

PLA
CLIMA



ESTUDI DELS IMPACTES DEL CANVI CLIMÀTIC A BARCELONA

CAPÍTOL I

EFFECTE ILLA DE CALOR

BR

BARCELONA
REGIONAL
AGÈNCIA
DESENVOLUPAMENT
URBÀ

Ajuntament de
Barcelona



CLIENT



**Ajuntament
de Barcelona**

REDACCIÓ



**Ajuntament
de Barcelona**



BARCELONA
REGIONAL
AGÈNCIA
DESENVOLUPAMENT
URBÀ

CARRER 60, 25-27.
EDIFICI Z, PLANTA 2
SECTOR A, ZONA FRANCA
08040 BARCELONA
T 932 237 400
F 932 237 414

www.bcnregional.com
br@bcnregional.com

COORDINACIÓ

Marc Montlleó Balsebre, *Director de Medi Ambient i Eficiència Energètica*

COL·LABORACIÓ

Itzel Sanromà Moncunill, *Ambientòloga*
Jose Lao Mulero, *Enginyer industrial*
Albert Carbonell Ferrer, *Tècnic de GIS*
Pablo Casals Hernández, *Humanista*
Dani Lorca Ruiz, *Tècnic de CAD*
Gemma Conde Cros, *Ambientòloga*

i l'equip tècnic i administratiu de Barcelona Regional

DIRECCIÓ PER PART DE L'AJUNTAMENT DE BARCELONA

Irma Ventayol i Ceferino, *Coordinadora de l'Oficina de Sostenibilitat*
Ares Gabàs Masip, *Responsable de Resiliència Urbana*

I L'EQUIP TÈCNIC:

Benjamí Gauchía Legal
Antoni González Gómez
Patricia Lacera Martínez

© 2017, BARCELONA REGIONAL



AGENDA 21 BCN



ÍNDEX

1. PRESENTACIÓ	5
1.1 QUÈ ÉS L'EFECTE ILLA DE CALOR?	7
1.1.1 Efecte illa de calor de superfície	9
1.1.2 Efecte illa de calor atmosfèrica	11
1.1.3 Relació entre l'illa de calor de superfície i l'illa de calor atmosfèrica	12
1.2 PER QUÈ ESTUDIAR L'ILLA DE CALOR	14
1.2.1 Principals efectes associats a l'illa de calor	14
1.2.2 Relació entre Illa de Calor i Canvi Climàtic	14
1.2.3 Elements que influeixen l'efecte illa de calor	15
2. ANÀLISI I DIAGNOSI	19
2.1 AVALUACIÓ DELS PARÀMETRES QUE INFLUÏEIXEN EN L'ILLA DE CALOR DE BARCELONA	21
2.1.1 Fonts de calor	21
2.1.2 Materials de superfície	24
2.1.3 Superfícies verdes i naturals	32
2.2 EFECTE ILLA DE CALOR DE SUPERFÍCIE	41
2.3 EFECTE ILLA DE CALOR ATMOSFÈRICA	46
2.3.1 Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona, 1990	46
2.3.2 La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático	49
2.3.3 Anàlisi de l'efecte illa de calor a Barcelona a partir de les dades de les estacions meteorològiques del SMC	53
3. CONCLUSIONS	73
4. RECOMANACIONS	79
5. BIBLIOGRAFIA	89
6. ANNEXOS	95

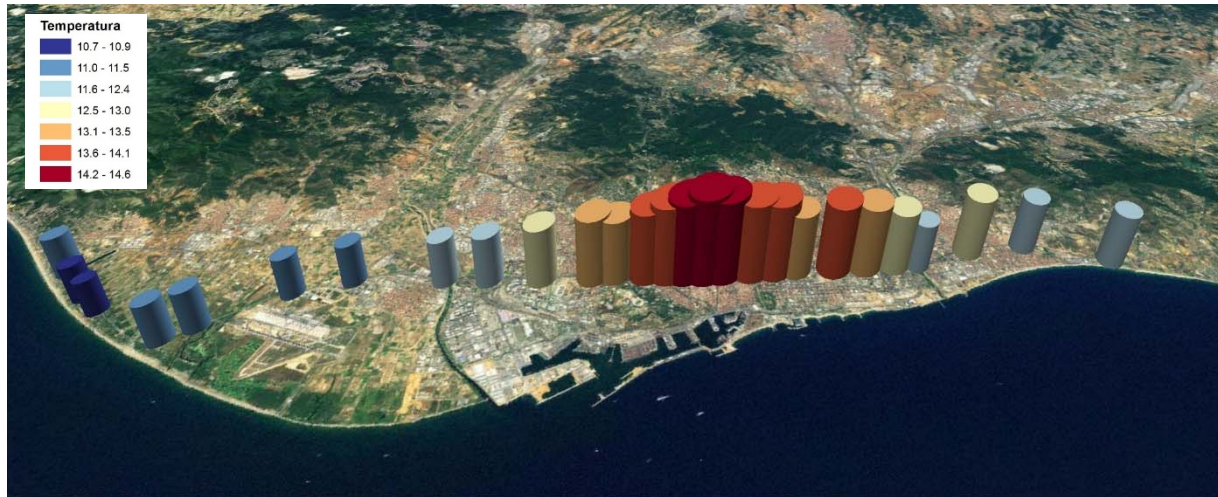
1. PRESENTACIÓ



1.1 QUÈ ÉS L'EFECTE ILLA DE CALOR?

Les ciutats tenen tendència a tenir unes temperatures més elevades que les zones del seu voltant menys urbanitzades, especialment durant la nit. Aquesta diferència de temperatura és el que s'anomena "efecte illa de calor" (o UHI, per les seves sigles en anglès *Urban Heat Island*).

Imatge 1. Perfil de temperatures de l'illa de calor de Barcelona



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de temperatura del transecte 1 (JM Vide, 2014-2015)

L'illa de calor és una modificació del clima produïda per les característiques del propi medi urbà. Quan els edificis i carrers reemplacen els espais més naturalitzats s'alteren les condicions de temperatura, radiació, humitat i propietats aerodinàmiques de la superfície. Això fa augmentar la temperatura de la superfície i la temperatura de l'aire de les ciutats.

Això es deu als materials de construcció de les zones urbanes que tenen propietats tèrmiques (calor específica i conductivitat tèrmica) i radiatives (reflectivitat i emissivitat) diferents de les zones circumdants menys urbanitzades. Els materials urbans absorbeixen i emmagatzemen més energia tèrmica que no pas els materials de les zones rurals, que posteriorment es va alliberant a l'atmosfera. A més, l'alçada dels edificis i la forma en què es disposen afecta a la velocitat de despreniment de l'energia tèrmica que els materials de construcció han anat absorbint per la radiació solar. El resultat és que les zones urbanes a la nit es refreden a un ritme molt més lent que les zones menys urbanes, mantenint així la temperatura de l'aire comparativament més alta.

Les illes de calor també estan influenciades per les condicions meteorològiques del moment, sent més propenses si el cel està poc ennuvolat i amb poc vent. Per contra, els cels ennuvolats redueixen l'escalfament dels materials urbans, i els forts vents barregen l'atmosfera, reduint així la diferència de temperatura entre les zones urbanes i el seu entorn.

Avui en dia, la majoria de ciutats estan sobre els 2°C més càlides que les zones rurals, i les zones comercials i d'alta densitat residencial poden arribar a estar uns 5-7°C més càlides¹.

¹ Shahmohamadi 2011

Malgrat que les illes de calor es poden formar en qualsevol zona urbana, i en qualsevol escala espacial, les grans ciutats o àrea metropolitanes són els entorns amb major probabilitat d'ocurrència d'aquest fenomen, afavorit per l'acumulació de materials propensos a captar i alliberar grans quantitats de calor.

Hi ha dos tipus diferents d'illes de calor: la superficial i l'atmosfèrica. Ambdues es diferencien per la manera com es formen, el seu punt àlgid d'intensitat, el seu mètode d'identificació principal i pel mètode de representació habitual.

L'illa de calor superficial influencia indirectament però de forma significativa l'illa de calor atmosfèrica. Els materials urbans que van agafant energia tèrmica durant el dia indirectament escalfen l'aire proper, especialment en el període nocturn. Aquest increment de temperatura de l'aire (UHI atmosfèrica) és el que els ciutadans percebem més, i és el tipus d'illa de calor més estudiada.

A continuació es resumeixen les principals característiques d'ambdós tipus d'UHI.

Taula 1: Característiques bàsiques de les illes de calor superficial i atmosfèrica

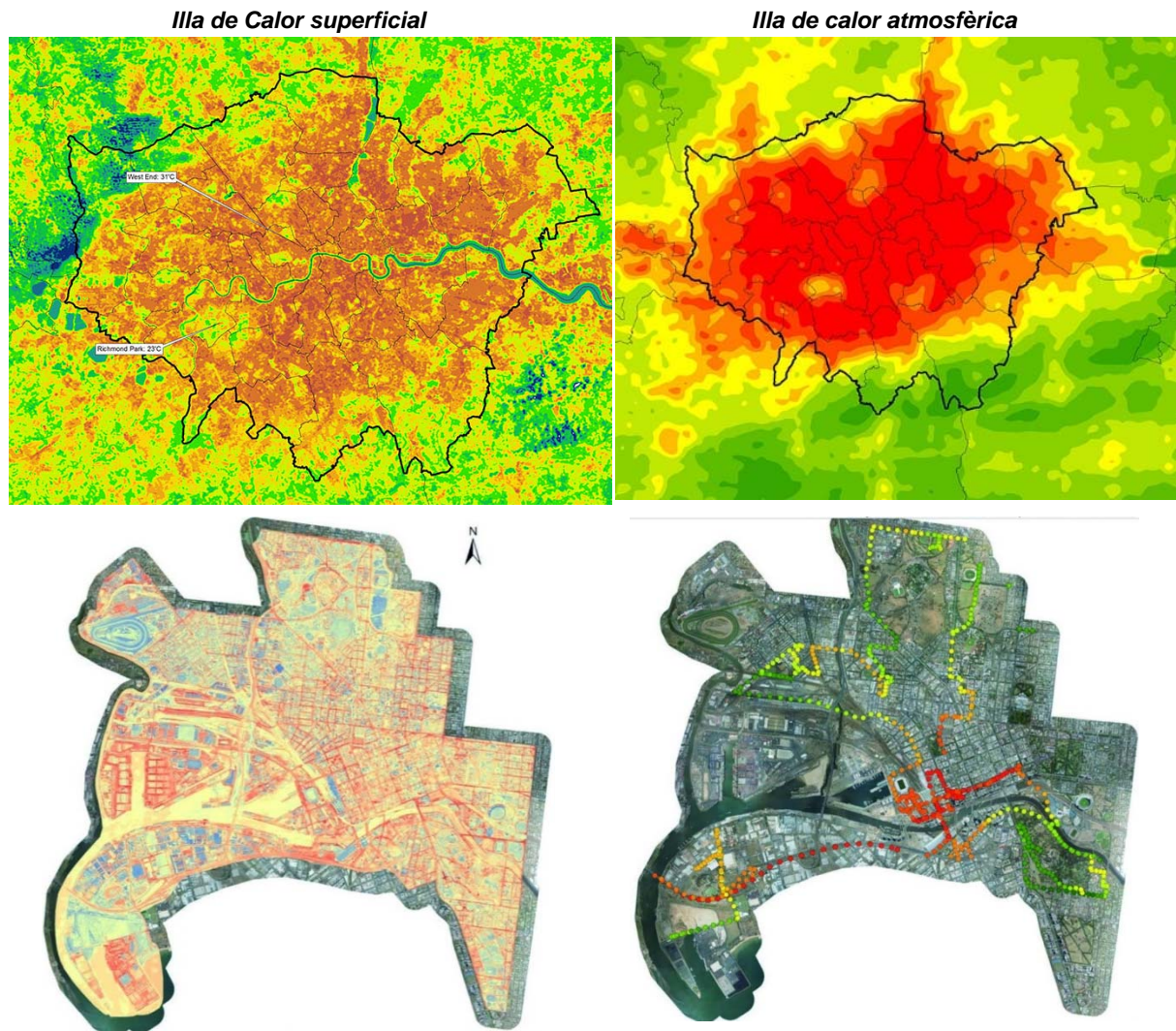
	Efecte Illa de Calor superficial	Efecte Illa de Calor atmosfèrica
Formació temporal	Present al llarg de tot el dia i la nit Més intensa durant el dia i a l'estiu	Petita o inexistent durant el dia Més intensa a la nit o abans de l'alba i a l'hivern
Intensitat màxima ^(a)	Més variació territorial i temporal ^(b) : <ul style="list-style-type: none"> • Dia: de 10 a 15°C • Nit: de 5 a 10°C 	Menys variació territorial i temporal ^(b) : <ul style="list-style-type: none"> • Dia: de 1 a 3°C • Nit: de 7 a 12°C
Mètode identificació principal	Mesurament indirecte: <ul style="list-style-type: none"> • Teledetecció 	Mesurament directe: <ul style="list-style-type: none"> • estacions meteorològiques fixes • transsectes mesures mòbils
Representació habitual	Imatge tèrmica	Mapa isotèrmic Gràfic de temperatura

Font: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics. EPA – USA

(a): tenint en compte les condicions més intenses de UHI

(b): dades representatives en el cas d'Estats Units.

Imatge 2: Exemples d'algunes representacions d'illa de calor de superfície (esquerra) i d'aire (dreta) de London (adalt) i Melbourne – Port Phillip (abaix)



Font Great London: © Arup/ UK Space Agency London i Arup / University College London

Font Melbourne: Coutts A, Harris R 2013. Urban Heat Island Report: A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation, Victorian Centre for Climate Change Adaptation Research

1.1.1 EFECTE ILLA DE CALOR DE SUPERFÍCIE

L'efecte illa de calor es refereix al calor captat i emès per les diferents superfícies urbanes. La seva intensitat està molt associada al grau d'urbanització del territori, al tipus d'urbanisme i a la predominança del tipus de material.

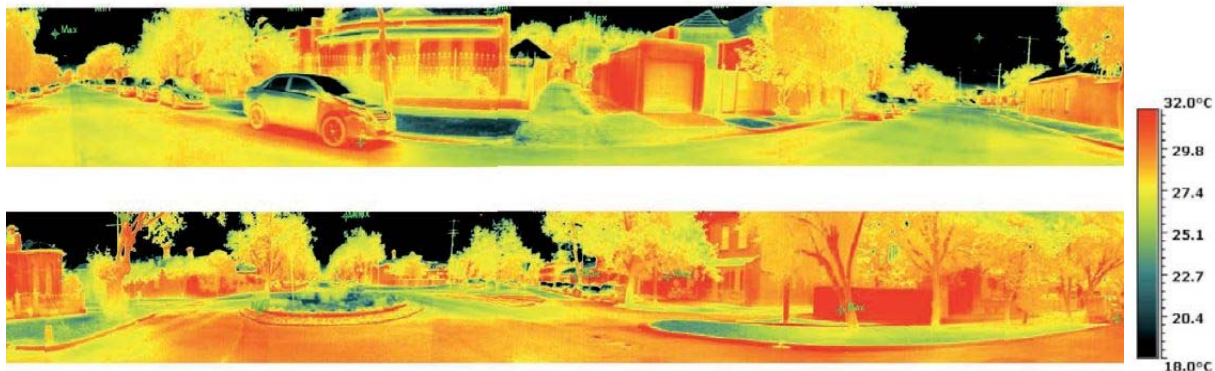
El sol escalfa les superfícies urbanes exposades, com teulades, terrats i paviments, podent arribar un dia solejat d'estiu a unes temperatures superiors a la temperatura de l'aire d'entre els 27 a 50 °C (Estats Units²) o arribant fins a 50-60°C (Londres³), mentre que a l'ombra o en superfícies humides sovint ubicades en entorns més rurals o oberts, la temperatura de superfície roman similar a la temperatura de l'aire.

² EPA

³ London's Urban Heat Island: A Summary for Decision Makers, 2006

Cada material té el seu grau de captació d'energia calorífica i d'emissió diferent, fent que l'UHI superficial pugui ser molt variable.

Imatge 3: Imatges tèrmiques del 25 de febrer de 2012 a Melbourne



Font: Coutts A, Harris R 2013. Urban Heat Island Report: A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation, Victorian Centre for Climate Change Adaptation Research

Les illes de calor de superfície són típicament presents en el dia i la nit, però tendeixen a ser més fortes durant el dia, quan les superfícies absorbeixen la llum del sol. Després de la posta del sol, les diferències són més petites, però tot i així poden ser substancials.

De mitjana, la diferència en les temperatures superficials durant el dia entre les zones urbanes i les rurals és 10 a 15 °C⁴; la diferència de temperatures de la superfície durant la nit acostuma a ser més petita, entre el 5 - 10 °C⁵.

La magnitud de l'efecte UHI varia amb les estacions de l'any, principalment pels canvis en la intensitat del Sol, així com la cobertura del sòl i el clima. L'efecte illa de calor de superfície acostuma a ser més gran a l'estiu.

Per identificar les illes de calor urbanes de superfície s'acostuma a utilitzar sensors remots, una tècnica de mesurament indirecta, amb la qual s'estimen les temperatures superficials i es poden produir imatges tèrmiques.

Cal destacar que les temperatures de les superfícies són més fàcils d'obtenir que no les de l'aire, ja que la seva obtenció és mitjançant imatges de satèl·lit que porten sensors de teledetecció tèrmics.

⁴ EPA
⁵ EPA

1.1.2 EFECTE ILLA DE CALOR ATMOSFÈRICA

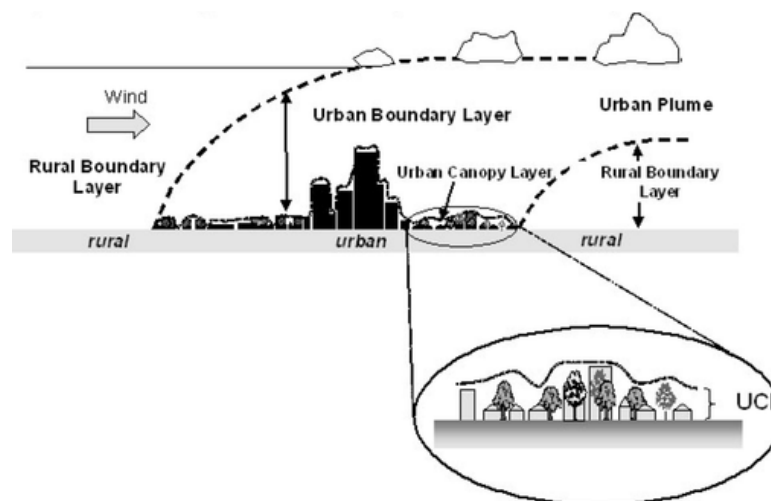
L'illa de calor atmosfèrica és la diferència de temperatura de l'aire entre la ciutat i els seus entorns immediats. Aquest tipus d'UHI està molt condicionada pel calor emès de les superfícies urbanes (UHI de superfície), i és per això que el seu efecte més pronunciat és a la nit, quan després de la posta del Sol s'allibera lentament la calor dels diferents materials urbans a l'atmosfera. Cada ciutat té el seu punt àlgid en funció de les propietats tèrmiques de les seves superfícies urbanes, l'època de l'any i les condicions climàtiques imperants.

Sovint es diferencien dos tipus diferents d'illes de calor atmosfèriques:

- Illa de calor en el pal·li urbà⁶ (*urban canopy layer*), és la capa d'aire més propera a la superfície on la gent viu, des del terra fins les copes dels arbres i teulats. La presència d'edificis, pavimentació del carrer, els arbres i l'aigua té un efecte directe i perceptible en el clima (microclima).
- Illa de calor en la capa límit urbana⁷ (*urban boundary layer*), és la capa superior de l'atmosfera urbana. La seva intensitat depèn de la situació geogràfica de la ciutat, la configuració general i la morfologia.

Les discussions sobre el clima urbà associat a l'efecte illa de calor en general es refereixen a la del pal·li urbà (*urban canopy layer*), ja que és el més comunament estudiat i el que és directament perceptible per als seus ciutadans.

Imatge 4: Pal·li urbà (*urban canopy layer*) i capa límit urbana (*urban boundary layer*)



Font: <http://thebritishgeographer.weebly.com/urban-climates.html>

Les illes de calor atmosfèriques varien molt menys en intensitat que no pas les illes de calor de superfície. Sobre una base mitjana anual, les temperatures de l'aire a les grans ciutats poden ser d'1 a 3 °C⁸ més calenta que les del seu voltant rural. La zona més calenta de l'UHI

⁶ Traducció pròpia al català de la terminologia "palio urbano" extreta de "Una propuesta de terminología castellana en climatología urbana" de M^a Carmen Moreno Garcia. Investigaciones geográficas 17 (1997): pàg. 89-98.

⁷ Traducció pròpia al català de la terminologia "capa límite urbana" extreta de "Una propuesta de terminología castellana en climatología urbana" de M^a Carmen Moreno Garcia. Investigaciones geográficas 17 (1997): pàg. 89-98.

⁸ EPA

atmosfèrica acostuma a situar-se en el centre del nucli urbà, però la meteorologia, l'orografia, o les característiques del teixit urbà poden desplaçar aquest centre.

Per identificar les illes de calor urbanes de la temperatura de l'aire s'acostuma a utilitzar mètodes de mesurament directes, a través d'una xarxa de punts de mostreig en estacions fixes, o bé transectes mòbils.

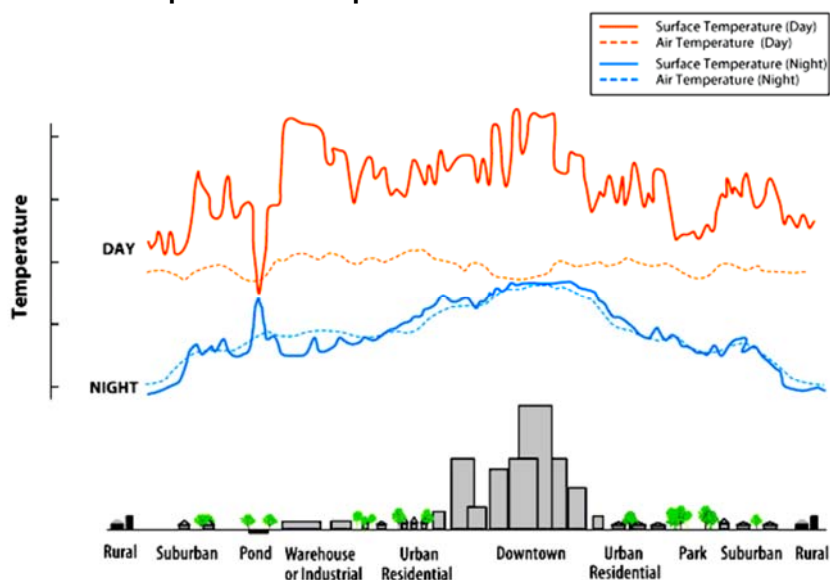
1.1.3 RELACIÓ ENTRE L'ILLA DE CALOR DE SUPERFÍCIE I L'ILLA DE CALOR ATMOSFÈRICA

Les temperatures de superfície dels diferents materials urbans influeixen de forma indirecta però significativa la temperatura de l'aire, especialment en el pal·li urbà ja que és la que està més propera a la superfície.

Així doncs, zones que normalment tenen unes temperatures superficials més fredes, com poden ser els parcs i les zones amb major presència de vegetació, tenen un efecte refredador de les temperatures de l'aire. Pel contrari, zones densament edificades generalment condueixen a escalfar la temperatura de l'aire.

Però la relació entre la temperatura de la superfície i la temperatura de l'aire no és constant, i entre diferents autors hi ha certa divergència dels valors de transmissió de la calor, ja que varia en funció del moment del dia, els usos del sòl, del tipus de teixit urbà i els materials urbans. A més, durant el dia les temperatures de superfície varien més que les temperatures de l'aire que són molt més constants, però totes dues són molt similars durant la nit.

Imatge 5: Variació de la temperatura de superfície i atmosfèrica



Font: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies (EPA, 2008)

Els patrons de temperatures de l'aire i superficial són similars⁹. Per tant, sovint s'utilitza la teledetecció tèrmica per conèixer les diferències espacials en la distribució de la calor i la identificació de *hot spots*. Tot i això no hi ha relació clara entre la temperatura absoluta de l'aire i l'obtinguda a través de teledetecció tèrmica, i per tant tampoc en la magnitud de les diferències de temperatura de l'aire entre diferents localitzacions.

També cal dir que, tot i que sigui important estudiar l'illa de calor atmosfèrica perquè és la que té afectació directa sobre les persones, és més fàcil actuar sobre l'illa de calor superficial, a través dels materials. El coneixement de les zones més crítiques en illa de calor atmosfèrica, i el coneixement també de la temperatura de superfície permet definir quines zones són més prioritàries per actuar a nivell de materials.

Els aspectes principals de vinculació entre els dos són¹⁰:

- La temperatura superficial pot comparar-se millor entre diferents àrees que la temperatura de l'aire, ja que no està tant influenciada per patrons i velocitat del vent.
- L'increment de temperatura superficial contribueix a l'increment de temperatura de l'aire.
- La calor emmagatzemada en les superfícies impermeables fosques amb alta capacitat de retenció de calor com l'asfalt i el formigó tenen una contribució important a l'UHI.
- Els canvis en la temperatura superficial generalment segueixen el mateix patró que els canvis en la temperatura de l'aire però el rang i la taxa de canvi en la temperatura superficial no és de tanta magnitud. A vegades la relació entre temperatura de l'aire i superficial es pot preveure, però no sempre, particularment en condicions de vent.
- És possible fer ús de teledetecció tèrmica aconseguint dades espacials d'alta resolució i un mapa continu de l'illa de calor superficial.
- La reducció de la temperatura superficial durant el dia redueix l'emmagatzematge de calor durant el dia i per tant és menys energia que s'allibera durant la nit, ajudant a mitigar l'increment de temperatura durant la nit.

⁹ A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation. Victorian Center for Climate Change Adaptation Research, 2012.

¹⁰ Decision principles for the selection and placement of Green Infrastructure. Technical report. VCCCAR, 2013

1.2 PER QUÈ ESTUDIAR L'ILLA DE CALOR

1.2.1 PRINCIPALS EFECTES ASSOCIATS A L'ILLA DE CALOR

La formació d'illes de calor urbanes té diferents efectes en la ciutat, en el consum de recursos, en la salut dels habitants i en el conjunt de l'ecosistema urbà.

CIUTAT	RECURSOS	PERSONES	ECOSISTEMA URBÀ
<ul style="list-style-type: none"> • Pèrdua de qualitat de l'espai públic • Debilitament de les estructures dels edificis més antics o amb deficiències 	<ul style="list-style-type: none"> • Increment de la demanda energètica per a climatització (aires condicionats) a l'estiu • Reducció de la demanda de climatització a l'hivern • Major demanda d'aigua (domèstic, vegetació, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducció del confort en l'espai públic • Afectació al descans nocturn en nits estivals • Afectació a la salut de la població sensible (gent gran, nadons) 	<ul style="list-style-type: none"> • Canvis en la convecció i la brisa urbana • Adaptació d'espècies exòtiques per modificació del calendari fenològic

Es tracta de diferents impactes associats als increments de temperatura en els centres urbans. En ser el fenomen de l'illa de calor un fenomen de distribució irregular i heterogènia tant en l'espai com en el temps és difícil definir la magnitud d'aquests impactes o fins i tot associar directament aquests impactes al fenomen. En alguns llocs, es poden percebre diferències poc significatives de temperatura i no mostrar-se aquests impactes, però en d'altres, si l'efecte illa de calor és més intens, aquests impactes poden ser significatius.

1.2.2 RELACIÓ ENTRE ILLA DE CALOR I CANVI CLIMÀTIC

Els impactes de les illes de calor urbanes i el canvi climàtic global pel ciutadà urbà són sovint similars, ja que incrementen les temperatures del seu entorn malgrat l'UHI actuï a escala local i el canvi climàtic a escala global.

Respecte al possible efecte del canvi climàtic a les illes de calor no hi ha un consens clar en els diferents autors, ja que alguns creuen que s'accentuarà l'efecte illa de calor, mentre que d'altres consideren que el canvi climàtic pot comportar una atenuació de l'UHI perquè augmentaran comparativament més les temperatures rurals que no pas les urbanes, per una limitació de captació tèrmica dels materials.

En el marc del Pla d'adaptació al canvi climàtic de l'AMB 2015-2020, es considera entre els prioritaris el risc d'efecte d'illa de calor, valorat com a risc mitjà.

L'increment de temperatura a causa del canvi climàtic afectarà tota l'àrea metropolitana, de manera que la l'efecte illa de calor, entès com la diferència de temperatura entre el centre i la

perifèria de la zona urbana es mantindrà invariable. Ara bé, aquesta diferència de temperatura partirà d'una temperatura d'origen més elevada i per tant totes les conseqüències avui en dia observades s'intensificaran.

El temps d'exposició s'incrementarà ja que els períodes amb temperatures i condicions favorables (especialment anticiclons) a aquest risc seran més llargues. Les zones urbanes que ja pateixen l'efecte illa de calor, amb el canvi climàtic encara notaran més els seus efectes, amb ambients urbans més càlids.

La sensibilitat inicial a l'efecte illa de calor a l'AMB es considera moderada i la capacitat d'adaptació a l'efecte UHI relativament elevada. Si bé la principal causa (urbanització) és difícilment reversible existeixen força possibilitats pel que fa a l'adaptació de les edificacions.

La incidència del canvi climàtic en l'efecte illa de calor és important en sí mateix però també en tant que és un agreujant en els episodis d'onades de calor, que també es veuran afectades pel canvi climàtic. Es preveu que a l'AMB les onades siguin més freqüents i persistents.

El canvi climàtic pot afectar tant la freqüència com a la intensitat d'esdeveniments d'illa de calor extremes. La seva predictibilitat és difícil ja que cal considerar no només les projeccions climàtiques de temperatures mitjanes sinó també estacionals i en rangs diaris, i cal a més tenir en compte la influència d'altres paràmetres com la radiació solar, la nuvolositat, la velocitat del vent i la seva incertesa.

A Londres s'han fet projeccions de canvi climàtic i per les condicions més habituals en episodis d'illa de calor sembla que en el futur hi haurà més dies amb illa de calor però no es preveuen canvis en la seva intensitat donat que no es preveuen grans canvis en les cobertes del sòl.

En el cas de Melbourne, s'espera que l'UHI s'estengui i intensifiqui degut a la tendència d'increment de densitat i urbanització de les zones verdes.

1.2.3 ELEMENTS QUE INFLUENCIEN L'EFECTE ILLA DE CALOR

Hi ha diversos elements que influeixen en la creació o atenuació de les illes de calor. En primer lloc cal tenir en compte totes les fonts de calor que arriben a nivell de superfície, considerant no només la radiació procedent del Sol sinó també el calor que és generat per l'activitat humana i el calor que és reemès cap a la superfície per l'atmosfera contaminada. En segon lloc, cal tenir en compte els materials de superfície de la ciutat, principalment artificials, i les seves propietats tèrmiques i radiatives. I finalment, cal tenir en compte la presència d'elements naturals a la superfície (vegetació i aigua) i les seves propietats.

Imatge 6. Elements que influencien l'efecte illa de calor

FONTS DE CALOR	MATERIALS DE SUPERFÍCIE	SUPERFÍCIES NATURALS
<ul style="list-style-type: none"> • Radiació solar • Calor antropogènica • Reemissió cap a la superfície de la radiació d'ona llarga per atmosfera contaminada 	<ul style="list-style-type: none"> • Propietats tèrmiques dels materials de superfície (capacitat d'absorció i de retenció de calor) • Propietats radiatives dels materials de superfície (pèrdua de calor sensible) 	<ul style="list-style-type: none"> • Presència de vegetació • Evaporació i eficàcia dels sistemes de drenatge

Font: Elaboració pròpia a partir de Dr. Javier Martin Vide

Alguns d'aquests elements es poden analitzar per mitjà de paràmetres quantificables com és el cas de la radiació solar o bé l'anàlisi de la presència de vegetació per mitjà de l'índex NDVI (que expressa la densitat i vigorositat de la vegetació).

Altres elements són molt més complexos de descriure, caracteritzar i quantificar, com poden ser el calor antropogènica o el reconeixement de totes les tipologies de materials urbans i la seves propietats tèrmiques i radiatives. I cal tenir en compte, també, que molts d'aquests elements estan interrelacionats entre ells. Tot i això sí que hi ha alguns paràmetres i variables que aporten informació relacionada amb aquests elements.

En el quadre següent es poden veure els paràmetres i variables principals que influencien en l'illa de calor.

Imatge 7. Variables i paràmetres que influencien l'illa de calor

FONTS DE CALOR	MATERIALS DE SUPERFÍCIE	SUPERFÍCIES NATURALS
<ul style="list-style-type: none"> • Radiació solar • Mobilitat 	<ul style="list-style-type: none"> • Albedo • Inèrcia tèrmica • Morfologia urbana: Sky View Factor, Urban street canyon 	<ul style="list-style-type: none"> • NDVI • Grau d'impermeabilització de la superfície

Font: Elaboració pròpia

Encara que es puguin identificar alguns paràmetres que influencien en l'illa de calor, el coneixement existent sobre el fenomen no és prou avançat com per assegurar que es recullen tots els paràmetres que hi tenen influència ni tampoc per poder quantificar fins a quin punt cadascun d'aquests paràmetres és determinant en la configuració o la intensitat del fenomen d'illa de calor a les ciutats.

Algunes ciutats que han estudiat l'illa de calor han correlacionat alguns d'aquests paràmetres amb la intensitat de l'illa de calor superficial, com és el cas d'Amsterdam. S'ha observat major correlació de la temperatura superficial amb els paràmetres obtinguts a través d'imatges de satèl·lit que amb variables que s'extreuen de la topografia i de bases de dades GIS¹¹.

¹¹ Urbna heat vulnerability mapping in Amsterdam (and Rotterdam). Alexander Wandl, TU Delft, Faculty of Architecture and the Built Environment, Department of Urbanism. Resilient Cities 2014 – 5 th Global Fòrum on Urban Resilience and Adaptation.

2. ANÀLISI I DIAGNOSI



2.1 AVALUACIÓ DELS PARÀMETRES QUE INFLUENCIEN EN L'ILLA DE CALOR DE BARCELONA

Com s'ha comentat en el punt anterior hi ha diversos elements que influencien l'illa de calor. Alguns d'aquests es poden estimar per mitjà de paràmetres quantificables, d'altres es reconeix la seva influència però són difícilment quantificables.

A continuació s'expliquen els principals elements i la informació de la que es disposa d'aquests a Barcelona, com a informació de base per a l'estudi de l'illa de calor. Com s'ha dit anteriorment, es desconeix en quina magnitud cadascuna d'aquestes variables és determinant en la configuració i intensitat de l'illa de calor.

Recordar que al llarg d'aquest capítol, i segons la nomenclatura definida al *Capítol introductori* per al conjunt de l'*Estudi dels Impactes del Canvi Climàtic a Barcelona*, l'anàlisi s'ha basat en el **perill** d'ocurrència associat als efectes de l'illa de calor a la ciutat de Barcelona.

A mode de recordatori, presentem la nomenclatura establerta al *Capítol – Introducció al canvi climàtic*:

- **Perill** es pot definir com la freqüència i intensitat (o magnitud) amb la que un determinat fenomen natural o antròpic impacta en un espai determinat.
- Per **vulnerabilitat**, s'entén la predisposició intrínseca d'un sistema (subjecte, grup, element físic, ecosistema, etc.) a ser afectat per un perill.
- **Risc** és la resultant de considerar el perill i la vulnerabilitat, valorant com cada sistema es veu afectat per un perill determinat.

2.1.1 FONTS DE CALOR

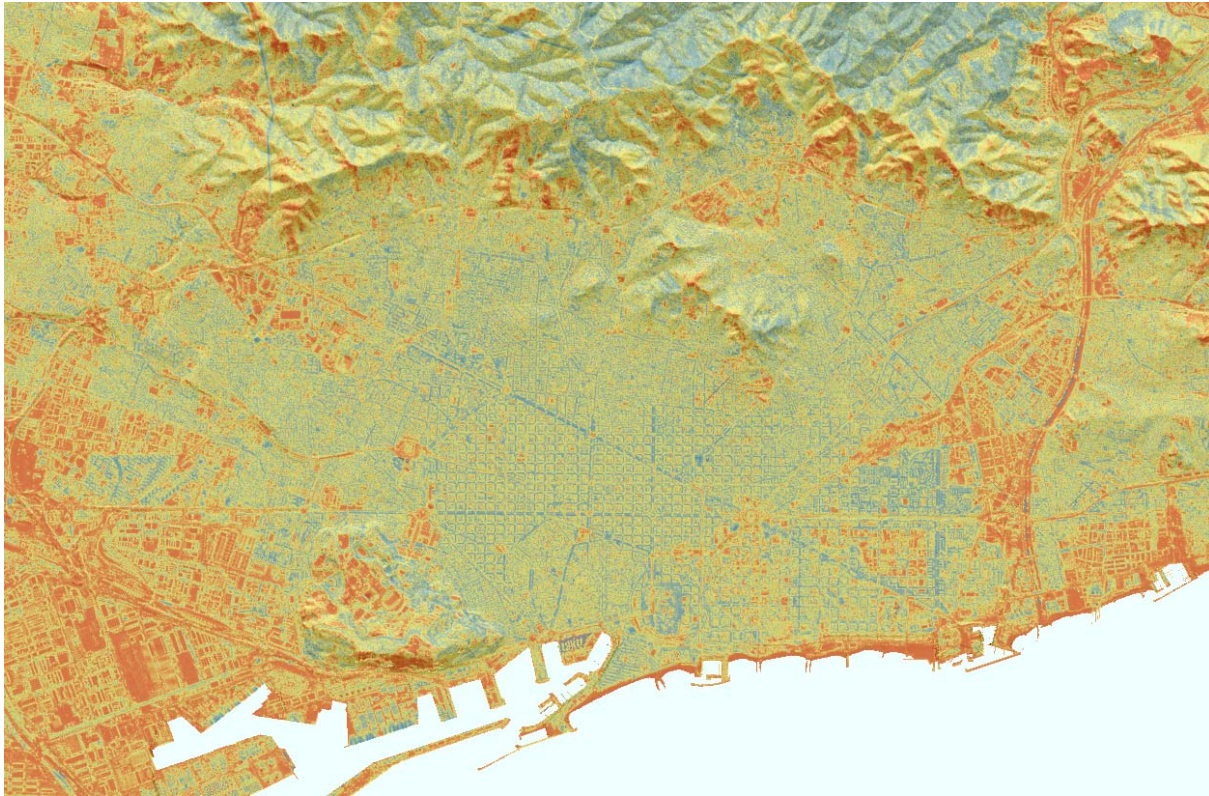
2.1.1.1 Radiació solar

La insolació és el paràmetre principal que determina el comportament tèrmic de les superfícies que configuren la volumetria urbana. Disposar de dades sobre la radiació solar és important en el context de l'illa de calor i també des del punt de vista de l'aprofitament d'energia solar, un dels principals recursos renovables del territori metropolità, viable per latitud i condicions climàtiques.

En funció de la radiació solar que reben terrats, façanes i sòls i de la tipologia de material les superfícies emetran més o menys quantitat de calor a posteriori.

En el marc del Pla de Sostenibilitat Ambiental de l'AMB s'ha calculat la radiació solar incident a l'AMB, a partir de la topografia LIDAR. Amb imatges aèries, informació cadastral i cartografia topogràfica s'ha desenvolupat un model tridimensional per avaluar la radiació incident amb una precisió de 0,5m. El model s'ha realitzat amb dades històriques de les estacions meteorològiques existent.

Imatge 8. Mapa de radiació solar de l'AMB



Font: Barcelona Regional per al Pla de Sostenibilitat de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (PSAMB 2014-2020)

2.1.1.2 Calor antropogènica

S'entén per calor antropogènica la descàrrega de calor generada a les ciutats per mecanismes de calefacció i refrigeració dels edificis, indústria, transport i il·luminació, i per les persones. Aquestes fonts escalfen l'atmosfera per conducció, convecció i radiació. En funció de la latitud i de l'estació de l'any la contribució d'aquestes fonts és major o menor. Alguns autors informen de que la calor antropogènica té un efecte menor que l'albedo o la cobertura de vegetació. D'altres diuen que és un input significatiu a l'hivern¹².

Una part d'aquesta calor antropogènica és el degut a la mobilitat. La mobilitat en vehicle privat té efecte doble en relació a la temperatura¹³. Per una banda, el funcionament del motor és una font de calor directa que contribueix a l'escalfament. Per altra banda, en el cas de vehicles propulsats per gasolina o dièsel, hi ha un escalfament indirecte derivat de l'emissió de contaminants com NOx, ozó, etc., que produeixen un efecte hivernacle local que evita el refredament de la ciutat a la nit.

La creació de calor antropogènica fa augmentar la temperatura i accentuar l'efecte UHI. I consegüentment causa un increment significatiu de consum d'energia per escalfar i refredar els edificis.

¹² The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524

¹³ Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Cahier#2: simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements. Apur, atelier parisien d'urbanisme, 2014.

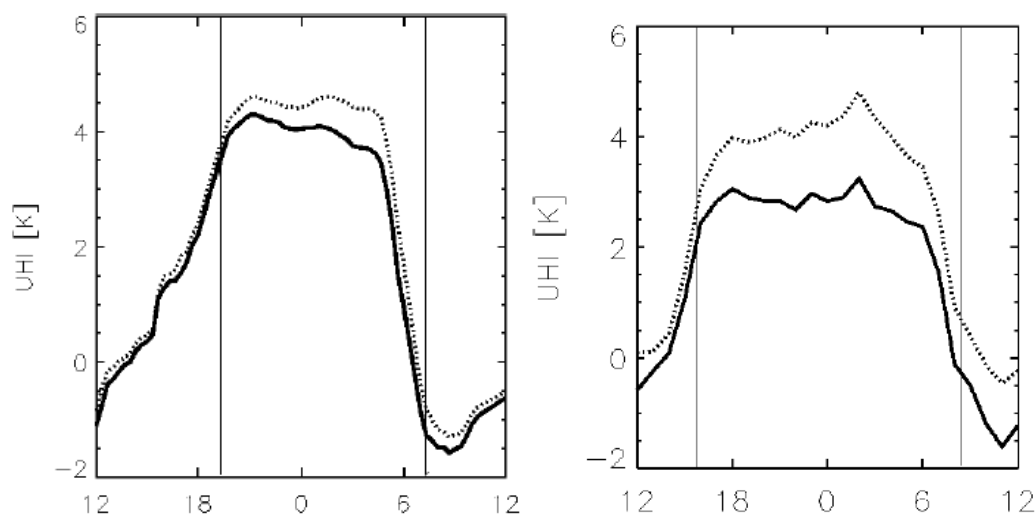
Hi ha diferents maneres d'estimar les emissions antropogèniques en àrees urbanes. En primer lloc es pot fer un inventari a través de les dades de consum d'energia, assumint que l'energia consumida és similar al calor sensible antropogènic alliberat. En segon lloc es pot fer una estimació basada en un balanç d'energia tancat fent ús de mesures directes. En tercer lloc, si es disposa de dades detallades en alta resolució, es poden utilitzar models energètics dels edificis (com en EnergyPlus), que calculen el consum d'energia que tenen els edificis i permeten fer una simulació dinàmica.

A Londres s'ha modelitzat el calor antropogènic de la ciutat amb el model MORUSES, que parametriza el balanç d'energia superficial urbana¹⁴. S'utilitzen com a dades d'entrada al model les dades energètiques domèstiques, no domèstiques i de transport a nivell de secció censal. Com a sortida del model, hi ha dades de calor antropogènic horàries per una malla de punts.

S'han analitzat dos casos d'estudi per comparar els impactes de les emissions antropogèniques en UHI a l'estiu i l'hivern. S'ha trobat un impacte més pronunciat al desembre que al maig, quan les emissions antropogèniques són més grans en comparació al flux de calor sensible causat per l'emmagatzematge de calor. Les emissions antropogèniques incrementen l'amplitud i el període de UHI al desembre.

Imatge 9. Cicle diürn d'illa de calor modelitzada a Londres

La línia contínua no inclou les emissions antropogèniques mentre que la línia discontinua sí. Les línies verticals inclouen sortida i posta del Sol. Esquerra 7/8 maig 2009 i dreta 10/11 desembre 2009.



Font: Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. Bohnenstengel et al, 2012. Quarterly journal of the Royal meteorological society

No es disposa de cap estimació de la calor antropogènica per a la ciutat de Barcelona.

¹⁴ Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. Bohnenstengel et al, 2012. Quarterly journal of the Royal meteorological society

2.1.2 MATERIALS DE SUPERFÍCIE

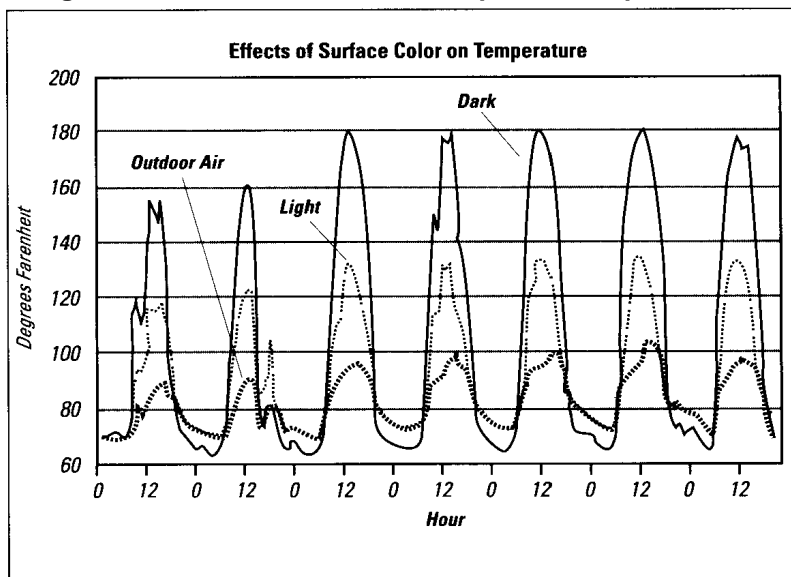
2.1.2.1 Albedo

La reflectància solar o albedo, és el percentatge d'energia solar reflectida per una superfície. Gran part de l'energia del Sol es troba en les longituds d'ona visibles, per tant, l'albedo es correlaciona amb el color d'un material. Així, les superfícies més fosques tendeixen a tenir valors d'albedo més baixos que les superfícies de colors més clars.

Valors alts d'albedo indiquen que la majoria de l'energia incident procedent del Sol es reflecteix de nou cap a l'atmosfera. Valors baixos d'albedo impliquen superfícies no reflexives, que absorbeixen gran quantitat d'energia del Sol. L'energia és emmagatzemada a la capa superficial dels materials o absorbida pels materials i alliberada després a l'aire quan la temperatura de l'aire és menor que la del material, generalment a la nit.

Els albedos urbans són de mitjana un 5-10% més baixos que els valors d'albedo rurals¹⁵. Això conjuntament amb el fet de que els materials urbans tenen més capacitat calorífica i inèrcia tèrmica fa que hi hagi més capacitat d'absorció diürna de radiació d'ona curta.

Imatge 10. Efectes del color en la temperatura superficial



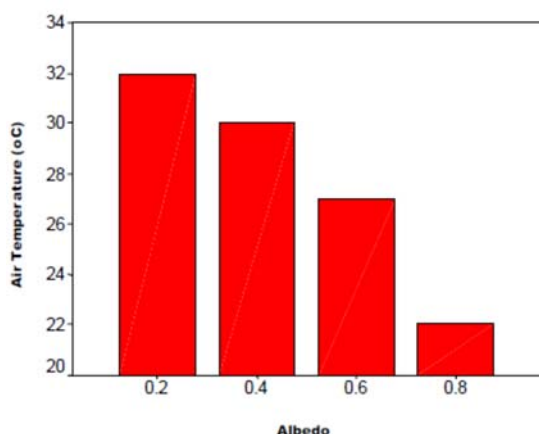
Source: Griggs et al., 1989

Font: Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. EPA, 1992

Generalment quan l'albedo és alt es tendeix a reduir la temperatura superficial, encara que la vegetació i les superfícies d'aigua tenen baixos valors d'albedo i temperatura superficial degut a altres característiques com l'emmagatzematge de calor o l'evaporació.

¹⁵ The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524

Imatge 11. Canvis teòrics de la temperatura de l'aire per diferents rangs d'albedo en condicions de bon temps al migdia 12.00h



Font: London's Urban Heat Island: A summary for decision makers. Mayor of London, 2006

Les ciutats implementen estratègies de *cool roofs* i *green roofs* precisament per intentar modificar l'albedo i reduir l'energia que es reflecteix a l'atmosfera. S'estan estudiant i desenvolupant materials de colors freds, però, que utilitzin pigments especialment dissenyats que reflecteixen bé en les longituds d'ona infraroges. Aquests productes poden ser de color fosc, però tenen una reflectància solar propera la d'un material de color blanc o de color clar¹⁶.

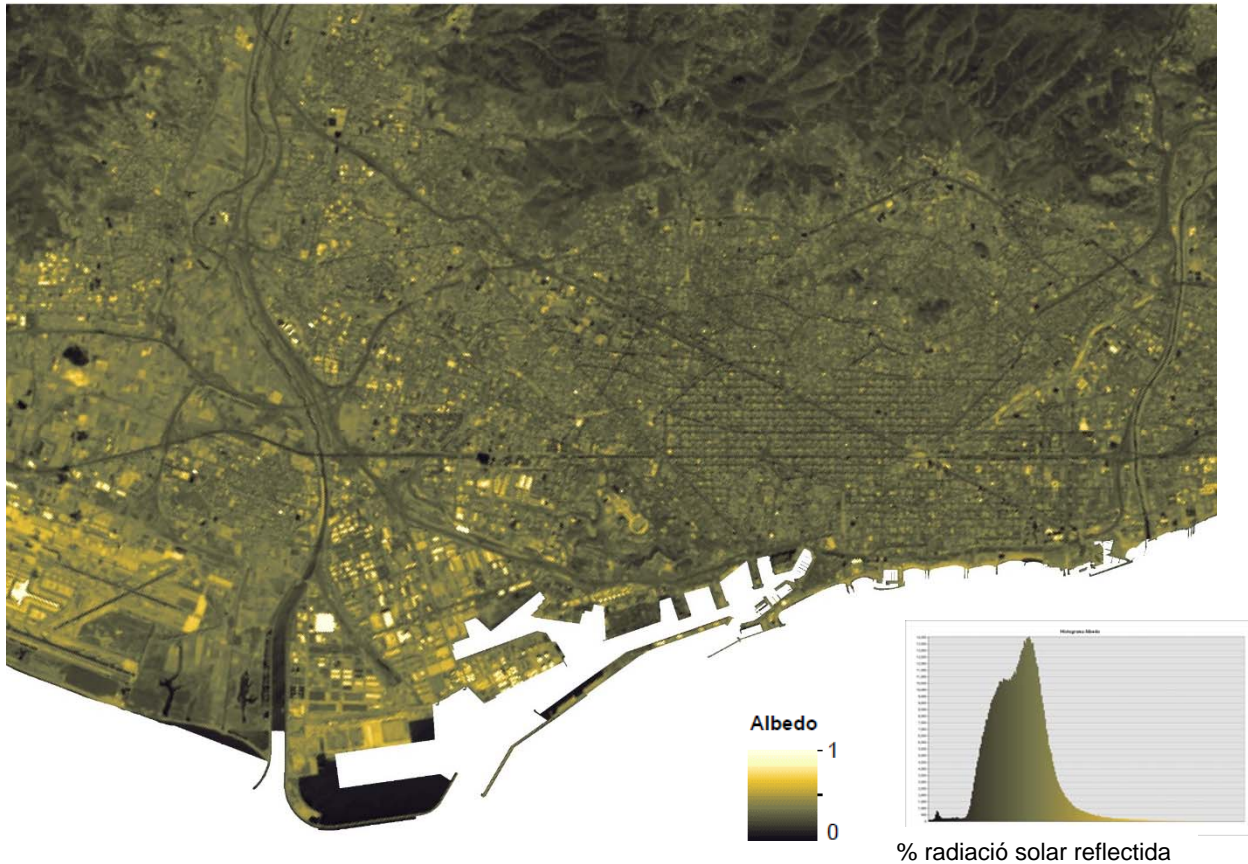
S'ha calculat l'albedo de Barcelona utilitzant la metodologia realitzada per la universitat de Yale per al càlcul a partir del Landsat 7. Donat que les imatges d'aquest satèl·lit presenten bandes sense dades, s'ha fet una aproximació als valors d'albedo en aquestes bandes correlacionant els valors de Landsat 7 i utilitzant les imatges disponibles de Landsat 8 de dies propers i les dades del US Geological Survey, fent els càlculs previs necessaris per utilitzar aquestes imatges¹⁷ i seguint la mateixa metodologia de Yale.

El mapa resultant es pot veure a continuació.

¹⁶ EPA

¹⁷ http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

Imatge 12. Aproximació a l'albedo de Barcelona



Font: Barcelona Regional

Analitzant el mapa resultant d'albedo de Barcelona es pot veure com la part més central de la ciutat té un albedo baix, de manera que reflecteix poca radiació solar, i per tant els materials emmagatzemen el calor en la superfície. Destaquen pel seu elevat albedo les superfícies de cobertes industrials i l'aeroport.

2.1.2.2 Inèrcia tèrmica

Es parla d'inèrcia tèrmica per referir-se a la propietat d'emmagatzematge de calor dels materials. És un concepte important en illa de calor perquè determina la temperatura superficial i la potencial alliberació de calor a l'atmosfera, per tant, també la temperatura de la capa més propera d'aire.

Es diferencia de l'albedo per ser la part d'energia solar que és absorbida en forma de calor pels materials (encara que després pugui ser de nou alliberada a l'atmosfera), mentre que l'albedo és el % de radiació solar reflectida directament, que els materials no absorbeixen.

Imatge 13. Increment de temperatura superficial per sobre de la temperatura de l'aire (en condicions de sol i sense vent)

Increment de temperatura del material	°F	°C
Llis i blanc brillant	+ 15 °F	- 9,4 °C
Superfície blanca aspra	+ 35 °F	+ 1,6 °C
Gris	+ 52 °F	+ 11,1 °C
Teulada plana i amb grava	+ 61-82 °F	+ 16,1-27,7 °C
Material Negre	+ 90 °F	+ 32 °C

Font: Adaptat de Cool and Green roofing manual. NYC Department of Design & Construction Office of Sustainable Design, 2007

No es disposa de cap estimació de la inèrcia tèrmica dels materials de superfície per Barcelona.

2.1.2.3 Morfologia urbana

Com s'ha vist fins ara, l'ús de materials artificials en les ciutats té implicacions en el clima urbà. Però no és només la tipologia de materials que s'utilitzen el que determina que es generi un microclima urbà a les ciutats, i fa que es configurin illes de calor amb diferències de temperatura significatives entre el centre de la ciutat i l'entorn rural.

La morfologia urbana és un factor molt rellevant: la densitat urbana, la configuració, orientacions, o relacions alçada-amplada o entre façana i profunditat dels edificis, la presència i disposició de l'espai lliure d'edificacions, etc. determinen entre d'altres els patrons de vent o d'ombreig a la ciutat, factors determinants en el clima urbà i en la configuració de les illes de calor.

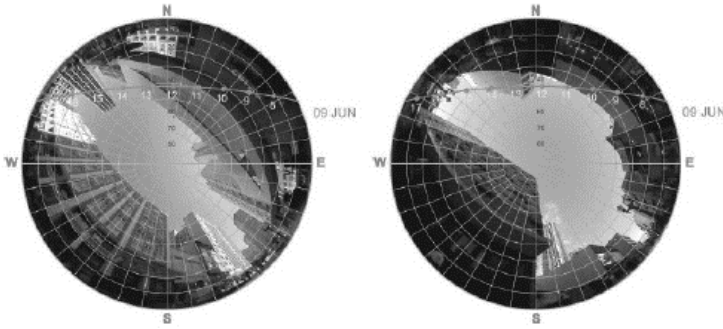
A continuació s'expliquen dos dels paràmetres de morfologia urbana més rellevants en relació a les illes de calor urbanes, que són el *Sky View Factor* i el *Urban Street Canyon*.

Sky view factor

L'*sky view factor* (SVF) es defineix com la proporció de cel que és visible per sobre un determinat punt d'observació, considerant tots els obstacles naturals i construïts que hi ha al voltant del punt d'observació.

L'SVF és un indicador que té un rang de mesura de 0 a 1. Quan és 1 indica que l'observador veu el cel sense obstacles (és el cas ideal d'estar en mig de l'oceà visionant als 365° només l'horitzó). Quan l'SVF és 0 vol dir que no es pot visualitzar el cel. Així en les imatges següents l'SVF seria l'àrea que ocupa el cel visible considerant que l'àrea del cercol sencer és 1.

Imatge 14. Exemple de SVF utilitzant objectius gran angulars



Font: Minella (2009), extret de l'estudi de teixits urbans del PSAMB

Aquest factor de visió del cel és un determinant important de la taxa d'alliberament de la calor durant la nit, que descriu l'obertura relativa entre els edificis. Un factor de visió restringit com es troba en carrers estrets i edificis alts dificultarà la lliure alliberació de calor emès des de les superfícies dels carrers i els edificis. Això contribueix a acumular calor en "street canyons" i a l'increment de la temperatura de l'aire. Si a més, els carrers estan orientats en un angle que és perpendicular a la direcció predominant del vent, durant situacions d'illa de calor intensa això reduirà els canvis en la ventilació de "street canyon" i dispersió de calor i contaminants que s'acumulen entre els edificis.

El càlcul del *Sky View Factor (SVF)* o factor de visió del cel es va realitzar per Barcelona en el marc del Pla de Sostenibilitat Ambiental de l'AMB (PSAMB 2014-2020), en un estudi d'anàlisi dels teixits urbans metropolitans¹⁸ (Barcelona Regional, 2014).

Per calcular l'SVF es van utilitzar algorismes d'eines SIG (SAGA GIS) amb processos iteratius en base a una malla de punts d'observació de 0,5 metres i així obtenir la màxima definició possible. A més es va utilitzar el model 3D de tota l'AMB (edificis inclosos) en base a la informació aportada per un vol efectuat al 2013 per l'ICGC amb tecnologia LiDAR5 amb una resolució de punts de 0,5 m.

¹⁸ <http://www.amb.cat/web/medi-ambient/sostenibilitat/pla-de-sostenibilitat/estudis-sostenibilitat>

Imatge 15. Sky View Factor de Barcelona

Font: Barcelona Regional

Per a l'estudi de illa de calor realitzat per J. M. Vide al 2015¹⁹ es van fer mesures de SVF amb ull de peix, fent una classificació no supervisada de la imatge seguint el procés que s'utilitza en teledetecció. Es van comparar les mesures amb els resultats que s'obtenen calculant-lo a partir de SAGA GIS i ArcGis.

Els resultats de tractament de les imatges d'ull de peix mostraven una bona correlació amb els obtinguts mitjançant ArcGis, però donat que el llarg temps de processat de ArcGis feia inviable el càlcul per tota Barcelona, es van utilitzar els càlculs fets en ArcGis per calibrar els resultats que ja s'havien obtingut amb SAGA GIS correlacionant els valors d'ambdós.

Urban Street Canyon

L'*urban street canyon* és una mesura estàndard de la secció del carrer utilitzada per climatòlegs. És la zona del carrer (considerant també voreres i jardins davant de façana, etc.) que hi ha entre dos edificis. És un aspecte àmpliament descrit en climatologia urbana perquè la geometria i orientació dels congostos urbans determina l'exposició solar i la temperatura superficial en àrees

¹⁹ J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

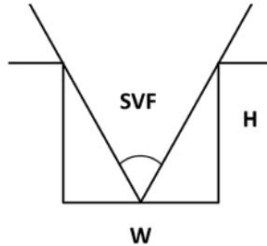
urbanes. La geometria del congost també afecta a la dispersió del vent en les zones urbanes, que és un dels factors que determina la temperatura de l'aire.

Les principals propietats dels congostos urbans són:

- Alçada dels edificis
- Amplada del carrer
- Ratio alçada i amplada
- Sky view factor
- Longitud del congost

La geometria del congost influeix el clima de manera previsible, especialment per temperatura superficial. Un congost més estret implicarà una menor circulació del vent ja que hi ha menor permeabilitat del teixit urbà i això també dificulta la dispersió de contaminants.

Imatge 16. Diagrama de street canyon, mostrant l'alçada de l'edifici (H), l'amplada del carrer (W) i el sky view factor (SVF)



Font: Decision principles for the selection and placement of Green Infrastructure. Technical report. VCCCAR, 2013

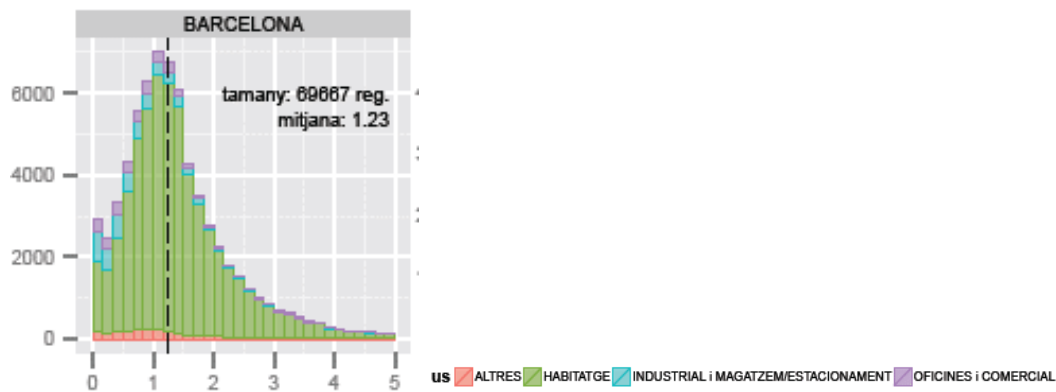
El ràtio es calcula dividint l'alçada dels edificis per la distància entre façanes. Si la relació és igual a 1, aleshores es parla d'un *regular canyon* (alçada igual a amplada). Si és menor o igual que 0,5 parlariem d'avingudes, mentre que si és major o igual a 2 tindriem un teixit urbà amb carrers estrets.

Algunes ciutats, com és el cas de Melbourne²⁰, han estudiat el fenomen de l'illa de calor considerant els *urban street canyon*.

En el cas de Barcelona, el *Urban Street Canyon* es va calcular en el marc de l'estudi d'anàlisi dels teixits urbans de l'AMB ja mencionat abans²¹ (treball realitzat per Barcelona Regional al 2014 inclòs en el PSAMB 2014-2020).

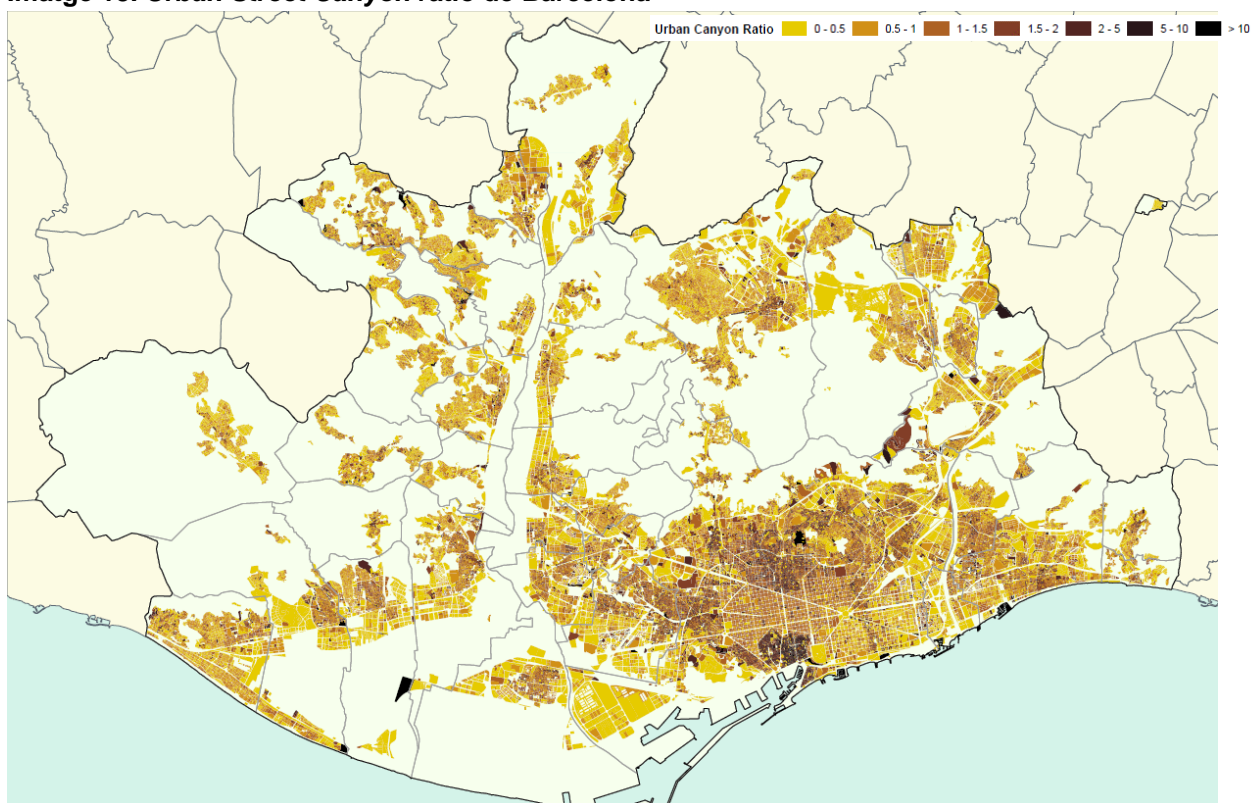
²⁰ Planning for a cooler future: green infrastructure to reduce urban heat (VCCCAR, 2013)

²¹ <http://www.amb.cat/web/medi-ambient/sostenibilitat/pla-de-sostenibilitat/estudis-sostenibilitat>

Imatge 17. Gràfic de *urban street canyon* de Barcelona

Font: Barcelona Regional per treball teixits urbans PSAMB

Analitzant el ràtio de *urban street canyon* a l'AMB s'obté una mitjana de 0,92. Barcelona té un valor de mitjana de 1,23. És el municipi metropolità que té valors més elevats del ràtio *urban street canyon*, superant valors de 5 a zones com Ciutat Vella o Gràcia.

Imatge 18. *Urban Street Canyon* ràtio de Barcelona

Font: Barcelona Regional

2.1.3 SUPERFÍCIES VERDES I NATURALS

2.1.3.1 Vegetació – NDVI

La presència d'arbres i vegetació en zones urbanes redueix la temperatura de les superfícies i de retruc la temperatura de l'aire per un doble efecte.

Per una banda, amb l'ombra es redueix la quantitat de radiació solar que arriba a la superfície urbana situada directament sota les copes dels arbres. Aquesta reducció varia molt en funció del tipus d'espècie i de l'època de l'any.

Per altra banda, la vegetació absorbeix aigua líquida a través de les seves arrels i emet vapor d'aigua a través de les seves fulles. Aquest procés d'evapotranspiració refreda l'aire del seu voltant ja que s'ajuda de la calor de l'aire per evaporar aigua i emetre-la cap a l'atmosfera. Igual com en l'ombreig, el refredament causat per l'evapotranspiració varia significativament entre espècies i època de l'any, però també en aquest cas segons els nivells d'irrigació.

Per efecte de l'ombreig, a l'estiu s'estima que entre el 10-30% de l'energia solar arriba a la superfície on es projecta l'ombra, mentre que a l'hivern l'interval va del 10-80% ja que els arbres de fulla caduca perden les fulles i permeten un major pas de llum solar (EPA²²). Altres estudis mostren com es pot aconseguir una reducció en el pic de temperatura de de 5 a 20°C²³ per l'ombreig.

Per efecte de l'evapotranspiració s'ha estimat que l'evapotranspiració pot reduir els pics de temperatura 1-5°C.

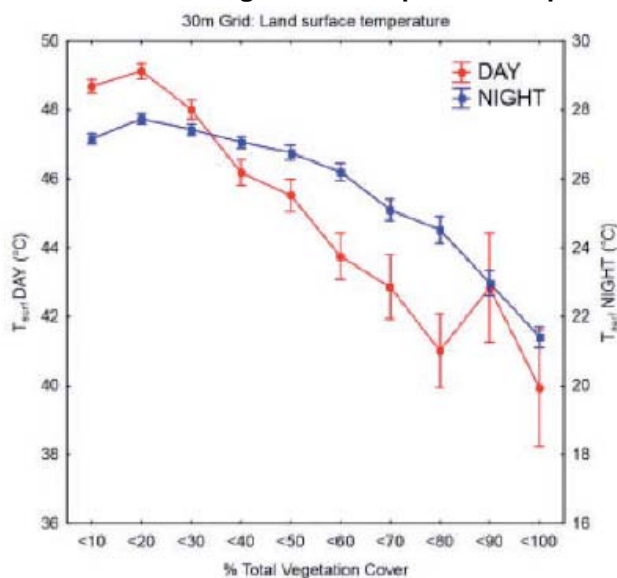
Estudis internacionals suggereixen que incrementar en un 10% la cobertura de la infraestructura verda a la ciutat resultaria en una reducció de fins a 2,5 °C²⁴. En el cas d'estudi realitzat a Port Phillip²⁵, un 10% d'increment de la cobertura de vegetació ha resultat en una reducció de 1°C en la temperatura superficial durant el dia.

²² Fonts més antigues de la mateixa EPA indiquen com la radiació solar que arriba al terra a través d'un arbre de fulla caduca és de 15-30% a l'estiu i 55-65% a l'hivern. (Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. EPA, 1992)

²³ London's Urban Heat Island: A summary for decision makers. Mayor of London, 2006

²⁴ Urban Heat Reduction through Green Infrastructure (GI): Policy Guidance State Government (VCCCAR, 2012)

²⁵ A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation. Victorian Center for Climate Change Adaptation Research, 2012

Imatge 19. Relació entre % cobertura de vegetació i temperatura superficial de dia i de nit

Font: De Coutts & Harris, 2012. Extret de Decision principles for the selection and placement of Green Infrastructure. Technical report. VCCCAR, 2013

Aquest efecte sobre la temperatura és doncs un dels serveis ambientals que proporciona la vegetació a la ciutat, així com també ho són el seu paper en la biodiversitat, en l'emmagatzematge de carboni, la capacitat de retenció de l'escorrentia superficial, la filtració de contaminants de l'aire o la contribució a la qualitat de vida, entre d'altres.

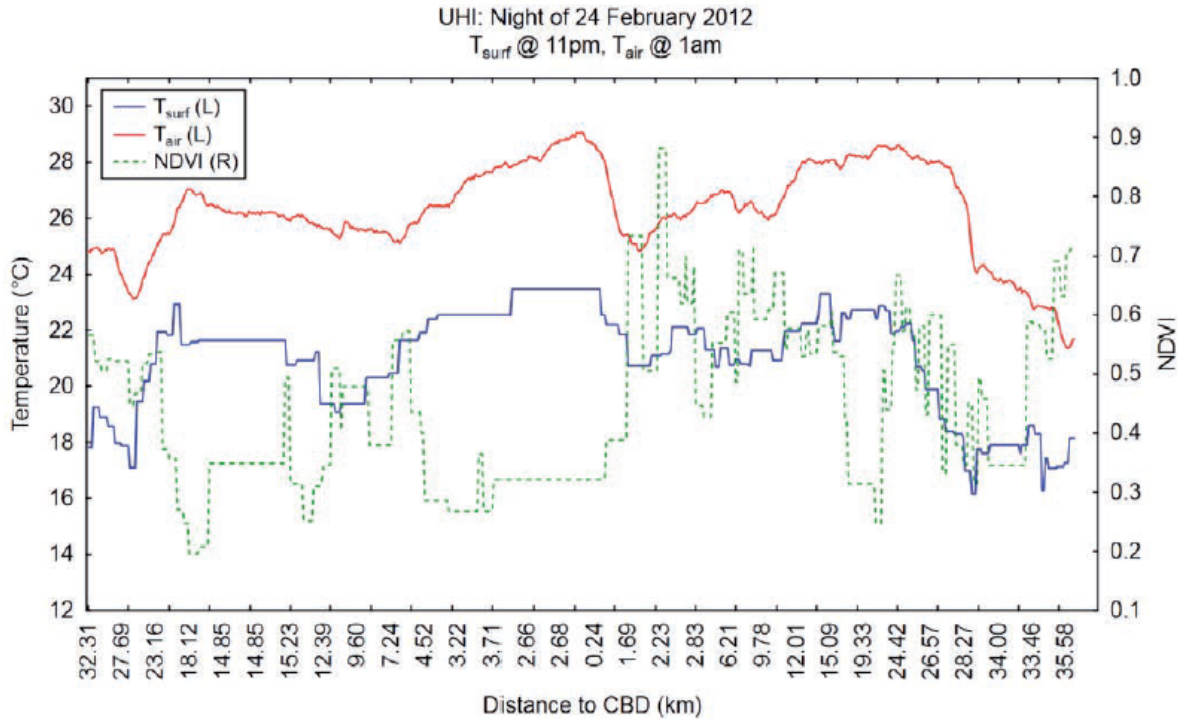
L'efecte de la vegetació en el confort climàtic es pot potenciar entre d'altres a través de paviments (utilitzant gespa), espais amb estructures més complexes de la vegetació, és a dir generant estrats, cobertes verdes, murs verds, o a través de plantació d'arbrat. Un estudi realitzat sobre l'efecte de diferents espècies d'arbrat de clima mediterrani a Barcelona²⁶ recomana per l'ús urbà espècies com el Lledoner (*Celtis australis*) per la densitat de la seva ombra, Saboner de la Xina (*Koelreuteria paniculata*) pel seu diàmetre de protecció i tipus de fulla, el plataner (*Platanus x hispanica*) per la seva alçada, ombra i versatilitat davant les estacions climàtiques, la Tipuana (*Tipuana tipu*) per les zones de trànsit i la implementació d'arbusts amb arbres per les zones de lleure i llarga estada.

Per a l'estudi de l'illa de calor de les ciutats, la vegetació que hi ha és, doncs, un dels paràmetres importants a tenir en compte. Aquesta es pot obtenir a partir de l'índex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que expressa la densitat i vigorositat de la vegetació, i es realitza a partir d'imatges de satèl·lit.

²⁶ La vegetació en el confort microclimàtic. Comparació d'espècies del clima mediterrani de Barcelona. Rojas Cortorreal, Roset i Navés. ACE (Architecture, City and Environment) any 10, num. 29. Octubre 2015

Imatge 20. Temperatura superficial, temperatura de l'aire i NDVI

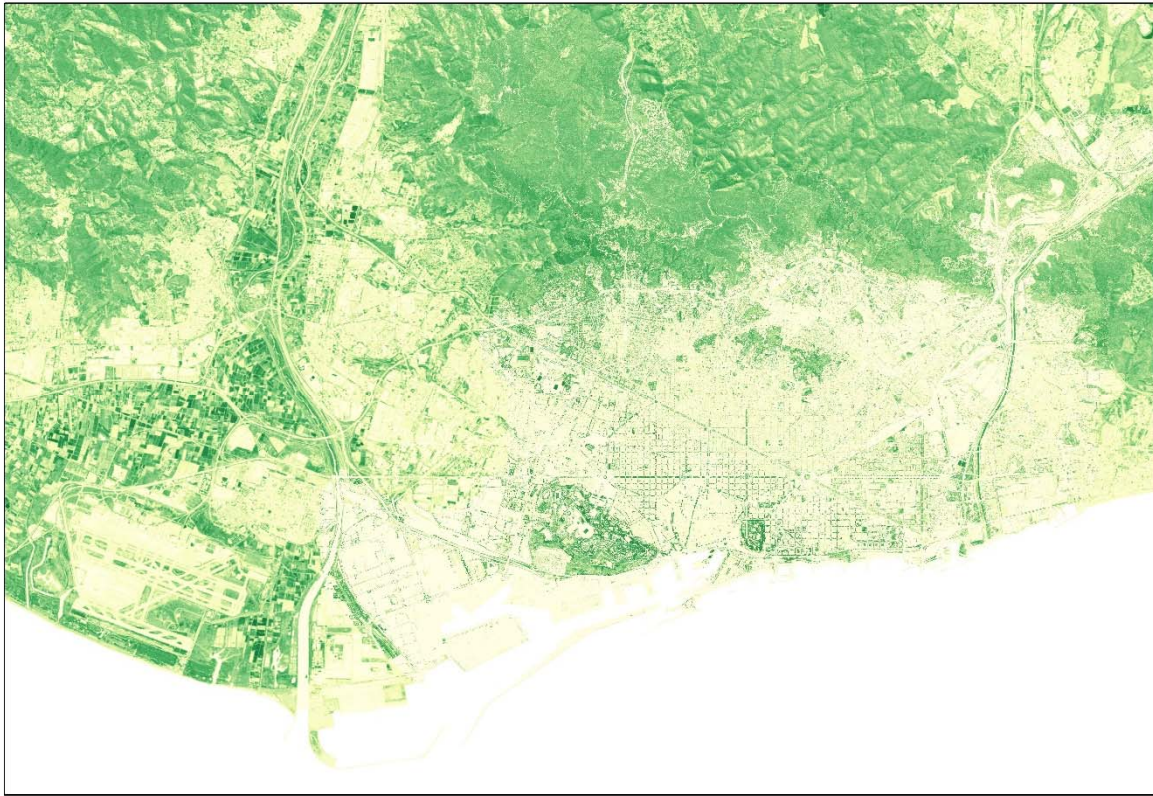
West-east UHI transect 24 February 2012. The air temperature transect is corrected to 1am. The MODIS surface temperature data corresponds to 2.55 am. NDVI values indicate fraction of vegetation cover. CBD was taken as 37° 48' 51.0906", 144° 57' 47.2782" (intersection of Swanson St and Bourke St, Melbourne).



Font: A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation. Victorian Center for Climate Change Adaptation Research, 2012.

L'índex NDVI de Barcelona s'ha calculat utilitzant imatges de satèl·lit d'infrarroig i infraroig proper de dues maneres. Per una banda, l'ICC ha realitzat un càlcul de NDVI a una resolució de 40 cm. Per altra banda, a través de les imatges de Landsat 8 s'han fet altres càlculs de NDVI a BR.

Imatge 21. Mapa de NDVI de Barcelona



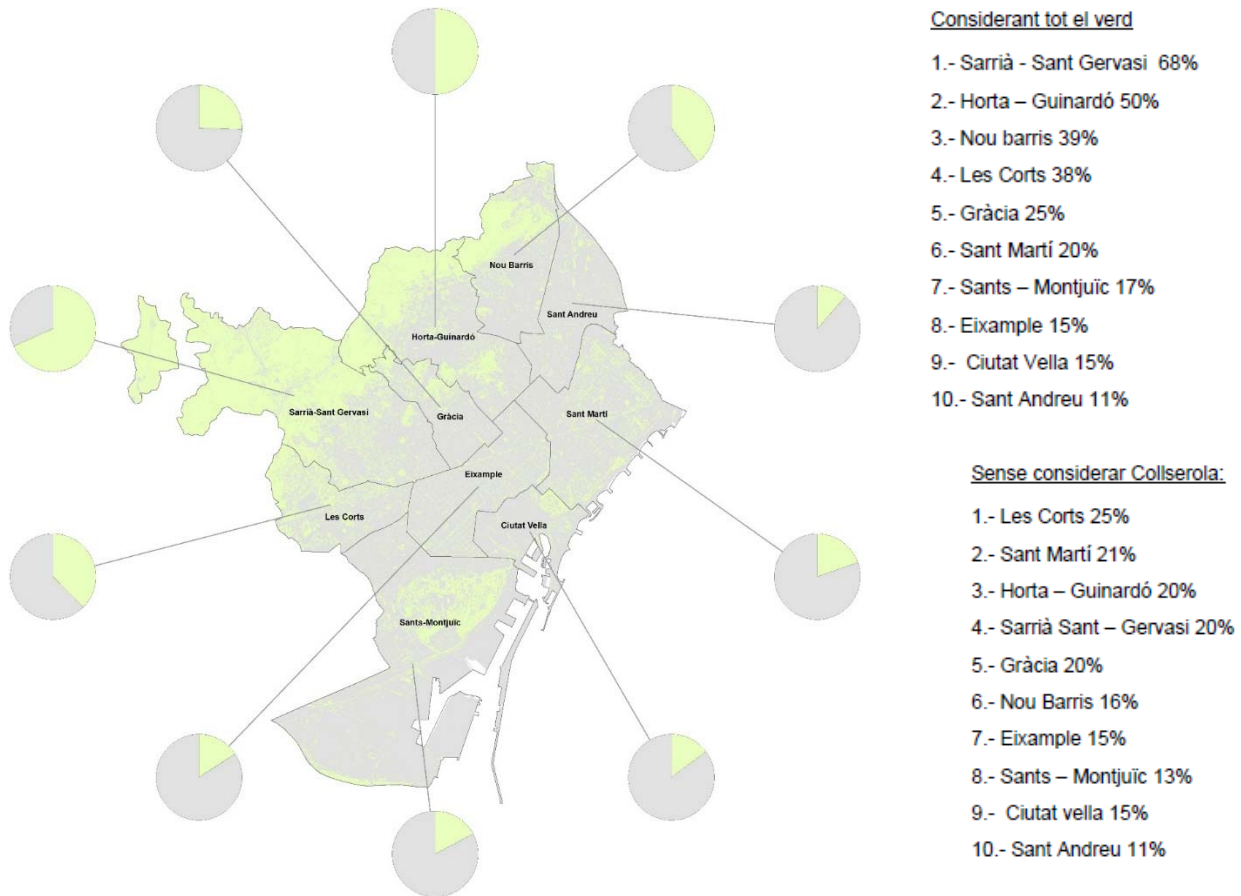
Font: Barcelona Regional

D'acord amb els resultats d'aquest índex, el municipi de Barcelona disposa de 3.463 ha de cobertura de verd, de les que 46% estan dins de Collserola. La seva distribució es pot veure en la imatge anterior. Destaca la manca de cobertura de verd al centre de la ciutat, que és on es mostra més intensament l'illa de calor de Barcelona. El districte de l'Eixample, amb un 15% de superfície vegetada, és el tercer districte amb menys percentatge de verd de la ciutat, i és el que té un menor ràtio de cobertura de verd per habitant ($4 \text{ m}^2/\text{hab.}$, respecte el $21,44 \text{ m}^2/\text{hab.}$ de mitjana de la ciutat)²⁷.

Es tracta d'una ciutat densa on un 67% de l'arbrat es situa alienat als carrers, i no hi ha grans parcs al centre de la ciutat que contribueixin a refrescar les temperatures. El parc més gran és el de la Ciutadella, amb 31 ha.

²⁷ Primera identificació de la infraestructura verda de Barcelona a partir de l'índex NDVI (Barcelona Regional, 2014)

Imatge 22. Percentatge de verd per districte a Barcelona



Font: Primera identificació de la infraestructura verda de Barcelona a partir de l'NDVI (Barcelona Regional per a l'Ajuntament de Barcelona, 2016)

S'han analitzat les dades de temperatures de les estacions meteorològiques fixes a Barcelona per veure si l'efecte refrigerant dels parcs es mostra en continu, més enllà de l'efecte refrigerant observat amb mesures preses en transectes puntuals en els parcs de la Ciutadella i Turó Parc en l'estudi realitzat per JM Vide al 2015²⁸ (estudi explicat en l'apartat 2.3.2 La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático).

Aquest efecte refrigerant dels parcs s'ha estudiat a Londres en el marc del projecte LUCID amb una prova pilot i sembla que perquè les zones verdes puguin tenir un efecte refrescant han de tenir una superfície significativa (espais grans i interconnectats tenen un efecte de reducció de la temperatura superficial més significativa en comparació amb el seu entorn)²⁹.

En l'anàlisi de les temperatures d'estacions meteorològiques fixes a Barcelona s'ha vist que no es disposa de dades horàries d'estacions meteorològiques que permetin comprovar clarament l'efecte refrigerant dels parcs. Es disposa de dues estacions que permetrien mostrar aquest efecte: l'estació zoo, situada al parc de la Ciutadella i de l'estació del Raval, situada en trama

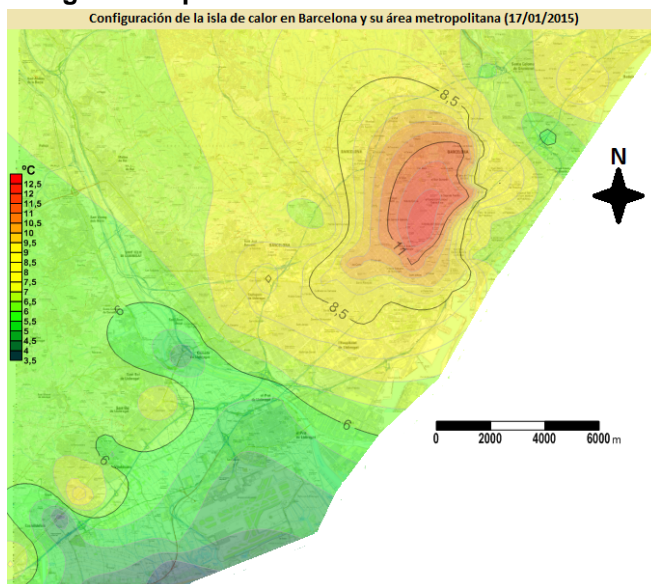
²⁸ J Martín Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

²⁹ Reducing urban heat risk: A study on urban heat risk mapping and visualisation. ARUP, 2014

urbana a una distància similar al mar. Tanmateix, la presa de temperatura no està a la mateixa alçada, situant-se la del Raval a dalt d'un terrat a una cota de més de 30 m, mentre que l'estació de Ciutadella està a nivell de terra a una cota aproximada de 7 m. Per tant, no són directament comparables.

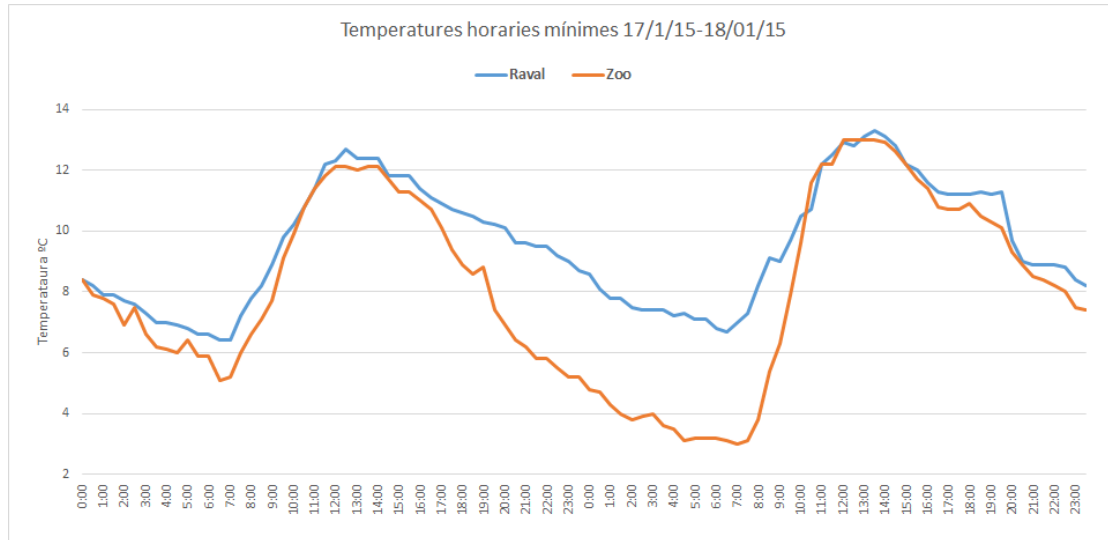
Tot i això cal dir que malgrat la diferència d'alçada implica encara una diferència tèrmica major a nivell del terra que entre les dades disponibles, sí que es mostren diferències tèrmiques significatives que es poden atribuir a l'efecte illa de calor i l'efecte refrigerant dels parcs. Com a mostra, en les imatges següents es pot veure en primer lloc la configuració de l'illa de calor a Barcelona i en segon lloc la diferència de temperatura mínima enregistrada a les estacions de Raval i Zoo per la nit del 17/01/15 (data de màxima intensitat d'illa de calor en l'estudi realitzat per JM Vide, 2015). Considerant que l'estació del Raval té el sensor en alçada, el que es mostra en el gràfic és encara conservador, ja que la diferència de temperatura a nivell de terra encara seria més gran.

Imatge 23. Mapa d'illa de calor de Barcelona 17/01/15 22:15h



Font: J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

Imatge 24. Diferència de temperatures entre les estacions de Raval i Zoo



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades del SMC

2.1.3.2 Aigua – impermeabilització del sòl

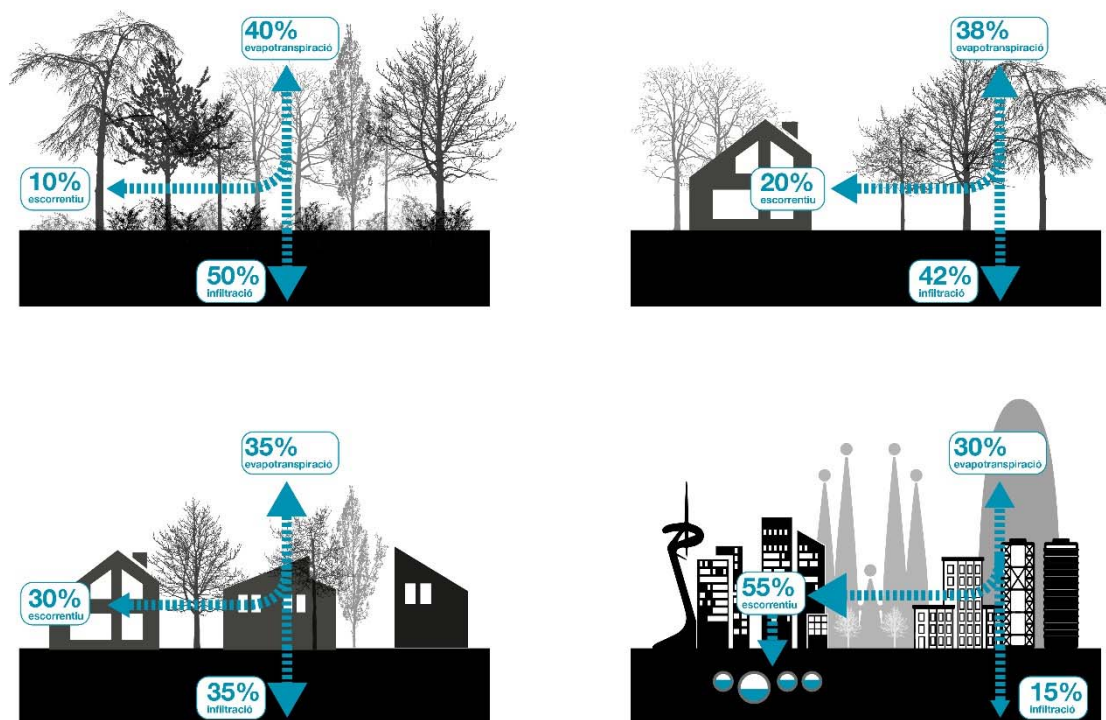
Les àrees urbanes tendeixen a ser més seques que les zones rurals properes a causa de la falta d'espai verd, i d'un predomini de les superfícies impermeables i els sistemes de drenatge urbà, que eliminen ràpidament l'aigua de la superfície urbana. Aquesta combinació d'efectes altera el balanç d'aigua del medi ambient urbà.

Els edificis i les superfícies impermeables recullen ràpidament l'escolament superficial i creen un dèficit d'evaporació a la ciutat. Mentre que en les zones rurals els sòls i la vegetació retenen l'aigua pel refredament a través de l'evaporació.

Una superfície urbana seca potencia la transferència de calor sensible (calor que fa incrementar la temperatura del material) i suprimeix el flux de calor latent (calor que no s'inverteix en increment de temperatura sinó en canvi de fase, calor d'evaporació), mentre que les superfícies rurals humides redueixen la transferència de calor sensible i potencien el flux de calor latent³⁰.

El cicle de l'aigua a la ciutat és un dels capítols d'estudi realitzat en el marc del Pla de Resiliència i Adaptació al Canvi Climàtic de Barcelona. D'acord amb aquest estudi, l'esquema de fluxos a Barcelona és el següent:

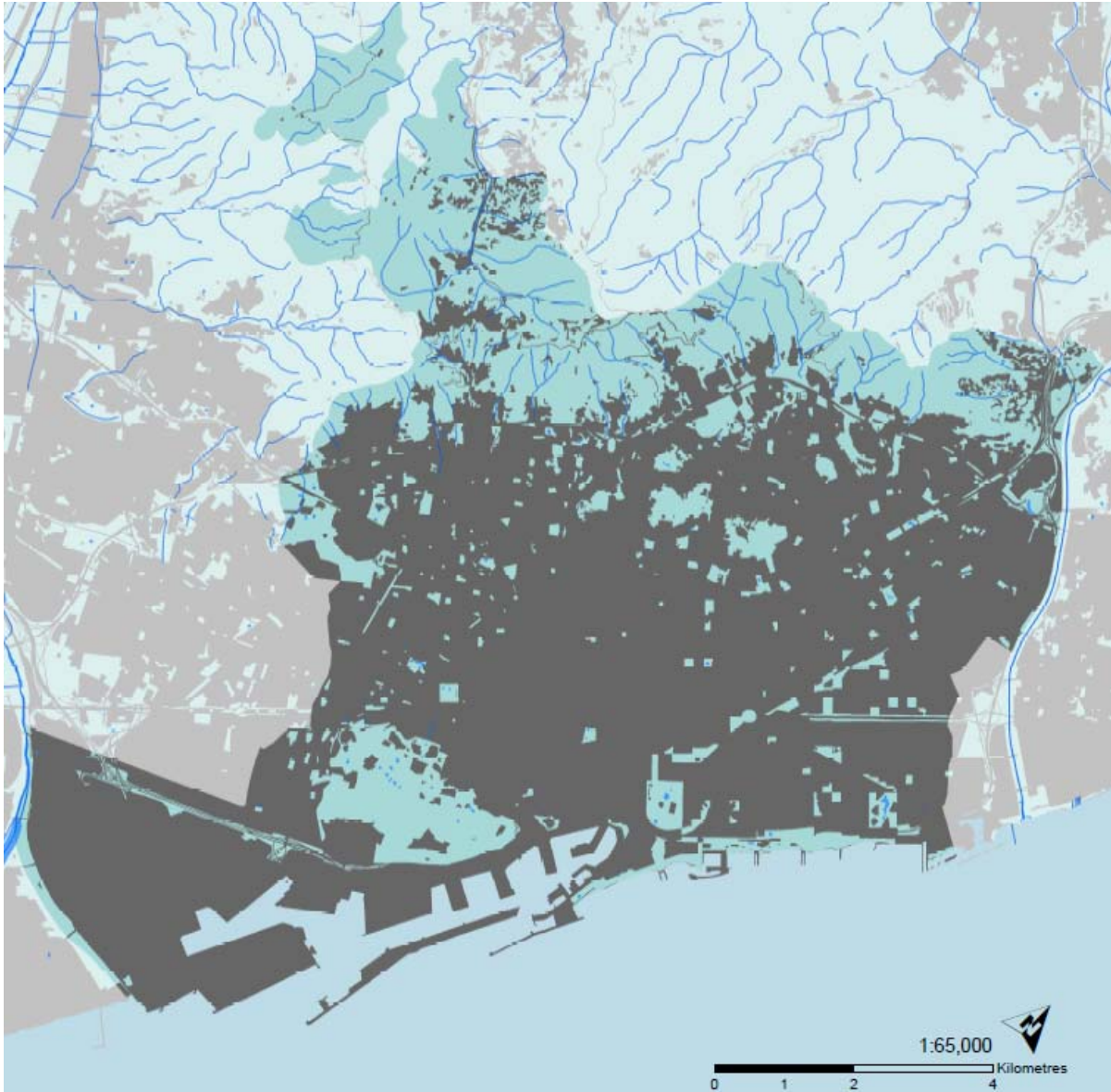
³⁰ The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524

Imatge 25: Efecte de la impermeabilització sobre l'escorrentiu i la infiltració

Font: Barcelona Regional a partir de dades d'Arnold and Gibbons (1996) Impervious Surface Coverage

Un dels paràmetres importants en el cicle de l'aigua i determinant en l'estudi de l'illa de calor de Barcelona és el grau de permeabilitat o impermeabilitat del sòl. El % de superfície impermeable és també un dels indicadors que s'utilitzen en les principals àrees urbanes per valorar els esforços de conservació de la biodiversitat.

S'ha fet una aproximació a la superfície impermeable de Barcelona fent una selecció de cobertes a partir del Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya 2009. El resultat es pot veure en la imatge següent:

Imatge 26. Mapa d'impermeabilitat de les cobertes de Barcelona

Font: Barcelona Regional

L'efecte de les masses d'aigua sobre la temperatura de l'aire del seu entorn s'ha estudiat a París modelitzant l'efecte del riu Seine, que juga un rol de regulador tèrmic de petita escala a la ciutat. L'abast de la seva influència tèrmica s'ha quantificat en 30 m³¹. El riu també juga un rol destacat en la creació de les brises tèrmiques.

Aquest efecte tèrmic dels cursos fluvials és palpable en l'entorn metropolità de Barcelona, per exemple, en el riu Besòs (veure més endavant capítol 2.3 Efecte illa de calor atmosfèrica).

Per altra banda, la ubicació biogeogràfica de Barcelona determina que hi hagi un massa d'aigua important a considerar en termes de regulació tèrmica, que és el mar. No està quantificat el seu efecte, però és un clar determinant en la temperatura de l'aire de la ciutat, i en la configuració de les brises.

³¹ Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Cahier#1. APUR, atelier parisien d'urbanisme, 2012.

2.2 EFECTE ILLA DE CALOR DE SUPERFÍCIE

La temperatura de superfície es pot estimar per mitjà de teledetecció d'imatges de satèl·lit i fotografies aèries amb sensors tèrmics. S'han efectuat ambdues aproximacions.

El procediment físic és molt semblant en els dos casos. Principalment es tracta de recuperar la informació tèrmica a nivell de sensor i transformar-la a la reflectivitat en superfície. No obstant, degut a que els diferents materials alliberen la temperatura en diferent mesura depenent de la seva naturalesa química i física, cal estimar primer la seva emissivitat per saber la temperatura real a la que estan.

Així doncs, en cap dels casos es tracta d'una mesura directa, sinó que cal efectuar una sèrie de transformacions i càlculs per arribar a estimar la temperatura de superfície dels materials.

Temperatura de superfície – vol tèrmic ICGC

Després de realitzar un primer vol tèrmic a l'hivern de 2012 que va resultar tenir problemes amb el sensor tèrmic, es va fer un conveni de col·laboració entre l'ICGC i BR el 2014 per a la realització d'un vol amb sensor tèrmic hiperespectral TASI (*Thermal Airborn Spectrographic imager*) sobre la ciutat de Barcelona³², amb l'objectiu de detectar modificacions antròpiques de tipus tèrmic en entorns urbans, per contribuir a l'estudi de l'Illa de Calor de Barcelona.

Encara que el TASI mesura radiació emesa per la superfície observada i no per l'atmosfera, la condició d'equilibri termodinàmic nocturn, demostrat per l'ICGC³³, permet l'anàlisi de les *UHIs* a través de la detecció d'illes de calor superficials (*SUHIs*).

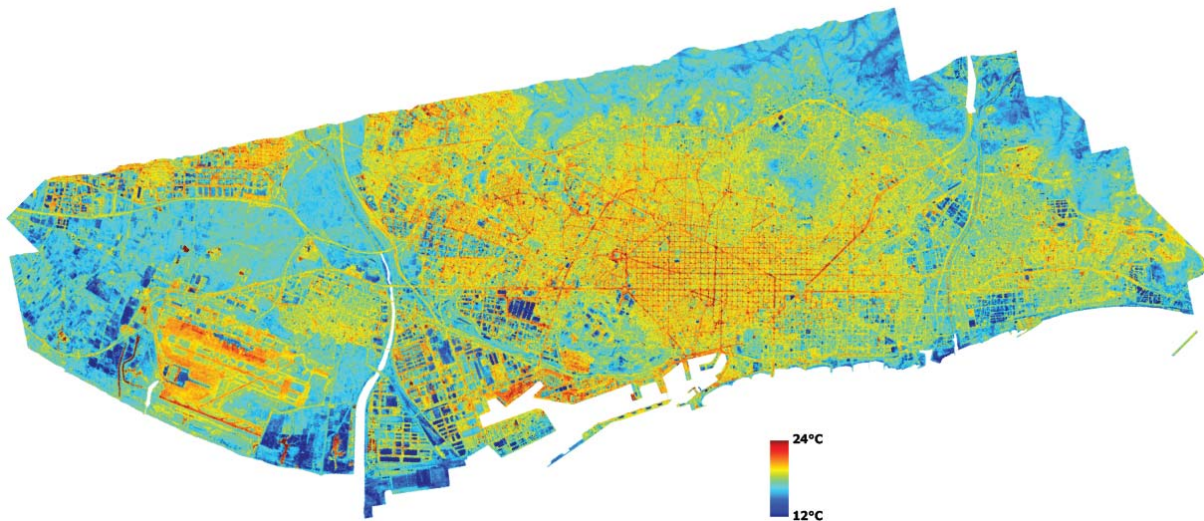
El vol es va realitzar el 26 de setembre de 2014 en horari nocturn (entre les 0h i les 2h), i es va fer amb una resolució espacial de 4 x 4 m² i una resolució espectral de 32 bandes. La finestra espectral que abasta el sensor cobreix la part més significativa de l'infraroig tèrmic i permet recuperar informació d'informació quantitativa sobre la temperatura de la coberta observada i la seva composició química. En l'infraroig tèrmic, la temperatura i l'espectre d'emissivitat s'acoblen per determinar la quantitat de radiació tèrmica emesa per les cobertes.

Les imatges obtingudes s'han calibrat radiomètricament i geomètricament. I els valors de temperatura s'han sotmès a un procés de correcció atmosfèrica. Com a resultat d'aquest tractament s'obtenen mapes de temperatura de superfície.

³² Segon Vol Nocturn TASI-600 sobre Barcelona (BCN-Regional). Informe del treball realitzat. ICGC, 2014

³³ 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

Imatge 27. Mapa de temperatura de superfície realitzat a partir del vol tèrmic de 2014



Font: ICGC-BR 2014

Els resultats d'aquest estudi d'anomalies tèrmiques que s'obté a partir del vol tèrmic confirmen l'existència d'una illa de calor urbana que es genera malgrat les alteracions induïdes per la seva condició de ciutat litoral, la localització de la màxima intensitat en el districte de l'Eixample, i la seva estructura espacial, disminuint els seus efectes en apropar-se a zones més perifèriques de la ciutat.

Temperatura de superfície – Landsat-8

El Landsat-8 és el satèl·lit de llançament més recent (2013) del programa d'observació terrestre Landsat que opera des de 1972, fet que el converteix en el programa d'adquisició d'imatges per satèl·lit més llarg de la història.

El satèl·lit Landsat-8 consta d'un sensor òptic (OLI) i un de tèrmic (TIRS). El sensor òptic conté de 8 bandes d'una resolució de 30 m i una banda pancromàtica de 15 m. Pel que fa al TIRS, disposa de dues bandes infraroges amb una resolució de 100 m, tot i que s'entreguen remostrejades a 30 m.

L'òrbita d'aquest satèl·lit permet un període de visita cada 16 dies en el que l'hora de pas per la nostra latitud és al voltant de les 11:30 am, que equival al moment de màxima il·luminació.

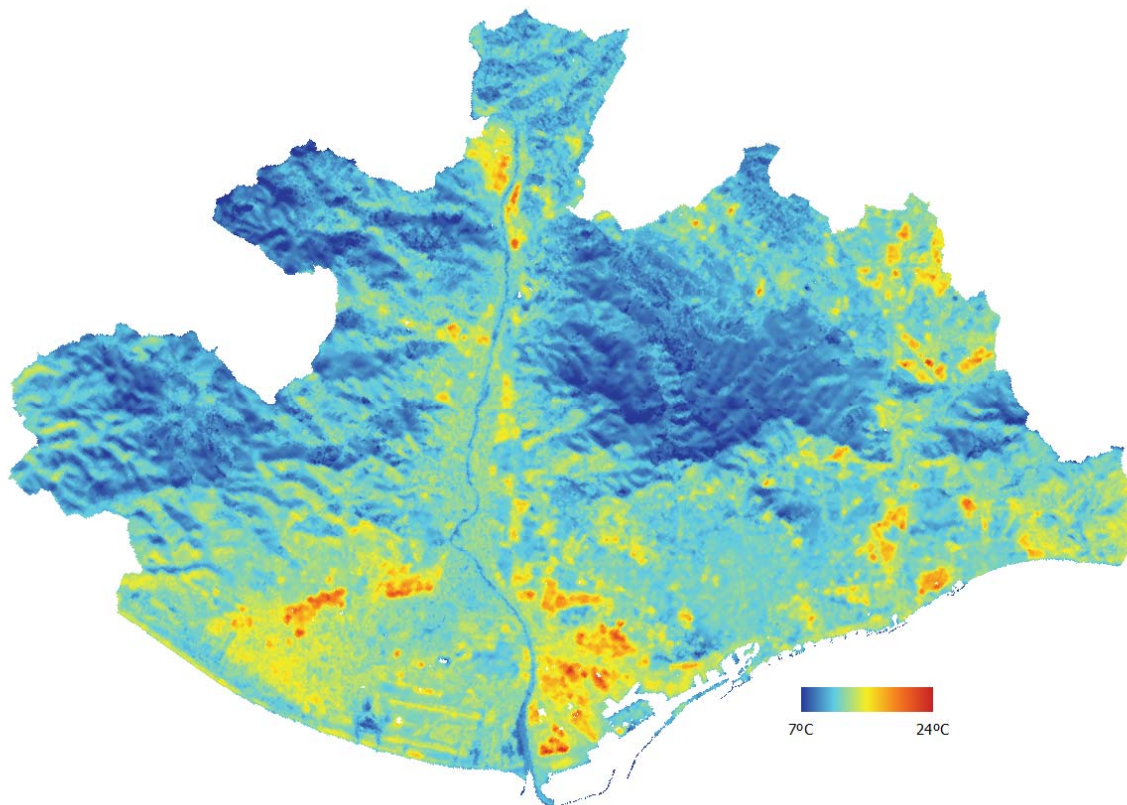
Així doncs, tot i tenir resolucions espacials molt menors que el vol tèrmic de l'ICGC, podem disposar d'una informació relativament periòdica que a més es distribueix de manera oberta i gratuïta i amb una cobertura global.

Una altra gran diferència entre les dues metodologies és el moment de la captura. El Landsat-8 ens permet observar el fenomen durant el dia, on trobarem els pics de calor en els materials que s'escalfen més de pressa mentre que el vol ICGC, per la seva hora de captura veurà aquests pics en els materials que triguen més a refredar-se i en el calor antropogènic. Per tant, una metodologia ens mostra l'illa de calor diürna i l'altre la nocturna.

Pel que fa al procés d'obtenció, es necessita tant la informació tèrmica com l'òptica, aquesta darrera serà la que a través d'un sistema de classificació supervisada d'imatge ens donarà l'estimació de l'emissivitat dels materials. A banda de l'emissivitat, també es requereix conèixer la concentració de vapor d'aigua atmosfèric en el moment de la captura ja que aquest interfereix en el senyal rebut des de la superfície. Cal tenir present que el sensor està rebent una informació que ha hagut de travessar 700 km d'atmosfera.

L'algoritme utilitzat és específic per a l'estat actual del Landsat-8, sense entrar en detalls molt tècnics, es tracta d'un mètode alternatiu per a superar el nivell d'incertesa associat al mal funcionament d'una de les dues bandes tèrmiques del TIRS.

Imatge 28. Mapa de temperatura de superfície realitzat a partir de Landsat-8



Font: BR 2017

Aquests resultats mostren diferències clares en algunes tipologies de coberta. Per exemple, les cobertes industrials mostren les regions més calentes en aquest mapa degut a que el metall s'escalfa molt de pressa amb l'energia solar, aquestes cobertes però, es mostren un patró invers en el vol de l'ICGC degut a que es refreden molt de pressa quan la intensitat solar disminueix.

Tot i així, el que sí que es manté és la baixa temperatura de les zones amb vegetació. Així doncs, també es veu un clar efecte antròpic en la distribució de la temperatura de superfície diürna.

Potencial d'acumulació de calor

Barcelona Regional ha fet una aproximació al potencial d'acumulació de calor de la superfície basada en la informació disponible de radiació solar, albedo i NDVI. D'aquesta manera es recull informació de l'entrada d'energia calorífica externa, de la proporció d'energia reflectida, i de la vegetació activa amb paper refrescant degut a l'evapotranspiració.

La radiació solar horària per un any sencer es va calcular a resolució de 0.5 m per tota l'àrea metropolitana en el marc del Pla de Sostenibilitat Ambiental de l'AMB (PSAMB 2014-2020), a partir de la utilització d'un model 3D LIDAR i software GIS.

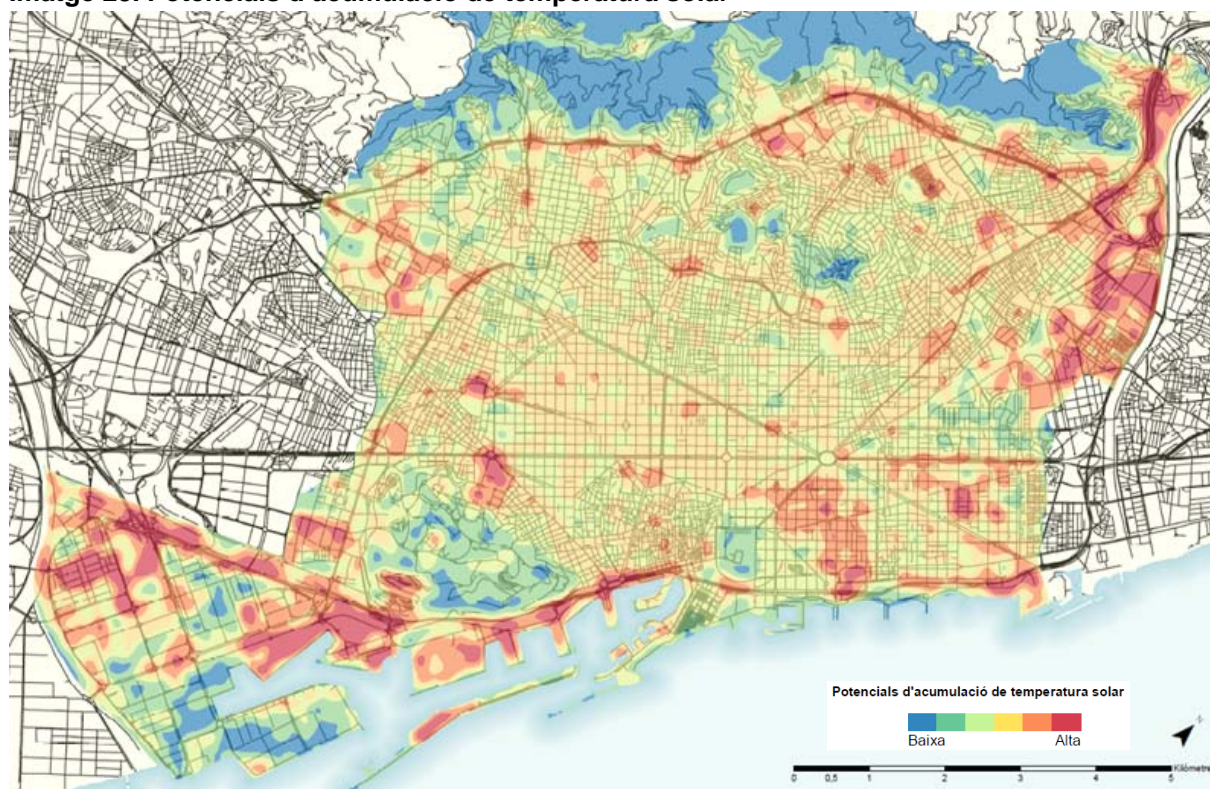
L'albedo es va calcular a partir del paquet d'imatges del Landsat 8 utilitzant la metodologia de Liang (2009) a resolució de 30 m.

Per incloure el paper de la vegetació en l'illa de calor s'ha utilitzat l'índex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calculat pel ICGC a resolució de 0,4 m. Aquest és un dels mètodes més comuns de teledetecció remota de la vegetació. El procés de fotosíntesi que fan les plantes canvia les propietats físiques de la llum reflectida i això pot ser detectat a través de sensors calibrats per a detectar aquestes longituds d'ona.

A partir d'aquests tres paràmetres i considerant els seus rangs i magnituds s'han fet diversos anàlisis espacials assegurant el mínim canvi en les dades originals i utilitzant els següents l·lindars:

- Albedo: es consideren valors més petits de 0.2, representatius de materials poc reflectants (asfalt, ciment, sòls nus, etc.).
- NDVI: es considera un l·lindar de 0.18. A partir d'aquest valor s'ha observat vegetació activa en les mesures realitzades amb el vol de l'ICGC
- Radiació solar: es considera un l·lindar de 800 MWH/m², que és el límit a partir del que es considera cost-efectiu la instal·lació de panells solars tèrmics.

Un cop aplicats aquests l·lindars s'analitza la densitat de les àrees "calentes": baixa reflexió (albedo < 0.2), vegetació escassa o nul·la (NDVI < 0.18) i radiació incident alta (> 800MWH/m²).

Imatge 28. Potencials d'acumulació de temperatura solar

Font: Barcelona Regional

Aquesta aproximació s'ha utilitzat degut a l'heterogeneïtat de les fonts de dades. És un anàlisi que permet veure els patrons de comportament general a la ciutat així com els efectes de vora.

Tot i això cal tenir en compte que el resultat pot presentar distorsions al límits del mapa degut a la manca d'informació fora de l'àmbit. També cal tenir en compte que no es consideren els efectes de regulació tèrmica del mar, la capacitat calorífica dels materials ni tampoc les condicions meteorològiques de vent, humitat o diferències diàries o estacionals.

El resultat permet identificar fàcilment grans parcs de ciutat com la Ciutadella, el Parc Güell, Tres Turons, i fins i tot parcs més petits com Joan Güell, Jardins de Gandhi o Josep Trueta.

Es mostren diferències clares entre barris residencials amb elevada proporció de jardins i arbrat alineat als carrers (Sant Martí de Provençals, Tres Torres) i districtes industrials o àrees amb menys verd (Bon Pastor, Dreta de l'Eixample).

També es detecten àrees amb metall o teulades blanques on gran part de la radiació és reflectida (com Zona Franca, o el Port) i s'identifiquen places grans i "infraestructures calentes" (Sants Estació, Plaça Espanya- Fira). Igualment es poden visualitzar fàcilment les grans infraestructures viàries que no tenen vegetació (Rondes, C-31).

2.3 EFECTE ILLA DE CALOR ATMOSFÈRICA

En aquest apartat es descriuen els diferents estudis i aproximacions que s’han fet sobre l’illa de calor atmosfèrica de Barcelona.

2.3.1 MODIFICACIONES TÉRMICAS EN LAS CIUDADES. AVANCE SOBRE LA ISLA DE CALOR EN BARCELONA, 1990

Documents d’Anàlisi Geogràfica, 17.

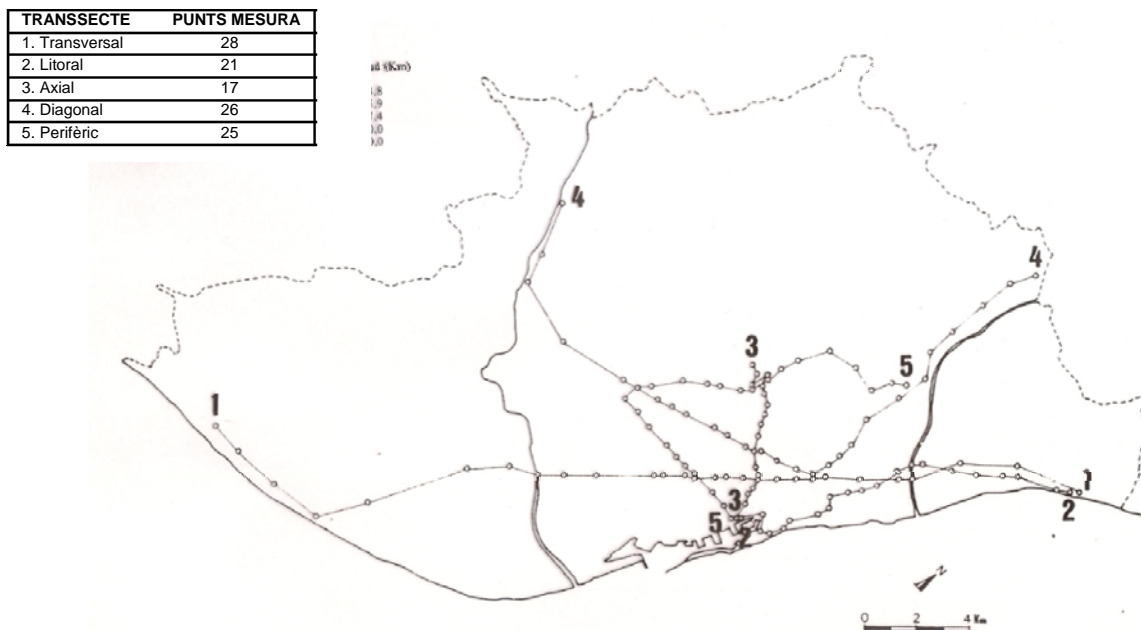
Moreno, María del Carmen; Carreras, Carles; Marín, Mercedes; Martín Vide, Javier y Sabí, Joan.

L’any 1990 es va publicar un estudi sobre l’illa de calor de Barcelona realitzat per diferents departaments de la Universitat de Barcelona (Departament de Geografia Humana i Geografia Física) i la Universitat Autònoma de Barcelona (Departament de Geografia)³⁴.

Es tractava del primer estudi empíric sobre l’illa de calor atmosfèrica, i va consistir en la presa de la temperatura de l’aire en horari nocturn de forma setmanal al llarg de 5 transectes diferents durant el període comprès entre octubre de 1985 i juliol 1987.

El conjunt de transectes suposaven un recorregut de 108 km i un total de 121 punts d’observació, que es mesuraven mitjançant dues estacions termo-higromètriques digitals Hanna amb sonda, instal·lats en cotxes que recorrien els transectes a una velocitat mitjana de 40 km/h.

Imatge 29. Transectes i punts de mesura



Font: Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona (Moreno et al, 1990)

³⁴ Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona (1990, Documents d’Anàlisi Geogràfica, 17). Moreno, María del Carmen; Carreras, Carles; Marín, Mercedes; Martín Vide, Javier y Sabí, Joan.

Aquest estudi conclou que Barcelona té efecte illa de calor, malgrat les alteracions que produeix la seva condició de ciutat litoral.

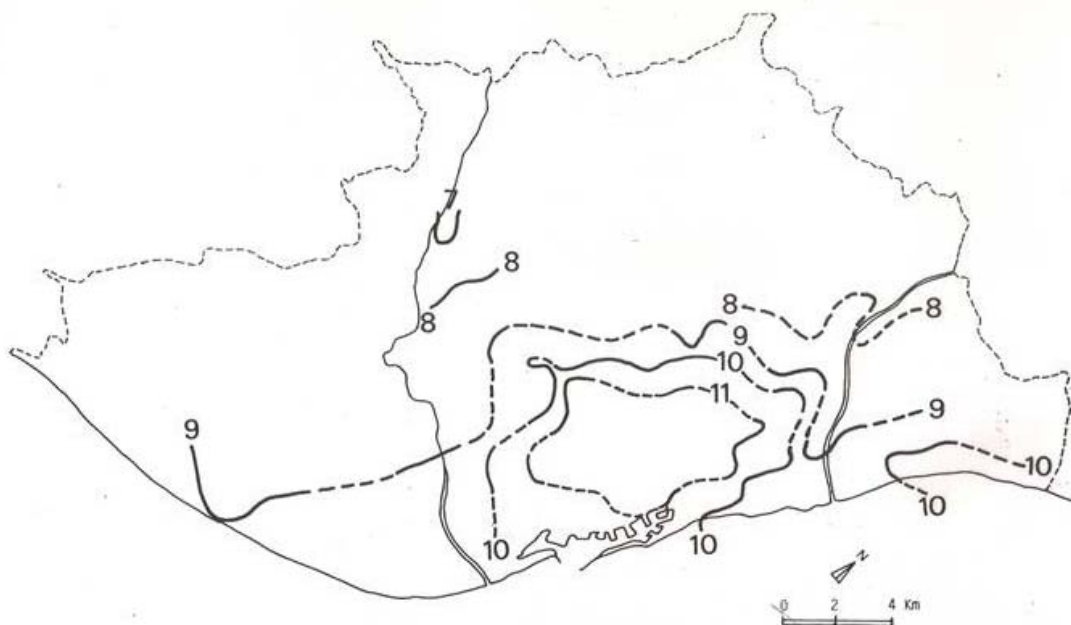
La forma o configuració de l'illa de calor, reflectida per les isoterms té poca dependència de les condicions meteorològiques particulars, té sobretot a veure amb la trama i característiques urbana i periurbana. La distribució en l'espai i la situació del màxim dels valors té a veure amb la morfologia urbana, algunes condicions meteorològiques com el vent i l'estació de l'any.

Quan es produeix l'efecte illa de calor de Barcelona, bàsicament es presenta com a dèbil a la major part del temps, i esporàdicament es presenta com a intensa.

Amb les dades recopilades es constata un màxim de 6,9 °C amb una illa de calor localitzada principalment en el sector de la dreta de l'Eixample. Segons la situació sinòptica i la direcció del vent el màxim es pot desplaçar cap a sotavent del flux dominant. La màxima intensitat de l'UHI es dona en el període de novembre i febrer, ambdós mesos inclosos.

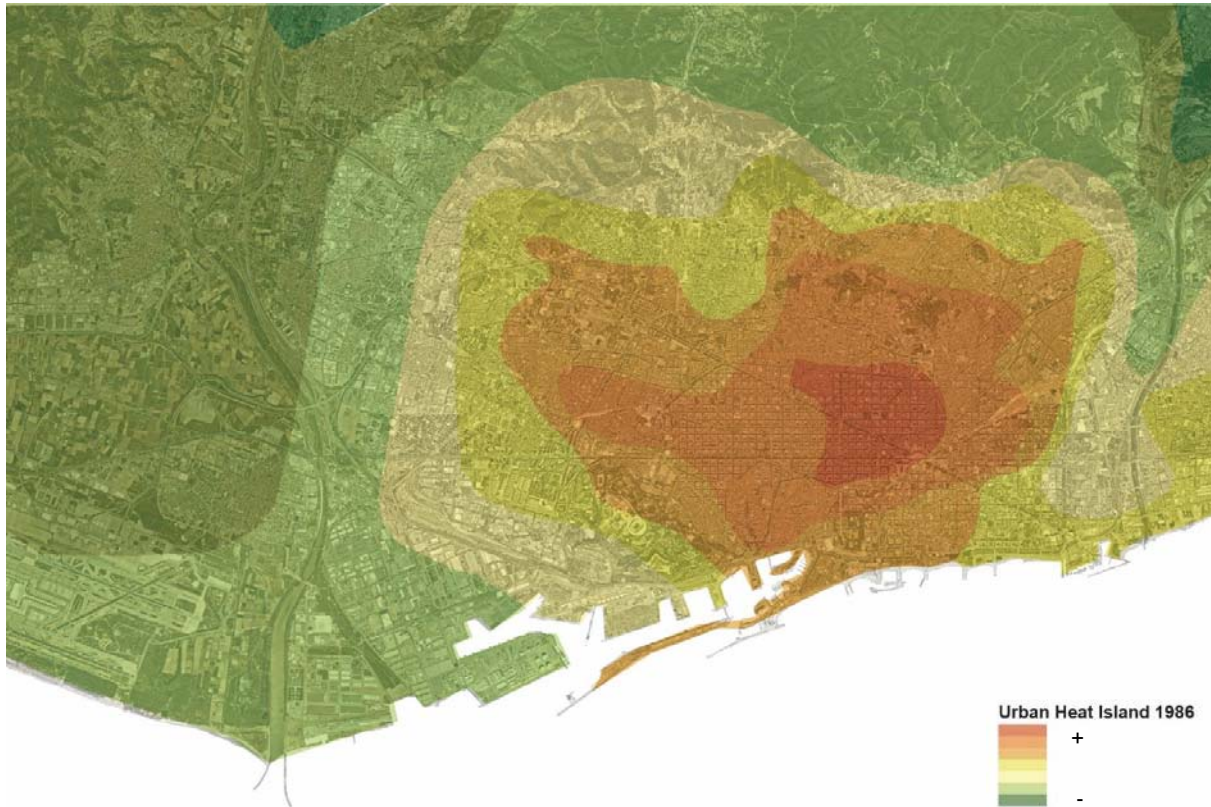
La configuració de l'illa de calor resultant de les dades preses mostra com les isoterms estan generalment tancades encara que a vegades estan una mica obertes cap al port, i generalment mostren una meseta tèrmica a l'Eixample. Es percep l'efecte frontera especialment cap al nord, i el riu Besòs actua com un canal fred.

Imatge 30. Isothermes (en °C) de 26/10/1986 23.05h de l'AMB



Font: Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona (Moreno et al, 1990)

Imatge 31. Isotermes (en °C) de 12-02-1986 22:03 h de l'AMB



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'estudi del METROBS La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. (J Martín Vide et al, 2015).

En aquest estudi es va plantejar la possibilitat de contrastar els resultats amb imatges de satèl·lit (banda tèrmica Landsat 5) però no es poden extreure conclusions de la comparativa entre el treball realitzat i la teledetecció per la diferència horària entre les observacions en terra i des del satèl·lit.

2.3.2 LA ISLA DE CALOR EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

(J Martin Vide et al, 2015).

15 anys després d'aquest primer estudi sobre l'illa de calor a Barcelona s'ha realitzat un nou estudi sobre l'illa de calor a l'AMB i l'adaptació al canvi climàtic dirigit per Javier Martin Vide.

Aquest estudi s'ha realitzat en el marc del METROBS, l'Observatori Metropolità del Canvi Climàtic, creat al 2014 per l'AMB en el context del Pla de Sostenibilitat Ambiental (PSAMB 2014-2020), amb la finalitat de dur a terme estudis sobre efectes, adaptació i les mesures necessàries per combatre el canvi climàtic en l'àmbit metropolità i disposar de criteris de gestió. L'observatori també es va crear per potenciar la transferència de coneixement entre el món acadèmic, les administracions públiques i la societat civil.

En primer lloc, aquest estudi analitza la intensitat de l'illa de calor de l'AMB a partir de l'anàlisi de les temperatures mínimes de dos observatoris fixos. Els punts de referència són les estacions de la Vila Olímpica i l'aeroport de Barcelona (ambdues de l'AEMET), amb similars condicions geogràfiques d'altitud i distància al mar. En relació al punt de referència més urbà s'ha contrastat les dades de Vila Olímpica amb l'estació de Raval (SMC) i s'ha observat en aquesta darrera una diferència de temperatura de 0.22°C major, ubicant-se més proper al nucli de l'illa de calor de Barcelona. El període estudiat és 2004-2013.

Com a resultat s'ha observat que les nits al centre de la ciutat són de mitjana uns 2°C més càlides que les de l'aeroport, i un 10% dels dies les diferències superen els 3,5°C.

L'anàlisi per estacions conclou que l'hivern, seguit de la tardor és l'estació en que l'illa de calor a Barcelona es manifesta de forma més intensa i freqüent. I l'anàlisi mensual indica que el període d'illes de calor més freqüents i intenses és d'octubre a març, sent més freqüents en el mes central de l'hivern, al gener.

Amb les dades analitzades, la probabilitat de que les diferències de temperatures entre les dues estacions superi els 2 i 3°C per les diferents estacions de l'any es resumeixen a continuació.

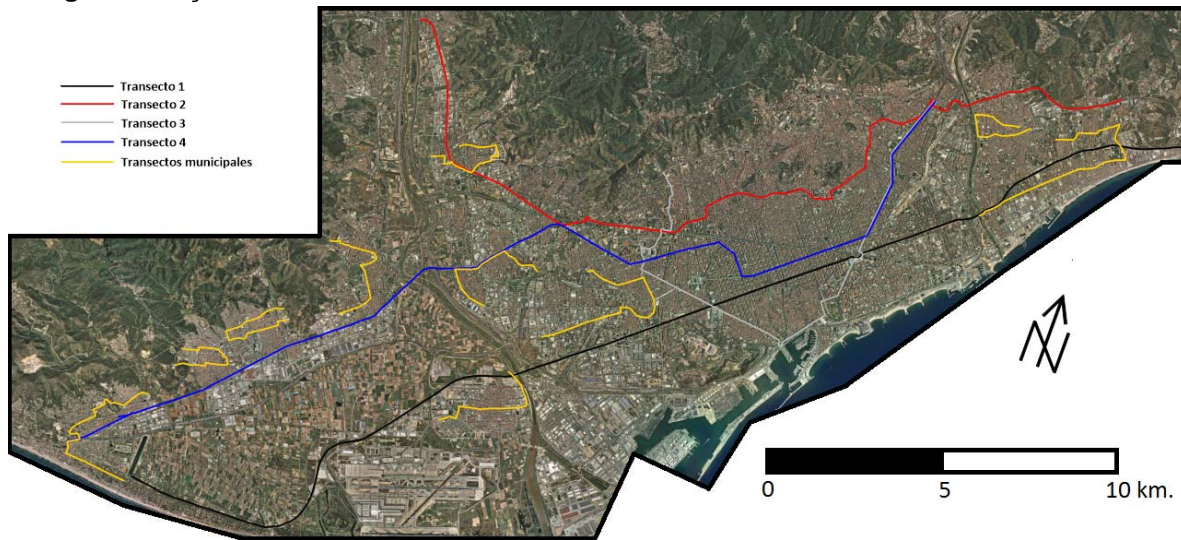
Tabla 1. Probabilitat de superació de diferències de temperatura entre les dues estacions

	$\Delta T > 2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T > 3 \text{ }^\circ\text{C}$
Tardor	39,39 %	13,31 %
Hivern	72,14 %	44,91 %
Primavera	35,74 %	11,45 %
Estiu	7,79 %	0,39 %

Font: Elaboració pròpia a partir de l'estudi del METROBS de J Martin Vide et al, 2015.

En segon lloc, de manera anàloga al que s'havia realitzat 15 anys enrere, s'analitza la configuració de les illes de calor de l'AMB a partir de 4 transsectes metropolitans i 10 transsectes municipals. El treballs de camp es van dur a terme en horari nocturn entre l'octubre de 2014 i el març de 2015.

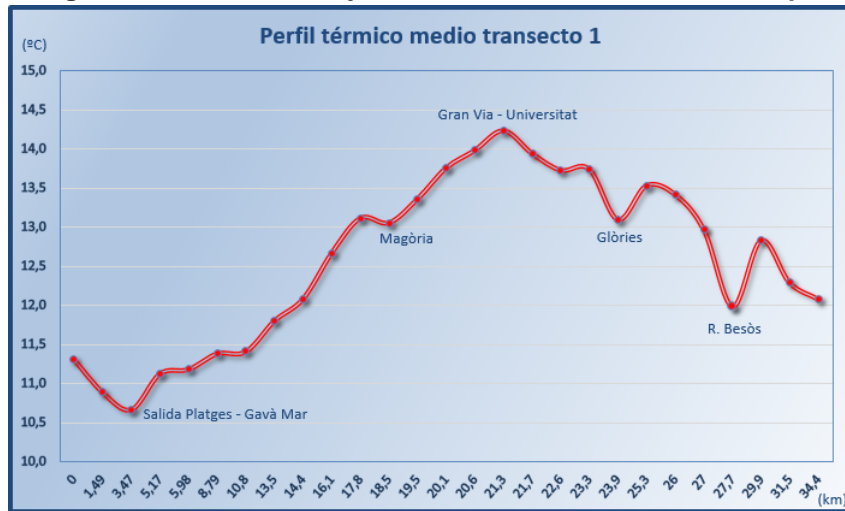
Imatge 32. Traçat dels transectes realitzats



Font: J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

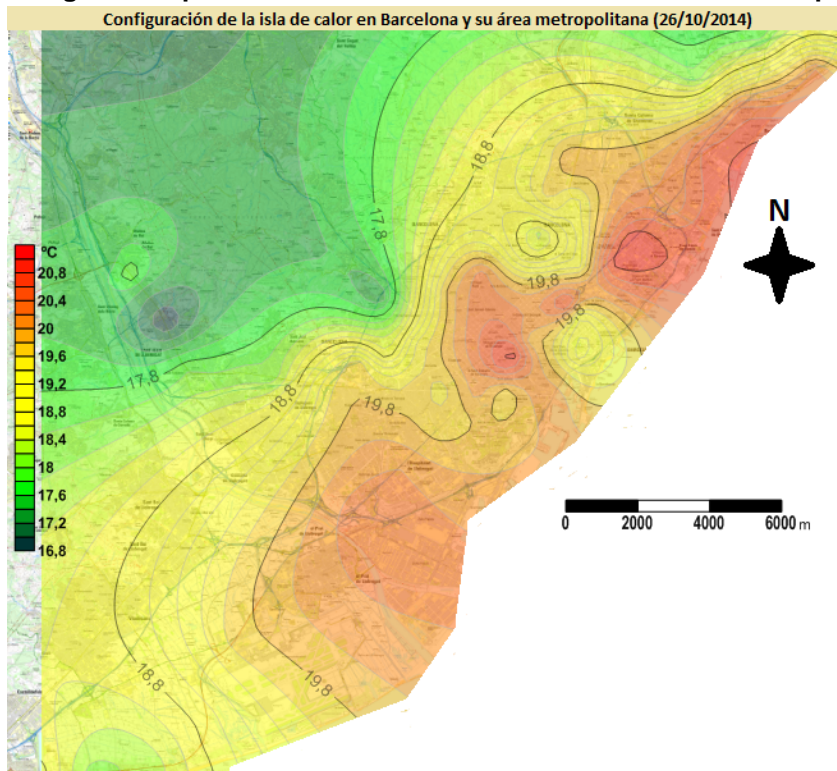
El perfil tèrmic del transecte transversal metropolità es mostra en la següent imatge.

Imatge 33. Perfil tèrmic mitjà del transecte transversal metropolità



Font: J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

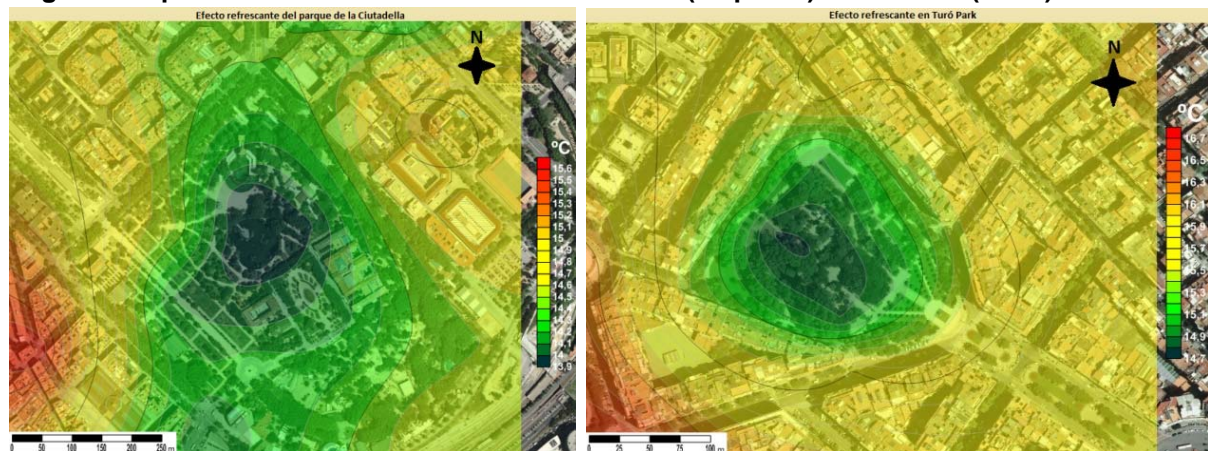
En les 20 casos que s’ha realitzat el transecte transversal s’ha valorat la influència dels factors meteorològics. La nuvolositat, encara que presenta certa correlació negativa, no s’ha mostrat significativa (es mostra més intensitat d’illa de calor en situació de cel sense núvols). La relació amb la velocitat del vent sí que ha mostrat correlació estadísticament significativa, a major velocitat del vent menys intensitat de l’illa de calor.

Imatge 34. Mapa d'isotermes de Barcelona i el seu entorn metropolità 26/10/2014 21.29h

Font: J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

Es confirma que el nucli de l'illa de calor de Barcelona segueix situant-se a l'eixample dret.

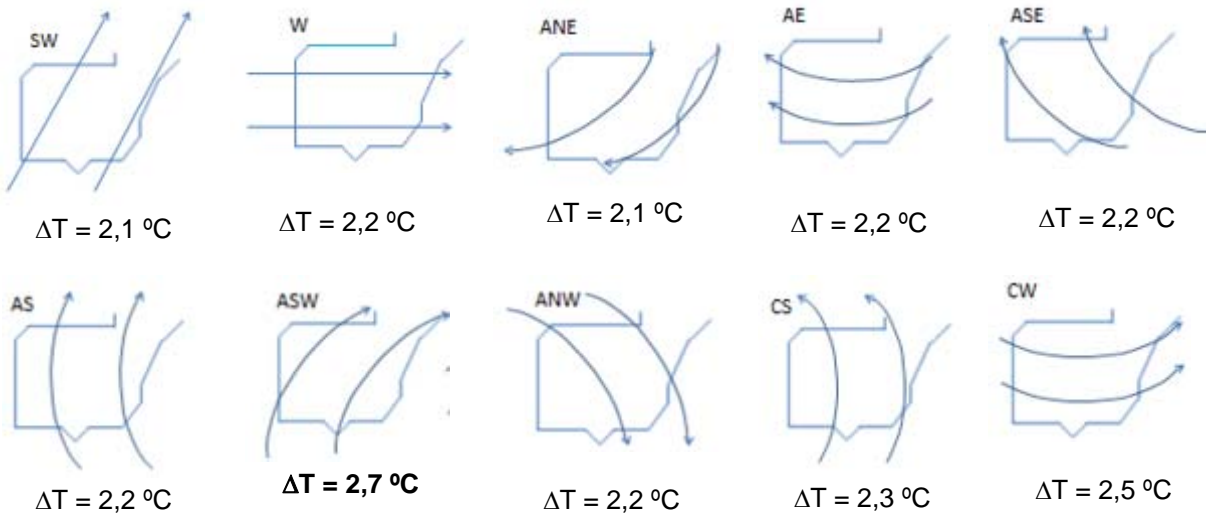
L'estudi recull també l'anàlisi de dos parcs urbans de Barcelona per veure el seu efecte refrigerant. En els casos estudiats de turó Parc i Ciutadella es va observar com en pocs centenars de metres la temperatura es reduïa en 2°C.

Imatge 35. Mapes d'isotermes del Parc de la Ciutadella (esquerre) i Turó Parc (dreta)

Font: La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. (J Martin Vide et al, 2015). Estudi del METROBS

En tercer lloc, s'ha realitzat un estudi de la intensitat de l'illa de calor de l'AMB segons la situació sinòptica, que conclou que les diferències tèrmiques mitjanes entre situacions sinòptiques distintes van des de 1°C a 2,7°C. En general, els tipus sinòptics que potencien l'illa de calor són els advectionius del tercer quadrant i els anticiclònics mixtes, aquests últims associats sovint a condicions d'estabilitat atmosfèrica.

Imatge 36. Configuració isobàrica i màximes diferències entre temperatures mínimes de Vila Olímpica i Aeroport de les situacions sinòptiques que potencien l'illa de calor, segons tipus sinòptics de Jenkinson i Collison 2004-2010.



Font: Elaboració pròpia a partir de l'estudi del METROBS de J Martin Vide et al, 2015.

Finalment, s'analitza, en col·laboració amb Barcelona Regional, el factor de visió del cel de l'AMB. L'*sky view factor* (SVF) s'analitza de 2 maneres diferents: amb imatges amb ull de peix, i amb l'ús i tractament de dades LIDAR i es comparen i calibren els resultats obtinguts amb els dos mètodes.

Imatge 37. Imatges d'ull de peix i valors de SVF a 3 localitzacions de Barcelona



Gran Via – SVF 28,22%

pl. MACBA – SVF 51,05%

c. Tallers – SVF 8,61%

Font: J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

Els dos estudis mostren com la màxima intensitat de l'illa de calor a Barcelona es mostra a l'Eixample en horari nocturn durant els mesos d'hivern.

2.3.3 ANÀLISI DE L'EFECTE ILLA DE CALOR A BARCELONA A PARTIR DE LES DADES DE LES ESTACIONS METEOROLÒGIQUES DEL SMC

En aquest capítol es mostrarà i avaluarà l'efecte illa de calor a Barcelona utilitzant les dades de temperatura de les estacions meteorològiques que el Servei Meteorològic de Catalunya té ubicades a Barcelona així com les dades de les estacions de fora del municipi.

Per analitzar aquest efecte, principalment s'han fet tres tipus d'anàlisi. Tots ells es basen en comparar la temperatura enregistrada per les diferents estacions meteorològiques amb la temperatura d'una estació de referència.

Els tres anàlisis són:

- Anàlisi numèric
- Anàlisi territorial
- Anàlisi d'evolució històrica

L'anàlisi numèric, i el d'evolució històrica es centra a comparar la temperatura relativa de les estacions de Barcelona respecte la temperatura de referència d'una estació externa a la ciutat, considerant la dinàmica horària i mensual del fenomen.

Per contra l'anàlisi territorial mostra en el mapa l'efecte illa de calor urbana en un interval determinat, mitjançant la interpolació de la temperatura a les estacions meteorològiques i considerant la distribució territorial.

En tots els anàlisis s'utilitza l'estació de Viladecans [UG] com a estació de referència. La raó és perquè aquesta estació està ubicada fora del municipi de Barcelona, i a més està envoltada d'un entorn rural, per tant es pot dir que està molt poc influenciada per qualsevol efecte urbà d'illa de calor.

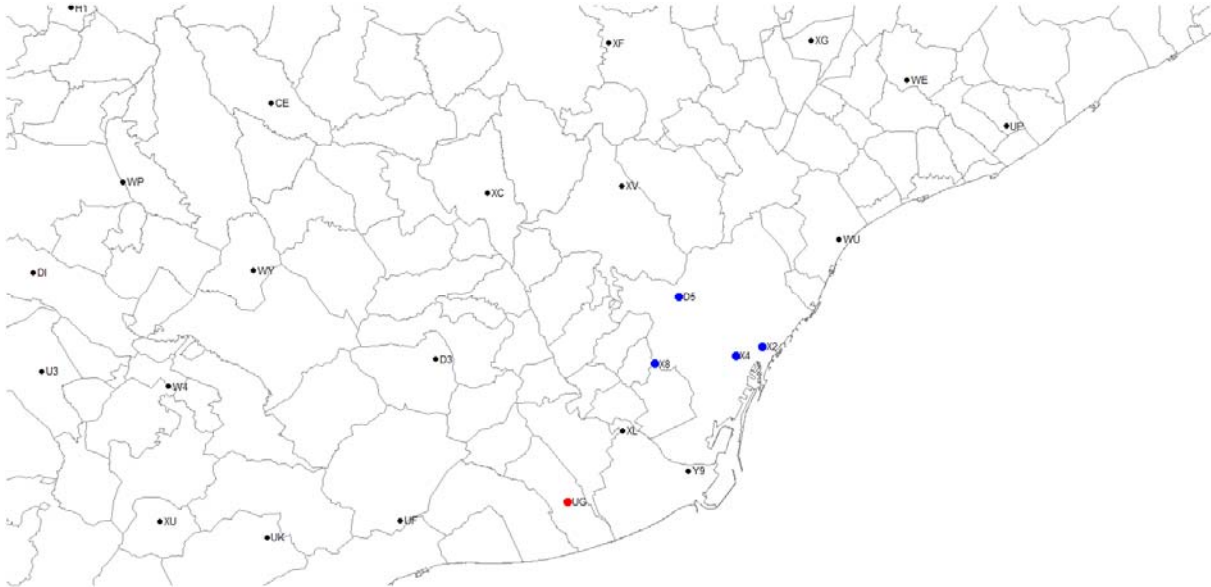
Tant l'anàlisi numèric com el territorial utilitzen les dades històriques de temperatura, a resolució semi-horari, del gener de 2015 al setembre de 2017. En canvi l'anàlisi de l'evolució històrica utilitza les dades més antigues disponibles de les estacions, algunes es remunten als anys 90 i d'altres al 2006.

Les estacions meteorològiques utilitzades per l'anàlisi principalment han estat les de Barcelona, i l'estació de referència externa a Barcelona. Tot i això, per l'anàlisi territorial també s'han utilitzat les estacions que hi ha al voltant de Barcelona.

A continuació s'ubiquen en el mapa les estacions meteorològiques de Barcelona i entorn, i en color blau les 4 estacions meteorològiques de Barcelona utilitzades per l'estudi [D5, X2, X4, X8], i en vermell l'estació de referència de Viladecans [UG].

- D5: Barcelona - Observatori Fabra
- X2: Barcelona - Zoo
- X4: Barcelona - el Raval
- X8: Barcelona – Zona Universitària
- UG: Viladecans [estació de referència]

Imatge 38: Ubicació de les estacions meteorològiques de Barcelona i rodalies



Font: Barcelona Regional

2.3.3.1 Ajust del gradient tèrmic vertical

L'efecte del *gradient tèrmic vertical (GTV)* provoca que la temperatura baixa amb l'alçada (a excepció d'anomalies meteorològiques com els dies d'inversió tèrmica). Això és degut a que la font de calor que s'està irradiant a l'atmosfera prové de la Terra. Així, com més s'allunya d'aquesta font (a major alçada), l'aire estarà més fred.

El GTV varia segons la ubicació i l'època, i el seu valor real es determina a partir dels valors obtinguts per radiosondatges. Per norma general el seu valor està entre 6 o 7°C per cada quilòmetre d'alçada.

Degut a que es compararan les dades de temperatura de diferents estacions meteorològiques ubicades a diferents alçades, per aïllar l'efecte "alçada" en la temperatura i així poder fer una comparativa més coherent, s'han transformat tots els valors de temperatura a una temperatura a alçada 0 metres considerant el GTV.

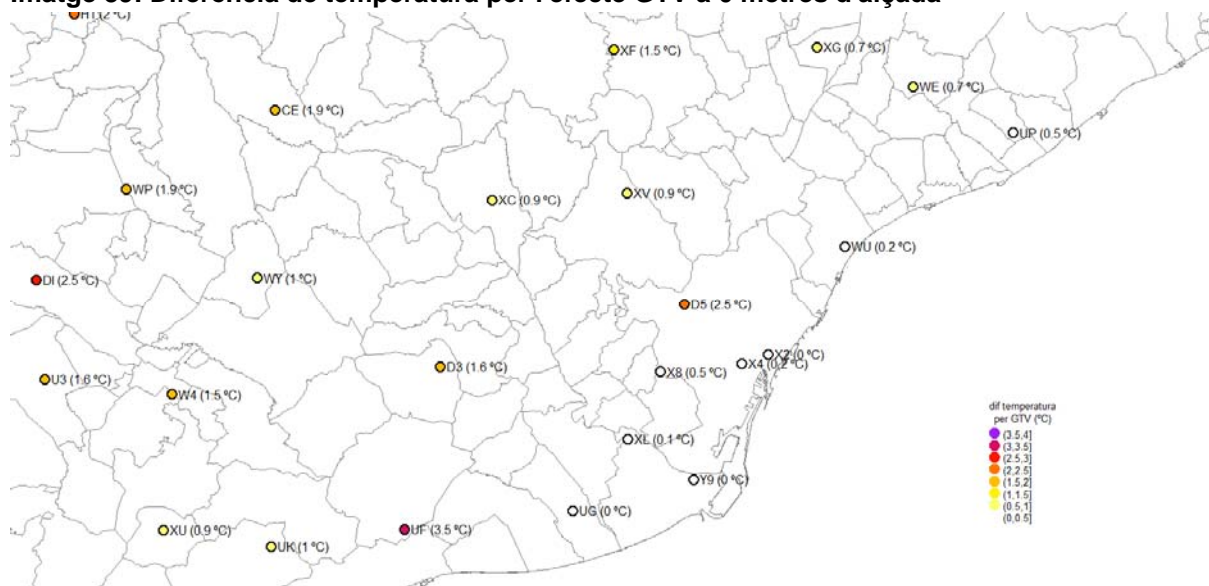
En aquest treball s'ha considerat que el GTV provoca una baixada de 0,6°C de temperatura per cada 100 metres d'augment en l'alçada. Sota aquesta hipòtesi, la temperatura mitjana a l'any 2016 (columna: *TEMP REAL 2016*) de les estacions queda ajustada a 0 metres d'alçada amb la columna: *TEMP 0METRES 2016*, veure la taula següent on també es mostra la diferència de temperatura (columna: *DIF TEMP*) que provoca l'efecte d'alçada segons el GTV.

Taula 2: Diferència de temperatura segons el GTV de les estacions meteorològiques operatives de les comarques de Barcelonès, Baix Llobregat, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental

CODI	ESTACIÓ	COMARCA	MUNICIPI	ALÇADA	TEMP REAL 2016	TEMP 0METRES 2016	DIF TEMP
D3	Vallirana	Baix Llobregat	Vallirana	252	16.1	17.7	1.6
UF	PN del Garraf - el Rascler	Baix Llobregat	Begues	573	14.0	17.5	3.5
UG	Viladecans	Baix Llobregat	Viladecans	3	16.8	16.8	0.0
XL	El Prat de Llobregat	Baix Llobregat	El Prat de Llobregat	8	16.6	16.7	0.1
Y9	Port de Barcelona - ZAL Prat	Baix Llobregat	El Prat de Llobregat	4	17.6	17.6	0.0
D5	Barcelona - Observatori Fabra	Barcelonès	Barcelona	411	15.4	17.9	2.5
WU	Badalona - Museu	Barcelonès	Badalona	42	17.0	17.2	0.2
X2	Barcelona - Zoo	Barcelonès	Barcelona	7	17.4	17.4	0.0
X4	Barcelona - el Raval	Barcelonès	Barcelona	33	18.1	18.3	0.2
X8	Barcelona - Zona Universitària	Barcelonès	Barcelona	79	16.8	17.3	0.5
UP	Cabrils	Maresme	Cabrils	81	16.6	17.1	0.5
UQ	Dosrius - PN Montnegre C.	Maresme	Dosrius	460	14.0	16.8	2.8
WT	Malgrat de Mar	Maresme	Malgrat de Mar	2	15.7	15.7	0.0
D2	Vacarisses	Vallès Occidental	Vacarisses	343	13.9	16.0	2.1
VU	Rellinars	Vallès Occidental	Rellinars	421	14.1	16.6	2.5
VV	Sant Llorenç Savall	Vallès Occidental	Sant Llorenç Savall	528	13.0	16.2	3.2
XC	Castellbisbal	Vallès Occidental	Castellbisbal	147	16.0	16.9	0.9
XF	Sabadell - Parc Agrari	Vallès Occidental	Sabadell	258	15.4	16.9	1.5
XV	Sant Cugat del Vallès - CAR	Vallès Occidental	Sant Cugat del Vallès	158	15.7	16.6	0.9
VX	Tagamanent - PN del Montseny	Vallès Oriental	Tagamanent	1030	11.6	17.8	6.2
WE	Vilanova del Vallès	Vallès Oriental	Vilanova del Vallès	126	14.3	15.0	0.7
X9	Caldes de Montbui	Vallès Oriental	Caldes de Montbui	176	14.9	15.9	1.0
XG	Parets del Vallès	Vallès Oriental	Parets del Vallès	123	16.0	16.7	0.7
XK	Puig Sesolles (1.668 m)	Vallès Oriental	Fogars de Montclús	1668	7.6	17.6	10.0

Font: Barcelona Regional

El mapa següent mostra la diferència de temperatura provocada l'efecte d'alçada segons el GTV.

Imatge 39: Diferència de temperatura per l'efecte GTV a 0 metres d'alçada

Font: Barcelona Regional

Al llarg de tot el capítol s'utilitzarà la temperatura a 0 metres per analitzar l'efecte illa de calor i comparar unes estacions amb les altres, tot i això en algunes gràfiques també es mostren les temperatures reals de les estacions a efecte indicatiu.

2.3.3.2 Anàlisi numèric

Per l'anàlisi numèric s'han comparat les temperatures de les 4 estacions meteorològiques que actualment hi ha a Barcelona (Observatori Fabra [D5], Zoo [X2], el Raval [X4] i Zona Universitària [X8]) amb la de l'estació de referència de Viladecans [UG], ubicada al Parc Agrari i per tant allunyada de qualsevol efecte d'illa de calor urbana.

Taula 3: Estacions meteorològiques utilitzades en l'anàlisi numèric

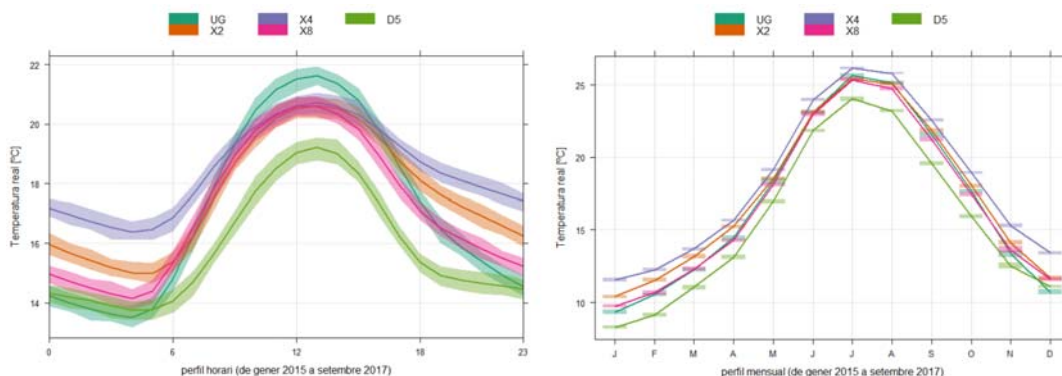
codi	estacio	municipi	lat	lon	altitud
D5	Meteocat. Barcelona - Observatori Fabra	Barcelona	41.41843	2.12388	411
UG	Meteocat. Viladecans	Viladecans	41.29928	2.03787	3
X2	Meteocat. Barcelona - Zoo	Barcelona	41.38943	2.18847	7
X4	Meteocat. Barcelona - el Raval	Barcelona	41.38390	2.16775	33
X8	Meteocat. Barcelona - Zona Universitària	Barcelona	41.37919	2.10540	79

Font: Barcelona Regional

Les dues gràfiques següents mostren la mitjana i interval de confiança al 95% del perfil horari i mensual de la sèrie històrica analitzada (de gener de 2015 fins setembre de 2017) de la temperatura real de les estacions de Barcelona (D5, X2, X4 i X8) i la de referència (UG).

Tot i que, com s'ha comentat anteriorment, no s'utilitzaran aquests resultats (temperatura real) per demostrar l'efecte d'illa de calor ja que són gràfiques que no tenen anul·lat el GTV.

Gràfic 1: Mitjana i interval de confiança al 95% del perfil horari i mensual de la temperatura real de les estacions de Barcelona: D5, X2, X4 i X8 i la de referència: UG



Font: Barcelona Regional

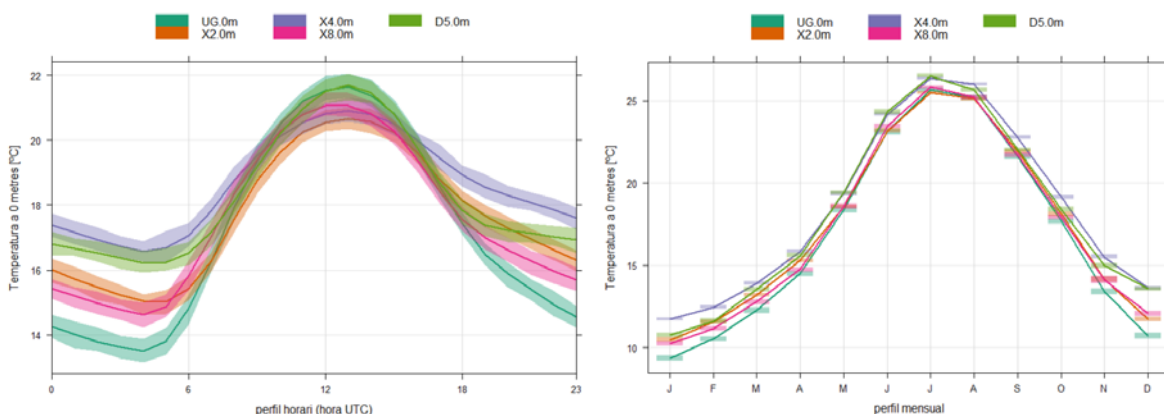
Si es considera l'efecte del GTV, i es projecta la temperatura a l'alçada de 0 metres es pot observar, a les gràfiques següents, com la temperatura s'igualava a les hores de màxima radiació i es separa a les hores nocturnes.

De fet en horari nocturn és l'estació de referència: Viladecans [UG] la que marca els mínims, fet diferent a les anteriors dues gràfiques que la que marcava els mínims era l'estació a major alçada: Observatori Fabra [D5]. Per tant es pot dir que aïllant l'efecte alçada, i observant les hores

nocturnes (quan l'efecte illa de calor es manifesta més) resulta com l'estació del Raval [X4] és la que sembla que major temperatura té.

Observant el perfil mensual (a la dreta) s'observa com les corbes de temperatura mitjana mensual presenten major separació als mesos d'hivern que als mesos d'estiu, situació típica de l'efecte illa de calor urbana que té major incidència a l'hivern.

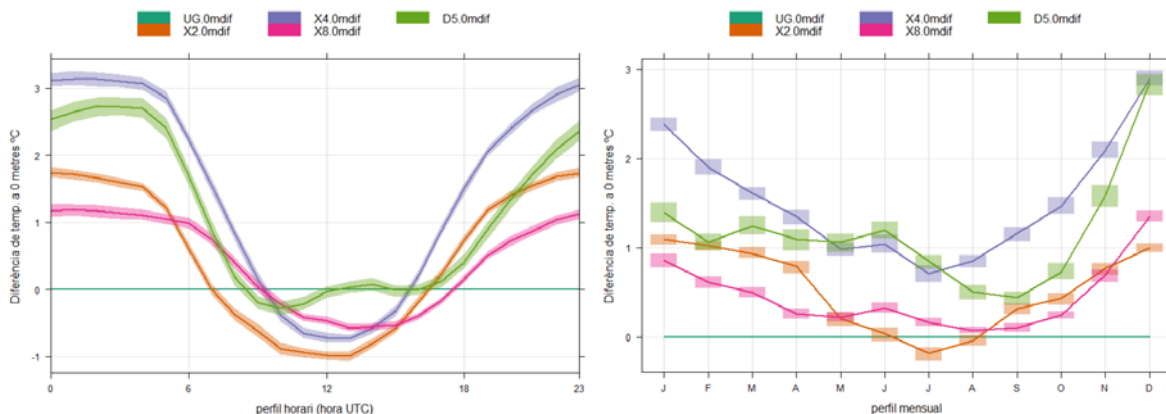
Gràfic 2: Mitjana i interval de confiança al 95% del perfil horari i mensual de la temperatura 0 metres de les estacions de Barcelona: D5, X2, X4 i X8 i la de referència: UG



Font: Barcelona Regional

Per analitzar amb major detall la diferència de temperatura entre les estacions de la ciutat amb l'entorn extern, les següents gràfiques mostres l'efecte de restar de temperatura de les estacions de Barcelona amb l'estació de referència de Viladecans (línia horitzontal ubicada al zero).

Gràfic 3: Mitjana i interval de confiança al 95% del perfil horari i mensual de la diferència de temperatura a 0 metres de les estacions de Barcelona: D5, X2, X4 i X8 amb la de referència: UG



Font: Barcelona Regional

En termes generals la temperatura de les estacions de Barcelona són superiors a l'horari nocturn a l'estació de referència (línia horitzontal) i inferiors en horari diürn. Aquest fet és típic de l'efecte d'illa de calor urbà que afecta a la temperatura de l'aire especialment a les hores nocturnes i a l'hivern.

Així es pot observar com al migdia (a les hores de major radiació solar), la temperatura de les estacions de Barcelona és menor que la de Viladecans (excepte l'estació de l'Observatori Fabra). Això segurament és degut a que al migdia l'absorció d'energia dels materials urbans poden fer reduir la temperatura ambient a la ciutat comparada amb una externa a la ciutat.

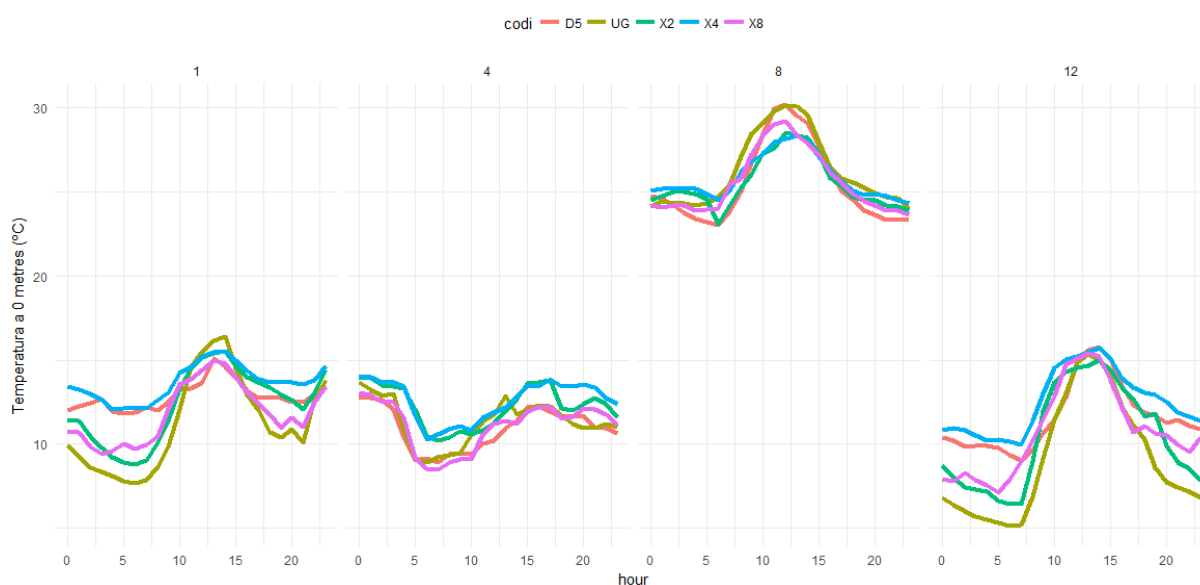
Per contra, l'alliberació a la nit d'aquesta energia absorbida durant el dia, fa que a la tarda/nit les estacions urbanes tinguin temperatures de fins a +3°C (en mitjana anual) entre les 23h i les 3h del matí.

També es pot observar com l'estació meteorològica del Raval és la que major efecte illa de calor té a la nit assolint valors de fins +3°C, mentre que l'estació de Zona Universitària [X8] és la que menor efecte demostra a la nit amb un increment de +1°C.

Realitzant el mateix anàlisi seguint el perfil mensual (imatge anterior figura de la dreta), s'observa com l'efecte illa de calor és més accentuat a les èpoques d'hivern, especialment al desembre, i de menor efecte als mesos d'estiu.

La següent gràfica mostra l'evolució horària de la temperatura projectada a 0 metres en un dia qualsevol. Es mostra el primer dia dels mesos de gener, abril, agost i desembre de 2016. Es pot observar com els mesos d'hivern a la nit, es quan major divergència de temperatura hi ha respecte l'estació de referència de Viladecans [UG].

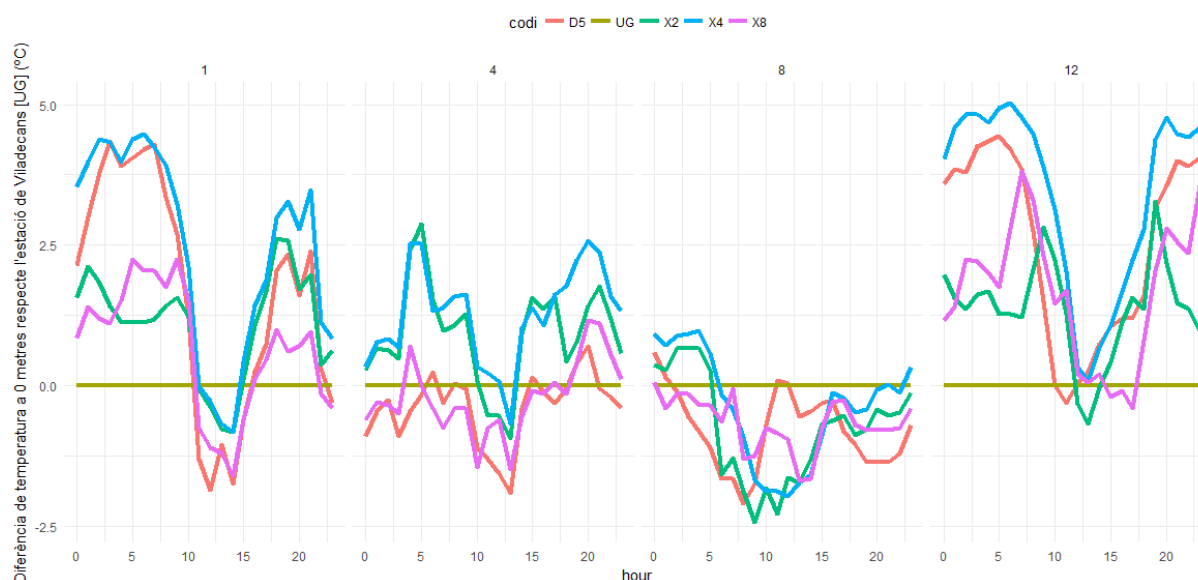
Gràfic 4: Exemple de la temperatura projectada a 0 metres d'alçada del dia 1 de gener, abril, agost i desembre de 2016



Font: Barcelona Regional

Si es realitza el mateix exercici però observant la diferència de temperatures s'observa clarament com en els mesos d'hivern podem trobar a la nit variacions de fins a 4°C o 5°C a la nit a l'estació del Raval [X4] i l'Observatori Fabra [D5], respecte la temperatura de l'estació de Viladecans [UG].

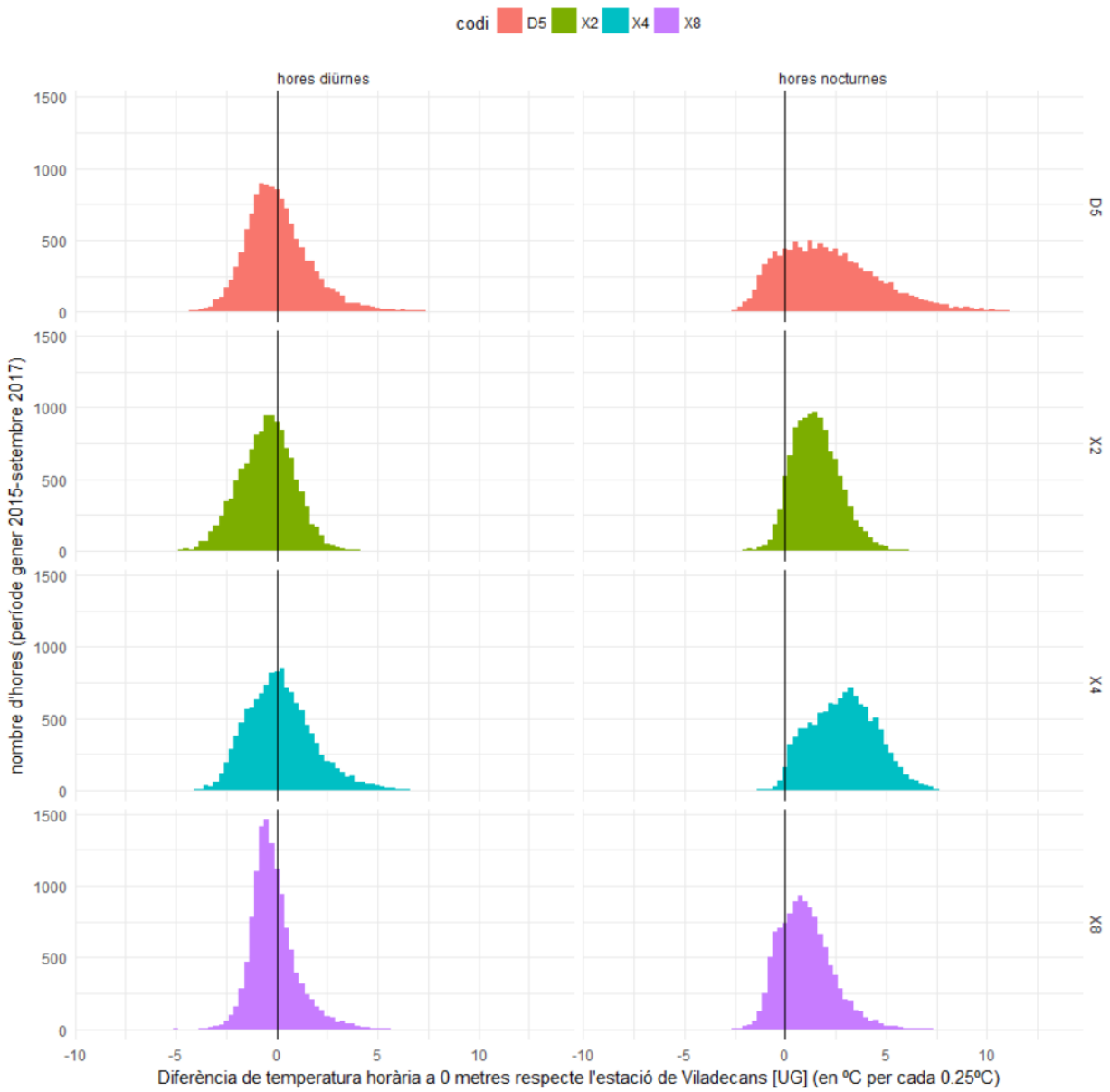
Gràfic 5: Exemple de la diferència de la temperatura a 0 metres d'alçada respecte l'estació de Viladecans [UG] del dia 1 de gener, abril, agost i desembre de 2016



Font: Barcelona Regional

En el següent histograma es pot observar com l'efecte illa de calor va arribar a assolir, en moments molt puntuals, uns valors màxims en hores nocturnes de fins a 7,5°C al Raval [X4] i Zona Universitària [X8], i superant els 12°C a l'Observatori Fabra [D5]. Tot i això com ja s'ha comentat anteriorment l'estació de l'Observatori Fabra està influenciada per altres efectes, per tant a l'hora de considerar el valor màxim assolit per l'illa de calor podríem dir que realment a la ciutat està entre 7 i 8°C, valors que històricament s'han assolit majoritàriament al mes de febrer.

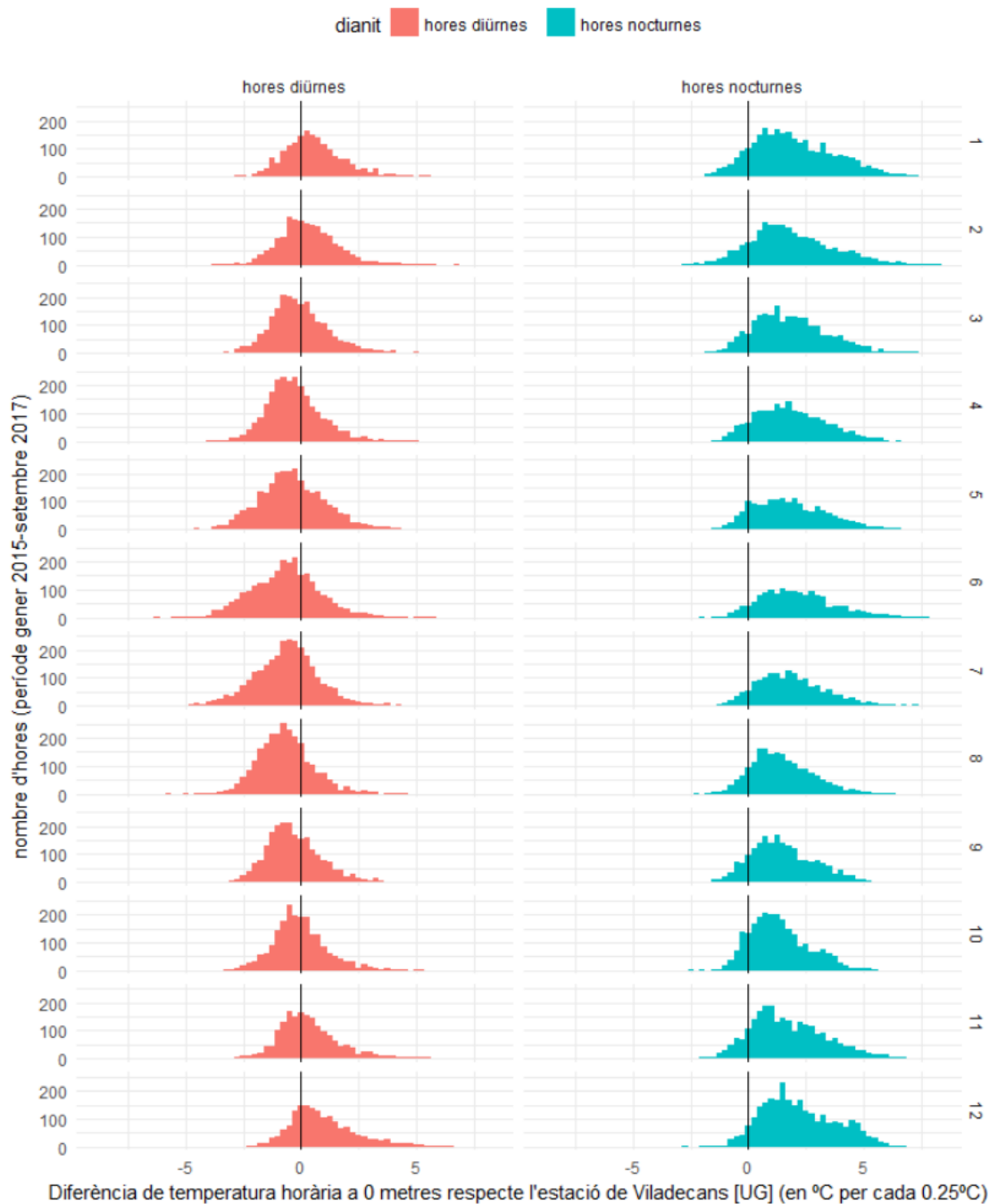
Gràfic 6: Histograma de l'efecte illa de calor amb resolució horària de gener de 2015 a setembre de 2017



Font: Barcelona Regional

Analitzant per mesos l'efecte illa de calor màxim en hores nocturnes, i sense tenir en compte l'estació de l'Observatori Fabra [D5] que ja hem comentat té altres influències. Es pot observar a la gràfica següent com els mesos amb aquest efecte màxim van del novembre al març, tot i que al juny i juliol també hi ha un determinat nombre d'hores amb altes temperatures nocturnes.

Gràfic 7: Histograma de la diferència de temperatura horària (estacions: X2,X4,X8, sense D5)



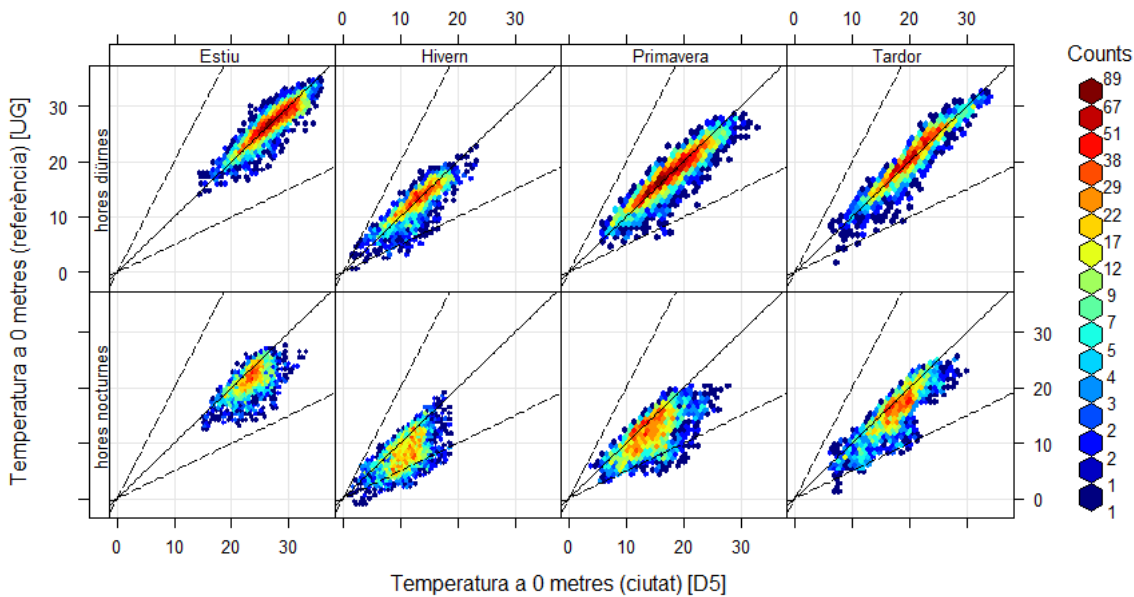
Font: Barcelona Regional

Una altra manera de visualitzar l'efecte de l'illa de calor és fer un anàlisi de freqüència de correlació entre la temperatura dins de la ciutat i la temperatura de l'estació de referència. En les properes gràfiques es mostra, en "l'eix y", la temperatura corregida a 0 metres de l'estació de Viladecans [UG], i en "l'eix x" la temperatura de cadascuna de les estacions de Barcelona.

Les gràfiques mostren la freqüència (nombre de vegades que succeeix) cada punt del gràfic (*Counts*). A més es realitza l'anàlisi separant les dades segons època de l'any³⁵ i segons efecte en hores diürnes o nocturnes³⁶. Per l'anàlisi s'ha utilitzat la sèrie disponible de gener 2015 a setembre de 2017.

Es pot observar clarament a la gràfica següent, i per l'Observatori Fabra [D5], com l'efecte de l'illa de calor al llarg del dia és poc apreciable (els punts vermells, que indiquen major freqüència, es situen en la línia diagonal de correlació). En canvi a les hores nocturnes si que hi ha un efecte d'illa de calor urbana, especialment apreciable a la primavera i a l'hivern.

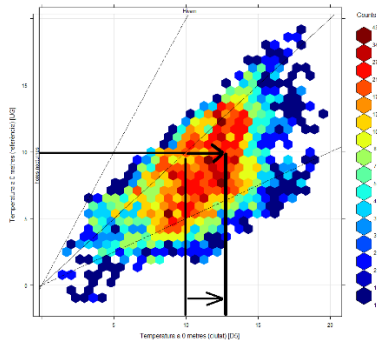
Gràfic 8: Diagrama de freqüència de dispersió entre temperatura urbana (eix x) i temperatura rural (eix y): Estació de l'Observatori Fabra [D5]



Font: Barcelona Regional

³⁵ Considerant la següent assignació → Primavera: març, abril, maig. Estiu: juny, juliol, agost. Tardor: setembre, octubre, novembre. Hivern: desembre, gener, febrer

³⁶ Segons la sortida i posta de sol per la latitud i longitud de Barcelona

Gràfic 9: Exemple de com llegir l'efecte illa de calor en el diagrama

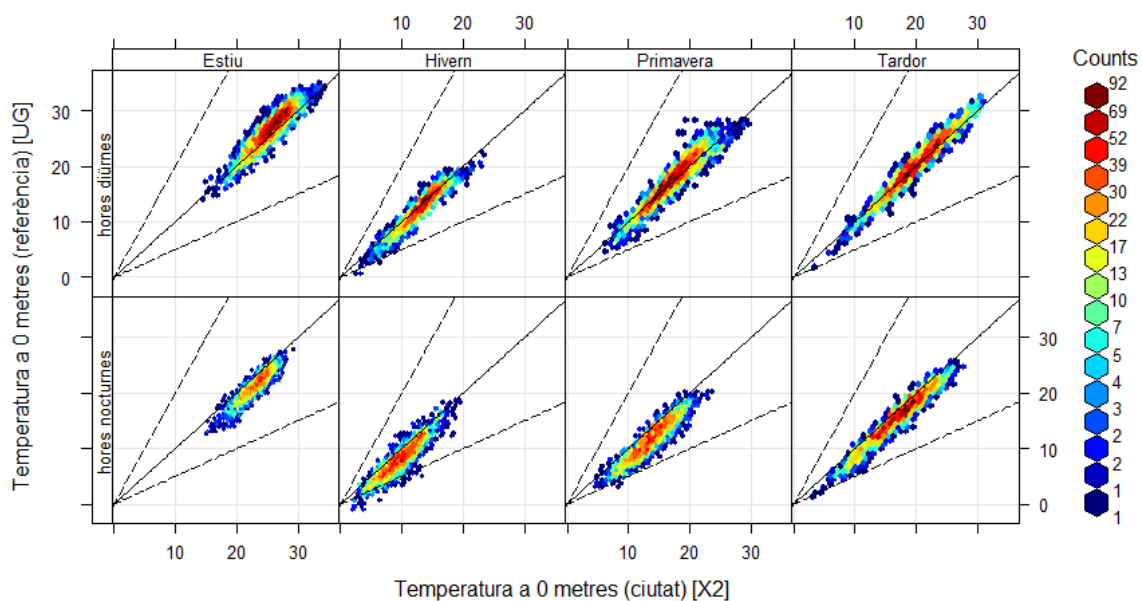
Aquest efecte es pot observar degut a que la major freqüència succeeix per sota de la línia diagonal de correlació ideal, o sigui en l'exemple veiem que la temperatura (ajustada a 0 metres) de l'Observatori Fabra, tendeix a desplaçar-se cap a la dreta de la línia diagonal de correlació.

Aquest fet vol dir que hi ha una major temperatura a l'Observatori Fabra que a l'estació de referència externa a la ciutat.

Font: Barcelona Regional

També s'observa per l'estació de l'Observatori Fabra una major dispersió del núvol de punts que el de les altres estacions meteorològiques de Barcelona (com es podrà observar en les gràfiques següents). Això pot ser degut a que l'Observatori Fabra, en estar situat a la muntanya de Collserola pot ser que rebi l'efecte de les brises marines a la tarda que poden transportar part de l'illa de calor de la ciutat cap a l'interior, i per tant accentuant-ne aquest efecte.

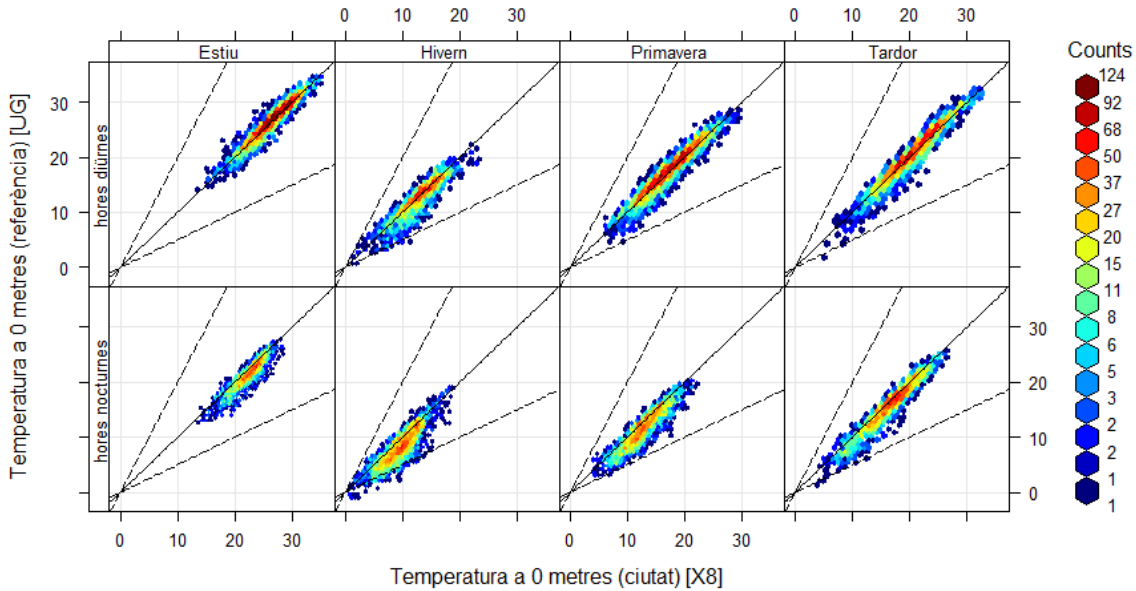
Per l'estació meteorològica del Zoo [X2] l'efecte és similar que a l'Observatori Fabra, a diferència de que hi ha una menor dispersió del núvol de punts en ser una estació situada en mig de la trama de la ciutat i a cota baixa i segurament esta menys afectada per les brises marines. Tot i això també s'observa l'efecte illa de calor especialment a les hores nocturnes i amb major efecte als mesos d'hivern.

Gràfic 10: Diagrama de freqüència de dispersió entre temperatura urbana (eix x) i temperatura rural (eix y): Estació del Zoo [X2]

Font: Barcelona Regional

A l'estació de Zona Universitària, [X8], potser és la que menys efecte illa de calor pel que s'observa segons l'anàlisi de freqüència, tot i que sí que s'aprecia aquest efecte a les hores nocturnes de l'hivern i lleugerament a la primavera.

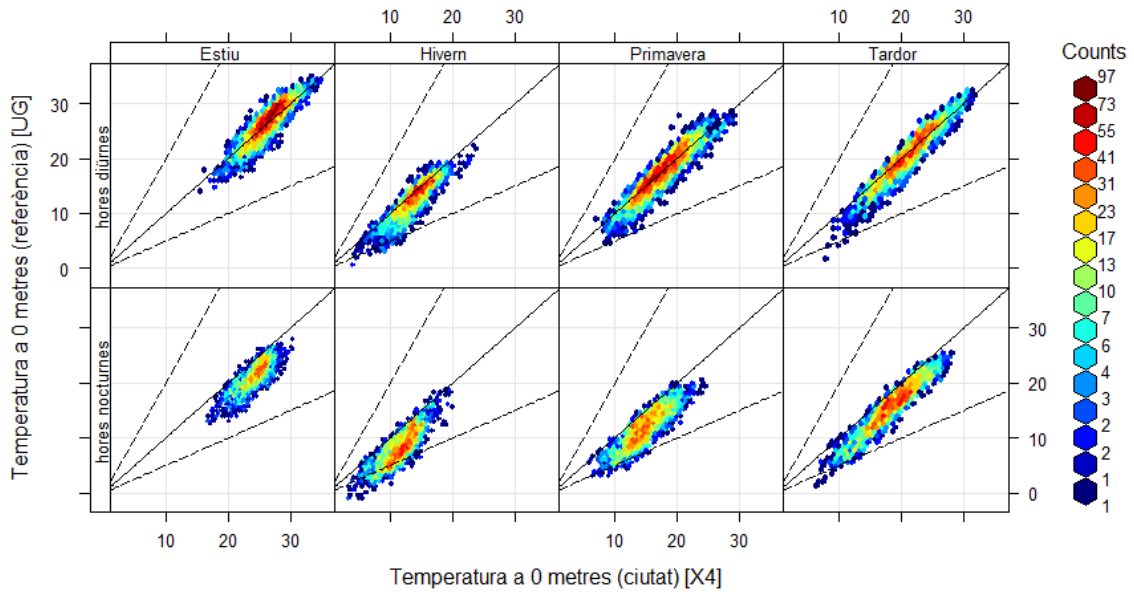
Gràfic 11: Diagrama de freqüència de dispersió entre temperatura urbana (eix x) i temperatura rural (eix y): Estació de Zona Universitària [X8]



Font: Barcelona Regional

Finalment, a l'estació del Raval [X4] també es troba l'efecte illa de calor nocturna. La diferència en aquest cas és que també s'observa en els mesos d'estiu i tardor, fet que no s'ha apreciat de manera tant clara a les altres tres estacions. Potser és perquè aquesta estació es troba sobre d'un edifici i dins d'una trama urbana densa.

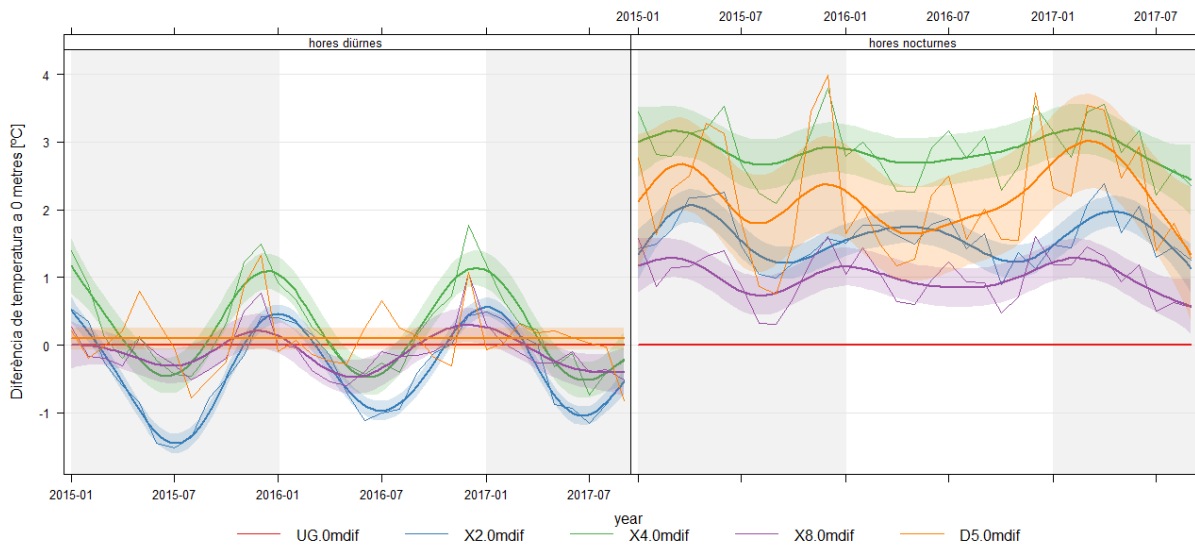
Gràfic 12: Diagrama de freqüència de dispersió entre temperatura urbana (eix x) i temperatura rural (eix y): Estació del Raval [X4]



Font: Barcelona Regional

Finalment, analitzant l'evolució de la mitjana i l'interval de confiança al 95% de la diferència de temperatura a 0 metres d'alçada des del gener de 2015, es pot observar a la gràfica següent com per les hores diürnes i en mitjana no s'aprecia un efecte d'illa de calor (tot i que sí que s'aprecien les oscil·lacions de l'efecte estacionari de la meteorologia). En canvi per les hores nocturnes s'observa clarament un efecte mantingut d'illa de calor per totes les estacions de Barcelona.

Gràfic 13: Evolució temporal de l'efecte illa de calor diürn i nocturn



Font: Barcelona Regional

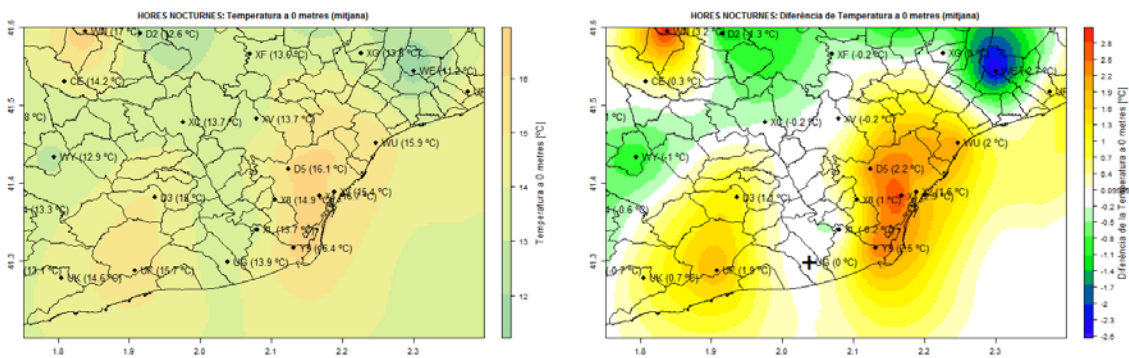
2.3.3.3 Anàlisi territorial

Per l'anàlisi territorial, que comporta la realització de mapes, s'han utilitzat totes les estacions meteorològiques de Catalunya (per així disposar de la millor interpolació territorial de dades possible), tot i que els resultats dels mapes mostren exclusivament la zona més propera a Barcelona i el seu entorn.

En el mapa següent de l'esquerra es mostra la temperatura mitjana (projectada a 0 metres per l'efecte GTV) exclusivament de les hores nocturnes per el període de gener de 2015 a setembre de 2017 de les estacions del Servei Meteorològic de Catalunya amb una interpolació de la temperatura. El mapa de la dreta mostra, pel mateix període, la mitjana de la diferència de la temperatura (també projectada a 0 metres per l'efecte GTV) en hores nocturnes respecte l'estació de referència de Viladecans [UG].

Com es pot observar en el mapa següent de la dreta, l'efecte illa de calor en hores nocturnes es mostra clarament al centre de Barcelona, marcant una diferència de fins a casi +3°C [a l'estació del Raval], per diluir-se a mida que la ciutat es fa menys densa.

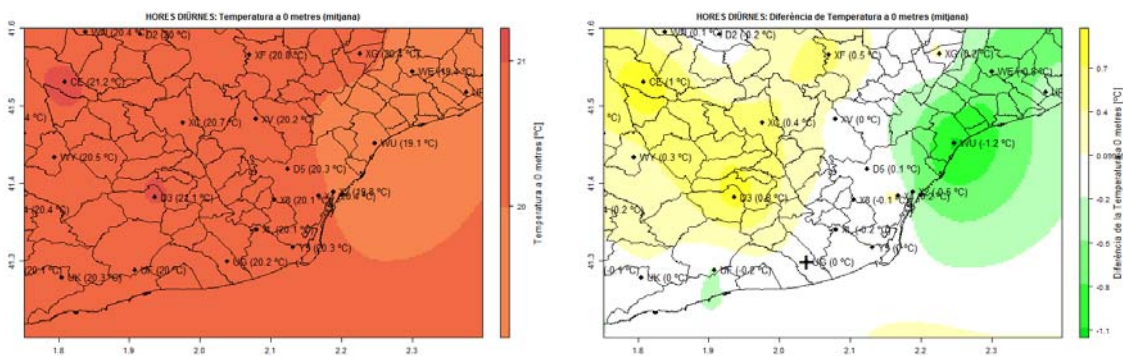
Imatge 40: Mapa d'interpolació de la diferència de temperatura a 0 metres: hores nocturnes



Font: Barcelona Regional

En canvi en hores diürnes, i en valor mitjà pel mateix període de gener de 2015 a setembre de 2017, l'efecte illa de calor és molt lleu o pràcticament menyspreable.

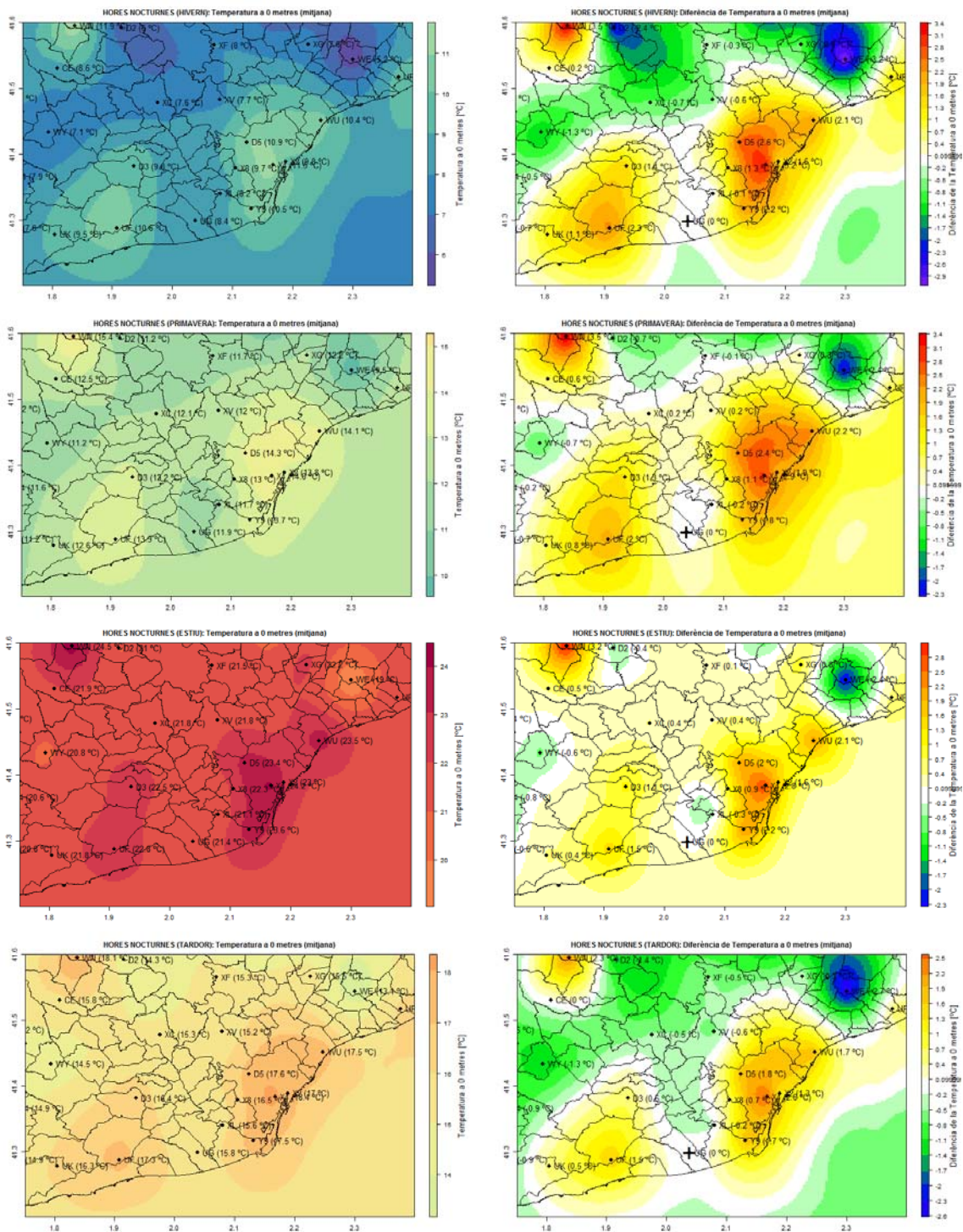
Imatge 41: Mapa d'interpolació de la diferència de temperatura a 0 metres: hores diürnes



Font: Barcelona Regional

Els mapes següents mostren l'efecte illa de calor en horari nocturn, però desagregant l'efecte segons època de l'any. Es pot observar com l'illa de calor és més intensa a l'hivern i menys intensa a l'estiu i la tardor.

Imatge 42: Mapa d'interpolació de la diferència de temperatura a 0 metres: hores nocturnes – Hivern, Primavera, Estiu i Tardor respectivament



Font: Barcelona Regional

2.3.3.4 Evolució històrica de l'illa de calor

Per analitzar l'evolució històrica de l'illa de calor, s'ha utilitzat la mateixa metodologia que anteriorment (GTV amb referència a una estació externa a la ciutat). La diferència respecte apartats anteriors és que s'han utilitzat les dades històriques més antigues disponibles de les estacions meteorològiques de l'Observatori Fabra [D5], Zoo [X2], Raval [X4] i de l'estació de referència de Viladecans [UG].

L'històric de dades es remunta als anys 90 (per l'Observatori Fabra [D5] i l'estació de Viladecans [UG]), mentre que les estacions de Zoo [X2] i Raval [X4] daten del 2006. La taula següent resumeix les finestres temporals de dades utilitzades per aquest anàlisi.

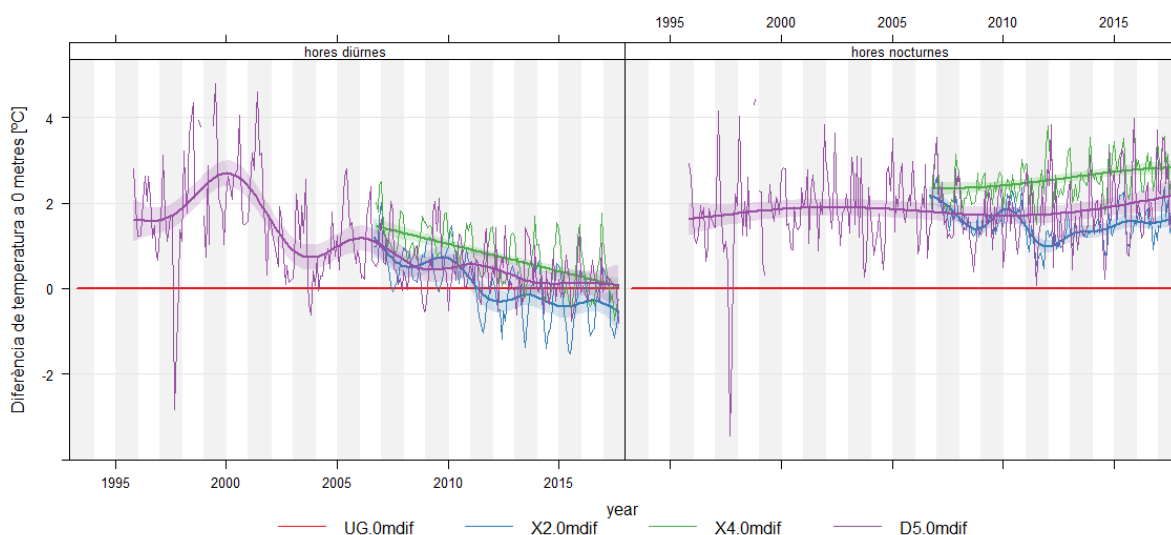
Taula 4: Franja de dades utilitzades per l'anàlisi històric

D5	1995-11-03	2017-09-30
UG	1993-04-29	2017-09-30
X2	2006-09-22	2017-09-30
X4	2006-10-11	2017-09-30

Font: Barcelona Regional

L'evolució històrica de la diferència de temperatura projectada a 0 metres, mostra com en horari nocturn (on es produeix l'efecte illa de calor), en termes generals totes les estacions de Barcelona tenen una tendència a incrementar aquest efecte especialment en la última dècada. Mentre que en hores diürnes hi ha una tendència a disminuir-lo.

Gràfic 14: Evolució històrica de l'efecte illa de calor diürn i nocturn

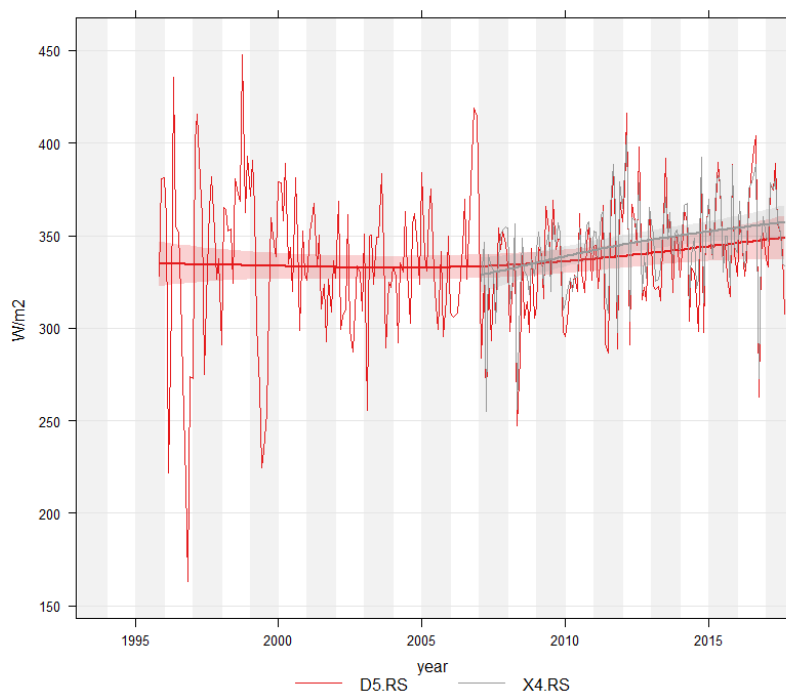


Font: Barcelona Regional

Segurament hi ha diversos factors involucrats però un dels més importants pot ser que a mida que les temperatures augmenten pel canvi climàtic conjuntament amb una major radiació solar (com es pot apreciar en la gràfica següent), l'absorció durant el dia d'energia dels materials urbans és més intensa, fet que explicaria una disminució de la temperatura relativa diürna. Després aquesta energia absorbida al llarg del dia seria alliberada en horari nocturn provocant una tendència a l'alça de l'efecte illa de calor a les estacions urbanes.

Analitzant l'evolució de la irradiació global a les estacions de Barcelona del Raval [X4] i de l'Observatori Fabra [D5], es pot observar com hi ha una major irradiació (en mitjana anual i extraient l'efecte estacional) a partir de l'any 2005. Fet que explicaria en part l'increment en l'efecte illa de calor dels últims anys.

Gràfic 15: Evolució de la irradiància solar global – mitjana en hores diürnes



Font: Barcelona Regional

2.3.3.5 Recapitulació

Segons l'anàlisi estadístic realitzat utilitzant les dades de les estacions del Servei Meteorològic de Catalunya entre gener de 2015 i setembre de 2017, la major incidència de l'efecte illa de calor es troba a les hores nocturnes degut a l'alliberació del calor acumulat al llarg del dia pels materials de construcció de les ciutat.

Dins aquest període, és l'estació del Raval [X4] la que major increment presenta amb una mitjana anual (en horari nocturn) de 2,89°C, li segueixen l'Observatori Fabra [D5] amb 2,21°C, l'estació del Zoo [X2] amb 1,56°C i finalment la Zona Universitària [X8] amb 1,02°C.

La taula següent mostra les mitjanes de l'efecte illa de calor del període gener de 2015 a setembre de 2017, es mostren els valors totals i desagregats per horari diürn i nocturn. A més també s'indica per cada mitjana el seu interval de confiança calculat al 95%.

Taula 5: Efecte de l'illa de calor a Barcelona (mitjana i interval de confiança al 95%) del període gener de 2015 a setembre de 2017 – per període diürn/nocturn

illa calor 2015-2017	mitjana+ic [X4]	mitjana+ic [D5]	mitjana+ic [X2]	mitjana+ic [X8]
hores diürnes	0.15 ± 0.03	0.09 ± 0.03	-0.48 ± 0.02	-0.14 ± 0.02
hores nocturnes	2.89 ± 0.03	2.21 ± 0.05	1.56 ± 0.02	1.02 ± 0.02
TOTAL	1.48 ± 0.03	1.12 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.42 ± 0.02

Font: Barcelona Regional

Per període de l'any, i només observant *les hores nocturnes*, l'efecte illa de calor és més intens a l'hivern, així es demostra amb l'anàlisi fet i és coincident amb el treball d'altres autors (Javier Martin Vide³⁷). A la taula següent es pot observar com a l'hivern s'assoleix, en mitjana, els 3,18°C a l'estació del Raval [X4] o els 2,59°C a l'Observatori Fabra [D5]. La única estació on a la primavera i a l'estiu l'efecte illa de calor és major que a l'hivern és a l'estació del Zoo [X2].

Taula 6: Efecte de l'illa de calor a Barcelona (mitjana i interval de confiança al 95%) del període gener de 2015 a setembre de 2017 – per estació de l'any

illa calor 2015-2017	estació	mitjana+ic [X4]	mitjana+ic [D5]	mitjana+ic [X2]	mitjana+ic [X8]
hores nocturnes	Estiu	2.79 ± 0.06	1.99 ± 0.09	1.61 ± 0.04	0.88 ± 0.04
hores nocturnes	Hivern	3.18 ± 0.06	2.59 ± 0.09	1.47 ± 0.04	1.33 ± 0.05
hores nocturnes	Primavera	2.92 ± 0.06	2.39 ± 0.1	1.9 ± 0.04	1.08 ± 0.05
hores nocturnes	Tardor	2.58 ± 0.05	1.76 ± 0.08	1.24 ± 0.04	0.71 ± 0.04
TOTAL HORES NOCTURNES	---	2.89 ± 0.03	2.21 ± 0.05	1.56 ± 0.02	1.02 ± 0.02

Font: Barcelona Regional

Analitzant l'efecte per mesos de l'any, i també només observant *les hores nocturnes*, s'obté que el mes amb major intensitat és el desembre (seguits del novembre i gener) en totes les estacions menys a l'estació del Zoo [X2] on destaca l'abril i el juny, també amb valors elevats a les altres

³⁷ J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

estacions de la ciutat. Per tant d'alguna manera la ubicació de l'estació del Zoo té una regulació que mitiga l'efecte illa de calor a l'hivern, però no es capaç de fer-ho en la mateixa intensitat en els altres mesos. A la taula següent s'observa la distribució de l'efecte illa calor per mesos.

Taula 7: Efecte de l'illa de calor a Barcelona (mitjana i interval de confiança al 95%) del període gener de 2015 a setembre de 2017 – per mesos de l'any

illa calor 2015-2017	mes	mitjana+ic [X4]	mitjana+ic [D5]	mitjana+ic [X2]	mitjana+ic [X8]
hores nocturnes	1	3.13 ± 0.09	2.24 ± 0.13	1.47 ± 0.07	1.27 ± 0.08
hores nocturnes	2	2.86 ± 0.11	1.96 ± 0.15	1.57 ± 0.08	1.16 ± 0.1
hores nocturnes	3	2.97 ± 0.1	2.43 ± 0.18	1.85 ± 0.07	1.22 ± 0.09
hores nocturnes	4	2.99 ± 0.1	2.38 ± 0.17	2.06 ± 0.08	1.04 ± 0.08
hores nocturnes	5	2.77 ± 0.11	2.34 ± 0.17	1.78 ± 0.08	0.95 ± 0.08
hores nocturnes	6	3.21 ± 0.12	2.77 ± 0.18	2.03 ± 0.08	1.19 ± 0.09
hores nocturnes	7	2.68 ± 0.1	1.91 ± 0.14	1.54 ± 0.07	0.87 ± 0.07
hores nocturnes	8	2.54 ± 0.08	1.41 ± 0.11	1.31 ± 0.06	0.63 ± 0.06
hores nocturnes	9	2.5 ± 0.08	1.34 ± 0.1	1.3 ± 0.06	0.59 ± 0.06
hores nocturnes	10	2.38 ± 0.08	1.53 ± 0.12	1.06 ± 0.06	0.58 ± 0.06
hores nocturnes	11	2.89 ± 0.11	2.5 ± 0.19	1.36 ± 0.07	0.97 ± 0.1
hores nocturnes	12	3.66 ± 0.09	3.85 ± 0.16	1.35 ± 0.06	1.61 ± 0.08
TOTAL HORES NOCTURNES	---	2.89 ± 0.03	2.21 ± 0.05	1.56 ± 0.02	1.02 ± 0.02

Font: Barcelona Regional

A més, analitzant el màxim efecte horària d'illa de calor observat a les estacions de la ciutat (sense considerar l'Observatori Fabra que té altres efectes associats), es pot afirmar que en moments puntuals es pot arribar a assolir un efecte illa de calor de fins a 7 o 8°C majoritàriament això succeeix al mes de febrer.

També s'ha analitzat l'evolució històrica de l'efecte illa de calor utilitzant el màxim període de dades de les estacions meteorològiques de Barcelona (des dels anys 90 per l'Observatori Fabra [D5] i l'estació de referència de Viladecans [UG], i des del 2006 per les estacions del Zoo [X2] i Raval [X4]). En termes generals s'observa com totes les estacions de Barcelona tenen una tendència a incrementar l'efecte illa de calor en horari nocturn especialment en la última dècada. Segurament hi ha diversos factors involucrats però un dels més importants pot ser un augment de les temperatures pel canvi climàtic conjuntament amb una major intensitat d'irradiació solar, fet que pot induir a una major acumulació de calor al llarg del dia per ser alliberat a les hores nocturnes.

3. CONCLUSIONS



En aquest capítol de l'estudi dels impactes del canvi climàtic a Barcelona es descriu i analitza la informació disponible sobre l'efecte illa de calor a Barcelona i el seu entorn.

Inicialment i després d'una contextualització al fenomen, es presenten i analitzen per Barcelona els principals elements que hi tenen influència. En relació a les fonts de calor, la radiació solar i el calor antropogènic; en relació als materials de superfície, l'albedo i la inèrcia tèrmica; en relació a la morfologia urbana, el *sky view factor* i *urban street canyon*; i en relació a les superfícies verdes i naturals, la vegetació (NDVI), el paper de l'aigua i la impermeabilització del sòl. Tots aquests paràmetres determinen que les diferències entre la temperatura de dins i fora de la ciutat puguin ser diferents, encara que és difícil poder quantificar en quina mesura afecta cadascun d'ells.

Per tal de conèixer i caracteritzar el fenomen, l'estudi de la illa de calor superficial permet veure quins tipus de cobertes retenen o alliberen més o menys el calor, i per tant, poder plantejar quins canvis en les cobertes serien necessaris en llocs que pateixin efecte perjudicial d'illa de calor i s'hi vulgui incidir per reduir la temperatura superficial dels materials. Per altra banda, l'estudi de l'illa de calor atmosfèrica és necessari per valorar no només el que és derivat de l'acumulació i alliberament de calor per part de les superfícies urbanes, sinó també considerar les particularitats microclimàtiques de cada lloc (vents, brises, proximitat a mar o a espais naturals) i poder valorar el que percep el ciutadà directament que és la temperatura de l'aire.

Per tant, un cop presentats els diferents paràmetres i variables a considerar, s'explica el coneixement disponible sobre l'efecte illa de calor de superfície, presentant els resultats del vol tèrmic i les aproximacions realitzades des de Barcelona Regional sobre l'illa de calor superficial a Barcelona.

Finalment, s'expliquen els estudis i anàlisis realitzats sobre l'efecte illa de calor atmosfèrica a Barcelona, començant pel primer estudi de l'any 1990 i l'estudi de 2015 endegat des del METROBS, i seguit d'un anàlisi de l'illa de calor de Barcelona a partir de les dades històriques de temperatura de les estacions del SMC.

Com es pot veure en el treball, Barcelona té illa de calor, però generalment no és molt acusada. Això es pot veure tant estudiant l'illa de calor superficial com l'atmosfèrica.

Des del punt de vista de illa de calor superficial, la imatge resultant del vol tèrmic nocturn de ICGC posa de relleu la presència d'una illa de calor urbana malgrat les alteracions induïdes per la seva condició de ciutat litoral la localització de la màxima intensitat en el districte de l'Eixample, i la seva estructura espacial, disminuint els seus efectes en apropar-se a zones més perifèriques de la ciutat. Per altra banda, el mapa realitzat a partir de Landsat8 en període diürn mostra diferències clares en algunes tipologies de coberta. Per exemple, les cobertes industrials es mostren com les regions més calentes en el mapa diürn de temperatura de superfície degut a que el metall s'escalfa molt de pressa amb l'energia solar, però alhora mostren un patró invers en el mapa nocturn de temperatura de superfície degut a que també es refreden molt de pressa quan la intensitat solar disminueix. El que sí que es manté en els dos mapes de superfície diürn i nocturn és la baixa temperatura de les zones amb vegetació.

L'aproximació realitzada al potencial d'acumulació de calor de la superfície considerant albedo, vegetació i radiació solar permet veure els patrons de comportament general a la ciutat. Per una banda, permet identificar grans parcs de la ciutat, i mostra diferències clares entre barris residencials amb elevada proporció de vegetació i districtes industrials o àrees amb menys verd. Per altra banda es detecten àrees amb cobertes més reflectives com la Zona Franca o el Port

(metall o teulades blanques), altres infraestructures calentes com Sants o la Fira, i es visualitzen fàcilment les grans infraestructures viàries que no tenen vegetació.

La illa de calor superficial determina la illa de calor atmosfèrica, encara que es desconeixi en quin pes hi contribueix cadascun dels paràmetres. Cal tenir en compte, però que la rellevància de l'estudi de l'illa de calor superficial i atmosfèrica també difereix en el període determinant. Mentre que la illa de calor superficial és present al llarg de tot el dia i la nit, però la màxima intensitat es donarà durant el dia i a l'estiu, la illa de calor atmosfèrica no és tant acusada durant el dia, i en canvi a la nit és quan és més intensa.

Els estudis que s'havien realitzat fins al moment sobre l'illa de calor atmosfèrica de Barcelona denotaven una configuració espacial de la illa de calor localitzada principalment en l'Eixample dret. També es mostrava l'efecte refrigerant del riu Besòs i d'alguns parcs urbans de la ciutat.

La màxima intensitat i major freqüència de l'illa de calor es manifestava en horari nocturn d'octubre a març, i especialment durant els mesos d'hivern (destacant el mes de gener). De mitjana, les nits al centre de la ciutat es mostraven uns 2°C més càlides que les de l'aeroport, i un 10% dels dies les diferències superant els 3,5°C. Els episodis de màxima intensitat d'illa de calor es quantificaven en uns 7°C de diferència entre la zona urbana i el seu entorn.

L'anàlisi realitzat a partir de les dades de temperatura de les estacions meteorològiques del SMC reafirma la presència d'illa de calor atmosfèrica a Barcelona i també que la major intensitat sigui en període nocturn i a l'hivern. A més també s'observa que la màxima intensitat succeeix entre novembre i març..

Encara que s'observa com la temperatura de l'aire de dins de la ciutat al migdia és inferior a la de fora segurament degut a l'absorció d'energia dels materials urbans, l'alliberació a la nit d'aquesta energia absorbida és la que fa que a al tarda-nit les estacions urbanes tinguin fins a 3°C (mitjana anual) que les de fora de la ciutat. Els màxims observats són de diferències de temperatura, a les estacions dins la trama urbana de la ciutat, de fins a 7 o 8°C.

De les estacions estudiades l'estació del Raval és la que major increment presenta amb una mitjana anual de 2.89°C, li segueixen l'Observatori Fabra amb 2.21°C, el Zoo amb 1.56°C i finalment la Zona Universitària amb 1.02°C. L'elevada diferència de temperatura de l'Observatori Fabra amb l'estació de fora de la ciutat (ajustant prèviament el gradient tèrmic vertical), pot ser degut a la seva situació a Collserola, on pot rebre la influència de les brises marines que transportin part de l'illa de calor de la ciutat cap a l'interior.

L'anàlisi de l'evolució històrica de les temperatures mostra com hi ha una lleugera tendència a incrementar l'efecte illa de calor atmosfèric en horari nocturn en totes les estacions estudiades de Barcelona. Caldrà tenir en compte aquesta evolució històrica de cara a l'estudi de què pot passar en el futur i especialment els canvis que es poden produir en la illa de calor derivats del canvi climàtic.

És important, per tant, seguir treballant en l'estudi de l'illa de calor de Barcelona. Cal explorar les possibilitats de la modelització de la situació actual i de les possibles situacions futures que es puguin produir en els diferents escenaris de canvi climàtic. La simulació, però, és complexa perquè en l'illa de calor hi intervenen multitud de factors, alguns d'ells difícilment parametrizables, i es desconeix la rellevància relativa de cadascun dels factors. L'avanç en la modelització de la illa de calor de Barcelona és doncs objecte d'un altre estudi ad hoc. Els

resultats dels estudis fets fins al moment serviran per anar calibrant els resultats de la modelització.

4. RECOMANACIONS



Per tal de reduir els efectes de l'illa de calor a Barcelona es fan a continuació una sèrie de recomanacions. Per una banda, s'expliquen les diferents estratègies que s'apliquen a les ciutats per reduir l'efecte illa de calor agrupades en estratègies relacionades amb el verd, els materials i l'urbanisme.

En segon lloc, s'expliquen les estratègies i actuacions que ja es troben en curs a Barcelona i van en benefici de reduir els efectes d'illa de calor de la ciutat.

Finalment, s'identifiquen noves actuacions que caldria plantejar de manera específica per al cas de Barcelona.

Estratègies per reduir l'efecte illa de calor

VERD	MATERIALS	URBANISME
<ul style="list-style-type: none"> • Increment del verd • Cobertes verdes • Murs verds 	<ul style="list-style-type: none"> • Materials de recobriment de superfícies externes • Cobertes fredes • Paviments freds 	<ul style="list-style-type: none"> • Promoure la ventilació natural • Increment del verd a través de l'urbanisme

- Incrementar el verd

La plantació d'arbres i vegetació juga un paper important en el clima de les ciutats per proveir ombra i pel seu paper termoregulator, refredant l'aire de l'entorn gràcies al procés d'evapotranspiració (veure apartat 2.1.3.1 Vegetació – NDVI).

Diverses ciutats han optat per implementar algun mètode de puntuació inserit en el codi de construcció que incorpori les diferents tipologies d'elements d'infraestructura verda per afavorir el verd a la ciutat. Algunes de les ciutats destacades són Seattle, Berlín i Stockholm.

El *Seattle Green Factor* es va incorporar amb els objectius d'aconseguir un bon disseny del paisatge urbà, reduir l'escorrentia superficial, refredar la ciutat durant episodis de calor, proveir hàbitat per ocells i insectes, donar suport a les activitats adjacents i reduir el crim. A l'hora de plantejar una actuació urbanística s'ha d'aconseguir un mínim de puntuació en el Green Factor. En aquest sentit, la implementació de cobertes verdes, jardins regats amb aigua de pluja, murs verds, plantació d'arbres i arbusts, etc. es comptabilitza, i també es considera si es planta al llarg d'un eix per vianants, i s'utilitzen plantes autòctones o es crea un mercat d'aliments³⁸.

En *Biotope Area Factor* de Berlín s'aplica a zones residencials, comercials i d'infraestructures i dóna uns estàndards mínims per canvis estructurals en nous desenvolupaments. Totes les àrees verdes potencials com patis, cobertes, o murs s'inclouen³⁹.

³⁸ <http://www.seattle.gov/dpd/codesrules/changestocode/greenfactor/whatwhy/default.htm>

³⁹ http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/index_en.shtml

Stockholm al 2010 va generar el sistema de puntuació *Green Space Index* per considerar mitigació del canvi climàtic, aspectes socials i biodiversitat. Cada propietat i espai públic ha d'assolir una puntuació mínima, i les superfícies verdes han d'estar adaptades a les condicions que es necessitin a cada lloc. L'índex es va desenvolupar per ser compatible amb altres sistemes de classificació ambiental com BREEAM o LEEDs.

- Cobertes verdes

Consisteixen en la plantació de vegetació mitjana sobre una membrana impermeable. En dies molt assolellats les temperatures poden ser fins a 20-40°C més fredes de un terrat negre convencional⁴⁰. El seu efecte refrescant és el resultat de l'evapotranspiració, i també tenen efecte en la reducció de l'escorrentia superficial i actuen com a aïllants de soroll per als habitatges dels pisos superiors, incrementen la biodiversitat proveint hàbitat per a espècies d'ocells i petits animals, milloren el paisatge urbà i contribueixen a la qualitat de vida.

La seva eficiència en la regulació del clima depèn del manteniment d'un programa de reg i cura de la vegetació.

Les cobertes verdes permeten l'estalvi de 15-45% del consum d'energia total, predominantment degut a la reducció en el cost de refrigeració. Un estudi americà també ha mostrat com a través de l'ombreig, un arbre de 10 anys pot reduir el cost energètic fins al 8%⁴¹.

- Murs verds

El terme murs verds es refereix a vegetació que creix als murs o façanes. Es tracta de plantes enfiladisses que puguen o sobre una façana o en una estructura vertical. Les plantes es poden plantar al terra o amb torretes a qualsevol alçada.

A banda de preveure el guany de calor per part de l'edifici, també contribueixen a la millora visual i al refredament a través de la transpiració. Són una solució a plantejar per façanes amb exposició solar directe on no es pot implementar arbrat al carrer, sent especialment beneficiosos en congostos urbans estrets.

A vegades es planten en mòduls i fins tot amb cultiu hidropònic, però això té un elevat cost d'instal·lació i manteniment.

- Utilitzar materials adequats en les superfícies externes dels edificis i carrers

Diversos estudis avaluen l'efecte directe del canvi d'albedo en les superfícies urbanes i demostren l'eficiència d'utilitzar superfícies reflectives⁴². En tots els casos les temperatures es

⁴⁰ London's Urban Heat Island: A summary for decision makers. Mayor of London, 2006

⁴¹ Urban Heat Reduction through Green Infrastructure (GI): Policy Guidance State Government (VCCCAR, 2012)

⁴² Asimakopoulus 2001, extret de The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi 2011

redueixen però el grau en què refreden depèn de l'estructura de la coberta i del balanç tèrmic global de l'edifici.

Utilitzar materials amb albedo alt redueixen la calor guanyada al llarg del dia. La temperatura de l'asfalt pot arribar als 63°C mentre que el paviments blancs només arriben als 45°C⁴³. Les més baixes temperatures superficials impliquen menys temperatura de l'aire perquè la intensitat del moviment de convecció de la calor és menor en una superfície més freda.

- Cobertes fredes

Els terrats negres emmagatzemen i alliberen una gran quantitat d'energia a l'atmosfera. Les altes temperatures acceleren el deteriorament dels materials i això en edificis amb poc aïllament pot contribuir a incrementar la demanda de refrigeració i reduir el confort tèrmic de l'interior dels edificis en els pisos superiors.

Els terrats freds amb elevada reflectivitat, albedo i emissió tèrmica poden assolir temperatures inferiors, ja que absorbeixen i emmagatzemen menys calor durant el dia i per tant són menys emissors de calor a l'atmosfera durant la nit.

Perquè compleixin la seva funció tèrmicament cal tenir en compte el manteniment i mantenir-los nets sense brutícia i pols que pugui reduir la seva reflectivitat.

El seu ús també té beneficis en la vida útil dels terrats ja que hi ha menys contracció i expansió dels materials i també es redueix el rang de temperatures a que estan sotmesos.

- Paviments freds

La instal·lació de paviments freds comprèn material amb alta reflectivitat solar i bona permeabilitat d'aigua és potencialment una opció efectiva de mitigar les altes temperatures a través de la reducció de l'absorció d'energia solar i l'increment de emmagatzematge d'aigua i el conseqüent potencial refredament per evaporació.

L'ús de paviments freds es fonamenta en les diferències de temperatura que presenten els diferents materials. L'asfalt pot assolir 63°C i els paviments blancs només assoleixen els 45°C⁴⁴.

- Promoure la ventilació natural

Promoure la ventilació natural és la tècnica passiva més efectiva per reduir la temperatura de l'aire de superfície. Això es pot fer a través de resoldre correctament les obertures en els edificis facilitant l'entrada del vent dominant i afavorint també la bona qualitat de l'aire interior de l'edifici; sostres ventilats per reduir el sobreescalfament; variació de les alçades dels

⁴³ Santamouris 2001, extret de The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi 2011

⁴⁴ The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524

edificis; orientació adequada amb obertures adients; increment de la permeabilitat evitant cobertes buides a baixa i mitja alçada⁴⁵.

Estratègies i actuacions en curs a Barcelona

Barcelona, juntament amb altres ciutats com Copenhagen, Rotterdam o Hèlsinki, són ciutats pioneres a Europa en treballar cap a la construcció de ciutats més resilents, incorporant la perspectiva del canvi climàtic en diferents polítiques. S'estan impulsant plans i estratègies a mig i llarg termini per preparar la ciutat pels efectes del canvi climàtic.

- Pla del Verd i la Biodiversitat 2012-2020

L'Ajuntament en els darrers anys ha treballat molt a nivell estratègic en relació amb la infraestructura verda de la ciutat. El document marc que defineix els reptes, objectius i compromisos de l'Ajuntament en relació a la conservació del verd i la biodiversitat de la ciutat és el Pla del Verd i la Biodiversitat de Barcelona. En aquest es defineix la planificació a llarg termini per aconseguir una infraestructura verda que compleixi les funcions ecològiques, ambientals i socials que li són pròpies.

El pla inclou totes les tipologies d'elements que formen part de la infraestructura verda (espais naturals, parcs, jardins, cobertes verdes, jardins verticals) i valora els seus atributs.

El pla planteja per al 2050 una ciutat on natura i urbs interactuïn i es potenciïn mitjançant la connectivitat del verd i la renaturalització de la ciutat. En aquest sentit, identifica una xarxa de corredors verds que fan robusta i funcional la infraestructura ecològica, i planteja com a instrument de renaturalització de la ciutat els espais d'oportunitat (cobertes d'edificis, terrats, balcons, murs i espais residuals) que són susceptibles de transformar-se en noves formes de verd urbà.

Es plantegen com a objectius conservar i millorar el patrimoni natural, assolir la màxima dotació de verd i la seva connectivitat, obtenir els màxims serveis ambientals i socials del verd i la biodiversitat, avançar en el valor que la societat li assigna i fer la ciutat més resilient en front als reptes emergents com el canvi climàtic.

En el capítol V. Biodiversitat del mateix Estudi dels impactes del canvi climàtic a Barcelona, que forma part del Pla Clima, es descriu aquest pla i la relació de la biodiversitat de Barcelona amb el canvi climàtic.

Altres ciutats han elaborat els seus estudis i plans relacionats amb el verd i la biodiversitat. Destaca especialment Melbourne, i el seu treball envers a l'efecte illa de calor i de manera específica sobre el paper de la infraestructura verda en la seva mitigació⁴⁶.

⁴⁵ The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524

⁴⁶ <http://www.vcccar.org.au/responding-to-urban-heat-island-optimising-implementation-green-infrastructure>

- Pla de Buits Urbans amb implicació territorial i social, 2012

El Pla de Buits Urbans amb implicació territorial i social té per objectiu dinamitzar terrenys en desús de la ciutat a través d'activitats d'interès públic de caràcter provisional. Entitats públiques o privades sense ànim de lucre, entitats, associacions, etc. poden optar a la cessió d'un solar per un període d'un any prorrogable a màxim 3 anys. S'hi poden realitzar diferents activitats educatives, esportives, lúdiques o recreatives, culturals, artístiques, ambientals o paisatgístiques, socials o comunitàries.

Al 2012 es va fer la primera convocatòria del Pla de Buits, que va resultar en la cessió temporal de 19 solars, 12 d'aquests segueixen encara en actiu. En la 2a edició del programa resolta a principis de 2016 s'han cedit 6 solars, dels 11 posats a disposició.

Cal destacar que en molts d'aquests espais el verd té un paper fonamental, sobretot en forma d'horts urbans i comunitaris.

- Mesura de govern de terrats vius i cobertes verdes, 2014

El 3 d'octubre de 2014 es va aprovar per Consell Municipal la Mesura de govern per a impulsar els terrats vius i les cobertes verdes a la ciutat.

L'objectiu és abordar per una banda aspectes relacionats amb l'eficiència energètica i l'augment de biodiversitat a la ciutat i per altre propiciar que els ciutadans utilitzin teulades i cobertes per al seu ús lúdic. La mesura busca sinèrgies que permetin incrementar el verd urbà i els seus beneficis a la ciutat biodiversitat, regulació, paisatge urbà i serveis ambientals.

La mesura de govern proposa accions encaminades a afavorir les dues tipologies de cobertes. Per les cobertes verdes es proporcionen ajudes per la seva instal·lació. L'Ajuntament es compromet a treballar mesures que promoguin canvis i modificacions necessàries en normatives i ordenances per promoure el seu ús i instal·lació.

- Compromís de Barcelona pel Clima, 2015

Barcelona com moltes altres ciutats del món estan compromeses amb el desenvolupament sostenible, com ho reflecteix el seu procés d'Agenda 21 iniciat al 1995 amb la signatura de la carta d'Aalborg. La creació del Consell Municipal pel Medi Ambient i la Sostenibilitat, i el Compromís Ciutadà per la Sostenibilitat són elements destacats en aquest procés.

En aquest context i d'acord amb la llarga tradició en la lluita contra el canvi climàtic i les diverses actuacions de planificació per reduir les emissions de GEH, augmentar la generació d'energies renovables i locals, millorar l'eficiència energètica i adaptar-se als impactes esperats, en el marc de la celebració de la COP-21, la 21a Conferència de les Parts de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, Barcelona va signar al 2015 el Compromís pel Clima.

Aquest compromís té com a objectius per al 2030 que Barcelona, des del punt de vista de la mitigació, redueixi un 40% de les emissions de CO₂ equivalents per càpita (respecte al 2005)

i que, des del punt de vista de l'adaptació, incrementi el verd urbà en 1,6 km², és a dir 1 m² per cada habitant .

Pera aconseguir els objectius es defineix un primer full de ruta per als dos primers anys 2015-2017 que inclou el desplegament del Pla del Verd i la Biodiversitat de Barcelona 2020, el desenvolupament d'una estratègia de Resiliència i Adaptació al Canvi Climàtic, el disseny d'un corredor verd que reforci els serveis ambientals i mobilitat sostenible i la creació d'un jardí per a la biodiversitat dirigit a la conservació d'espècies, entre d'altres.

- Pla Director de l'Arbrat 2017-2037

L'Ajuntament en els darrers anys ha treballat molt a nivell estratègic en relació amb la infraestructura verda de la ciutat.

Mostra d'això és la redacció dels plans del Verd i la Biodiversitat de Barcelona i el Pla Director de l'Arbrat.

En el document de vulnerabilitat de la biodiversitat de Barcelona al Canvi Climàtic, que també forma part del Pla de Resiliència i Adaptació al Canvi Climàtic de Barcelona es descriuen aquests dos plans i la relació de la biodiversitat de Barcelona amb el canvi climàtic.

Altres ciutats han elaborat els seus estudis i plans relacionats amb el verd i la biodiversitat. Destaca especialment Melbourne, i el seu treball envers a l'efecte illa de calor i de manera específica sobre el paper de la infraestructura verda en la seva mitigació⁴⁷.

- Mesura de govern “Programa d'impuls de la infraestructura verda urbana”, 2017

Per tal de concretar el Pla del Verd i la Biodiversitat, el 17 de maig de 2017 es va aprovar la mesura de govern sobre el Programa d'impuls de la infraestructura verda urbana. Els objectius principals són incrementar el verd a la ciutat d'acord amb l'objectiu impulsat pel Compromís pel Clima, la millora de la infraestructura verda per obtenir més serveis, i la implicació de la ciutadania en l'increment del verd i de la biodiversitat. Alhora es planteja com a objectiu instrumental el seguiment i avaluació de la infraestructura verda.

Per incrementar el verd es planteja planificar els espais verds urbans com a sistema, considerant la seva multifuncionalitat, fer-los més accessibles a la població buscant l'equilibri, i dissenyar una estratègia alineada amb les diverses infraestructures de la ciutat.

La mesura de govern identifica i caracteritza el verd urbà i defineix una sèrie de mesures per incrementar i millorar la infraestructura verda de Barcelona.

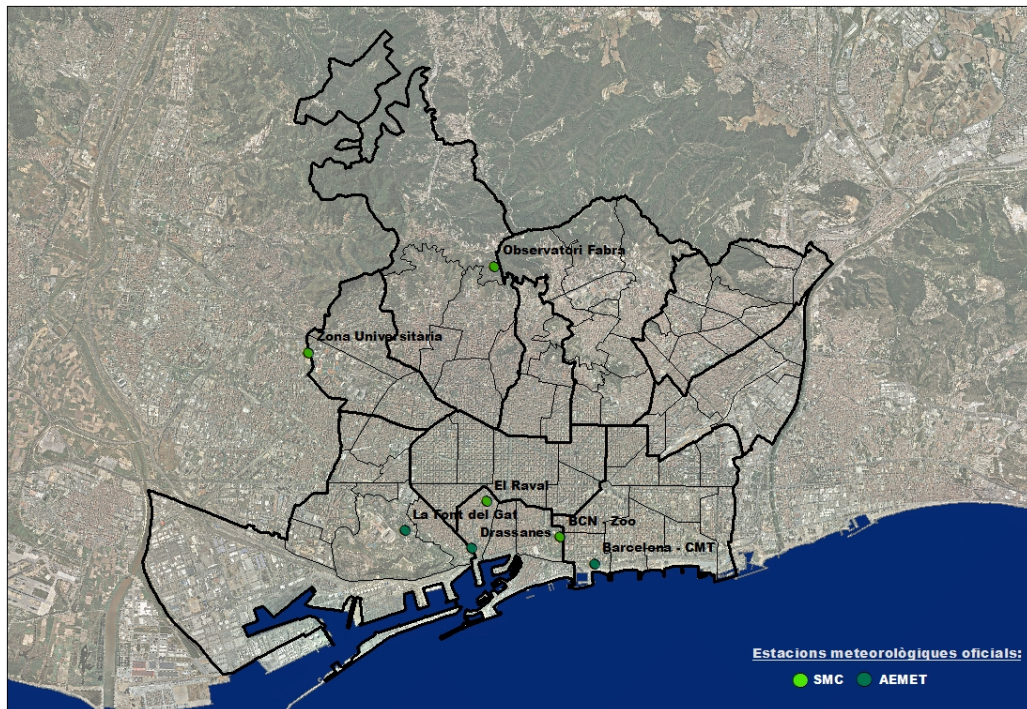
Noves estratègies i actuacions a plantejar per Barcelona

- Caldria ampliar la xarxa d'estacions meteorològiques a la ciutat de Barcelona. Actualment no es disposa d'estacions meteorològiques oficials en la part més central

⁴⁷ <http://www.vcccar.org.au/responding-to-urban-heat-island-optimising-implementation-green-infrastructure>

ni en la zona nord de la ciutat. S'hauria de plantejar posar noves estacions en aquestes zones descobertes. Cal dir que existeixen algunes altres estacions meteorològiques d'altres organismes o associacions⁴⁸ que prenen les dades de temperatura però caldria certificar-les per tal de poder validar les dades que es prenen.

Imatge 43: Estacions meteorològiques oficials a Barcelona (SMC i AEMET)

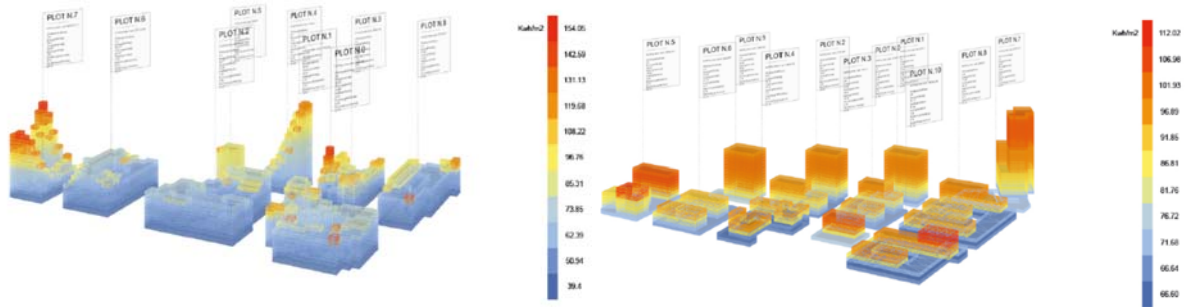


Font: Barcelona Regional a partir de dades del AEMET i SMC

- En l'ampliació d'estacions meteorològiques també caldria considerar la implementació d'estacions en situacions similars de distància al mar i alçada, que permetin estudiar l'efecte refrigerant dels parcs.
- Aprofundir en el coneixement de la regulació tèrmica que aporten els parcs a la ciutat
- Modelització del comportament tèrmic en nous desenvolupaments per influir en els condicionants de morfologia urbana de l'UHI

⁴⁸ Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica de la Generalitat de Catalunya, Xarxa d'observadors privats de Meteoclimatic, Servidor de dades meteorològiques, Xarxa d'observadors privats de Wunderground, Xarxa d'observadors privats de Weathercloud

Imatge 44. Exemple de modelització energètica de nous desenvolupaments



Font: DUMO (BR, 2015)

- Incorporar un índex de verd en la planificació per potenciar l'increment de verd considerant les diferents estratègies possibles i fer-ho adaptat a les necessitats i possibilitats de cada lloc.
- Reg (amb aigua no potable) dels carrers per reduir la temperatura superficial en episodis d'onada de calor en les zones més afectades per altes temperatures.

5. BIBLIOGRAFIA



Moreno et al, 1990. Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona

J Martin Vide et al, 2015. La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Estudi del METROBS

JJ Terrin (Dir), 2015. Villes et changement climatique. [Ilots de chaleur urbans. Parenthesès

EPA – USA, 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics.

Coutts A, Harris R 2013. Urban Heat Island Report: A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation, Victorian Centre for Climate Change Adaptation Research

Dementra Ltd Publishers (2005). Meteorology applied to urban pollution problems-Final report COST Action 715.

Arup/ UK Space Agency London i Arup / University College London

An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface

Wang et al, 2015. Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. Remote Sensing 2015.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG)

Estudi PSAMB mapa solar BR

Estudi PSAMB teixits urbans BR 2014

Primera identificació de la infraestructura verda de Barcelona a partir de l'NDVI (Barcelona Regional, 2016)

London's Urban Heat Island: A summary for decision makers. Mayor of London, 2006

Mike Davies (UCL). Implications of UHI Issues for Urban Planning: a London Perspective.

ARUP, 2014. Reducing urban heat risk: A study on urban heat risk mapping and visualisation.

Shahmohamadi et al 2011. The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Hindawi Publishing Corporation. Urban Studies Research, Volume 2011, Article ID 497524

A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation. Victorian Center for Climate Change Adaptation Research, 2012.

Planning for a cooler future: green infrastructure to reduce urban heat (victorian centre for climate change adaptation research, 2013),

Growing green guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria (State of Victoria through the Department of Environment and Primary Industries, 2014)

Cool Roofs: City of Melbourne Research Report (University of Melbourne, 2011)

Decision principles for the selection and placement of Green Infrastructure. Technical report. VCCCAR, 2013

City of Toronto Guidelines for Biodiverse Green Roofs. Livegreen Toronto. Toronto, 2013.

Planning for a cooler future: green infrastrucutre to reduce urban heat. VCCCAR, 2013.

Mitigating New York City's Heat Island with urban forestry, living roofs and light surfaces. NYSERDA – New York State energy research and development authority, 2006.

Urban heat vulnerability mapping in Amsterdam (and Rotterdam). Alexander Wandl, TU Delft, Faculty of Architecture and the Built Environment, Department of Urbanism. Resilient Cities 2014 - 5th Global Forum on Urban Resilience and Adaptation.

Amsterwarm: Mapping the landuse, health and energy-efficiency implications of the Amsterdam urban heat island. Frank van der Hoeven and Alexander Wandl. Building Serv Eng Res Technol published online 24 June 2014.

Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. EPA, 1992.

Cool and Green roofing manual. NYC Department of Design & Construction Office of Sustainable Design, 2007.

Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Cahier#1. Apur, atelier parisien d'urbanisme, 2012.

Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Cahier#2: simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements. Apur, atelier parisien d'urbanisme, 2014.

La vegetació en el confort microclimàtic. Comparació d'espècies del clima mediterrani de Barcelona. Rojas Cortorreal, Roset i Navés. ACE (Architecture, City and Environment) any 10, num. 29. Octubre 2015.

Pla d'adaptació al canvi climàtic de l'AMB 2015-2020.

Pla del verd i la biodiversitat de Barcelona 2012-2020.

The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Shahmohamadi et al, 2011. Urban studies research. Volume 2011. Article ID 497524.

Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. Bohnenstengel et al, 2012. Quarterly journal of the Royal meteorological society.

Urban adaptation to climate change in Europe 2016. Transforming cities in a changing climate. European Environment Agency. EEA Report No 12/2016.

<http://www.bcn.cat/mambient/newsletters/intranet/Urban%20adaptation%20report.pdf>

Presentació del Pla Director d'arbrat de Barcelona 2016-2036. MASU-EU. Vil·la Florida, 31/05/2016.

Pàgines web:

<https://www.epa.gov/heat-islands>

<http://www.vcccar.org.au/responding-to-urban-heat-island-optimising-implementation-green-infrastructure>

<http://www.toronto.ca/greenroofs/overview.htm>

<http://www.seattle.gov/dpd/permits/greenfactor/Overview/>

http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/index_en.shtml

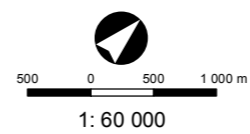
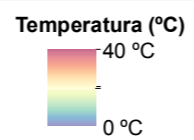
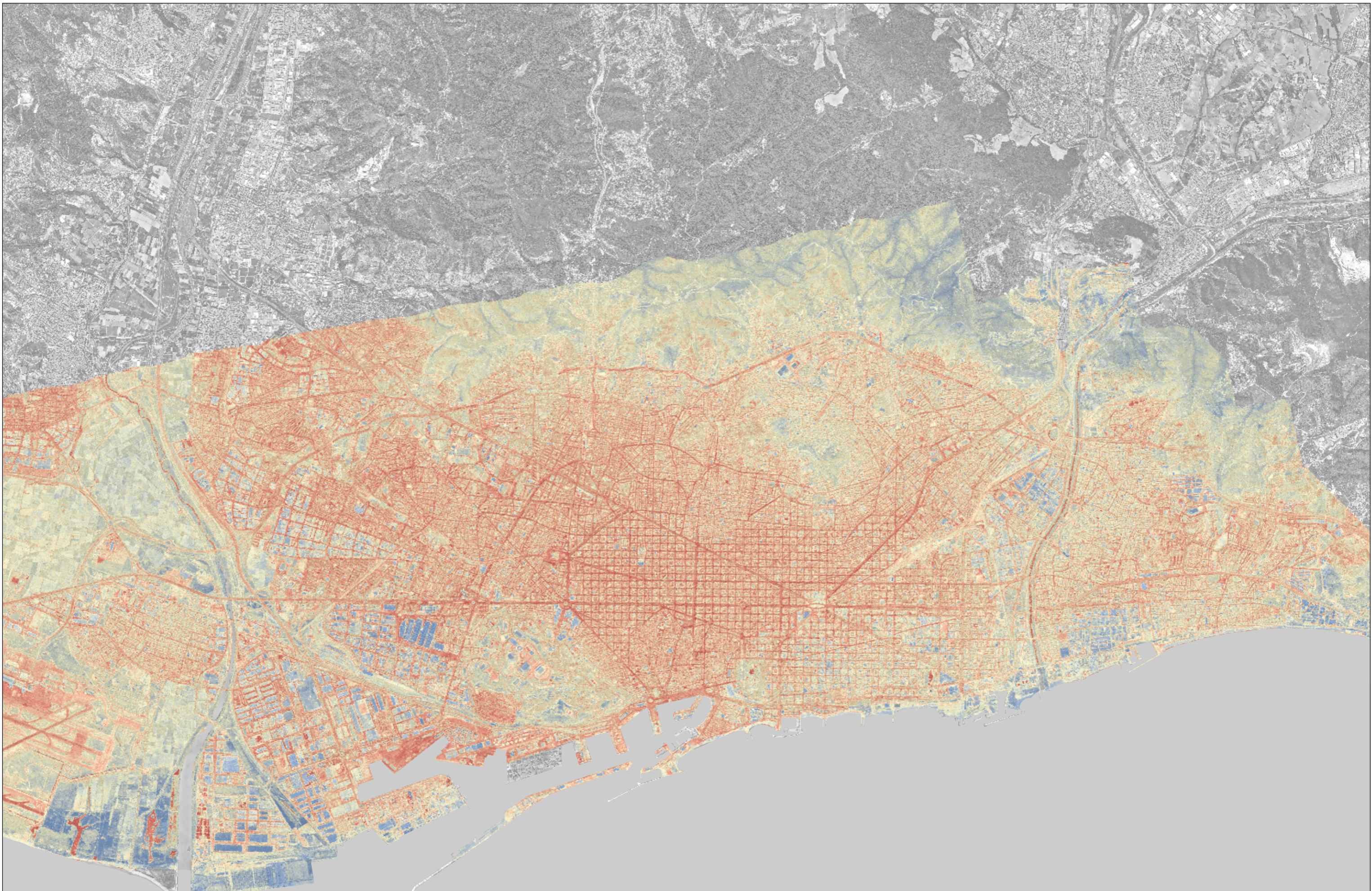
6. ANNEXOS

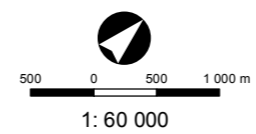
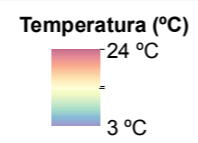
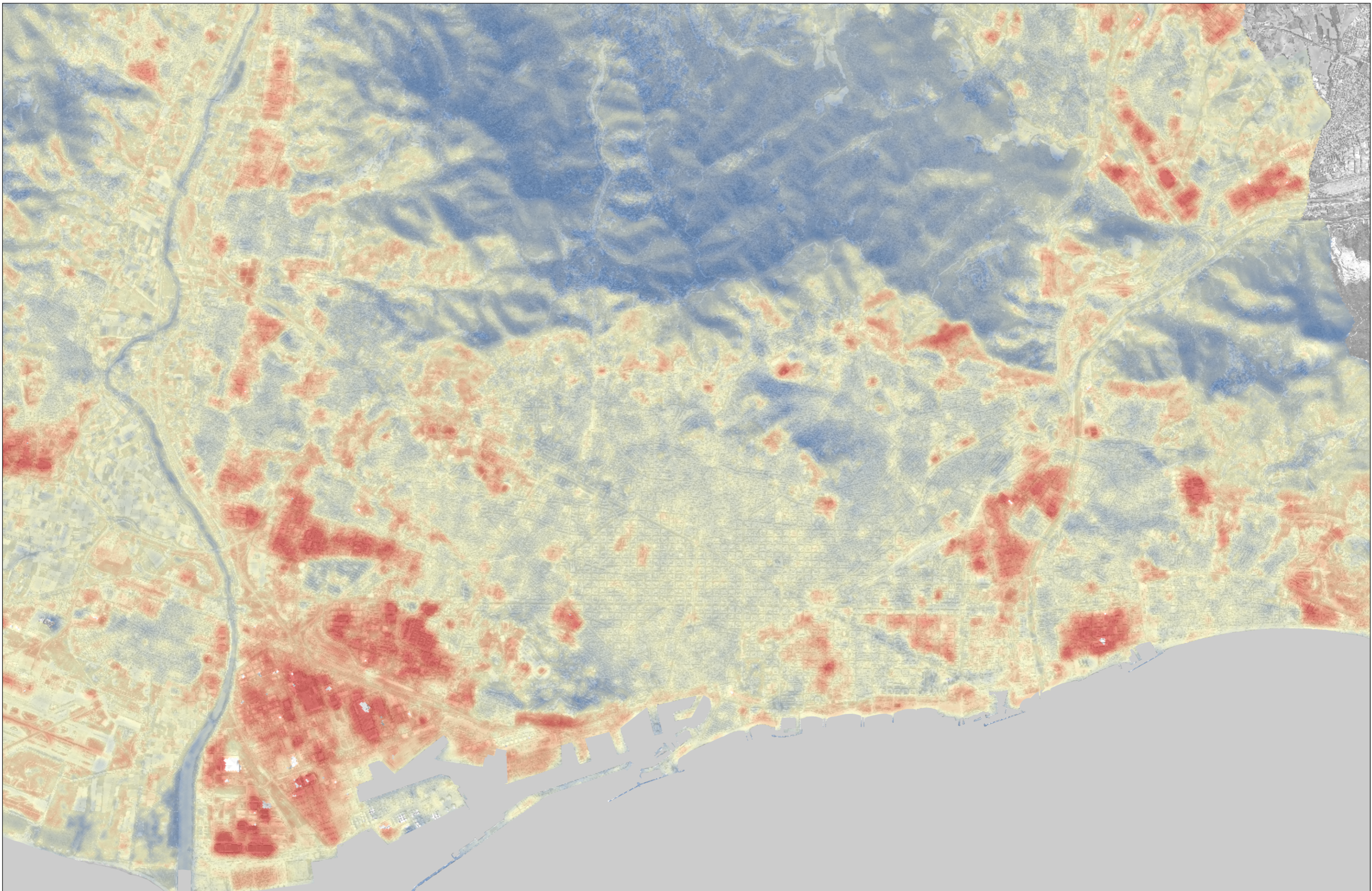


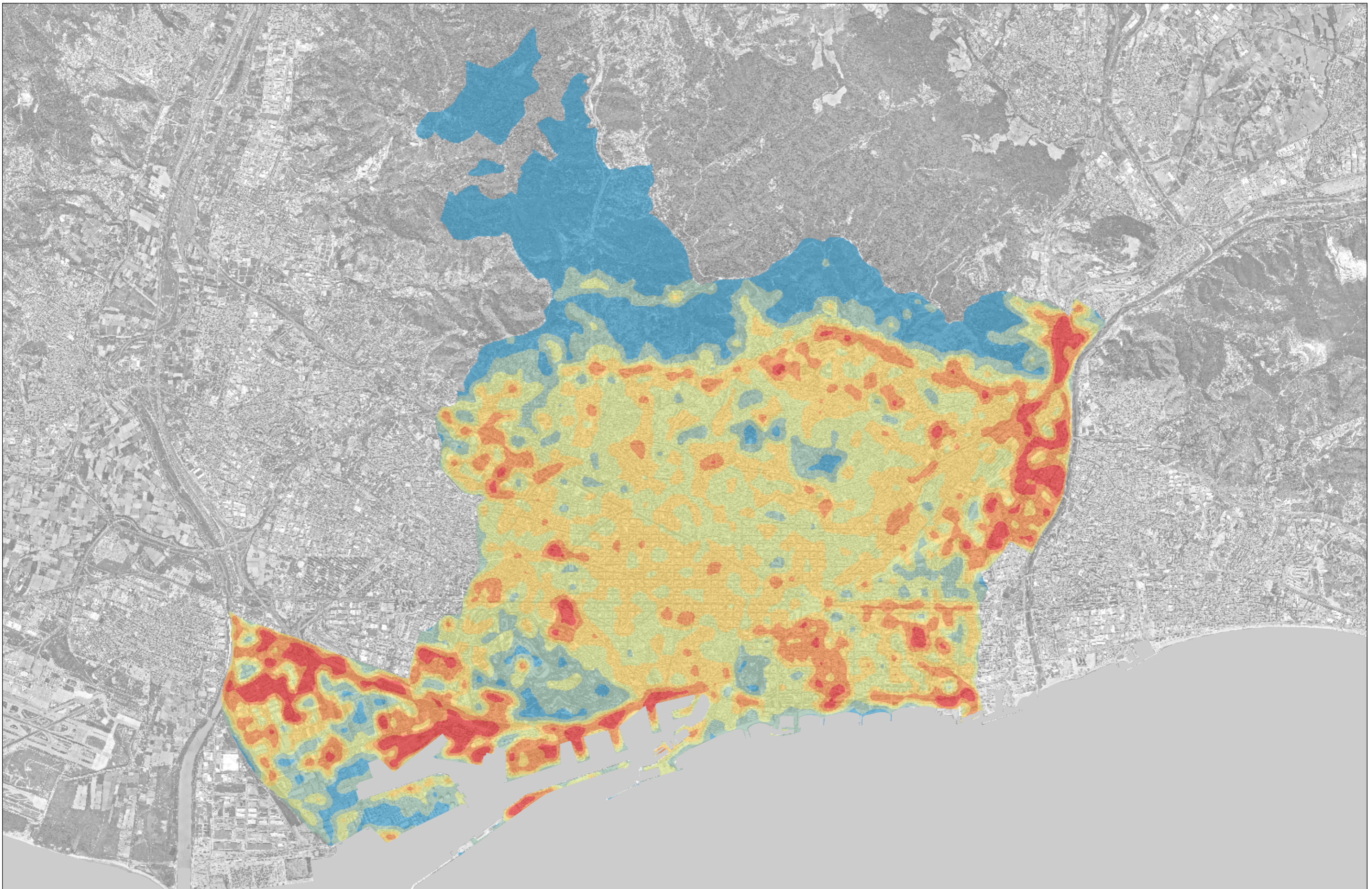
Mapes

- 1. Temperatura de superfície a partir del vol tèrmic de l'ICGC – 2014**
- 2. Temperatura de superfície a partir de Landsat-8. 2017**
- 3. Potencial d'acumulació de temperatura solar**









Potencials d'acumulació de temperatura solar

