a la carpeta EMISIONES'. Los *Shapefiles* ocupan mucho espacio, por eso este script está diseñado para trabajar en una geodatabase (ubicación de los outputs) y, en el último paso, convertir los *Feature Class* en *Shapefile*. Por lo tanto, es necesario también crear una carpeta para situar estos *Shapefiles* (path3). La creación de ambos directorios solo se realizará en caso de que no existan.

Se deben definir los nombres de los archivos resultantes, donde encontrar los archivos entrantes y sus variables para iterar.

Una vez definidos los nombres comienza la desagregación. Cada proceso genera una capa resultante que sólo se utilizará en el siguiente proceso y para evitar obtener una lista interminable de capas intermedias se eliminan una vez y ya no se usan.

El último proceso para la conversión de *Feature Class* en *Shapefile* (.shp) sólo es necesario utilizarla si se desea tener como outputs archivos .shp.

La simbolización y clasificación de las capas resultantes se realiza utilizando el método de *Jenks Natural Breaks*. Es un método de agrupamiento de datos diseñado para determinar la mejor disposición de valores en diferentes clases. Esto se hace buscando minimizar la desviación promedio de cada clase de la media de la clase, al tiempo que se maximiza la desviación de cada clase de los medios de los otros grupos. En otras palabras, el método busca reducir la varianza dentro de las clases y maximizar la varianza entre las clases (Jenks, 1967).





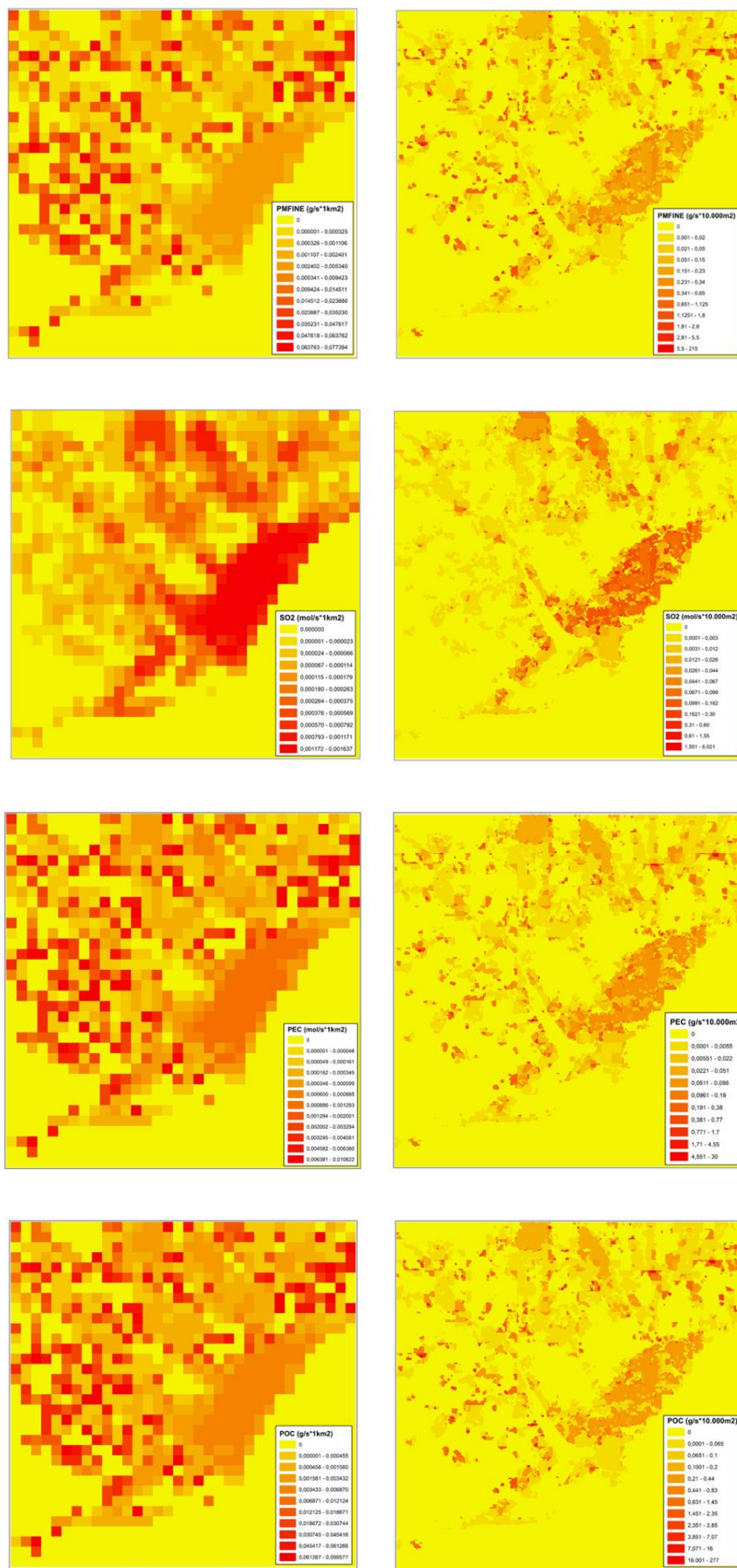


Figura 6.24 Emisiones consideradas a 1 km<sup>2</sup> (izquierda) y 10.000 m<sup>2</sup> (derecha) respectivamente (Cont.).



Se observa en las capas resultantes una más que notable mejora en la resolución espacial en la desagregación de las emisiones en las áreas urbanas que son las posibles fuentes potenciales de emisión de contaminación doméstica. La metodología aplicada ha resultado ser buena ya que se ha garantizado la conservación de la masa, es decir, la emisión total de cada contaminante es igual en las dos cuadrículas. En otras palabras, el valor de concentración de un contaminante en una celda de 1x1km es el mismo que la suma de los valores de las celdas de 100x100m que componen esta celda de 1x1km.

Una gran concentración de emisión y con valores máximos para los contaminantes NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se focaliza, principalmente, en la ciudad de Barcelona. Los contaminantes se desagregan correctamente en las áreas residenciales y en la ciudad Barcelona se ve potenciada esta desagregación ya que se observan celdas de la cuadrícula 100x100m con valores de emisión muy bajos o nulos que corresponden, fundamentalmente, a zonas verdes.

#### **6.4.4. Aportación de las LCZ a la desagregación espacial de emisiones**

Se consigue desarrollar una buena metodología para mejorar la resolución de las emisiones de combustión doméstica gracias, sobre todo, a la buena caracterización del uso del suelo que ofrecen las LCZ para las zonas urbanas y periurbanas.

El uso de sistemas de información geográfica ofrece la posibilidad de combinar otras capas socioeconómicas o demográficas y conseguir, en definitiva, una mejor desagregación de las emisiones de combustión doméstica a resolución 100x100m. Además, se ha podido mejorar la resolución espacial conservando la masa total.

El *script* desarrollado para la automatización de la metodología de este trabajo permite la generación de un nuevo inventario de emisiones a una alta resolución, aunque cabe destacar que para desagregar los contaminantes de las emisiones de combustión doméstica para un día tarda aproximadamente 15' por lo que sería conveniente optimizar la metodología con tal de reducir el coste computacional. Además, como trabajo futuro, sería conveniente adaptar el *script* con el fin de que sea multiplataforma y poder usarse

en otros programarios. Actualmente se está trabajando en la mejor automatización de esta metodología. La finalidad es cruzarla con nuevas capas de pobreza energética y calidad energética de la vivienda para tener una visión más integradora y real del área de estudio, en el contexto de la generación de cartografías de justicia climática.

# 7. CONCLUSIONES

En este capítulo final, se resumen los hallazgos principales y las contribuciones que se han hecho dentro del campo de la observación de la Tierra, la climatología y la meteorología urbana, cuyo objetivo general es entender y tratar la complejidad del entramado urbano y el importante papel que juegan las cubiertas y otros factores antropogénicos en el comportamiento térmico urbano. Una complejidad singular que modifica el clima provocando en nuestras latitudes una elevada vulnerabilidad a las altas temperaturas que se agravará debido al cambio climático global. Para lograr este objetivo, se han respondido los objetivos específicos enumerados en el apartado 1.2. La sección 7.1 presenta los resultados referidos a cada objetivo, el apartado 7.2 nos presentará una conclusión general enfocada a la utilidad que puede tener este trabajo para la sociedad, se finaliza con un apartado 7.3 abriendo nuevas líneas de investigación para el futuro. El subíndice del capítulo es el siguiente:

7.1 Resultados de la tesis.....	210
7.2 Conclusiones generales.....	221
7.3 Retos de futuro.....	222

## 7.1 Resultados de la tesis

### 1 Crear una primera unización de *Local Climate Zones* (LCZ) presente e histórica para el Área Metropolitana de Barcelona.

Las *Local Climate Zones* (LCZ) constituyen una óptima herramienta y sistema de estandarización de los usos y cubiertas del suelo desde una perspectiva térmica. Sirven como punto de partida muy detallado para llegar a entender las propiedades intrínsecas de las cubiertas y sus comportamientos térmicos, ya que nos propone unos estándares basados en umbrales que definen aspectos radiativos, físicos y metabólicos de la ciudad. En la tesis se han presentado dos metodologías diferentes para realizar esta cartografía:

- a) Mediante una propuesta metodológica internacional basada en observación de la tierra: LCZ WUDAPT.

En la tesis se ha adaptado el método internacional WUDAPT basado en datos de satélite Landsat 8 (Bechtel et al., 2015) a los satélites Landsat 5 y Landsat 7 con la finalidad de poder recrear cartografías históricas y observar los cambios de los usos del suelo a nivel temporal y/o con el fin de modelizar casos de estudio pretéritos. También se ha adaptado para imágenes Sentinel 2, del programa europeo de Observación de la Tierra Copernicus.

La validación de los resultados se ha realizado mediante el índice Kappa (K).

Los resultados de la validación han sido óptimos con valores superiores a  $K=0.6$  exceptuando la imagen con Landsat 5 con un valor  $K=0.58$ . Los índices más favorables han sido para las imágenes Landsat 8 del período presente. Esto es debido principalmente a la dificultad de trazar unas buenas áreas de entrenamiento sobre ortofotos históricas (de menor resolución), sin obviar que los Landsat 5 y 7 tienen un menor número de bandas y menor resolución espacial.

Al comparar las diferentes cartografías históricas concluimos que las clases de LCZ asociadas a zonas urbanas e industriales han crecido alrededor del 50%

en un período de 30 años, debido al éxodo rural y abandono de las tierras agrícolas durante el transcurso del período 1987-2015.

- b) Mediante una metodología propia aprovechando los datos de alta resolución que existen en nuestra región de interés: LCZ modelización LCLU.

Se ha realizado una cartografía de LCZ aprovechando la gran cantidad de datos relacionados con mapas de usos del suelo que dispone el Área Metropolitana de Barcelona. A partir de la conversión de las leyendas del *Urban Atlas* y el Mapa de Coberturas del Suelo del Área Metropolitana de Barcelona y el Modelo Digital de Superficie (datos LiDAR), se ha propuesto un mapa vectorial de alta resolución de LCZ inferior a los 100m de resolución.

Al comparar la metodología WUDAPT con LCLU, observamos que el método WUDAPT sobreestima en un 16% las áreas urbanas e industriales, debido a que el nivel de resolución espacial es menor y el método de interpolación o generalización no es tan preciso. En consecuencia, cuando los datos requeridos estén disponibles, es mejor aplicar la metodología LCLU que la WUDAPT. La metodología WUDAPT es una metodología que presenta gran aplicabilidad, para cualquier región del planeta debido al acceso libre de datos satélite y que consiste en una metodología propuesta mediante *software* libre. Aun así, si la región es rica en datos de usos del suelo y modelos de elevación de alta resolución espacial, recomendamos cambiar de metodología y seguir las directrices propuestas en el método propio LCLU elaborado en el marco de esta Tesis.

Para finalizar, se ha mapeado una cartografía LCZ con los datos de LCLU para el Área Metropolitana de Barcelona acoplando datos WUDAPT para cubrir los contornos restantes de nuestra ROI (*Región de Interés*, 41°14'10"N-1°49'59"E y 41°34'55"N-2°18'16"E). Este mapa ha sido empleado para los modelos climáticos y meteorológicos utilizados durante el trabajo de tesis, obteniendo notables mejoras en sus resultados.

Se han calculado las temperaturas superficiales de tres episodios de olas de calor (15/08/1987, 11/08/2003 y 03/08/2015) para cada período cartografiado (pre-olímpico, pre-Fórum, presente) mediante el método de transferencia radiativa a partir de imágenes Landsat. La finalidad que se ha perseguido es la de obtener una primera caracterización

de la evolución temporal del comportamiento térmico de las LCZ. Observamos como las LCZ urbanas son las que mantienen temperaturas más elevadas, destacando, por encima de todas ellas, la LCZ 8 atribuidas a polígonos industriales y la LCZ E perteneciente al asfalto. Estos resultados son coherentes con las propiedades intrínsecas de cada una de ellas. Los valores de estas dos LCZ se encuentran por encima de 1°C de diferencia respecto zonas urbanas densas (LCZ 2), más de 2°C respecto zonas urbanas poco densas (LCZ 5) y más de 3°C respecto parques urbanos o zonas naturales periurbanas (LCZ B).

Los resultados aquí generados, se han publicado internacionalmente en la web de acceso abierto de WUDAPT (<https://wudapt.cs.purdue.edu/>), en una publicación interna (<https://www.icgc.cat/es/Innovacion/Proyectos-I-D-i/Clima-y-zonificacion-urbana>) del ICGC y forman parte del artículo (Gilabert et al., 2020) y una publicación en la revista catalana de geografía (Gilabert et al., 2018).

## **2 Mejorar, mediante las cartografías creadas, la salida de modelos climáticos, en nuestro caso del UrbClim y modelizar a alta definición el clima presente y futuro en nuestra región de interés. Unización de las LCZ desde una perspectiva climática.**

El modelo UrbClim (De Ridder et al., 2015) es un modelo novedoso creado por VITO (*Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*, Instituto Flamenco para la investigación Tecnológica) que acepta las LCZ como input de entrada y por lo tanto puede substituir capas como el *Corine Land Cover*, mejorando las salidas de las temperaturas debido a la entrada más heterogénea de las propiedades de las cubiertas urbanas.

En el marco del proyecto PUCS (Servicio Paneuropeo de Clima Urbano), dónde se colaboró en el marco de esta tesis, en el apartado de *inputs* urbanos para el modelo, se han recogido las salidas diarias de temperatura una vez validado el modelo. A pesar de subestimar la temperatura hasta 2°C en las máximas, el modelo mejora y reduce la sobreestimación hasta 1°C si se usan las LCZ en detrimento del *Corine Land Cover*. Esto se debe a que el modelo contempla no solo más heterogeneidad de superficies urbanas,

sino que permite entrar las propiedades térmicas, radiativas y metabólicas que en este caso propone Stewart y Oke (2012) asociadas a las LCZ.

A partir de las salidas del modelo se han obtenido los percentiles climáticos extremos y medios (P50, P75, P90, P95 y P99) para los meses de verano (junio-julio-agosto, JJA) y para el período 1987-2016 y también para el período 2071-2100 utilizando los escenarios RCP 4.5 y 8.5. La resolución temporal es diaria y la resolución espacial llega hasta los 100x100m (poco común para lo que se refiere a este tipo de modelos), un detalle muy óptimo para poder hacer estudios de vulnerabilidad climática.

Se ha podido llegar a este nivel de detalle gracias a que el modelo UrbClim se fundamenta en un esquema de superficie terrestre con física urbana simplificada acoplada a una capa límite atmosférica.

En las salidas de la modelización en tiempo presente, se ha observado que en el percentil P99 la temperatura de bochorno en la mayor parte de la ciudad registra 39°C. Sin tener en cuenta el efecto de la humedad, la temperatura media en el mismo percentil supera los 30°C en la mayor parte de la ciudad. Para la distribución de la mediana, se superan los 25°C en toda la ciudad con excepción de la zona más próxima a la cordillera Litoral. Cuando se habla de temperatura media de las máximas diarias superan los 30°C en toda la ciudad en el percentil 90, y los 27°C en el percentil 50. En cuanto a los escenarios futuros, para las distribuciones referentes a la mediana P50, el RCP 4.5 se asemeja bastante al P50 1987-2015, puede llegar a registrar temperaturas medias de hasta 28.5°C. En el caso del RCP 8.5, la distribución P50 perteneciente a la más frecuente implica temperaturas superiores a los 28.5°C y en algunos casos puede llegar a los 29.8°C.

Fruto de este trabajo es el artículo Gilabert et al., (2020) en el que se muestran los resultados de la modelización climática 1987-2016.

### **3 Unizar las *Local Climate Zones* a nivel térmico con la finalidad de poder estudiar la exposición y la vulnerabilidad al calor.**

Mediante las distribuciones climáticas obtenidas con el modelo Urbclim, se han caracterizado las LCZ desde una perspectiva de extremos climáticos térmicos.

Las LCZ A y C (suelos de bosque denso y arbustos), que pertenecen a las categorías más representativas a nivel espacial, muestran las temperaturas más bajas. En cuanto a la categoría B, atribuida a los parques interurbanos, mantiene temperaturas inferiores a las de las zonas urbanas circundantes. Las temperaturas medias diarias más altas del verano en Barcelona se concentran a lo largo de las LCZ 2, E, 1, 8, E y 10, siendo las categorías 2, 1 y E (edificación densa y asfalto) las más representativas en la cobertura urbana, en el centro de la ciudad. Con respecto a LCZ 8 y 10 (polígonos e industria) estas son zonas que tienden a registrar altas temperaturas debido a la naturaleza de los usos y los materiales de las cubiertas. Las diferencias pueden llegar a superar los 5°C entre las zonas periurbanas naturales y las zonas urbanas más expuestas. Entre categorías urbanas observamos que las diferencias entre área de edificaciones densas y menos densas pueden llegar a los 2°C de diferencia.

Atendiendo a este comportamiento en las distribuciones se aplicó un test ANOVA, el resultado del cual nos permite afirmar que las características y condiciones medias microclimáticas de cada LCZ son significativamente diferentes entre ellas.

Partiendo de esta premisa, se han podido convertir las LCZ en un modelo de temperaturas donde cada LCZ tiene una temperatura media y unos umbrales asociados. Esta relación nos permite modelizar escenarios de cubiertas urbanas y analizar su efecto, con la finalidad de promover una planificación urbana más sostenible.

La ventaja de la metodología propuesta (dónde se interrelacionan las LCZ con la temperatura) es que permite obtener una distribución de exposición al calor para las temperaturas de verano sin tener que recurrir a modelos climáticos. Tan solo aplicando el modelo de temperatura asociado a cada LCZ podemos obtener esta distribución. También nos puede ser útil para realizar cambios en los usos y cubiertas del suelo sobre la cartografía y, en consecuencia, observar los impactos en la exposición al calor asociada,



con lo que puede ser muy útil para el planificador/a urbano. Al mismo tiempo, nos permite desagregar las salidas del modelo a una escala más detallada e inferior a los 100m, basada en el mapa de LCZ LCLU vectorial. El modelo nos explica más del 90% de las salidas térmicas del UrbClim para los percentiles P50, P75 y P90 y más del 60% para los percentiles más extremos P95 y P99.

El trabajo aquí sintetizado se ha publicado en el artículo Gilabert et al., (2020).

#### **4 Crear índices de exposición y vulnerabilidad combinando la unización térmica de las LCZ con una curva de riesgo de mortalidad asociada a temperaturas extremas y otras unísticas socioeconómicas.**

Se ha propuesto un nuevo índice de exposición al calor (HEI) que evalúa el aumento del riesgo de mortalidad con relación al calor en base a un modelo logístico propuesto por Achebak et al. (2018). El índice (que va de 1 a 7 siendo 1 un valor bajo/óptimo y el 7 el valor más extremo) nos relacionará la mortalidad causada por la insuficiencia cardiorrespiratoria derivada de los efectos de las temperaturas. Este índice, se ha asociado a cada LCZ a partir de la correlación que hemos establecido entre LCZ y comportamiento climático (LCZ-T).

En las distribuciones asociadas a situaciones de olas de calor, consideradas las distribuciones P95 y P99, observamos que el índice HEI de valor 7 es el mayoritario y cubre prácticamente toda la ciudad incrementando el riesgo relativo de mortalidad más de un 100% en comparación al período óptimo HEI=1, que no se encuentra en ninguna distribución igual o superior a P50.

Cabe destacar que en el RCP 8.5 la distribución más extrema abarcaría toda la ciudad con un HEI=7, superando en todo el municipio temperaturas medias diarias superiores a los 31°C. Esta situación conllevaría a noches tórridas con temperaturas superiores a los 25°C en todas las LCZ de la ciudad.

Si comparamos los mapas 2071-2100 con el de referencia 1987-2015, observamos que el índice de exposición se mantiene un punto o dos por debajo. El P99 del período

observado, que sería la distribución más parecida a un período de ola de calor, constituiría la distribución de P75 en el escenario RCP8.5. Esto nos informa del incremento en los impactos de olas de calor en este período futuro y este escenario concreto.

Finalmente se ha integrado el Índice de Población Vulnerable al Clima (CVPI) con el Índice de Exposición al calor (HEI), facilitando así la detección de las zonas con población más sensible al efecto de las altas temperaturas. Al mismo tiempo también se han acoplado a nivel de barrios con variables socioeconómicas (renta per cápita familiar). De esta forma se han acoplado ambas variables obteniendo un índice de vulnerabilidad (HVI) al calor donde se pueden observar las zonas más vulnerables o *hotspots* de la ciudad, teniendo una radiografía óptima en un enfoque de justicia climática.

El trabajo aquí presentado forma parte del artículo Gilabert et al., (2020).

## **5 Elaborar una metodología a modo de workflow para la preparación de inputs de alta resolución urbanos para la modelización mediante el modelo de acceso público WRF con el módulo de dosel urbano BEP+BEM.**

A lo largo de este trabajo de tesis y en concreto en el capítulo 5, se han resuelto las limitaciones de detalle y escala para modelizar el comportamiento urbano a nivel climático y meteorológico.

Se ha trabajado con el modelo WRF BEP+BEM que permite incluir una resolución espacial muy elevada de las características urbanas de la ciudad y su interacción con la capa límite.

Gracias a la alta capacitación del modelo, se han podido preparar inputs muy detallados que han servido para actualizar y redefinir, los umbrales propuestos por Stewart y Oke (2012) aplicados a las LCZ para nuestra ROI:

Hemos creado diferentes capas de morfología urbana a partir de datos LiDAR que nos han permitido establecer detalles de la rugosidad de la ciudad a resoluciones espaciales de 2m.

Hemos calculado las fracciones urbanas, de suelo desnudo y fracciones vegetales mediante técnicas de teledetección a partir de datos satélite con resoluciones de 30m.

Hemos calculado parámetros radiativos mediante diferentes metodologías de observación de la tierra a resoluciones de 30m.

Además, a lo largo de este trabajo de tesis se han llevado a cabo reuniones con arquitectos e ingenieros que nos han ayudado a modificar los valores de las parametrizaciones urbanas que hacen referencia a tipologías de edificios y sus características energéticas.

Toda esta información, mediante diferentes flujos de trabajo, se han incluido en el módulo BEP+BEM que ejecuta la modelización en el dosel urbano.

Mediante esta actualización de las propiedades intrínsecas de las LCZ y la cartografía propuesta en el capítulo 2, se han mejorado los resultados del modelo.

Para analizar todas estas mejoras en la simulación, se ha simulado un caso de estudio referente a la ola de calor que sufrió Barcelona durante el mes de julio de 2015. Una ola de calor que afectó gravemente todo el continente y que registró varios records de temperatura en nuestra región de interés.

La validación nos ha dado errores de RMSE por debajo del  $1.5^{\circ}\text{C}$  y de BIAS por debajo del  $0.5^{\circ}\text{C}$  y como consecuencia han permitido diseñar potenciales planes de mitigación sobre el entramado urbano.

En definitiva, se han preparado diferentes metodologías para poder tratar datos muy específicos de la ciudad con la finalidad de obtener simulaciones más realistas que contemplen la mayor parte de heterogeneidad urbana posible.

Los datos y modelos que se han utilizado han sido todos de libre acceso y por lo tanto las metodologías son replicables en otras áreas urbanas del mundo.

El trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto ERC URBAG dirigido por la Dra. Gara Villalba. Éste forma parte del artículo actualmente en revisión Gilabert et al., (2021).

## **6 Proponer escenarios de futuro y estrategias de mitigación ante el aumento de temperatura para mejorar la respuesta térmica de nuestra área de estudio a partir de la modelización de un caso de estudio utilizando los inputs preparados en el objetivo específico 5.**

A partir de la cadena de inputs urbanos que se ha preparado, hemos podido modificar las características del entramado urbano con la finalidad de proponer escenarios de mitigación más sostenibles que nos ayuden a disminuir la temperatura y el consumo energético.

Estos planes de mitigación se han podido acoplar de forma muy realista debido al alto detalle espacial que se ha conseguido y gracias también a la colaboración con el Área Metropolitana de Barcelona. Con ello se ha conseguido que los resultados no queden en una fase de experimentación o diseño hipotético, sino que se basan en una realidad programática. Se han propuesto diferentes escenarios para los que se presentan a continuación las principales conclusiones:

Para la implementación de tejados fríos (A0.85), se ha fijado un albedo de 0.85 que se ha aplicado a las LCZ 1-2-4-5-8 superficies más fáciles de implementar debido a sus tejados mayormente planos. También se hallan en la mayoría de edificaciones urbanas de la ROI (20,43% respecto todo el tejido urbano). Se ha observado una disminución media de 2.22°C con un máximo de 3.83°C durante el período diurno analizado. Es durante el día que la radiación neta se reduce. Por la noche, el cambio, no es tan efectivo debido a que no hay radiación de onda corta. Las LCZ más efectivas a esta estrategia (A0.85) serán las LCZ 1 y 2 debido que sumadas son superficies que tienen más captación y un flujo de radiación neta superior al resto de cubiertas urbanas. Se observa un flujo de radiación neta máximo de 77W/m<sup>2</sup>, en el mediodía, correspondiente al incremento de reflectividad de los edificios en detrimento de un pico de reducción de calor sensible

limitando el crecimiento de la capa límite hasta 168m, favoreciendo una distribución más uniforme de la temperatura y humedad.

La simulación de incremento de verde urbano e irrigación (V2 y V5) ha consistido en un aumento de 255.6 ha adicionales de verde basados en el Plan Director Urbanístico del AMB. Esto ha contribuido a reducir la temperatura promedio  $0.94^{\circ}\text{C}$  con máximos de hasta  $2.46^{\circ}\text{C}$  para el escenario con irrigación. Al aumentar el riego hay un aumento notable del calor latente en detrimento del sensible con diferencias medias entre ambos escenarios de  $0.28^{\circ}\text{C}$ . Los valores máximos se registran durante el día porque los procesos de evapotranspiración ocurren cuando hay radiación de onda corta incidente. El incremento en la disponibilidad de agua en las capas superficiales y/o el incremento de la vegetación permiten incrementar la evapotranspiración, ya sea evaporación directa del suelo o transpiración a través de la vegetación, aumentando los flujos de calor latente, con picos de  $12.5\text{W}/\text{m}^2$  y  $78\text{W}/\text{m}^2$  durante el mediodía y la tarde. Existen diferencias notables entre ambos escenarios tan solo con el incremento de  $3\text{l}/\text{m}^2$  en el riego, siendo este escenario mucho más eficiente en cuanto a la reducción de temperatura, sobre todo durante el día.

El escenario combinado ha resultado el más eficaz, con óptimos resultados tanto de día como de noche debido a los efectos que se complementan de los dos escenarios anteriores. Se alcanzan reducciones de  $1.26^{\circ}\text{C}$  en promedio para toda el área urbana con máximos de hasta  $4.73^{\circ}\text{C}$  durante el día y de  $1.88^{\circ}\text{C}$  durante la noche. Los máximos los encontramos en las LCZ más efectivas 1 y 2 y en las zonas donde se localizan los parques. Se observa una reducción de temperatura casi proporcional a la suma de los dos escenarios anteriormente mencionados debido a que los dos mecanismos no se contrarrestan totalmente al afectar diferentes procesos en diferentes superficies, con una reducción del flujo de calor sensible de  $158\text{W}/\text{m}^2$ . También observamos una disminución del pico de flujo de calor latente debido a la disminución de la capa límite, que logra una diferencia media máxima de 283m, con el consecuente incremento de la humedad en superficie que limita la evapotranspiración.

En conclusión, el efecto de enfriamiento debería comportar un menor potencial uso o necesidad de los aires acondicionados y por lo consiguiente una reducción de temperatura debido a que se libera menos calor antropogénico, con reducciones máximas del 24.9% del consumo, ahorrando significativamente energía, así como CO<sub>2</sub> equivalente para generar dicha energía.

Este trabajo se halla en el artículo Gilabert et al. (2021) actualmente en revisión.

### **7 Elaborar *workflows* y programas de usuario para poder replicar los productos y cartografías con el objetivo de generar productos y geoservicios como herramientas de decisión y análisis aplicables a otros municipios y regiones.**

En el marco de un programa de doctorado industrial, se pretende dar respuesta al reto de transferir los conocimientos y metodologías utilizadas, en una transformación de la investigación hacia productos y servicios operacionales. En este sentido, se han elaborado diferentes *softwares* y flujos de trabajo muy pautados para poder replicar los estudios y análisis presentados durante los diferentes capítulos.

Se han desarrollado y automatizado métodos para obtener las LCZ que ya han sido utilizados operacionalmente por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*. Se ha publicado la cartografía de LCZ para Barcelona en el repositorio del proyecto internacional WUDAPT. También se han elaborado informes de sostenibilidad con metodologías depositadas en el ICGC, por ejemplo, la automatización de imágenes térmicas utilizando satélites Landsat para el informe de sostenibilidad de Berga, o la automatización de las LCZ para el informe de sostenibilidad de Sabadell, así como la automatización de cálculos de albedo y emisividad mediante imágenes satélite, entre otros.

Por ello, los algoritmos y técnicas desarrolladas se han orientado y presentado para que sean fácilmente aplicadas en la cadena operativa de generación de productos y servicios de geoinformación del ICGC. Se ha estimado un valor añadido de la implementación directa e indirecta de los productos presentados de 4.4 sobre 5, mediante

una aproximación descriptiva y cuantitativa de los principales elementos que se han tenido en consideración en la generación de beneficios.

En el anexo se halla un documento sobre un informe de Isla de Calor Urbana para el municipio de Berga, ejemplificando alguna de las técnicas descritas en el trabajo de doctorado industrial. Actualmente el ICGC está realizando informes de sostenibilidad teniendo en cuenta parte de algunos productos presentados

## 7.2 Conclusiones generales

Este trabajo nos ha permitido entender muy bien el detalle del entramado urbano de nuestra región de estudio. Se han utilizado una ingente cantidad de parámetros y capas que nos han ayudado a reproducir de forma muy minuciosa el comportamiento térmico, ya sea desde un enfoque climático como meteorológico. Gracias a estas mejoras en el conocimiento del comportamiento de las cubiertas urbanas y sus propiedades, se ha podido caracterizar el entramado urbano con el objetivo de poder hacer propuestas de mitigación con el fin de mejorar la resiliencia de la ciudad (disminuir su vulnerabilidad) en un entorno de cambio climático presente y futuro.

A partir de los flujos de trabajo y las metodologías presentadas, esta tesis puede ser de gran utilidad en futuras planificaciones territoriales que se promueven desde las entidades públicas. A lo largo de la tesis doctoral se han establecido colaboraciones con el Área Metropolitana de Barcelona y el Ayuntamiento de Barcelona, precisamente para orientar el trabajo hacia problemas de sostenibilidad ambiental urbana y ayudar a la toma de decisiones con el objetivo de crear entornos urbanos resilientes. Obviamente nos encontramos ante un reto a distintos niveles, administración pública, ciudadanía, academia e investigación. Estas herramientas y bases presentadas constituyen elementos de soporte fundamentales para la toma de decisiones por parte de los diferentes *stakeholders*.

### 7.3 Retos de futuro

En este apartado se enumeran diferentes líneas de investigaciones futuras, algunas de las cuales ya han sido iniciadas:

RF1: Aplicar el modelo/interrelación LCZ-T a la escala de LCZ vectorial, para bajar a una resolución inferior a los 100m, con la finalidad de crear una herramienta mejor focalizada a la planificación urbana a nivel local

RF2: Acoplar el efecto de isla de calor urbana y el modelo digital del terreno en el modelo LCZ-T, con la finalidad de reducir la incertidumbre de la caracterización.

RF3: Acoplar un modelo de mortalidad a las altas temperaturas a escala de barrios con la finalidad de mejorar la exposición al calor a nivel espacial. Actualmente, a partir de la colaboración con ISGlobal se está trabajando en esta dirección.

RF4: Mejorar la resolución del modelo WRF BEP+BEM, para pasar de 1km de resolución espacial a 333m. Actualmente se está trabajando en esta dirección en el contexto del proyecto ERC-URBAG, obteniendo mejores resultados y aprovechando mejor los inputs que se han trabajado.

RF5: Mejorar la respuesta de los modelos mediante los datos del programa de observación de la Tierra Copernicus y los nuevos satélites Sentinel. Actualmente, dentro del área de observación de la Tierra (CSPCOT) del ICGC se trabaja en esta dirección

RF6: Trabajar en metodologías de inteligencia artificial para generar LCZ para todo el territorio catalán. Actualmente, dentro del grupo CPCOT del ICGC se está trabajando con metodologías *deep learning*, para la clasificación y segmentación de cubiertas del suelo.



---

## ANEXO

### ARTÍCULOS (ANEXO 1) E INFORME (ANEXO 2)

En esta sección se anexan las referencias de los artículos que se han publicado o presentados durante el período de tesis. También se adjunta uno de los informes realizados por el ICGC fruto del trabajo de Doctorado Industrial, como ejemplo de producto de sostenibilidad. A parte de los artículos realizados se han dirigido tres trabajos de máster:

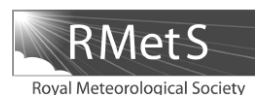
*Metodologia per millorar la resolució de les emissions del sector de combustió domèstica a Barcelona.* De Maria Ripoll, 2018, Màster en Geoinformació, Universitat Autònoma de Barcelona.

*Generation of urban data to support climate research: developing Local Climate ones for Oslo, Norway.* De Laurence Sigler, 2019, Màster en Geoinformació, Universitat Autònoma de Barcelona.

*Elaboració de la morfologia urbana de l'Àrea Metropolitana de Barcelona per modelitzar la temperatura i analitzar les onades de calor.* De Sergi Ventura, 2020. Máster de Meteorología, Universitat de Barcelona.

## ANEXO 1

INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY  
*Int. J. Climatol.* (2017)  
 Published online in Wiley Online Library  
 (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.5301



## Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean

Joan Gilabert<sup>a,b\*</sup> and María Carmen Llasat<sup>a</sup>

<sup>a</sup> GAMA, Department of Applied Physics, University of Barcelona, Spain

<sup>b</sup> Institute Cartographic and Geological of Catalonia, Barcelona, Spain

**ABSTRACT:** The aim of this work was to identify the circulation weather types associated with flood events that occurred in Catalonia (Northeastern Spain) during the period 1900–2010. To achieve this objective, 261 extraordinary and catastrophic flood and flash flood events that were recorded during this period were characterized and classified based on impact data. A preliminary analysis of maximum precipitation and discharge was conducted in order to have some quantitative hydrometeorological indicators associated with these kinds of events. The objective classification developed by Jenkinson and Collinson, which is based on differences in synoptic patterns according to surface pressure, was implemented. Once the weather regimes for each flood event had been established, a statistical and comparative analysis was performed that allowed us to determine which synoptic patterns were more frequently associated with the different flood types, their differences and their similarities. The results show that most synoptic situations were pure cyclonic structures, in both extraordinary and catastrophic events, although they were more frequent in the latter. Catastrophic floods generally had a synoptic origin enhanced by certain mesoscale factors, while extraordinary floods were usually associated with local flash floods that occurred primarily in summer and early autumn, highlighting the undetermined types that were not reflected at a synoptic scale. As the Mediterranean basin is a region where floods cause serious socio-economic impacts, this work will help improve prevention measures and provide information for policymakers, mainly for land-use planning and early warning systems.

**KEY WORDS** circulation weather types; floods; Catalonia; Mediterranean; precipitation; trend analysis; impacts; cyclones

Received 13 December 2016; Revised 31 July 2017; Accepted 1 September 2017

### 1. Introduction

Floods represent a significant risk to people and can have a major economic impact on society. According to the report 'Flood Risks to People' (DEFRA, 2006), 12% of deaths caused by natural disasters in the 20th century were due to flooding. Between 1980 and 2000, more than 170 000 flood-related deaths were recorded (Dao and Peduzzi, 2004). The same research suggests that about 196 million people in 90 countries are exposed to flooding each year. In Europe, the countries most frequently affected by this phenomenon are Italy, France and Spain, which are all located in the Mediterranean basin (Llasat *et al.*, 2010). In Spain, more than 2000 people died as a result of floods between 1950 and 2000; 64% of these deaths occurred in Catalonia (Northeastern Spain). In terms of economic impact, more than 60% of the payments made by the Spanish Public Reinsurer Compensation Consortium (Consorcio de Compensación de Seguros, CCS) between 1971 and 2014 were related to floods, according to its database. These facts demonstrate that the impact of flooding is greater than that of any other natural disasters in Spain.


Most floods in the Western Mediterranean basin are due to warm, humid air coming in at low levels from the sea, mainly during the autumn (SON) and summer (JJA) seasons. In many cases, the incoming air is associated with the presence of a low-pressure (cyclonic) weather system (Ramis *et al.*, 1994; Fiori *et al.*, 2014; Jansà *et al.*, 2014). Air mass inflow is mostly associated with cyclonic conditions. The complex topography of the region is also an important factor, in addition to synoptic-scale processes. In many cases, this combination acts as a catalyst by triggering any latent instability or favouring the formation of mesoscale structures such as orographic dipoles that create disturbances or intensify the cyclogenesis process.

The aim of synoptic climatology is to determine the relationships between atmospheric patterns and local weather (Yarnal *et al.*, 2001). In order to do so, different techniques are used to characterize weather types. The first approaches were called subjective classifications, the most important of which were developed by Lamb (1972), and in the case of Spain, by Tullot (2000) and Martín-Vide (1991). The problem with these classifications lies in their subjective nature, which prevents their replication, and the fact that they are not usually applied to periods exceeding 10–15 years (Rastilla Álvarez, 2003) increases their internal inconsistency and hinders their duplication. Objective classifications, on the other hand, are based on the application of algorithms that use ratios derived from

\* Correspondence to: J. Gilabert, Department of Applied Physics, Faculty of Physics, University of Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Spain. E-mail: jgilabert@meteo.ub.edu



## Towards a better understanding of the evolution of the flood risk in Mediterranean urban areas: the case of Barcelona

Maria Cortès<sup>1</sup>  · Maria Carmen Llasat<sup>1</sup> · Joan Gilabert<sup>1,2</sup> ·  
Montserrat Llasat-Botija<sup>1</sup> · Marco Turco<sup>1</sup> · Raül Marcos<sup>3</sup> ·  
Juan Pedro Martín Vide<sup>4</sup> · Lluís Falcón<sup>5</sup>

Received: 15 March 2017 / Accepted: 28 July 2017  
© Springer Science+Business Media B.V. 2017

**Abstract** This contribution explores the evolution of the flood risk in the Metropolitan Area of Barcelona (MAB; Northeast Spain) from 1981 to 2015, and how it has been affected by changes in land use, population and precipitation. To complete this study, we analysed PRESSGAMA and INUNGAMA databases to look for all the information related to the floods and flash floods that have affected the chosen region. The “Consortio de Compensación de Seguros”, a state insurance company for extraordinary risks, provided data on economic damage. The extreme precipitation trend was analysed by the Fabra Observatory and El Prat-Airport Observatory, and daily precipitation data were provided by the State Meteorological Agency of Spain (AEMET) and the Meteorological Service of Catalonia (SMC). Population data were obtained from the Statistical Institute of Catalonia (IDESCAT). Changes in land use were estimated from the land use maps for Catalonia corresponding to 1956, 1993, 2000, 2005 and 2009. Prevention measures like rainwater tanks and improvements to the drainage system were also been considered. The specific case of Barcelona is presented, a city recognised by United Nations International Strategy for Disaster Reduction as a model city for urban resilience to floods. The evolution of flood events in the MAB does not show any significant trend for this period. We argue that the evolution in floods can be explained, at least in part, by the lack of trend in extreme precipitation indices, and also by the improvements in flood prevention measures.

**Keywords** Floods · Flash floods · Changes in land use · Vulnerability · Precipitation extremes · Barcelona

✉ Maria Cortès  
mcortes@meteo.ub.edu

<sup>1</sup> GAMA, Department of Applied Physics, University of Barcelona, Barcelona, Spain

<sup>2</sup> Cartographic and Geological Institute of Catalonia, Barcelona, Spain

<sup>3</sup> Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación, Barcelona, Spain

<sup>4</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, UPC, Barcelona Tech, Barcelona, Spain

<sup>5</sup> Urban Architect, FALCON Architecture and Urbanism, Barcelona, Spain

## [RCG] Revista Catalana de Geografia

Revista digital de geografia, cartografia i ciències de la Terra

**Autor/s:** Gilabert, J., Llassat, C., Corbera, J.  
**Títol:** Les zones climàtiques locals: La nova cartografia urbana i rural segons la seva resposta tèrmica  
 Revista Catalana de Geografia  
**Publicat a:** IV època / volum XIII / núm. 58 / gener 2018  
**Font:** -  
**URL:** <http://www.rcg.cat/articles.php?id=440>

### LES ZONES CLIMÀTIQUES LOCALS: LA NOVA CARTOGRAFIA URBANA I RURAL SEGONS LA SEVA RESPOSTA TÈRMICA

Joan Gilabert\*, Carme Llassat\*\*, Jordi Corbera\*  
 \*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya  
 \*\*Universitat Politècnica de Catalunya

#### Introducció

Els paisatges urbans concentren més de la meitat de la població del planeta i la tendència és que dos terços de la població es concentrin en elles el 2050. En definitiva, són zones més exposades i vulnerables a aquests efectes a causa de l'alteració i ocupació del medi agreujats pel canvi climàtic global.

Existeixen molts factors que influeixen en la variabilitat del clima urbà, com poden ser les diferents morfologies urbanes i propietats tèrmiques dels materials que la constitueixen. Un dels efectes més estudiats és l'efecte d'illa de calor urbana (ICU). Sobre la base d'aquesta premissa, sorgeix una nova metodologia anomenada *Local Climate Zones* (LCZ), establint un sistema d'estandardització de zones urbanes i rurals a la seva resposta tèrmica. Les LCZ estan conformades per un total de 17 categories mesurables que responen a paràmetres geomètrics, tèrmics, radiatius i metabòlics. A partir d'aquesta classificació, de propòsit climàtic, és possible estudiar espaciotemporalment de forma més detallada les afectacions del clima a les ciutats.

Actualment els models climàtics i meteorològics urbans són deficitaris quant a la descripció adequada de les cobertures del sòl com a paràmetres d'entrada. Les LCZ responen a aquesta problemàtica i a altres com poden ser la millora del planejament urbà o la comparació estandarditzada de ciutats amb diferents morfologies. En aquest sentit, el projecte internacional WUDAPT ha creat unes directrius i metodologia basades en observació de la terra amb la finalitat de construir una base de dades de ciutats de tot el món amb aquesta classificació, permetent estandarditzar, comparar ciutats i proveir de millors dades als models meteorològics i climàtics.

#### Zona d'estudi i dades

Per aplicar la classificació de les LCZ s'ha seleccionat l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB) s'han usat:

- Urban Atlas (GSD=0,25ha)
- CORINE Land Cover (GSD=25ha)
- MCSC IV (GSD=0,25m)
- 3D Model de l'AMB (GSD=0,5m)
- Ortofotografia de Catalunya
- Imatges LANDSAT 8 (GSD=30m)
- Google Earth Pro (Model 3D i Imatges en satèl·lit)

Adicionalment i per a caracteritzar les LCZ s'ha usat una imatge a partir del sensor hiperespectral del ICGC, TASI amb un GSD=4m, de la nit del dia 20/02/2012.

#### Metodologia

La metodologia seguida a la creació de les cartografies s'ha fet seguint els diagrames de flux que es mostren a continuació:



## Article

# Spatial Variability of Heat-Related Mortality in Barcelona from 1992–2015: A Case Crossover Study Design

Vijendra Ingole <sup>1,2</sup> , Marc Mari-Dell'Olmo <sup>3,4,5,\*</sup> , Anna Deluca <sup>1,2</sup>, Marcos Quijal <sup>1,2,3,4</sup>, Carme Borrell <sup>3,4,5,6</sup>, Maica Rodríguez-Sanz <sup>3,4,5,6</sup>, Hicham Achebak <sup>2,7</sup> , Dirk Lauwaet <sup>8</sup>, Joan Gilabert <sup>9</sup> , Peninah Murage <sup>10</sup>, Shakoor Hajat <sup>10</sup> , Xavier Basagaña <sup>1,5,6</sup> and Joan Ballester <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Barcelona Institute for Global Health (ISGlobal), Barcelona 08003, Spain; vijendra.ingole@isglobal.org (V.I.); adelucasilberberg@gmail.com (A.D.); marcos.quijal@isglobal.org (M.Q.); xavier.basagana@isglobal.org (X.B.); joan.ballester@isglobal.org (J.B.)

<sup>2</sup> Climate and Health Program (CLIMA), Barcelona Institute for Global Health (ISGlobal), Barcelona 08003, Spain; hicham.achebak@isglobal.org

<sup>3</sup> Agència de Salut Pública de Barcelona (ASPB), Barcelona 08023, Spain; cborrell@aspb.cat (C.B.); mrodri@aspb.cat (M.R.-S.)

<sup>4</sup> Biomedical Research Institute Sant Pau (IIB Sant Pau), Barcelona 08041, Spain

<sup>5</sup> Centro de Investigación Biomédica en Red de Epidemiología y Salud Pública (CIBERESP), Madrid 28029, Spain

<sup>6</sup> Universitat Pompeu Fabra (UPF), Barcelona 08003, Spain

<sup>7</sup> Centre for Demographic Studies (CED), Autonomous University of Barcelona, Barcelona 08193, Spain

<sup>8</sup> Environmental Modelling Department, Flemish Institute for Technological Research (VITO), Mol 2400, Belgium; dirk.lauwaet@vito.be

<sup>9</sup> PCOT, Cartographic and Geological Institute of Catalonia (ICGC), Barcelona 08038, Spain; jgilabert@meteo.ub.edu

<sup>10</sup> Public Health, Environments and Society, London School of Hygiene and Tropical Medicine, London WC1H 9SH, UK; Peninah.Murage@lshtm.ac.uk (P.M.); Shakoor.Hajat@lshtm.ac.uk (S.H.)

\* Correspondence: mmari@aspb.cat; Tel.: +34-93-2384545

Received: 5 March 2020; Accepted: 4 April 2020; Published: 8 April 2020



**Abstract:** Numerous studies have demonstrated the relationship between summer temperatures and increased heat-related deaths. Epidemiological analyses of the health effects of climate exposures usually rely on observations from the nearest weather station to assess exposure-response associations for geographically diverse populations. Urban climate models provide high-resolution spatial data that may potentially improve exposure estimates, but to date, they have not been extensively applied in epidemiological research. We investigated temperature-mortality relationships in the city of Barcelona, and whether estimates vary among districts. We considered georeferenced individual (natural) mortality data during the summer months (June–September) for the period 1992–2015. We extracted daily summer mean temperatures from a 100-m resolution simulation of the urban climate model (UrbClim). Summer hot days (above percentile 70) and reference (below percentile 30) temperatures were compared by using a conditional logistic regression model in a case crossover study design applied to all districts of Barcelona. Relative Risks (RR), and 95% Confidence Intervals (CI), of all-cause (natural) mortality and summer temperature were calculated for several population subgroups (age, sex and education level by districts). Hot days were associated with an increased risk of death (RR = 1.13; 95% CI = 1.10–1.16) and were significant in all population subgroups compared to the non-hot days. The risk ratio was higher among women (RR = 1.16; 95% CI = 1.12–1.21) and the elderly (RR = 1.18; 95% CI = 1.13–1.22). Individuals with primary education had similar risk (RR = 1.13; 95% CI = 1.08–1.18) than those without education (RR = 1.10; 95% CI = 1.05–1.15). Moreover, 6 out of 10 districts showed statistically significant associations, varying the risk ratio

<https://doi.org/10.5194/nhess-2020-240>  
Preprint. Discussion started: 1 September 2020  
© Author(s) 2020. CC BY 4.0 License.



Natural Hazards  
and Earth System  
Sciences  
Discussions

Open Access  
EGU

## 1 **Assessing heat exposure to extreme temperatures in urban** 2 **areas using the Local Climate Zones classification**

3 Joan Gilabert<sup>1,2,3</sup>, Anna Deluca<sup>4</sup>, Dirk Lauwaet<sup>5</sup>, Joan Ballester<sup>4</sup>, Jordi Corbera<sup>2</sup>, Maria  
4 Carmen Llasat<sup>1</sup>

5

6 <sup>1</sup>GAMA Team Department of Applied Physics - University of Barcelona,

7 <sup>2</sup>Institute Cartographic and Geological of Catalonia (ICGC),

8 <sup>3</sup>URBAG research team, Sostenipra SGR 1412 ICTA-UAB,

9 <sup>4</sup>Climate and Health Program - Barcelona Institute for Global Health,

10 <sup>5</sup>Flemish Institute for Technological Research (VITO)

11

12 *Correspondence to:* Joan Gilabert (jgilabert@meteo.ub.edu)

13

14 **Abstract.** Trends of extreme temperature episodes in cities are increasing (in frequency,  
15 magnitude and duration) due to regional climate change in interaction with the urban  
16 effects. Urban morphologies and thermal properties of the materials used to build them  
17 are factors that influence the spatial and temporal climate variability and becomes one of  
18 the main reasons for the climatic singularity of cities. This paper presents a proposal to  
19 evaluate the urban and peri-urban effect on extreme temperatures exposure in Barcelona  
20 (Spain), using the Local Climate Zone (LCZ) framework as a base statement, that allows  
21 the comparison with other cities of the world characterized using this criterion. LCZs  
22 were introduced as input of the high resolution UrbClim model (100 m spatial resolution)  
23 to create the daily temperatures (median and maximum) series for summer (JJA) during  
24 the period 1987 to 2016, pixel by pixel, in order to create a cartography of extremes.  
25 Using the relationship between mortality due to high temperatures and the temperature  
26 distribution, the heat exposure of each LCZ was obtained. Methodological results of the  
27 paper show the improvement obtained when LCZs were mapped through a combination  
28 of two techniques (from Land Cover/Land Use maps and from WUDAPT method), as  
29 well as proposes a methodology to obtain the exposure to high temperatures of different  
30 LCZs on urban and peri-urban areas. In the case of Barcelona, the distribution of  
31 temperatures for the 90th percentile (about 3–4°C compared to average conditions) leads  
32 to an increase in the relative risk of mortality of 80%.



## Abating heat waves in urban areas: what can cool roofs and vegetation contribute?

Joan Gilabert<sup>a,c,d</sup>, Sergi Ventura<sup>a</sup>, Ricard Segura<sup>a</sup>, Alberto Martilli<sup>b</sup>, Alba Badia<sup>a</sup>, Carme Llasat<sup>c</sup>, Jordi Corbera<sup>d</sup>, Gara Villalba<sup>a,e\*</sup>

<sup>a</sup> Sostenipra Research Group (SGR 01412), Institute of Environmental Sciences and Technology (MDM-2015-0552), Z Building, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Campus UAB, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain

<sup>b</sup> Research Center for Energy, Environment and Technology, CIEMAT, Madrid, Spain.

<sup>c</sup> GAMA Team Department of Applied Physics - University of Barcelona (UB), Barcelona, Spain.

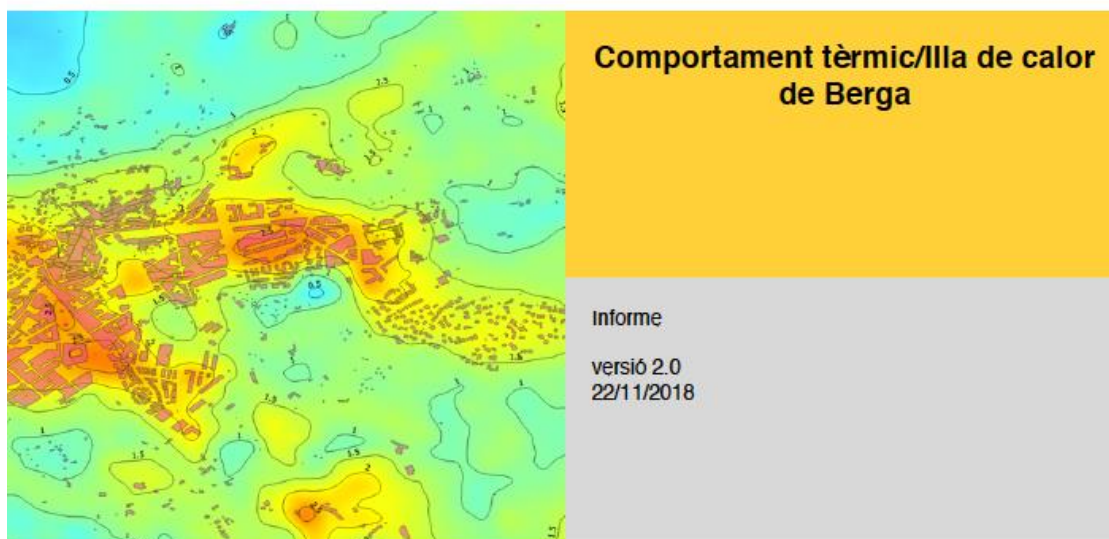
<sup>d</sup> PCOT Team, Institute Cartographic and Geological of Catalonia (ICGC), Barcelona, Spain.

<sup>e</sup> Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Campus UAB, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.

\* corresponding author: [gara.villalba@uab.cat](mailto:gara.villalba@uab.cat)  
Submitted in Urban Climate

### Abstract

The frequency and intensity of heat wave episodes in cities are on the rise due to climate change as well as urban fabric materials and anthropogenic activities that affect heat accumulation. To lessen the intensity of these episodes, various strategies can be implemented such as substituting conventional roofs for cool roofs and incrementing urban vegetation. However, how successful those strategies are towards reducing heat wave episodes depends on a city's specific and unique urban morphology, land use, building materials, climate and geography. In this study we aim to show the effectiveness of cool roofs and vegetation in reducing temperature by using the Weather and Research Forecasting model (WRF) with the multi-layer urban scheme Building Effect Parameterization (BEP) and Building Energy Model (BEP+BEM) to simulate various scenarios in the Metropolitan Area of Barcelona (AMB). The Local Climate Zone classification of urban land use is used to take into account the energy consumption of buildings and anthropogenic heat generated by air conditioning systems, building and street canyon geometry, as well as surface characteristics (e.g. albedo, heat capacity, emissivity, urban/vegetation fraction). The methods are validated for the heat wave that occurred in August 2015 during which temperatures stayed between 30 and 40°C for five consecutive days. We then simulate three potential scenarios: 1) Increasing the albedo of rooftops to 0.85 for certain urban classes, 2) Increasing the urban green by an additional 255.64 ha according to the proposal of the Master Urban Plan for 2030 with two different irrigation schemes and 3) a combination of these two complementary mitigation strategies. We find that the cool roofs reduce temperatures best during the day (average reductions of 2.22°C), while the additional green areas help moderate temperatures evenly during the day and nighttime (average reductions of 0.15°C and 0.17°C, respectively). However, when irrigation is increased from 2 to 5L/m<sup>2</sup>/day, the temperature reduction potential during the day is intensified due to the cooling effect of more evapotranspiration. The thermal regulation potential of the combined scenario is the most propagated over the AMB and has the highest impact with average daytime reductions of 1.26°C and maximum reduction of 4.73°C at 13:00 UTC.

**ANEXO 2**



**Anàlisi Comportament Tèrmic/Il·la de calor de Berga****Històric del document**

<b>Versió</b>	<b>Data</b>	<b>Autor</b>	<b>Acció</b>
1.0	19/11/2018	Jordi Corbera	Creació
1.1	22/11/2018	Joan Gilabert	Tractament imatge Landsat-8 i transectes
2.0	22/11/2018	Jordi Corbera	Revisió final



## Índex

---

<b>1</b>	<b>Introducció</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Àmbit del projecte</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Les Imatges satèl·lit</b> .....	<b>5</b>
3.1	Característiques de les imatges .....	5
3.2	Les imatges de treball .....	5
<b>4</b>	<b>Obtenció de la Land Surface Temperature (LST)</b> .....	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Càlcul Comportament tèrmic-UHI</b> .....	<b>7</b>
5.1	Zona de temperatura de referència .....	7
5.2	Capa de cobertes .....	8
5.3	Càlcul Comportament tèrmic-UHI .....	8
<b>6</b>	<b>Transectes tèrmics</b> .....	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Productes Illurats</b> .....	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Conclusions preliminars</b> .....	<b>13</b>
<b>9</b>	<b>Referències</b> .....	<b>14</b>
<b>10</b>	<b>Agraïments</b> .....	<b>15</b>



## 1 Introducció

---

El present document descriu el procés de tractament de les imatges satèl·lit tèrmiques en el municipi de Berga i el seu posterior procés de càlcul de temperatures per finalitzar en la confecció de mapes del comportament tèrmic de zones urbanes a nivell de carrer i el potencial efecte d'illa de calor o UHI (*Urban Heat Island*).

El treball s'ha realitzat en el marc d'un conveni entre la Diputació de Barcelona i l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (en endavant ICGC) amb l'objecte d'estudiar l'efecte d'illa de calor del municipi de Sant Cugat amb tècniques d'Observació de la Terra per teledetecció.

En el marc de l'explotació de sensors d'observació de la Terra, en particular i pel municipi de Berga d'imatges satèl·lit Landsat-8, es genera cartografia temàtica que permet l'anàlisi del comportament tèrmic dels ecosistemes urbans i en particular en la determinació del potencial fenomen conegut com a illa de Calor (UHI). El processat de les dades, ofereix la delimitació de la distribució espacial del comportament tèrmic. El creuament d'aquesta informació, altament associada a la tipologia de materials i morfologia de l'ecosistema urbà, ens aporta una geoinformació clau de suport a la decisió a possibles fenòmens d'illa de calor en situacions d'onades de calor.

L'ICGC ha usat imatges nocturnes del satèl·lit Landsat-8 que ha prèviament sol·licitat al servei geològic dels Estats Units (USGS) que gestiona el satèl·lit d'observació de la Terra, per obtenir les imatges nocturnes. Per aquest estudi s'ha utilitzat imatges Landsat-8 nocturnes durant l'onada de calor del 2015 del mes de juliol sobre el municipi de Berga. El sensor tèrmic Landsat-8 va recollir imatges dins del rang espectral de les longituds d'ona tèrmiques dels 10,60 als 12,51 micròmetres ( $\mu\text{m}$ ) i amb una resolució espacial final de 30 m.

Un cop obtingudes les imatges TIR es va procedir a realitzar les correccions radiomètriques, geomètriques i atmosfèriques pertinents i el càlcul de la temperatura segons processos de l'ICGC.

Paral·lelament i durant la nit del 12 al 13 de novembre es van realitzar entre les 10:30pm i les 02:00am, diferents transectes amb cotxe cobrint zones urbanes, periurbanes, agrícoles i forestals del municipi de Berga on es van mesurar un total de 54 punts, la temperatura exterior amb precisions de 0.1°C. La metodologia dels transectes, establerta i consolidada a manca de dades de sensors tèrmics d'observació de la Terra, ens dona una nova aproximació, en aquest cas de la tardor-hivern, que també presenten en aquest informe.

En els pròxims apartats d'aquest document es detallen les diferents parts del procés i es descriuen els productes lliurats.

## 2 Àmbit del projecte

---

Aquest projecte es porta a terme usant dades tèrmiques satèl·lit i transectes tèrmics en treball de camp, amb la finalitat d'analitzar el comportament tèrmic-UHI (illa de calor o *Urban Heat Island*) en el context de la totalitat del municipi de Berga.



## Anàlisi Comportament Tèrmic/Il·la de calor de Berga

### 3 Les imatges satèl·lit

Aquest projecte es porta a terme a partir de les dades captades pel sensor TIR a bord del satèl·lit d'Observació de la Terra Landsat-8 i d'una col·lecció de transsectes nocturns realitzant en treball de camp.

En el projecte actual i motiu d'aquest informe aquestes dades són emprades per a l'anàlisi del comportament tèrmic-UHI a escala urbana de Berga.

#### 3.1 Característiques de les imatges

Les imatges de Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) i de sensor infraroig tèrmic (TIRS) consisteixen en nou bandes espectrals amb una resolució espacial de 30 metres per a les bandes 1 a 7 i 9. La banda ultra blue 1 és útil per als estudis costaners i aerosols. La banda 9 és útil per a la detecció de núvols en cirrus. La resolució de banda-8 (pancromàtica) és de 15 metres. Les bandes termals 10 i 11 són útils per proporcionar temperatures superficials més precises i es recullen a 100 metres. La mida de l'escena aproximada és de 170 km al nord-sud per 183 km a l'est i oest

Informació més detallada sobre els paràmetres està disponible a la Taula 1.

Taula 1. Paràmetres espectrals dades Landsat-8

Landsat 8	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
	Band 2 - Blue	0.452 - 0.512	30
	Band 3 - Green	0.533 - 0.590	30
	Band 4 - Red	0.636 - 0.673	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
	Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
*Landsat 9 will have these same bands.	Band 8 - Pancromatic	0.503 - 0.676	15
	Band 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

\* TIRS bands are acquired at 100 meter resolution, but are resampled to 30 meter in delivered data product.

No obstant cal remarcar que la natura de les imatges de temperatura i la seva resolució espacial, que com indica USGS inicialment són a 60 m. però són finalment generades a 30m de resolució espacial, fan que aquestes imatges siguin apropiades per a l'estudi de l'estudi del comportament tèrmic-UHI.

#### 3.2 Les imatges de treball

Els passos orbitals del satèl·lit Landsat-8 nocturns, no són un producte habitual de descarrega i que USGS el posi a disposició. A tal efecte es va fer des de l'ICGC una sol·licitud d'imatges nocturnes sobre la zona d'interès a USGS. La resposta d'USGS va ser una col·lecció de 5 imatges nocturnes, concretament de juliol de 2015, dates d'especial interès ja que a Catalunya es va produir una molt important onada de calor [1].



## Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

De les 5 imatges que finalment vàrem accedir a través de l'USGS, tant sols una d'elles presentava una qualitat, en quan a pràcticament no presència de núvols, que segons els estàndards ICGC, ens permetia poder avaluar amb integritat el comportament tèrmic – UHI. La imatge finalment de treball es correspon a la capturada pel sensor TIR de Landsat-8, corresponent al dia 13/08/2015 a les 23:36:11.

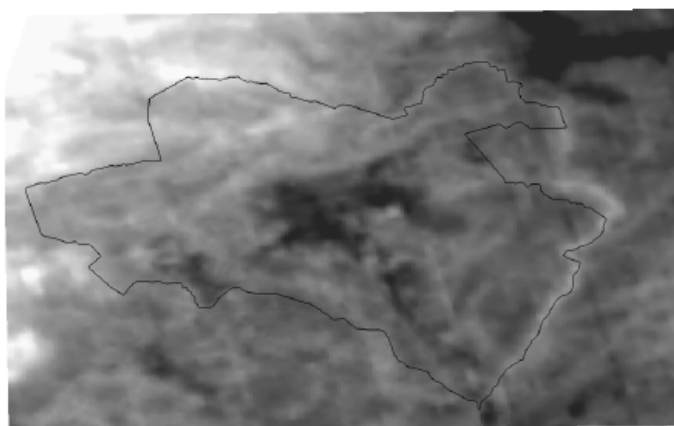


Figura 1. Imatge Landsat-8 banda 10 utilitzada per aquest treball.

## 4 Obtenció de la Land Surface Temperature (LST)

Per calcular la LST amb Landsat-8, s'ha seguit la metodologia proposada pel servei oficial de geologia dels Estats Units (United State Geological Survey – USGS) [2]. Per a fer-ho, s'ha seleccionat la banda 10 del TIRS ja que la banda 11 està significativament més contaminada. Per arribar a generar un mapa de LST cal realitzar un seguit de conversions mitjançant els següents algorismes. El primer pas consisteix en convertir la banda 10 amb TOA radiància mitjançant la següent equació:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{CAL} + A_L$$

On,  $L_{\lambda}$ , és Top Of Atmosphere (TOA) radiància espectral ( $\text{Watts/m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m}$ ),  $M_L$ , és la Banda-factor reescalat multiplicatiu específic de les metadades,  $A_L$ , és la Banda-factor reescalat additiu específic de metadades i  $Q_{CAL}$ , és el número digital de valors de píxels estàndards de productes quantificats i calibrats (DN).

Una vegada convertida a radiància, es calcula la At-Satellite Brightness Temperature mitjançant la següent expressió:



### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15$$

Per tenir la LST de forma més exacte, s'acaba d'ajustar aquest valor mitjançant la proporció de vegetació que deriva de l'Index NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR(B5) - VIS(B4)}{NIR(B5) + VIS(B4)}$$

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}\right)^2$$

Finalment s'obté la LST amb la equació final:

$$LST = \frac{\overline{BT}}{1 + w\left(\frac{\overline{BT}}{p}\right) \ln(e)}$$

El resultat és una imatge tèrmica de la superfície del sòl a una resolució de 30m. Tot i que la banda 10 i 11 tèrmiques treballen a resolucions reals de 100m, la USGS disposa les dades tèrmiques ja interpolades a 30m, d'aquesta manera totes les bandes del satèl·lit mantindran la mateixa resolució. El producte final s'ha resamplejat i suavitzat a 2,5m de píxel per tal de que la imatge quedi més neta i s'observi amb més claredat el comportament tèrmic.

## 5 Càlcul Comportament tèrmic-UHI

El terme *illa de calor urbana* fa referència a un àrea urbana que està significativament més calenta que les àrees rural veïnes o de referència degut a l'activitat antropogènica (la literatura científica parla de diferències superiors als 4 - 4.5°C es pot parlar d'illa de calor).

Cal notar que la temperatura *a nivell de carrer*, és a dir, per sota de l'alçada dels edificis, representa millor la temperatura de la zona urbana on té lloc l'activitat de les persones. La temperatura a nivell de carrer és usualment superior a la temperatura de terrats i cobertes d'edificis, ja que aquestes estan més obertes i ventilades.

Per tant, a més de la imatge tèrmica, per a fer un anàlisi de la possible illa de calor urbana cal disposar d'informació addicional:

- Una temperatura de referència de l'àrea rural veïna
- Capa de cobertes: edificis

### 5.1 Zona de temperatura de referència

La temperatura de referència és la temperatura que teòricament assoliria el nucli urbà de Berga, en cas de que fos una zona rural en lloc d'urbana. Per això hem seleccionat una zona





## Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

rural plana, situada en una alçada similar a la de Berga (d'aquesta manera no existeix l'efecte de gradient de temperatura amb l'alçada).

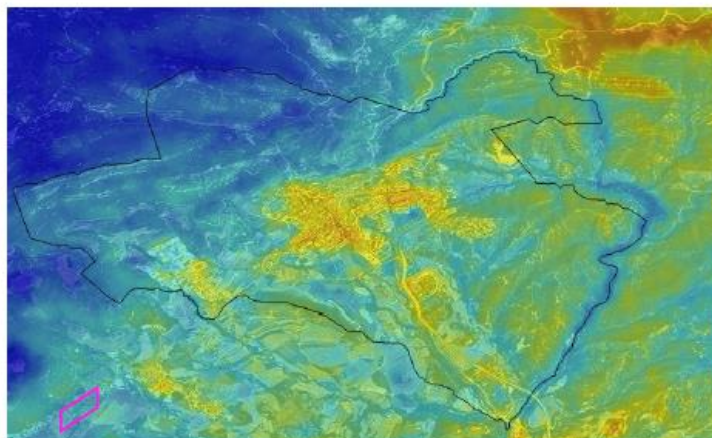


Figura 2. Localització de les zones rurals (en fucsia) que han de definir la temperatura de referència sobreimposades a part de la ortoimatge de temperatures.

### 5.2 Capa de cobertes

A partir de la base topogràfica 1:5 000 de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya s'han extret arxius vectorials contenint els edificis del àmbit de treball.

### 5.3 Càlcul Comportament tèrmic-UHI

A partir de la imatge satèl·lit Landsat-8 processada i corregida atmosfèricament per tal de finalment obtenir valors de temperatura superficial, s'ha realitzat una interpolació per mitjana mòbil usant un radi de 2.5 m. Assignant un increment de temperatura respecte a la temperatura de referència per a tot píxel del àmbit de treball.

Tots els càlculs s'han realitzat en la totalitat de l'àrea que recull la imatge processada. Al finalitzar el procés es generen els resultats només en el àmbit de treball (municipi de Berga).

El resultat del procediment descrit en aquesta secció són un mapa ràster de comportament tèrmic-UHI a nivell de carrer i un mapa vectorial de corbes iso-tèrmiques derivat del ràster anterior. Les unitats en que es presenten les dades són graus Celsius i representen l'increment de temperatura respecte a la temperatura de la zona de referència.

En la figura 4 i 5 es poden veure detalls dels resultats sobre el casc urbà de Sant Cugat de la imatge ràster de comportament tèrmic-UHI a nivell de carrer (gamma de colors entre el blau i el vermell), les corbes iso-tèrmiques derivades d'aquest mapa (les etiquetes de les corbes de nivell estan en graus Celsius i estan espaiades cada 0,5°C) i sobre impositat es poden apreciar els edificis (capa de cobertes referenciada en la secció 6.2).



### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

Cal notar, que tant en el mapa comportament tèrmic-UHI a nivell de carrer com de les corbes iso-tèrmiques derivades la variable en estudi és l'increment de temperatura registrada respecte a la temperatura de referència en graus Celsius.

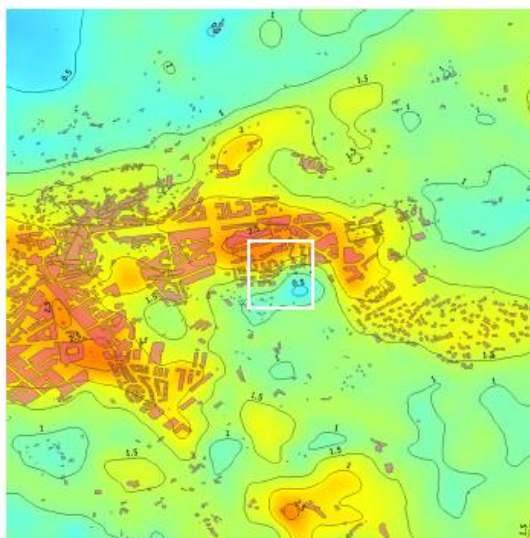


Figura 3. Detall del mapa comportament tèrmic – UHI a nivell de carrer





#### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

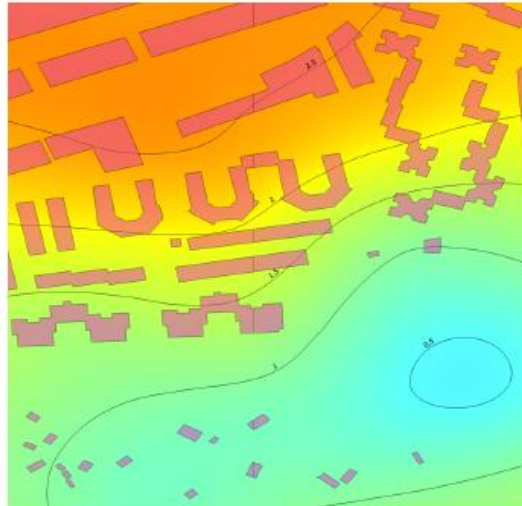


Figura 4. Detall de l'illa de calor, del requadre marcat a la figura 4 a nivell de terra. La imatge ràster de l'illa de calor així com les corresponents corbes de nivell tenen sobre imposit el vectorial de les cobertes.



## Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

### 6 Transsectes tèrmics

Els transsectes urbans són recorreguts ràpids de l'àrea urbana i la seva perifèria durant els quals es mesura la temperatura en determinats punts representatius dels diferents sectors diferencials de la zona d'interès. Per a fer-ho s'ha usat un automòbil dotat d'un termohigròmetre digital de baixa inèrcia, on la seva sonda es situa al exterior del vehicle. Mentre es duu a terme el recorregut o transsectes que s'han dissenyat, s'aniran anotant les dades observades en els punts de mesura marcats que s'han preestablerts.

Durant la sortida de camp, que es va realitzar la nit del 12-13 de novembre del 2018 durant les 22:30 i les 2:00, es van realitzar un total de 5 transsectes (Fig. 5), de les quals els dos més representatius (vermell i blau fosc) s'han representat els seus perfils tèrmics (Figs. 6 i 7).

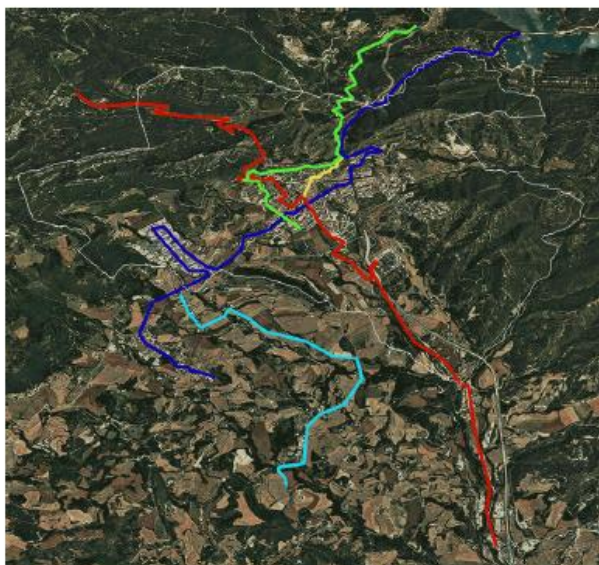


Figura 5. Recorregut dels transsectes treballats la nit del 12-13 de novembre



### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

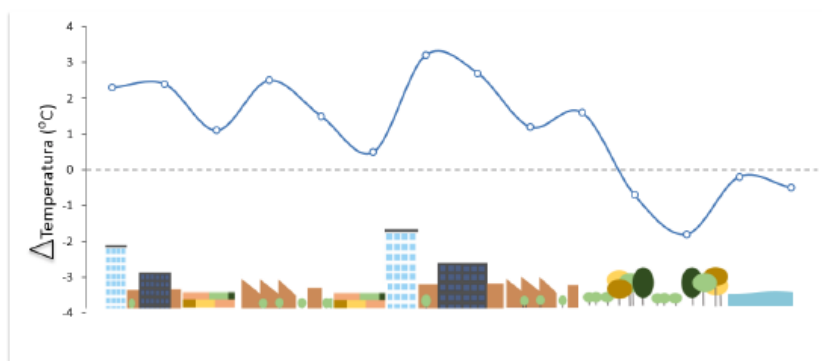


Figura 6. Perfil d'increments de temperatura del transsecte blau, que va començar a Avià i passant pel centre de Berga finalitzava proper al pantà de La Baells.

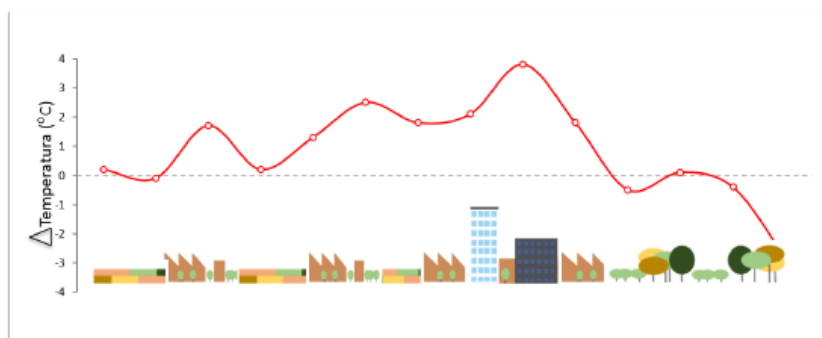


Figura 7. Perfil d'increments de temperatura del transsecte vermell, que passant pel centre de Berga, finalitzava a la zona dels boscos propers a Espinalbet.

## 7 Productes lliurats

Els productes lliurats són:

### 1. Imatge de temperatures

**Descripció:** Ortoimatge de la temperatura extreta dades sensor TIR del Landsat-8. En format Geotiff. El valor de píxel sense dades és 0. Les unitats estan en graus Kelvin.

**Nom de l'arxíu d'imatge:** BE\_Temp\_Vespre.tif

### 2. Mapa d'illa de calor (UHI)

**Descripció:** Ortoimatge en nivell de grisos en format Geotiff.



### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

**Nom de l'arxlu d'imatge:** BE\_UHI.tif

#### 3. Vectorial de corbes Iso-tèrmiques d'illa de calor

**Descripció:** Arxius vectorials en format shape de ESRI contenint les corbes iso-tèrmiques d'illa de calor a nivell de carrer. Les corbes representades són les de -1.0°C fins a 4.0°C amb un pas entre corbes de 0.5°C.

**Noms dels arxius vectorials:** BE\_UHI\_contourlines.prj,  
BE\_UHI\_contourlines.qpj,  
BE\_UHI\_contourlines.shx,  
BE\_UHI\_contourlines.shp i  
BE\_UHI\_contourlines.dbf

#### 4. Vectorial de edificis en l'ambit de treball

**Descripció:** Arxius vectorials en format shape de ESRI contenint els edificis extrets de la base cartogràfica 1:5000 de l'ICGC.

**Nom dels arxius vectorials:** TMberga\_e.prj,  
TMberga\_e.qpj,  
TMberga\_e.shx,  
TMberga\_e.shp i  
TMberga\_e.dbf

#### 5. BBDD transectes

**Descripció:** Arxius excel amb les dades de temperatures per transectes

**Nom de l'arxlu d'imatge:** BE\_TRAN.xls

#### 6. Vectorials transectes

**Descripció:** Arxius vectorials en format shape de ESRI contenint els transectes

**Nom de l'arxlu d'imatge:** BE\_TRAN.shp

Per a una millor importació i potencial explotació de les dades aquests productes es proporcionen integrats en un projecte Qgis, arxius de projecte amb el nom BE\_UHI.qgis.

A més també es lliura l'**Informe final**: el present document, on es descriuen els actius emprats per la captura de les imatges tèrmiques, disseny i planificació de la campanya de vol, les etapes de treball, descripció i explicació dels resultats lliurats.

## 8 Conclusions preliminars

En la imatge de comportament tèrmic-UHI es posa de manifest que:

- El nucli urbà més interior on s'assoleixen els increments més importants aquests arriben a superar els 3.5°C.
- S'observa com els espais oberts o de menor densitat d'edificacions redueixen significativament els increments de temperatura.
- En la vista general del mapa d'illa de calor (figura 6) s'aprecia amb claredat com la tipologia de cobertes urbanes o vegetades incideix en el comportament tèrmic al Municipi de Berga.



### Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga

- En els transectes realitzats, s'observen diferències de temperatura de gairebé 4°C (nucli urbà-zona de referència).
- La imatge Landsat-8 tractada es correspon a l'estiu de 2015, coincidint amb una onada de calor a tot Catalunya. Els transectes es van portar a terme al novembre de 2018.
- Tot i així, els patrons de comportament tèrmic espacials són molt similars, observant no obstant, tal i com era previst i així s'indica en l'actual estat de l'art, les variacions de temperatura a "hivern" són més acusades que a l'estiu

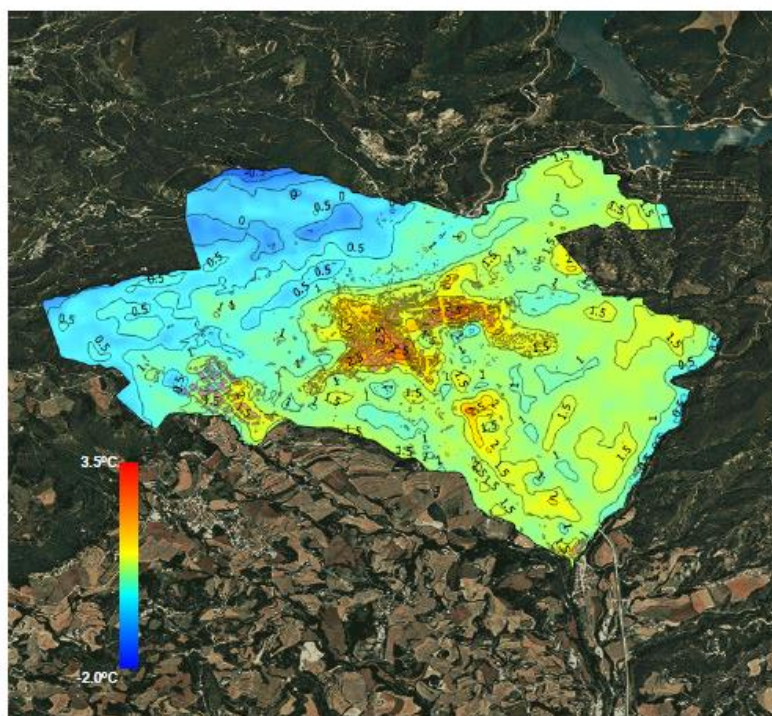


Figura 8. Vista general del mapa complet comportament tèrmic-UHI de Berga.

## 9 Referències

- [1] [http://canalsalut.gencat.cat/web/.content/\\_Professionals/Vigilancia\\_epidemiologica/documentos/arxius/2015\\_actuacions\\_pocs.pdf](http://canalsalut.gencat.cat/web/.content/_Professionals/Vigilancia_epidemiologica/documentos/arxius/2015_actuacions_pocs.pdf)
- [2] <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>





### **Anàlisi Comportament Tèrmic/Illa de calor de Berga**

- R. Alamús, F. Pérez, L. Pipia, J. Corbera., "Urban sustainable ecosystems assessment through airborne earth observation: lessons learned", ISPRS ID-193 (2018)
- Luca Pipia, Fernando Pérez, Anna Tardà, Vicenç Palà, Jordi Corbera, Marta Morera and Angel Ruiz, "Hyperspectral TIR sensor for building heat-loss detection", RAQS 2014
- L. Pipia, F. Pérez, A. Tardà, V. Palà and R. Arbiol, "Potentials of the Thermal Airborne Spectrographic Imager for Environmental Studies," International Geomatic Week Conference, 15-17 March, Barcelona, Spain, 2011

## **10 Agraïments**

---

Volem agrair al Grup de Climatologia de la Universitat de Barcelona, dirigit pel Dr. Javier Martín Vide per proporcionar-nos el termohigròmetre per tal de fer els perfils tèrmics.

---

## REFERENCIAS

- Achebak, H., Devolder, D., Ballester, J., 2018. Heat-related mortality trends under recent climate warming in Spain: A 36-year observational study. *PLoS Med.* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002617>
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol. Energy* 70. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Akbari, H., Menon, S., Rosenfeld, A., 2009. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. *Clim. Change* 94. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- Alamús, R., Pippia, L., Corbera, J. 2014. Comportament tèrmic / Illa de calor de Barcelona. Informes tècnics ICGC.
- Alamús, R., Pérez, F., Pipia, L., Corbera, J., 2018. Urban sustainable ecosystems assessment through airborne earth observation: Lessons learned, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-5-2018>
- Alwang, J., P.B. Siegel, S.L. Jorgensen, 2001. *Vulnerability: A View From Different Disciplines*. Social Protection Discussion Paper Series, No. 115, World Bank, Washington, DC
- Alexander, P.J., Mills, G., 2014. Local climate classification and Dublin's urban heat island. *Atmosphere (Basel)*. 5. <https://doi.org/10.3390/atmos5040755>
- Alvarez-Pedrerol, M., Rivas, I., López-Vicente, M., Suades-González, E., Donaire-Gonzalez, D., Cirach, M., de Castro, M., Esnaola, M., Basagaña, X., Dadvand, P., Nieuwenhuijsen, M., Sunyer, J., 2017. Impact of commuting exposure to traffic-related air pollution on cognitive development in children walking to school. *Environ. Pollut.* 231. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.075>
- Aminipouri, M., Knudby, A.J., Krayenhoff, E.S., Zickfeld, K., Middel, A., 2019. Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban For. Urban Green.* 39. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.016>

- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Baccini, M., Kosatsky, T., Analitis, A., Anderson, H.R., D'Ovidio, M., Menne, B., Michelozzi, P., Biggeri, A., Michelozzi, P., Kirchmayer, U., de'Donato, F., D'Ovidio, M., D'Ippoliti, D., Marino, C., McGregor, G., Biggeri, A., Accetta, G., Menne, B., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., Kassomenos, P., Sunyer, J., Anderson, H.R., Atkinson, R., Medina, S., Paldy, A., Bisanti, L., Cadum, G., Kriz, B., Hojs, A., Clancy, L., Goodman, P., Forsberg, B., Pekkanen, J., Woityniak, B., Jolliffe, I., Jendritzky, G., Blazejczyk, K., Huth, R., Cegnar, T., Schindler, C., Ballester, F., Monceau, G., Kalkstein, L.S., 2011. Impact of heat on mortality in 15 European cities: Attributable deaths under different weather scenarios. *J. Epidemiol. Community Health* 65. <https://doi.org/10.1136/jech.2008.085639>
- Balchin, W.G.V., Pye, N., 1947. A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 73. <https://doi.org/10.1002/qj.49707331706>
- Ballester, J., Douville, H., Chauvin, F., 2009. Present-day climatology and projected changes of warm and cold days in the CNRM-CM3 global climate model. *Clim. Dyn.* 32. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0371-0>
- Banks, R.F., Tiana-Alsina, J., Rocadenbosch, F., Baldasano, J.M., 2015. Performance Evaluation of the Boundary-Layer Height from Lidar and the Weather Research and Forecasting Model at an Urban Coastal Site in the North-East Iberian Peninsula. *Boundary-Layer Meteorol.* 157. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0056-2>
- Bao, J., Li, X., Yu, C., 2015. The construction and validation of the heat vulnerability index, a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* <https://doi.org/10.3390/ijerph120707220>
- de Barcelona, A., 2018. Pla Clima. Emergència Climàtica. Compromís i Crida a l'Acció.
- de Barcelona, A., 2013. Manual de reg. Guia pràctica per al reg de les zones verdes de Barcelona. Medi Ambient i Serveis Urbans.
- Brooks, N., 2003. Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework. Tyndall Centre for Climate Change Working Paper 38, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Barlow, J.F., 2014. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Clim.* 10. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>



- 
- Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science* (80-). 332. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>
- Bechtel, B., Alexander, P.J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., Stewart, I., 2015. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 4. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>
- Bechtel, B., Daneke, C., 2012. Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2189873>
- Bechtel, B., See, L., Mills, G., Foley, M., 2016. Classification of local climate zones using SAR and multispectral data in an arid environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7), 3097-3105
- Beck, C., Straub, A., Breitner, S., Cyrus, J., Philipp, A., Rathmann, J., Schneider, A., Wolf, K., Jacobeit, J., 2018. Air temperature characteristics of local climate zones in the Augsburg urban area (Bavaria, southern Germany) under varying synoptic conditions. *Urban Clim.* 25. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.007>
- Behnisch, M., Meinel, G., Tramsen, S., Diesselmann, M., 2013. Using quadtree representations in building stock visualization and analysis. *Erdkunde* 67. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2013.02.04>
- Benzie, M., Burningham, K., Hodgson, N., 2011. Vulnerability to heatwaves and drought Case studies of adaptation to climate change in. *Water*.
- Best, M.J., Grimmond, C.S.B., 2014. Importance of initial state and atmospheric conditions for urban land surface models' performance. *Urban Clim.* 10. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.006>
- Bougeault, P., Lacarrere, P., 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Mon. Weather Rev.* 117. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2)
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc. Urban Plan.* <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 45. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

- Bretz, S.E., Akbari, H., 1997. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy Build.* 25. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01005-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01005-5)
- Brien, K., L. Sygna, R. Leinchenko, W.N. Adger, J. Barnett, T. Mitchell, L. Schipper, T. Tanner, C. Vogel, and C. Mortreux, 2008. Disaster Risk Reduction, ClimateChange Adaptation and Human Security. GECHS Report 2008:3, Global Environmental Change and Human Security, Oslo, Norway.
- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G., Bechtel, B., 2016. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Clim.* 17. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
- Cadenasso, M.L., Pickett, S.T.A., Schwarz, K., 2007. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: Reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Front. Ecol. Environ.* [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[80:SHIUER\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[80:SHIUER]2.0.CO;2)
- Calbó, J., M. Gonçalves, A. Barrera-Escoda, J. García-Serrano, F. Doblas-Reyes, V. Guemas, J. Cunillera, V. Altava-Ortiz, 2016. Projeccions climàtiques i escenaris futurs. En Martín Vide, J. (coord.) (2016). Tercer Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Barcelona: Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans. ISBN 9788499653174 (IEC). – ISBN 9788439394488 (Generalitat de Catalunya)
- Campra, P., 2011. Global and Local Effect of Increasing Land Surface Albedo as a Geo-Engineering Adaptation/Mitigation Option: A Study Case of Mediterranean Greenhouse Farming, in: *Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation.* <https://doi.org/10.5772/23286>
- Campra, P., Garcia, M., Canton, Y., Palacios-Orueta, A., 2008. Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD009912>
- Cannon, T., 2006. Vulnerability analysis, livelihoods and disasters. In: *Risk 21: Coping with Risks Due to Natural Hazards in the 21st Century* [Ammann, W.J., S. Dannenmann, and L. Vulliet (eds.)]. Taylor and Francis Group, London, UK, pp.41-49.
- Cardona, O.D., 1990. Terminología de Uso Común en Manejo de Riesgos. AGIDReporte No. 13, Escuela de Administración, Finanzas, y Tecnología, Medellín, Colombia.
- Cardona, O.D., J.E. Hurtado, G. Duque, A. Moreno, A.C. Chardon, L.S. Velásquez, and S.D. Prieto, 2003. The Notion of Disaster Risk: Conceptual Framework for Integrated Management. National University of Colombia / Inter-American Development Bank, Washington, DC.

- 
- Chen, F., Dudhia, J., 2001. Coupling and advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Weather Rev.* 129. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Chen, F., Bornstein, R., Grimmond, S., Li, J., Liang, X., Martilli, A., Miao, S., Voogt, J., Wang, Y.H., 2012. Research priorities in observing and modeling urban weather and climate, in: *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00217.1>
- Chen, F., Miao, S., Tewari, M., Bao, J.W., Kusaka, H., 2011. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area. *J. Geophys. Res. Atmos.* 116. <https://doi.org/10.1029/2010JD015533>
- Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X., Yin, Z.Y., 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sens. Environ.* 104. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., Brorousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Mouzourides, P., Stewart, I., Hanna, A., Ng, E., Foley, M., Alexander, P., Aliaga, D., Niyogi, D., Shreevastava, A., Bhalachandran, P., Masson, V., Hidalgo, J., Fung, J., Andrade, M., Baklanov, A., Dai, W., Milcinski, G., Demuzere, M., Brunzell, N., Pesaresi, M., Miao, S., Mu, Q., Chen, F., Theeuwesits, N., 2018. WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 99. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>
- Chow, Ven Te. *Engineering Hydrology*. 1988.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., Richels, R. 2007. CCSP synthesis and assessment product 2.1, Part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. US Government Printing Office, Washington DC.
- Cortès, M., Llasat, M.C., Gilabert, J., Llasat-Botija, M., Turco, M., Marcos, R., Martín Vide, J.P., Falcón, L., 2017. Towards a better understanding of the evolution of the flood risk in Mediterranean urban areas: the case of Barcelona. *Nat. Hazards* 93. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3014-0>
- Cortès, M., Turco, M., Llasat-Botija, M., Carmen Llasat, M., 2018. The relationship between precipitation and insurance data for floods in a Mediterranean region (northeast Spain). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-857-2018>

- Coseo, P., Larsen, L., 2014. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. *Landscape Urban Plan.* 125. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.019>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., Xoplaki, E., 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nat. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Cutter, S.L., 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Prog. Hum. Geogr.* 20. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- Cutter, S.L., Mitchell, J.T., Scott, M.S., 2000. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of georgetown county, South Carolina. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 90. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00219>
- Cutter, S.L. and C. Finch, 2008: Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,105(7),2301-2306
- Dadvand, P., Pujol, J., Maciá, D., Martínez-Vilavella, G., Blanco-Hinojo, L., Mortamais, M., Alvarez-Pedrerol, M., Fenoll, R., Esnaola, M., Dalmau-Bueno, A., López-Vicente, M., Basagaña, X., Jerrett, M., Nieuwenhuijsen, M.J., Sunyer, J., 2018. The association between lifelong greenspace exposure and 3-dimensional brain magnetic resonance imaging in Barcelona schoolchildren. *Environ. Health Perspect.* 126. <https://doi.org/10.1289/EHP1876>
- De Jarnett, N., and Pittman, M.: Protecting the Health and Wellbeing of Communities in a Changing Climate. *Proceedings of a Workshop – in Brief.* The National Academies Press. 10.17226/24797, 8p, 2017.
- De Ridder, K., Lauwaet, D., Maiheu, B., 2015. UrbClim - A fast urban boundary layer climate model. *Urban Clim.* 12. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001>
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

- 
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A.G., Mittal, N., Feliu, E., Faehnle, M., 2014. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *J. Environ. Manage.* 146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Dickson, E., Baker, J. L., Hoornweg, D., Asmita, T. 2012. Urban risk assessments: an approach for understanding disaster and climate risk in cities. The World Bank.
- Diffenbaugh, N.S., Pal, J.S., Giorgi, F., Gao, X., 2007. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2007GL030000>
- Drobinski, P., Ducrocq, V., Alpert, P., Anagnostou, E., Béranger, K., Borga, M., Braud, I., Chanzy, A., Davolio, S., Delrieu, G., Estournel, C., Filali Boubrahmi, N., Font, J., Grubišić, V., Gualdi, S., Homar, V., Ivančan-Picek, B., Kottmeier, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lionello, P., Llasat, M.C., Ludwig, W., Lutoff, C., Mariotti, A., Richard, E., Romero, R., Rotunno, R., Roussot, O., Ruin, I., Somot, S., Taupier-Letage, I., Tintor, J., Uijlenhoet, R., Wernli, H., 2014. HYMEX: A 10-year multidisciplinary program on the mediterranean water cycle. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 95. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00242.1>
- Efron, B., Tibshirani, R.J., 1993. An Introduction to the Bootstrap, An Introduction to the Bootstrap. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9>
- Eliasson, I., 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, in: *Atmospheric Environment*. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00033-X)
- Eum, J.H., Kim, K., Jung, E.H., Rho, P., 2018. Evaluation and utilization of thermal environment associated with policy: A case study of Daegu Metropolitan City in South Korea. *Sustain.* 10. <https://doi.org/10.3390/su10041179>
- Fallmann, J., Emeis, S., Suppan, P., 2013. Mitigation of urban heat stress -a modelling case study for the area of Stuttgart. *Erde* 144. <https://doi.org/10.12854/erde-144-15>
- Feyisa, G.L., Dons, K., Meilby, H., 2014. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landsc. Urban Plan.* 123. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.008>
- Füssel, H.-M. and R.J.T. Klein, 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75, 301-329

- Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J., 2013. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057>
- García-Diéz, M., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Ballester, J., De Ridder, K., Rodó, X., 2016. Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona. *Geosci. Model Dev.* 9. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4439-2016>
- Gedzelman, S.D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., Robinson, D.A., 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor. Appl. Climatol.* 75. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2>
- Geletič, J., Lehnert, M., 2016. GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Morav. Geogr. Reports* 24. <https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0012>
- Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolný, P., 2016. Land surface temperature differences within local climate zones, Based on two central European cities. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8100788>
- Geletič, J., Lehnert, M., Savić, S., Milošević, D., 2018. Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic. *Sci. Total Environ.* 624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.076>
- Gémes, O., Tobak, Z., Leeuwen, B. van, 2016. Satellite Based Analysis of Surface Urban Heat Island Intensity. *J. Environ. Geogr.* 9. <https://doi.org/10.1515/jengeo-2016-0004>
- Getter, K.L., Rowe, D.B., 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience* 41. <https://doi.org/10.21273/hortsci.41.5.1276>
- Gilabert, J., M. Llasat-Botija, R. Marcos, M.C. Llasat, 2014. Hacia una clasificación de las inundaciones: del impacto a la evaluación cuantitativa. *Cambio climático y cambio global. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*, n. 9, pp. 477-488, ISBN: 978-84-16027-69-9, D. L.: AL 1067-2014
- Gilabert, J., Tardà, A., Llasat, M., Corbera, J. 2016. Assessment of local climate zones over metropolitan area of barcelona and added value of urban atlas, corine land cover and copernicus layers under Inspire specifications. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22495.25764>.
- Gilabert, J., Llasat, M.C., 2018. Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean. *Int. J. Climatol.* 38. <https://doi.org/10.1002/joc.5301>

- 
- Gilabert, J., Llasat, MC., Corbera, J., 2018. Les Zones CLimáticas Locals: La nova cartografia urbana i rural segons la seva resposta tèrmica. *Revista Catalana de Geografia (IV)*, vol. XIII, n58.
- Gilabert, J., Deluca, A., Lauwaet, D., Ballester, J., Corbera, J., Llasat, M. C. 2020. Assessing heat exposure to extreme temperatures in urban areas using the Local Climate Zones classification. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-41.
- Gilabert, J., Ventura, S., Segura, R., Martilli, A., Badia, A., Llasat., MC., Corbera, J., Villalba, G., 2021. Abating heat waves in urban areas: what can cool roofs and vegetation contribute?. *Urban Climate*, submitted.
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Gómez, Antonio López; GARCÍA, Felipe Fernández. *El clima de las ciudades españolas*. Catedra Ediciones, 1993.
- González, M.Á., Arasa, R., Gámez, P., Picanyol, M., Campra, P., 2019. Effects of increasing the surface reflectance over air quality levels using WRF-BEM/AEMM/CMAQ: Application over the city of Madrid, in: *International Journal of Environment and Pollution*. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2019.101841>
- Grimmond, S., 2007. Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming, in: *Geographical Journal*. [https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232\\_3.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x)
- Guarino, M. V., Martilli, A., Di Sabatino, S., Leo, L.S., 2014. Modelling the urban boundary-layer over a typical mediterranean city using WRF: Assessment of UHI and thermal comfort, in: *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2014-21572>
- Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A., 2018. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Guevara, M., Martínez, F., Arévalo, G., Gassó, S., Baldasano, J.M., 2013. An improved system for modelling Spanish emissions: HERMESv2.0. *Atmos. Environ.* 81. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.053>
- Habitat, U., 2013. State of the world's cities 2012/2013: Prosperity of cities, *State of the World's Cities 2012/2013: Prosperity of Cities*. <https://doi.org/10.4324/9780203756171>

- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J., Corfee-Morlot, J., 2013. Future flood losses in major coastal cities. *Nat. Clim. Chang.* 3. <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>
- Hammerberg, K., Brousse, O., Martilli, A., Mahdavi, A., 2018. Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *Int. J. Climatol.* 38. <https://doi.org/10.1002/joc.5447>
- Hanson, S., Nicholls, R., Ranger, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Chateau, J., 2011. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. *Clim. Change* 104. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9977-4>
- Harman, I.N., Belcher, S.E., 2006. The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 132. <https://doi.org/10.1256/qj.05.185>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Holtanová, E., Valeriánová, A., Crhová, L., Racko, S., 2014. Heat wave of August 2012 in the Czech Republic: comparison of two approaches to assess high temperature event. *Stud. Geophys. Geod.* 59. <https://doi.org/10.1007/s11200-014-0805-6>
- Hong, S. Y., Lim, J. O. J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Hoy, A., Hänsel, S., Skalák, P., Ustrnul, Z., Bochníček, O., 2017. The extreme European summer of 2015 in a long-term perspective. *Int. J. Climatol.* 37. <https://doi.org/10.1002/joc.4751>
- Huang, M., Gao, Z., Miao, S., Chen, F., 2019. Sensitivity of urban boundary layer simulation to urban canopy models and PBL schemes in Beijing. *Meteorol. Atmos. Phys.* 131. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0634-1>
- Hunt, A., Watkiss, P., 2011. Climate change impacts and adaptation in cities: A review of the literature. *Clim. Change* 104. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9975-6>



- 
- Hunt, J.C., Timoshkina, Y. V., Bohnenstengel, S.I., Belcher, S., 2013. Implications of climate change for expanding cities worldwide. *Proc. Inst. Civ. Eng. Urban Des. Plan.* 166. <https://doi.org/10.1680/udap.10.00062>
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., Collins, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Imran, H.M., Kala, J., Ng, A.W.M., Muthukumaran, S., 2019. Effectiveness of vegetated patches as Green Infrastructure in mitigating Urban Heat Island effects during a heatwave event in the city of Melbourne. *Weather Clim. Extrem.* 25. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100217>
- Ingole, V., Mari-Dell'Olmo, M., Deluca, A., Quijal, M., Borrell, C., Rodríguez-Sanz, M., Achebak, H., Lauwaet, D., Gilabert, J., Murage, P., Hajat, S., Basagaña, X., Ballester, J., 2020. Spatial variability of heat-related mortality in Barcelona from 1992-2015: A case crossover study design. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072553>
- Inostroza, L., Palme, M., De La Barrera, F., 2016. A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile. *PLoS One* 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162464>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacob, D.J., Winner, D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.* 43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Chang.* 14. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jacobs, S.J., Gallant, A.J.E., Tapper, N.J., Li, D., 2018. Use of cool roofs and vegetation to mitigate urban heat and improve human thermal stress in Melbourne, Australia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 57. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0243.1>

- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.E., Belarbi, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renew. Energy* 43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- Jandaghian, Z., Touchaei, A. G., Akbari, H., 2018. Sensitivity analysis of physical parameterizations in WRF for urban climate simulations and heat island mitigation in Montreal. *Urban climate*, 24, 577-599.
- Jenks, G.F., 1967. The data model concept in statistical mapping. *Int. Yearb. Cartogr.* 7.
- Jiang, S., Lee, X., Wang, J., Wang, K., 2019. Amplified Urban Heat Islands during Heat Wave Periods. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD030230>
- Jiménez-Esteve, B., Udina, M., Soler, M. R., Pepin, N., Miró, J. R., 2018. Land use and topography influence in a complex terrain area: A high resolution mesoscale modelling study over the Eastern Pyrenees using the WRF model. *Atmospheric Research*, 202, 49-62.
- Kain, J.S., 2004. The Kain - Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol.* 43. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kaloustian, N., Bechtel, B., 2016. Local Climatic Zoning and Urban Heat Island in Beirut, in: *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.026>
- Knutti, R., Sedláček, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat. Clim. Chang.* 3. <https://doi.org/10.1038/nclimate1716>
- Kotharkar, R., Bagade, A., 2018. Local Climate Zone classification for Indian cities: A case study of Nagpur. *Urban Clim.* 24. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.03.003>
- Krstic, N., Yuchi, W., Ho, H.C., Walker, B.B., Knudby, A.J., Henderson, S.B., 2017. The Heat Exposure Integrated Deprivation Index (HEIDI): A data-driven approach to quantifying neighborhood risk during extreme hot weather. *Environ. Int.* 109. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.011>
- Kwok, Y.T., Schoetter, R., Lau, K.K.L., Hidalgo, J., Ren, C., Pigeon, G., Masson, V., 2019. How well does the local climate zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *Int. J. Climatol.* 39. <https://doi.org/10.1002/joc.6140>
- Kysely, J., 2010. Recent severe heat waves in central Europe: How to view them in a long-term prospect? *Int. J. Climatol.* 30. <https://doi.org/10.1002/joc.1874>

- 
- Langemeyer, J., Wedgwood, D., McPhearson, T., Baró, F., Madsen, A.L., Barton, D.N., 2020. Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Sci. Total Environ.* 707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487>
- Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Maiheu, B., Lefebvre, W., Driesen, G., Van Looy, S., De Ridder, K., 2015. Detailed urban heat island projections for cities worldwide: Dynamical downscaling CMIP5 global climate models. *Climate* 3. <https://doi.org/10.3390/cli3020391>
- Lavell, A., 2003. *Local Level Risk Management: Concept and Practices*. CEPRE-DENAC-UNDP, Quito, Ecuador
- Lehoczky, A., Sobrino, J., Skoković, D., Aguilar, E., 2017. The Urban Heat Island Effect in the City of Valencia: A Case Study for Hot Summer Days. *Urban Sci.* 1. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010009>
- Lelovics, E., Unger, J., Gál, T., Gál, C. V., 2014. Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Clim. Res.* 60. <https://doi.org/10.3354/cr01220>
- Lhotka, O., Kyselý, J., 2015. Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe. *Int. J. Climatol.* 35. <https://doi.org/10.1002/joc.4050>
- Li, D., Bou-Zeid, E., 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 52. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Li, D., Bou-Zeid, E., Oppenheimer, M., 2014. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- Li, H., Wolter, M., Wang, X., Sodoudi, S., 2018. Impact of land cover data on the simulation of urban heat island for Berlin using WRF coupled with bulk approach of Noah-LSM. *Theor. Appl. Climatol.* 134. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2253-z>
- Li, X.X., Norford, L.K., 2016. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Clim.* 16. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.002>
- Li, X., Li, W., Middel, A., Harlan, S.L., Brazel, A.J., Turner, B.L., 2016. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition

- and configuration and cadastral-demographic-economic factors. *Remote Sens. Environ.* 174. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.022>
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. *Remote Sens. Environ.* 76. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)
- Liao, J., Wang, T., Wang, X., Xie, M., Jiang, Z., Huang, X., Zhu, J., 2014. Impacts of different urban canopy schemes in WRF/Chem on regional climate and air quality in Yangtze River Delta, China. *Atmos. Res.* 145–146. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.04.005>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Järvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.F.G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., Zhang, Z., 2018. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environ. Model. Softw.* 99. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020>
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U., Xoplaki, E., 2006. The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. *Dev. Earth Environ. Sci.* [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- Lionello, P., Abrantes, F., Gacic, M., Planton, S., Trigo, R., Ulbrich, U., 2014. The climate of the Mediterranean region: research progress and climate change impacts. *Reg. Environ. Chang.* <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0666-0>
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M., López, L., 2009. A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2049-2009>
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M., Gilabert, J., Marcos, R., 2012. Treinta años de inundaciones en Cataluña: la importancia de lo cotidiano, in: *Publicaciones de La Asociación Española de Climatología (AEC)*.
- Llasat, M.C., Marcos, R., Llasat-Botija, M., Gilabert, J., Turco, M., Quintana-Seguí, P., 2014. Flash flood evolution in North-Western Mediterranean. *Atmos. Res.* 149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.05.024>
- Llasat, M.C., Marcos, R., Turco, M., Gilabert, J., Llasat-Botija, M., 2016a. Trends in flash flood events versus convective precipitation in the Mediterranean region: The case of Catalonia. *J. Hydrol.* 541. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.040>

- 
- Llasat, M.C., M. Cortès, Ll. Falcón, J. Gilabert, M. Llasat-Botija, R. Marcos, J. P. Martín Vide, M. Turco, 2016b. A multifactorial analysis of flood variability in the Metropolitan Area of Barcelona. Proceedings of the International Conference on Urban Risks, Contribution 2-21, Lisbon, 30 June-2 July, 2017.
- Lo, C.P., Quattrochi, D.A., Luvall, J.C., 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *Int. J. Remote Sens.* 18. <https://doi.org/10.1080/014311697219079>
- López-Calva, L.F. and E. Ortiz, 2008. Evidence and Policy Lessons on the Link between Disaster Risk and Poverty in Latin America: Summary of Regional Studies. RPP LAC – MDGs and Poverty – 10/2008, RBLAC-UNDP, New York, NY, USA.
- Lowe, R., Ballester, J., Creswick, J., Robine, J.M., Herrmann, F.R., Rodó, X., 2015. Evaluating the performance of a climate-driven mortality model during heat waves and cold spells in Europe. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12. <https://doi.org/10.3390/ijerph120201279>
- Luber, G., McGeehin, M., 2008. Climate Change and Extreme Heat Events. *Am. J. Prev. Med.* <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Maes, J., Vliegen, J., Van de Vel, K., Janssen, S., Deutsch, F., De Ridder, K., Mensink, C., 2009. Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories. *Atmos. Environ.* 43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.040>
- Martilli, A., 2002. Numerical study of urban impact on boundary layer structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture. *J. Appl. Meteorol.* 41. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1247:NSOUIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1247:NSOUIO>2.0.CO;2)
- Martilli, A., Brousse, O., Ching, J., 2016. Urbanized WRF modeling using WUDAPT(1). <http://www.wudapt.org/resources/> 1–8.
- Martin-Vide, J., Moreno-Garcia, M.C., 2020. Probability values for the intensity of Barcelona’s urban heat island (Spain). *Atmos. Res.* 240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>
- Martin-Vide, J., Sarricolea, P., Moreno-García, M.C., 2015. On the definition of urban heat island intensity: The “rural” reference. *Front. Earth Sci.* 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00024>
- Masterton, J. M., and Richardson, F. A.: Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada. Atmospheric Environment, 1979.

- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White (eds.), 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- McCarthy, M.P., Best, M.J., Betts, R.A., 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL042845>
- MedECC Network, 2019. Risks associated to climate and environmental changes in the Mediterranean region. A preliminary assessment by the MedECC Network. *Br. J. Psychiatry*
- Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* (80-. ). 305. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landsc. Urban Plan.* 77. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005. The weather research and forecast model: Software architecture and performance, in: *Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. [https://doi.org/10.1142/9789812701831\\_0012](https://doi.org/10.1142/9789812701831_0012)
- Millstein, D., Menon, S., 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *Environ. Res. Lett.* 6. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034001>
- Mirzaei, P.A., Haghighat, F., 2010. Approaches to study Urban Heat Island - Abilities and limitations. *Build. Environ.* 45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Mitraka, Z., Del Frate, F., Chrysoulakis, N., Gastellu-Etchegorry, J.P., 2015. Exploiting Earth Observation data products for mapping Local Climate Zones, in: *2015 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE 2015*. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120456>
- Moreno-Garcia, M.C., 1994. Intensity and form of the urban heat island in barcelona. *Int. J. Climatol.* 14. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140609>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

- 
- Nakamura, I., Llasat, M.C., 2017. Policy and systems of flood risk management: a comparative study between Japan and Spain. *Nat. Hazards* 87. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2802-x>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R. A., Rogner, H. H., & Victor, N. 2000. Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Nayak, S.G., Shrestha, S., Kinney, P.L., Ross, Z., Sheridan, S.C., Pantea, C.I., Hsu, W.H., Muscatiello, N., Hwang, S.A., 2018. Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health* 161. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006>
- Ndossi, M.I., Avdan, U., 2016. Application of open source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8050413>
- Nemunaitis-Berry, K.L., Klein, P.M., Basara, J.B., Fedorovich, E., 2017. Sensitivity of predictions of the urban surface energy balance and heat Island to variations of urban canopy parameters in simulations with the WRF model. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 56. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0157.1>
- Oke, T. R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R., 1988. The urban energy balance. *Prog. Phys. Geogr.* 12. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J., 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>
- Pachauri R. K., M.L., 2015. IPCC 2014, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
- Papangelis, G., Tombrou, M., Dandou, A., Kontos, T., 2012. An urban “green planning” approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece. *Landsc. Urban Plan.* 105. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.014>

- Pappaccogli, G., Giovannini, L., Cappelletti, F., Zardi, D., 2017. Sensitivity of WRF/urban simulations to urban morphology parameters: A case study in the city of bolzano, in: Building Simulation Applications.
- Perrotti, D., Iuorio, O., 2019. Green Infrastructure in the Space of Flows: An Urban Metabolism Approach to Bridge Environmental Performance and User's Wellbeing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01866-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01866-5_18)
- Patt, A., R. Klein, and A. Vega-Leinert, 2005. Taking the uncertainty in climate-change vulnerability seriously. *Geoscience*, 337, 411-424
- QIU, G. yu, LI, H. yong, ZHANG, Q. tao, CHEN, W., LIANG, X. jian, LI, X. ze, 2013. Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *J. Integr. Agric.* [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Ramos, M. M., Vide, J. M., García, M. D. C. M., Bonastre, J. S. 1990. Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona. *Documents d'anàlisi Geogràfica*, (17), 51-77.
- Riahi, K., Grübler, A., Nakicenovic, N., 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol. Forecast. Soc. Change* 74. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>
- Ribeiro, I., Martilli, A., Falls, M., Zonato, A., Villalba, G., 2021. Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ. *Atmos. Res.* 248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105220>
- RIZWAN, A.M., DENNIS, L.Y.C., LIU, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *J. Environ. Sci.* 20. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Robinson, P.J., 2001. On the definition of a heat wave. *J. Appl. Meteorol.* 40. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2)
- Rothfusz, L. P., Headquarters, N. S. R., 1990. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, 9023
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., and Ali Ibrahim, S., 2018. Climate change and cities. Second assessment report of the urban climate change research network. New York: Cambridge University Press



- 
- Rowe, D.B., Getter, K.L., 2015. Green Roofs and Garden Roofs. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr55.c19>
- Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., Clappier, A., 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor. Appl. Climatol.* 99. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
- Salamanca, F., Martilli, A., 2010. A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.* 99. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0143-8>
- Salamanca, F., Martilli, A., Tewari, M., Chen, F., 2011. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2538.1>
- Salamanca, F., Martilli, A., Yagüe, C., 2012. A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *Int. J. Climatol.* 32. <https://doi.org/10.1002/joc.3398>
- Salvati, A., Coch Roura, H., Cecere, C., 2017. Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. *Energy Build.* 146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025>
- Santamouris, M., 2014. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* 103. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santiago, J.L., Martilli, A., Martin, F., 2017. On Dry Deposition Modelling of Atmospheric Pollutants on Vegetation at the Microscale: Application to the Impact of Street Vegetation on Air Quality. *Boundary-Layer Meteorol.* 162. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0210-5>
- Schlosberg, D., Collins, L.B., 2014. From environmental to climate justice: Climate change and the discourse of environmental justice. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1002/wcc.275>
- Schneidereit, A., Schubert, S., Vargin, P., Lunkeit, F., Zhu, X., Peters, D.H.W., Fraedrich, K., 2012. Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010. *Mon. Weather Rev.* 140. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00249.1>

- Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), 2015. Butlletí climàtic mensual (juliol del 2015). Departament de Territori i Sostenibilitat.
- Sharma, A., Conry, P., Fernando, H.J.S., Hamlet, A.F., Hellmann, J.J., Chen, F., 2016. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model. *Environ. Res. Lett.* 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064004>
- Sharma, A., Fernando, H.J.S., Hamlet, A.F., Hellmann, J.J., Barlage, M., Chen, F., 2017. Urban meteorological modeling using WRF: a sensitivity study. *Int. J. Climatol.* 37. <https://doi.org/10.1002/joc.4819>
- Sharma, A., Fernando, H.J.S., Hellmann, J., Chen, F., 2014. Sensitivity of WRF model to urban parameterizations, with applications to Chicago metropolitan urban heat Island, in: American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2014-21292>
- Sheridan, S.C., Dixon, P.G., 2017. Spatiotemporal trends in human vulnerability and adaptation to heat across the United States. *Anthropocene* 20. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.10.001>
- Sievers, U., Früh, B., 2012. A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings. *Meteorol. Zeitschrift* 21. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0331>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G. 2005. A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X.-Y., 2019. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Skarbit, N., Gál, T., Unger, J., 2015. Airborne surface temperature differences of the different Local Climate Zones in the urban area of a medium sized city, in: 2015 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE 2015. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120497>
- Skarbit, N., Stewart, I.D., Unger, J., Gál, T., 2017. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *Int. J. Climatol.* 37. <https://doi.org/10.1002/joc.5023>

- 
- Smid, M., Russo, S., Costa, A.C., Granell, C., Pebesma, E., 2019. Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves. *Urban Clim.* 27. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>
- Smith, S.J., Wigley, T.M.L., 2006. Multi-gas forcing stabilization with minicam. *Energy J.* 27. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-volsi2006-nosi3-19>
- Sobrino, J.A., Irakulis, I., 2020. A methodology for comparing the surface urban heat Island in selected urban agglomerations around the world from Sentinel-3 SLSTR data. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/RS12122052>
- Soler, M.R., Arasa, R., Merino, M., Olid, M., Ortega, S., 2011. Modelling Local Sea-Breeze Flow and Associated Dispersion Patterns Over a Coastal Area in North-East Spain: A Case Study. *Boundary-Layer Meteorol.* 140. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9599-z>
- Soriano, C., Baldasano, J.M., Buttler, W.T., Moore, K.R., 2001. Circulatory patterns of air pollutants within the Barcelona air basin in a summertime situation: Lidar and numerical approaches. *Boundary-Layer Meteorol.* 98. <https://doi.org/10.1023/A:1018726923826>
- Stewart, I.D., 2011. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., Krayenhoff, E.S., 2014. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *Int. J. Climatol.* 34. <https://doi.org/10.1002/joc.3746>
- Stott, P.A., Stone, D.A., Allen, M.R., 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432. <https://doi.org/10.1038/nature03089>
- Susca, T., 2012. Multiscale Approach to Life Cycle Assessment: Evaluation of the Effect of an Increase in New York City’s Rooftop Albedo on Human Health. *Susca, LCA: Rooftop Albedo and Human Health. J. Ind. Ecol.* 16. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00560.x>
- Susca, T., Pomponi, F., 2020. Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making. *J. Ind. Ecol.* 24. <https://doi.org/10.1111/jiec.12980>

- Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M., Soulakellis, N., 2008. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>
- Synnefa, A., Santamouris, M., 2012. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project, in: *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.051>
- Takebayashi, H., Moriyama, M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build. Environ.* 42. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A.J., Li, F., Chen, H., 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.* 54. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>
- Taubenböck, H., Debray, H., Qiu, C., Schmitt, M., Wang, Y., Zhu, X.X., 2020. Seven city types representing morphologic configurations of cities across the globe. *Cities* 105. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102814>
- Teixeira, J.C., Fallmann, J., Carvalho, A.C., Rocha, A., 2019. Surface to boundary layer coupling in the urban area of Lisbon comparing different urban canopy models in WRF. *Urban Clim.* 28. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100454>
- Thywissen, K., 2006: Core terminology of disaster risk reduction: A comparative glossary. In: *Measuring Vulnerability to Natural Hazards* [Birkmann, J. (ed.)]. UNU Press, Tokyo, Japan, pp. 448-496
- Unger, J., Skarbit, N., Gál, T., 2018. Evaluation of outdoor human thermal sensation of local climate zones based on long-term database. *Int. J. Biometeorol.* 62. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1440-z>
- UNISDR, 2015. *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction., International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)
- UNISDR, 2009. *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Int. Strat. Disaster Reduct.
- United Nations, 2015. *World Population Prospects: The 2015 Revision*, United Nations Economic and Social Affairs
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, United Nations Economic and Social Affairs

- 
- Upmanis, H., Eliasson, I., Lindqvist, S., 1998. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *Int. J. Climatol.* 18. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
- Vahmani, P., Hogue, T.S., 2014. Incorporating an Urban Irrigation Module into the Noah Land Surface Model Coupled with an Urban Canopy Model. *J. Hydrometeorol.* 15. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-0121.1>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Clim. Change* 109. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Verdonck, M.L., Demuzere, M., Hooyberghs, H., Beck, C., Cyrus, J., Schneider, A., Dewulf, R., Van Coillie, F., 2018. The potential of local climate zones maps as a heat stress assessment tool, supported by simulated air temperature data. *Landsc. Urban Plan.* 178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.06.004>
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., Franch, B., 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sens. Environ.* 185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Vicedo-Cabrera, A.M., Iñíguez, C., Barona, C., Ballester, F., 2014. Exposure to elevated temperatures and risk of preterm birth in Valencia, Spain. *Environ. Res.* 134. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.07.021>
- Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* 86. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Lau, K.K.L., Shi, Y., 2018. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban Clim.* 24. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., Endlicher, W., 2016. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Sci. Total Environ.* 569–570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>

- Weber, E., 1977. Kendall, M.: *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Co. LTD. London, High Wycombe 1975. 210 s., 9 Abb., 27 Tab., 1 Anhang, £ 6,80. *Biometrical J.* 19. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710190413>
- Weber, S., Sadoff, N., Zell, E., de Sherbinin, A., 2015. Policy-relevant indicators for mapping the vulnerability of urban populations to extreme heat events: A case study of Philadelphia. *Appl. Geogr.* 63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.006>
- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S.J., Janetos, A., Edmonds, J., 2009. Implications of limiting CO2 concentrations for land use and energy. *Science* (80-). 324. <https://doi.org/10.1126/science.1168475>
- Wolf, T., McGregor, G., 2013. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather Clim. Extrem.* 1. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.004>
- Wong, K. V., Paddon, A., Jimenez, A., 2013. Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality. *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME.* <https://doi.org/10.1115/1.4023176>
- Xiao, W., Fu, Y., Wang, T., Lv, X., 2018. Effects of land use transitions due to underground coal mining on ecosystem services in high groundwater table areas: A case study in the Yanzhou coalfield. *Land use policy* 71. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.059>
- Xu, Z., Sheffield, P.E., Hu, W., Su, H., Yu, W., Qi, X., Tong, S., 2012. Climate change and children's health- A call for research on what works to protect children. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* <https://doi.org/10.3390/ijerph9093298>
- Yang, J., Wang, Z.H., Kaloush, K.E., 2015. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a "silver bullet" for mitigating urban heat island? *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yu, Z., Guo, X., Zeng, Y., Koga, M., Vejre, H., 2018. Variations in land surface temperature and cooling efficiency of green space in rapid urbanization: The case of Fuzhou city, China. *Urban For. Urban Green.* 29. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.008>
- Yuan, F., Bauer, M.E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>

- 
- 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. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- Zhou, B., Rybski, D., Kropp, J.P., 2017. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Sci. Rep.* 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2>
- Zinzi, M., Agnoli, S., 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, in: *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.024>
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C., Pauleit, S., 2016. Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban For. Urban Green.* 20. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>
- Zonato, A., Martilli, A., Di Sabatino, S., Zardi, D., Giovannini, L., 2020. Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models. *Urban Clim.* 31. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100584>

