

TESIS DOCTORAL

**Estimación de potenciales ahorros energéticos y beneficios medioambientales para España derivados del uso de control de radiación ("cool roofs") en los tejados de viviendas**

María Ángeles Díaz Vicente

Ingeniero Informático por la Universidad Complutense de Madrid

Tesis presentada en

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
CONTROL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

como parte de los requerimientos para la obtención del Grado de Doctor

2015



TESIS DOCTORAL

**Estimación de potenciales ahorros energéticos y beneficios medioambientales para España derivados del uso de control de radiación ("cool roofs") en los tejados de viviendas**

Marian Diaz Vicente

Ingeniero Informático

Tesis presentada en la

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A  
DISTANCIA**

como parte de los requerimientos para la obtención del Grado de Doctor

2015

Directores de Tesis:

Dr. Manuel-Alonso Castro Gil  
Dr. Antonio Colmenar Santos



*A mi familia y en especial a mis padres, Nacho y mis hijos Cristina y Sergio*

*Al Dr. Sergio Boixo por su inestimable ayuda*



## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis doctoral refleja el trabajo de siete interrumpidos años de investigación que no hubieran sido posibles sin la ayuda de muchas personas. Desde estas líneas, quiero agradecer a todas su colaboración. Dos hijos, un marcapasos y una recolocación después, por fin es posible publicar los resultados de este trabajo.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis directores de Tesis Dr. Manuel Castro y Dr. Antonio Colmenar, por sus continuos ánimos a continuar con esta interesante investigación sorteando todos los obstáculos, que no han sido pocos. También a mi amigo y mentor, el Dr. Sergio Boixo, por abrirme las puertas de la Universidad de Harvard y enseñarme a trabajar de manera tan productiva en el campo de la investigación, que era nuevo para mí.

También quiero agradecer de una forma muy especial al equipo de doctores en Medicina y profesionales sanitarios que me ponen en pie una y otra vez. Sobre todo a los doctores Luis Rodríguez Fuentes, Fernando Montoya Lozano, José Casas Rivero, Antonio Goicolea de Oro, Raquel Meizoso, Patxi Diago, Francisco Campillo y Rocío Valero.

Por supuesto quiero dar las gracias también al equipo de investigación del “Fatigómetro”, por ayudarme a salvar mi vida y, sobre todo, por devolverme la esperanza en que algún día los enfermos de sensibilización central tendremos una calidad de vida mejor. Gracias de todo corazón (nunca mejor dicho) a Susana García Juez, Irene Rodríguez Andonaegui, Joaquín Recas, Francisco Rincón y doble agradecimiento a José Manuel Bote Rosado por su apoyo también en el cierre de esta tesis. También agradecer a Román Hermida y Luis Piñuel por facilitar que el proyecto sea posible.

Agradecer también la compañía, los ánimos y el trabajo de mis compañeros de la Asociación de Afectados por el Síndrome de Fatiga Crónica (SFC) y por el Síndrome de la Sensibilidad Química Múltiple (SQM) de la Comunidad de Madrid. Del mismo modo, a mis compañeros del Institut Français de Madrid, en

especial a Patricia Couderchon, Julián, Arantxa, Nuria, Charmian, Paz, Pilar, John y Daniel.

Pero sobre todo, doy mi más profundo agradecimiento a mi familia, que siempre está a mi lado y que me ha enseñado a no rendirme nunca. Especialmente a mis padres Maite y Manolo por hacerme como soy y a mi hermana María José Díaz y mis tíos Soco, Manuel y Ascen por estar siempre tan cerca y facilitarme tanto el día a día, por complicado que se ponga. Y a mi marido Nacho Morandé y su familia, que es también la mía. Y a mis hijos Sergio y Cristina, con la esperanza de haber puesto un pequeño granito de arena para que les quede un mundo mejor.

Por último, no puedo dejar de agradecer a todos mis amigos por su incondicional apoyo, su cariño y por mirarme con cara rara pero también animarme, cada vez que propongo alguna idea a priori extraña, como pintar los tejados de medio país de blanco. Gracias en especial a Alberto Cordero, Shannon Boyle, Ana Camacho, Alonso Esteras, Alberto Martín, Beppe Murgia, Grazia Mattana, Isabel Fdez. de la Cigoña, Daniel Encinas, Roberto Antonides, Jesús Ranz, Diego Soriano, Marina Romero, Beatriz Sanz, Gerardo Revilla, Cristina Sanz, Eva Sánchez, Sonia Pamplona, María Quirós, Pedro López, Eva Franco y Neva Milicic. Y gracias a Javier López de Lérida por sus aportaciones en materia de economía.



## RESUMEN

El control de radiación en los tejados mediante la variación del color de su superficie (técnica conocida internacionalmente como Cool Roof), es un método económico y simple para mejorar el nivel de confort en los edificios en climas templados y cálidos. Una implantación a gran escala de esta técnica puede contribuir a reducir la contaminación y a bajar la demanda de potencia pico, resultando en ahorros económicos tanto para las compañías energéticas como para los usuarios.

Una implantación a gran escala en Andalucía puede ahorrar potencialmente 295.000 kWh anuales (un 2% del consumo de electricidad residencial), teniendo en cuenta sólo edificios residenciales con el tejado plano. Con los precios actuales, los usuarios podrían ahorrar 59 millones de euros al año en electricidad. La ausencia de producción de esta electricidad podría evitar la emisión de 136.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Estas cifras se han calculado asumiendo que todas las viviendas tienen calefacción eléctrica (caso peor).

Una vivienda con el tejado plano que sea de color oscuro en Cádiz con calefacción eléctrica, podría ahorrar un 19% (13% con un tejado rojo) de la demanda de energía termal pintando el tejado de blanco. Una casa en Huelva podría ahorrar entre el 10% y el 15% y una en Sevilla entre el 7% y el 10%.

Si se considera el efecto de los forzamientos radiativos en la atmósfera, instalar cool roofs en todas las residencias con tejado plano podría evitar potencialmente la emisión de entre 9,44 y 12 megatoneladas de CO<sub>2</sub>.

Expandiendo el estudio al resto de España, la instalación de tejados frescos resultaría en ahorros positivos en viviendas con calefacción de gas para todas las ciudades estudiadas salvo las tres provincias del noroeste: Oviedo, Lugo y La Coruña. Los ahorros máximos se obtienen en Gran Canaria (48% de reducción en el coste de la energía), Tenerife (48%), Cádiz (36%), Murcia (33%), Huelva (30%), Málaga (29%), Almería (29%) y Sevilla (28%), donde los

ahorros son mayores o iguales de 2 €/m<sup>2</sup> para edificios antiguos con tejados oscuros.

Las principales ciudades españolas obtendrían ahorros positivos que irían de los 0,2 a 0,76 €/m<sup>2</sup> en Madrid (del 7,4% al 11% de ahorro en coste de la energía), de 0,25 a 1,1 €/m<sup>2</sup> en Barcelona (del 12% al 18% del coste) y de entre 0,36 y 1,4 €/m<sup>2</sup> en Valencia (entre 14% y el 20% del coste), en estos casos considerando calefacción de gas.

En la construcción de un nuevo tejado o en la reparación de un tejado, el coste marginal de aplicar una capa reflectiva es menor de 2 €/m<sup>2</sup> para una pintura certificada de alta calidad. En general es rentable invertir en convertir un tejado a fresco en la gran mayoría de ciudades de España, con matices según la época de construcción del edificio y la zona en que se encuentre:

- **Zona de muy alta rentabilidad** (incluye Sevilla, Málaga, Murcia, Palma de Mallorca y las Palmas de G.C.): se recomienda enfocar los esfuerzos en edificios antiguos (construidos antes de 2008); aprovechar para fomentar el empleo en estas zonas con cursos de formación especializados, dado que aún contratando mano de obra la inversión en cool roofs es rentable para los ciudadanos; y cambiar la normativa para que sea siempre obligatorio utilizar materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.
- **Zona de alta rentabilidad** (incluye Barcelona y Valencia): enfocar las actuaciones en edificios antiguos de tejados oscuros; lanzar programas de voluntarios para adaptar edificios antiguos con tejados de colores medios; y recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.
- **Zona de rentabilidad media** (incluye Madrid y Zaragoza): lanzar programas de voluntarios para adaptar tejados oscuros en edificios antiguos; y recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados oscuros y en las nuevas edificaciones.
- **Zona desaconsejada para el uso de cool roofs:** (incluye Bilbao y las provincias del noroeste): estudiar caso por caso la adecuación de utilizar cool roofs con datos locales y valorar la utilización de otras opciones como los tejados verdes.

## ABSTRACT

Cool roofs are an inexpensive method to save energy and to improve the comfort level in buildings in mild and hot climates. A high scale implementation in some regions of Spain may contribute to reduce contamination and to lower peak electricity demand, yielding significant economical savings for electrical companies and for consumers.

A high scale implementation of cool roofs in Andalusia, one of the most southern regions in Spain, could potentially save 295,000 kWh per year (a 2% reduction in the electrical consumption for residential use), considering only residential buildings with flat roofs using electrical heating. At the current energy prices, consumers can save 59 million euros annually in electricity costs and the emission of 136,000 metric tons of CO<sub>2</sub> can be directly avoided every year from the production of that electricity. If radiative forcings are considered, Andalucía can potentially offset between 9.44 and 12 Mt of CO<sub>2</sub>.

A house in Cádiz with a flat dark roof will save 19% of the thermal energy with a cool roof if using electrical heating and 36% in the final energy cost when using gas heating. A house in Huelva would save between 10% and 15% and one in Sevilla between 7% and 10%.

All the provinces in the rest of Spain are also studied in this dissertation. Cool roofs yield positive savings for all the regions studied (using gas heating) except Oviedo, Lugo and Coruña. The biggest savings are achieved in Gran Canaria (48%), Tenerife (48%), Cádiz (36%), Murcia (33%), Huelva (30%), Málaga (29%), Almería (29%) and Sevilla (28%), where savings are greater than 2 euros per square meter of flat roof for old buildings with dark roofs.

For the biggest cities the range of savings obtained with gas heating are: between 7.4% and 11% in Madrid (0,2 to 0,76 €/m<sup>2</sup>), between 12% and 18% in Barcelona (0,25 to 1,1 €/m<sup>2</sup>) and between 14% and 20% in Valencia (0,36 to 1,4 €/m<sup>2</sup>).

The marginal cost of a cool roof is very low during the construction or regular upgrade of the roof: less than 2 €/m<sup>2</sup> for a high quality certified paint. In general, it is profitable to invest in cool roofs in most of the Spanish regions, but attention should be paid on when the house was built and where it is located:

- **Very high profitability area** (includes Sevilla, Málaga, Murcia, Palma de Mallorca and Las Palmas): it is recommended to focus efforts in old buildings (built before 2008); to promote employment by organizing cool roof training, as investments in cool roofs are profitable for citizens even contracting external workforce; to prioritize legal enforcement of cool roof materials in regular roof repairs and in new building construction.
- **High profitability area** (includes Barcelona and Valencia): focus actions in old buildings with dark roofs; promote “do it yourself” o volunteers programs to adapt old buildings with medium colored roofs (red, green, light grey, etc.); recommend always cool roof materials in roof repairs and new buildings.
- **Medium profitability area** (includes Madrid and Zaragoza): promote volunteers or “do it yourself” programs to adapt old buildings with dark roofs; recommend cool roof materials in roof repairs and new buildings.
- **Not recommended for cool roofs area** (includes Bilbao and all the northeastern regions): do a case by case analysis with local weather data and consider other options like green roofs.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO DE ACRÓNIMOS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ECUACIONES</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Análisis evolución de precios de la energía .....	3
1.2. Oportunidades de mejora en la eficiencia energética: envolventes de los edificios .....	7
1.3. Oportunidad de aplicar “cool roofs” en España .....	9
1.4. Motivación de este trabajo .....	11
<b>2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL</b>	<b>13</b>
2.1. Objetivos .....	13
2.2. Estructura de la tesis doctoral .....	14
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LOS TEJADOS FRESCOS O “COOL ROOFS”</b>	<b>15</b>
3.1. ¿Cómo funciona un cool roof? .....	16
3.2. Beneficios de la utilización de cool roofs .....	22
3.2.1. Reducción en el uso de aire acondicionado, debido a la menor demanda energética del edificio .....	23
3.2.2. Ahorros en la demanda eléctrica pico .....	24
3.2.3. Mejora de la sensación de confort en el interior del edificio .....	25
3.2.4. Reducción en costes de mantenimiento del tejado .....	25
3.2.5. Mitigación del fenómeno de las “islas urbanas” .....	26
3.2.6. Reducción de la contaminación en los núcleos urbanos .....	26

3.2.7. Reducción de las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	27
3.3. Posibles problemas de los cool roofs.....	28
3.4. Intuiciones falsas sobre los cool roofs .....	28
<b>4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE AHORROS CON COOL ROOFS</b>	<b>35</b>
4.1. Datos de entrada .....	37
4.1.1. Datos climatológicos.....	39
4.1.2. Tipos de tejados .....	40
4.2. Estimación de demanda energética.....	44
4.3. Cálculo de ahorros económicos.....	48
4.4. Agregación de ahorros por región.....	49
4.5. Estimación de ahorros de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	52
4.6. Resumen gráfico del método de cálculo .....	52
<b>5. INCERTIDUMBRES PRINCIPALES EN EL CÁLCULO DE AHORROS: DATOS Y HERRAMIENTAS DISPONIBLES</b>	<b>55</b>
5.1. Incertidumbres en los datos .....	55
5.1.1. Superficie de tejados .....	55
5.1.2. CDD y HDD .....	56
5.1.3. Disponibilidad de datos meteorológicos .....	56
5.1.4. Variabilidad de datos meteorológicos.....	56
5.1.5. Distribución colores de los tejados .....	58
5.2. Herramientas disponibles.....	58
5.2.1. DOE: Cool Roof Calculator.....	58
5.2.2. MIT: Design Advisor .....	59
5.2.3. Proyecto “Cool Roof” de la Unión Europea: aplicación Cool Roofs-EU.....	61
5.2.4. Aplicación “Roof Savings Calculator” de la ORNL y LBRL .....	62
<b>6. RESULTADOS: ESTIMACIÓN DE AHORROS PARA ANDALUCÍA</b>	<b>65</b>
6.1. Ahorros de energía estimados .....	65
6.2. Ahorros económicos .....	66
6.3. Ahorros en emisiones de CO <sub>2</sub> .....	70
<b>7. RESULTADOS: ESTIMACIÓN DE AHORROS PARA ESPAÑA</b>	<b>73</b>
7.1. Introducción .....	73
7.2. Ahorros en la demanda de energía.....	76

7.3.	Ahorros económicos con calefacción de gas .....	79
7.3.1.	Distribución geográfica de los ahorros .....	83
7.4.	Ahorros económicos con calefacción eléctrica .....	84
7.5.	Inconsistencias en la definición de las zonas climáticas .....	87
<b>8.</b>	<b>COSTES Y RENTABILIDAD DE LOS COOL ROOFS</b> .....	<b>89</b>
8.1.	Costes de los cool roofs .....	89
8.1.1.	Coste de reparación de tejado en mal estado .....	92
8.1.2.	Coste de adaptación de tejado en buen estado contratando mano de obra .....	92
8.1.3.	Coste de adaptación de tejado en buen estado sin contratar mano de obra .....	93
8.2.	Método de cálculo en el estudio de la rentabilidad .....	93
8.2.1.	Escenarios propuestos .....	94
8.2.2.	Variables económicas .....	94
8.2.3.	Caso de ejemplo: Sevilla .....	96
8.3.	Resultados del estudio de la rentabilidad de cool roofs para España .....	102
8.3.1.	Rentabilidad para tejados oscuros de edificios antiguos .....	103
8.3.2.	Rentabilidad para tejados medios de edificios antiguos .....	110
8.3.3.	Rentabilidad para tejados oscuros de edificios modernos .....	116
8.3.4.	Rentabilidad para tejados medios de edificios modernos .....	122
8.4.	Conclusiones del estudio de la rentabilidad de cool roofs .....	128
8.5.	Análisis de sensibilidad del estudio de la rentabilidad de cool roofs 133	
<b>9.</b>	<b>VALIDACIÓN DE RESULTADOS CONTRA OTRAS PUBLICACIONES</b> .....	<b>137</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES Y APORTACIONES</b> .....	<b>141</b>
10.1.	Conclusiones .....	141
10.2.	Recomendaciones .....	144
10.3.	Aportaciones .....	147
10.3.1.	Publicación del artículo en revista internacional de alto impacto .....	147
10.3.2.	Primera estimación económica para la aplicación de cool roofs en España y primer análisis de rentabilidad de esta técnica para un país europeo .....	149
10.3.3.	Modelo y herramienta dinámica interactiva para cálculos .....	149

10.3.4. Detectados errores en el cálculo de zonas climáticas de España .....	149
10.3.5. Detectados y corregidos errores en la calculadora del mayor proyecto europeo del sector .....	150
10.3.6. Encontrado un error significativo en los datos de la NASA y analizado su impacto en la aplicación RETScreen .....	150
10.4. Líneas de investigación futuras.....	150
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO I. REFERENCIAS DEL ARTÍCULO PUBLICADO EN ENERGY</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO II. COEFICIENTES UTILIZADOS PARA EL AJUSTE POLINÓMICO DEL MÉTODO DE CÁLCULO</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO III. CONTENIDO DEL CD-ROM</b>	<b>169</b>
<b>ANEXO IV. CURRICULUM VITAE</b>	<b>171</b>
<b>ANEXO V. CÓDIGO FUENTE EN MATHEMATICA</b>	<b>173</b>



## GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

AA	Aire acondicionado
AMT	Año Meteorológico Típico
CC.AA.	Comunidades Autónomas
CDD	Grados día de refrigeración
COP	Coefficiente de Eficiencia de Aire Acondicionado (Coefficient of Performance)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CTE-2006	Código Técnico de Edificación de 2006
DCRC	DOE Cool Roof Calculator
EER	Ratio de Eficiencia Energética
EEUU	Estados Unidos de América
EU-27	Los 27 países de la Unión Europea
FSEC	Florida Solar Energy Center
GCCA	Global Cool Cities Alliance
GDP	Gross Domestic Product
GJ	Gigajulios
Gt	Gigatonelada ( $1 \cdot 10^{12}$ kg)
GW	Gigavatio
HARC	Houston Advanced Research Center
HDD	Grados día de calefacción
IDAE	Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía
IPC	Índice de los Precios de Consumo
K	Transmitancia térmica medida ( $W/m^2K$ )
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
kWh/m <sup>2</sup>	Kilovatio hora por metro cuadrado
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
MIT	Massachusetts Institute Of Technology
Mt	Megatonelada ( $1 \cdot 10^6$ kg)

NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
NBE-79	Norma Básica de Edificación de 1979
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PIB	Producto interior bruto
R-value	Resistencia térmica medida ( $m^2K/W$ )
STAR	Simplified Transient Analysis of Roofs
SWEC	Spanish Weather for Energy Calculations
TIR	Tasa Interna de Rentabilidad
TUR	Tarifa de Último Recurso (electricidad)
UN	United Nations (Naciones Unidas)
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
USD	Dólar americano
VAN	Valor Actual Neto
W	Vatio
$W/m^2$	Vatio por metro cuadrado
$€/m^2$	Euro por metro cuadrado
$\mu m$	Micrómetro

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Absortividad de materiales .....	20
Tabla 3-2. Absortividad de pinturas .....	20
Tabla 3-3. Condiciones de diseño de viviendas para confort térmico. Fuente: RITE. ....	25
Tabla 3-4. Porcentaje de viviendas en España con calefacción y/o aire acondicionado por Comunidades Autónomas. ....	34
Tabla 4-1. Resumen de variables y fuentes utilizadas en la metodología. ....	38
Tabla 4-2. Resistencia térmica (y transmitancia) para distintas zonas climáticas según el NBE-79. ....	41
Tabla 4-3. Clasificación de zonas climáticas según Severidad Climática de acuerdo al CTE-2006. ....	43
Tabla 4-4. Resistencia térmica (y transmitancia) de las zonas climáticas para edificios construidos con posterioridad a 2006. Fuente: CTE-2006. ....	44
Tabla 6-1. Datos de entrada para Andalucía. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER” .....	65
Tabla 6-2. Ahorros de energía anuales en Andalucía en kWh, con total, asumiendo calefacción eléctrica. ....	66
Tabla 6-3. Ahorros detallados anuales para Andalucía en euros, con total, asumiendo calefacción eléctrica y un coste de energía de 0,20 €/kWh. ....	67
Tabla 6-4. Ahorros económicos anuales para provincias de Andalucía en €/m <sup>2</sup> , asumiendo calefacción eléctrica a un coste de 0,20 €/kWh. ....	68
Tabla 6-5. Ahorro detallado para provincias andaluzas: edificios antiguos (construidos antes del 2007) en energía kWh/m <sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración. ....	69
Tabla 6-6. Ahorro detallado para provincias andaluzas: edificios modernos (construidos durante o después del 2007) en energía kWh/m <sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración. ....	69
Tabla 6-7. Ahorros anuales de emisiones de kilogramos de CO <sub>2</sub> en Andalucía, con total, asumiendo calefacción eléctrica. ....	70

Tabla 7-1. Datos de entrada para España. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER”.....	75
Tabla 7-2. Ahorro detallado para provincias españolas para edificios antiguos (construidos antes del 2007) en kWh/m <sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro de la calefacción de gas (EER= 0,7) y de refrigeración (COP=3). .....	77
Tabla 7-3. Ahorro detallado para provincias españolas para edificios modernos (construidos durante o después del 2007) en energía kWh/m <sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración.....	78
Tabla 7-4. Ahorros económicos anuales para provincias Españolas en €/m <sup>2</sup> , asumiendo calefacción de gas a un coste de 0,047 €/kWh. ....	80
Tabla 7-5. Distribución de tipo de calefacción de sobre el total de la población de la Comunidad. ....	85
Tabla 7-6. Ahorros económicos anuales para provincias Españolas en €/m <sup>2</sup> , asumiendo calefacción eléctrica a un coste de 0,20 €/kWh. ....	86
Tabla 7-7. Datos de entrada para España ordenados por zona climática. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER”.....	88
Tabla 8-1. Costes de reparación completa de un tejado usando pintura termorreflectante. Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).....	91
Tabla 8-2. Costes de reparación completa de un tejado usando pintura convencional. Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).....	91
Tabla 8-3. Costes de convertir tejado en buen estado con mano de obra. Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).....	93
Tabla 8-4. Variables económicas comunes a todos los escenarios propuestos.....	95
Tabla 8-5. Principales capitales de provincia. Fuente: (INE, 2014). ....	102
Tabla 8-6. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.....	105
Tabla 8-7. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	107
Tabla 8-8. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas, haciéndolo uno mismo.....	109

Tabla 8-9. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.....	111
Tabla 8-10. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	113
Tabla 8-11. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas haciéndolo uno mismo.....	115
Tabla 8-12. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas. ....	117
Tabla 8-13. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	119
Tabla 8-14. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.....	121
Tabla 8-15. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas. ....	123
Tabla 8-16. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	125
Tabla 8-17. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.....	127
Tabla 8-18. Tabla-resumen de rentabilidad de escenarios de inversión en cool roof en las principales capitales de provincias españolas.....	131
Tabla 9-1. Ahorros detallados para ciudades españolas seleccionadas en demanda de energía (kWh/m <sup>2</sup> año) y coste (€/m <sup>2</sup> ) para un R-value de 1,94 m <sup>2</sup> K/W (11 h ft <sup>2</sup> F/Btu) y un incremento en la reflectividad solar de 10% a 40%, COP= 2,3, EER gas= 0,7, EER eléctrica= 1.....	138
Tabla 9-2. Ahorros detallados para ciudades de EEUU seleccionadas en demanda de energía (kWh/m <sup>2</sup> año) y coste (€/m <sup>2</sup> ) para un R-value de 1,94 m <sup>2</sup> K/W (11 h ft <sup>2</sup> F/Btu) y un incremento en la reflectividad solar de 10% a 40%, COP= 2,3, EER gas= 0,7, EER eléctrica= 1, 1 Euro= 1 USD.....	138



## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1-1. Análisis histórico de años necesarios para doblar el PIB per cápita y población al inicio del periodo de crecimiento. Fuente: (Dobbs et al., 2011).....	1
Ilustración 1-2. Histórico índice de precios de las materias básicas de McKinsey (McKinsey Commodity Price Index). Fuente: Banco Mundial.....	2
Ilustración 1-3. Histórico y proyección del índice de precios de las materias básicas desglosado (commodity index) hasta 2020. Fuente: Banco Mundial, (The World Bank, 2015).....	3
Ilustración 1-4. Precios de la electricidad en países europeos a diciembre de 2014 para sector residencial con todos los impuestos incluidos. Fuente: Eurostat. ....	4
Ilustración 1-5. Precios del gas en países europeos a diciembre de 2014 para sector residencial con todos los impuestos incluidos. Fuente: Eurostat. ....	4
Ilustración 1-6. Evolución semestral del precio de la electricidad para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014.....	5
Ilustración 1-7. Evolución semestral del precio del gas natural para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014.....	6
Ilustración 1-8. Comparación de la evolución semestral del precio de la electricidad y gas natural para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014. ....	7
Ilustración 1-9. Oportunidades de ahorro de recursos organizadas por tipología. Fuente: (Dobbs et al., 2011). ....	7
Ilustración 1-10. Irradiación solar anual media acumulada en Europa (kWh/m <sup>2</sup> ).....	9
Ilustración 1-11. Vejer de la Frontera (Cádiz), perspectiva horizontal. ....	10
Ilustración 1-12. Vista aérea de los tejados de Vejer de la Frontera (Cádiz). ....	10
Ilustración 1-13. Percepción de los ciudadanos del ahorro energético. ....	12
Ilustración 3-1. Transferencia de calor del tejado. Fuente LBNL.....	15
Ilustración 3-2. Tipos de tejados. Fuente: (U. S. EPA, 2010). ....	16
Ilustración 3-3. Efecto de la reflectancia o albedo en la temperatura de la superficie. Fuente: ASU National Center of Excellence.....	17
Ilustración 3-4. Distribución espectral de la radiación térmica de un tejado. Fuente LBNL. ....	17

Ilustración 3-5. Propiedades reflectivas y emisivas de varios materiales. Fuente: FSEC.....	19
Ilustración 3-6. Distribución de la temperatura de diferentes tipos de recubrimiento. S1, S12: aluminio; S13, S16: blanco; S7: negro. S15: teja sin recubrimiento. Fuente: (Synnefa et al., 2006).....	21
Ilustración 3-7. Flujos de energía en el tejado. Fuente: (Cool Metal Roofing, 2015).....	22
Ilustración 3-8. Perfil de temperaturas de diversas zonas ilustrando el efecto de las "islas urbanas" o "heat islands". Fuente: LBRL.....	26
Ilustración 3-9. Asfalto tradicional vs asfalto aclarado con aditivos. Fuente: David Hitchcock, HARC. ....	27
Ilustración 3-10. Tejados frescos en Bermudas (Silverman, 2008). ....	30
Ilustración 3-11. Los "cool colors" son construidos para reflejar más luz solar cerca de longitudes de onda del infrarrojo. Fuente: LBNL.....	30
Ilustración 3-12. Reflectancia solar de diferentes "cool colors". ....	31
Ilustración 3-13. Apariencia y temperatura de distintos recubrimientos con "cool colors" (fila superior) frente a colores normales. Fuente (Levinson, Akbari, & Reilly, 2007).....	32
Ilustración 3-14. Vista aérea del área de Cool Colors del centro de investigación ORNL. Fuente: LBNL.....	32
Ilustración 4-1. Grados-día de Sevilla en 2010. CDD=1.360. HDD=961. Fuente: Wolfram-Alpha.....	39
Ilustración 4-2. Grados-día en Madrid en 2010. HDD= 2.120. CDD= 863. Fuente: Wolfram Alpha.....	40
Ilustración 4-3. Mapas de zonas climáticas de España según los grados- día (Mapa 1, izquierda) y según temperatura media de Enero (Mapa 2, derecha). Fuente: NBE-79.....	41
Ilustración 4-4. Clasificación de zonas climáticas según Severidad Climática de acuerdo al CTE-2006.....	42
Ilustración 4-5. Mapa de las zonas climáticas españolas según el CTE- 2006. Fuente: Construmática. ....	43
Ilustración 4-6. Vista aérea de la ciudad de Barcelona con colores de los tejados. Fuente: Google Maps. ....	50
Ilustración 4-7. Diagrama de flujo simplificado de la metodología de cálculo. ....	53
Ilustración 5-1. Comparativa de datos de HDD en base 18 °C a partir de diversas fuentes. ....	57
Ilustración 5-2. Comparativa de datos de CDD en base 18 °C a partir de diversas fuentes. ....	57
Ilustración 5-3. Imagen de la aplicación "DOE Cool Roof Calculator". Fuente: (ORNL, 2005b).....	59



Ilustración 5-4. Aplicación MIT Design Advisor. Pantalla de entrada de datos. Fuente: (MIT, 2009). .....	60
Ilustración 5-5. Aplicación MIT Design Advisor. Pantalla de resultados de ahorro de energía. Fuente: (MIT, 2009). .....	61
Ilustración 5-6. Captura de pantalla de la aplicación "Cool Roofs-EU" con errores. Fuente: (Roofs-EU, 2010). .....	62
Ilustración 5-7. Aplicación "Roof Saving Calculator". Captura de pantalla de entrada de datos parcial. ....	63
Ilustración 6-1. Distribución ahorros económicos en Andalucía. ....	67
Ilustración 6-2. Ahorros económicos anuales unitarios en Andalucía. ....	68
Ilustración 7-1. Distribución geográfica de HDD. ....	73
Ilustración 7-2. Distribución geográfica de CDD. ....	74
Ilustración 7-3. Distribución geográfica de la irradiación. ....	74
Ilustración 7-4. Ahorro económico por provincia para edificios antiguos. ....	81
Ilustración 7-5. Ahorro económico por provincia para edificios nuevos. ....	82
Ilustración 7-6. Ahorro económico de las principales ciudades españolas para calefacción de gas. ....	83
Ilustración 7-7. Distribución geográfica de ahorros de cool roof para edificios antiguos con tejados de color oscuro. ....	84
Ilustración 8-1. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en mal estado. ....	98
Ilustración 8-2. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en buen estado contratando mano de obra. ....	100
Ilustración 8-3. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en buen estado realizando el trabajo uno mismo. ....	101
Ilustración 8-4. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas. ....	104
Ilustración 8-5. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada. ....	106
Ilustración 8-6. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas, haciéndolo uno mismo. ....	108
Ilustración 8-7. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas. ....	110
Ilustración 8-8. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios	

antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	112
Ilustración 8-9. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas haciéndolo uno mismo.....	114
Ilustración 8-10. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas. ....	116
Ilustración 8-11. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	118
Ilustración 8-12. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo. ....	120
Ilustración 8-13. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas. ....	122
Ilustración 8-14. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.....	124
Ilustración 8-15. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo. ....	126
Ilustración 8-16. Herramienta dinámica desarrollada en <i>Mathematica</i> para el análisis de sensibilidad del estudio de la rentabilidad de cool roofs. ....	135
Ilustración 10-1. Zonas actuación según rentabilidad de inversiones en cool roofs.....	143
Ilustración 10-2. Distribución geográfica de las citas de la publicación Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. <i>Energy</i> , 38(1), 425-438.....	148

## LISTA DE ECUACIONES

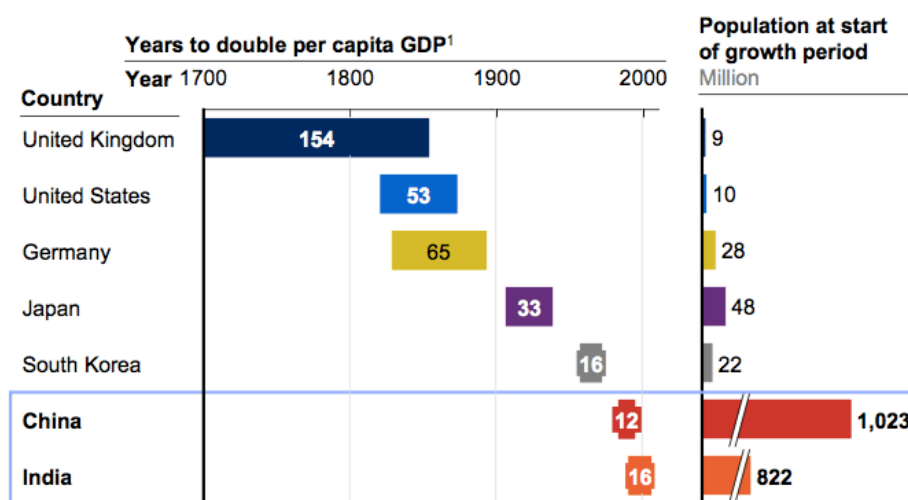
Ecuación 3-1. Balance térmico superficie expuesta al sol con aislamiento por debajo .....	22
Ecuación 4-1. Índice de refrigeración (Cooling Index).....	45
Ecuación 4-2. Índice de Calefacción (Heating Index).....	45
Ecuación 4-3. Demanda refrigeración. ....	45
Ecuación 4-4. Coeficientes de ajuste para carga refrigeración. ....	46
Ecuación 4-5. Demanda de calefacción. ....	46
Ecuación 4-6. Coeficientes de ajuste para carga calefacción. ....	47
Ecuación 4-7. Cálculo de ahorros económicos en refrigeración.....	48
Ecuación 4-8. Cálculo de penalización económica en calefacción.....	48
Ecuación 4-9. Cálculo de ahorro/penalización económica total. ....	48
Ecuación 4-10. Ahorro provincial por tipo de tejado. ....	51
Ecuación 4-11. Ahorro total de la Comunidad Autónoma.....	52



# 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y el desarrollo económico a gran velocidad de varias regiones del planeta han disparado la demanda de energía a niveles no conocidos con anterioridad. La renta per cápita ha crecido de manera desproporcionada en muchas economías y este desarrollo está históricamente asociado a un cambio en los hábitos de consumo de las industrias y ciudadanos especialmente voraz en la demanda de recursos energéticos, según los avances tecnológicos fueron proporcionando un acceso más fácil a los mismos.

Si en siglos anteriores, doblar el producto interior bruto (PIB) per cápita de una nación podía llevar 154 años como en el caso de Inglaterra en el siglo XVII ó 53 para Estados Unidos y 85 para Alemania a mediados del siglo XIX, a finales del siglo XX se pudo asistir a la “explosión económica” de varias naciones como China e India que sólo tardaron 12 y 16 años respectivamente en doblar este PIB per cápita (Dobbs, Oppenheim, Thompson, Brinkman, & Zornes, 2011), (ver *Ilustración 1-1*).



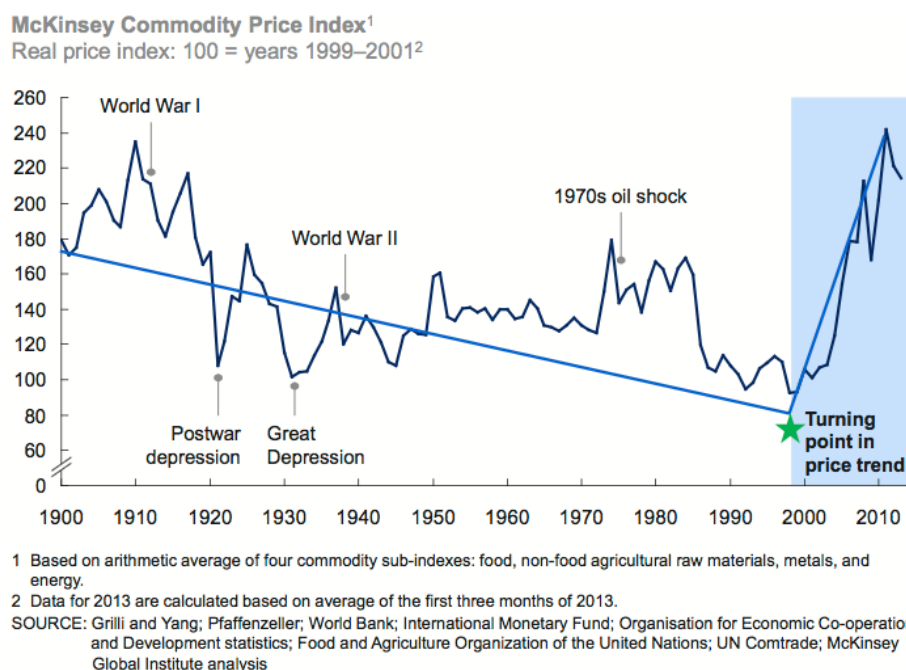
<sup>1</sup> Time to increase per capita GDP (in PPP terms) from \$1,300 to \$2,600.  
SOURCE: Angus Maddison; University of Groningen; McKinsey analysis

**Ilustración 1-1. Análisis histórico de años necesarios para doblar el PIB per cápita y población al inicio del periodo de crecimiento. Fuente: (Dobbs et al., 2011).**

Teniendo en cuenta que la población de partida antes de esta explosión era de algo más de 1.000 millones de habitantes en China y más de 800 millones en

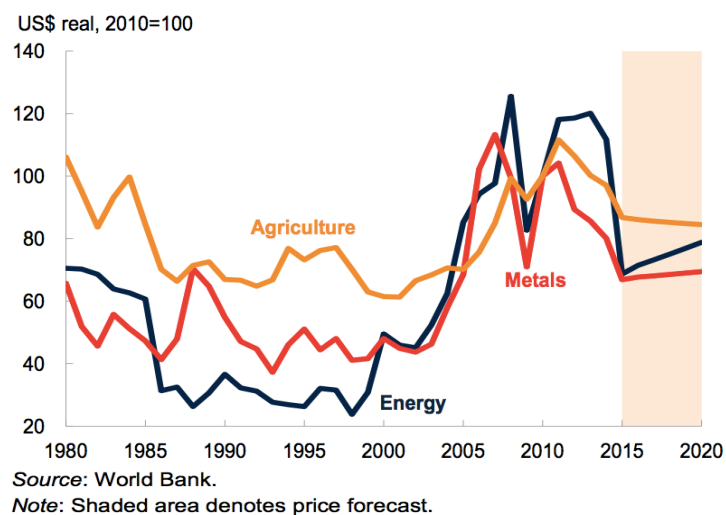
India, muy lejos de los 9, 10 ó 28 millones de habitantes que protagonizaron los inicios del cambio en Inglaterra, Estados Unidos o Alemania durante los siglos anteriores, es fácil concluir que el crecimiento de la demanda energética está siendo poco sostenible y que la eficiencia energética y la racionalización del consumo deben ser temas a priorizar a nivel global.

El efecto en los precios de la energía de esta explosión de la demanda ha sido bastante claro, disparando la inestabilidad. Como se puede observar en la *Ilustración 1-2* los precios de las materias básicas o “commodities”, que incluyen alimentos, materias primas, metales y energía, se han disparado a partir del año 2.000, borrando todos los ahorros que se consiguieron durante el siglo anterior (Dobbs et al., 2013).



**Ilustración 1-2. Histórico índice de precios de las materias básicas de McKinsey (McKinsey Commodity Price Index). Fuente: Banco Mundial.**

Y en un análisis más reciente elaborado por el Banco Mundial (The World Bank, 2015) donde se realiza su proyección hasta 2020 (zona sombreada) y además se desglosa el precio de la energía (en azul en la *Ilustración 1-3*), se observa que la previsión continuará ascendente para los próximos años a pesar del ajuste que ha sufrido en 2015 por la crisis del precio del petróleo. La inestabilidad en los precios es claramente creciente a partir del año 2000.

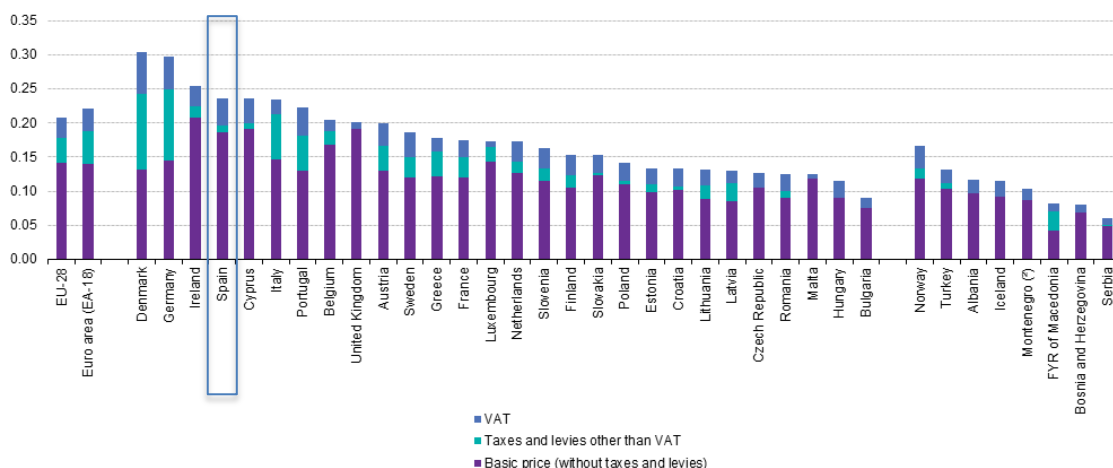


**Ilustración 1-3. Histórico y proyección del índice de precios de las materias básicas desglosado (commodity index) hasta 2020. Fuente: Banco Mundial, (The World Bank, 2015).**

### 1.1. Análisis evolución de precios de la energía en España

España no ha sido ajena al contexto económico mundial. Los precios de la energía final para los consumidores en España se encuentran entre los más caros de Europa. A continuación se muestran los precios para el sector residencial publicados por Eurostat durante el primer semestre de 2015 se realiza un análisis de la evolución de dichos precios en los últimos años. Se puede comprobar con facilidad que España no ha sido inmune ni al encarecimiento global del precio de la energía ni a la inestabilidad que se comentaba al inicio del capítulo.

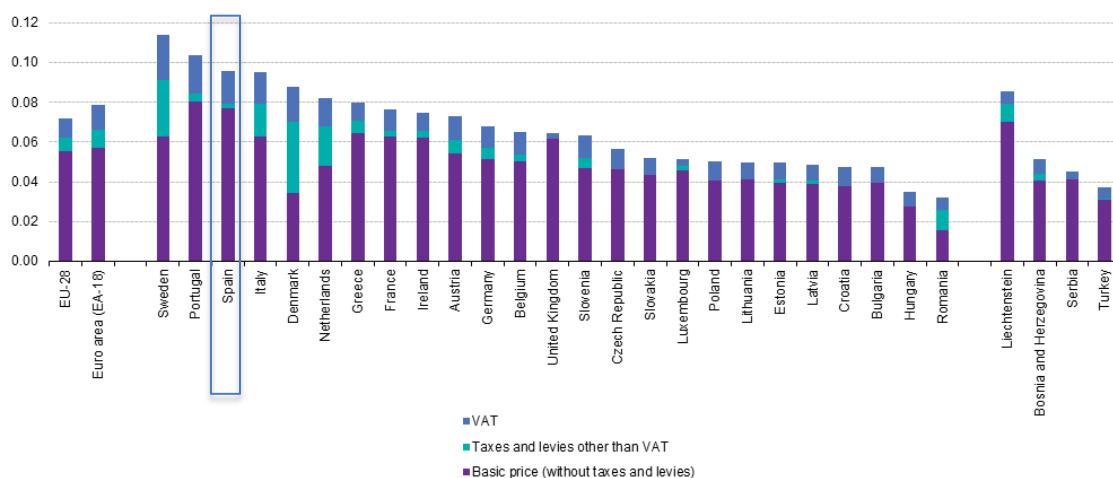
El precio de la electricidad en euros por kWh en España para el sector residencial se sitúa por encima de la media de la Unión Europea (EU), sólo por detrás de Dinamarca, Alemania e Irlanda (ver *Ilustración 1-4*).



(\*) Annual consumption: 2 500 kWh < consumption < 5 000 kWh.  
 (\*) Taxes and levies other than VAT are slightly negative and therefore the overall price is marginally lower than that shown by the bar.  
 Source: Eurostat (online data code: nrg\_pc\_204)

**Ilustración 1-4. Precios de la electricidad en países europeos a diciembre de 2014 para sector residencial con todos los impuestos incluidos. Fuente: Eurostat.**

El precio del gas natural también está entre los más costosos de Europa, en este caso sólo por detrás del Suecia y Portugal y seguido de cerca por Italia (ver *Ilustración 1-5*).



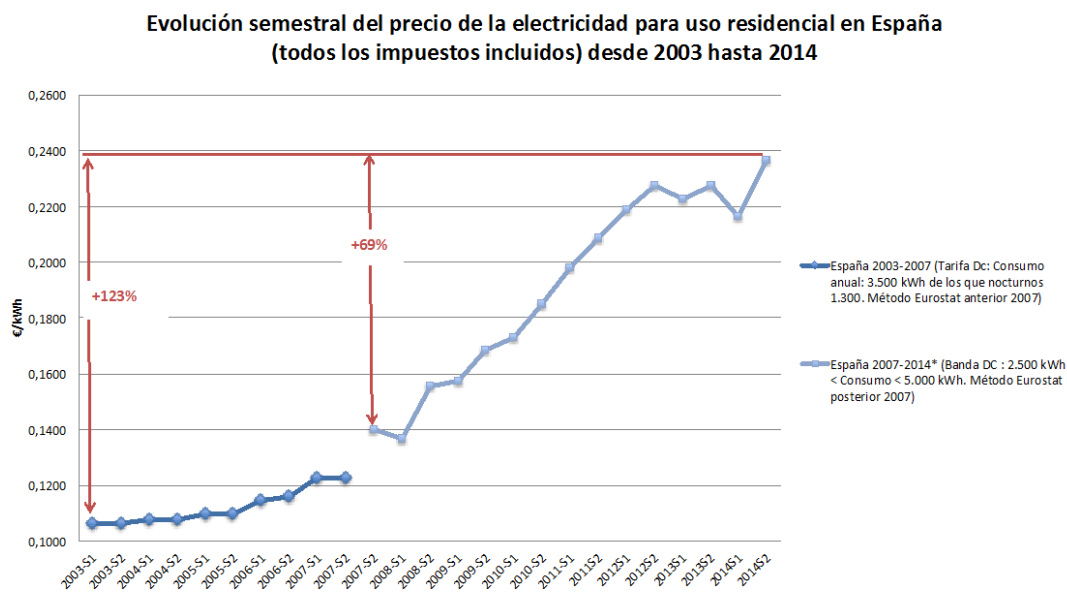
(\*) Annual consumption: 20 GJ < consumption < 200 GJ. Finland: not available. Cyprus and Malta: not applicable.  
 Source: Eurostat (online data code: nrg\_pc\_202)

**Ilustración 1-5. Precios del gas en países europeos a diciembre de 2014 para sector residencial con todos los impuestos incluidos. Fuente: Eurostat.**

La evolución del precio de la electricidad en los últimos once años ha resultado en un incremento del 123% para los consumidores españoles. En el año 2007, Eurostat cambió el método de cálculo de los precios finales con el fin de armonizar las comparativas entre los países miembros de la UE. En la



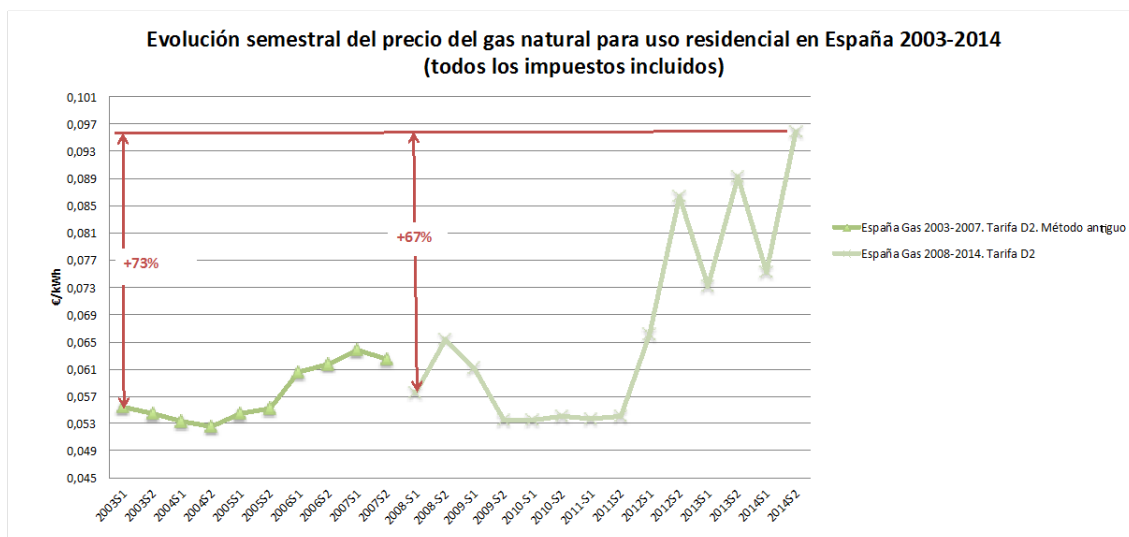
*Ilustración 1-6* se observa que a partir del 2007, el precio se ha encarecido un 69%.



**Ilustración 1-6. Evolución semestral del precio de la electricidad para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014.**

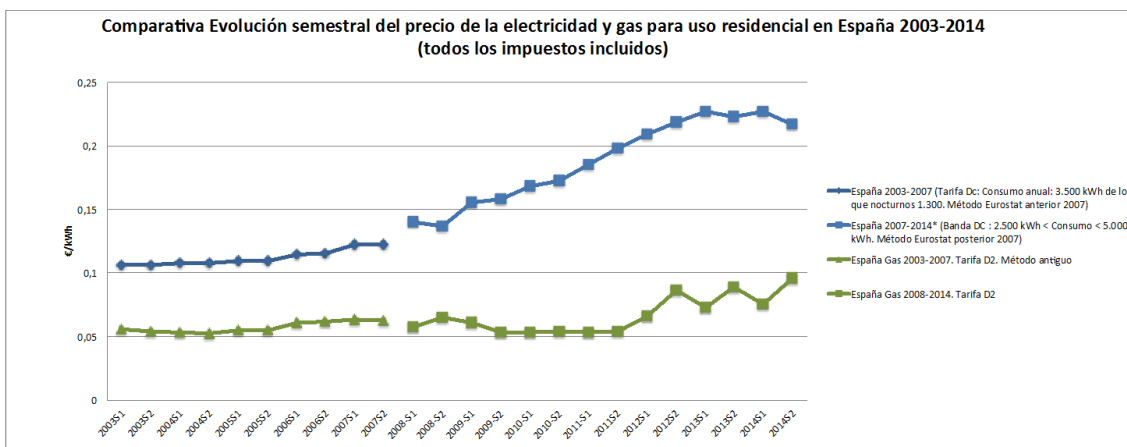
La evolución del precio del gas también ha sido claramente desfavorable para los consumidores españoles. En los últimos 11 años, el precio del gas (con todos los impuestos incluidos) se ha encarecido un nada despreciable 73%. Aunque históricamente el precio del gas era bastante estable, en la *Ilustración 1-7* se puede observar como en los últimos años seis crece la inestabilidad, resultando en un aumento del 67% desde el 2008 hasta los últimos disponibles en 2015 que cubren todo el año 2014.

Para el cálculo se ha tomado la banda más frecuente de consumo denominada D2, que desde el 2007 va desde los 20 a los 200 Gigajulios (GJ) y que con el método anterior de cálculo de Eurostat contemplaba un consumo anual medio de 16,74 GJ (equivalentes a 4.650,4 kWh).



**Ilustración 1-7. Evolución semestral del precio del gas natural para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014.**

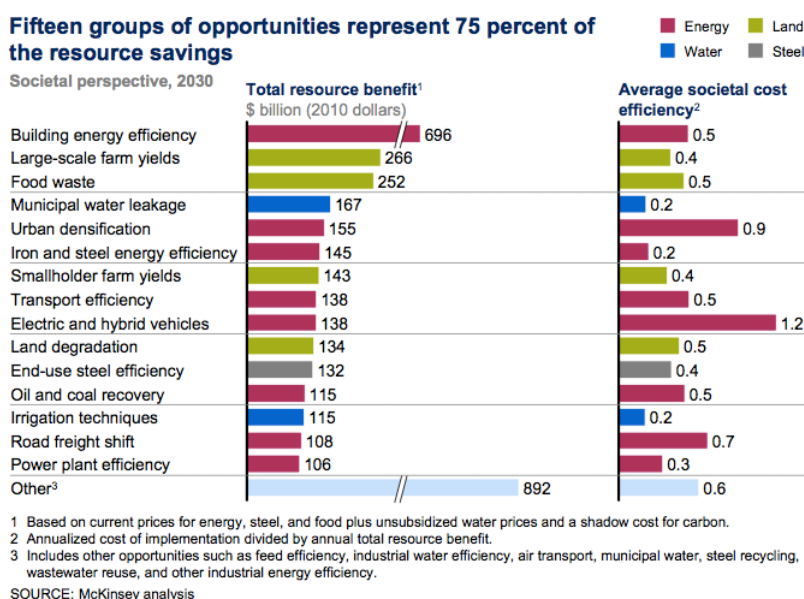
Es importante destacar los precios relativos de estas dos fuentes de energía, electricidad y gas, porque como se verá en el estudio, la electricidad es la fuente de energía más utilizada para el aire acondicionado en España, mientras que el gas es la energía mayoritaria utilizada para los sistemas de calefacción en las viviendas que disponen de ella. De este modo, se puede simplificar que, en general, a día de hoy en España es “más caro” enfriar una vivienda (disminuir 4 ó 5 grados centígrados la temperatura ambiente) con aire acondicionado eléctrico que calentar los mismos metros de vivienda con una caldera de gas natural. Por supuesto existen distintos matices a esta afirmación, según la eficiencia de las máquinas utilizadas para refrigerar o calentar y otros factores, tal y como se expondrá en los cálculos. Pero en la *Ilustración 1-8* puede apreciarse que el precio relativo de la electricidad por unidad de energía (kWh en este caso) sigue siendo significativamente mayor que el precio del gas natural.



**Ilustración 1-8. Comparación de la evolución semestral del precio de la electricidad y gas natural para uso residencial en España desde 2003 hasta 2014.**

## 1.2. Oportunidades de mejora en la eficiencia energética: envoltentes de los edificios

Se han realizado diversos estudios para enfocar cómo hacer frente a esta hipotética escasez futura de recursos (Dobbs et al., 2013, 2011; United Nations, 2010, 2013) y casi todos apuntan a que la mayor área de oportunidad para hacer frente a esta creciente demanda de energía y conseguir estabilizar los precios, es la eficiencia energética en la construcción, como se muestra en la *Ilustración 1-9* a continuación.



**Ilustración 1-9. Oportunidades de ahorro de recursos organizadas por tipología. Fuente: (Dobbs et al., 2011).**

Dentro de las medidas de eficiencia energética en la industria de construcción de edificios, entre las que se incluyen por ejemplo cambiar los sistemas de iluminación, destaca la rehabilitación de las envolventes de los mismos, que suele ser de tres tipos:

- Una rehabilitación integral de la fachada y/o el tejado para mejorar el aislamiento. Sin duda la medida más eficiente, pero que requiere grandes inversiones.
- Una rehabilitación parcial cambiando el color de los tejados a tonos más claros para que absorban menos radiación solar y por tanto se reduzca la temperatura en su interior y se reduzca el uso de aire acondicionado. Esta técnica conocida como “cool roofs” o tejados frescos, es una medida simple y relativamente poco costosa y muy eficiente en climas cálidos.
- Existe una tercera opción mixta, que consiste en colocar un pequeño jardín en el tejado con plantas autóctonas. Esta técnica conocida como “green roofs” o tejados verdes, es más eficiente en climas mixtos porque con la vegetación se consigue aumentar el aislamiento del tejado y por tanto reducir la energía que el edificio absorbe de la radiación solar y las pérdidas de calor desde el interior del edificio hacia el exterior. Esta técnica requiere una inversión mayor que la de los tejados frescos, dado que además de ser una actuación más compleja (se debe subir tierra, plantar la vegetación, canalizar bien el agua de lluvia o incluir riego si el clima es muy seco y sobre todo, reforzar la impermeabilización de la cubierta), también tiene asociados costes de mantenimiento para garantizar que la cubierta evoluciona correctamente según su fin (evitar zonas secas, resistencia a tormentas, etc.).

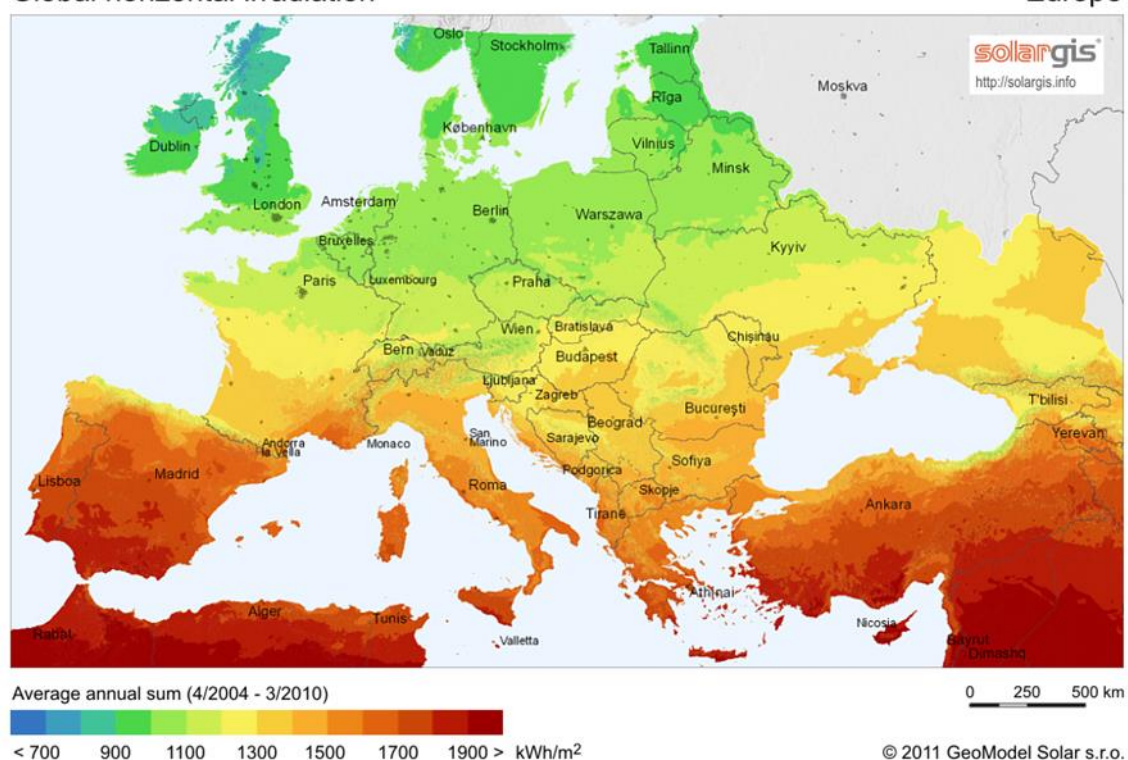
En esta tesis doctoral, se hace un estudio pormenorizado de la segunda técnica, la de “cool roofs” o tejados frescos, y si sería beneficioso aplicarla en España en el mercado residencial, analizando para qué zonas geográficas es más eficiente tanto en términos de ahorro de costes como en rentabilidad para los ciudadanos.

### 1.3. Oportunidad de aplicar “cool roofs” en España

Modificar los edificios para que requieran menos aire acondicionado puede ahorrar una cantidad considerable de energía a nivel global. El aire acondicionado y la calefacción representan un 21,7% del consumo eléctrico residencial en Europa (Bertoldi & Atanasiu, 2009). España es el primer mercado europeo de aire acondicionado, con una cuota de mercado del 37% (Bertoldi & Atanasiu, 2009). Es también uno de los países que más radiación solar recibe durante el año, como se puede apreciar en la *Ilustración 1-10*.

Global horizontal irradiation

Europe



**Ilustración 1-10. Irradiación solar anual media acumulada en Europa (kWh/m<sup>2</sup>).**

Algunas regiones de España, sobre todo las más calurosas situadas al Sur, tradicionalmente pintaban las paredes de blanco para conseguir reflejar parte de la radiación solar y tratar de bajar la temperatura dentro de los edificios (ver *Ilustración 1-11*).



**Ilustración 1-11. Vejer de la Frontera (Cádiz), perspectiva horizontal.**

Pero habitualmente no se pintaba también el tejado, que en muchos casos es oscuro, absorbiendo una cantidad importante de radiación solar (ver *Ilustración 1-12*).



**Ilustración 1-12. Vista aérea de los tejados de Vejer de la Frontera (Cádiz).**

De cualquier manera, estos métodos tradicionales se han ido abandonando paulatinamente, a medida que la utilización de la calefacción y el aire acondicionado se han ido extendiendo por todo el país.

Los beneficios potenciales de los cool roofs han sido estudiados ampliamente en los Estados Unidos (H. Akbari, Levinson, Miller, & Berdahl, 2005; Bansal, Garg, & Kothari, 1992; S. Bretz & Akbari, 1994; Hoff, 2005; Konopacki, Gartland, Akbari, & Rainer, 1998; Levinson, Akbari, Konopacki, & Bretz, 2005; Levinson et al., 2010; Menon, Akbari, Mahanama, Sednev, & Levinson, 2010;

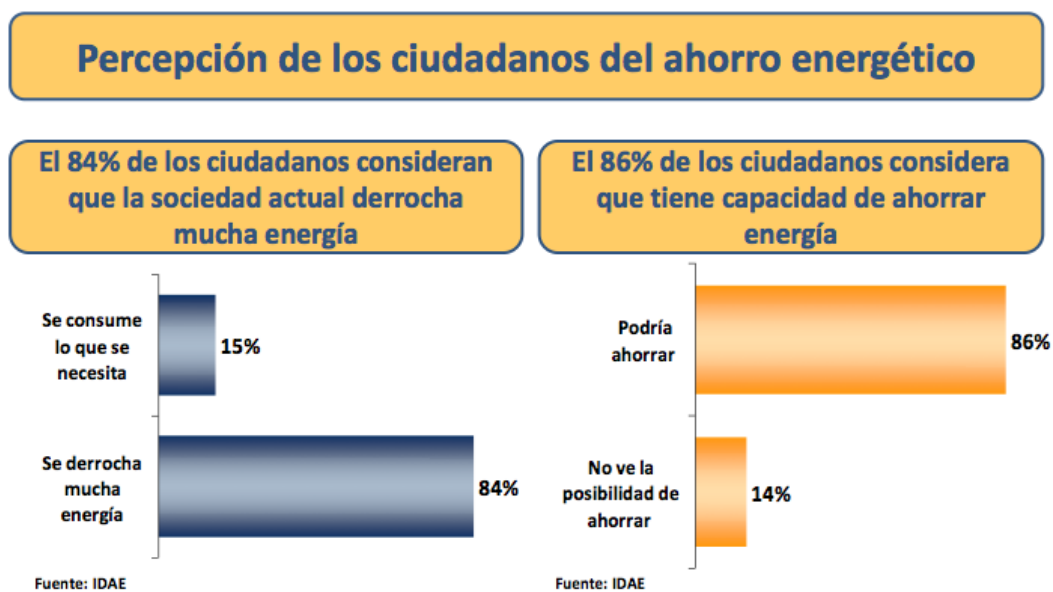
Oleson, Bonan, & Feddema, 2010; ORNL & LBNL, 2010; Parker, Barkaszi, Chandra, & Beal, 1995; Parker & Sherwin, 1998; Petrie, Atchley, Childs, & Desjarlais, 2001, 2007; Petrie, Wilkes, & Desjarlais, 2004; Rosenfeld, Akbari, Romm, & Pomerantz, 1998; Synnefa, Santamouris, & Akbari, 2007; B. Urban & Roth, 2010; Wilkes, 1989; Winandy & Beaumont, 1995).

Sin embargo, se ha realizado muy poca investigación en Europa y casi ninguna en España, a pesar de que por climatología parece a priori un lugar con un gran potencial para esta tecnología, sobre todo en las zonas más cálidas. En el caso de España, los estudios relacionados se han enfocado en estudiar los cambios en el albedo debidos a los invernaderos (Muñoz, Campra, & Fernández-Alba, 2010). Tal y como se explica en el siguiente capítulo, un cool roof es un tejado tratado para reducir el flujo de energía proveniente de las radiaciones solares y que calienta la casa, por tanto reduciendo el uso de aire acondicionado y ahorrando energía. La manera más simple de hacerlo es utilizando pintura blanca. Desarrollar una iniciativa a gran escala en España y especialmente en las regiones del sur y del sureste podría potencialmente generar grandes ahorros.

Esta tesis doctoral trata de cuantificar la magnitud de estos ahorros y analizar en qué zonas del país sería más conveniente utilizar esta sencilla técnica, así como estudiar la rentabilidad de la medida.

#### **1.4. Motivación de este trabajo**

La sensibilidad social hacia el ahorro energético en España es bastante alta. Según un estudio reciente del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el 84% de los ciudadanos opina que se derrocha mucha energía en la sociedad actual y el 86% considera que tiene capacidad para ahorrar (*Ilustración 1-13*) (IDAE, 2011a).



**Ilustración 1-13. Percepción de los ciudadanos del ahorro energético.**

Entonces, si la sensibilidad social hacia el ahorro energético es tan alta en España, ¿por qué los ciudadanos no aplican medidas de ahorro?

Seguramente la respuesta entra dentro de una de las cuatro categorías siguientes que han motivado la realización de esta tesis doctoral:

- No saben cómo hacerlo.
- Es demasiado caro y/o requiere una inversión inicial elevada.
- Es demasiado complejo.
- No saben cuánto se van a ahorrar (rentabilidad de la inversión).

Analizar la potencial rentabilidad de un tejado fresco o cool roof para que cada propietario de una vivienda pueda tener una idea clara de sus beneficios, es crítico a la hora de tomar decisiones de implantación masiva para las autoridades. Saber cómo priorizar las acciones o incluso si la técnica no es conveniente para una zona geográfica en concreto, es una información necesaria que no está disponible para España en la actualidad. Esta tesis doctoral pretende abordar todas estas cuestiones de una manera clara y rigurosa.



## 2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

### 2.1. Objetivos

Se pueden definir los objetivos de este trabajo en seis grandes puntos:

- Describir los métodos de control de radiación en los tejados y sus ventajas: se describirán distintos métodos como los “cool roofs” o “tejados frescos”, los “green roofs” o “tejados verdes” y otros métodos, para finalmente profundizar en los primeros.
- Definir una metodología para el cálculo de ahorros con “cool roofs” en términos de:
  - Energía: midiendo la energía que se ahorra potencialmente en aire acondicionado.
  - Coste: calculando el ahorro económico que supone potencialmente el hecho de no consumir la energía mencionada arriba.
  - Emisiones de CO<sub>2</sub>: derivadas de la energía ahorrada y que no tiene que ser producida y de los cambios en los “radiative forcings”, a veces traducido como “forzamientos o empujes radiativos”, que son cambios en la irradiación neta (diferencia entre radiación que entra y sale medidas en W/m<sup>2</sup>) entre distintas capas de la atmósfera.
- Estimar los ahorros para la Comunidad Autónoma de Andalucía, aplicando el método descrito.
- Estimar estos ahorros para todas las capitales de provincia españolas.
- Analizar la rentabilidad económica de invertir en aplicar esta técnica (comparativa de costes y beneficios económicos obtenidos).
- Realizar una herramienta de modelado dinámico en *Mathematica* para el cálculo de ahorros Cool-Roof en España.

## 2.2. Estructura de la tesis doctoral

Esta tesis doctoral se estructura en los siguientes capítulos:

En el capítulo 3 *Descripción de los tejados frescos o “cool roofs”* se describe el modelo físico de cool roof y se desarrollan los beneficios y problemas que acarrearán el convertir el tejado convencional de una vivienda en un cool roof.

En el capítulo 4 *Metodología para la estimación de ahorros con Cool roofs* se detalla el procedimiento seguido en la estimación de los ahorros, tanto energético como económico, que proporciona la instalación de un cool roof frente a un tejado convencional y una estimación de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al reducir esta demanda de energía.

En el capítulo 5 *Incertidumbres principales en el cálculo de ahorros: datos y herramientas disponibles* se presentan las diversas fuentes existentes de datos, fiables y contrastadas, que se han utilizado en el desarrollo de los cálculos de este estudio y qué herramientas existen en la actualidad en la estimación de ahorros.

En los capítulos 6 *Resultados: Estimación de ahorros para Andalucía* y 7 *Resultados: Estimación de ahorros para España*, se realiza un estudio pormenorizado de los ahorros energéticos, económicos y en emisiones de CO<sub>2</sub> que se obtendrían para Andalucía y España, respectivamente, si los tejados convencionales se convirtieran en cool roofs.

En el capítulo 8 *Costes y rentabilidad de los Cool Roofs*, se realiza un estudio de la rentabilidad económica de la instalación de cool roofs en España, detallando su distribución geográfica en función de si el tejado de la vivienda se encuentra en buen o mal estado, si la vivienda es antigua o moderna o si el color del tejado convencional es oscuro o medio.

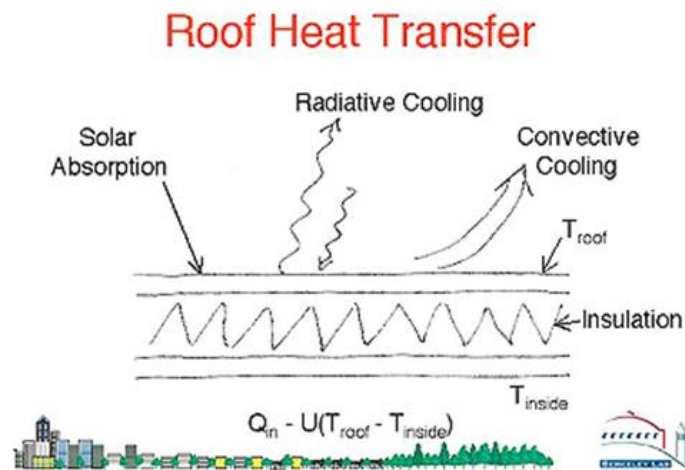
En el capítulo 9 *Validación de resultados contra otras publicaciones*, se comparan diversos estudios encontrados en la literatura acerca de los cool roofs.

En el capítulo 10 *Conclusiones y aportaciones*, se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este trabajo, qué contribuciones aporta y cuáles son las líneas de investigación futuras.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS TEJADOS FRESCOS O “COOL ROOFS”

Los techos de las casas pueden modelarse físicamente como una superficie aislante que separa dos medios diferentes: el interior de la vivienda y el exterior. Entre ambas superficies existe por tanto una transferencia de calor debido a la diferencia de temperaturas y proporcional al área de dichas superficies.

Como puede observarse en la *Ilustración 3-1*, esta transmisión de calor ocurre por tres motivos: transmisión del calor entre ambas superficies, radiación y convección debido a corrientes de aire tanto externas como internas.



**Ilustración 3-1. Transferencia de calor del tejado. Fuente LBNL.**

Entre los diferentes tipos de techos pueden clasificarse en tres grupos: techos negros, metálicos y blancos, como puede apreciarse en la *Ilustración 3-2*. Los techos negros presentan una baja reflectancia solar y una alta emitancia, lo cual provoca que la temperatura del interior de la vivienda sea elevada. Por otra parte, los techos metálicos tienen alta reflectancia solar y baja emitancia, lo que supone una temperatura interior inferior a la de los techos negros pero superior a los techos blancos, que presentan una temperatura interior inferior debido a su elevada reflectancia solar y alta emitancia. Como puede observarse en la *Ilustración 3-2*, un ejemplo de edificio con tejado blanco tiene

una temperatura interior de 120 °F que supone 60 °F (33.3 °C) menos que el edificio con un tejado oscuro o negro y 40°F (22.2 °C) menos que el edificio con tejado metálico.

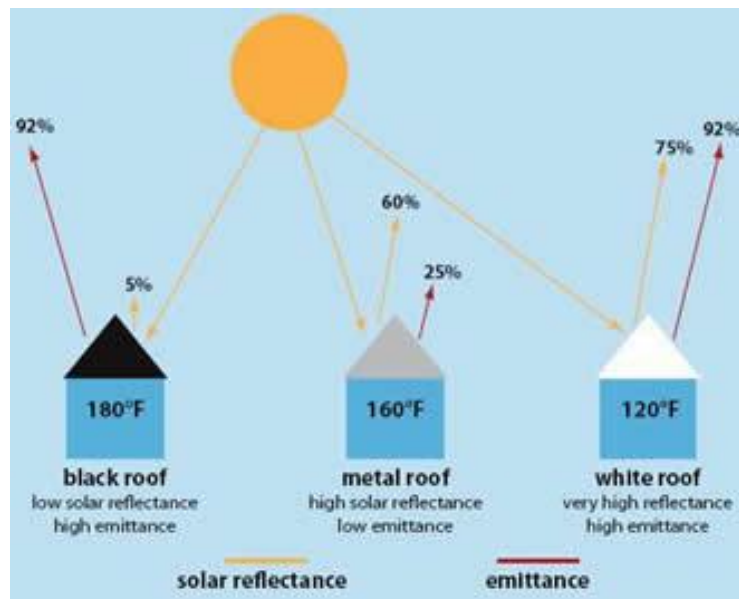
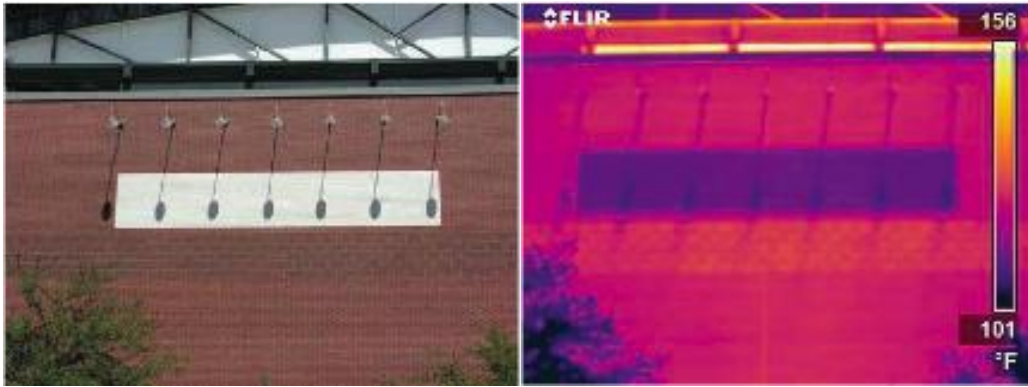


Ilustración 3-2. Tipos de tejados. Fuente: (U. S. EPA, 2010).

### 3.1. ¿Cómo funciona un cool roof?

Los tejados frescos son capaces de reducir el flujo de energía que entra en un edificio a través del tejado. Hay tres propiedades principales en la superficie del tejado que afectan este flujo: la reflectividad solar, la emittance infrarroja y el aislamiento térmico.

La reflectancia solar es el porcentaje de la radiación solar que se refleja hacia el cielo (en el espectro de 0,3 a 2,5  $\mu\text{m}$ , ver *Ilustración 3-3*), reduciendo la energía que el tejado absorbe. La reflectancia es la inversa de la absorptancia. Cuanto más claro es un material, mayor es su reflectancia, siendo el blanco puro el de mayor reflectancia (cercana a 1) y el negro el de menor (cercana a 0). La reflectividad o albedo tiene un efecto directo en la temperatura de la superficie donde con una cámara infrarroja se puede observar que la franja blanca de la pared está unos 3 °C a 5 °C más fría que el resto de la pared, ver *Ilustración 3-3*, (U. S. EPA, 2010).

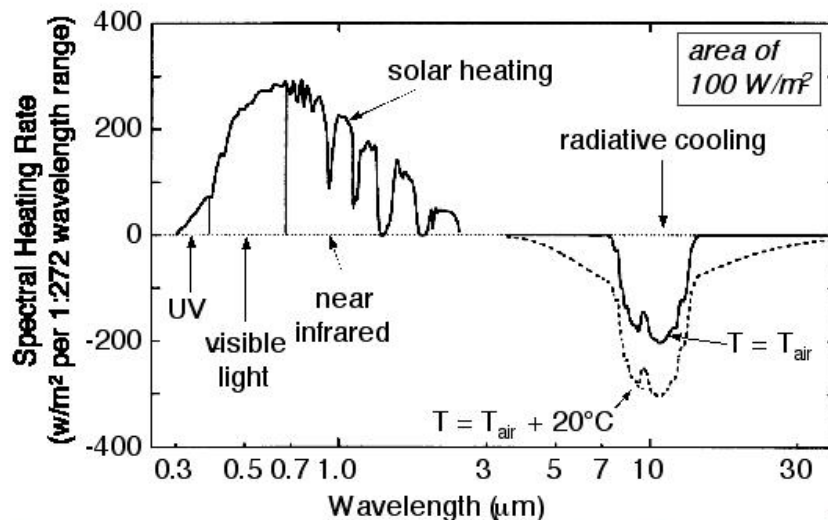


**Ilustración 3-3. Efecto de la reflectancia o albedo en la temperatura de la superficie.**

**Fuente: ASU National Center of Excellence.**

Cuando el tejado absorbe radiación solar, ésta se transforma en calor. Parte de este calor se emite de nuevo a la atmósfera en forma de radiación infrarroja (en el espectro de 4 a 80  $\mu\text{m}$ , ver *Ilustración 3-4*), de acuerdo a la propiedad de emitancia del material. Así, un material con baja emitancia térmica como es el aluminio, emitirá poca radiación infrarroja o calor hacia el exterior.

El efecto de enfriamiento por la emisión de radiación infrarroja termal depende de la temperatura del tejado. Si está a temperatura ambiente, el efecto ocurre en la ventana espectral entre 8 y 13  $\mu\text{m}$ , mientras que un tejado con una temperatura superior a la ambiental tiene una ventana más ancha, tal y como se ilustra en la *Ilustración 3-4*.



**Ilustración 3-4. Distribución espectral de la radiación térmica de un tejado. Fuente LBNL.**

De este modo, un tejado con una alta reflectividad y una alta emisividad, absorberá menos energía y estará a menor temperatura que un tejado normal

(Levinson & Akbari, 2010). Si la superficie del tejado está más fría, entrará menos energía en el edificio en forma de calor, mejorando la sensación de confort y disminuyendo la demanda energética de refrigeración para enfriar el espacio. Si la refrigeración se realiza con aire acondicionado, entonces se ahorrará energía eléctrica.

No todo el calor absorbido por el tejado penetrará en el edificio: el aislamiento térmico es la propiedad que define cuánta de esta energía atravesará el tejado, entrando o saliendo del edificio. El aislamiento es la medida más efectiva para ahorrar energía (tanto de refrigeración como de calefacción), pero depende de la constitución física del material y normalmente es bastante costosa.

Cambiar el aislamiento de un tejado suele ser costoso y complejo, dado que deben realizarse cambios estructurales en el tejado añadiendo o cambiando una capa de aislamiento en la estructura del tejado para aumentar el valor del aislamiento. Sin embargo, para cambiar la reflectancia del tejado sólo es necesario actuar en la superficie del mismo, generalmente cambiando el color a uno más claro o utilizando un material de alta radiación (Levinson & Akbari, 2010).

Para climas templados y cálidos, es preferible una emitancia infrarroja alta, ya que parte del calor absorbido del sol se emitirá de nuevo y no entrará en el edificio. De este modo se reduce la carga de refrigeración del espacio, reduciendo la temperatura interior mejorando la sensación de confort y ahorrando energía en edificios con aire acondicionado. Para climas fríos con un verano muy caluroso, es mejor una emitancia alta, dado que la penalización en la calefacción durante el año será menos importante (Miller, Parker, & Kriner, 2004). Para climas fríos todo el año, los tejados frescos no son adecuados y seguramente es mejor invertir en aislamiento térmico.

Aunque los cool roofs son más beneficiosos en climas cálidos y templados, si la zona es de inviernos muy fríos, un tejado verde (con vegetación) puede tener un mejor rendimiento (Ray, 2010), dado que proporciona un nivel de aislamiento adicional (Palomo del Barrio, 1998).

En general, los tejados frescos tienen un impacto mayor en edificios con poco o ningún aislamiento, ya que estos son más sensibles a los cambios de temperatura exterior (H. Akbari, Konopacki, & Pomerantz, 1999).

Para resumir, un cool roof o tejado fresco, se define como un tejado con alta reflectancia solar y una emitancia infrarroja alta o baja.

A la hora de calcular ahorros, es importante conocer la reflectividad y emitancia del material de la cubierta. En la se muestran estos valores para diversos materiales: Los materiales más adecuados para utilizar en tejados frescos son los del cuadrante superior izquierdo: alta reflectancia y alta emitancia en infrarrojos.

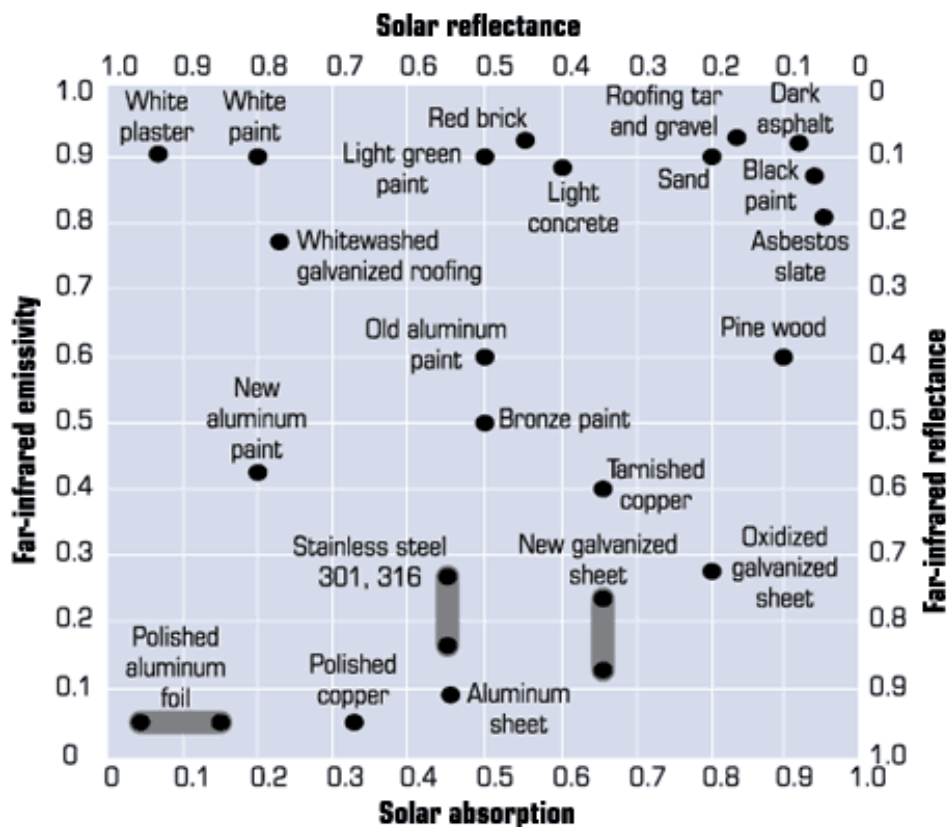


Ilustración 3-5. Propiedades reflectivas y emisivas de varios materiales. Fuente: FSEC.

En la *Tabla 3-1* se muestra la absorptividad de diferentes materiales y en la *Tabla 3-2* la absorptividad de diferentes pinturas.

**Tabla 3-1. Absortividad de materiales**

Material	Absortividad
Lámina de aluminio pulida	0.12
Pavimento de asfalto	0.82
Ladrillo claro	0.55
Ladrillo rojo	0.88
Ladrillo barnizado	0.25
Cemento con amianto incoloro	0.75
Cemento amianto blanco	0.61
Hormigón negro	0.91
Hormigón color pardo	0.85
Hormigón normal	0.65
Fieltro bituminoso	0.88
Grava	0.29
Chapa galvanizado blanca	0.26
Mármol blanco	0.58
Cubierta clara	0.50
Cubierta vegetal	0.86
Pizarra	0.87

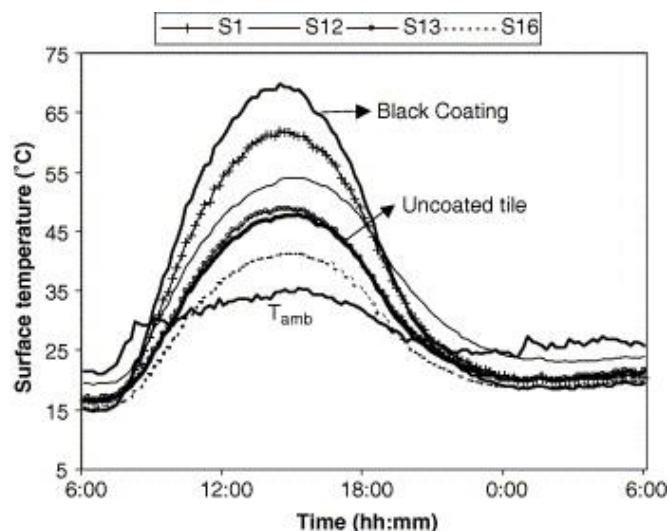
**Tabla 3-2. Absortividad de pinturas**

Material	Absortividad
Capa de aluminio	0.40
Negra lisa	0.95
Negra lacada	0.92
Negra mate	0.98
Azul claro	0.88
Azul oscuro	0.91
Marrón oscuro	0.88
Esmalte marrón	0.79
Marrón medio	0.84
Marrón claro	0.80
Gris oscuro	0.91
Gris claro	0.75
Verde claro	0.47
Verde oscuro	0.89
Roja	0.74
Media capa de óxido	0.78
Plateada	0.25
Superficie de estaño (blanca brillante)	0.05



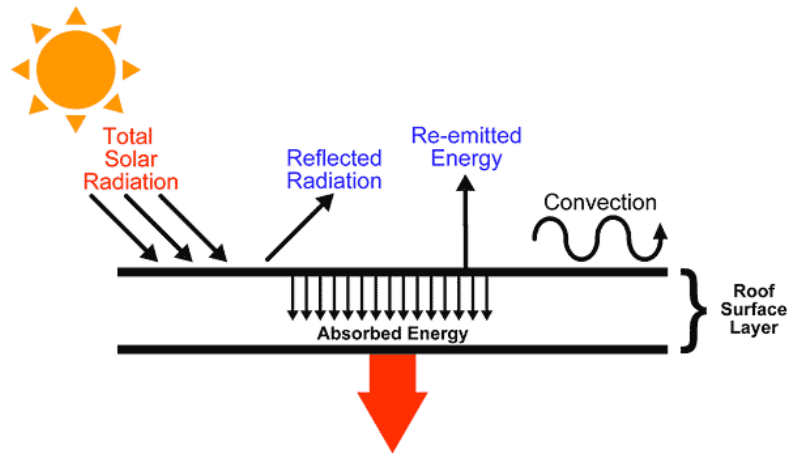
Los tejados convencionales tienen reflectancias de entre 0,20 y 0,35, aunque para un tejado muy oscuro puede ser tan baja como 0,05. Los metales tienen una emitancia muy baja y casi todos los demás materiales, la tienen baja. Por ejemplo, una pintura negra tiene una emitancia del 0,95 y una pintura blanca del 0,90, mientras que un metal sin tratar tiene un 0,35. Algunos fabricantes incluyen metal en las pinturas para reducir la emisividad.

Como ejemplo del efecto en la temperatura de diversos materiales, a continuación se ve el resultado de algunos experimentos realizados por (Synnefa, Santamouris, & Livada, 2006) para medir el efecto termal de diversos recubrimientos reflectivos sobre una teja de cemento corriente de color blanco. En la *Ilustración 3-6* se puede observar una distribución horaria representativa (tomada en agosto de 2004) de la temperatura de diversos recubrimientos para una teja. En la figura se pueden ver como la temperatura de la muestra recubierta de negro (S7: Black coating) tiene un valor máximo de 67,92 °C, frente a los 45,79 °C de la muestra de la teja sin recubrir (S15: uncoated tile) y los 38,28 °C de la muestra blanca más reflectiva (S16: White acrylic elastomeric coating). Es decir, que la muestra negra tenía en su máximo punto una temperatura 48% (22 °C más) superior a la teja sin tratar, mientras que la blanca tenía una temperatura de un 16% (7,5 °C) inferior, teniendo en cuenta que el cemento original era claro.



**Ilustración 3-6. Distribución de la temperatura de diferentes tipos de recubrimiento. S1, S12: aluminio; S13, S16: blanco; S7: negro. S15: teja sin recubrimiento. Fuente:** (Synnefa et al., 2006).

Desde un punto de vista más académico se pueden resumir los flujos de energía del tejado en la *Ilustración 3-7*.



**Ilustración 3-7. Flujos de energía en el tejado. Fuente: (Cool Metal Roofing, 2015).**

El balance térmico puede representarse según la *Ecuación 3-1* descrita en (Sarah Bretz, Akbari, & Rosenfeld, 1998), donde la temperatura de equilibrio  $T_s$  para una superficie expuesta al sol con aislamiento por debajo será:

**Ecuación 3-1. Balance térmico superficie expuesta al sol con aislamiento por debajo**

$$(1 - \alpha)I = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{cielo}}^4) + h_c(T_s - T_a)$$

donde:

$\alpha$  es la reflectividad solar o albedo de la superficie;

$I$ , la irradiación total incidente en la superficie, en  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$\varepsilon$ , la emitancia de la superficie;

$\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzmann,  $5.6685 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ ;

$T_s$ , la temperatura de equilibrio, en K;

$T_{\text{cielo}}$ , la temperatura efectiva radiante del cielo, en K;

$h_c$ , el coeficiente de convección, en  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ;

$T_a$ , la temperatura del aire según se define en (ASHRAE, 1998).

### 3.2. Beneficios de la utilización de cool roofs

Existen numerosos estudios que describen y han medido los beneficios de utilizar cool roofs, incluso se ha cuantificado el impacto económico de una

implantación a gran escala en diversas partes del mundo. Los beneficios más importantes son:

- Reducción en el uso de aire acondicionado.
- Ahorros en la demanda eléctrica pico.
- Mejora de la sensación de confort en el interior del edificio
- Reducción en costes de mantenimiento del tejado

Cuando se hace una utilización a gran escala, entonces se pueden obtener los siguientes beneficios:

- Mitigación del fenómeno de las “islas urbanas”
- Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>
- Reducción de la contaminación en los núcleos urbanos

A continuación se describe cada uno de estos beneficios y se proporcionan ejemplos concretos para cuantificarlos:

### **3.2.1. Reducción en el uso de aire acondicionado, debido a la menor demanda energética del edificio**

Según se ha explicado en el apartado anterior *¿Cómo funciona un cool roof?*, al penetrar menos energía térmica del exterior en dentro del edificio, se reduce la carga térmica y por tanto la necesidad de utilizar el aire acondicionado (AA).

En el estudio de (Parker et al., 1995) se midió el efecto de cambiar el color del tejado de nueve casas en Florida (EEUU) en mitad del verano. La reducción media en la carga de refrigeración (uso de AA) fue del 19%. Los ahorros oscilaron entre el 2% y el 43%, dependiendo del aislamiento, la reflectividad solar inicial del tejado, la colocación del conducto de aire y la eficiencia y configuración del equipo de AA. Más datos de los estudios desarrollados en el FSEC pueden encontrarse en (Parker & Barkaszi Jr., 1997; Parker, Sherwin, Sonne, & Barkaszi Jr., 1996; Parker & Sherwin, 1998).

Más tarde, (Parker & Sherwin, 1998) utilizaron el sistema software de simulación energética de edificios *DOE-21E* (ORNL, 2005a) del Departamento de Energía de los EEUU (DOE) para simular un modelo, obteniendo un ahorro medio del 18,6% tras simular once casas. Los autores simularon catorce áreas

climáticas diferentes de EEUU, obteniendo que los ahorros anuales en AA variaban desde el 13% de una casa en Saint Louis (la mejor aislada) al 58% de una casa existente en Los Ángeles. La demanda de calefacción se incrementaba sólo en un 5%. Los mayores ahorros absolutos fueron de 114 kWh/m<sup>2</sup> en Phoenix, la localidad más cálida de las evaluadas.

(Synnefa et al., 2007) estudiaron 27 ciudades de todo el mundo en climas cálidos utilizando el software de simulación *TRNSYS* (Solar Energy Laboratory, University Of Wisconsin, Madison, 1975) y datos de *METEONORM* (Meteotest, 2010). Descubrieron que incrementando la reflectividad solar se reducía la carga de refrigeración entre un 18% y un 93%, dependiendo de la ubicación del edificio.

### **3.2.2. Ahorros en la demanda eléctrica pico**

Los ahorros en la energía pico son también muy importantes en regiones con un grado de penetración de AA alto, dado que las reducciones de esta demanda pico resultan directamente en una mayor estabilidad de la red y reducen el número de plantas productoras de energía necesarias.

En diferentes estudios llevados a cabo en el *Florida Solar Energy Center* (FSEC), (Parker et al., 1996) y posteriormente (Synnefa et al., 2007) observaron una reducción media en la demanda pico de energía del 22%, variando desde el 12 al 38% en las cinco casas observadas. La hora en que se observó este pico de energía fue entre las 17:00 y las 18:00 horas locales.

En el mismo estudio mencionado en el apartado anterior, (Synnefa et al., 2007), se estimó un ahorro en la demanda pico de entre el 11 y el 27% en las 27 ciudades de todo el mundo consideradas.

En una simulación de once áreas metropolitanas de Estados Unidos, (Konopacki, Akbari, Pomerantz, Gabersek, & Gartland, 1997) se estimaron ahorros en demanda pico de 1,7 GW ya para 1997. Estos resultados se extrapolaron a los EEUU, estimando una reducción en la demanda pico del entre 6,2 y 5,2 GW, equivalentes a entre 12 y 14 centrales de producción de 0.5 GW de potencia cada una.

### 3.2.3. Mejora de la sensación de confort en el interior del edificio

Los tejados frescos pueden incrementar el confort de los usuarios, especialmente en las épocas de calor. Estudios realizados ya en los años 60 en Israel (Givoni & Hoffman, 1968) encontraron que edificios sin ventilación pintados de blanco estaban 3 °C más frescos que los mismos edificios pintados de gris. Pruebas similares en India, registraron que una maqueta a escala de un edificio oscuro con muy poco aislamiento térmico tenía una temperatura interior de 7 °C más alta que otro similar de color blanco, aunque ambos registraban casi la misma temperatura en las horas nocturnas.

Otro experimento en Madison, Wisconsin (EEUU) realizado en cinco habitaciones externas durante un periodo de tres años, concluyó que un contrachapado de madera cubierto con tejas negras estaba entre 5 °C y 8 °C más caliente que los que tenían tejas blancas (Solar Energy Laboratory, University Of Wisconsin, Madison, 1975).

En España, las condiciones de bienestar térmico están definidas en el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE) (Ministerio de Fomento, 1998), de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 7730. Estas condiciones se resumen en la *Tabla 3-3*.

**Tabla 3-3. Condiciones de diseño de viviendas para confort térmico. Fuente: RITE.**

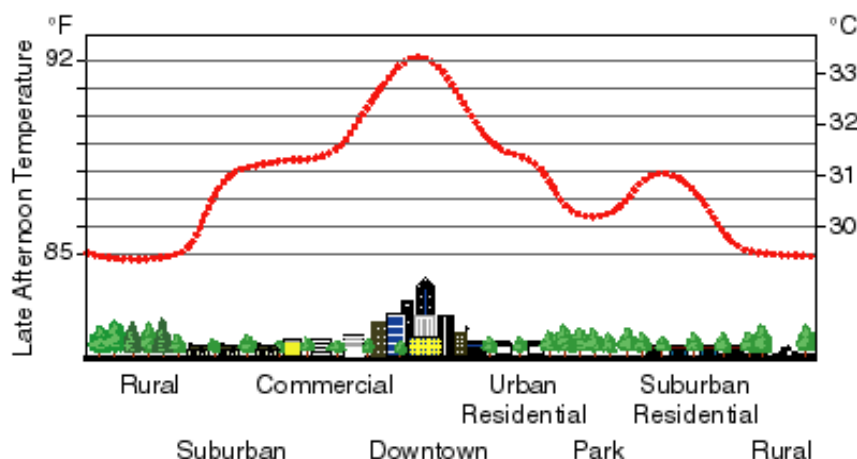
Estación	Temperatura Operativa (°C)	Velocidad media del aire (m/s)	Humedad relativa (%)
Verano	23 a 25	0,18 a 0,24	40 a 60
Invierno	20 a 23	0,15 a 0,20	40 a 60

### 3.2.4. Reducción en costes de mantenimiento del tejado

Los cool roofs hacen decrecer costes de mantenimiento del tejado. Al estar a una temperatura menor, están menos tiempo bajo condiciones de estrés térmico para los materiales y, en consecuencia, tienen un ciclo de vida más largo (Berdahl, Akbari, Levinson, & Miller, 2008).

### 3.2.5. Mitigación del fenómeno de las “islas urbanas”

Cuando se hace una aplicación a gran escala, los cool roofs contribuyen a cambiar el albedo (razón entre la energía luminosa que difunde por reflexión una superficie y la energía incidente) de las ciudades, ayudando a mitigar el fenómeno conocido como “Islas de Calor Urbanas” o en inglés “Urban Heat Islands”: mayor temperatura en los núcleos urbanos que en los entornos rurales (ver *Ilustración 3-8*).



**Ilustración 3-8. Perfil de temperaturas de diversas zonas ilustrando el efecto de las "islas urbanas" o "heat islands". Fuente: LBRL.**

España no es una excepción en este fenómeno, donde diversos estudios han encontrado diferencias de más de 8 °C en Barcelona (Moreno-García, 1994) y en las principales ciudades españolas (Esteban-Parra, Rodrigo, & Castro-Díez, 1995; Yagüe, Zurita, & Martínez, 1991).

### 3.2.6. Reducción de la contaminación en los núcleos urbanos

Los tejados frescos pueden contribuir también a la reducción de la contaminación en las ciudades. En el documento de (Rosenfeld et al., 1998), se realiza un buen estudio sobre la relación del albedo, la formación de contaminación y cómo la producción de ozono se dispara a partir de los 22 °C.

El grupo “The Heat Island Group” (grupo de la isla de calor) del LBNL publicó que la contaminación en Los Ángeles (California, EEUU) incrementaba un 5% por cada 1 °C que aumentaba la temperatura por encima de los 22 °C (H. Akbari, 2005).

### 3.2.7. Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>

Hay también estudios muy interesantes sobre la potencial reducción de CO<sub>2</sub> derivada del uso de cool roofs. En (Hashem Akbari, Menon, & Rosenfeld, 2009) se estudia el efecto de cambiar el albedo urbano (sobre todo con tejados frescos y carreteras o pavimentos frescos (ver *Ilustración 3-9*)) en el balance radiativo global (global radiative forcings), estimando que la emisión global de CO<sub>2</sub> puede reducirse en 24 Gt (incrementando la reflectancia de los tejados en 0,25 y la de las carreteras en 0,15). Según sus cálculos, las emisiones se reducirían en 64 kg por cada m<sup>2</sup> de tejado fresco.



**Ilustración 3-9. Asfalto tradicional vs asfalto aclarado con aditivos. Fuente: David Hitchcock, HARC.**

En (Menon et al., 2010) se realizó un cálculo similar, un poco más preciso, con una estimación de ahorro de unos 57 Gt de CO<sub>2</sub>.

Una línea completamente diferente de investigación, es el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la reducción de la energía eléctrica para refrigeración (aire acondicionado). (Levinson & Akbari, 2010) estimaron un ahorro de unos 3,02 kg de CO<sub>2</sub> por cada m<sup>2</sup> de área de cool roof (sobre áreas acondicionadas) en edificios comerciales, asumiendo un incremento de la reflectividad al 55% (después de la degradación por efectos climáticos) desde el 20% (tejado gris convencional). En el mismo estudio, estimaron que rehabilitar el 80% de la superficie de tejados de edificios comerciales en EEUU con estos criterios, podría evitar la emisión de 6,23 Mt de CO<sub>2</sub> anuales.

### 3.3. Posibles problemas de los cool roofs

Debido al cambio de albedo en las ciudades, el incremento en la luz que se refleja puede causar molestias visuales (S. Bretz & Akbari, 1994). Este problema no es muy importante a nivel de la calle para los tejados planos, pero puede serlo para los tejados inclinados. Es necesaria más investigación en esta área para discernir si el posible deslumbramiento es o no un problema crítico.

Pero la principal barrera para la adopción de los tejados frescos como un estándar es posiblemente estética, dado que los tejados claros no están socialmente aceptados en la mayoría de los países.

También es muy importante considerar la ubicación física del edificio, dado que los potenciales beneficios dependen, como se verá más adelante, sobre todo de la temperatura ambiente, el tipo de construcción y el precio de la energía. Como ya se estudió en (Oleson et al., 2010), globalmente el aumento en el flujo de calefacción por los cool roofs es mayor que la reducción en el flujo de aire acondicionado, dado que el impacto en la calefacción es mayor que en la refrigeración, pero el precio de la energía es clave en este proceso, dado que la energía eléctrica de refrigeración es generalmente más cara que la calefacción. Por estas razones, es importante discriminar bien en qué lugares y circunstancias son viables los cool roofs, siendo recomendables en lugares con aire acondicionado o en lugares cálidos con periodos cortos de calefacción y/o altos costes de electricidad.

### 3.4. Intuiciones falsas sobre los cool roofs

Cuando se habla de tejados frescos o cool roofs, la opinión pública suele hacer una serie de asunciones que la ciencia ha demostrado falaces. En esta sección se exponen los principales malentendidos y se proporcionan ejemplos para clarificarlos:

- **El sobrecoste de la calefacción es mayor que los ahorros en refrigeración:** Siempre hay un incremento en la carga de calefacción del edificio, ya que menos energía del sol penetrará en el edificio. Pero esta penalización en la calefacción suele ser menor que los ahorros en aire acondicionado, principalmente por dos razones: hay menos horas de sol en



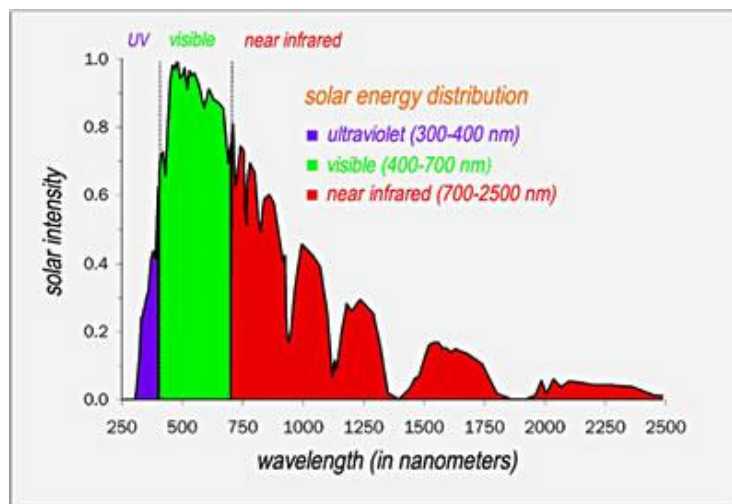
invierno (en el hemisferio norte donde está situada España) y los sistemas de calefacción suelen usar fuentes de energía más económicas (gas, gasoil) que las máquinas eléctricas de aire acondicionado. (Synnefa et al., 2007) realizaron un estudio en 27 ciudades de todo el mundo que representaban diversas condiciones climáticas y concluyeron que la penalización en la calefacción variaba entre los 0.2 y los 17 kWh/m<sup>2</sup> anuales, mientras que los ahorros de climatización variaban entre 9 y 48 kWh/m<sup>2</sup> anuales.

- **Degradación de la reflectividad por efectos climáticos “Weathering effect”**: La reflectividad solar disminuye por los efectos climáticos (suciedad, lluvia, etc.). Se sabe que la mayor parte de la degradación ocurre en los primeros dos años, donde generalmente se pierde un 20% de la reflectividad (S. Bretz & Akbari, 1994). Después de este periodo, sin embargo, la reflectividad se estabiliza.
- **Los efectos climáticos no afectan a la emitancia** (Petrie et al., 2001): Se está realizando mucha investigación para desarrollar materiales más resistentes (Berdahl et al., 2008). Pero en la mayoría de los casos lavar el tejado puede restablecer la reflectancia a un 90% de su valor inicial, demostrando que la mayoría de la degradación se debe a la acumulación de suciedad que al efecto de rayos ultra violetas o a degradación hidrolítica (Sarah Bretz et al., 1998). Generalmente, contratar a alguien para limpiar el tejado no es una solución efectiva en costes si sólo se consideran los ahorros en climatización (S. Bretz & Akbari, 1994). En esta tesis, para la realización de los cálculos, se asumirá que la reflectancia solar es de un máximo del 60%, asumiendo que el tejado ha estado expuesto a la intemperie al menos durante dos años (Levinson, Berdahl, Asefaw Berhe, & Akbari, 2005).
- **Los cool roofs deben ser blancos o muy claros**: Generalmente un tejado blanco no es bien aceptado socialmente por razones estéticas. Aunque en algunos lugares como las Islas Bermudas, esta convención social no existe y los tejados claros dominan el paisaje (ver *Ilustración 3-10*).



**Ilustración 3-10. Techados frescos en Bermudas (Silverman, 2008).**

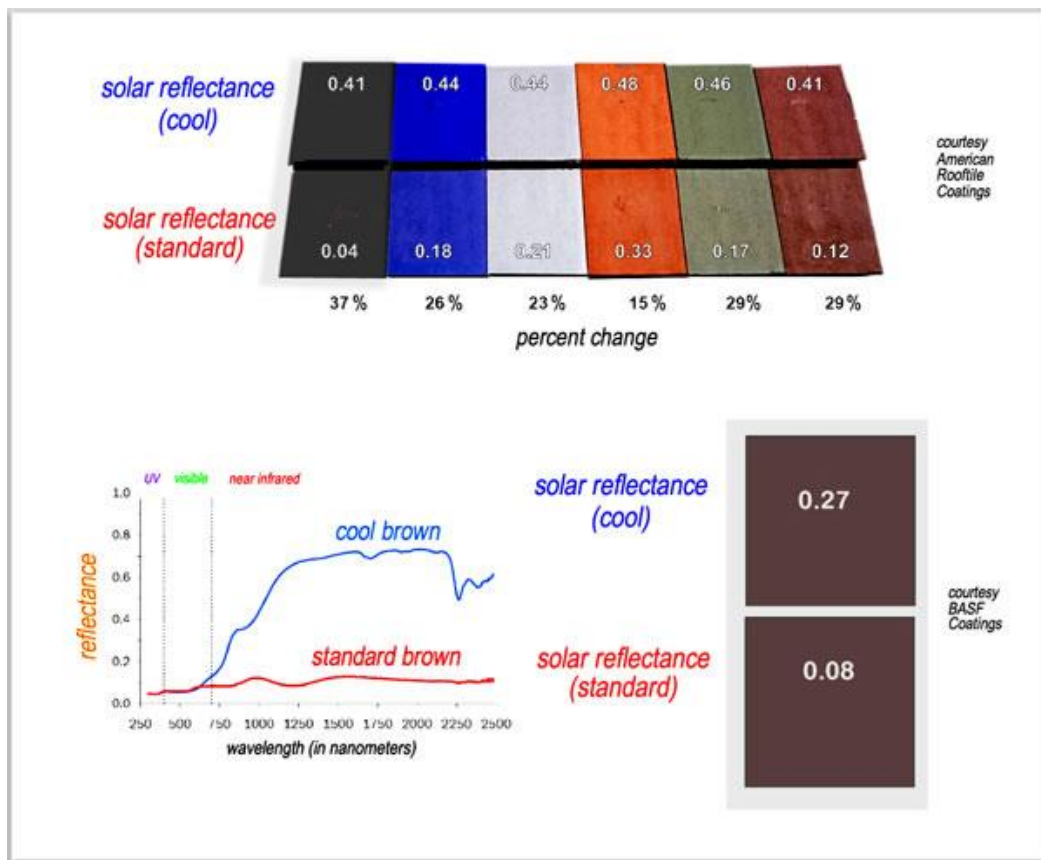
Para evitar esta barrera social, se está realizando una cantidad de esfuerzo significativa en los llamados materiales con “cool colors” o colores frescos. Estos nuevos materiales están alterados con pigmentos inorgánicos que tienen una alta reflectividad en el espectro solar cercano al infrarrojo incluso siendo oscuros a la vista. El efecto “cool” se consigue porque gran parte de la radiación solar se encuentra en el espectro cercano al infrarrojo (ver *Ilustración 3-11*).



**Ilustración 3-11. Los “cool colors” son construidos para reflejar más luz solar cerca de longitudes de onda del infrarrojo. Fuente: LBNL.**

Se han creado materiales con “colores frescos” para baldosas de cemento, de cerámica, techados de metal y tejas convencionales. Para los primeros materiales, se incrementó la reflectancia solar hasta entre un 0.30 a un

0.45, desde valores iniciales de 0.05 y 0.25 y hasta más de 0.30 para las tejas (H. Akbari et al., 2005). Algunos ejemplos de materiales con “cool colors” pueden verse en la *Ilustración 3-12* y la *Ilustración 3-13*.



**Ilustración 3-12. Reflectancia solar de diferentes “cool colors”.**

Un ejemplo de la diferencia de temperaturas que puede obtenerse con los “cool colors” se muestra en la *Ilustración 3-13*. La fila de arriba representa las tejas “cool” mientras que la de abajo las tejas habituales de los distintos colores. Las temperaturas se tomaron entre las 11:20 y las 11:30 el 17 de septiembre de 2003 con una temperatura ambiental de 27 °C y una irradiación horizontal de 820 W/m<sup>2</sup>. Se puede observar que la diferencia de temperatura varía desde sólo 2,3 °C para el color azul hasta un máximo de 14,4 °C para el color negro.

53.9°C	53.3°C	48.9°C	50.0°C	49.4°C	49.4°C
black	blue	gray	terracotta	green	chocolate
68.3°C	55.6°C	53.9°C	54.4°C	56.1°C	56.1°C

**Ilustración 3-13. Apariencia y temperatura de distintos recubrimientos con "cool colors" (fila superior) frente a colores normales. Fuente (Levinson, Akbari, & Reilly, 2007).**

Las investigaciones preliminares sugieren que el coste de los recubrimientos "cool color" será de aproximadamente 1 dólar americano por metro cuadrado superior a los materiales convencionales, incrementando el coste total del tejado en sólo un 2% a un 5% (H. Akbari, 2005).

En la actualidad se continúa investigando en los colores frescos, aunque todavía no se ha extendido su uso en el mercado, donde los tejados inclinados podrían ser los mayores beneficiados. En la *Ilustración 3-14* se puede ver una foto del centro de investigación *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) (Tennessee, EEUU) especializado en el desarrollo de esta tecnología.



**Ilustración 3-14. Vista aérea del área de Cool Colors del centro de investigación ORNL.**

**Fuente: LBNL.**

**El uso de aire acondicionado en España es muy bajo:** aunque el uso de aire acondicionado (AA) en Europa es significativamente menor que en los EEUU, su popularidad ha crecido espectacularmente en los últimos años. España es el primer mercado de aire acondicionado de la Unión Europea, con una 37% de la cuota de mercado (Bertoldi & Atanasiu, 2009). Según el último informe oficial sobre calefacción y aire acondicionado en los hogares del Instituto Nacional de Estadística de España (INE, 2009), un 35.5% de los hogares españoles dispone de aire acondicionado y un 70.3% de calefacción. Murcia es la región con mayor uso de AA, con un 63.9% de hogares con AA y un 87.6% con calefacción. Andalucía es la segunda región, con un 57.4% de las casas con AA y un 43.1% con calefacción. En la *Tabla 3-4* se encuentran los datos para todas las comunidades autónomas españolas.

- **Los cool roofs no son adecuados para climas fríos:** Para calcular los ahorros por los tejados frescos, la severidad del verano es más importante que la temperatura media anual, según se ha explicado en el primer punto de este apartado. En distintos estudios se han encontrado ahorros positivos para ciudades tan frías en invierno como Nueva York y Chicago (Konopacki et al., 1997). En esta tesis se han estimado ahorros positivos para ciudades con inviernos fríos como Madrid, Pamplona y Bilbao.
- **La técnica sólo es efectiva para tejados planos:** Los tejados se clasifican en dos grupos dependiendo de su inclinación: los planos o de poca inclinación (5 cm de alto sobre caída de 23 cm (2 pulgadas sobre 12 en sistema imperial)) y tejados inclinados (para cualquier inclinación mayor) (B. Urban & Roth, 2010).

Los tejados planos reciben más radiación horizontal que los tejados inclinados y es más fácil modelar su comportamiento. Se han medido ahorros positivos para tejados inclinados (Miller et al., 2004), que pueden clasificarse como “cool” o fresco con una reflectancia menor que los tejados planos. De acuerdo a la Agencia de Protección de la Energía norteamericana (EPA), para estar listado en su programa de certificación Energy Star<sup>®</sup>, un tejado plano debe tener una reflectancia inicial de al menos 0.65 y de un mínimo de 0.50 después de tres años de la instalación. Un

tejado inclinado, debe tener una reflectancia inicial de 0.25 y de 0.15 a los tres años (Miller et al., 2004).

Aunque hay una calculadora disponible para tejados inclinados desarrollada por el Departamento de Energía Estadounidense (ORNL, 2005b), no hay mucha documentación científica para verificar su corrección ni el error de sus cálculos. En esta tesis, sólo se considerarán los tejados con tejado plano.

**Tabla 3-4. Porcentaje de viviendas en España con calefacción y/o aire acondicionado por Comunidades Autónomas.**

	Viviendas con calefacción (% sobre total)	Temperatura media calefacción durante el día (°C)	Viviendas con aire acondicionado (% sobre total)	Temperatura media aire acondicionado durante el día (°C)
Andalucía	43,1	23,3	57,4	22,7
Aragón	92,0	20,9	37,4	21,5
Asturias (Principado de)	84,9	20,5	0,4	20,6
Baleares (Illes)	88,1	21,7	46,1	22,0
Canarias	2,7	21,7	6,3	22,5
Cantabria	76,9	19,8	0,7	20,6
Castilla y León	90,8	20,2	3,3	21,4
Castilla-La Mancha	86,2	21,5	36,2	22,5
Cataluña	76,0	20,8	36,1	21,6
Comunitat Valenciana	61,1	22,8	54,5	22,7
Extremadura	79,7	22,0	58	22,5
Galicia	59,9	19,5	1,0	19,4
Madrid (Comunidad de)	90,4	21,8	43,5	22,3
Murcia (Región de)	87,6	23,5	63,9	22,7
Navarra (Comunidad Foral de)	94,6	21,1	11,4	21,2
País Vasco	89,9	20,1	1,7	20,7
Rioja (La)	97,2	20,5	13,3	20,9
Ceuta y Melilla	20,6	27,0	27,6	23,0
Total Nacional	70,3	21,3	35,5	22,3

## 4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE AHORROS CON COOL ROOFS

A continuación se presenta una metodología para calcular ahorros económicos potenciales con los cool roofs. En los próximos apartados, se aplicará dicha metodología para calcular el ahorro potencial en Andalucía de transformar los edificios de tejado plano en el ámbito residencial (viviendas). A continuación se realizará una estimación del ahorro por metro cuadrado de tejado para las capitales de provincia de toda España. Aunque el cálculo agregado se realizará para Andalucía, por supuesto la metodología puede ser utilizada para hacer estimaciones en otras regiones, Comunidades Autónomas o incluso países.

Las Comunidades Autónomas españolas pueden abarcar más de una zona climática. En esta tesis se hace un análisis por provincias, calculando el ahorro estimado en las capitales de provincia y después sumando los ahorros obtenidos. Podría hacerse el estudio con un nivel de granularidad mayor, a nivel municipio por ejemplo, pero para el objetivo de esta tesis de hacer una primera estimación para España, se considera que este nivel de detalle es suficiente. Sobre todo, teniendo en cuenta que los principales beneficios de adoptar la tecnología de tejados frescos a gran escala se obtienen en los núcleos urbanos.

Para realizar los cálculos, tal y como se explica más adelante, se ha adoptado el algoritmo de cálculo usado en la calculadora para tejados planos del Departamento de Energía Norteamericano: “*DOE Cool Roof Calculator for Low-Slope or Flat Roofs*” (ORNL, 2005b).

Los datos de entrada para la simulación se componen de las variables climatológicas de la provincia y las características del tejado. Como se explicó anteriormente en el apartado *¿Cómo funciona un cool roof?*, los tejados frescos se caracterizan por tener una alta reflectividad solar y preferiblemente una alta emitancia térmica. La otra característica fundamental del tejado que va a incidir en los posibles ahorros es la resistencia térmica, generalmente denominada *R-value* ( $m^2K/W$ ) y que es la inversa de la transmitancia térmica generalmente expresada como *U* ( $W/m^2K$ ).

Para calcular los ahorros por metro cuadrado de tejado fresco, primero se obtienen los ahorros en energía mediante la realización de dos simulaciones de demanda energética: una con los valores de reflectividad solar propias de un cool roof y otra con un tejado más oscuro (menor reflectividad) con la misma resistencia térmica y emitancia. El ahorro en energía será la diferencia de las demandas energéticas en los dos casos, tanto de calefacción como de refrigeración.

Los ahorros económicos medios por metro cuadrado de tejado se calculan dependiendo del precio y tipo de energía utilizada (electricidad o gas) y de la eficiencia de los sistemas de calefacción y de refrigeración. Los resultados se ajustan posteriormente para reflejar solamente los edificios con sistemas activos de calefacción o aire acondicionado, dado que para los que no tengan, el beneficio se limitará a una mejor sensación de confort pero no tendrá un impacto económico por la energía que deje de consumir el sistema de aire acondicionado o la energía extra que se requiera de la calefacción.

Por último, este ahorro económico medio se multiplica por el área de tejados planos (o de poca pendiente) residenciales de la provincia para obtener el ahorro total por provincia. Los ahorros de la Comunidad Autónoma se calculan como la suma de los ahorros de todas sus provincias.

Es importante resaltar que los ahorros de energía se traducen fácilmente en ahorros de CO<sub>2</sub>, dado que la cantidad de dióxido de carbono que se genera al producir energía es conocido (Romeo, Calvo, Valero, & De Vita, 2009).

A continuación se resume esta metodología y se describe en detalle cada uno de sus pasos:

El método puede dividirse en cuatro partes bien diferenciadas:

1. Obtener datos de entrada: se identifican todas las variables que intervienen en los cálculos y se obtienen los datos. Todas las fuentes se describen en detalle a continuación.
2. Estimación de demanda energética por provincia: se obtiene la diferencia entre la demanda de calefacción y de refrigeración mediante simulaciones de distintos tipos de tejados según su reflectividad y aislamiento en cada provincia con las características climáticas y se



- comparan con tejados negros en la misma ubicación para obtener los posibles ahorros en kWh/m<sup>2</sup>.
3. Cálculo de ahorros económicos por provincia: Se transforman estos ahorros de energía en €/m<sup>2</sup>. Tanto el coste de la energía como la emisión media de CO<sub>2</sub> al generar dicha energía son variables de entrada.
  4. Agregación regional de resultados: Por último, se agregan e interpretan los datos de la Comunidad Autónoma, Andalucía en este caso, para presentar una visión más clara de los potenciales beneficios de utilizar cool roofs a nivel de una comunidad autónoma. Como ya se ha mencionado, esta metodología puede ser aplicada fácilmente a otras regiones.
  5. Estimación de ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub>: Los ahorros de energía en kWh/m<sup>2</sup> se transforman en ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub>. La cantidad media de emisiones de CO<sub>2</sub> producidas al generar esta energía es parte de las variables de entrada. Los cool roofs, tienen también un efecto climatológico como un forzamiento o empuje radiativo (radiative forcing) debido al aumento del albedo. Este forzamiento es negativo y tiende a reducir las temperaturas, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen un forzamiento radiativo positivo. En este trabajo se presenta una estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> que podrían ser evitadas con el uso extensivo de tejados frescos en Andalucía.

#### **4.1. Datos de entrada**

Aunque el método de cálculo no es complejo, obtener fuentes de datos fiables y contrastadas ha sido una tarea muy ardua. En la *Tabla 4-1* se muestra un resumen de las principales variables, sus valores y las fuentes utilizadas.

**Tabla 4-1. Resumen de variables y fuentes utilizadas en la metodología.**

Sección de Metodología	Variable		Valor	Unidad	Fuente
4.1.1 Datos climatológicos	Insolación diaria media anual		Ver Ilustración 4-1 e Ilustración 4-2	kWh/m <sup>2</sup> ·día	(NASA, 2012)
	HDD 18			°C·día	
	CDD 18			°C·día	
4.1.2 Tipos de tejados	Reflectancia solar	White	60%	%	(H. Akbari et al., 2005; Petrie et al., 2001)
		Medium	25%	%	
		Dark	5%	%	
	Emitancia infrarroja		90%	%	
	R-Value edificios antiguos	V y W	0,71	m <sup>2</sup> K/W	(Ministerio de Fomento, 1979)
		X	0,83	m <sup>2</sup> K/W	
		Y	1,11	m <sup>2</sup> K/W	
		Z	1,43	m <sup>2</sup> K/W	
	R-Value edificios nuevos	A	2	m <sup>2</sup> K/W	(Ministerio de Fomento, 2006)
		B	2,22	m <sup>2</sup> K/W	
C		2,44	m <sup>2</sup> K/W		
D		2,63	m <sup>2</sup> K/W		
E		2,86	m <sup>2</sup> K/W		
4.3 Ahorros económicos	COP		3		(IDAE, 2010)
	EER	Eléctrica	1		
		Gas Natural	0,7		
	Precio Energía	Electricidad	0,2	€/kWh	(Ministerio de Industria y Comercio, 2010a)
Gas Natural		0,047	€/kWh		
4.4 Agregación regional	Distribución colores	Claro	10	%	(Google, 2006)
		Medio	70	%	
		Oscuro	20	%	
	Distribución edad edificio	Antiguos	95	%	Permisos de construcción (IEA, 2010; Ministerio de Fomento, 2006)
		Nuevos	5	%	
	Penetración Aire Acondicionado		57.4	%	(INE, 2009)
Penetración Calefacción		43.1	%		
4.5 Ahorros de CO <sub>2</sub>	Ratio emisión CO <sub>2</sub> de producción eléctrica	Andalucía	459.3	g/kWh	(AAE, 2009)
		EEUU	718	g/kWh	(Buchanan, DeLallo, Schoff, White, & R., 2000)

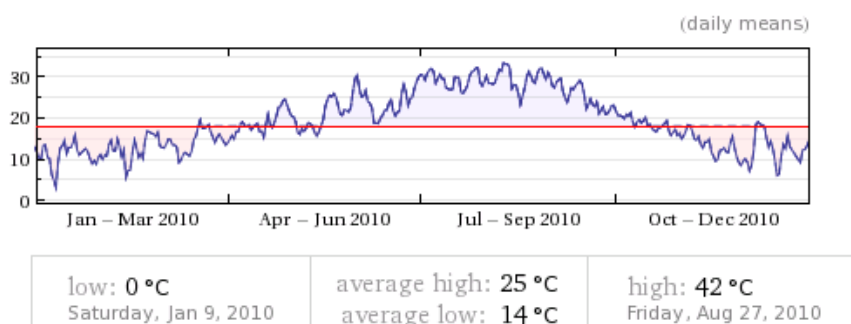
A continuación se describe cada una de las variables utilizadas en el cálculo para cada paso del método:

#### 4.1.1. Datos climatológicos

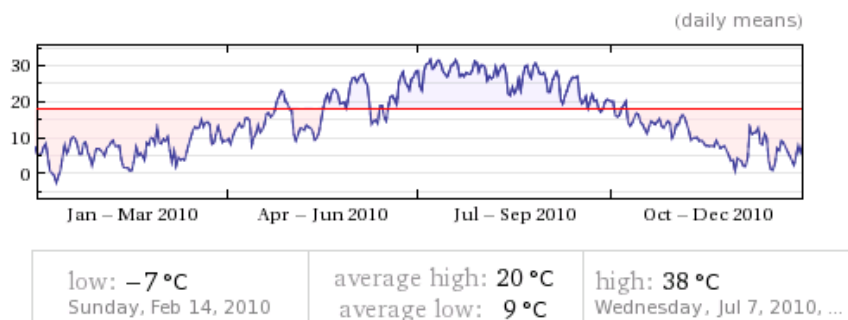
Para cada provincia se obtienen las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de la capital que disponga de una estación meteorológica. Generalmente, los datos de la estación meteorológica corresponden al aeropuerto de la ciudad. Con estas coordenadas, se obtienen los datos meteorológicos desde el centro de datos atmosféricos de la Nasa (*NASA Atmospheric Science Data Center*) (NASA, 2012). Los datos que se obtienen son una media de los últimos veintidós años de:

- Irradiación horizontal media diaria en superficie horizontal ( $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ).
- Grados día de calefacción (en inglés *Heating Degree Days*, en adelante *HDD*) con base  $18\text{ }^\circ\text{C}$ . Es la suma anual de la acumulación diaria de grados cuando la temperatura media es menor de  $18\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Grados día de refrigeración (en inglés *Cooling Degree Days*, en adelante *CDD*) con base  $18\text{ }^\circ\text{C}$ . Es la suma anual de la acumulación diaria de grados cuando la temperatura media es mayor de  $18\text{ }^\circ\text{C}$ .

Con el fin de ilustrar el concepto de grados-día, se muestran a continuación dos ejemplos con los HDD y CDD de Sevilla (ver *Ilustración 4-1*) y Madrid (ver *Ilustración 4-2*) para una temperatura base de  $18\text{ }^\circ\text{C}$ . Los CDD o grados-día de refrigeración aparecen en las gráficas sombreados en azul por encima de la línea roja y los HDD sombreados en rosa por debajo de la línea roja de temperatura base de  $18\text{ }^\circ\text{C}$ . Como se puede observar, Sevilla tiene una demanda de refrigeración mucho más alta que Madrid y ésta sin embargo tiene unos HDD de 2.120, más del doble de los 961 de Sevilla.



**Ilustración 4-1. Grados-día de Sevilla en 2010. CDD=1.360. HDD=961. Fuente: Wolfram-Alpha.**



**Ilustración 4-2. Grados-día en Madrid en 2010. HDD= 2.120. CDD= 863. Fuente: Wolfram Alpha.**

#### 4.1.2. Tipos de tejados

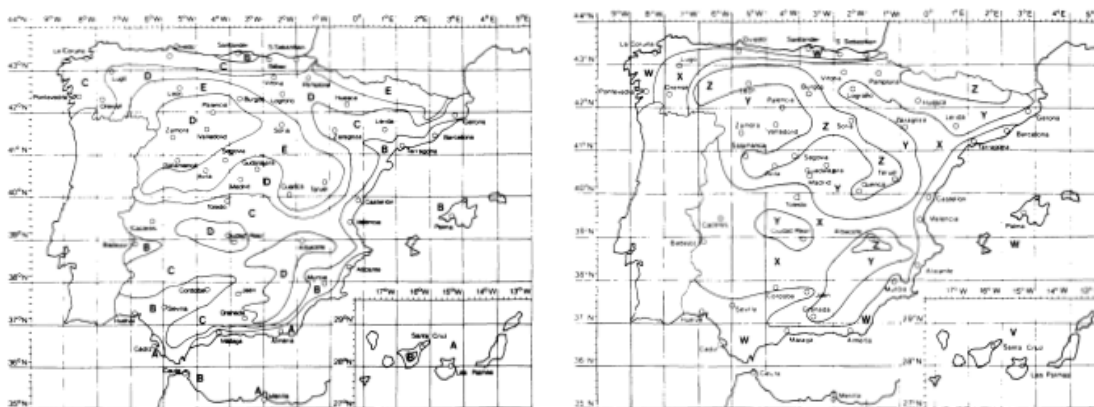
Para clasificar los tejados se utilizan dos criterios de clasificación: la edad y el color. A la hora de estimar ahorros, la edad o fecha de construcción influye en la resistencia térmica o aislamiento del tejado y el color en su reflectividad. Para simplificar el cálculo, se hace una distribución de los tejados según su color, clasificándolos en tres grupos: claros, medios y oscuros:

- Claros: Tejados blancos o ya tratados para ser “cool”. Este porcentaje de los tejados se ignora en la estimación de ahorros. Se asume que su reflectividad solar es de 60%.
- Medios: Tejados rojos, verdes, gris claro o similares. En este caso, se fija la reflectividad en 25%.
- Oscuros: tejados negros, marrones o gris oscuros. A los que se ha fijado una reflectividad del 5%.

Para todas las simulaciones realizadas en esta tesis se ha asumido que la emitancia infrarroja es del 90% y que es igual para los tejados oscuros de control. Es decir, que se asume que no se realiza un cambio del material del tejado, sino que simplemente se aplica una capa superficial de tratamiento.

La resistencia térmica del tejado que se utiliza en la simulación, depende de la fecha de construcción del tejado. En España se han publicado hasta la fecha dos códigos que regulan la construcción de edificios y que incluyen normas para fijar el aislamiento mínimo que debe tener un tejado o cubierta. El primero fue publicado en 1979 y se denominó *Norma Básica De La Edificación NBE-CT-79* (en adelante NBE-79), *sobre condiciones térmicas en los edificios*

(Ministerio de Fomento, 1979) y el segundo, mucho más restrictivo en materia de aislamiento térmico y eficiencia energética, se publicó en el año 2006 y es conocido como el CTE (*Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006*) (Ministerio de Fomento, 2006). Estos dos códigos designan una transmitancia térmica máxima de los tejados según su zona climática. El primer código identifica cinco zonas climáticas utilizando dos mapas: el primero clasificando las zonas según los grados-día (ver *Ilustración 4-1*, izquierda) y el segundo según la temperatura media de enero (ver *Ilustración 4-1*, derecha), designando este último tanto las temperaturas exteriores para el cálculo de condensaciones así como los valores máximos de transmisión térmica  $K$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) para las cubiertas.



**Ilustración 4-3. Mapas de zonas climáticas de España según los grados-día (Mapa 1, izquierda) y según temperatura media de Enero (Mapa 2, derecha). Fuente: NBE-79.**

En la *Tabla 4-2* se pueden ver los valores de resistencia térmica (R-value) utilizados en las simulaciones para los edificios construidos antes de 2006:

**Tabla 4-2. Resistencia térmica (y transmitancia) para distintas zonas climáticas según el NBE-79.**

Zona Climática	V y W	X	Y	Z
R-value ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )	0,71	0,83	1,1	1,4
Transmitancia ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	1,40	1,20	0,90	0,70

En el segundo código, el CTE-2006, se definen las zonas climáticas con una granularidad un poco más alta. De este modo, se calculan dos características

de la zona conocidas como Severidad Climática de Invierno (SCI) y Severidad Climática de Verano (SCV), que se calculan de dos maneras alternativas:

- En base a los grados-día en base 20 de verano (e invierno para SCI) y la radiación solar global acumulada, las dos medidas para los meses de junio, julio, agosto y septiembre (enero, febrero y diciembre para SCI).
- En base a los grados-día en base 20 y el ratio entre el número de horas de sol y el número de horas de sol máximas sumadas por separado para cada uno de los meses arriba indicados.

Una vez calculadas las dos severidades de invierno y verano, se clasifican en zonas de acuerdo a la *Ilustración 4-4*. Las zonas comienzan por cinco letras según la SCI y cuatro números según la SCV. Sólo se consideran las doce zonas correspondientes a los climas españoles, bajo el principio de que si dos zonas tienen la misma SCI tendrán la misma demanda de calefacción anual y si tienen la misma SCV, tendrán la misma demanda de aire acondicionado.

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
SC (invierno)					

**Ilustración 4-4. Clasificación de zonas climáticas según Severidad Climática de acuerdo al CTE-2006.**

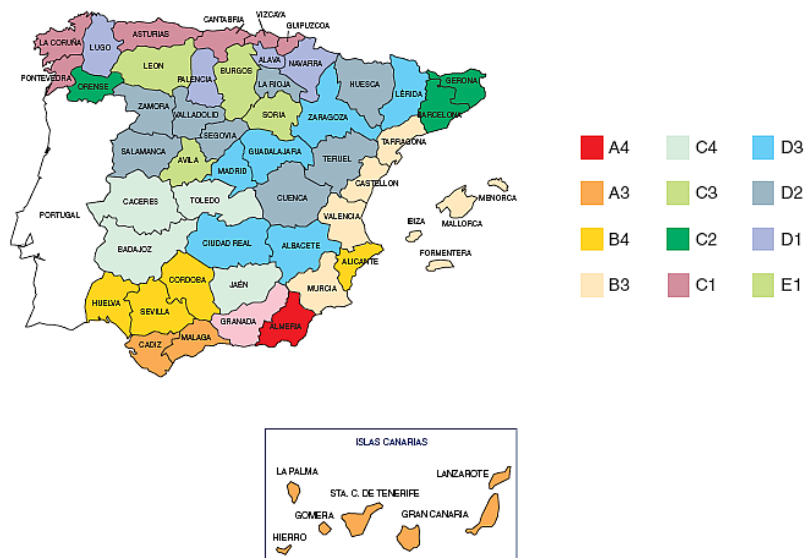
De manera general, se toma la zona climática como la correspondiente a la capital de provincia y se corrige según la diferencia entre la altitud de la población de que se trate y la de la capital de provincia, según se muestra en la *Tabla 3-1*, especificada en el apéndice D del Documento Básico HE de Ahorro de Energía (Ministerio de Fomento, 2006). En caso de que se dispongan de datos climáticos concretos para la localidad a calcular y ésta no sea capital de provincia, se puede hacer un cálculo en base a la SCI y SVI según unas fórmulas de correlación que se indican en el mismo CTE-2006.

En la *Ilustración 4-5* se muestran estas mismas zonas en un mapa, para una mejor apreciación de los datos.

**Tabla 4-3. Clasificación de zonas climáticas según Severidad Climática de acuerdo al CTE-2006.**

Provincia	Capital	Altura de referencia (m)	Desnivel entre la localidad y la capital de su provincia (m)				
			≥200 <400	≥400 <600	≥600 <800	≥800 <1000	≥1000
Albacete	D3	677	D2	E1	E1	E1	E1
Alicante	B4	7	C3	C1	D1	D1	E1
Almería	A4	0	B3	B3	C1	C1	D1
Ávila	E1	1054	E1	E1	E1	E1	E1
Badajoz	C4	168	C3	D1	D1	E1	E1
Barcelona	C2	1	C1	D1	D1	E1	E1
Bilbao	C1	214	D1	D1	E1	E1	E1
Burgos	E1	861	E1	E1	E1	E1	E1
Cáceres	C4	385	D3	D1	E1	E1	E1
Cádiz	A3	0	B3	B3	C1	C1	D1
Castellón de la Plana	B3	18	C2	C1	D1	D1	E1
Ceuta	B3	0	B3	C1	C1	D1	D1
Ciudad real	D3	630	D2	E1	E1	E1	E1
Córdoba	B4	113	C3	C2	D1	D1	E1
Coruña (a)	C1	0	C1	D1	D1	E1	E1
Cuenca	D2	975	E1	E1	E1	E1	E1
Donostia-San Sebastián	C1	5	D1	D1	E1	E1	E1
Girona	C2	143	D1	D1	E1	E1	E1
Granada	C3	754	D2	D1	E1	E1	E1
Guadalajara	D3	708	D1	E1	E1	E1	E1
Huelva	B4	50	B3	C1	C1	D1	D1
Huesca	D2	432	E1	E1	E1	E1	E1
Jaén	C4	436	C3	D2	D1	E1	E1
León	E1	346	E1	E1	E1	E1	E1
Lleida	D3	131	D2	E1	E1	E1	E1
Logroño	D2	379	D1	E1	E1	E1	E1
Lugo	D1	412	E1	E1	E1	E1	E1
Madrid	D3	589	D1	E1	E1	E1	E1
Málaga	A3	0	B3	C1	C1	D1	D1
Melilla	A3	130	B3	B3	C1	C1	D1
Murcia	B3	25	C2	C1	D1	D1	E1
Ourense	C2	327	D1	E1	E1	E1	E1
Oviedo	C1	214	D1	D1	E1	E1	E1
Palencia	D1	722	E1	E1	E1	E1	E1
Palma de Mallorca	B3	1	B3	C1	C1	D1	D1
Palmas de gran canaria (las)	A3	114	A3	A3	A3	B3	B3
Pamplona	D1	456	E1	E1	E1	E1	E1
Pontevedra	C1	77	C1	D1	D1	E1	E1
Salamanca	D2	770	E1	E1	E1	E1	E1
Santa cruz de Tenerife	A3	0	A3	A3	A3	B3	B3
Santander	C1	1	C1	D1	D1	E1	E1
Segovia	D2	1013	E1	E1	E1	E1	E1
Sevilla	B4	9	B3	C2	C1	D1	E1
Soria	E1	984	E1	E1	E1	E1	E1
Tarragona	B3	1	C2	C1	D1	D1	E1
Teruel	D2	995	E1	E1	E1	E1	E1
Toledo	C4	445	D3	D2	E1	E1	E1
Valencia	B3	8	C2	C1	D1	D1	E1
Valladolid	D2	704	E1	E1	E1	E1	E1
Vitoria-Gasteiz	D1	512	E1	E1	E1	E1	E1
Zamora	D2	617	E1	E1	E1	E1	E1
Zaragoza	D3	207	D2	E1	E1	E1	E1

**MAPA NACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS**



**Ilustración 4-5. Mapa de las zonas climáticas españolas según el CTE-2006. Fuente: Construmática.**

Los valores que se toman en las simulaciones para la resistencia térmica (R-value) se definen entonces según la zona climática de invierno y se enumeran en la *Tabla 4-4*.

**Tabla 4-4. Resistencia térmica (y transmitancia) de las zonas climáticas para edificios construidos con posterioridad a 2006. Fuente: CTE-2006.**

Zona Climática	A	B	C	D
R-value ( $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ )	2	2,22	2,44	2,63
Transmitancia ( $\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )	0,50	0,45	0,41	0,38

Tal y como se explicará más adelante, para calcular los ahorros de una región, se realizará una estimación de la edad de los edificios y se clasificarán como antiguos si se construyeron antes de 2006, asumiendo entonces que su aislamiento viene determinado por el NBE-79 y que si son posteriores a 2006, habrán sido construidos de acuerdo a la norma CTE-2006 respetando los valores mínimos para el aislamiento de las cubiertas expuestos en la *Tabla 4-4*.

## 4.2. Estimación de demanda energética

Para realizar las estimaciones de la demanda energética correspondiente a los distintos tipos de tejados y zonas climatológicas españolas, se ha adaptado la *DOE Cool Roof Calculator* (DCRC), desarrollada por el ORNL, disponible online (ORNL, 2005b) y documentada en (Petrie et al., 2001). Esta calculadora está basada en un modelo llamado *Simplified Transient Analysis of Roofs* (STAR), en castellano Análisis simplificado transitorio de tejados, desarrollado por Wilkes (Wilkes, 1989). La calculadora se desarrolló mediante un ajuste polinómico (bastante complicado) de un conjunto de entradas y salidas generadas con STAR para una colección suficientemente representativa de localidades utilizando los datos de año meteorológico típico TMY2 (NREL, 1995) y de tipos de tejados. Las variables de entrada para el ajuste polinómico son:

- Índice de refrigeración o Cooling index, que combina los CDD y la irradiación solar anual en superficie horizontal (Irradiación) según la *Ecuación 4-1*, donde CDD son los grados día de refrigeración en base 18 °C



e *Irradiación* es la irradiación solar anual en superficie horizontal expresada en kWh/m<sup>2</sup>.

**Ecuación 4-1. Índice de refrigeración (Cooling Index).**

$$CoolingIndex = \frac{CDD}{5000} * \frac{Irradiación}{24 * 100}$$

- Índice de calefacción o Heating index, que es el resultado de multiplicar HDD por un factor de normalización, tal y como se indica en la *Ecuación 4-2*, donde *HDD* son los grados día de calefacción en base 18 °C.

**Ecuación 4-2. Índice de Calefacción (Heating Index).**

$$HeatingIndex = \frac{HDD}{10000}$$

- Rvalue o resistencia térmica del tejado, expresada en W/m<sup>2</sup>K.
- RS o reflectividad solar, expresada como un tanto por ciento.
- El o emitancia infrarroja, expresada como un tanto por ciento.

Para realizar el ajuste polinómico se utilizan dos polinomios, uno que genera la carga o demanda de refrigeración (la energía equivalente necesaria para refrigerar el edificio en W/m<sup>2</sup> donde los metros cuadrados son los del tejado) a partir del índice de refrigeración y las variables que definen el tejado y otro que genera la carga o demanda de calefacción a partir del índice de calefacción y las variables del tipo de tejado. Estos dos polinomios se normalizan tal y como se describe en las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 4-3. Demanda refrigeración.**

$$\frac{Demanda\_refrigeración}{60000} = Ar CI + Br CI^2 + Cr CI^3$$

donde:

*CI* es el cooling index o índice de refrigeración y los coeficientes *Ar*, *Br*, *Cr* se utilizan para realizar el ajuste polinómico de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 4-4. Coeficientes de ajuste para carga refrigeración.**

$$\begin{aligned}
 Ar & \\
 &= a1 + a2 Rvalue + a3 Rvalue^2 + a4 Rvalue^3 \\
 &+ (a5 + a6 Rvalue + a7 Rvalue^2 + a8 Rvalue^3)RS \\
 &+ (a9 + a10 Rvalue + a11 Rvalue^2 + a12 Rvalue^3)RS^2 \\
 &+ (a13 + a14 Rvalue + a15 Rvalue^2 + a16 Rvalue^3)IE
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Br &= \\
 &= b1 + b2 Rvalue + b3 Rvalue^2 + b4 Rvalue^3 \\
 &+ (b5 + b6 Rvalue + b7 Rvalue^2 + b8 Rvalue^3)RS \\
 &+ (b9 + b10 Rvalue + b11 Rvalue^2 + b12 Rvalue^3)RS^2 \\
 &+ (b13 + b14 Rvalue + b15 Rvalue^2 + b16 Rvalue^3)IE
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Cr &= \\
 &= c1 + c2 Rvalue + c3 Rvalue^2 + c4 Rvalue^3 \\
 &+ (c5 + c6 Rvalue + c7 Rvalue^2 + c8 Rvalue^3)RS \\
 &+ (c9 + c10 Rvalue + c11 Rvalue^2 + c12 Rvalue^3)RS^2 \\
 &+ (c13 + c14 Rvalue + c15 Rvalue^2 + c16 Rvalue^3)IE
 \end{aligned}$$

donde:

*Rvalue* es la resistencia térmica del tejado en W/m<sup>2</sup>K,

*RS* es la reflectividad solar del tejado,

*IE* es la emitancia infrarroja del tejado y

los coeficientes *a1...c16* son constantes para el ajuste polinómico cuyos valores pueden verse en el Anexo II. Coeficientes utilizados para el ajuste polinómico del método de cálculo.

De igual modo se define la carga o demanda de calefacción como:

**Ecuación 4-5. Demanda de calefacción.**

$$\frac{Carga_{calefacción}}{60000} = Ac HI + Bc HI^2 + Cc HI^3$$

donde:

HI es el heating index o índice de calefacción y

los coeficientes Ac, Bc, Cc se utilizan para realizar el ajuste polinómico de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 4-6. Coeficientes de ajuste para carga calefacción.**

$$\begin{aligned}
& A_c \\
&= d1 + d2 Rvalue + d3 Rvalue^2 + d4 Rvalue^3 \\
&+ (d5 + d6 Rvalue + d7 Rvalue^2 + d8 Rvalue^3)RS \\
&+ (d9 + d10 Rvalue + d11 Rvalue^2 + d12 Rvalue^3)RS^2 \\
&+ (d13 + d14 Rvalue + d15 Rvalue^2 + d16 Rvalue^3)IE \\
& B_c = \\
&= e1 + e2 Rvalue + e3 Rvalue^2 + e4 Rvalue^3 \\
&+ (e5 + e6 Rvalue + e7 Rvalue^2 + e8 Rvalue^3)RS \\
&+ (e9 + e10 Rvalue + e11 Rvalue^2 + e12 Rvalue^3)RS^2 \\
&+ (e13 + e14 Rvalue + e15 Rvalue^2 + e16 Rvalue^3)IE \\
& C_c = \\
&= f1 + f2 Rvalue + f3 Rvalue^2 + f4 Rvalue^3 \\
&+ (f5 + f6 Rvalue + f7 Rvalue^2 + f8 Rvalue^3)RS \\
&+ (f9 + f10 Rvalue + f11 Rvalue^2 + f12 Rvalue^3)RS^2 \\
&+ (f13 + f14 Rvalue + f15 Rvalue^2 + f16 Rvalue^3)IE
\end{aligned}$$

donde:

*Rvalue* es la resistencia térmica del tejado en W/m<sup>2</sup>K,

*RS* es la reflectividad solar del tejado,

*IE* es la emitancia infrarroja del tejado y

los coeficientes *d1...f16* son constantes para el ajuste polinómico cuyos valores pueden verse en el Anexo II. Coeficientes utilizados para el ajuste polinómico del método de cálculo.

El ajuste polinómico es de tercer grado en cooling index, heating index y *Rvalue*, de segundo grado en reflectancia solar y de primer grado en emitancia infrarroja. Dadas todas las incertidumbres naturales y la cantidad limitada de datos, hay un riesgo de sobre-ajuste (“over fitting”) cuando se utilizan polinomios de alto grado, como en el fenómeno de Runge. De hecho, durante la elaboración de este trabajo se ha observado que la estimación genera valores poco sensatos con valores extremos de cooling index y heating index correspondientes en la práctica a climas más cálidos que Miami, EEUU. Sin embargo, en el rango de valores correspondientes a la meteorología española

utilizados en esta simulación, pruebas anteriores indican que los rangos de valores son aceptables (Petrie et al., 2001).

### 4.3. Cálculo de ahorros económicos

Para cada tipo de tejado, se calculan los ahorros en las demandas energéticas, comparando las demandas de calefacción y refrigeración del tejado que se esté analizando con los de un tejado oscuro de las mismas características. Estas diferencias son los ahorros en calefacción (generalmente negativos) y refrigeración.

Para calcular los ahorros económicos, se calculan primero los ahorros en refrigeración según la fórmula descrita en la *Ecuación 4-7* y la penalización en la calefacción según la *Ecuación 4-8*. Los ahorros totales, son entonces la diferencia entre los dos, tal y como indica la *Ecuación 4-9*:

**Ecuación 4-7. Cálculo de ahorros económicos en refrigeración.**

$$\text{ahorro económico refrigeración} = \frac{\text{ahorros refrigeración} \times \text{precio energía}}{COP}$$

**Ecuación 4-8. Cálculo de penalización económica en calefacción.**

$$\text{penalización económica calefacción} = - \frac{\text{ahorros calefacción} \times \text{precio energía}}{EER}$$

**Ecuación 4-9. Cálculo de ahorro/penalización económica total.**

$$\text{ahorro económico} = \text{ahorro económico refrigeración} - \text{penalización económica calefacción}$$

donde los términos usados en las ecuaciones se definen como:

- *COP*: Es el coeficiente de rendimiento del sistema de aire acondicionado. La ventas de los equipos más eficientes, los de clase A, subieron en Europa un 361% de 2005 a 2008, mientras que las ventas de equipos de clase C o inferiores disminuyeron en más de un 50% (Bertoldi & Atanasiu, 2009). Se ha utilizado un COP medio de 3, asumiendo que los equipos tienen la clase energética A según el esquema de etiquetado energético de la Unión Europea y cuyos valores

para los equipos más típicos son (IDAE, 2010): compacto (3), compacto transportable (2,6) y Split (3,2).

- *EER*: es el ratio de eficiencia energética entre potencia termal de la salida del aparato de calefacción y la potencia eléctrica de entrada). Se ha fijado en 1 para calefacciones eléctricas (asumiendo una calefacción con una resistencia eléctrica, el método menos eficiente) y 0,7 para calderas de gas.
- *precio energía*: el precio final de energía eléctrica utilizado en las estimaciones es de 0,20 €/kWh, calculado en base a (Ministerio de Industria y Comercio, 2010a). El precio del gas es de 0,047 €/kWh (European Union, 2010). El precio de la electricidad se basa en la tarifa TUR (tarifa de último recurso), que es la tarifa regulada a la que pueden acogerse los hogares con instalaciones con una potencia inferior a los 10 kW. El precio se ha calculado obteniendo un coste medio por kWh a partir de la factura eléctrica del usuario, incluyendo todos los impuestos (IVA e impuesto eléctrico) y una parte del término de potencia para compensar por los usuarios del mercado libre, que generalmente pagan una tarifa más alta.

#### **4.4. Agregación de ahorros por región**

Como puede observarse en la *Tabla 3-4*, las comunidades autónomas situadas al sur de España son las que disponen de un porcentaje mayor de aparatos de aire acondicionados. Entre ellas, Andalucía es un de las comunidades más calurosas, con un consumo muy elevado de aire acondicionado en verano y, además, porque se dispone de datos precisos sobre la superficie de tejados disponibles.

La estimación de ahorros se hace primero para cada una de las ocho provincias andaluzas: Almería, Cádiz, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla. Para agregar los datos correctamente y obtener un ahorro medio, se calcula un porcentaje de los edificios de cada tipo según el color y el aislamiento térmico del tejado (derivado de la fecha de construcción). Las estimaciones se hacen con los siguientes criterios:

- Porcentaje de cada tipo de edificio según el color del tejado (ver apartado 4.1.2 *Tipos de tejados*) el porcentaje del color de los tejados se ha realizado en base a una estimación de imágenes por satélite de Google Earth (Google, 2006), llegando a la siguiente distribución media:
  - Blancos: estimados en un 10% del total del área de tejados planos.
  - Medios: estimados en un 70% del total.
  - Oscuros: estimados en un 20% del total de superficie de tejados planos.

En la siguiente figura se ilustran los distintos colores utilizados en este estudio a partir de una fotografía de la vista aérea de Barcelona (inmediaciones del estadio Camp Nou), ver *Ilustración 4-6*.



**Ilustración 4-6. Vista aérea de la ciudad de Barcelona con colores de los tejados. Fuente: Google Maps.**

- Para estimar la resistencia térmica de los tejados de los edificios, se ha partido de la edad de los edificios, dado que dependiendo de la fecha de construcción obedecen a uno de los dos códigos de construcción que regulan la transmitancia máxima de las cubiertas (ver apartado 4.1.2 *Tipos de tejados*). El área total de tejados de los edificios nuevos y antiguos, se ha estimado a partir de los permisos municipales de construcción (IEA, 2010; Ministerio de Fomento, 2006). El área de superficie de cada tipo se ha estimado de la siguiente manera:

- Edificios antiguos: edificios construidos durante o con anterioridad a 2006. Corresponde aproximadamente al total de los edificios construidos hasta 2006 menos los edificios remodelados o demolidos entre 2001 y 2006. Se asume que los edificios construidos antes de 1978 tienen también un aislamiento mínimo como el designado en el NBE-79.
- Edificios modernos: construidos de acuerdo al CTE-2006. Se estima que son un 5% del total de los edificios. El área se calcula a partir del área total construida entre 2007 y 2009, menos los edificios remodelados o demolidos en ese periodo. Debido a la crisis económica, los índices de construcción bajaron drásticamente en España a partir de 2008. Nótese que se ha asumido que los edificios construidos ya en 2007 cumplían con el código de construcción CTE-2006, lo que es una aproximación conservadora.

Los ahorros de energía se ajustan también según el grado de penetración del aire acondicionado y la calefacción, que en Andalucía es un 57,4% de las viviendas para el AA y de un 43,1% para la calefacción (INE, 2009). Desde un punto de vista económico, sólo estas viviendas ahorrarán o tendrán una penalización en el coste energético al cambiar el color del tejado. El resto se beneficiarán en cualquier caso de un mejor confort térmico en el interior, pero sin impacto económico directo.

Para cada provincia se calcula entonces el área de tejado plano para cada tipo de tejado según se ha explicado arriba y se procede al cálculo total de ahorros de acuerdo a la *Ecuación 4-10*:

**Ecuación 4-10. Ahorro provincial por tipo de tejado.**

$$\begin{aligned}
 & \text{ahorro provincial por tipo de tejado} = \\
 & = (\text{ahorro económico refrigeración} \times \text{penetración AA} \\
 & + \text{penalización económica calefacción} \times \text{penetración Calefacción}) \\
 & \quad \times \text{área tipo de tejado}
 \end{aligned}$$

Es importante resaltar que en esta tesis solo se incluyen edificios residenciales con tejados planos y se toman los datos de superficie de tejados calculados en la referencia (Ordóñez, Jadraque, Alegre, & Martínez, 2010).

Para calcular los ahorros de la Comunidad Autónoma, por último se agregan los datos de cada provincia sumando los ahorros de cada tipo de tejado por provincia y agregando los de todas las provincias, tal y como se indica en la *Ecuación 4-11*:

**Ecuación 4-11. Ahorro total de la Comunidad Autónoma.**

$$\text{ahorro total región} = \sum_{\text{provincia}} \sum_{\text{tipo tejado}} \text{ahorro provincial por tipo de tejado}$$

#### **4.5. Estimación de ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub>**

Ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la producción de energía eléctrica. La tasa de emisiones de dióxido de carbono correspondiente a la producción de energía eléctrica en Andalucía en 2009 es de 459,3 g/kWh según la Agencia Andaluza de la Energía (AAE, 2009). Aplicando esta cifra a los ahorros potenciales de energía, se obtienen los ahorros de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera.

#### **4.6. Resumen gráfico del método de cálculo**

Para finalizar este capítulo, se realiza a continuación un gráfico de flujo simplificado con todos los pasos del método en la *Ilustración 4-7*.



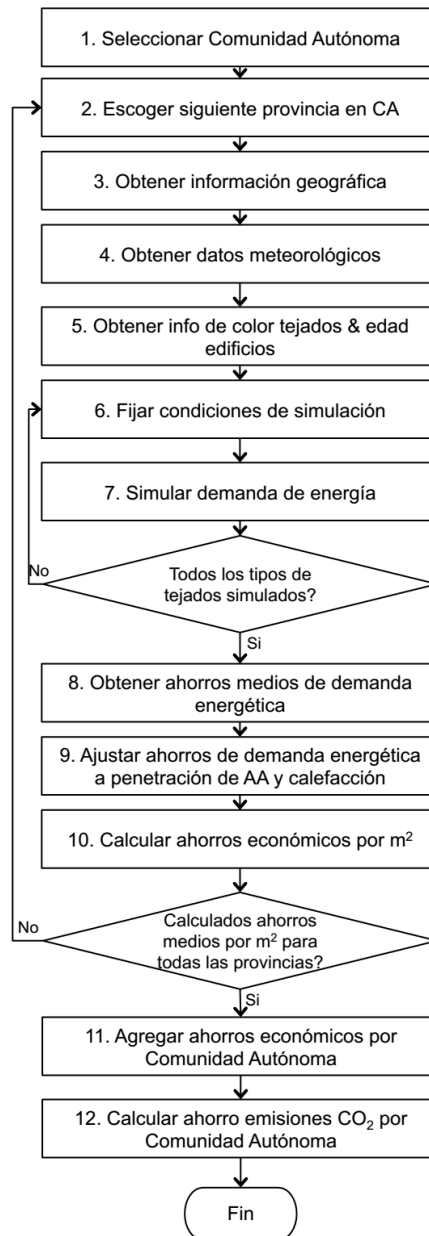


Ilustración 4-7. Diagrama de flujo simplificado de la metodología de cálculo.



## **5. INCERTIDUMBRES PRINCIPALES EN EL CÁLCULO DE AHORROS: DATOS Y HERRAMIENTAS DISPONIBLES**

Los resultados presentados en esta tesis doctoral, son una primera estimación del potencial de ahorros en España con la utilización de cool roofs.

Algunas incertidumbres acompañan el método de cálculo de esta primera estimación, que podría refinarse si en el futuro se hace una investigación más detallada de los siguientes puntos:

### **5.1. Incertidumbres en los datos**

#### **5.1.1. Superficie de tejados**

La superficie de tejados en España se ha estudiado para medir el potencial fotovoltaico en (Castro et al., 2005) basado en el trabajo de (Cueli, 2003) que utilizó el censo de 1991. Estimaron que España tiene una superficie de tejados de 680 km<sup>2</sup>. Otro trabajo posterior en 2005 de (García Casals, Domínguez Bravo, Linares Llamas, & López García, 2005), estimó la superficie de tejados residenciales de Andalucía en unos 125 km<sup>2</sup> y el área total incluyendo edificios comerciales en aproximadamente 180 km<sup>2</sup>. La superficie total de tejados residenciales para España se calculó en 595 km<sup>2</sup>, proyectando la superficie total para 2050 en unos 340 km<sup>2</sup> para Andalucía y 1.799 km<sup>2</sup> para toda España. En 2008, (S. Izquierdo, Rodrigues, & Fueyo, 2008) estimó la superficie de tejados total para Andalucía en 80±10 km<sup>2</sup> para Andalucía y la superficie total de España en 571±183 km<sup>2</sup>.

El último trabajo disponible a la fecha de elaboración de esta tesis, estimó el área de tejados residencial de Andalucía en 266 km<sup>2</sup>, de los que 105 km<sup>2</sup> serían tejados planos y 161 km<sup>2</sup> tejados inclinados (Ordóñez et al., 2010).

Este último dato ha sido utilizado para hacer los cálculos de la tesis, pero la varianza tan significativa en los datos sugiere que es necesaria más investigación para validar estas estimaciones de superficie de tejados.

### 5.1.2. CDD y HDD

Los cálculos están basados en grados-día de calefacción (HDD) y grados-día de refrigeración (CDD) con base 18 °C, dado que el simulador del DOE en el que está basado el cálculo (ORNL, 2005b), está construido en base a esta temperatura. Por el método de cálculo del algoritmo simplificado utilizado en esta tesis, consistente en una aproximación polinómica a los resultados de simulación, tal y como se explica en el apartado *4.2 Estimación de demanda energética*, no sería correcto utilizar el método con grados-día a otras temperaturas.

Los resultados son por tanto comparables a muchos de los datos publicados, aunque para unos resultados más precisos se deberían utilizar las temperaturas medias de control utilizadas en la población española: 21,3 °C para HDD y 22,3 °C para CDD (INE, 2009).

### 5.1.3. Disponibilidad de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos (CDD, HDD e insolación media) han sido obtenidos de la NASA, del sistema “Surface meteorology and Solar Energy system” (NASA, 2012), tal y como se ha explicado en el apartado *4.1.1 Datos climatológicos*. En este sistema faltan datos para algunas provincias españolas, así que han sido aproximados con la información de las provincias colindantes. Para el fin de esta tesis de proporcionar una primera aproximación de ahorros, estos datos pueden considerarse aceptables. Las provincias que sobre las que se han realizado aproximaciones son las siguientes: Castellón aproximada con Valencia, Girona con Barcelona y Guadalajara con Madrid.

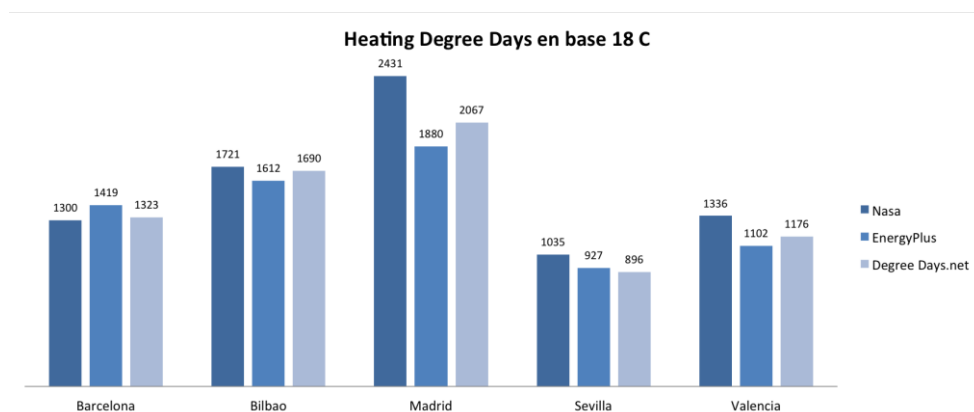
Nótese que los datos se han tomado del sistema de la Nasa “Surface meteorology and Solar Energy system” (NASA, 2012) y no del sistema “RETScreen® International data system”, dado que este último tiene los datos de CDD en base 10 °C.

### 5.1.4. Variabilidad de datos meteorológicos

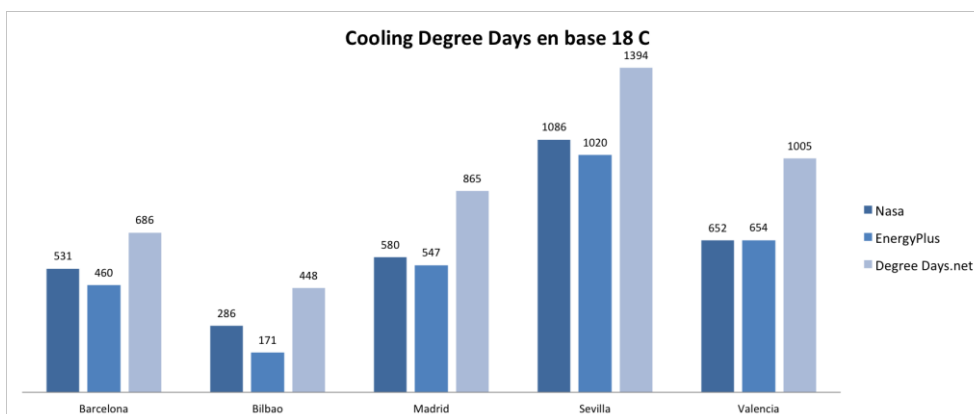
Los datos de HDD y CDD varían notablemente según la fuente consultada. Aunque su uso está aceptado en la comunidad científica y profesional para la

estimación de demandas energéticas, deben ser tratados con cautela. En la *Ilustración 5-1* se muestran los datos de HDD y en la *Ilustración 5-2* los de CDD obtenidos de las siguientes fuentes:

- Nasa: los datos son los ya mencionados de la Nasa “Surface meteorology and Solar Energy system” (NASA, 2012), utilizados finalmente para los resultados presentados en la tesis.
- EnergyPlus: utiliza datos obtenidos del “Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC)”, que son los mismos que se utilizan en el software de certificación de eficiencia energética de edificios Calener (Ministerio de Industria y Comercio, 2009). Datos accesibles online en (U.S. Department of Energy, 2013).
- Degreedays.net: se obtienen los datos medios para los últimos cinco años (2006-2010) a partir de los datos de la estación meteorológica que se especifique obtenidos a través de la red meteorológica *Weather Underground*. Datos accesibles online en (Software, 2011).



**Ilustración 5-1. Comparativa de datos de HDD en base 18 °C a partir de diversas fuentes.**



**Ilustración 5-2. Comparativa de datos de CDD en base 18 °C a partir de diversas fuentes.**

En la *Ilustración 5-1* puede observar que existe una diferencia notable de HDD para Madrid, dado que entre el dato proporcionado por la NASA (2431) y posteriormente utilizado en el estudio hay una variación de 551 puntos con el dato de EnergyPlus y de 364 con el de DegreeDays.net, que representan una variación del 23% y del 15% respectivamente. Este hecho, junto con la diferencia en CDD que puede observarse en la *Ilustración 5-2* de casi un 50% entre los datos de la NASA y de DegreeDays.net, confirma el hecho de que la estimación de ahorros realizada en el estudio para Madrid es muy conservadora. La diferencia en los datos de CDD entre los datos de la NASA y Energy Plus con los datos más actualizados de DegreeDays.net, podrían estar indicando un aumento de la temperatura en las épocas de más calor en las principales ciudades, pero sería necesario un estudio más exhaustivo.

#### **5.1.5. Distribución colores de los tejados**

La distribución de los distintos tipos de tejados según su color se ha obtenido con un análisis rápido de imágenes satelitales de elaboración propia. Esta estimación podría ser mejorada con un análisis estadístico formal con mayor precisión.

### **5.2. Herramientas disponibles**

Hay varias herramientas y métodos disponibles para estimar ahorros de cool roofs en la red, pero ninguna de ellas tiene datos fiables para España. A continuación se resumen las principales herramientas simplificadas disponibles para cálculo online de ahorros con cool roofs:

#### **5.2.1. DOE: Cool Roof Calculator**

La herramienta más utilizada y conocida es la “DOE Cool Roof Calculator” (ORNL, 2005b). Está basada en un modelo desarrollado por Wilkes (Wilkes, 1989) y adaptado posteriormente por Petrie et al. (Petrie et al., 2001) tal y como se ha descrito en la sección *4.2 Estimación de demanda energética*. Al estar basado en una regresión de tercer grado sobre el resultado de un modelo aproximado, se pueden encontrar errores de más de un 20%, sobre todo en climas muy cálidos es decir, con temperaturas pico muy elevadas (por ejemplo

en Miami, EEUU), fuera del rango de temperaturas más moderado en el que se encuadran todas las ciudades españolas, para las que el modelo tiene un comportamiento aceptable.

En la *Ilustración 5-3* se muestra una captura de imagen de esta aplicación.

**DOE Cool Roof Calculator**  
**Estimates Cooling and Heating Savings for Flat Roofs with Non-Black Surfaces**

- Developed by the U.S. Department of Energy's Oak Ridge National Laboratory (Version 1.2)  
- This version of the calculator is for small and medium-sized facilities that purchase electricity without a demand charge based on peak monthly load. If you have a large facility that purchases electricity with a demand charge, run the [CoolCalcPeak](#) version in order to include the savings in peak demand charges from using solar radiation control.  
- What you get out of this calculator is only as good as what you put in. If you [CLICK HERE](#), you'll find help in figuring out the best input values. Some things, such as the weathering of the solar radiation control properties and the effects of a plenum, are especially important. You'll also find help in figuring out your heating and cooling system efficiencies and proper fuel prices.  
- To compare two non-black roofs, print out results of separate estimates for each vs. a black roof. Manually compute the difference in savings to compare the two non-black roofs.  
- If your energy costs are determined by on-peak and off-peak rates, print out results of separate estimates with on-peak and off-peak rates for the same roof. Judge what fraction of the savings with on-peak rates is appropriate.

My State

My City

Click to see [Data for All 243 Locations](#)

**My Proposed Roof:**

R-value (HIGH=20, AVG=10, LOW=5) [h·ft<sup>2</sup>·°F/Btu]

Solar reflectance, SR (HIGH=80, AVG=50, LOW=10) [%]

Infrared emittance, IE (HIGH=90, AVG=60, LOW=10) [%]

**My Energy Costs and Equipment Efficiencies**

Summertime cost of electricity (HIGH=0.20, AVG=0.10, LOW=0.05) [\$KWh]

Air conditioner efficiency (Coefficient of Performance) (HIGH=2.5, AVG=2.0, LOW=1.5)

Energy source for heating (choose one)  Electricity  Fuel

If electricity, wintertime cost (HIGH=0.20, AVG=0.10, LOW=0.05) [\$KWh]

If fuel, cost (Natural gas: HIGH=1.00, AVG=0.70, LOW=0.50) [\$/Therm]   
(Fuel oil: 2002 East coast=0.85; 2002 Midwest=0.70) [\$/Therm]

Heating system efficiency (Furnace or boiler: HIGH=0.8; AVG=0.7, LOW=0.5)   
(Electric heat pump: HIGH=2.0, AVG=1.5) (Electric resistance: 1.0)

**Net Savings** [\$m<sup>2</sup> per year]

Cooling savings [\$m<sup>2</sup> per year]

Heating savings (heating penalty if negative) [\$m<sup>2</sup> per year]

**Insulation in Black Roof to Yield Same Annual Energy Savings:**

Upgrade from R- to R- [h·ft<sup>2</sup>·°F/Btu]

**Details of Comparison:**

Heating degree days for location chosen [Annual °F-day]

Cooling degree days for location chosen [Annual °F-day]

Solar load for location chosen [Annual Average Btu/ft<sup>2</sup> per day]

Cooling load for black roof (SR=5%, IE=90%) [Btu/ft<sup>2</sup> per year]

Heating load for black roof (SR=5%, IE=90%) [Btu/ft<sup>2</sup> per year]

Cooling load for proposed roof [Btu/ft<sup>2</sup> per year]

Heating load for proposed roof [Btu/ft<sup>2</sup> per year]

**Ilustración 5-3. Imagen de la aplicación "DOE Cool Roof Calculator". Fuente: (ORNL, 2005b).**

### 5.2.2. MIT: Design Advisor

La aplicación "MIT design advisor" fue desarrollada por Urban et al. (B. J. Urban, 2007) como un simulador de demanda energética rápido de edificios que se caracteriza por su fácil utilización. Esta aplicación fue adaptada posteriormente por Glicksman et al. (Ray, 2010) para incluir simulaciones de tejados frescos y tejados verdes. La aplicación puede accederse online en la siguiente dirección: <http://designadvisor.mit.edu/design/>. Esta herramienta de simulación de la demanda energética ha sido validada contra el conocido software de simulación energética Energy Plus<sup>®</sup> (B. Urban & Glicksman, 2007)

y el módulo de tejados reflectivos se ha validado con datos empíricos del FSEC en Florida (EEUU) (Cummings, Withers, Sonne, Parker, & Vieira, 2007) y de la Universidad de Kobe (Japón) (Takebayashi & Moriyama, 2007). En esta aplicación el error estimado es de entre un 7% y un 10%.

La aplicación tiene una primera pantalla de datos de entrada donde se pueden incluir varios escenarios para posteriormente comparar los resultados. En *Ilustración 5-4* se muestra una captura de pantalla de la aplicación con un ejemplo para Los Ángeles (California, EEUU).

**Setup: Describe the Building You Wish to Simulate**

**Getting Started**

**Building Properties**

1. Climate: Region: USA, City: CA - Los Angeles

2. Occupancy and Equipment: Low-rise Residential, Occupancy Schedule: 12:00 midnight begins, 12:00 midnight ends, Person-density: 0.025 people per m<sup>2</sup>, Lighting: 750 - fine work lux, Equipment: 5.0 - office (light) W/m<sup>2</sup>

3. Ventilation System: Mechanical Cooling & Heating, Indoor Air Temperature: Max: 18 °C, Min: 18 °C, Max Relative Humidity: 60 %, Ventilation Rate: Fresh Air Rate: 15 liters / sec per person, Air Change Rate: 1.8 roomfuls per hour

4. Thermal Mass: High Mass: exposed concrete slab floor, Low Mass: lightweight or obstructed floor, Zero Mass

5. Building Geometry: Single Zone (1 facade)

6. Roof Description: Cool Roof, Roof Insulation: Residential (Medium Insulation), R-Value: 2 (m<sup>2</sup>·°C)/W, Roof Insulation Location: Insulation on bottom of roof slab, Floors: 1

**Typical Room Properties**

7. Room Dimensions: Width: 5 m, Depth: 5 m, Height: 3 m, Window / Primary Facade Orientation: east

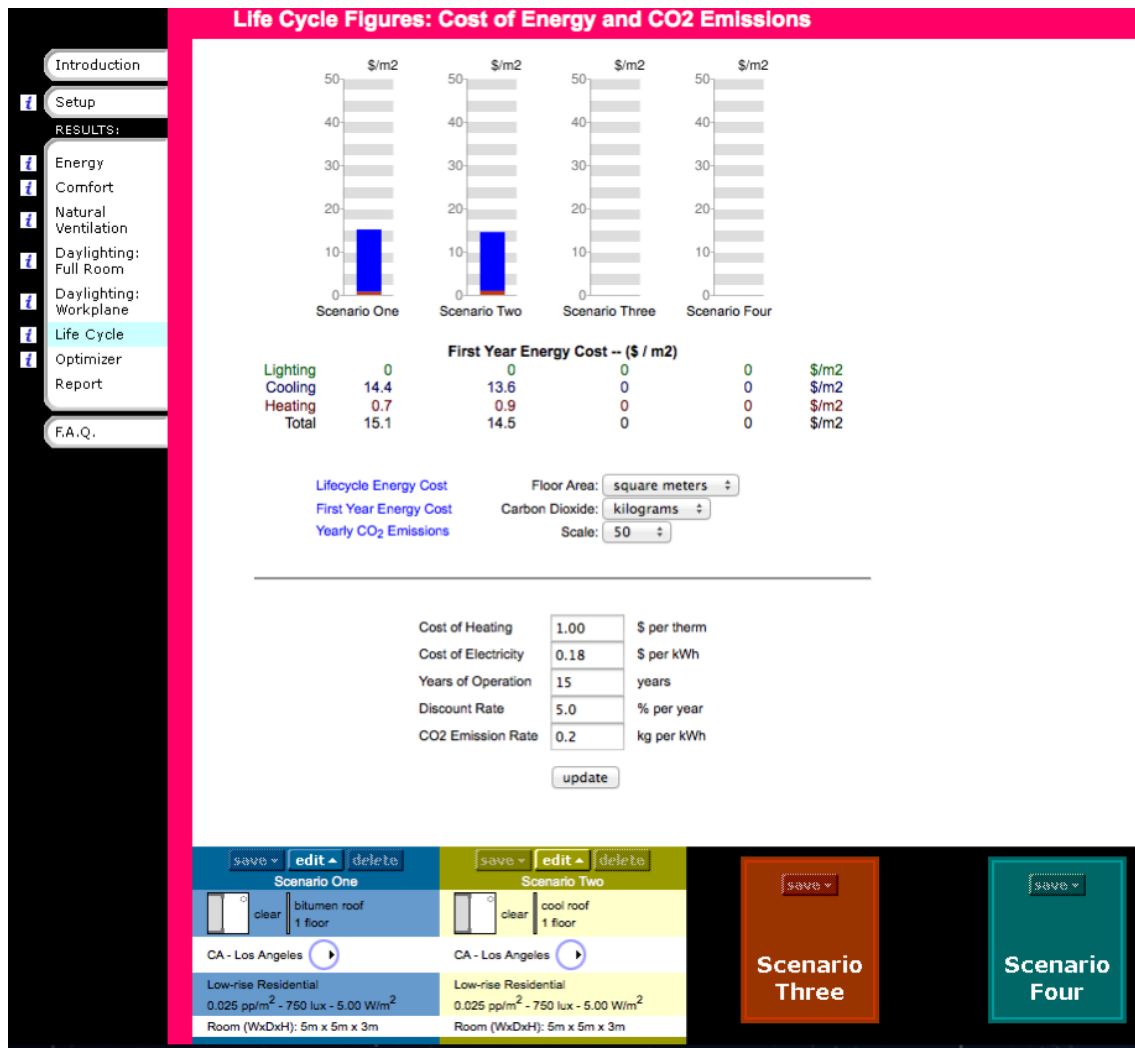
**Scenario Management**

Scenario One	Scenario Two	Scenario Three	Scenario Four
clear bitumen roof 1 floor	clear cool roof 1 floor		
CA - Los Angeles	CA - Los Angeles		
Low-rise Residential 0.025 ppl/m <sup>2</sup> - 750 lux - 5.00 W/m <sup>2</sup>	Low-rise Residential 0.025 ppl/m <sup>2</sup> - 750 lux - 5.00 W/m <sup>2</sup>		
Room (WxDxH): 5m x 5m x 3m	Room (WxDxH): 5m x 5m x 3m		

**Ilustración 5-4. Aplicación MIT Design Advisor. Pantalla de entrada de datos. Fuente: (MIT, 2009).**

En la *Ilustración 5-5* se muestra la pantalla de resultados de ahorro de energía para el mismo escenario.





**Ilustración 5-5. Aplicación MIT Design Advisor. Pantalla de resultados de ahorro de energía. Fuente: (MIT, 2009).**

### 5.2.3. Proyecto “Cool Roof” de la Unión Europea: aplicación Cool Roofs-EU

La Unión Europea creó en Septiembre de 2008 un proyecto para la promoción de Cool Roofs en Europa denominado “Cool Roofs-EU”, dentro del marco del “Intelligent Energy Europe Programme” (Programa de Europa Energía Inteligente). Dentro de este proyecto se desarrolló una adaptación de la “DOE coolroof calculator” para el mercado europeo. Esta calculadora (en fase de desarrollo) presentaba inicialmente resultados erróneos: por ejemplo, para una construcción en Sevilla estimaba ahorros de más de 40 €/m<sup>2</sup>, como puede observarse en la *Ilustración 5-6*.

The screenshot displays the 'CoolRoofs-EU' web application interface. It is divided into two main sections: 'Input data' (yellow background) and 'Output data' (green background).

**Input data section:**

- Country: Spain
- City: Sevilla
- Roof:
  - R-value (high=3.5; avg=1.5; low=0.5): 1 K·m²/W
  - Solar reflectance, SR (high=80; avg=50; low=10): 80 %
  - Infrared emission, IE (high=90; avg=60; low=10): 90 %
- Energy costs and equipment efficiencies (visit Europe's Energy portal for help):
  - Summertime cost of electricity (high=0.30; medium=0.15; low=0.08): 2 €/KWh
  - Air conditioner efficiency (cooling COP) (high=4; avg=3; low=1.5): 3
  - Energy source for heating (choose one): Electricity (selected) / Fuel
  - If electricity, wintertime cost (high=0.30; avg=0.15; low=0.08): 2 €/KWh
  - If fuel, cost (Natural gas: high=0.15; avg=0.09; low=0.03; Heating oil: high=0.09; avg=0.07; low=0.05 = € per litre/12.24): 1 €/KWh
  - Heating system efficiency (heating COP) (Furnace or boiler: high=0.8; avg=0.7; low=0.5) (Electric heat pump: high=2; avg=1.5) (Electric resistance: 1): 1

**Output data section:**

- Calculate annual savings relative to black roof
- Net savings: 38.341 €/m² per year
- Cooling savings: 53.9405 €/m² per year
- Heating savings (heating penalty if negative): -15.5997 €/m² per year
- Insulation in black roof to yield same annual energy savings: Upgrade from R- 1 to R- 6.7 K·m²/W
- Details of comparison:
  - Heating degree days for location chosen: 1494.95 annual °C-day
  - Cooling degree days for location chosen: 856.55 annual °C-day
  - Solar load for location chosen: 4.81 annual average kWh/m² per day
  - Cooling load for black roof (SR=5%; IE=90%): 36.46 kWh/m² per year
  - Heating load for black roof (SR=5%; IE=90%): 29.9 kWh/m² per year
  - Cooling load for proposed roof: 8.85 kWh/m² per year
  - Heating load for proposed roof: 35.23 kWh/m² per year

Below the interface, there are two notes:

- Developed in the framework of EC's "CoolRoof" project.
- The accuracy of this calculator depends on the supplied data. [CLICK HERE](#) to get help in figuring out the best input values.

**Ilustración 5-6. Captura de pantalla de la aplicación "Cool Roofs-EU" con errores.**

**Fuente: (Roofs-EU, 2010).**

Este hecho fue puesto en conocimiento de las personas responsables (profesor A. Pouliezos) y, tras varios intercambios de información, la aplicación fue corregida y publicada de nuevo. Se encuentran todavía pequeñas diferencias con el modelo desarrollado en esta tesis, debido a que este proyecto europeo utiliza como datos de entrada grados-día en base 20 °C, lo que no es formalmente correcto, debido a que el desarrollo original del DOE está basado en una regresión polinómica sobre simulaciones con base 18 °C, tal y como se explicó en el apartado 4.2 *Estimación de demanda energética*. Esta circunstancia ha sido también clarificada con los autores de la herramienta.

#### 5.2.4. Aplicación "Roof Savings Calculator" de la ORNL y LBRL

El "Oak Ridge National Laboratory" (ORNL) y el "Lawrence Berkeley National Laboratory" están desarrollando una aplicación denominada "Roof Savings Calculator (RSC)" (ORNL & LBNL, 2010), esta aplicación está basada en el modelo del DOE 2.1-E y hace estimaciones hora a hora para calcular el ahorro de energía como las anteriores. Al momento de la escritura de esta tesis, la aplicación se encuentra en fase de desarrollo (beta) y todavía no proporciona resultados consistentes. Un ejemplo de los datos de entrada de una simulación

para Los Ángeles (California, EEUU) y de los resultados se muestran en la *Ilustración 5-7*.

### Residential Roof Savings Calculator (RSC)

Go to: [Advanced Mode](#)  
[Java-less version](#)

**Building**

1. Closest location (similar weather):

2. Building Type:

3. Conditioned floor area (ft<sup>2</sup>):

4. Number of floors:

5. Year of construction:  
 post-1990  
 1980-1990  
 pre-1980

**Heating/Cooling**

6. Heating equipment:  
 Electric heat pump  
 Natural gas furnace

P1. Electricity price (cents per kWh):

P2. Natural gas price (dollars per 1000 ft<sup>3</sup>):

7. Heating system efficiency (AFUE):  
 High-efficiency (90%)  
 Mid-efficiency (83%)  
 Low-efficiency (70%)  
 None  
 Custom

**Ilustración 5-7. Aplicación "Roof Saving Calculator". Captura de pantalla de entrada de datos parcial.**



## 6. RESULTADOS: ESTIMACIÓN DE AHORROS PARA ANDALUCÍA

En esta sección se presentan los resultados estimados del potencial de ahorro de aplicar cool roofs en Andalucía.

Los datos de entrada para simular el modelo se muestran en la Tabla 6-1, según la definición y las fuentes mencionados en la sección 4.1 *Datos de entrada*. Para cada provincia se muestran su zona climática, primero según el CTE-2006 (Ministerio de Fomento, 2006) y después según la antigua clasificación en el NBE-79 (Ministerio de Fomento, 1979). A continuación se muestran los datos climatológicos (NASA, 2012) grados-día de calefacción (HDD) y los grados-día de refrigeración (CDD) en base 18 °C, así como la irradiación media diaria en kWh/(m<sup>2</sup> día). Por último, se muestra la superficie estimada de tejados planos residenciales (Ordóñez et al., 2010).

**Tabla 6-1. Datos de entrada para Andalucía. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER”.**

Provincia	Zona	HDD °C - día anual	CDD °C - día anual	Irradiación kWh/(m <sup>2</sup> · día)	Área Tejados m <sup>2</sup>
Almería	A4-W	866	833	5,06	12.201.868
Cádiz	A3-W	533	874	5,42	15.242.189
Córdoba	A3-X	1.282	975	4,86	11.422.168
Granada	C3-Y	1.510	872	4,87	6.049.432
Huelva	B4-W	850	1.105	4,9	6.348.100
Jaén	C4-W	1.510	872	4,75	3.258.725
Málaga	C4-W	848	790	4,79	18.890.581
Sevilla	B4-W	1.035	1.086	4,92	31.056.926
<b>Total</b>					<b>104.469.989</b>

A continuación se muestran los resultados de ahorros estimados en términos de energía, coste económico y emisiones de gases de efecto invernadero, en concreto CO<sub>2</sub>.

### 6.1. Ahorros de energía estimados

Los ahorros de energía provienen de reducir la carga de refrigeración que necesitan los edificios. Estos ahorros se corrigen con la penalización debida al aumento de la carga de calefacción.

El ahorro estimado para Andalucía es de 295.000 kWh por año, tal y como se describe en la *Tabla 6-2*. Esta reducción representa un 2% de ahorro en el consumo de energía eléctrica de Andalucía en el sector residencial. Es importante resaltar que estos ahorros corresponden sólo a viviendas con tejado plano. El cálculo se ha realizado de acuerdo a las asunciones para las distribuciones de edificios por época de construcción y por color de los tejados que se explicaron en la *Tabla 4-1*.

**Tabla 6-2. Ahorros de energía anuales en Andalucía en kWh, con total, asumiendo calefacción eléctrica.**

Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 y posterior)		Total (kWh/año)
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio	
Almería	A4-W	10.343.456	23.423.310	245.483	555.063	34.567.312
Cádiz	A3-W	16.036.636	36.320.487	380.701	860.536	53.598.360
Córdoba	A3-X	7.997.476	18.065.070	205.811	464.264	26.732.621
Granada	C3-Y	2.910.875	6.557.807	69.698,8	156.693	9.695.074
Huelva	B4-W	6.255.101	14.153.216	131.564	297.142	20.837.022
Jaén	C4-W	1.951.393	4.398.448	36.656,3	82.402,1	6.468.899
Málaga	C4-W	14.964.392	33.897.556	276.833	624.993	49.763.774
Sevilla	B4-W	28.128.125	63.605.988	592.870	1.338.433	93.665.417
<b>Gran total</b>						<b>295.328.479</b>

Sevilla, Cádiz y Málaga concentran un 66,7% de los ahorros, dado que son las provincias con más superficie de tejados. Sólo Sevilla representa un ahorro de 94 MWh de los 295 MWh que potencialmente se pueden ahorrar en Andalucía.

## 6.2. Ahorros económicos

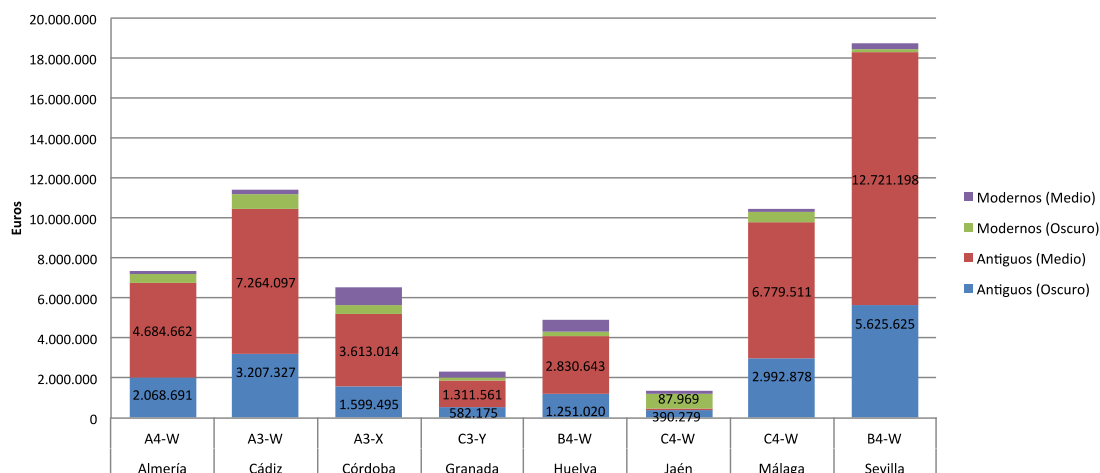
Una implantación a gran escala de cool roofs en Andalucía puede ahorrar potencialmente 59 millones de euros al año, contemplando sólo tejados residenciales planos con calefacción eléctrica. La información agrupada por provincias puede verse en la *Tabla 6-3*.

Estos números podrían variar significativamente con un estudio más detallado de la distribución de colores de los tejados, dado que como se verá a continuación en el análisis de los resultados económicos, convertir tejados oscuros produce mucho más ahorro que convertir tejados de colores medios (rojo, verde, etc.). Por ejemplo, el 20% actual de tejados oscuros en Sevilla están ahorrando casi 6 millones de euros al año, como puede observarse en la *Ilustración 6-1*.

**Tabla 6-3. Ahorros detallados anuales para Andalucía en euros, con total, asumiendo calefacción eléctrica y un coste de energía de 0,20 €/kWh.**

Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 y posterior)		Total (€/ año)
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio	
Almería	A4-W	2.068.691	4.684.662	49.096,7	111.013	6.913.462
Cádiz	A3-W	3.207.327	7.264.097	76.140,2	172.107	10.719.672
Córdoba	A3-X	1.599.495	3.613.014	41.162,3	92.852,7	5.346.524
Granada	C3-Y	582.175	1.311.561	13.939,8	31.338,6	1.939.015
Huelva	B4-W	1.251.020	2.830.643	26.312,8	59.428,4	4.167.404
Jaén	C4-W	390.279	879.690	7.331,26	16.480,4	1.293.780
Málaga	C4-W	2.992.878	6.779.511	55.366,6	124.999	9.952.755
Sevilla	B4-W	5.625.625	12.721.198	118.574	267.687	18.733.083
<b>Gran total</b>						<b>59.065.696</b>

**Ahorros económicos de Andalucía por provincia y distribución por edad del edificio y tipo de tejado**



**Ilustración 6-1. Distribución ahorros económicos en Andalucía.**

Es importante resaltar que si el precio de la electricidad continua subiendo en España en los próximos años como se presentó en la introducción (ver *Ilustración 1-6*), los ahorros serían mayores, dado que son lineales al precio de la energía.

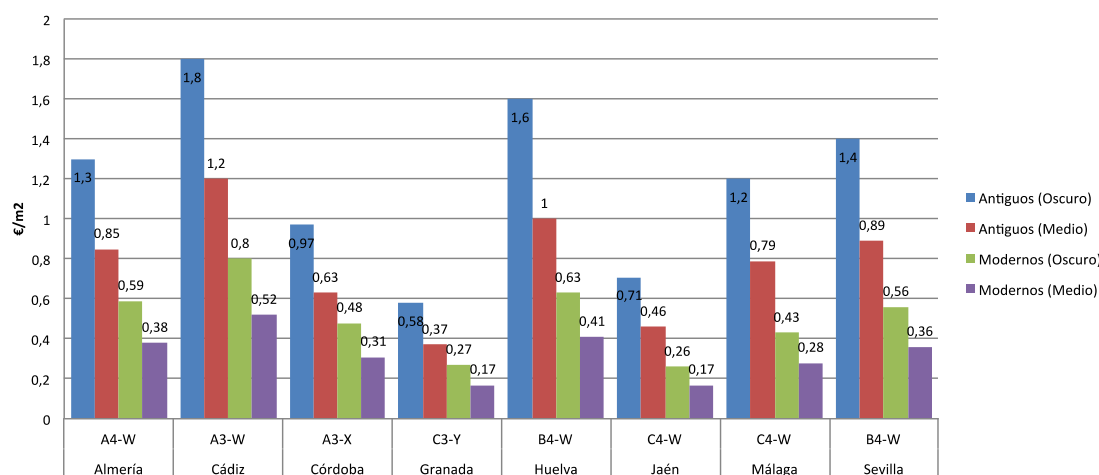
Los ahorros unitarios para edificios antiguos con tejado oscuro en Andalucía varían desde los 0,58 €/m<sup>2</sup> en Granada hasta los 1,8 €/m<sup>2</sup> en Cádiz, tal y como se muestra en la *Tabla 6-4*.

**Tabla 6-4. Ahorros económicos anuales para provincias de Andalucía en €/m<sup>2</sup>,  
asumiendo calefacción eléctrica a un coste de 0,20 €/kWh.**

Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 o posterior)	
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio
Almería	A4-W	1,3	0,85	0,59	0,38
Cádiz	A3-W	1,8	1,2	0,8	0,52
Córdoba	A3-X	0,97	0,63	0,48	0,31
Granada	C3-Y	0,56	0,36	0,26	0,17
Huelva	B4-W	1,6	1	0,63	0,41
Jaén	C4-W	0,71	0,46	0,26	0,17
Málaga	C4-W	1,2	0,79	0,43	0,28
Sevilla	B4-W	1,4	0,89	0,56	0,36

Los ahorros mínimos para tejados de colores medios (rojo o similar) en edificios nuevos varían de 0,17 €/m<sup>2</sup> en Granada a 0,52 €/m<sup>2</sup> en Cádiz, tal y como se muestra en la *Ilustración 6-2*.

**Ahorros económicos unitarios anuales de Andalucía por provincia y edad del edificio y tipo de tejado**



**Ilustración 6-2. Ahorros económicos anuales unitarios en Andalucía.**

Los ahorros unitarios medios para Andalucía haciendo una media ponderada con la actual distribución de colores, son de 0,94 €/m<sup>2</sup> y varían desde 0,41 €/m<sup>2</sup> en Granada hasta 1,3 €/m<sup>2</sup> en Cádiz.

Para finalizar, en la *Tabla 6-5*, se muestra el porcentaje que estos ahorros representan sobre el coste de energía total con calefacción de gas y eléctrica, para distintos tipos de tejados y grados de aislamiento. Por ejemplo, una casa en Cádiz con un tejado oscuro, ahorrará un 19% del coste de energía con un tejado fresco si utiliza calefacción eléctrica y un 36% del coste de energía si utiliza calefacción de gas. El ahorro porcentual en coste y energía es el mismo



al asumir calefacción eléctrica, porque los calefactores eléctricos convierten la electricidad en calor (EER=1), es decir, que la casa ahorrará un 19% de la energía termal. Otra casa en Cádiz con un tejado rojo ahorrará entre el 13% (calefacción eléctrica) y un 26% (calefacción gas) del coste energético total.

**Tabla 6-5. Ahorro detallado para provincias andaluzas: edificios antiguos (construidos antes del 2007) en energía kWh/m<sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración.**

Provincia	Zona	Oscuro				Medio			
		Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Eléctric. %	Ahorro Gas %	Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Eléctric. %	Ahorro Gas %
Almería	A4-W	34	(4,8)	11	29	22	(3,1)	7,7	21
Cádiz	A3-W	36	(3,1)	19	36	23	(2)	13	26
Córdoba	A3-X	33	(6,2)	7,1	24	22	(4)	4,7	17
Granada	C3-Y	27	(6)	4,7	22	17	(3,9)	3,1	15
Huelva	B4-W	38	(4,7)	13	30	24	(3)	8,9	22
Jaén	C4-W	34	(7,7)	4,5	21	22	(5)	3	15
Málaga	C4-W	32	(4,7)	11	29	21	(3)	7,3	21
Sevilla	B4-W	38	(5,6)	10	28	24	(3,6)	7	20

Por último, en la *Tabla 6-6* se muestran los mismos cálculos para edificios de construcción reciente. Se puede observar como los ahorros absolutos de energía son menores que los de los edificios antiguos, aunque la proporcionalidad de los ahorros se mantiene.

**Tabla 6-6. Ahorro detallado para provincias andaluzas: edificios modernos (construidos durante o después del 2007) en energía kWh/m<sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración.**

Provincia	Zona	Oscuro				Medio			
		Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Eléctric. %	Ahorro Gas %	Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2a}$	Ahorro Eléctric. %	Ahorro Gas %
Almería	A4-W	15	(2,1)	11	29	9,9	(1,4)	7,5	21
Cádiz	A3-W	16	(1,4)	19	35	10	(0,88)	13	26
Córdoba	A3-X	16	(3)	7,1	24	10	(1,9)	4,7	17
Granada	C3-Y	12	(2,7)	4,7	21	7,7	(1,7)	3	15
Huelva	B4-W	15	(1,8)	13	30	9,7	(1,2)	8,7	22
Jaén	C4-W	12	(2,7)	4,5	21	7,6	(1,7)	2,9	15
Málaga	C4-W	11	(1,6)	11	28	7,3	(1)	7	20
Sevilla	B4-W	15	(2,2)	10	28	9,6	(1,4)	6,9	20

Estos resultados preliminares sugieren que es necesario priorizar la adopción de tejados frescos en Andalucía, mediante acciones legislativas y promocionales, para dar a conocer los beneficios de los mismos al público general.

### 6.3. Ahorros en emisiones de CO<sub>2</sub>

Con un despliegue a gran escala de cool roofs en Andalucía en las viviendas con tejado plano, podría evitarse la emisión de 136.000 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> cada año. Estas emisiones son la conversión directa de la producción de 295.000 kWh de energía eléctrica que se ahorrarían. La distribución por provincias se muestra en la *Tabla 6-7*, donde puede apreciarse que Sevilla, Cádiz y Málaga son las tres provincias que más ahorran, acumulando entre las tres 90,5 Mt de CO<sub>2</sub> que se evitarían cada año.

**Tabla 6-7. Ahorros anuales de emisiones de kilogramos de CO<sub>2</sub> en Andalucía, con total, asumiendo calefacción eléctrica.**

Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 y posterior)		Total (kg CO <sub>2</sub> /año)
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio	
Almería	A4-W	4.750.749	10.758.326	112.750	254.940	15.876.766
Cádiz	A3-W	7.365.627	16.682.000	174.856	395.244	24.617.727
Córdoba	A3-X	3.673.241	8.297.287	94.529,1	213.236	12.278.293
Granada	C3-Y	1.336.965	3.012.001	32.012,6	71.969,2	4.452.948
Huelva	B4-W	2.872.968	6.500.572	60.427,2	136.477	9.570.444
Jaén	C4-W	896.275	2.020.207	16.836,2	37.847,3	2.971.165
Málaga	C4-W	6.873.145	15.569.147	127.149	287.059	22.856.501
Sevilla	B4-W	12.919.248	29.214.230	272.305	614.742	43.020.526
<b>Gran Total</b>						<b>135.644.370</b>

Estas emisiones se han calculado asumiendo que todas las casas utilizan calefacción eléctrica. La misma producción eléctrica de 295 MWh en Estados Unidos resultaría en la emisión de 212.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, utilizando el ratio de emisiones de 718 g/kWh (Buchanan et al., 2000). Esta diferencia de casi el 40% de emisiones entre España y Estados Unidos, se justifica por la influencia de las energías renovables en el mix energético de España (ver (Gómez, Zubizarreta, Dopazo, & Fueyo, 2011; Romeo et al., 2009)), que en 2008 tenía un valor para el ratio de emisiones por kWh producido de cerca de 400 g/kWh (M. Izquierdo, Moreno-Rodríguez, González-Gil, & García-Hernando, 2011).

Desafortunadamente para los consumidores, la política legislativa para compensar a las eléctricas por el coste del proceso de desregularización así como los subsidios para las energías renovables han contribuido de manera significativa a la subida de precios que los consumidores españoles están sufriendo en los últimos años (Gómez et al., 2011; Ministerio de Industria y Comercio, 2010b).

Adicionalmente a los ahorros de emisiones producidas por la producción de electricidad, si se considera el impacto de cambiar el albedo en los forzamientos radiativos, se obtiene un ahorro potencial de emisiones de entre 9,44 y 12 Mt de CO<sub>2</sub>. Estas cifras son de mayor orden que la emisión anual debida a la producción eléctrica para un año de toda Andalucía. Por supuesto, el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> debido al incremento del albedo no está relacionado con el CO<sub>2</sub> derivado de la producción eléctrica y es lógico que en la comparación aquellos sean de mayor orden. De hecho, el contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera está prácticamente saturado en lo que se refiere a la absorción radiativa, lo que significa que sólo cantidades relativamente grandes tienen un efecto notable. Por último, no se debe olvidar que el CO<sub>2</sub> tiene otros efectos, como la acidificación oceánica.

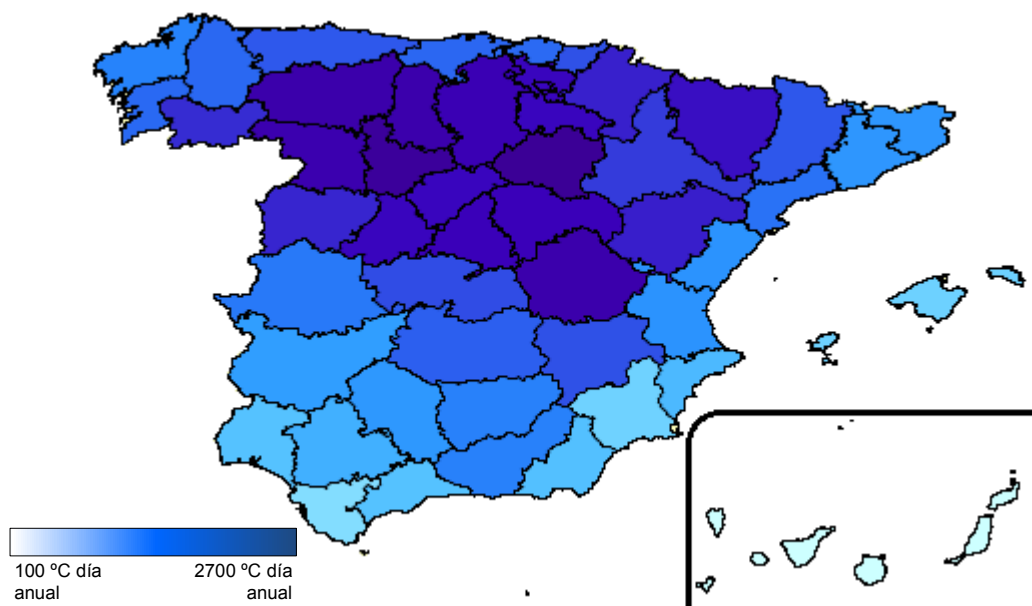


## 7. RESULTADOS: ESTIMACIÓN DE AHORROS PARA ESPAÑA

### 7.1. Introducción

El estudio de ahorros por el uso de cool roofs se expande en este capítulo a todas las provincias de España. Se han analizado los datos para todas las capitales de provincia con el fin de estimar la idoneidad de utilizar cool roofs en diferentes regiones españolas. Los ahorros/penalizaciones de energía se han calculado para calefacciones de gas y de electricidad, para edificios nuevos y antiguos y para distintos colores de los tejados, tal y como se explicó en el capítulo 4 *Metodología para la estimación de ahorros con Cool roofs*.

En las *Ilustraciones 7.1, 7.2 y 7.3* se recogen las distribuciones geográficas de los grados día de calefacción (HDD), grados día de refrigeración (CDD) e irradiación, respectivamente, para toda España mediante mapas *choropleth*. Estos datos, basados en las de las capitales de las distintas provincias, se detallan en la *Tabla 7-1*. Todos los resultados utilizados en el modelo para España se han calculado en base a los datos de dicha tabla.



**Ilustración 7-1. Distribución geográfica de HDD.**

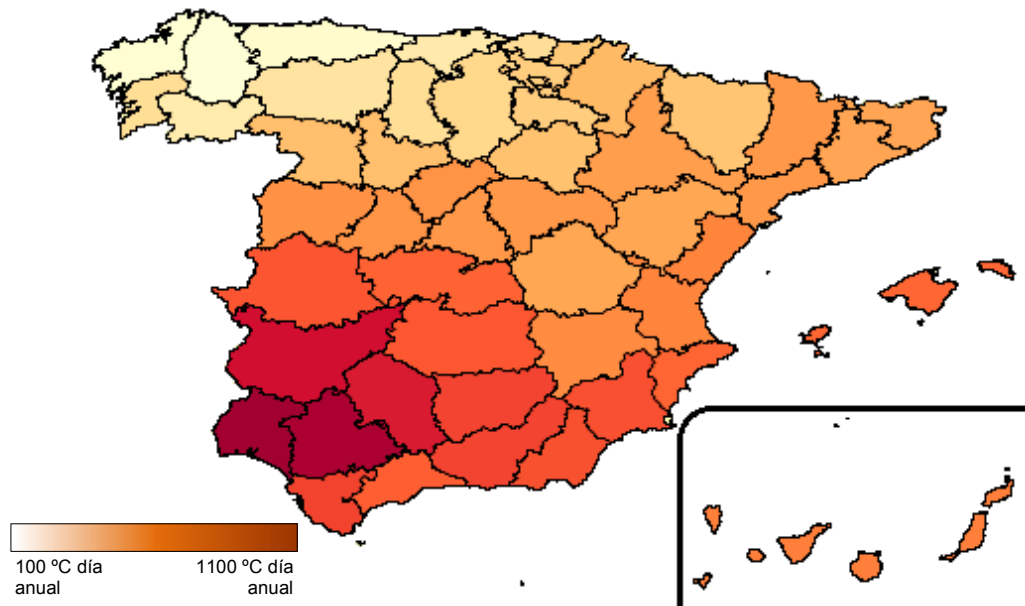


Ilustración 7-2. Distribución geográfica de CDD.

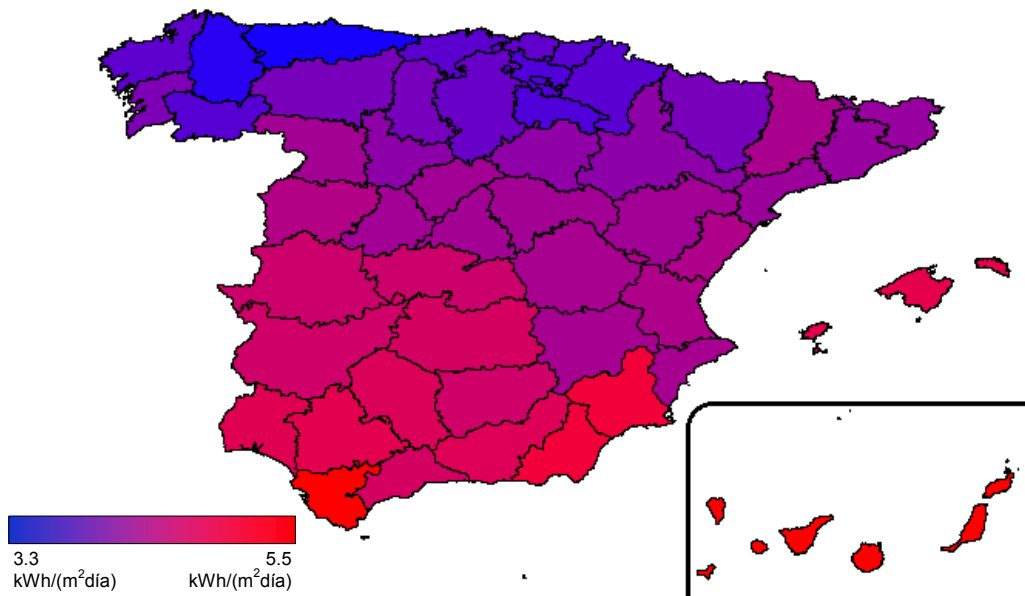


Ilustración 7-3. Distribución geográfica de la irradiación.

**Tabla 7-1. Datos de entrada para España. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER”.**

<b>Ciudad</b>	<b>Zona</b>	<b>HDD</b> °C - día anual	<b>CDD</b> °C - día anual	<b>Irradiación</b> kWh/(m <sup>2</sup> · día)
Cádiz	A3-W	533	874	5,42
Las Palmas de Gran Canaria	A3-V	109	674	5,4
Santa Cruz de Tenerife	A3-V	107	682	5,62
Córdoba	A3-X	1.282	975	4,86
Almería	A4-W	866	833	5,06
Castellón de la Plana	B3-W	1.336	652	4,49
Murcia	B3-W	661	835	5,05
Palma de Mallorca	B3-W	673	762	4,94
Tarragona	B3-W	1.652	577	4,34
Valencia	B3-W	1.336	652	4,49
Alicante	B4-W	934	768	4,43
Huelva	B4-W	850	1.105	4,9
Sevilla	B4-W	1.035	1.086	4,92
Bilbao	C1-W	1.721	286	3,91
Coruña	C1-W	1.498	135	3,89
Oviedo	C1-X	1.885	148	3,37
Pontevedra	C1-W	1.733	288	4,11
Santander	C1-W	1.753	232	3,88
San Sebastián	C1-W	1.944	376	3,85
Barcelona	C2-W	1.300	531	4,31
Girona	C2-X	1.300	531	4,31
Orense	C2-W	2.214	227	3,84
Granada	C3-Y	1.510	872	4,75
Jaén	C4-W	1.510	872	4,75
Málaga	C4-W	848	790	4,79
Badajoz	C4-X	1.222	998	4,75
Cáceres	C4-X	1.584	818	4,72
Toledo	C4-X	1.983	776	4,72
Lugo	D1-X	1.740	126	3,55
Palencia	D1-Y	2.519	288	4,06
Pamplona	D1-Y	2.281	442	3,86
Vitoria	D1-Y	2.393	360	3,8
Cuenca	D2-Z	2.516	523	4,44
Huesca	D2-Y	2.363	395	4,08
Logroño	D2-X	2.393	360	3,8
Salamanca	D2-Z	2.247	601	4,53
Segovia	D2-Z	2.390	598	4,39
Teruel	D2-Z	2.291	521	4,39
Valladolid	D2-Y	2.623	420	4,23
Zamora	D2-Y	2.499	422	4,4
Albacete	D3-Z	1.946	625	4,43
Ciudad Real	D3-Y	1.822	812	4,79
Guadalajara	D3-Y	2.431	580	4,4
Lleida	D3-Y	1.896	576	4,45
Madrid	D3-Y	2.431	580	4,4
Zaragoza	D3-X	2.114	555	4,24
Ávila	E1-Z	2.390	598	4,39
Burgos	E1-Z	2.469	316	3,96
León	E1-Z	2.522	257	4,08
Soria	E1-Z	2.649	412	4,25

A continuación se muestran los resultados para las provincias españolas según el tipo de calefacción utilizada, ya sea de gas o eléctrica.

## 7.2. Ahorros en la demanda de energía

En las *Tabla 7-2* y *Tabla 7-3* se presentan los ahorros detallados en la demanda de energía de provincias españolas para edificios antiguos y modernos, respectivamente. Estas tablas incluyen la siguiente información en forma de columnas:

- Zona climática a la que pertenece la provincia.
- Ahorro en la demanda de energía de refrigeración en kWh/m<sup>2</sup>.
- Ahorro en la demanda de energía de calefacción en kWh/m<sup>2</sup> (los valores negativos indican penalización).
- Porcentaje de ahorro neto en la demanda de energía con calefacción eléctrica.
- Porcentaje de ahorro neto en la demanda de energía con calefacción de gas.

Los ahorros máximos se obtienen en Las Palmas de Gran Canaria, donde aumentar reflectividad de un tejado oscuro en un edificio antiguo (peor aislado) al 60% resulta en una reducción de la demanda de refrigeración de 32 kWh/m<sup>2</sup> al año, con un aumento en la demanda de calefacción de sólo 0,66 kWh/m<sup>2</sup> al año. Estas reducciones en la demanda de energía se transforman en una reducción del 48% en los costes totales de energía (calefacción y refrigeración) si se utiliza calefacción de gas y en una reducción del 38% si se utiliza calefacción eléctrica (ver *Tabla 7-2*). Si el edificio es de reciente construcción, aunque los ahorros porcentuales son iguales, la demanda de refrigeración se reduce a 14 kWh/m<sup>2</sup> al año con una penalización en la calefacción de 0,3 kWh/m<sup>2</sup> al año (ver *Tabla 7-3*).

Las provincias con más ahorros son Gran Canaria (48% de ahorro en costes energéticos), Tenerife (48%), Cádiz (36%), Murcia (33%), Huelva (30%), Málaga (29%), Almería (29%) y Sevilla (28%).



**Tabla 7-2. Ahorro detallado para provincias españolas para edificios antiguos (construidos antes del 2007) en kWh/m<sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro de la calefacción de gas (EER= 0,7) y de refrigeración (COP=3).**

Provincia	Zona	Oscuro				Medio			
		Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	Ahorro Electric. %	Ahorro Gas %	Ahorro Refrig. $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	Ahorro Calefacción $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	Ahorro Electric. %	Ahorro Gas %
Cádiz	A3-W	36	(3,1)	19	36	23	(2)	13	26
Palmas de G.C.	A3-V	32	(0,66)	40	48	21	(0,42)	30	38
SC.de Tenerife	A3-V	33	(0,65)	40	48	21	(0,41)	30	38
Córdoba	A3-X	33	(6,2)	7,1	24	22	(4)	4,7	17
Almería	A4-W	34	(4,8)	11	29	22	(3,1)	7,7	21
Cast de la Plana	B3-W	28	(7)	3,4	20	18	(4,5)	2,2	14
Murcia	B3-W	34	(3,7)	15	33	22	(2,4)	10	24
Pde Mallorca	B3-W	32	(3,8)	14	32	21	(2,4)	9,6	23
Tarragona	B3-W	25	(8,3)	0,22	16	16	(5,4)	0,11	11
Valencia	B3-W	28	(7)	3,4	20	18	(4,5)	2,2	14
Alicante	B4-W	31	(5,1)	8,8	26	20	(3,3)	5,8	19
Huelva	B4-W	38	(4,7)	13	30	24	(3)	8,9	22
Sevilla	B4-W	38	(5,6)	10	28	24	(3,6)	7	20
Bilbao	C1-W	14	(8,5)	(5,6)	5,6	8,8	(5,6)	(3,6)	3,7
Coruña	C1-W	6,9	(7,6)	(8,7)	(1,2)	4,4	(5)	(5,5)	(0,79)
Oviedo	C1-X	6,1	(8,5)	(9,6)	(3,3)	3,9	(5,5)	(6,1)	(2,2)
Pontevedra	C1-W	14	(8,6)	(5,3)	6,2	9,2	(5,6)	(3,4)	4,1
Santander	C1-W	11	(8,7)	(6,9)	2,9	7,3	(5,6)	(4,4)	1,9
San Sebastián	C1-W	17	(9,4)	(4,7)	7,3	11	(6,1)	(3,1)	4,8
Barcelona	C2-W	24	(6,8)	1,7	18	15	(4,4)	1,1	12
Girona	C2-X	22	(6,3)	1,7	18	14	(4,1)	1,1	12
Orense	C2-W	11	(10)	(8,1)	0,53	7,1	(6,7)	(5,1)	0,28
Granada	C3-Y	27	(6)	4,7	22	17	(3,9)	3,1	15
Jaén	C4-W	34	(7,7)	4,5	21	22	(5)	3	15
Málaga	C4-W	32	(4,7)	11	29	21	(3)	7,3	21
Badajoz	C4-X	33	(6)	7,7	25	22	(3,9)	5,1	18
Cáceres	C4-X	30	(7,4)	3,6	20	20	(4,8)	2,3	14
Toledo	C4-X	30	(8,8)	1,2	17	19	(5,8)	0,73	12
Lugo	D1-X	5,5	(8)	(9,8)	(3,7)	3,5	(5,2)	(6,1)	(2,4)
Palencia	D1-Y	11	(8,8)	(7)	2,5	7,1	(5,7)	(4,5)	1,5
Pamplona	D1-Y	15	(8,2)	(4,5)	7,5	9,7	(5,3)	(3)	4,9
Vitoria	D1-Y	13	(8,5)	(6)	4,6	8,1	(5,5)	(3,9)	2,9
Cuenca	D2-Z	15	(7,1)	(3,2)	9,9	9,9	(4,7)	(2,1)	6,5
Huesca	D2-Y	14	(8,4)	(5,1)	6,5	9,2	(5,5)	(3,3)	4,2
Logroño	D2-X	15	(10)	(6,1)	4,6	9,6	(6,6)	(4)	3
Salamanca	D2-Z	17	(6,6)	(1,5)	13	11	(4,3)	(1)	8,5
Segovia	D2-Z	17	(6,9)	(2,1)	12	11	(4,5)	(1,4)	7,8
Teruel	D2-Z	15	(6,7)	(2,7)	11	9,8	(4,4)	(1,8)	7,1
Valladolid	D2-Y	15	(9)	(5)	6,6	10	(5,9)	(3,3)	4,3
Zamora	D2-Y	16	(8,7)	(4,5)	7,5	10	(5,7)	(3)	4,9
Albacete	D3-Z	17	(6)	(0,34)	15	11	(3,9)	(0,28)	9,9
Ciudad Real	D3-Y	26	(6,9)	2,3	18	17	(4,5)	1,5	13
Guadalajara	D3-Y	20	(8,6)	(2,5)	11	13	(5,6)	(1,7)	7,5
Lleida	D3-Y	20	(7,2)	(0,7)	14	13	(4,7)	(0,5)	9,6
Madrid	D3-Y	20	(8,6)	(2,5)	11	13	(5,6)	(1,7)	7,5
Zaragoza	D3-X	23	(9,3)	(2,1)	12	15	(6)	(1,4)	8
Ávila	E1-Z	17	(6,9)	(2,1)	12	11	(4,5)	(1,4)	7,8
Burgos	E1-Z	9,5	(7)	(6,5)	3,4	6,1	(4,6)	(4,2)	2,1
León	E1-Z	8,2	(7,1)	(7,5)	1,4	5,3	(4,7)	(4,8)	0,82
Soria	E1-Z	12	(7,4)	(5,1)	6,4	8	(4,8)	(3,3)	4,1

Tabla 7-3. Ahorro detallado para provincias españolas para edificios modernos (construidos durante o después del 2007) en energía kWh/m<sup>2</sup> y como porcentaje de ahorro del coste, asumiendo la calefacción de gas (EER= 0,7) o eléctrica (EER=1) y de COP=3 para la refrigeración.

Provincia	Zona	Oscuro				Medio			
		Ahorro Refrig. kWh m <sup>2</sup> a	Ahorro Calefacción kWh m <sup>2</sup> a	Ahorro Electric. %	Ahorro Gas %	Ahorro Refrig. kWh m <sup>2</sup> a	Ahorro Calefacción kWh m <sup>2</sup> a	Ahorro Electric. %	Ahorro Gas %
Cádiz	A3-W	16	(1,4)	19	35	10	(0,88)	13	26
Palmas de G.C.	A3-V	14	(0,3)	40	48	9,2	(0,19)	30	38
SC de Tenerife	A3-V	15	(0,29)	40	48	9,4	(0,19)	30	38
Córdoba	A3-X	16	(3)	7,1	24	10	(1,9)	4,7	17
Almería	A4-W	15	(2,1)	11	29	9,9	(1,4)	7,5	21
Castde la Plana	B3-W	11	(2,7)	3,4	20	7,1	(1,8)	2,2	14
Murcia	B3-W	13	(1,5)	15	32	8,7	(0,94)	10	23
Pde Mallorca	B3-W	13	(1,5)	14	31	8,2	(0,96)	9,3	23
Tarragona	B3-W	10	(3,2)	0,32	15	6,4	(2,1)	0,18	10
Valencia	B3-W	11	(2,7)	3,4	20	7,1	(1,8)	2,2	14
Alicante	B4-W	12	(2)	8,5	26	7,8	(1,3)	5,7	18
Huelva	B4-W	15	(1,8)	13	30	9,7	(1,2)	8,7	22
Sevilla	B4-W	15	(2,2)	10	28	9,6	(1,4)	6,9	20
Bilbao	C1-W	4,7	(2,9)	(5,2)	5,4	3	(1,9)	(3,3)	3,5
Coruña	C1-W	2,4	(2,6)	(8,2)	(1,1)	1,5	(1,7)	(5,1)	(0,72)
Oviedo	C1-X	2,3	(3,2)	(9,1)	(3,1)	1,5	(2)	(5,7)	(2)
Pontevedra	C1-W	4,9	(3)	(4,9)	6	3,2	(1,9)	(3,2)	3,9
Santander	C1-W	3,9	(3)	(6,5)	2,9	2,5	(1,9)	(4,1)	1,8
San Sebastián	C1-W	5,8	(3,2)	(4,4)	7,1	3,8	(2,1)	(2,8)	4,7
Barcelona	C2-W	8,3	(2,4)	1,7	17	5,3	(1,5)	1,1	12
Girona	C2-X	8,3	(2,4)	1,7	17	5,3	(1,5)	1,1	12
Orense	C2-W	3,8	(3,5)	(7,5)	0,62	2,4	(2,3)	(4,8)	0,33
Granada	C3-Y	12	(2,7)	4,7	21	7,7	(1,7)	3	15
Jaén	C4-W	12	(2,7)	4,5	21	7,6	(1,7)	2,9	15
Málaga	C4-W	11	(1,6)	11	28	7,3	(1)	7	20
Badajoz	C4-X	13	(2,2)	7,6	25	8,1	(1,4)	5	17
Cáceres	C4-X	11	(2,8)	3,6	20	7,4	(1,8)	2,3	14
Toledo	C4-X	11	(3,3)	1,3	17	7,2	(2,1)	0,83	11
Lugo	D1-X	1,9	(2,7)	(9,1)	(3,4)	1,2	(1,7)	(5,7)	(2,2)
Palencia	D1-Y	4,4	(3,5)	(6,7)	2,5	2,8	(2,3)	(4,3)	1,5
Pamplona	D1-Y	6,1	(3,3)	(4,3)	7,4	3,9	(2,1)	(2,8)	4,8
Vitoria	D1-Y	5,1	(3,4)	(5,7)	4,5	3,3	(2,2)	(3,7)	2,9
Cuenca	D2-Z	7,6	(3,5)	(3)	9,8	4,9	(2,3)	(2)	6,4
Huesca	D2-Y	5,8	(3,4)	(4,8)	6,4	3,7	(2,2)	(3,1)	4,2
Logroño	D2-X	5,1	(3,4)	(5,7)	4,5	3,3	(2,2)	(3,7)	2,9
Salamanca	D2-Z	8,5	(3,3)	(1,4)	13	5,5	(2,1)	(0,93)	8,4
Segovia	D2-Z	8,3	(3,4)	(2)	12	5,3	(2,2)	(1,3)	7,7
Teruel	D2-Z	7,5	(3,3)	(2,6)	11	4,8	(2,1)	(1,7)	7
Valladolid	D2-Y	6,2	(3,6)	(4,7)	6,5	4	(2,3)	(3,1)	4,2
Zamora	D2-Y	6,5	(3,5)	(4,2)	7,4	4,1	(2,3)	(2,8)	4,8
Albacete	D3-Z	8,6	(2,9)	(0,26)	14	5,5	(1,9)	(0,21)	9,7
Ciudad Real	D3-Y	10	(2,8)	2,4	18	6,7	(1,8)	1,5	13
Guadalajara	D3-Y	8,1	(3,4)	(2,2)	11	5,2	(2,2)	(1,5)	7,4
Leida	D3-Y	8,2	(2,9)	(0,57)	14	5,2	(1,9)	(0,41)	9,3
Madrid	D3-Y	8,1	(3,4)	(2,2)	11	5,2	(2,2)	(1,5)	7,4
Zaragoza	D3-X	7,7	(3,1)	(1,9)	12	4,9	(2)	(1,3)	7,8
Ávila	E1-Z	7,5	(3,1)	(2)	12	4,8	(2)	(1,3)	7,7
Burgos	E1-Z	4,2	(3,1)	(6,3)	3,3	2,7	(2)	(4)	2,1
León	E1-Z	3,6	(3,2)	(7,2)	1,4	2,3	(2,1)	(4,6)	0,83
Soria	E1-Z	5,6	(3,3)	(4,9)	6,3	3,6	(2,1)	(3,1)	4

### 7.3. Ahorros económicos con calefacción de gas

El uso de cool roofs supondría ahorros para todas las provincias españolas tal como se presenta en la *Tabla 7-4*. Ordenando los resultados para edificios antiguos según el máximo ahorro económico y en orden descendente, se puede apreciar que las provincias andaluzas, Canarias, Murcia y Baleares son las que más ahorrarían con esta medida, con ahorros en torno a 2 €/m<sup>2</sup> para tejados oscuros de edificios antiguos y superiores a 1 €/m<sup>2</sup> para tejados oscuros de edificios nuevos.

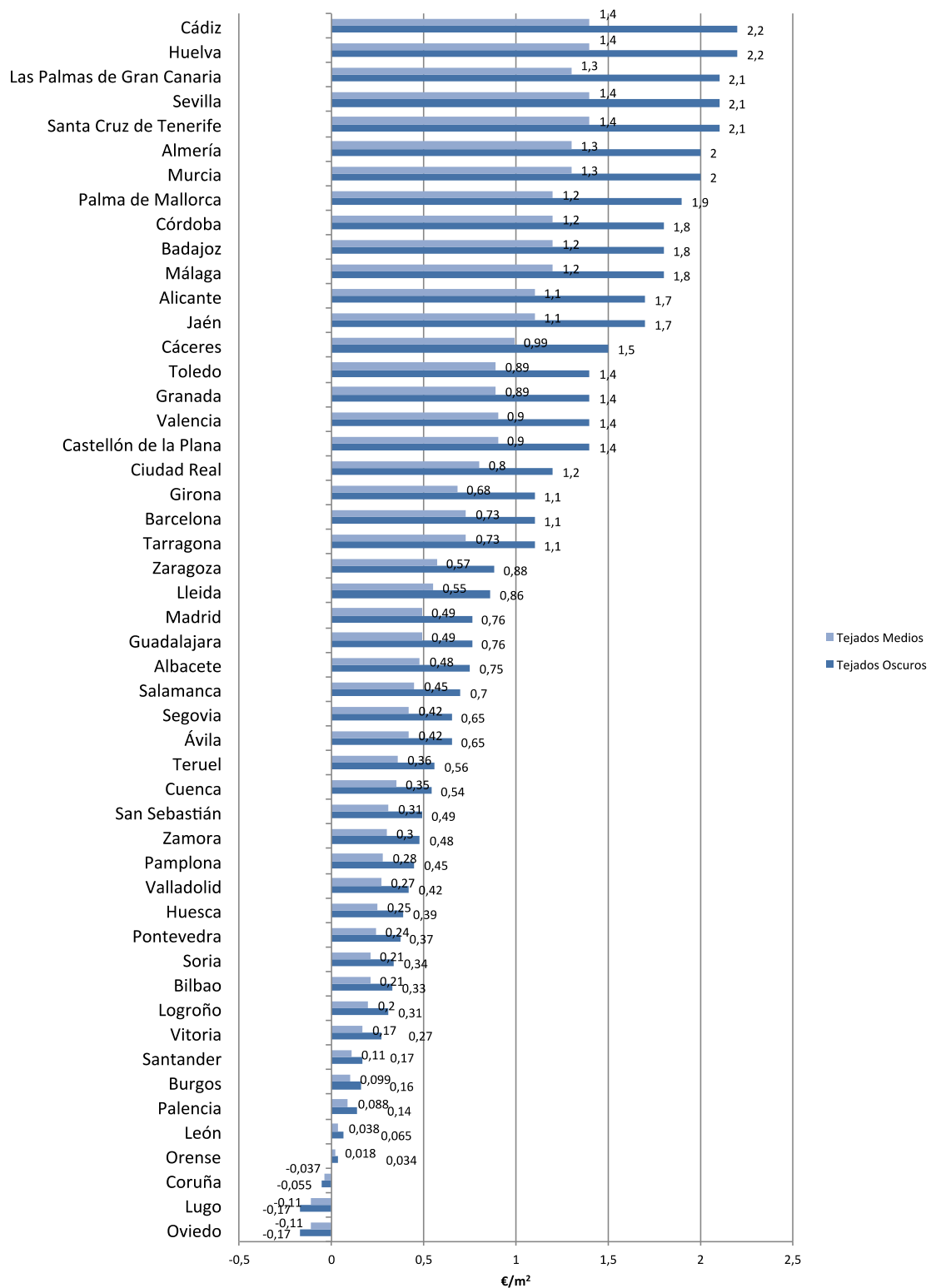
Como puede observarse, Oviedo, Lugo y La Coruña son las provincias más perjudicadas, ya que son de las que menos irradiación solar reciben, tal como se percibe claramente en la *Ilustración 7-3* y las que menos días al año requieren refrigeración, con sólo 148, 135 y 126 grados día (CDD). La penalización en estos casos varía desde -0,012 €/m<sup>2</sup> de un tejado de color medio en un edificio nuevo de La Coruña, hasta un máximo de -0,14 €/m<sup>2</sup> para un tejado oscuro de un edificio antiguo en Lugo.

Las ilustraciones 7.4 y 7.5 presentan la misma información de las tablas anteriores. En resumen, las provincias de Andalucía y Canarias son las más beneficiadas, tanto para edificios antiguos como de reciente construcción, debido a su clima más templado. En concreto, es Cádiz la provincia que presenta los mejores datos. Por el contrario, la mayor penalización se obtiene para provincias de climas más fríos como Oviedo, Lugo y La Coruña.

**Tabla 7-4. Ahorros económicos anuales para provincias Españolas en €/m<sup>2</sup>, asumiendo calefacción de gas a un coste de 0,047 €/kWh.**

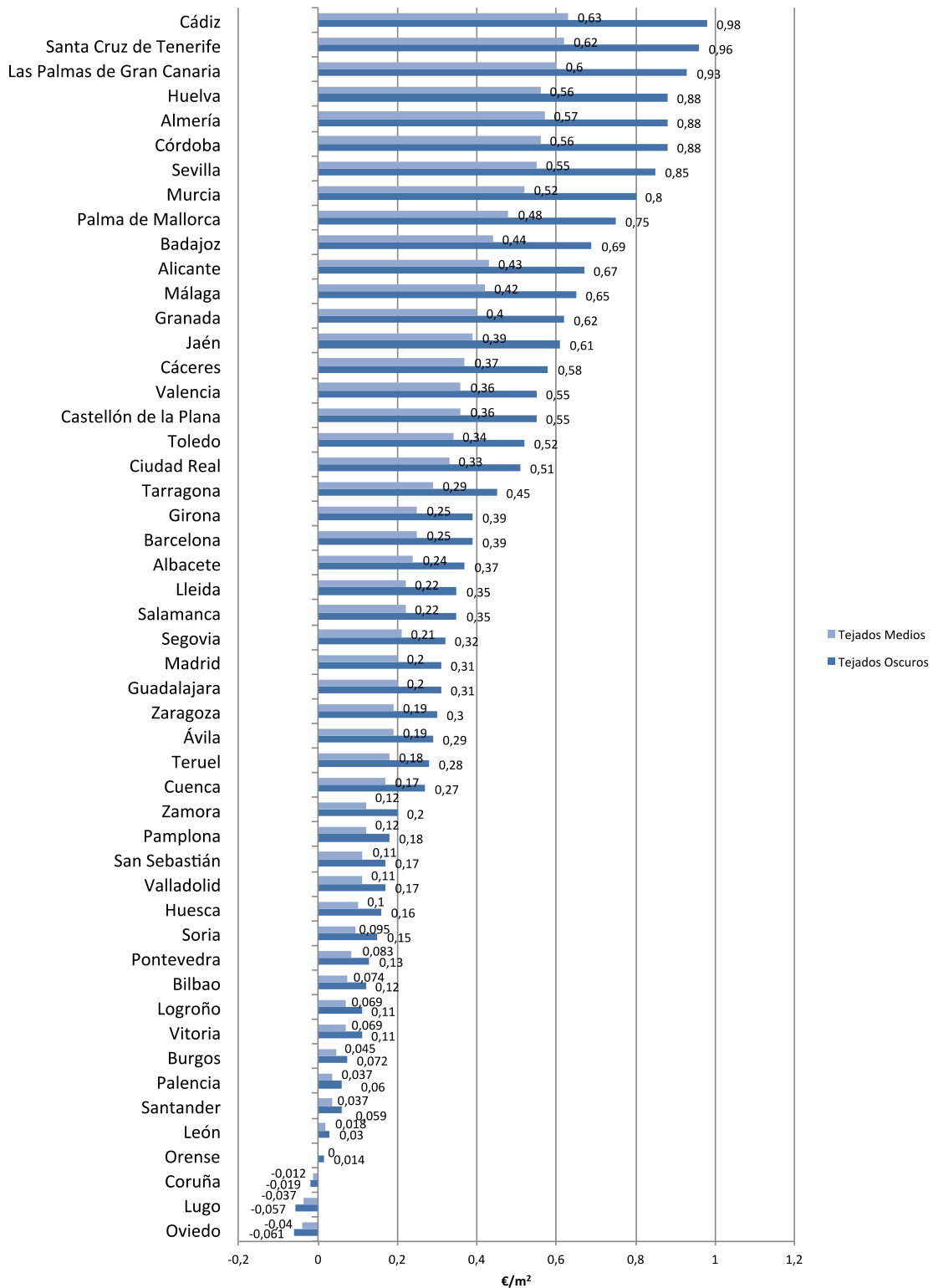
Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 y posterior)	
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio
Cádiz	A3-W	2,2	1,4	0,98	0,63
Las Palmas de Gran Canaria	A3-V	2,1	1,3	0,93	0,6
Santa Cruz de Tenerife	A3-V	2,1	1,4	0,96	0,62
Córdoba	A3-X	1,8	1,2	0,88	0,56
Almería	A4-W	2,	1,3	0,88	0,57
Castellón de la Plana	B3-W	1,4	0,9	0,55	0,36
Murcia	B3-W	2,	1,3	0,8	0,52
Palma de Mallorca	B3-W	1,9	1,2	0,75	0,48
Tarragona	B3-W	1,1	0,73	0,45	0,29
Valencia	B3-W	1,4	0,9	0,55	0,36
Alicante	B4-W	1,7	1,1	0,67	0,43
Huelva	B4-W	2,2	1,4	0,88	0,56
Sevilla	B4-W	2,1	1,4	0,85	0,55
Bilbao	C1-W	0,33	0,21	0,12	0,074
Coruña	C1-W	(0,055)	(0,037)	(0,019)	(0,012)
Oviedo	C1-X	(0,17)	(0,11)	(0,061)	(0,04)
Pontevedra	C1-W	0,37	0,24	0,13	0,083
Santander	C1-W	0,17	0,11	0,059	0,037
San Sebastián	C1-W	0,49	0,31	0,17	0,11
Barcelona	C2-W	1,1	0,73	0,39	0,25
Girona	C2-X	1,1	0,68	0,39	0,25
Orense	C2-W	0,034	0,018	0,014	0,007 6
Granada	C3-Y	1,4	0,88	0,61	0,39
Jaén	C4-W	1,7	1,1	0,61	0,39
Málaga	C4-W	1,8	1,2	0,65	0,42
Badajoz	C4-X	1,8	1,2	0,69	0,44
Cáceres	C4-X	1,5	0,99	0,58	0,37
Toledo	C4-X	1,4	0,89	0,52	0,34
Lugo	D1-X	(0,17)	(0,11)	(0,057)	(0,037)
Palencia	D1-Y	0,14	0,088	0,06	0,037
Pamplona	D1-Y	0,45	0,28	0,18	0,12
Vitoria	D1-Y	0,27	0,17	0,11	0,069
Cuenca	D2-Z	0,54	0,35	0,27	0,17
Huesca	D2-Y	0,39	0,25	0,16	0,1
Logroño	D2-X	0,31	0,2	0,11	0,069
Salamanca	D2-Z	0,7	0,45	0,35	0,22
Segovia	D2-Z	0,65	0,42	0,32	0,21
Teruel	D2-Z	0,56	0,36	0,28	0,18
Valladolid	D2-Y	0,42	0,27	0,17	0,11
Zamora	D2-Y	0,48	0,3	0,2	0,12
Albacete	D3-Z	0,75	0,48	0,37	0,24
Ciudad Real	D3-Y	1,2	0,8	0,51	0,33
Guadalajara	D3-Y	0,76	0,49	0,31	0,2
Lleida	D3-Y	0,86	0,55	0,35	0,22
Madrid	D3-Y	0,76	0,49	0,31	0,2
Zaragoza	D3-X	0,88	0,57	0,3	0,19
Ávila	E1-Z	0,65	0,42	0,29	0,19
Burgos	E1-Z	0,16	0,099	0,072	0,045
León	E1-Z	0,065	0,038	0,03	0,018
Soria	E1-Z	0,34	0,21	0,15	0,095

**Ahorro económico unitario por provincia para edificios antiguos**



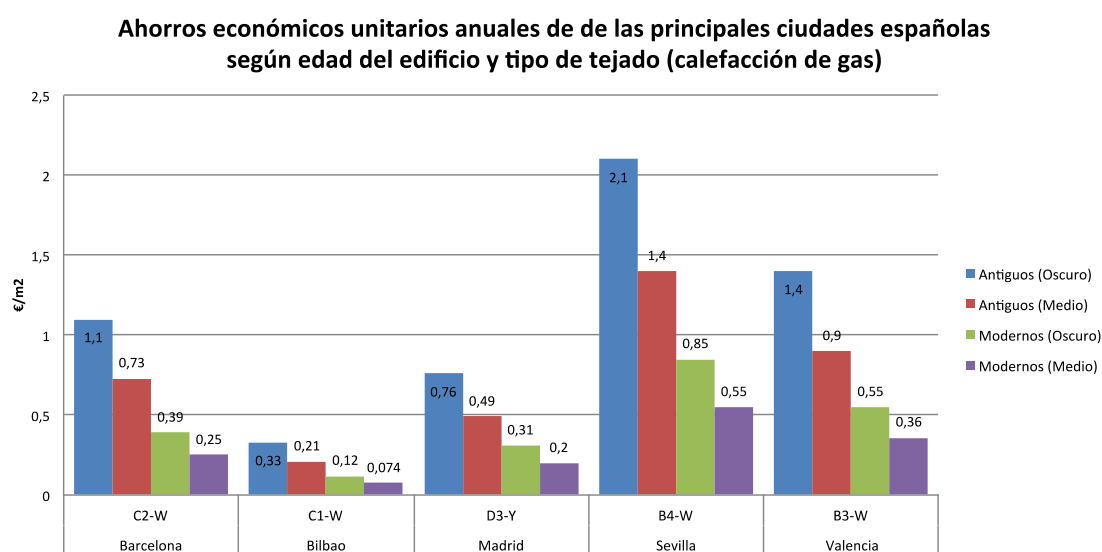
**Ilustración 7-4. Ahorro económico por provincia para edificios antiguos.**

**Ahorro económico unitario por provincia para edificios nuevos**



**Ilustración 7-5. Ahorro económico por provincia para edificios nuevos.**

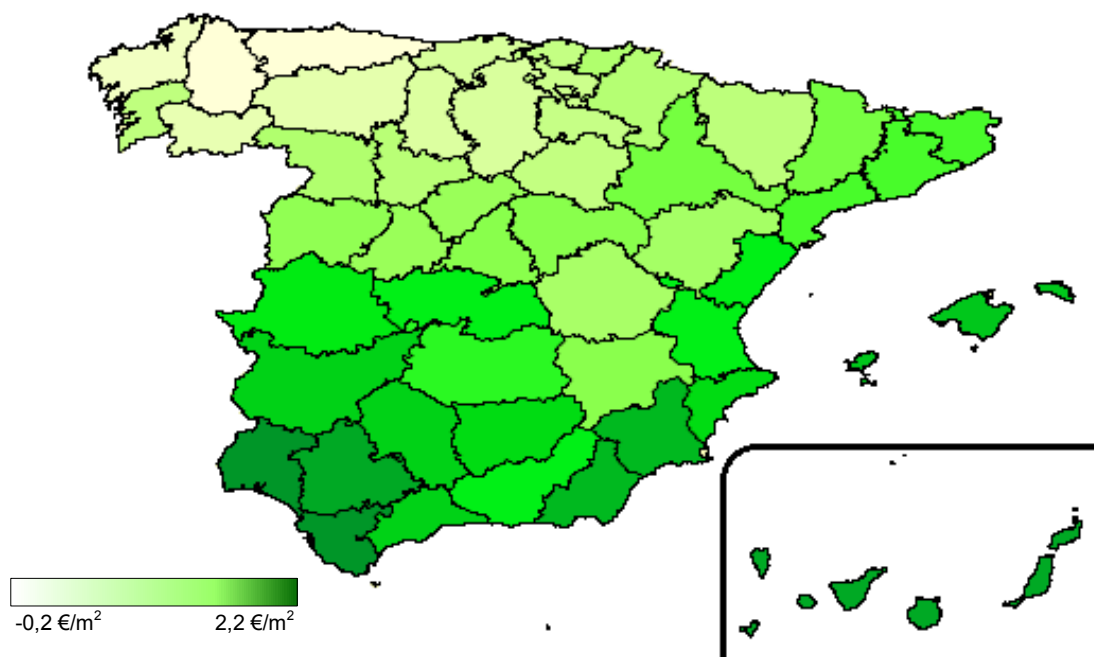
Las principales ciudades españolas por población (Madrid, Barcelona, Valencia y Bilbao) tienen ahorros positivos. El ahorro para Madrid en coste energético para cada año varían desde un 7,4% a un 11% según si el color del tejado es medio u oscuro, que se traducen económicamente a entre 0,2 €/m<sup>2</sup> (edificio nuevo, tejado medio) a 0,76 €/m<sup>2</sup> (edificio antiguo, tejado oscuro). Barcelona ahorraría anualmente entre un 12% y un 18% anual de la energía térmica (de 0,25 €/m<sup>2</sup> a 1,1 €/m<sup>2</sup>). Valencia entre un 14% y un 20% de energía (entre 0,36 €/m<sup>2</sup> y 1,4 €/m<sup>2</sup>) y Bilbao entre un 3,7% y un 5,6% de energía (entre 0,074 €/m<sup>2</sup> y 0,33 €/m<sup>2</sup>) (ver *Ilustración 7-6*).



**Ilustración 7-6. Ahorro económico de las principales ciudades españolas para calefacción de gas.**

### 7.3.1. Distribución geográfica de los ahorros

Es interesante estudiar la distribución de ahorros de manera geográfica. En la *Ilustración 7-7* se muestra un mapa *cloropleth* de las provincias españolas con los ahorros económicos para tejados oscuros en edificios antiguos utilizando distribución lineal (aunque como se ha mencionado con anterioridad la proporcionalidad de los ahorros se mantiene para los distintos tipos de tejados y edificios). En esta imagen se puede apreciar claramente que las regiones que más se beneficiarían del uso de cool roofs son las del sur y levante, además de las Islas.



**Ilustración 7-7. Distribución geográfica de ahorros de cool roof para edificios antiguos con tejados de color oscuro.**

#### **7.4. Ahorros económicos con calefacción eléctrica**

Los resultados de calefacción eléctrica suponen una penalización mayor en la calefacción, o ahorro de energía menor, debido a que la calefacción eléctrica es sustancialmente más cara que la de gas. Es importante resaltar que sólo ciertas Comunidades hacen un uso significativo de la calefacción eléctrica. Como era de esperar, se corresponden con las zonas más cálidas (Baleares (46,9%), Murcia (40,6%), Extremadura (28,3%) y Comunidad Valenciana (23,9%), ver *Tabla 7-5*). Aunque el País Vasco utiliza un 22,0%, su uso no es mayoritario en la Comunidad, dado que el 57,2% utiliza gas y el 11,9% gasoil. Con el fin de mantener el rigor científico, se han calculado también los potenciales ahorros (o penalizaciones) de utilizar cool roofs en todas las provincias.



**Tabla 7-5. Distribución de tipo de calefacción de sobre el total de la población de la Comunidad.**

	Calefacción eléctrica (%)	Calefacción de gas (%)	Calefacción por gasóleo (%)
Andalucía	23,5	3,5	3,3
Aragón	13,2	41,8	32,8
Asturias (Principado de)	17,5	50,4	12,7
Baleares (Illes)	46,9	18,6	4,3
Canarias	1,6	0,5	-
Cantabria	13,1	52,4	10,3
Castilla y León	8,6	39,2	32,3
Castilla-La Mancha	15,3	27,6	38,3
Cataluña	15,4	48,3	9,6
Comunitat Valenciana	23,9	15,3	2,7
Extremadura	28,3	23,7	7,7
Galicia	14,8	17,0	24,6
Madrid (Comunidad de)	15,6	66,4	9,4
Murcia (Región de)	40,6	15,6	3,8
Navarra (Comunidad Foral de)	10,2	57,2	28,7
País Vasco	22,0	57,2	11,9
Rioja (La)	7,8	53,2	33,6
Ceuta y Melilla	2,3	-	-
Total Nacional	18,6	32,3	11,7

La *Tabla 7-6* presenta los ahorros económicos anuales de edificios con calefacción eléctrica para las provincias españolas. Como puede observarse, tan sólo Baleares, Murcia, Extremadura y Andalucía presentan ahorros en la instalación de cool roofs.

Cuando se utiliza la calefacción eléctrica, la lista de las provincias del norte con una penalización neta en energía crece incluyendo casi todas las ciudades de zonas climáticas C1 (Bilbao, Coruña, Oviedo, Santander, San Sebastián, Pontevedra), C2 (Orense), D1 (Lugo, Palencia, Pamplona, Vitoria), D2 (Cuenca, Huesca, Logroño, Salamanca, Segovia, Teruel, Valladolid, Zamora), D3 (Albacete, Guadalajara, Lleida, Madrid, Zaragoza) y E1 (Ávila, Burgos,

León, Soria). Todas estas provincias tienen una importante penalización en la calefacción, lo cual significa un impacto negativo en el balance energético final. Este resultado negativo va desde -0.012 €/m<sup>2</sup> para un edificio nuevo con un tejado de color medio en Albacete hasta -1.30 €/m<sup>2</sup> para un edificio antiguo con un tejado oscuro en Orense. Es importante señalar que la mayoría de las ciudades en estas regiones frías utilizan actualmente calefacción de gas y/o gasoil, ver *Tabla 7-5*, (INE, 2009)

**Tabla 7-6. Ahorros económicos anuales para provincias Españolas en €/m<sup>2</sup>, asumiendo calefacción eléctrica a un coste de 0,20 €/kWh.**

Provincia	Zona	Antiguo (anterior 2007)		Nuevo (2007 y posterior)	
		Oscuro	Medio	Oscuro	Medio
Cádiz	A3-W	1,8	1,2	0,8	0,52
Las Palmas de Gran Canaria	A3-V	2	1,3	0,89	0,57
Santa Cruz de Tenerife	A3-V	2	1,3	0,92	0,59
Córdoba	A3-X	0,97	0,63	0,48	0,31
Almería	A4-W	1,3	0,85	0,59	0,38
Castellón de la Plana	B3-W	0,48	0,31	0,19	0,12
Murcia	B3-W	1,5	0,99	0,6	0,39
Palma de Mallorca	B3-W	1,4	0,9	0,55	0,36
Tarragona	B3-W	0,035	0,017	0,02	0,011
Valencia	B3-W	0,48	0,31	0,19	0,12
Alicante	B4-W	1	0,66	0,4	0,26
Huelva	B4-W	1,6	1	0,63	0,41
Sevilla	B4-W	1,4	0,89	0,56	0,36
Bilbao	C1-W	(0,8)	(0,53)	(0,28)	(0,18)
Coruña	C1-W	(1,1)	(0,7)	(0,37)	(0,24)
Oviedo	C1-X	(1,3)	(0,85)	(0,48)	(0,31)
Pontevedra	C1-W	(0,77)	(0,5)	(0,26)	(0,17)
Santander	C1-W	(0,98)	(0,64)	(0,34)	(0,22)
San Sebastián	C1-W	(0,76)	(0,5)	(0,26)	(0,17)
Barcelona	C2-W	0,23	0,15	0,082	0,053
Girona	C2-X	0,21	0,14	0,082	0,053
Orense	C2-W	(1,3)	(0,88)	(0,46)	(0,3)
Granada	C3-Y	0,56	0,36	0,26	0,17
Jaén	C4-W	0,71	0,46	0,26	0,17
Málaga	C4-W	1,2	0,79	0,43	0,28
Badajoz	C4-X	1	0,66	0,39	0,25
Cáceres	C4-X	0,54	0,34	0,21	0,14
Toledo	C4-X	0,2	0,12	0,088	0,054
Lugo	D1-X	(1,2)	(0,8)	(0,42)	(0,27)
Palencia	D1-Y	(1,)	(0,67)	(0,41)	(0,27)
Pamplona	D1-Y	(0,64)	(0,43)	(0,25)	(0,17)
Vitoria	D1-Y	(0,86)	(0,57)	(0,34)	(0,22)
Cuenca	D2-Z	(0,4)	(0,27)	(0,19)	(0,13)
Huesca	D2-Y	(0,73)	(0,48)	(0,29)	(0,19)
Logroño	D2-X	(1,)	(0,68)	(0,34)	(0,22)
Salamanca	D2-Z	(0,18)	(0,13)	(0,085)	(0,058)
Segovia	D2-Z	(0,27)	(0,18)	(0,13)	(0,086)
Teruel	D2-Z	(0,33)	(0,22)	(0,16)	(0,1)
Valladolid	D2-Y	(0,77)	(0,52)	(0,3)	(0,2)
Zamora	D2-Y	(0,68)	(0,45)	(0,27)	(0,18)
Albacete	D3-Z	(0,039)	(0,031)	(0,015)	(0,012)
Ciudad Real	D3-Y	0,32	0,2	0,14	0,087
Guadalajara	D3-Y	(0,38)	(0,26)	(0,14)	(0,097)
Lleida	D3-Y	(0,093)	(0,067)	(0,032)	(0,023)
Madrid	D3-Y	(0,38)	(0,26)	(0,14)	(0,097)
Zaragoza	D3-X	(0,35)	(0,24)	(0,11)	(0,074)
Ávila	E1-Z	(0,27)	(0,18)	(0,11)	(0,077)
Burgos	E1-Z	(0,78)	(0,51)	(0,34)	(0,22)
León	E1-Z	(0,88)	(0,58)	(0,39)	(0,26)
Soria	E1-Z	(0,64)	(0,43)	(0,28)	(0,19)

## 7.5. Inconsistencias en la definición de las zonas climáticas

Durante la elaboración de este trabajo, se han encontrado algunas inconsistencias en la definición de las zonas climáticas en España, que pueden causar un efecto económico significativo, dado que un aislamiento inadecuado puede resultar en una mayor demanda energética. Estas inconsistencias pueden encontrarse fácilmente en la *Tabla 7-7* donde se han ordenado los datos por zona climática. Por ejemplo, Barcelona y Orense pertenecen a la zona climática C2, pero las diferencias en CDD, HDD e irradiación son muy significativas. Barcelona tiene un CDD de 1300, HDD son 531 y la irradiación media diaria es de 4.31 kWh/m<sup>2</sup>/día. Los valores para Orense son CDD de 2214, HDD de 227 e irradiación de 3.84 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Con estos valores, si se calculan los ahorros de utilizar cool roofs, por ejemplo en tejados oscuros de edificios antiguos con calefacción de gas, se obtienen para Barcelona 1,1 €/m<sup>2</sup>, mientras que en Orense se obtienen unos ahorros mínimos de 0,034 €/m<sup>2</sup>, que son significativamente negativos (-1,3 €/m<sup>2</sup>) si se utiliza calefacción eléctrica cuando Barcelona en este caso sigue teniendo ahorros positivos de 0,23 €/m<sup>2</sup>. Inconsistencias similares pueden observarse por ejemplo entre Murcia y Valencia y Tarragona o entre Albacete, Guadalajara y Ciudad Real. Aunque algunos de estos conflictos ya se han puesto de manifiesto en un estudio hecho para Galicia donde incluso se presenta alguna alternativa (Vázquez Vázquez, Izquierdo Belmonte, & Santos Navarro, 2008), todavía no se han tomado medidas correctoras al respecto.

**Tabla 7-7. Datos de entrada para España ordenados por zona climática. Estos datos se han obtenido del proyecto “NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center POWER”.**

Ciudad	Zona	HDD	CDD	Irradiación kWh/(m <sup>2</sup> · día)
		°C - día anual	°C - día anual	
Cádiz	A3-W	533	874	5,42
Las Palmas de Gran Canaria	A3-V	109	674	5,4
Santa Cruz de Tenerife	A3-V	107	682	5,62
Córdoba	A3-X	1.282	975	4,86
Almería	A4-W	866	833	5,06
Castellón de la Plana	B3-W	1.336	652	4,49
Murcia	B3-W	661	835	5,05
Palma de Mallorca	B3-W	673	762	4,94
Tarragona	B3-W	1.652	577	4,34
Valencia	B3-W	1.336	652	4,49
Alicante	B4-W	934	768	4,43
Huelva	B4-W	850	1.105	4,9
Sevilla	B4-W	1.035	1.086	4,92
Bilbao	C1-W	1.721	286	3,91
Coruña	C1-W	1.498	135	3,89
Oviedo	C1-X	1.885	148	3,37
Pontevedra	C1-W	1.733	288	4,11
Santander	C1-W	1.753	232	3,88
San Sebastián	C1-W	1.944	376	3,85
Barcelona	C2-W	1.300	531	4,31
Girona	C2-X	1.300	531	4,31
Orense	C2-W	2.214	227	3,84
Granada	C3-Y	1.510	872	4,75
Jaén	C4-W	1.510	872	4,75
Málaga	C4-W	848	790	4,79
Badajoz	C4-X	1.222	998	4,75
Cáceres	C4-X	1.584	818	4,72
Toledo	C4-X	1.983	776	4,72
Lugo	D1-X	1.740	126	3,55
Palencia	D1-Y	2.519	288	4,06
Pamplona	D1-Y	2.281	442	3,86
Vitoria	D1-Y	2.393	360	3,8
Cuenca	D2-Z	2.516	523	4,44
Huesca	D2-Y	2.363	395	4,08
Logroño	D2-X	2.393	360	3,8
Salamanca	D2-Z	2.247	601	4,53
Segovia	D2-Z	2.390	598	4,39
Teruel	D2-Z	2.291	521	4,39
Valladolid	D2-Y	2.623	420	4,23
Zamora	D2-Y	2.499	422	4,4
Albacete	D3-Z	1.946	625	4,43
Ciudad Real	D3-Y	1.822	812	4,79
Guadalajara	D3-Y	2.431	580	4,4
Leida	D3-Y	1.896	576	4,45
Madrid	D3-Y	2.431	580	4,4
Zaragoza	D3-X	2.114	555	4,24
Ávila	E1-Z	2.390	598	4,39
Burgos	E1-Z	2.469	316	3,96
León	E1-Z	2.522	257	4,08
Soria	E1-Z	2.649	412	4,25

## **8. COSTES Y RENTABILIDAD DE LOS COOL ROOFS**

En este capítulo se analizan los costes de instalar un cool roof en una vivienda y su rentabilidad económica para cada una de las provincias españolas. Se analizan los beneficios económicos directos de la adaptación de un tejado para el propietario de una vivienda que disponga de aire acondicionado. Por simplificar el estudio y para ser rigurosos, no se han cuantificado beneficios indirectos como la mayor vida útil del tejado (menos deterioro debido al estrés térmico al bajar las temperaturas máximas que soportan), la posible reducción en la potencia contratada de electricidad en las zonas muy calurosas, etc. Tampoco se han incluido beneficios cualitativos como puede ser la mejora del confort térmico o los medioambientales, que pueden ser suficientes por sí solos para justificar la conversión del tejado convencional en un cool roof. Es decir, al ser una inversión relativamente pequeña, como se verá a continuación, la instalación de un cool roof puede justificarse aun no teniendo aire acondicionado en la vivienda.

### **8.1. Costes de los cool roofs**

Aunque existen distintos materiales y procesos de cambiar la reflectividad y emitancia de los tejados con el fin de convertirlos en cool roofs, en este estudio se analiza el caso más común: utilizar pinturas termorreflectantes de color claro (reflectividad garantizada de al menos 60%).

A continuación se establecerán diferentes escenarios para los que se evaluarán los costes de la instalación de un cool roof en viviendas de tejado plano a partir de los procesos explicados con anterioridad. Los tres escenarios diferentes que se abordarán en este apartado son los siguientes:

- a) El tejado de la vivienda se encuentra en mal estado y es necesaria su reparación mediante una impermeabilización y aislamiento completos. Para ello se evaluarán los costes marginales entre la elección de un cool roof (mediante pintura termorreflectante) o de uno normal (mediante pintura convencional).

- b) El tejado de la vivienda se encuentra en buen estado y, sin ser necesaria su reparación, se desea aplicar pintura con el objetivo de convertirlo en cool roof. Para ello se contrata mano de obra especializada que pinta el tejado con pintura termorreflectante.
- c) El tejado de la vivienda se encuentra en buen estado y, sin ser necesaria su reparación, se desea aplicar pintura con el objetivo de convertirlo en cool roof. En este caso no se contrata mano de obra para pintar el tejado con pintura termorreflectante, sino que se asume que lo hace el propietario, amigos, vecinos o voluntarios.

Para la elaboración de los costes de estos escenarios se han utilizado datos para la impermeabilización y el aislamiento de una cubierta plana no transitable de la herramienta *Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros* (CYPE Ingenieros, 2015). Tanto los datos como los procesos fueron validados en entrevistas con la empresa Revetón.

El proceso de impermeabilización de un tejado consta de tres pasos (CYPE Ingenieros, 2015). El primer paso consiste en la aplicación de resinas sintéticas para sellar superficies absorbentes del tejado en seco, el secado se produce en un máximo de 4 horas (Revetón, 2015).

Una vez secada la capa de resinas se procede a colocar una malla textil especializada o de tejido de fibra de vidrio, suficientemente elástica como para absorber las fisuras del soporte sin desgarrar el revestimiento y evitar que aparezca un punto de entrada al agua (Revetón, 2015).

Finalmente, se aplica una capa externa a base de un revestimiento continuo elástico impermeabilizante basado en polímeros acrílicos en emulsión acuosa. Esta pintura puede ser básica, constituyendo un tejado normal, o una pintura especial como es *Revetón "Revsun Tec-Plus"* (Revetón, 2015), que es una pintura especialmente tratada para ser termorreflectante con reflexión solar del 70% y emitancia del 91%.

En el caso de utilizar la pintura termorreflectante, el tejado es denominado cool roof.

Los costes de una reparación completa (impermeabilización y aislamiento) con pintura termorreflectante se recogen en la *Tabla 8-1* y los correspondientes a la

reparación de un tejado convencional se recogen en la *Tabla 8-2*. En estos costes se han tenido en cuenta tanto medios auxiliares (2% sobre el precio total) como indirectos (3% sobre el precio total) y han sido utilizados como punto de partida para los casos presentados anteriormente haciendo diferentes asunciones en función del caso estudiado que se argumentarán a continuación.

**Tabla 8-1. Costes de reparación completa de un tejado usando pintura termorreflectante.**

**Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).**

Concepto	Unidad	Rendimiento	Precio unitario (€)	Precio partida (€)
Imprimación de resinas sintéticas, "REKETÓN", incolora	l	0,200	13,45	2,69
Geotextil no tejido de fibras de vidrio, Texnón 300 "REKETÓN", de 300 g/m <sup>2</sup> de masa superficial.	m <sup>2</sup>	1,100	2,90	3,19
Revestimiento continuo elástico impermeabilizante a base de polímeros acrílicos en emulsión acuosa, Revetón "Revsun Tec-Plus", color blanco (Termorreflectante)	l	2,000	10,45	20,90
Oficial 1ª construcción	h	0,453	17,24	7,81
Ayudante construcción	h	0,453	16,13	7,31
Medios auxiliares	%	2,000	41,90	0,84
Costes indirectos	%	3,000	41,90	1,26
<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>				<b>43,99</b>

**Tabla 8-2. Costes de reparación completa de un tejado usando pintura convencional.**

**Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).**

Concepto	Unidad	Rendimiento	Precio unitario (€)	Precio partida (€)
Imprimación de resinas sintéticas, "REKETÓN", incolora	l	0,200	13,45	2,69
Geotextil no tejido de fibras de vidrio, Texnón 300 "REKETÓN", de 300 g/m <sup>2</sup> de masa superficial.	m <sup>2</sup>	1,100	2,90	3,19
Revestimiento continuo elástico impermeabilizante a base de polímeros acrílicos en emulsión acuosa, Revetón Cubiertas "REKETÓN", color negro.	l	2,000	9,54	19,08
Oficial 1ª construcción	h	0,453	17,24	7,81
Ayudante construcción	h	0,453	16,13	7,31
Medios auxiliares	%	2,000		0,80
Costes indirectos	%	3,000		1,20
<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>				<b>42,08</b>

Por tanto, los escenarios estudiados son tres y para cada uno de ellos los costes son diferentes como se verá a continuación.

### **8.1.1. Coste de reparación de tejado en mal estado**

En el caso en el que el tejado de la vivienda se encuentre en mal estado y haya que repararlo, hay que elegir entre instalar un tejado normal o un cool roof. Ambos procesos se diferencian únicamente en el tipo de pintura que se utiliza para el revestimiento final. Esto conduce a un coste marginal entre ambas partidas muy bajo, de **1.91 €/m<sup>2</sup>**.

### **8.1.2. Coste de adaptación de tejado en buen estado contratando mano de obra**

Para el segundo caso, en el que el tejado de la vivienda se encuentra en buen estado y sólo es necesario aplicar pintura sobre la superficie para convertirlo en un cool roof, los costes se reducen a partir de las siguientes asunciones:

- No son necesarios los procesos de imprimación ni de colocación del geotextil.
- La mano de obra se reduce en un 75% debido a que se reduce el número de procesos, ya que únicamente se pinta.
- El rendimiento de la pintura se reduce hasta 0,5, ya que no es necesario aplicar tantas capas de pintura como en una rehabilitación completa del tejado.

A partir de estas asunciones, los costes para este segundo escenario se resumen en la *Tabla 8-3*, con un resultado final de **9,45 €/m<sup>2</sup>**.



**Tabla 8-3. Costes de convertir tejado en buen estado con mano de obra. Fuente: (CYPE Ingenieros, 2015).**

Concepto	Unidad	Rendimiento	Precio unitario (€)	Precio partida (€)
Revestimiento continuo elástico impermeabilizante a base de polímeros acrílicos en emulsión acuosa, Revetón "Revsun Tec-Plus", color blanco (Termorreflectante)	l	0,500	10,45	5,23
Oficial 1ª construcción	h	0,113	17,24	1,95
Ayudante construcción	h	0,113	16,13	1,83
Medios auxiliares	%	2,000		0,18
Costes indirectos	%	3,000		0,27
<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>				<b>9,45</b>

### 8.1.3. Coste de adaptación de tejado en buen estado sin contratar mano de obra

Por último, si para la aplicación de la pintura en un tejado en buen estado no se contrata mano de obra especializada sino que es el propietario el que realiza el trabajo, el coste total de la *Tabla 8-3* se reduce hasta **5,49 €/m<sup>2</sup>**, ya que se eliminan las partidas referentes a la mano de obra.

## 8.2. Método de cálculo en el estudio de la rentabilidad

Aunque los ahorros económicos de los cool roofs son significativos en la mayoría de las provincias (en torno a 1 €/m<sup>2</sup> anual en media), no siempre son suficientes para justificar el abordar la modificación del tejado desde un punto de vista económico si éste se encuentra en buen estado. Sin embargo, tanto en la construcción de un nuevo tejado como en la reparación de uno que esté dañado, el coste marginal de utilizar una pintura reflectiva frente a una convencional es absolutamente despreciable. En este caso, la rentabilidad del cool roof frente a una superficie convencional oscura es evidente, tal y como se verá en las próximas páginas.

En este apartado se realiza un estudio de rentabilidad simplificado a modo de ejemplo para presentar la metodología seguida, desde el punto de vista de un propietario de una vivienda que tiene que, o bien, reparar su tejado, o bien,

reacondicionarlo aplicando una capa de pintura, con el fin de proporcionar la información necesaria sobre los costes y ahorros de un cool roof para poder tomar una decisión informada sobre la viabilidad económica de su instalación. Es importante resaltar una vez más que no sólo es importante tener en cuenta los posibles beneficios económicos, porque la mejora del confort térmico dentro de la vivienda es un beneficio cualitativo muy importante, sobre todo teniendo en cuenta la magnitud de los costes de los que se está hablando, donde para un tejado de 100 m<sup>2</sup> iría desde 191 € hasta 945 €.

### **8.2.1. Escenarios propuestos**

Para tener una estimación de la rentabilidad de la inversión de un cool roof, se va a emplear los tres escenarios diferentes presentados en el apartado anterior 8.1, considerando que los precios de la energía se mantienen constantes y solo incrementándose con la evolución del índice de precios de consumo (IPC).

Las situaciones de estudio serán, por tanto, combinaciones de los tres escenarios para tejados de colores oscuros y medios, tanto para edificios antiguos (NBE-79, (Ministerio de Fomento, 1979)), como para edificios modernos (CTE, (Ministerio de Fomento, 2006)). En consecuencia, se han realizado 12 estudios diferentes.

### **8.2.2. Variables económicas**

El estudio de la rentabilidad se ha elaborado a partir del método de flujos de caja descontados o cash-flows descontados, que actualiza el valor de los flujos de caja en cada momento. Estos flujos de caja se calculan en este caso a partir de los costes derivados de una inversión inicial (material, mano de obra, medios auxiliares y costes indirectos) y unos beneficios recurrentes, debidos tanto a un ahorro en el coste energético del aire acondicionado como a una penalización energética en el uso de calefacción. Los flujos de caja pueden definirse como *neto anual* si únicamente se contempla la diferencia entre costes y beneficios, *acumulado* teniendo en cuenta esta diferencia en el tiempo, y *descontado anual* y *descontado acumulado* teniendo en cuenta la tasa de descuento.

Para evaluar la rentabilidad de los distintos escenarios se ha definido un periodo de estudio de 10 años y se han usado unas variables económicas constantes y comunes a todos los escenarios y que se detallan en la *Tabla 8-4*. Todos los escenarios tienen un mantenimiento de en torno a 1 €/m<sup>2</sup> cada 10 años. Sin embargo, se han despreciado en el cálculo porque quedan fuera del periodo de estudio (ocurrirían en el año 11) y se ha asumido una reflectividad de la pintura del 60% (dato conservador empleado en todo el modelo) mientras que los datos de la pintura *Revetón "Revsun Tec-Plus"* aseguran una reflectividad del 70%, con lo que la estimación es bastante conservadora.

No se han contemplado subvenciones ni costes de financiación en el cálculo aunque el modelo está preparado para ello.

Los valores de IPC y tasa de descuento utilizados son los indicados por el IDAE como valores de referencia para estudios de rentabilidad de proyectos. El último dato disponible es de 2011 (IDAE, 2011b). El resto de variables son las mismas que se utilizan en el modelo descrito en el apartado *4.1 Datos de entrada*.

**Tabla 8-4. Variables económicas comunes a todos los escenarios propuestos.**

Tipo variable	Variable	Valor
Macroeconómicas	IPC	1,90%
	Tasa de descuento	4,05%
Físicas del tejado	Superficie	150 m2
Rendimiento energético	COP refrigeración	3
	EER calefacción	0,7
Coste de la energía	Coste refrigeración: electricidad	0,20 €/kWh
	Coste calefacción: gas	0,047 €/kWh

Una vez descritos los flujos de caja, se propone utilizar las siguientes medidas de la rentabilidad de la inversión:

- **VAN (Valor Actual Neto):** Es el valor actual de todos los flujos de caja, descontados a una tasa que es el coste de oportunidad. Un valor elevado y positivo determinará una alta rentabilidad en la operación.
- **TIR (Tasa Interna de Rentabilidad):** Este indicador obtiene el tipo de descuento que iguala los valores actuales de la inversión con los

recursos netos generados por la iniciativa. Al igual, que el VAN, valores altos y positivos determinarán alta rentabilidad.

- **Periodo de Payback:** Es el número de años necesarios para recuperar la inversión inicial en la operación.
- **Periodo de Payback Descontado:** Es el número de años necesarios para recuperar la inversión inicial teniendo en cuenta la tasa de descuento.

Estas variables serán los indicadores utilizados en el estudio de la rentabilidad de instalar cool roofs frente a tejados convencionales en función del estado de conservación del tejado de los edificios y de las provincias en las que se encuentren.

### **8.2.3. Caso de ejemplo: Sevilla**

Para ilustrar la metodología seguida en este estudio, se utilizará un caso a modo de ejemplo. Dicho ejemplo consiste en una vivienda de edificación antigua con un tejado oscuro situada en Sevilla y con una superficie de tejado de 150 m<sup>2</sup>. Para esta ciudad, el ahorro de energía por refrigeración es de 38 kWh/m<sup>2</sup> y la penalización de energía por calefacción es de 5.6 kWh/m<sup>2</sup> (ver *Tabla 7-2*). El resto de variables empleadas en los cálculos son las recogidas en la *Tabla 8-4*. A continuación se estudiará la viabilidad de un cool roof para los tres escenarios ya propuestos:

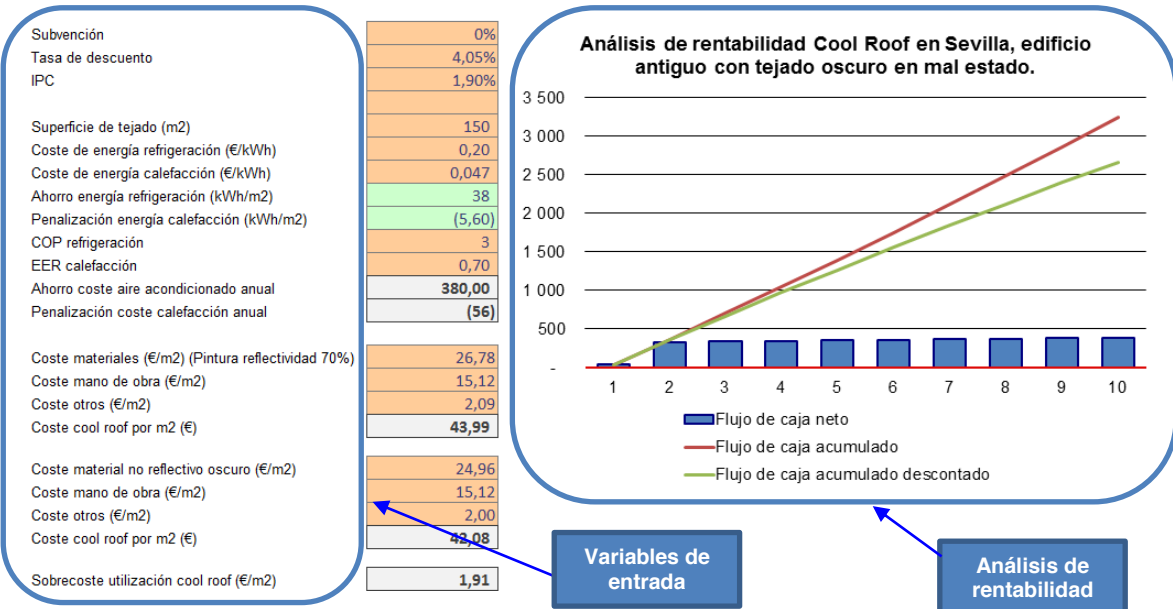
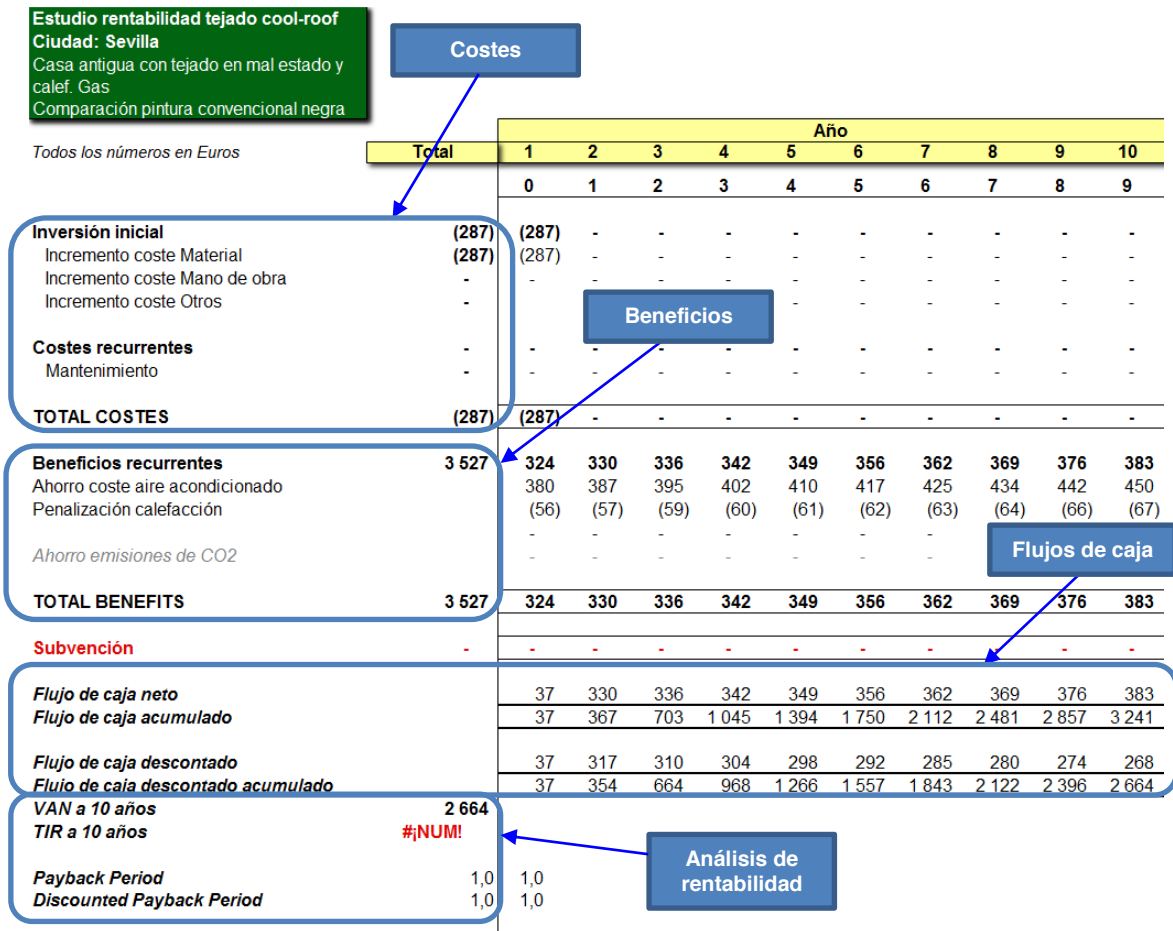
- Rentabilidad de la reparación de tejado en mal estado.
- Rentabilidad de la adaptación de tejado en buen estado contratando mano de obra.
- Rentabilidad de la adaptación de tejado en buen estado sin contratar mano de obra.

#### **8.2.3.1. Rentabilidad de la reparación de tejado en mal estado**

En la *Ilustración 8-1* se estudia la rentabilidad para el caso en el cual el tejado se encuentra en mal estado. En este escenario, la reparación del tejado es necesaria, por lo que el coste marginal entre impermeabilizar y aislar el tejado pintándolo con una pintura convencional de calidad o utilizar una pintura

termorreflectante para convertir dicho tejado en un cool roof es muy bajo, 1,91 €/m<sup>2</sup> como puede apreciarse en la ilustración.

Como se observa, tanto el VAN positivo y elevado como la TIR tendiendo a infinito determinan que la rentabilidad de escoger un cool roof frente a uno convencional es muy alta, siendo una operación altamente recomendable para el caso de ejemplo.



**Ilustración 8-1. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en mal estado.**

Los *paybacks* obtenidos son de 1 año, lo que significa que la inversión se rentabiliza ya en ese primer año. Esto es debido a que los beneficios energéticos (324 €) provenientes del ahorro en aire acondicionado menos la

penalización por calefacción por instalar un cool roof, superan la inversión inicial necesaria de 287 € debido al coste marginal del cool roof frente a un tejado convencional multiplicado por la superficie de dicho tejado (150 m<sup>2</sup>).

Como se ha dicho, esta inversión inicial se ve rentabilizada ya el primer año por lo que determina que la operación no sólo es rentable sino altamente recomendable.

### **8.2.3.2. Rentabilidad de la adaptación de tejado en buen estado contratando mano de obra**

La *Ilustración 8-2* recoge el estudio para el caso de ejemplo con un tejado en buen estado al que únicamente se le aplica pintura termorreflectante para convertirlo en cool roof y para ello se contrata mano de obra especializada, con un coste total de 9,45 €/m<sup>2</sup>.

En este escenario, la inversión a realizar (1418 €) es mayor al primer escenario debido a que, en este caso, la reparación del tejado no es necesaria sino una inversión. Esto repercute en un VAN y una TIR inferiores respecto del escenario anterior en el que el tejado está en mal estado, y en un *payback* de 4,5 años para el descontado. Sin embargo, la operación sigue siendo rentable para el caso de ejemplo.

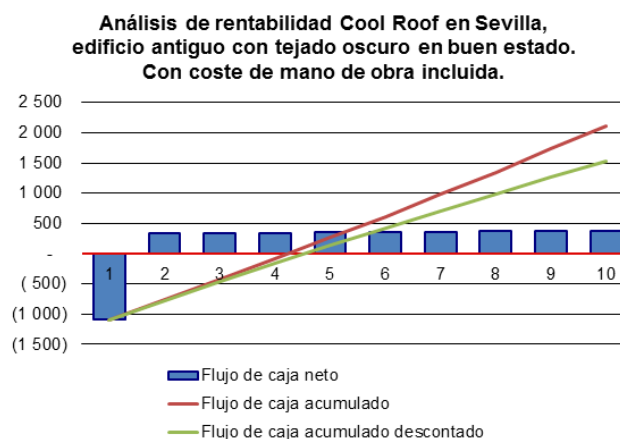
Es decir, que se realiza una inversión inicial de 1418 € que se recupera en cuatro años y medio. La inversión devolvería a 10 años 2109 €, que a día de hoy suponen un VAN de 1533 €, con lo que la inversión tendría una tasa interna de retorno del 28%.

**Estudio rentabilidad tejado cool-roof****Ciudad: Sevilla**Casa antigua con tejado oscuro en buen estado y calef. Gas  
Incluye coste mano de obra

Todos los números en Euros

	Total	Año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>Inversión inicial</b>	<b>(1 418)</b>	<b>(1 418)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Material	(784)	(784)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mano de obra	(567)	(567)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Otros	(68)	(68)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Costes recurrentes</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mantenimiento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL COSTES</b>	<b>(1 418)</b>	<b>(1 418)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Beneficios recurrentes</b>	<b>3 527</b>	<b>324</b>	<b>330</b>	<b>336</b>	<b>342</b>	<b>349</b>	<b>356</b>	<b>362</b>	<b>369</b>	<b>376</b>	<b>383</b>	<b>383</b>	<b>383</b>
Ahorro coste aire acondicionado		380	387	395	402	410	417	425	434	442	450	450	450
Penalización calefacción		(56)	(57)	(59)	(60)	(61)	(62)	(63)	(64)	(66)	(67)	(67)	(67)
Ahorro emisiones de CO2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL BENEFITS</b>	<b>3 527</b>	<b>324</b>	<b>330</b>	<b>336</b>	<b>342</b>	<b>349</b>	<b>356</b>	<b>362</b>	<b>369</b>	<b>376</b>	<b>383</b>	<b>383</b>	<b>383</b>
<b>Subvención</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Flujo de caja neto</b>		(1 095)	330	336	342	349	356	362	369	376	383	383	383
<b>Flujo de caja acumulado</b>		(1 095)	(765)	(429)	(86)	263	618	980	1 350	1 726	2 109	2 492	2 875
<b>Flujo de caja descontado</b>		(1 095)	317	310	304	298	292	285	280	274	268	262	256
<b>Flujo de caja descontado acumulado</b>		(1 095)	(778)	(467)	(163)	134	426	711	991	1 265	1 533	1 807	2 081
<b>VAN a 10 años</b>	<b>1 533</b>												
<b>TIR a 10 años</b>	<b>28,22%</b>												
<b>Payback Period</b>	4,2					4,2							
<b>Discounted Payback Period</b>	4,5					4,5							

Subvención	0%
Tasa de descuento	4,05%
IPC	1,90%
Superficie de tejado (m2)	150
Coste de energía refrigeración (€/kWh)	0,20
Coste de energía calefacción (€/kWh)	0,047
Ahorro energía refrigeración (kWh/m2)	38
Penalización energía calefacción (kWh/m2)	(5,60)
COP refrigeración	3
EER calefacción	0,70
Ahorro coste aire acondicionado anual	380,00
Penalización coste calefacción anual	(56)
Coste materiales (€/m2)	5,23
Coste mano de obra (€/m2)	3,78
Coste otros (€/m2)	0,45
Coste cool roof por m2 (€)	9,45



**Ilustración 8-2. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en buen estado contratando mano de obra.**

### 8.2.3.3. Rentabilidad de la adaptación de tejado en buen estado sin contratar mano de obra

En la *Ilustración 8-3* se recoge el estudio para el último escenario de los propuestos, en el cual el tejado se encuentra en buen estado y únicamente se le aplica pintura termorreflectante en el tejado para convertirlo en un cool roof.

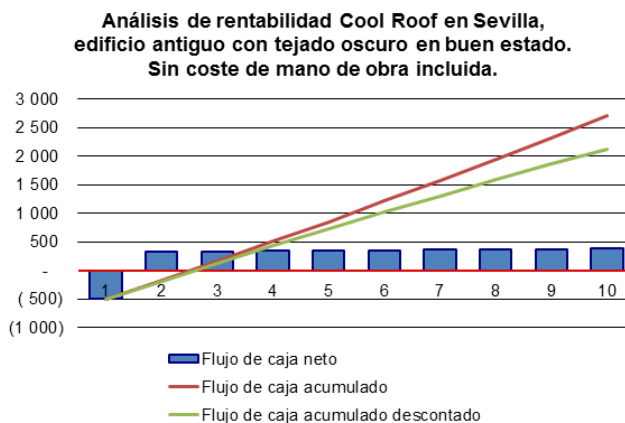


**Estudio rentabilidad tejado cool-roof**  
**Ciudad: Sevilla**  
 Casa antigua con tejado oscuro en buen estado y calef. Gas  
 Sin mano de obra (hágalo usted mismo)

Todos los números en Euros

	Total	Año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>Inversión inicial</b>	<b>(823)</b>	<b>(823)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Material	<b>(784)</b>	<b>(784)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mano de obra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Otros	<b>(39)</b>	<b>(39)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Costes recurrentes</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mantenimiento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL COSTES</b>	<b>(823)</b>	<b>(823)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Beneficios recurrentes</b>	<b>3 527</b>	<b>324</b>	<b>330</b>	<b>336</b>	<b>342</b>	<b>349</b>	<b>356</b>	<b>362</b>	<b>369</b>	<b>376</b>	<b>383</b>	<b>383</b>	<b>383</b>
Ahorro coste aire acondicionado		380	387	395	402	410	417	425	434	442	450	450	450
Penalización calefacción		(56)	(57)	(59)	(60)	(61)	(62)	(63)	(64)	(66)	(67)	(67)	(67)
Ahorro emisiones de CO2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL BENEFITS</b>	<b>3 527</b>	<b>324</b>	<b>330</b>	<b>336</b>	<b>342</b>	<b>349</b>	<b>356</b>	<b>362</b>	<b>369</b>	<b>376</b>	<b>383</b>	<b>383</b>	<b>383</b>
<b>Subvención</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Flujo de caja neto</b>		(499)	330	336	342	349	356	362	369	376	383	383	383
<b>Flujo de caja acumulado</b>		(499)	(170)	166	509	858	1 213	1 576	1 945	2 321	2 704	2 704	2 704
<b>Flujo de caja descontado</b>		(499)	317	310	304	298	292	285	280	274	268	268	268
<b>Flujo de caja descontado acumulado</b>		(499)	(182)	128	432	730	1 021	1 307	1 586	1 860	2 128	2 128	2 128
<b>VAN a 10 años</b>	<b>2 128</b>												
<b>TIR a 10 años</b>	<b>67,17%</b>												
<b>Payback Period</b>	2,5			2,5									
<b>Discounted Payback Period</b>	2,6			2,6									

Subvención	0%
Tasa de descuento	4,05%
IPC	1,90%
Superficie de tejado (m2)	150
Coste de energía refrigeración (€/kWh)	0,20
Coste de energía calefacción (€/kWh)	0,047
Ahorro energía refrigeración (kWh/m2)	38
Penalización energía calefacción (kWh/m2)	(5,60)
COP refrigeración	3
EER calefacción	0,70
Ahorro coste aire acondicionado anual	380,00
Penalización coste calefacción anual	(56)
Coste materiales (€/m2)	5,23
Coste mano de obra (€/m2)	0,00
Coste otros (€/m2)	0,26
Coste cool roof por m2 (€)	5,49



**Ilustración 8-3. Estudio de rentabilidad de cool roof para un edificio antiguo con tejado oscuro en buen estado realizando el trabajo uno mismo.**

En este caso no se contrata mano de obra especializada, sino que uno mismo, un amigo, vecino o voluntario realiza el trabajo en la vivienda. De esta forma, el coste del cool roof se reduce hasta 5,49 €/m<sup>2</sup> frente a los 9,45 €/m<sup>2</sup> del escenario anterior.

Lógicamente, la inversión inicial es menor (823 €) por lo que se mejora sensiblemente la rentabilidad con un VAN que sube a 2128 € y una TIR del 67%. El *payback* en este caso es de 2,6 años.

Por tanto, y a modo de ejemplo, convertir un tejado oscuro de un edificio antiguo en Sevilla con una superficie de 150 m<sup>2</sup> en un cool roof es rentable en cualquier situación, independientemente de que esté en mal estado o, estando en buen estado, se contrate a una empresa o realice uno mismo el trabajo.

### 8.3. Resultados del estudio de la rentabilidad de cool roofs para España

La metodología presentada en el apartado anterior 8.2 para el caso de Sevilla ha sido aplicada a todas las provincias españolas con los tres escenarios presentados anteriormente tanto para tejados de edificios antiguos como para tejados de edificios modernos, pintados de colores oscuros o medios. Por tanto, se han realizado 12 estudios diferentes para todas las regiones españolas, simulando el modelo en la herramienta *Mathematica*.

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de estos estudios, mostrando un análisis geográfico diferencial de rentabilidad en mapas para todas las provincias de España y detallado los resultados en tablas. Es importante tener en cuenta que las ciudades más pobladas de España se encuentran en zonas cálidas excepto Madrid, Zaragoza y Bilbao (ver *Tabla 8-5*) (INE, 2014).

**Tabla 8-5. Principales capitales de provincia. Fuente: (INE, 2014).**

Ciudad	Población
Madrid	3 165 235
Barcelona	1 602 386
Valencia	786 424
Sevilla	696 676
Zaragoza	666 058
Málaga	566 913
Murcia	439 712
Palma de Mallorca	399 093
Las Palmas de G.C.	382 283
Bilbao	346 574

Todos los mapas *cloropleth* representan el VAN por provincias y están normalizados para ser comparables entre todos los estudios. La TIR y el *payback* son magnitudes altamente relacionadas con el VAN para este estudio por lo que la comparación utilizando estas otras variables sería análoga a la realizada con el VAN.

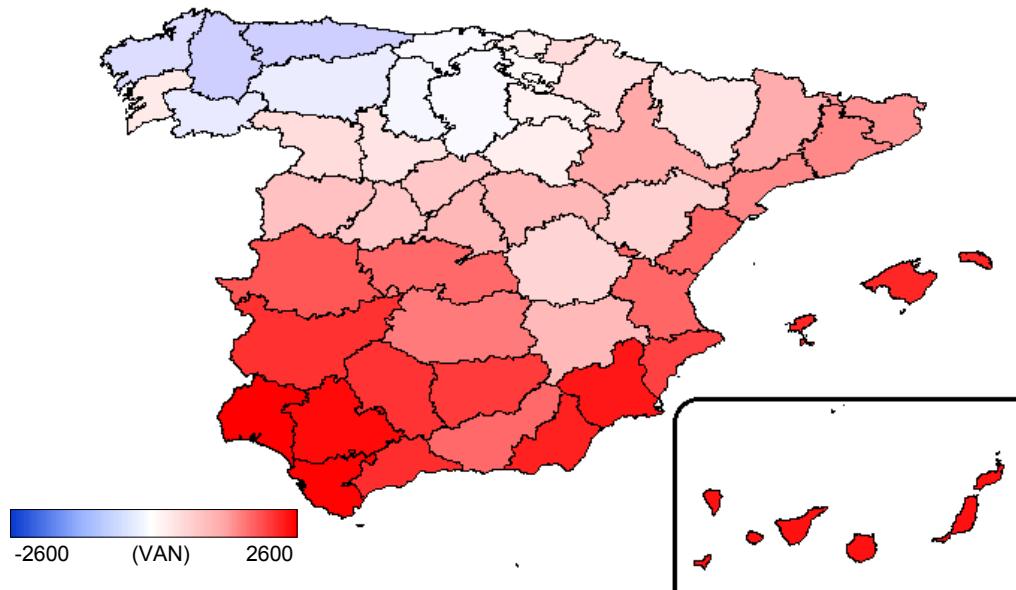
Las provincias de los mapas se presentan en tonos azules, blancos y rojos correspondiendo a valores negativos, intermedios y positivos, respectivamente. Es decir, una provincia representada por un rojo muy intenso indicará un VAN muy elevado y, por tanto, una alta rentabilidad. Por el contrario, los tonos azules reflejan que convertir el tejado en un cool roof no sería rentable en esa zona y en ese escenario en los 10 años analizados.

Los siguientes apartados reflejan las combinaciones de escenarios estudiados: tejados de colores oscuros de edificios antiguos, tejados de colores medios de edificios antiguos, tejados oscuros de edificios modernos y tejados medios de edificios antiguos.

### **8.3.1. Rentabilidad para tejados oscuros de edificios antiguos**

#### **8.3.1.1. Tejado oscuro de edificios antiguos en mal estado**

La *Ilustración 8-4* y la *Tabla 8-6* recogen los resultados para el estudio de tejados en mal estado. Como puede observarse en el mapa, la instalación de un cool roof es una operación altamente rentable para toda España, incluyendo las principales capitales de provincia y exceptuando el noroeste, especialmente las provincias gallegas de Lugo y Orense, y Oviedo, donde el clima atlántico provoca que no se ahorre energéticamente nada al instalar un cool roof y, en consecuencia, tampoco existe un ahorro económico.



**Ilustración 8-4. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.**

Tampoco es rentable en las provincias con los inviernos más fríos como Burgos, Palencia y Santander. Aunque en estas provincias sí se obtienen ahorros en la demanda de energía al instalar cool roofs (entre 2.5% en Palencia y 3.4% en Burgos), éstos no son suficientes para compensar el coste de la inversión en el periodo de estudio de 10 años.

Por el contrario, la operación es altamente recomendable para las principales ciudades de España, con una TIR superior al 50% en todas ellas, periodos de retorno inferiores a 3 años, salvo Bilbao que con una TIR del 17% recuperaría la inversión en 6 años.

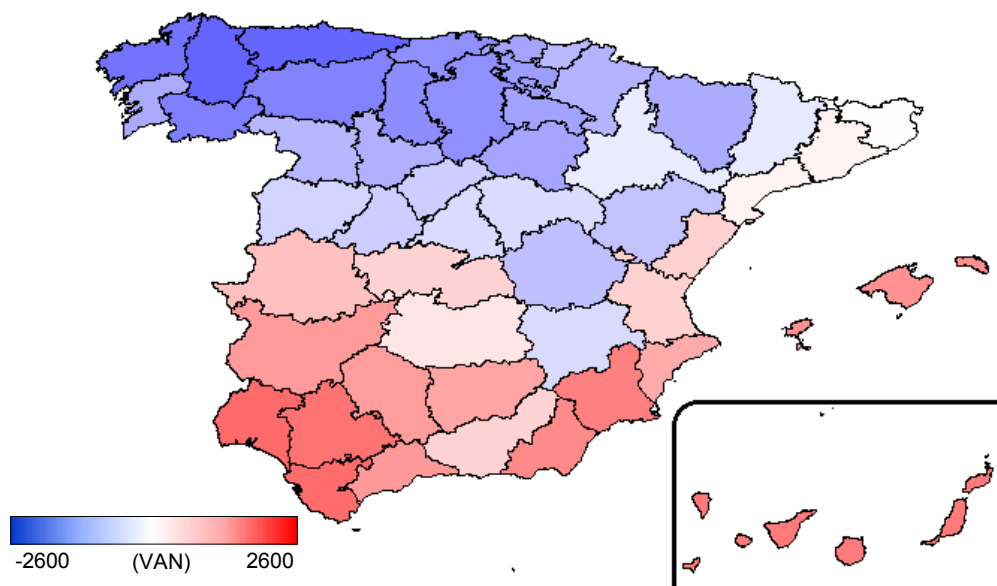
**Tabla 8-6. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	17,00	(6,00)	15,00	0,75	742	67,2	2,5	2,6
Alicante	B4-W	31,00	(5,10)	26,00	1,70	2030	802,0	1,2	1,0
Almería	A4-W	34,00	(4,80)	29,00	2,00	2380	∞	1,1	0,9
Ávila	E1-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	602	53,0	2,9	3,0
Badajoz	C4-X	33,00	(6,00)	25,00	1,80	2200	2020,0	1,2	0,9
Barcelona	C2-W	24,00	(6,80)	18,00	1,10	1260	150,0	1,7	1,6
Bilbao	C1-W	14,00	(8,50)	5,60	0,33	165	17,1	5,5	6,2
Burgos	E1-Z	9,50	(7,00)	3,40	0,16	(67)	(1,9)	11,0	13,0
Cáceres	C4-X	30,00	(7,40)	20,00	1,50	1800	406,0	1,3	1,2
Cádiz	A3-W	36,00	(3,10)	36,00	2,20	2700	∞	1,0	0,7
Castellón	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	1630	281,0	1,4	1,3
Ciudad Real	D3-Y	26,00	(6,90)	18,00	1,20	1410	191,0	1,6	1,5
Córdoba	A3-X	33,00	(6,20)	24,00	1,80	2180	1690,0	1,2	0,9
Coruña	C1-W	6,90	(7,60)	(1,20)	(0,06)	(362)	-∞	(31,3)	(38,7)
Cuenca	D2-Z	15,00	(7,10)	9,90	0,54	458	40,2	3,4	3,7
Girona	C2-X	22,00	(6,30)	18,00	1,10	1150	126,0	1,9	1,8
Granada	C3-Y	27,00	(6,00)	22,00	1,40	1600	267,0	1,5	1,3
Guadalajara	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	753	68,4	2,5	2,6
Huelva	B4-W	38,00	(4,70)	30,00	2,20	2720	∞	1,0	0,7
Huesca	D2-Y	14,00	(8,40)	6,50	0,39	246	23,2	4,7	5,2
Jaén	C4-W	34,00	(7,70)	21,00	1,70	2090	1020,0	1,2	1,0
Las Palmas de G.C.	A3-V	32,00	(0,66)	48,00	2,10	2540	∞	1,0	0,8
León	E1-Z	8,20	(7,10)	1,40	0,07	(198)	(16,8)	27,0	32,4
Lleida	D3-Y	20,00	(7,20)	14,00	0,86	887	84,5	2,2	2,2
Logroño	D2-X	15,00	(10,00)	4,60	0,31	144	15,5	5,7	6,5
Lugo	D1-X	5,50	(8,00)	(3,70)	(0,17)	(521)	-∞	(10,0)	(12,6)
Madrid	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	753	68,4	2,5	2,6
Málaga	C4-W	32,00	(4,70)	29,00	1,80	2230	2710,0	1,2	0,9
Murcia	B3-W	34,00	(3,70)	33,00	2,00	2480	∞	1,1	0,8
Orense	C2-W	11,00	(10,00)	0,53	0,03	(240)	(24,9)	51,4	62,1
Oviedo	C1-X	6,10	(8,50)	(3,30)	(0,17)	(513)	-∞	(10,3)	(13,0)
Palencia	D1-Y	11,00	(8,80)	2,50	0,14	(91)	(4,1)	12,3	14,6
P. Mallorca	B3-W	32,00	(3,80)	32,00	1,90	2310	12500,0	1,1	0,9
Pamplona	D1-Y	15,00	(8,20)	7,50	0,45	324	29,3	4,1	4,5
Pontevedra	C1-W	14,00	(8,60)	6,20	0,37	222	21,5	4,9	5,5
Salamanca	D2-Z	17,00	(6,60)	13,00	0,70	665	59,2	2,7	2,8
San Sebastián	C1-W	17,00	(9,40)	7,30	0,49	385	34,2	3,7	4,1
S.C. de Tenerife	A3-V	33,00	(0,65)	48,00	2,10	2620	∞	1,0	0,8
Santander	C1-W	11,00	(8,70)	2,90	0,17	(59)	(1,1)	10,6	12,5
Segovia	D2-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	602	53,0	2,9	3,0
Sevilla	B4-W	38,00	(5,60)	28,00	2,10	2620	∞	1,0	0,8
Soria	E1-Z	12,00	(7,40)	6,40	0,34	172	17,6	5,4	6,1
Tarragona	B3-W	25,00	(8,30)	16,00	1,10	1260	150,0	1,7	1,6
Teruel	D2-Z	15,00	(6,70)	11,00	0,56	484	42,4	3,3	3,5
Toledo	C4-X	30,00	(8,80)	17,00	1,40	1600	265,0	1,5	1,3
Valencia	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	1630	281,0	1,4	1,3
Valladolid	D2-Y	15,00	(9,00)	6,60	0,42	292	26,9	4,3	4,8
Vitoria	D1-Y	13,00	(8,50)	4,60	0,27	77	10,3	6,7	7,7
Zamora	D2-Y	16,00	(8,70)	7,50	0,48	367	32,7	3,8	4,2
Zaragoza	D3-X	23,00	(9,30)	12,00	0,88	919	88,8	2,2	2,2

### 8.3.1.2. Tejado oscuro de edificios antiguos en buen estado contratando mano de obra

La *Ilustración 8-5* y la *Tabla 8-7* presentan los resultados para tejados en buen estado que únicamente se pintan, contratando mano de obra especializada. En este escenario, la operación de convertir el tejado en cool roof sigue siendo rentable para la mitad sur de España, especialmente en los climas más cálidos como en Extremadura o Andalucía, la zona mediterránea y las provincias insulares; y deja de ser rentable para la zona norte de España.

Para las grandes poblaciones de España, no merece la pena contratar mano de obra para realizar la conversión ni en Bilbao ni en Madrid. El resto de grandes ciudades se beneficiarían en este escenario. Las provincias más cálidas siguen teniendo una rentabilidad atractiva. En este caso Cádiz, Huelva, Sevilla, Murcia y las Islas recuperarían la inversión en menos de 5 años con una TIR superior al 25% y Valencia y Barcelona estarían en rangos aceptables con una TIR del 12% y 6% respectivamente.



**Ilustración 8-5. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

**Tabla 8-7. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

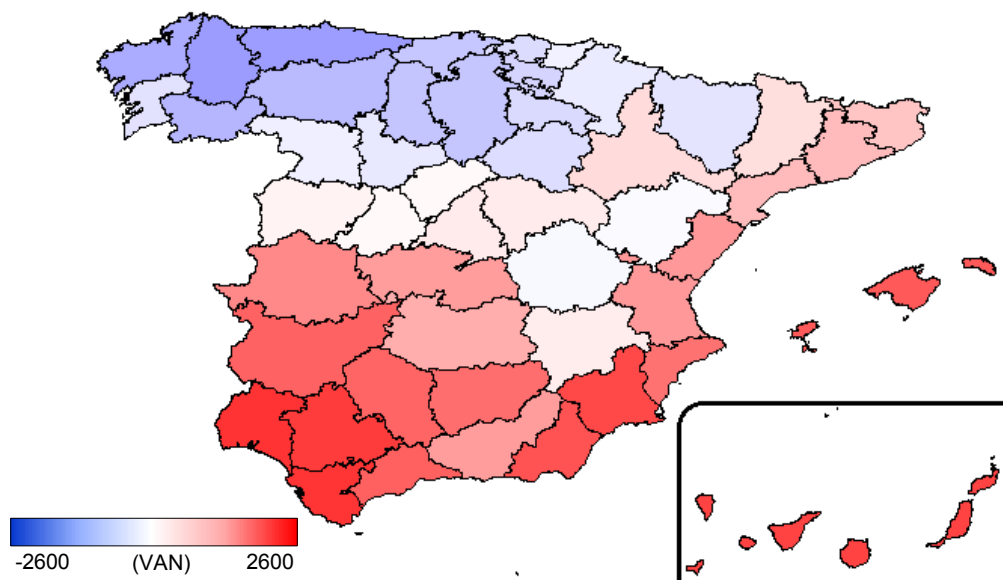
Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	17,00	(6,00)	15,00	0,75	(390)	(3,0)	11,6	13,7
Alicante	B4-W	31,00	(5,10)	26,00	1,70	901	18,4	5,3	6,0
Almería	A4-W	34,00	(4,80)	29,00	2,00	1250	23,8	4,6	5,1
Ávila	E1-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	(529)	(5,7)	13,4	15,9
Badajoz	C4-X	33,00	(6,00)	25,00	1,80	1070	21,0	4,9	5,5
Barcelona	C2-W	24,00	(6,80)	18,00	1,10	129	6,2	7,8	9,0
Bilbao	C1-W	14,00	(8,50)	5,60	0,33	(966)	(16,5)	26,2	31,5
Burgos	E1-Z	9,50	(7,00)	3,40	0,16	(1200)	(25,4)	53,8	65,1
Cáceres	C4-X	30,00	(7,40)	20,00	1,50	669	14,8	5,8	6,6
Cádiz	A3-W	36,00	(3,10)	36,00	2,20	1570	28,8	4,1	4,6
Castellón	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	496	12,1	6,4	7,3
Ciudad Real	D3-Y	26,00	(6,90)	18,00	1,20	282	8,7	7,1	8,2
Córdoba	A3-X	33,00	(6,20)	24,00	1,80	1050	20,6	5,0	5,6
Coruña	C1-W	6,90	(7,60)	(1,20)	(0,06)	(1490)	-∞	(156,0)	(190,0)
Cuenca	D2-Z	15,00	(7,10)	9,90	0,54	(673)	(8,8)	16,0	19,0
Girona	C2-X	22,00	(6,30)	18,00	1,10	19	4,4	8,4	9,7
Granada	C3-Y	27,00	(6,00)	22,00	1,40	470	11,7	6,4	7,4
Guadalajara	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	(379)	(2,7)	11,5	13,6
Huelva	B4-W	38,00	(4,70)	30,00	2,20	1590	29,1	4,1	4,5
Huesca	D2-Y	14,00	(8,40)	6,50	0,39	(886)	(14,1)	22,3	26,7
Jaén	C4-W	34,00	(7,70)	21,00	1,70	958	19,3	5,2	5,8
Las Palmas de G.C.	A3-V	32,00	(0,66)	48,00	2,10	1410	26,3	4,4	4,8
León	E1-Z	8,20	(7,10)	1,40	0,07	(1330)	(34,4)	133,0	161,0
Lleida	D3-Y	20,00	(7,20)	14,00	0,86	(245)	(0,2)	10,2	12,0
Logroño	D2-X	15,00	(10,00)	4,60	0,31	(988)	(17,1)	27,5	33,1
Lugo	D1-X	5,50	(8,00)	(3,70)	(0,17)	(1650)	-∞	(50,1)	(61,6)
Madrid	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	(379)	(2,7)	11,5	13,6
Málaga	C4-W	32,00	(4,70)	29,00	1,80	1100	21,5	4,9	5,5
Murcia	B3-W	34,00	(3,70)	33,00	2,00	1350	25,3	4,5	5,0
Orense	C2-W	11,00	(10,00)	0,53	0,03	(1370)	(39,8)	253,0	308,0
Oviedo	C1-X	6,10	(8,50)	(3,30)	(0,17)	(1640)	-∞	(51,7)	(63,5)
Palencia	D1-Y	11,00	(8,80)	2,50	0,14	(1220)	(26,6)	60,3	73,0
P. Mallorca	B3-W	32,00	(3,80)	32,00	1,90	1170	22,6	4,7	5,3
Pamplona	D1-Y	15,00	(8,20)	7,50	0,45	(808)	(12,1)	19,5	23,3
Pontevedra	C1-W	14,00	(8,60)	6,20	0,37	(909)	(14,8)	23,3	28,0
Salamanca	D2-Z	17,00	(6,60)	13,00	0,70	(466)	(4,5)	12,6	14,8
San Sebastián	C1-W	17,00	(9,40)	7,30	0,49	(746)	(10,5)	17,7	21,1
S.C. de Tenerife	A3-V	33,00	(0,65)	48,00	2,10	1490	27,6	4,2	4,7
Santander	C1-W	11,00	(8,70)	2,90	0,17	(1190)	(25,0)	51,9	62,7
Segovia	D2-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	(529)	(5,7)	13,4	15,9
Sevilla	B4-W	38,00	(5,60)	28,00	2,10	1490	27,5	4,3	4,7
Soria	E1-Z	12,00	(7,40)	6,40	0,34	(959)	(16,2)	25,8	31,0
Tarragona	B3-W	25,00	(8,30)	16,00	1,10	132	6,3	7,8	9,0
Teruel	D2-Z	15,00	(6,70)	11,00	0,56	(648)	(8,3)	15,5	18,4
Toledo	C4-X	30,00	(8,80)	17,00	1,40	466	11,6	6,4	7,4
Valencia	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	496	12,1	6,4	7,3
Valladolid	D2-Y	15,00	(9,00)	6,60	0,42	(839)	(12,9)	20,5	24,5
Vitoria	D1-Y	13,00	(8,50)	4,60	0,27	(1050)	(19,3)	32,5	39,2
Zamora	D2-Y	16,00	(8,70)	7,50	0,48	(765)	(11,0)	18,2	21,7
Zaragoza	D3-X	23,00	(9,30)	12,00	0,88	(212)	0,3	10,0	11,7

### 8.3.1.3. Tejado oscuros de edificios antiguos en buen estado sin contratar mano de obra

Para tejados en buen estado, donde el trabajo de pintar es realizado por uno mismo, vecinos, amigos o voluntarios, la rentabilidad es mayor que si se contrata a una empresa especializada. La rentabilidad sigue siendo muy alta en el sur y Levante de España y media en la zona centro, como puede observarse en la *Ilustración 8-6* y la *Tabla 8-8*. Para las provincias del norte esta operación no es rentable.

Convertir tejados oscuros de edificios antiguos a cool roof sin contratar mano de obra es rentable para todas las grandes ciudades de España, salvo Bilbao. Madrid y Barcelona recuperarían la inversión con una TIR superior al 10% y al 20%, respectivamente, y el resto de capitales de provincias más pobladas, la inversión sería muy rentable con una TIR mayor del 30% para Valencia y de más de 60% para Sevilla.

Estas conclusiones indican que tendrían mucho sentido organizar programas de voluntarios como ya se hace en Nueva York o Chicago (Hoag, 2015).



**Ilustración 8-6. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas, haciéndolo uno mismo.**



**Tabla 8-8. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas, haciéndolo uno mismo.**

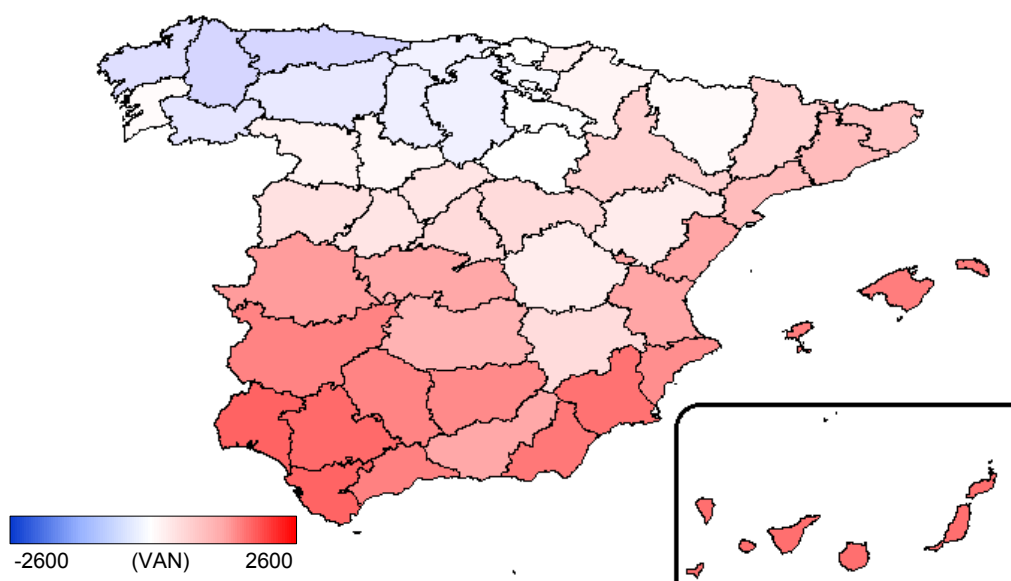
Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	17,00	(6,00)	15,00	0,75	206	9,9	6,8	7,9
Alicante	B4-W	31,00	(5,10)	26,00	1,70	1500	45,6	3,2	3,4
Almería	A4-W	34,00	(4,80)	29,00	2,00	1850	57,0	2,8	2,9
Ávila	E1-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	66	6,0	7,9	9,1
Badajoz	C4-X	33,00	(6,00)	25,00	1,80	1670	51,0	2,9	3,1
Barcelona	C2-W	24,00	(6,80)	18,00	1,10	724	23,8	4,6	5,1
Bilbao	C1-W	14,00	(8,50)	5,60	0,33	(371)	(8,1)	15,3	18,2
Burgos	E1-Z	9,50	(7,00)	3,40	0,16	(604)	(18,8)	31,3	37,7
Cáceres	C4-X	30,00	(7,40)	20,00	1,50	1260	38,7	3,5	3,8
Cádiz	A3-W	36,00	(3,10)	36,00	2,20	2160	68,5	2,5	2,6
Castellón	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	1090	33,8	3,8	4,1
Ciudad Real	D3-Y	26,00	(6,90)	18,00	1,20	877	27,9	4,2	4,7
Córdoba	A3-X	33,00	(6,20)	24,00	1,80	1640	50,2	3,0	3,1
Coruña	C1-W	6,90	(7,60)	(1,20)	(0,06)	(898)	-∞	(90,2)	(111,0)
Cuenca	D2-Z	15,00	(7,10)	9,90	0,54	(78)	1,7	9,4	10,9
Girona	C2-X	22,00	(6,30)	18,00	1,10	614	20,8	5,0	5,6
Granada	C3-Y	27,00	(6,00)	22,00	1,40	1060	33,0	3,8	4,2
Guadalajara	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	217	10,2	6,8	7,8
Huelva	B4-W	38,00	(4,70)	30,00	2,20	2180	69,2	2,5	2,5
Huesca	D2-Y	14,00	(8,40)	6,50	0,39	(291)	(5,2)	13,0	15,4
Jaén	C4-W	34,00	(7,70)	21,00	1,70	1550	47,4	3,1	3,3
Las Palmas de G.C.	A3-V	32,00	(0,66)	48,00	2,10	2010	62,7	2,6	2,7
León	E1-Z	8,20	(7,10)	1,40	0,07	(734)	(29,2)	77,0	93,4
Lleida	D3-Y	20,00	(7,20)	14,00	0,86	351	13,8	6,0	6,9
Logroño	D2-X	15,00	(10,00)	4,60	0,31	(392)	(8,9)	16,1	19,1
Lugo	D1-X	5,50	(8,00)	(3,70)	(0,17)	(1060)	-∞	(29,0)	(35,8)
Madrid	D3-Y	20,00	(8,60)	11,00	0,76	217	10,2	6,8	7,8
Málaga	C4-W	32,00	(4,70)	29,00	1,80	1700	52,0	2,9	3,1
Murcia	B3-W	34,00	(3,70)	33,00	2,00	1940	60,3	2,7	2,8
Orense	C2-W	11,00	(10,00)	0,53	0,03	(776)	(35,3)	147,0	179,0
Oviedo	C1-X	6,10	(8,50)	(3,30)	(0,17)	(1050)	-∞	(29,9)	(37,0)
Palencia	D1-Y	11,00	(8,80)	2,50	0,14	(627)	(20,3)	35,0	42,3
P. Mallorca	B3-W	32,00	(3,80)	32,00	1,90	1770	54,4	2,8	3,0
Pamplona	D1-Y	15,00	(8,20)	7,50	0,45	(212)	(2,5)	11,4	13,4
Pontevedra	C1-W	14,00	(8,60)	6,20	0,37	(314)	(6,0)	13,6	16,1
Salamanca	D2-Z	17,00	(6,60)	13,00	0,70	129	7,7	7,4	8,5
San Sebastián	C1-W	17,00	(9,40)	7,30	0,49	(151)	(0,5)	10,4	12,2
S.C. de Tenerife	A3-V	33,00	(0,65)	48,00	2,10	2090	65,6	2,6	2,6
Santander	C1-W	11,00	(8,70)	2,90	0,17	(595)	(18,4)	30,2	36,3
Segovia	D2-Z	17,00	(6,90)	12,00	0,65	66	6,0	7,9	9,1
Sevilla	B4-W	38,00	(5,60)	28,00	2,10	2080	65,5	2,6	2,6
Soria	E1-Z	12,00	(7,40)	6,40	0,34	(364)	(7,8)	15,1	17,9
Tarragona	B3-W	25,00	(8,30)	16,00	1,10	727	23,8	4,6	5,1
Teruel	D2-Z	15,00	(6,70)	11,00	0,56	(52)	2,5	9,1	10,6
Toledo	C4-X	30,00	(8,80)	17,00	1,40	1060	32,9	3,8	4,2
Valencia	B3-W	28,00	(7,00)	20,00	1,40	1090	33,8	3,8	4,1
Valladolid	D2-Y	15,00	(9,00)	6,60	0,42	(244)	(3,5)	12,0	14,1
Vitoria	D1-Y	13,00	(8,50)	4,60	0,27	(459)	(11,6)	19,0	22,6
Zamora	D2-Y	16,00	(8,70)	7,50	0,48	(169)	(1,1)	10,6	12,5
Zaragoza	D3-X	23,00	(9,30)	12,00	0,88	383	14,7	5,9	6,7

### 8.3.2. Rentabilidad para tejados medios de edificios antiguos

#### 8.3.2.1. Tejado medios de edificios antiguos en mal estado

La *Ilustración 8-7* y la *Tabla 8-9* recogen los resultados para el caso de tejados en mal estado. Este caso es similar al caso análogo estudiado para tejados oscuros, tanto el VAN como la TIR son ligeramente inferiores ya que el ahorro económico por metro cuadrado es menor si el tejado original es de color medio frente a colores oscuros.

La rentabilidad en las principales ciudades sigue siendo aceptable, con una TIR para Madrid del 33% y con Bilbao ya en el límite de la rentabilidad con una TIR del 4%. En definitiva, instalar cool roofs en este caso es rentable para casi toda España, excepto para Lugo, Orense y Oviedo. A las provincias frías para los que tampoco era rentable utilizar cool roofs con tejados oscuros (Burgos, Palencia y Santander), se le añaden para tejados medios, Vitoria y Logroño.



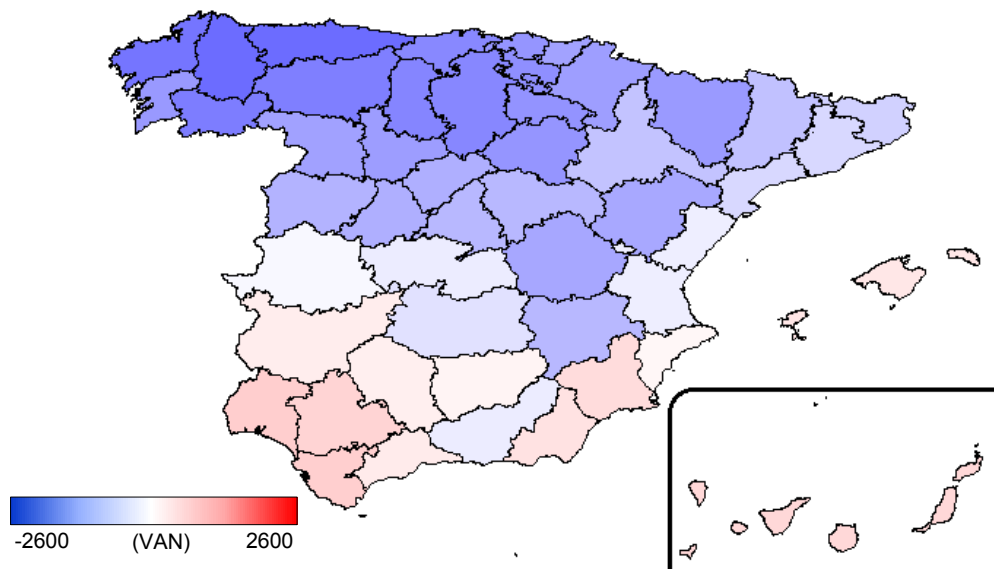
**Ilustración 8-7. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.**

**Tabla 8-9. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en mal estado de edificios antiguos con calefacción de gas.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	11,00	(3,90)	9,90	0,48	374	33,3	3,8	4,2
Alicante	B4-W	20,00	(3,30)	19,00	1,10	1210	139,0	1,8	1,7
Almería	A4-W	22,00	(3,10)	21,00	1,30	1440	200,0	1,6	1,4
Ávila	E1-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	282	26,0	4,4	4,9
Badajoz	C4-X	22,00	(3,90)	18,00	1,20	1320	165,0	1,7	1,6
Barcelona	C2-W	15,00	(4,40)	12,00	0,73	713	64,2	2,6	2,7
Bilbao	C1-W	8,80	(5,60)	3,70	0,21	3	4,3	8,4	9,8
Burgos	E1-Z	6,10	(4,60)	2,10	0,10	(151)	(10,5)	17,7	21,1
Cáceres	C4-X	20,00	(4,80)	14,00	0,99	1060	110,0	2,0	1,9
Cádiz	A3-W	23,00	(2,00)	26,00	1,40	1650	290,0	1,4	1,3
Castellón	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	951	93,2	2,1	2,1
Ciudad Real	D3-Y	17,00	(4,50)	13,00	0,80	809	74,8	2,4	2,4
Córdoba	A3-X	22,00	(4,00)	17,00	1,20	1310	161,0	1,7	1,6
Coruña	C1-W	4,40	(5,00)	(0,79)	(0,04)	(337)	-∞	(46,9)	(57,7)
Cuenca	D2-Z	9,90	(4,70)	6,50	0,35	188	18,9	5,2	5,9
Girona	C2-X	14,00	(4,10)	12,00	0,68	642	56,9	2,8	2,9
Granada	C3-Y	17,00	(3,90)	15,00	0,89	932	90,5	2,2	2,1
Guadalajara	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	379	33,7	3,8	4,1
Huelva	B4-W	24,00	(3,00)	22,00	1,40	1660	297,0	1,4	1,3
Huesca	D2-Y	9,20	(5,50)	4,20	0,25	52	8,3	7,2	8,3
Jaén	C4-W	22,00	(5,00)	15,00	1,10	1250	147,0	1,8	1,7
Las Palmas de G.C.	A3-V	21,00	(0,42)	38,00	1,30	1540	240,0	1,5	1,4
León	E1-Z	5,30	(4,70)	0,82	0,04	(235)	(23,7)	46,5	56,2
Lleida	D3-Y	13,00	(4,70)	9,60	0,55	468	41,1	3,4	3,6
Logroño	D2-X	9,60	(6,60)	3,00	0,20	(15)	2,8	8,9	10,4
Lugo	D1-X	3,50	(5,20)	(2,40)	(0,11)	(441)	-∞	(15,2)	(19,1)
Madrid	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	379	33,7	3,8	4,1
Málaga	C4-W	21,00	(3,00)	21,00	1,20	1340	171,0	1,7	1,5
Murcia	B3-W	22,00	(2,40)	24,00	1,30	1500	223,0	1,5	1,4
Orense	C2-W	7,10	(6,70)	0,28	0,02	(262)	(31,5)	96,9	118,0
Oviedo	C1-X	3,90	(5,50)	(2,20)	(0,11)	(437)	-∞	(15,6)	(19,6)
Palencia	D1-Y	7,10	(5,70)	1,50	0,09	(167)	(12,5)	20,0	24,0
P. Mallorca	B3-W	21,00	(2,40)	23,00	1,20	1390	184,0	1,6	1,5
Pamplona	D1-Y	9,70	(5,30)	4,90	0,28	103	12,3	6,3	7,2
Pontevedra	C1-W	9,20	(5,60)	4,10	0,24	40	7,3	7,5	8,7
Salamanca	D2-Z	11,00	(4,30)	8,50	0,45	323	29,3	4,1	4,5
San Sebastián	C1-W	11,00	(6,10)	4,80	0,31	144	15,5	5,7	6,5
S.C. de Tenerife	A3-V	21,00	(0,41)	38,00	1,40	1600	264,0	1,5	1,3
Santander	C1-W	7,30	(5,60)	1,90	0,11	(142)	(9,5)	16,7	19,8
Segovia	D2-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	282	26,0	4,4	4,9
Sevilla	B4-W	24,00	(3,60)	20,00	1,40	1590	262,0	1,5	1,3
Soria	E1-Z	8,00	(4,80)	4,10	0,21	3	4,3	8,4	9,8
Tarragona	B3-W	16,00	(5,40)	11,00	0,73	714	64,2	2,6	2,7
Teruel	D2-Z	9,80	(4,40)	7,10	0,36	206	20,2	5,0	5,7
Toledo	C4-X	19,00	(5,80)	12,00	0,89	928	90,0	2,2	2,2
Valencia	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	951	93,2	2,1	2,1
Valladolid	D2-Y	10,00	(5,90)	4,30	0,27	80	10,5	6,7	7,7
Vitoria	D1-Y	8,10	(5,50)	2,90	0,17	(57)	(1,0)	10,6	12,4
Zamora	D2-Y	10,00	(5,70)	4,90	0,30	129	14,3	5,9	6,7
Zaragoza	D3-X	15,00	(6,00)	8,00	0,57	488	42,8	3,3	3,5

### 8.3.2.2. Tejado medios de edificios antiguos en buen estado contratando mano de obra

Los resultados obtenidos en el escenario de tejados medios en buen estado contratando mano de obra especializada se muestran en la *Ilustración 8-8* y en la *Tabla 8-10*. Como puede observarse, este escenario es rentable para las provincias andaluzas y las zonas de clima mediterráneo cálido (Alicante, Murcia y Almería) excepto Castellón junto con las zonas insulares. Para el centro y el norte no es rentable ni para las grandes ciudades como Madrid, Barcelona, Bilbao o Valencia.



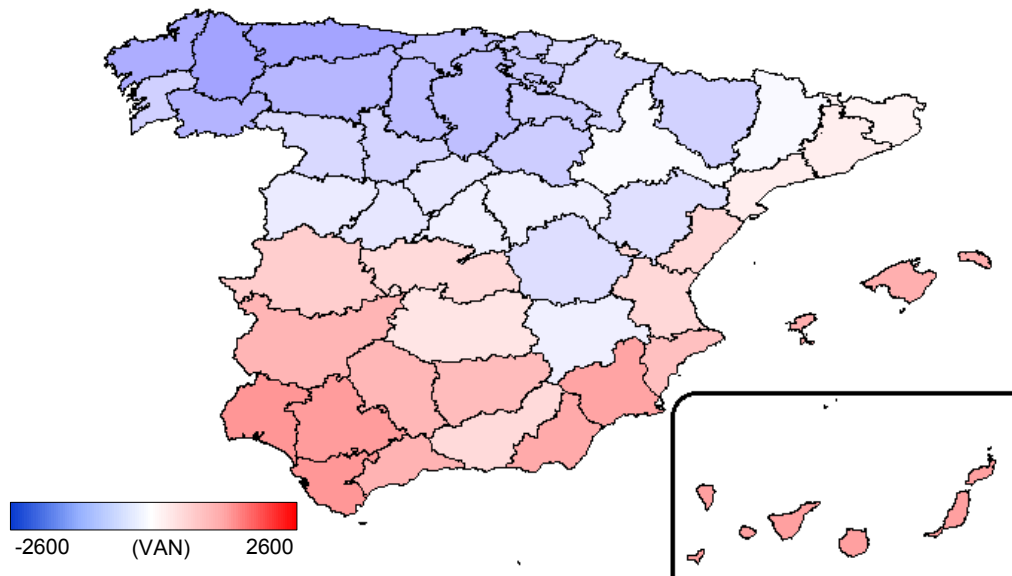
**Ilustración 8-8. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

**Tabla 8-10. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	11,00	(3,90)	9,90	0,48	(757)	(10,8)	18,0	21,5
Alicante	B4-W	20,00	(3,30)	19,00	1,10	82	5,4	8,0	9,3
Almería	A4-W	22,00	(3,10)	21,00	1,30	308	9,1	7,0	8,1
Ávila	E1-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	(850)	(13,1)	20,9	25,0
Badajoz	C4-X	22,00	(3,90)	18,00	1,20	190	7,2	7,5	8,7
Barcelona	C2-W	15,00	(4,40)	12,00	0,73	(418)	(3,5)	12,0	14,1
Bilbao	C1-W	8,80	(5,60)	3,70	0,21	(1130)	(22,2)	40,8	49,3
Burgos	E1-Z	6,10	(4,60)	2,10	0,10	(1280)	(30,4)	86,7	105,0
Cáceres	C4-X	20,00	(4,80)	14,00	0,99	(70)	2,9	8,9	10,4
Cádiz	A3-W	23,00	(2,00)	26,00	1,40	514	12,4	6,3	7,2
Castellón	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	(181)	0,9	9,7	11,4
Ciudad Real	D3-Y	17,00	(4,50)	13,00	0,80	(323)	(1,7)	10,9	12,9
Córdoba	A3-X	22,00	(4,00)	17,00	1,20	174	7,0	7,6	8,8
Coruña	C1-W	4,40	(5,00)	(0,79)	(0,04)	(1470)	-∞	(233,0)	(285,0)
Cuenca	D2-Z	9,90	(4,70)	6,50	0,35	(943)	(15,8)	25,0	30,0
Girona	C2-X	14,00	(4,10)	12,00	0,68	(489)	(4,9)	12,9	15,2
Granada	C3-Y	17,00	(3,90)	15,00	0,89	(200)	0,6	9,9	11,5
Guadalajara	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	(753)	(10,7)	17,9	21,3
Huelva	B4-W	24,00	(3,00)	22,00	1,40	524	12,5	6,3	7,2
Huesca	D2-Y	9,20	(5,50)	4,20	0,25	(1080)	(20,3)	35,0	42,2
Jaén	C4-W	22,00	(5,00)	15,00	1,10	116	6,0	7,9	9,1
Las Palmas de G.C.	A3-V	21,00	(0,42)	38,00	1,30	413	10,8	6,6	7,6
León	E1-Z	5,30	(4,70)	0,82	0,04	(1370)	(39,0)	229,0	279,0
Lleida	D3-Y	13,00	(4,70)	9,60	0,55	(663)	(8,6)	15,8	18,8
Logroño	D2-X	9,60	(6,60)	3,00	0,20	(1150)	(22,9)	43,4	52,5
Lugo	D1-X	3,50	(5,20)	(2,40)	(0,11)	(1570)	-∞	(76,2)	(93,4)
Madrid	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	(753)	(10,7)	17,9	21,3
Málaga	C4-W	21,00	(3,00)	21,00	1,20	212	7,6	7,4	8,6
Murcia	B3-W	22,00	(2,40)	24,00	1,30	370	10,1	6,8	7,8
Orense	C2-W	7,10	(6,70)	0,28	0,02	(1390)	(44,6)	479,0	583,0
Oviedo	C1-X	3,90	(5,50)	(2,20)	(0,11)	(1570)	-∞	(78,2)	(95,9)
Palencia	D1-Y	7,10	(5,70)	1,50	0,09	(1300)	(31,6)	98,3	119,0
P. Mallorca	B3-W	21,00	(2,40)	23,00	1,20	260	8,3	7,2	8,3
Pamplona	D1-Y	9,70	(5,30)	4,90	0,28	(1030)	(18,5)	30,4	36,6
Pontevedra	C1-W	9,20	(5,60)	4,10	0,24	(1090)	(20,7)	36,2	43,7
Salamanca	D2-Z	11,00	(4,30)	8,50	0,45	(808)	(12,1)	19,5	23,3
San Sebastián	C1-W	11,00	(6,10)	4,80	0,31	(987)	(17,1)	27,5	33,1
S.C. de Tenerife	A3-V	21,00	(0,41)	38,00	1,40	464	11,6	6,5	7,4
Santander	C1-W	7,30	(5,60)	1,90	0,11	(1270)	(29,8)	81,6	99,0
Segovia	D2-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	(850)	(13,1)	20,9	25,0
Sevilla	B4-W	24,00	(3,60)	20,00	1,40	460	11,5	6,5	7,4
Soria	E1-Z	8,00	(4,80)	4,10	0,21	(1130)	(22,2)	40,8	49,3
Tarragona	B3-W	16,00	(5,40)	11,00	0,73	(418)	(3,5)	12,0	14,1
Teruel	D2-Z	9,80	(4,40)	7,10	0,36	(926)	(15,2)	24,1	28,9
Toledo	C4-X	19,00	(5,80)	12,00	0,89	(204)	0,5	9,9	11,6
Valencia	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	(181)	0,9	9,7	11,4
Valladolid	D2-Y	10,00	(5,90)	4,30	0,27	(1050)	(19,2)	32,3	38,9
Vitoria	D1-Y	8,10	(5,50)	2,90	0,17	(1190)	(24,9)	51,5	62,3
Zamora	D2-Y	10,00	(5,70)	4,90	0,30	(1000)	(17,6)	28,5	34,3
Zaragoza	D3-X	15,00	(6,00)	8,00	0,57	(643)	(8,2)	15,4	18,3

### 8.3.2.3. Tejado medios de edificios antiguos en buen estado sin contratar mano de obra

En el caso de tejados en buen estado en los cuales el trabajo lo realiza uno mismo, los resultados de la *Ilustración 8-8* y de la *Tabla 8-10* muestran que convertir el tejado en cool roof mediante pintura termorreflectante es rentable para la zona sur de España, el litoral mediterráneo y las zonas insulares. En Madrid, Bilbao y La Coruña no es rentable este escenario y Zaragoza se encuentra en el límite. Barcelona, Valencia y Málaga no perderían dinero en esta inversión y el resto de ciudades más cálidas (Sevilla y Murcia) tendrían una rentabilidad aceptable con una TIR mayor del 10%.



**Ilustración 8-9. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas haciéndolo uno mismo.**

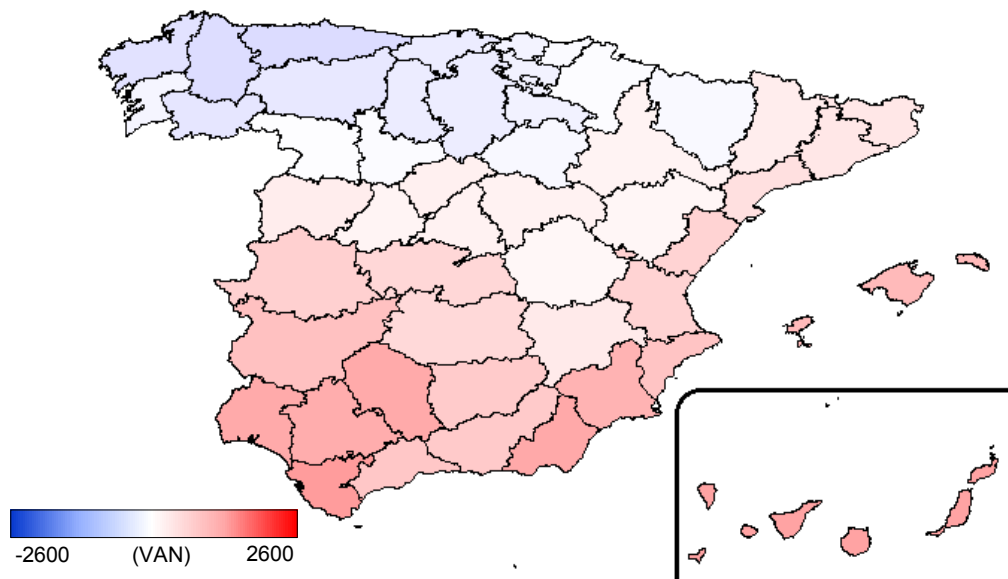
**Tabla 8-11. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios antiguos con calefacción de gas haciéndolo uno mismo.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	11,00	(3,90)	9,90	0,48	(162)	(0,9)	10,5	12,4
Alicante	B4-W	20,00	(3,30)	19,00	1,10	677	22,5	4,8	5,3
Almería	A4-W	22,00	(3,10)	21,00	1,30	903	28,6	4,2	4,6
Ávila	E1-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	(254)	(3,9)	12,2	14,4
Badajoz	C4-X	22,00	(3,90)	18,00	1,20	785	25,4	4,5	4,9
Barcelona	C2-W	15,00	(4,40)	12,00	0,73	177	9,1	7,0	8,1
Bilbao	C1-W	8,80	(5,60)	3,70	0,21	(533)	(15,1)	23,8	28,5
Burgos	E1-Z	6,10	(4,60)	2,10	0,10	(687)	(24,6)	50,4	61,0
Cáceres	C4-X	20,00	(4,80)	14,00	0,99	525	18,4	5,3	5,9
Cádiz	A3-W	23,00	(2,00)	26,00	1,40	1110	34,3	3,7	4,1
Castellón	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	415	15,5	5,7	6,5
Ciudad Real	D3-Y	17,00	(4,50)	13,00	0,80	273	11,7	6,4	7,4
Córdoba	A3-X	22,00	(4,00)	17,00	1,20	770	25,0	4,5	5,0
Coruña	C1-W	4,40	(5,00)	(0,79)	(0,04)	(873)	-∞	(135,0)	(165,0)
Cuenca	D2-Z	9,90	(4,70)	6,50	0,35	(348)	(7,2)	14,6	17,3
Girona	C2-X	14,00	(4,10)	12,00	0,68	106	7,1	7,6	8,7
Granada	C3-Y	17,00	(3,90)	15,00	0,89	395	15,0	5,8	6,6
Guadalajara	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	(157)	(0,7)	10,5	12,3
Huelva	B4-W	24,00	(3,00)	22,00	1,40	1120	34,6	3,7	4,1
Huesca	D2-Y	9,20	(5,50)	4,20	0,25	(485)	(12,8)	20,4	24,4
Jaén	C4-W	22,00	(5,00)	15,00	1,10	712	23,4	4,7	5,2
Las Palmas de G.C.	A3-V	21,00	(0,42)	38,00	1,30	1010	31,5	3,9	4,3
León	E1-Z	5,30	(4,70)	0,82	0,04	(772)	(34,4)	133,0	162,0
Lleida	D3-Y	13,00	(4,70)	9,60	0,55	(68)	2,0	9,2	10,8
Logroño	D2-X	9,60	(6,60)	3,00	0,20	(551)	(15,9)	25,3	30,4
Lugo	D1-X	3,50	(5,20)	(2,40)	(0,11)	(977)	-∞	(44,2)	(54,3)
Madrid	D3-Y	13,00	(5,60)	7,50	0,49	(157)	(0,7)	10,5	12,3
Málaga	C4-W	21,00	(3,00)	21,00	1,20	807	26,0	4,4	4,9
Murcia	B3-W	22,00	(2,40)	24,00	1,30	966	30,3	4,0	4,4
Orense	C2-W	7,10	(6,70)	0,28	0,02	(798)	(40,6)	278,0	338,0
Oviedo	C1-X	3,90	(5,50)	(2,20)	(0,11)	(973)	-∞	(45,3)	(55,7)
Palencia	D1-Y	7,10	(5,70)	1,50	0,09	(703)	(26,0)	57,2	69,2
P. Mallorca	B3-W	21,00	(2,40)	23,00	1,20	855	27,3	4,3	4,7
Pamplona	D1-Y	9,70	(5,30)	4,90	0,28	(434)	(10,6)	17,7	21,1
Pontevedra	C1-W	9,20	(5,60)	4,10	0,24	(497)	(13,3)	21,1	25,3
Salamanca	D2-Z	11,00	(4,30)	8,50	0,45	(213)	(2,5)	11,4	13,4
San Sebastián	C1-W	11,00	(6,10)	4,80	0,31	(392)	(8,9)	16,0	19,1
S.C. de Tenerife	A3-V	21,00	(0,41)	38,00	1,40	1060	32,9	3,8	4,2
Santander	C1-W	7,30	(5,60)	1,90	0,11	(678)	(24,0)	47,4	57,4
Segovia	D2-Z	11,00	(4,50)	7,80	0,42	(254)	(3,9)	12,2	14,4
Sevilla	B4-W	24,00	(3,60)	20,00	1,40	1060	32,8	3,8	4,2
Soria	E1-Z	8,00	(4,80)	4,10	0,21	(533)	(15,1)	23,8	28,5
Tarragona	B3-W	16,00	(5,40)	11,00	0,73	177	9,1	7,0	8,1
Teruel	D2-Z	9,80	(4,40)	7,10	0,36	(330)	(6,6)	14,1	16,7
Toledo	C4-X	19,00	(5,80)	12,00	0,89	391	14,9	5,8	6,6
Valencia	B3-W	18,00	(4,50)	14,00	0,90	415	15,5	5,7	6,5
Valladolid	D2-Y	10,00	(5,90)	4,30	0,27	(456)	(11,5)	18,8	22,5
Vitoria	D1-Y	8,10	(5,50)	2,90	0,17	(594)	(18,3)	30,0	36,1
Zamora	D2-Y	10,00	(5,70)	4,90	0,30	(407)	(9,5)	16,6	19,8
Zaragoza	D3-X	15,00	(6,00)	8,00	0,57	(48)	2,6	9,0	10,5

### 8.3.3. Rentabilidad para tejados oscuros de edificios modernos

#### 8.3.3.1. Tejado oscuros de edificios modernos en mal estado

La *Ilustración 8-10* y la *Tabla 8-12* recogen los resultados del estudio de tejados en mal estado. Esta distribución geográfica de la rentabilidad para edificios modernos es análoga al mismo escenario pero para edificios antiguos. Instalar un cool roof sigue siendo rentable para casi toda España, exceptuando el noroeste de España. Sin embargo, la rentabilidad es menor ya que el aislamiento de los edificios modernos es superior a la de los antiguos y, por tanto, el ahorro económico en la energía por metro cuadrado también es menor para edificios modernos frente a antiguos.



**Ilustración 8-10. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas.**

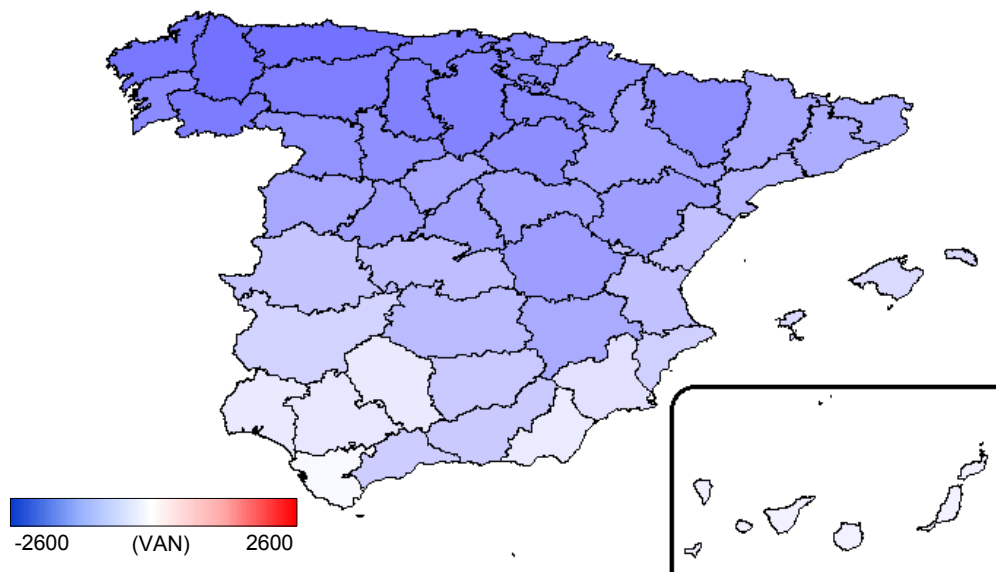


**Tabla 8-12. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	8,60	(2,90)	14,00	0,37	226	21,8	4,8	5,4
Alicante	B4-W	12,00	(2,00)	26,00	0,67	629	55,7	2,8	2,9
Almería	A4-W	15,00	(2,10)	29,00	0,88	915	88,3	2,2	2,2
Ávila	E1-Z	7,50	(3,10)	12,00	0,29	113	13,1	6,2	7,0
Badajoz	C4-X	13,00	(2,20)	25,00	0,69	659	58,5	2,7	2,8
Barcelona	C2-W	8,30	(2,40)	17,00	0,39	254	23,9	4,6	5,1
Bilbao	C1-W	4,70	(2,90)	5,40	0,12	(128)	(8,0)	15,2	18,1
Burgos	E1-Z	4,20	(3,10)	3,30	0,07	(188)	(15,3)	24,2	29,0
Cáceres	C4-X	11,00	(2,80)	20,00	0,58	505	44,2	3,2	3,4
Cádiz	A3-W	16,00	(1,40)	35,00	0,98	1060	110,0	2,0	1,9
Castellón	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	470	41,2	3,4	3,6
Ciudad Real	D3-Y	10,00	(2,80)	18,00	0,51	410	36,2	3,6	3,9
Córdoba	A3-X	16,00	(3,00)	24,00	0,88	912	87,9	2,2	2,2
Coruña	C1-W	2,40	(2,60)	(1,10)	(0,02)	(312)	-∞	(92,3)	(113,0)
Cuenca	D2-Z	7,60	(3,50)	9,80	0,27	85	10,9	6,6	7,6
Girona	C2-X	8,30	(2,40)	17,00	0,39	254	23,9	4,6	5,1
Granada	C3-Y	12,00	(2,70)	21,00	0,62	564	49,5	3,0	3,2
Guadalajara	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	139	15,1	5,8	6,6
Huelva	B4-W	15,00	(1,80)	30,00	0,88	911	87,7	2,2	2,2
Huesca	D2-Y	5,80	(3,40)	6,40	0,16	(68)	(2,0)	11,1	13,0
Jaén	C4-W	12,00	(2,70)	21,00	0,61	551	48,4	3,0	3,2
Las Palmas de G.C.	A3-V	14,00	(0,30)	48,00	0,93	985	98,1	2,1	2,0
León	E1-Z	3,60	(3,20)	1,40	0,03	(246)	(26,3)	58,6	71,0
Lleida	D3-Y	8,20	(2,90)	14,00	0,35	192	19,2	5,2	5,8
Logroño	D2-X	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(137)	(8,9)	16,0	19,1
Lugo	D1-X	1,90	(2,70)	(3,40)	(0,06)	(365)	-∞	(30,2)	(37,3)
Madrid	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	139	15,1	5,8	6,6
Málaga	C4-W	11,00	(1,60)	28,00	0,65	597	52,6	2,9	3,0
Murcia	B3-W	13,00	(1,50)	32,00	0,80	809	74,8	2,4	2,4
Orense	C2-W	3,80	(3,50)	0,62	0,01	(267)	(33,6)	121,0	147,0
Oviedo	C1-X	2,30	(3,20)	(3,10)	(0,06)	(370)	-∞	(28,5)	(35,2)
Palencia	D1-Y	4,40	(3,50)	2,50	0,06	(204)	(17,9)	29,1	35,0
P. Mallorca	B3-W	13,00	(1,50)	31,00	0,75	739	66,9	2,5	2,6
Pamplona	D1-Y	6,10	(3,30)	7,40	0,18	(37)	0,9	9,7	11,4
Pontevedra	C1-W	4,90	(3,00)	6,00	0,13	(108)	(5,9)	13,5	16,0
Salamanca	D2-Z	8,50	(3,30)	13,00	0,35	188	18,9	5,2	5,9
San Sebastián	C1-W	5,80	(3,20)	7,10	0,17	(50)	(0,3)	10,3	12,0
S.C. de Tenerife	A3-V	15,00	(0,29)	48,00	0,96	1020	104,0	2,0	2,0
Santander	C1-W	3,90	(3,00)	2,90	0,06	(206)	(18,1)	29,7	35,7
Segovia	D2-Z	8,30	(3,40)	12,00	0,32	157	16,5	5,6	6,3
Sevilla	B4-W	15,00	(2,20)	28,00	0,85	873	82,7	2,3	2,3
Soria	E1-Z	5,60	(3,30)	6,30	0,15	(80)	(3,1)	11,7	13,8
Tarragona	B3-W	10,00	(3,20)	15,00	0,45	326	29,5	4,1	4,5
Teruel	D2-Z	7,50	(3,30)	11,00	0,28	98	11,9	6,4	7,3
Toledo	C4-X	11,00	(3,30)	17,00	0,52	429	37,8	3,5	3,8
Valencia	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	470	41,2	3,4	3,6
Valladolid	D2-Y	6,20	(3,60)	6,50	0,17	(48)	(0,1)	10,2	11,9
Vitoria	D1-Y	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(137)	(8,9)	16,0	19,1
Zamora	D2-Y	6,50	(3,50)	7,40	0,20	(18)	2,5	9,1	10,6
Zaragoza	D3-X	7,70	(3,10)	12,00	0,30	128	14,3	5,9	6,8

### 8.3.3.2. Tejado oscuros de edificios modernos en buen estado contratando mano de obra

La *Ilustración 8-11* y la *Tabla 8-13* presentan resultados para tejados de edificios modernos en buen estado que se pintan para convertirlos en cool roofs contratando mano de obra. Como puede observarse y debido al buen aislamiento de los edificios modernos, convertir un tejado en buen estado en un cool roof contratando a una empresa especializada no es rentable para ninguna zona de España.



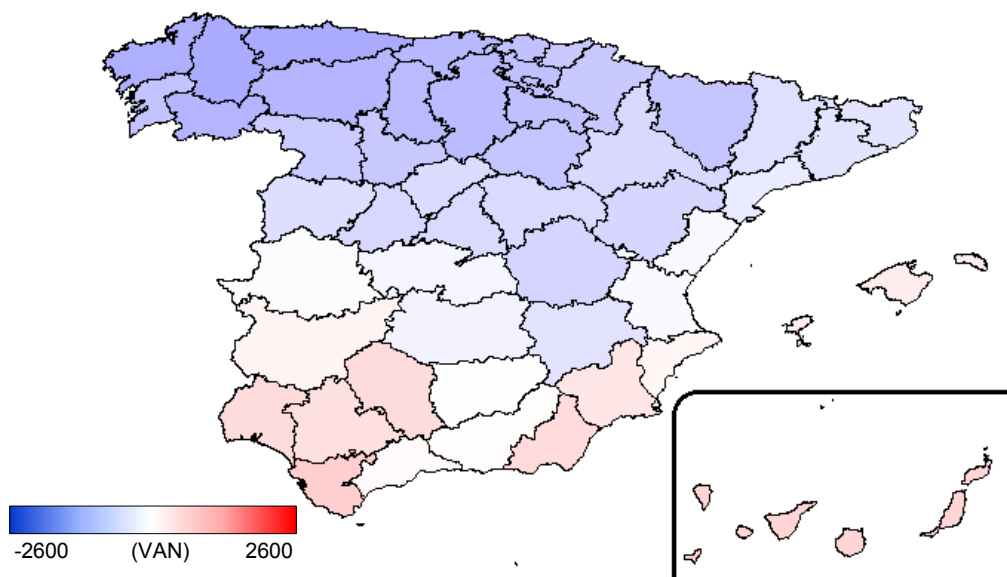
**Ilustración 8-11. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

**Tabla 8-13. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	8,60	(2,90)	14,00	0,37	(905)	(14,7)	23,1	27,7
Alicante	B4-W	12,00	(2,00)	26,00	0,67	(502)	(5,2)	13,0	15,4
Almería	A4-W	15,00	(2,10)	29,00	0,88	(216)	0,3	10,0	11,7
Ávila	E1-Z	7,50	(3,10)	12,00	0,29	(1020)	(18,1)	29,6	35,6
Badajoz	C4-X	13,00	(2,20)	25,00	0,69	(473)	(4,6)	12,6	14,9
Barcelona	C2-W	8,30	(2,40)	17,00	0,39	(878)	(13,9)	22,0	26,3
Bilbao	C1-W	4,70	(2,90)	5,40	0,12	(1260)	(28,8)	74,4	90,2
Burgos	E1-Z	4,20	(3,10)	3,30	0,07	(1320)	(33,4)	119,0	145,0
Cáceres	C4-X	11,00	(2,80)	20,00	0,58	(627)	(7,8)	15,1	17,9
Cádiz	A3-W	16,00	(1,40)	35,00	0,98	(71)	2,8	8,9	10,4
Castellón	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	(662)	(8,6)	15,8	18,7
Ciudad Real	D3-Y	10,00	(2,80)	18,00	0,51	(721)	(10,0)	17,1	20,3
Córdoba	A3-X	16,00	(3,00)	24,00	0,88	(219)	0,2	10,0	11,7
Coruña	C1-W	2,40	(2,60)	(1,10)	(0,02)	(1440)	-∞	(458,0)	(558,0)
Cuenca	D2-Z	7,60	(3,50)	9,80	0,27	(1050)	(19,1)	31,8	38,3
Girona	C2-X	8,30	(2,40)	17,00	0,39	(878)	(13,9)	22,0	26,3
Granada	C3-Y	12,00	(2,70)	21,00	0,62	(567)	(6,5)	14,0	16,6
Guadalajara	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	(992)	(17,3)	27,8	33,4
Huelva	B4-W	15,00	(1,80)	30,00	0,88	(220)	0,2	10,0	11,7
Huesca	D2-Y	5,80	(3,40)	6,40	0,16	(1200)	(25,4)	54,0	65,4
Jaén	C4-W	12,00	(2,70)	21,00	0,61	(580)	(6,8)	14,2	16,9
Las Palmas de G.C.	A3-V	14,00	(0,30)	48,00	0,93	(147)	1,5	9,5	11,0
León	E1-Z	3,60	(3,20)	1,40	0,03	(1380)	(40,9)	289,0	352,0
Lleida	D3-Y	8,20	(2,90)	14,00	0,35	(939)	(15,6)	24,8	29,7
Logroño	D2-X	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(1270)	(29,4)	78,6	95,3
Lugo	D1-X	1,90	(2,70)	(3,40)	(0,06)	(1500)	-∞	(150,0)	(183,0)
Madrid	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	(992)	(17,3)	27,8	33,4
Málaga	C4-W	11,00	(1,60)	28,00	0,65	(534)	(5,8)	13,5	16,0
Murcia	B3-W	13,00	(1,50)	32,00	0,80	(323)	(1,7)	10,9	12,9
Orense	C2-W	3,80	(3,50)	0,62	0,01	(1400)	(46,1)	599,0	730,0
Oviedo	C1-X	2,30	(3,20)	(3,10)	(0,06)	(1500)	-∞	(142,0)	(173,0)
Palencia	D1-Y	4,40	(3,50)	2,50	0,06	(1340)	(35,1)	143,0	174,0
P. Mallorca	B3-W	13,00	(1,50)	31,00	0,75	(393)	(3,0)	11,7	13,8
Pamplona	D1-Y	6,10	(3,30)	7,40	0,18	(1170)	(23,9)	47,2	57,1
Pontevedra	C1-W	4,90	(3,00)	6,00	0,13	(1240)	(27,6)	66,1	80,1
Salamanca	D2-Z	8,50	(3,30)	13,00	0,35	(943)	(15,8)	25,0	30,0
San Sebastián	C1-W	5,80	(3,20)	7,10	0,17	(1180)	(24,5)	50,0	60,4
S.C. de Tenerife	A3-V	15,00	(0,29)	48,00	0,96	(110)	2,2	9,2	10,7
Santander	C1-W	3,90	(3,00)	2,90	0,06	(1340)	(35,2)	146,0	178,0
Segovia	D2-Z	8,30	(3,40)	12,00	0,32	(974)	(16,7)	26,7	32,1
Sevilla	B4-W	15,00	(2,20)	28,00	0,85	(259)	(0,5)	10,3	12,1
Soria	E1-Z	5,60	(3,30)	6,30	0,15	(1210)	(26,0)	57,1	69,1
Tarragona	B3-W	10,00	(3,20)	15,00	0,45	(805)	(12,0)	19,4	23,2
Teruel	D2-Z	7,50	(3,30)	11,00	0,28	(1030)	(18,6)	30,8	37,1
Toledo	C4-X	11,00	(3,30)	17,00	0,52	(702)	(9,5)	16,6	19,8
Valencia	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	(662)	(8,6)	15,8	18,7
Valladolid	D2-Y	6,20	(3,60)	6,50	0,17	(1180)	(24,5)	49,6	59,9
Vitoria	D1-Y	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(1270)	(29,4)	78,6	95,3
Zamora	D2-Y	6,50	(3,50)	7,40	0,20	(1150)	(23,1)	44,0	53,2
Zaragoza	D3-X	7,70	(3,10)	12,00	0,30	(1000)	(17,6)	28,5	34,3

### 8.3.3.3. Tejado oscuros de edificios modernos en buen estado sin contratar mano de obra

La *Ilustración 8-12* y la *Tabla 8-14* presentan la rentabilidad obtenida para tejados modernos en buen estado, donde el trabajo de pintar es realizado por uno mismo. Este escenario sólo es rentable para la zona suroeste de España, las zonas de clima mediterráneo cálido (Alicante, Murcia y Almería) y las zonas insulares. Ni en Madrid ni en Barcelona es rentable y Valencia se encuentra en el límite.



**Ilustración 8-12. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.**

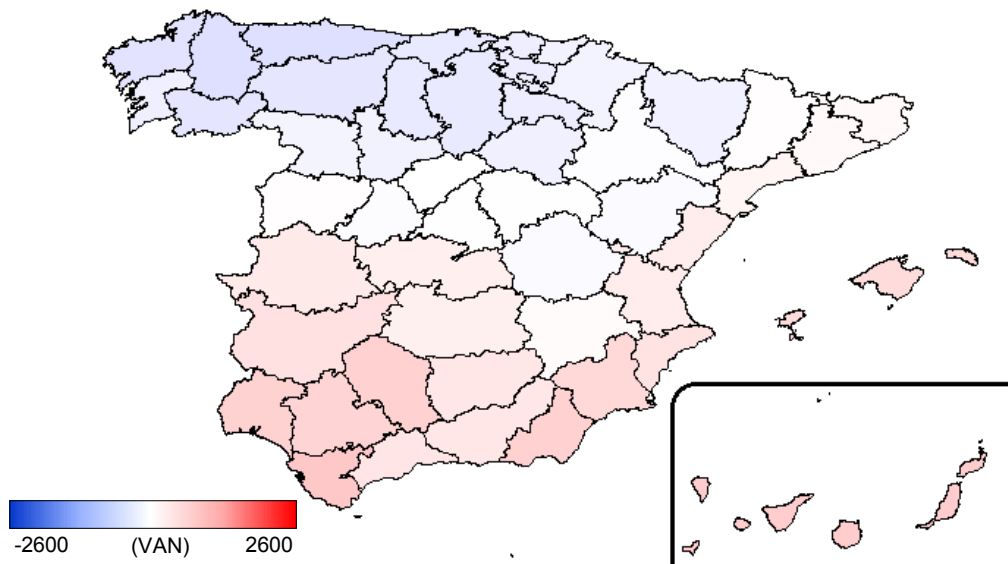
**Tabla 8-14. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados oscuros en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	8,60	(2,90)	14,00	0,37	(310)	(5,8)	13,5	16,0
Alicante	B4-W	12,00	(2,00)	26,00	0,67	93	6,7	7,7	8,9
Almería	A4-W	15,00	(2,10)	29,00	0,88	379	14,6	5,9	6,7
Ávila	E1-Z	7,50	(3,10)	12,00	0,29	(423)	(10,1)	17,3	20,6
Badajoz	C4-X	13,00	(2,20)	25,00	0,69	122	7,6	7,4	8,6
Barcelona	C2-W	8,30	(2,40)	17,00	0,39	(283)	(4,9)	12,8	15,2
Bilbao	C1-W	4,70	(2,90)	5,40	0,12	(664)	(22,9)	43,3	52,3
Burgos	E1-Z	4,20	(3,10)	3,30	0,07	(724)	(28,1)	69,1	83,8
Cáceres	C4-X	11,00	(2,80)	20,00	0,58	(32)	3,1	8,8	10,3
Cádiz	A3-W	16,00	(1,40)	35,00	0,98	524	18,4	5,3	5,9
Castellón	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	(67)	2,1	9,2	10,8
Ciudad Real	D3-Y	10,00	(2,80)	18,00	0,51	(126)	0,3	10,0	11,7
Córdoba	A3-X	16,00	(3,00)	24,00	0,88	376	14,5	5,9	6,7
Coruña	C1-W	2,40	(2,60)	(1,10)	(0,02)	(849)	-∞	(265,0)	(324,0)
Cuenca	D2-Z	7,60	(3,50)	9,80	0,27	(451)	(11,3)	18,5	22,1
Girona	C2-X	8,30	(2,40)	17,00	0,39	(283)	(4,9)	12,8	15,2
Granada	C3-Y	12,00	(2,70)	21,00	0,62	28	4,9	8,2	9,5
Guadalajara	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	(397)	(9,1)	16,2	19,3
Huelva	B4-W	15,00	(1,80)	30,00	0,88	375	14,5	5,9	6,7
Huesca	D2-Y	5,80	(3,40)	6,40	0,16	(604)	(18,9)	31,4	37,9
Jaén	C4-W	12,00	(2,70)	21,00	0,61	15	4,5	8,4	9,7
Las Palmas de G.C.	A3-V	14,00	(0,30)	48,00	0,93	448	16,4	5,6	6,3
León	E1-Z	3,60	(3,20)	1,40	0,03	(782)	(36,4)	168,0	204,0
Lleida	D3-Y	8,20	(2,90)	14,00	0,35	(344)	(7,1)	14,4	17,1
Logroño	D2-X	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(673)	(23,5)	45,7	55,2
Lugo	D1-X	1,90	(2,70)	(3,40)	(0,06)	(901)	-∞	(87,0)	(107,0)
Madrid	D3-Y	8,10	(3,40)	11,00	0,31	(397)	(9,1)	16,2	19,3
Málaga	C4-W	11,00	(1,60)	28,00	0,65	61	5,8	7,9	9,2
Murcia	B3-W	13,00	(1,50)	32,00	0,80	272	11,7	6,4	7,4
Orense	C2-W	3,80	(3,50)	0,62	0,01	(803)	(42,3)	348,0	423,0
Oviedo	C1-X	2,30	(3,20)	(3,10)	(0,06)	(906)	-∞	(82,1)	(101,0)
Palencia	D1-Y	4,40	(3,50)	2,50	0,06	(741)	(30,0)	83,3	101,0
P. Mallorca	B3-W	13,00	(1,50)	31,00	0,75	202	9,8	6,9	7,9
Pamplona	D1-Y	6,10	(3,30)	7,40	0,18	(573)	(17,1)	27,5	33,0
Pontevedra	C1-W	4,90	(3,00)	6,00	0,13	(645)	(21,5)	38,5	46,4
Salamanca	D2-Z	8,50	(3,30)	13,00	0,35	(348)	(7,2)	14,6	17,3
San Sebastián	C1-W	5,80	(3,20)	7,10	0,17	(587)	(17,9)	29,1	35,0
S.C. de Tenerife	A3-V	15,00	(0,29)	48,00	0,96	485	17,4	5,4	6,1
Santander	C1-W	3,90	(3,00)	2,90	0,06	(742)	(30,2)	84,9	103,0
Segovia	D2-Z	8,30	(3,40)	12,00	0,32	(379)	(8,4)	15,6	18,5
Sevilla	B4-W	15,00	(2,20)	28,00	0,85	336	13,4	6,1	6,9
Soria	E1-Z	5,60	(3,30)	6,30	0,15	(616)	(19,6)	33,2	40,0
Tarragona	B3-W	10,00	(3,20)	15,00	0,45	(210)	(2,4)	11,3	13,3
Teruel	D2-Z	7,50	(3,30)	11,00	0,28	(439)	(10,8)	18,0	21,4
Toledo	C4-X	11,00	(3,30)	17,00	0,52	(107)	0,8	9,7	11,4
Valencia	B3-W	11,00	(2,70)	20,00	0,55	(67)	2,1	9,2	10,8
Valladolid	D2-Y	6,20	(3,60)	6,50	0,17	(585)	(17,8)	28,8	34,7
Vitoria	D1-Y	5,10	(3,40)	4,50	0,11	(673)	(23,5)	45,7	55,2
Zamora	D2-Y	6,50	(3,50)	7,40	0,20	(555)	(16,1)	25,6	30,8
Zaragoza	D3-X	7,70	(3,10)	12,00	0,30	(408)	(9,5)	16,7	19,8

### 8.3.4. Rentabilidad para tejados medios de edificios modernos

#### 8.3.4.1. Tejado medios de edificios modernos en mal estado

Los resultados para el caso de tejados medios en mal estado se recogen en la *Ilustración 8-13* y la *Tabla 8-15*. Como puede observarse, instalar un cool roof es rentable para la zona sur y de Levante de España. En la zona centro, la rentabilidad es pequeña y en la zona norte no es rentable. Los valores obtenidos para Madrid y Barcelona muestran una baja rentabilidad para las dos grandes capitales de provincia.



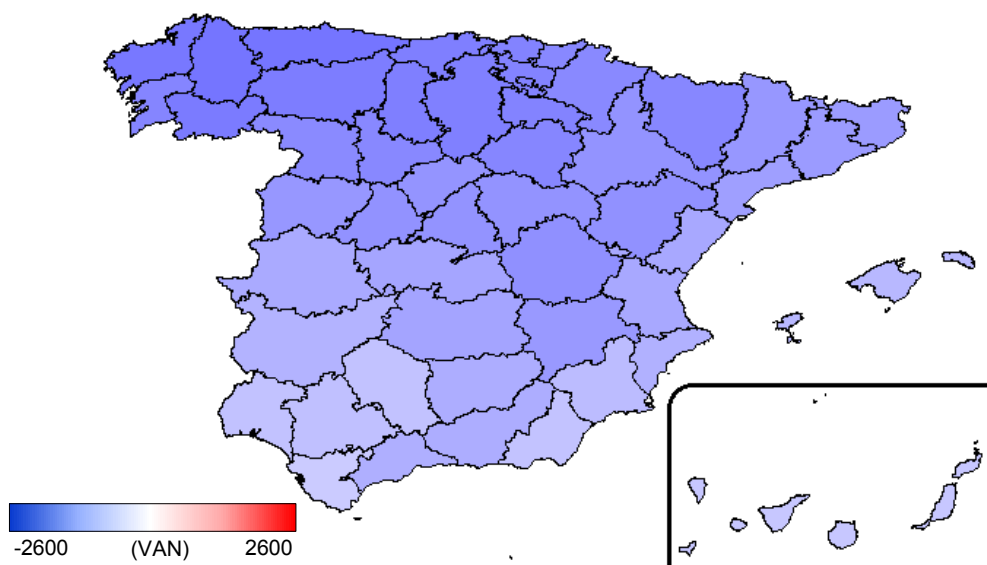
**Ilustración 8-13. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas.**

**Tabla 8-15. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en mal estado de edificios modernos con calefacción de gas.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	5,50	(1,90)	9,70	0,24	42	7,5	7,4	8,6
Alicante	B4-W	7,80	(1,30)	18,00	0,43	303	27,7	4,2	4,7
Almería	A4-W	9,90	(1,40)	21,00	0,57	488	42,8	3,3	3,5
Ávila	E1-Z	4,80	(2,00)	7,70	0,19	(32)	1,4	9,5	11,1
Badajoz	C4-X	8,10	(1,40)	17,00	0,44	322	29,1	4,1	4,5
Barcelona	C2-W	5,30	(1,50)	12,00	0,25	61	9,0	7,1	8,1
Bilbao	C1-W	3,00	(1,90)	3,50	0,07	(186)	(15,1)	23,8	28,5
Burgos	E1-Z	2,70	(2,00)	2,10	0,05	(225)	(21,5)	38,7	46,7
Cáceres	C4-X	7,40	(1,80)	14,00	0,37	222	21,4	4,9	5,5
Cádiz	A3-W	10,00	(0,88)	26,00	0,63	582	51,1	2,9	3,1
Castellón	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	200	19,8	5,1	5,7
Ciudad Real	D3-Y	6,70	(1,80)	13,00	0,33	161	16,7	5,5	6,3
Córdoba	A3-X	10,00	(1,90)	17,00	0,56	486	42,6	3,3	3,5
Coruña	C1-W	1,50	(1,70)	(0,72)	(0,01)	(304)	-∞	(140,0)	(171,0)
Cuenca	D2-Z	4,90	(2,30)	6,40	0,17	(50)	(0,3)	10,2	12,0
Girona	C2-X	5,30	(1,50)	12,00	0,25	61	9,0	7,1	8,1
Granada	C3-Y	7,70	(1,70)	15,00	0,40	261	24,4	4,6	5,1
Guadalajara	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(15)	2,8	9,0	10,4
Huelva	B4-W	9,70	(1,20)	22,00	0,56	485	42,5	3,3	3,5
Huesca	D2-Y	3,70	(2,20)	4,20	0,10	(148)	(10,3)	17,4	20,7
Jaén	C4-W	7,60	(1,70)	15,00	0,39	252	23,8	4,6	5,1
Las Palmas de G.C.	A3-V	9,20	(0,19)	38,00	0,60	532	46,6	3,1	3,3
León	E1-Z	2,30	(2,10)	0,83	0,02	(263)	(31,6)	98,7	120,0
Lleida	D3-Y	5,20	(1,90)	9,30	0,22	20	5,7	8,0	9,2
Logroño	D2-X	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(193)	(16,0)	25,5	30,6
Lugo	D1-X	1,20	(1,70)	(2,20)	(0,04)	(338)	-∞	(46,4)	(57,0)
Madrid	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(15)	2,8	9,0	10,4
Málaga	C4-W	7,30	(1,00)	20,00	0,42	282	26,1	4,4	4,9
Murcia	B3-W	8,70	(0,94)	23,00	0,52	419	37,0	3,6	3,9
Orense	C2-W	2,40	(2,30)	0,33	0,0076	(276)	(39,0)	228,0	278,0
Oviedo	C1-X	1,50	(2,00)	(2,00)	(0,04)	(341)	-∞	(43,4)	(53,4)
Palencia	D1-Y	2,80	(2,30)	1,50	0,04	(236)	(24,0)	47,6	57,5
P. Mallorca	B3-W	8,20	(0,96)	23,00	0,48	374	33,3	3,8	4,2
Pamplona	D1-Y	3,90	(2,10)	4,80	0,12	(128)	(7,9)	15,2	18,0
Pontevedra	C1-W	3,20	(1,90)	3,90	0,08	(173)	(13,3)	21,1	25,3
Salamanca	D2-Z	5,50	(2,10)	8,40	0,22	17	5,5	8,0	9,3
San Sebastián	C1-W	3,80	(2,10)	4,70	0,11	(136)	(8,9)	16,0	19,0
S.C. de Tenerife	A3-V	9,40	(0,19)	38,00	0,62	556	48,8	3,0	3,2
Santander	C1-W	2,50	(1,90)	1,80	0,04	(236)	(23,8)	47,0	56,8
Segovia	D2-Z	5,30	(2,20)	7,70	0,21	(4)	3,8	8,6	10,0
Sevilla	B4-W	9,60	(1,40)	20,00	0,55	460	40,4	3,4	3,7
Soria	E1-Z	3,60	(2,10)	4,00	0,10	(156)	(11,2)	18,4	22,0
Tarragona	B3-W	6,40	(2,10)	10,00	0,29	107	12,6	6,2	7,1
Teruel	D2-Z	4,80	(2,10)	7,00	0,18	(42)	0,5	9,9	11,6
Toledo	C4-X	7,20	(2,10)	11,00	0,34	172	17,6	5,4	6,1
Valencia	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	200	19,8	5,1	5,7
Valladolid	D2-Y	4,00	(2,30)	4,20	0,11	(136)	(8,9)	16,0	19,1
Vitoria	D1-Y	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(193)	(16,0)	25,5	30,6
Zamora	D2-Y	4,10	(2,30)	4,80	0,12	(117)	(6,7)	14,2	16,8
Zaragoza	D3-X	4,90	(2,00)	7,80	0,19	(22)	2,2	9,2	10,7

### 8.3.4.2. Tejado medios de edificios modernos en buen estado contratando mano de obra

Para el escenario de tejados medios en buen estado contratando mano de obra, los resultados obtenidos demuestran que en ningún caso es rentable (ver *Ilustración 8-14* y *Tabla 8-16*). Tanto el VAN como la TIR son negativos ya que el ahorro energético y, por tanto económico, entre los cool roofs y los tejados de colores medios y modernos son pequeños en comparación con la inversión inicial a realizar.



**Ilustración 8-14. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

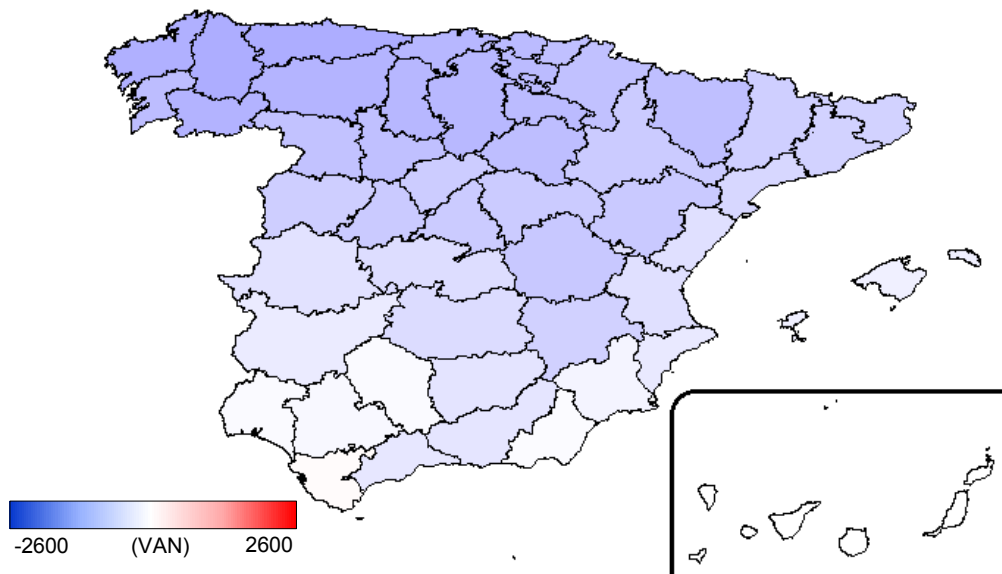


**Tabla 8-16. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas contratando mano de obra especializada.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	5,50	(1,90)	9,70	0,24	(1090)	(20,6)	36,0	43,4
Alicante	B4-W	7,80	(1,30)	18,00	0,43	(828)	(12,6)	20,1	24,1
Almería	A4-W	9,90	(1,40)	21,00	0,57	(643)	(8,2)	15,4	18,3
Ávila	E1-Z	4,80	(2,00)	7,70	0,19	(1160)	(23,7)	46,3	56,0
Badajoz	C4-X	8,10	(1,40)	17,00	0,44	(810)	(12,1)	19,5	23,3
Barcelona	C2-W	5,30	(1,50)	12,00	0,25	(1070)	(19,9)	34,1	41,1
Bilbao	C1-W	3,00	(1,90)	3,50	0,07	(1320)	(33,2)	117,0	142,0
Burgos	E1-Z	2,70	(2,00)	2,10	0,05	(1360)	(37,5)	191,0	232,0
Cáceres	C4-X	7,40	(1,80)	14,00	0,37	(910)	(14,8)	23,3	28,0
Cádiz	A3-W	10,00	(0,88)	26,00	0,63	(550)	(6,2)	13,7	16,3
Castellón	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	(932)	(15,4)	24,4	29,2
Ciudad Real	D3-Y	6,70	(1,80)	13,00	0,33	(971)	(16,6)	26,5	31,8
Córdoba	A3-X	10,00	(1,90)	17,00	0,56	(646)	(8,2)	15,4	18,3
Coruña	C1-W	1,50	(1,70)	(0,72)	(0,01)	(1440)	-∞	(694,0)	(846,0)
Cuenca	D2-Z	4,90	(2,30)	6,40	0,17	(1180)	(24,5)	49,9	60,4
Girona	C2-X	5,30	(1,50)	12,00	0,25	(1070)	(19,9)	34,1	41,1
Granada	C3-Y	7,70	(1,70)	15,00	0,40	(871)	(13,7)	21,7	26,0
Guadalajara	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(1150)	(22,9)	43,5	52,6
Huelva	B4-W	9,70	(1,20)	22,00	0,56	(646)	(8,2)	15,4	18,3
Huesca	D2-Y	3,70	(2,20)	4,20	0,10	(1280)	(30,2)	85,3	104,0
Jaén	C4-W	7,60	(1,70)	15,00	0,39	(879)	(13,9)	22,0	26,4
Las Palmas de G.C.	A3-V	9,20	(0,19)	38,00	0,60	(599)	(7,2)	14,6	17,3
León	E1-Z	2,30	(2,10)	0,83	0,02	(1390)	(44,7)	488,0	594,0
Lleida	D3-Y	5,20	(1,90)	9,30	0,22	(1110)	(21,5)	38,5	46,5
Logroño	D2-X	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(1320)	(33,9)	125,0	152,0
Lugo	D1-X	1,20	(1,70)	(2,20)	(0,04)	(1470)	-∞	(230,0)	(281,0)
Madrid	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(1150)	(22,9)	43,5	52,6
Málaga	C4-W	7,30	(1,00)	20,00	0,42	(849)	(13,1)	20,9	25,0
Murcia	B3-W	8,70	(0,94)	23,00	0,52	(712)	(9,7)	16,9	20,1
Orense	C2-W	2,40	(2,30)	0,33	0,0076	(1410)	(50,3)	1130,0	1380,0
Oviedo	C1-X	1,50	(2,00)	(2,00)	(0,04)	(1470)	-∞	(215,0)	(263,0)
Palencia	D1-Y	2,80	(2,30)	1,50	0,04	(1370)	(39,2)	235,0	285,0
P. Mallorca	B3-W	8,20	(0,96)	23,00	0,48	(758)	(10,8)	18,0	21,5
Pamplona	D1-Y	3,90	(2,10)	4,80	0,12	(1260)	(28,8)	74,3	90,1
Pontevedra	C1-W	3,20	(1,90)	3,90	0,08	(1300)	(32,1)	104,0	126,0
Salamanca	D2-Z	5,50	(2,10)	8,40	0,22	(1110)	(21,6)	39,0	47,0
San Sebastián	C1-W	3,80	(2,10)	4,70	0,11	(1270)	(29,4)	78,4	95,1
S.C. de Tenerife	A3-V	9,40	(0,19)	38,00	0,62	(576)	(6,7)	14,2	16,8
Santander	C1-W	2,50	(1,90)	1,80	0,04	(1370)	(39,1)	232,0	282,0
Segovia	D2-Z	5,30	(2,20)	7,70	0,21	(1140)	(22,5)	41,8	50,4
Sevilla	B4-W	9,60	(1,40)	20,00	0,55	(671)	(8,8)	16,0	19,0
Soria	E1-Z	3,60	(2,10)	4,00	0,10	(1290)	(30,8)	90,3	110,0
Tarragona	B3-W	6,40	(2,10)	10,00	0,29	(1020)	(18,3)	30,1	36,2
Teruel	D2-Z	4,80	(2,10)	7,00	0,18	(1170)	(24,1)	48,2	58,3
Toledo	C4-X	7,20	(2,10)	11,00	0,34	(959)	(16,2)	25,8	31,0
Valencia	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	(932)	(15,4)	24,4	29,2
Valladolid	D2-Y	4,00	(2,30)	4,20	0,11	(1270)	(29,4)	78,5	95,2
Vitoria	D1-Y	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(1320)	(33,9)	125,0	152,0
Zamora	D2-Y	4,10	(2,30)	4,80	0,12	(1250)	(28,1)	69,4	84,2
Zaragoza	D3-X	4,90	(2,00)	7,80	0,19	(1150)	(23,2)	44,6	53,9

### 8.3.4.3. Tejado medios de edificios modernos en buen estado sin contratar mano de obra

En el caso de tejados en buen estado en los cuales el trabajo lo realiza uno mismo, los resultados de la *Ilustración 8-15* y de la *Tabla 8-17* determinan que en ningún caso es rentable convertir el tejado de la vivienda en un cool roof, salvo quizás la zona occidental de Andalucía (Sevilla, Huelva y Cádiz) y las Islas Canarias, donde la rentabilidad es prácticamente nula o negativa.



**Ilustración 8-15. Análisis geográfico comparativo de rentabilidad de aplicar cool roofs para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.**

**Tabla 8-17. Tabla-resumen por provincia de ahorros energéticos, económicos y rentabilidad para tejados medios en buen estado de edificios modernos con calefacción de gas haciéndolo tú mismo.**

Provincia	Zona geográfica	Ahorro Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> a)	Ahorro Calefacción Gas (%)	Ahorro Económico (€/m <sup>2</sup> )	VAN	TIR (%)	Payback (año)	Payback descontado (año)
Albacete	D3-Z	5,50	(1,90)	9,70	0,24	(495)	(13,2)	21,0	25,1
Alicante	B4-W	7,80	(1,30)	18,00	0,43	(233)	(3,2)	11,8	13,9
Almería	A4-W	9,90	(1,40)	21,00	0,57	(48)	2,6	9,0	10,5
Ávila	E1-Z	4,80	(2,00)	7,70	0,19	(568)	(16,8)	26,9	32,4
Badajoz	C4-X	8,10	(1,40)	17,00	0,44	(215)	(2,6)	11,4	13,4
Barcelona	C2-W	5,30	(1,50)	12,00	0,25	(476)	(12,4)	19,9	23,7
Bilbao	C1-W	3,00	(1,90)	3,50	0,07	(722)	(27,9)	67,8	82,2
Burgos	E1-Z	2,70	(2,00)	2,10	0,05	(761)	(32,7)	111,0	135,0
Cáceres	C4-X	7,40	(1,80)	14,00	0,37	(314)	(6,0)	13,6	16,1
Cádiz	A3-W	10,00	(0,88)	26,00	0,63	46	5,4	8,1	9,3
Castellón	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	(336)	(6,8)	14,2	16,9
Ciudad Real	D3-Y	6,70	(1,80)	13,00	0,33	(376)	(8,3)	15,5	18,4
Córdoba	A3-X	10,00	(1,90)	17,00	0,56	(51)	2,6	9,0	10,5
Coruña	C1-W	1,50	(1,70)	(0,72)	(0,01)	(840)	-∞	(402,0)	(491,0)
Cuenca	D2-Z	4,90	(2,30)	6,40	0,17	(586)	(17,9)	29,0	34,9
Girona	C2-X	5,30	(1,50)	12,00	0,25	(476)	(12,4)	19,9	23,7
Granada	C3-Y	7,70	(1,70)	15,00	0,40	(276)	(4,6)	12,7	15,0
Guadalajara	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(551)	(16,0)	25,3	30,4
Huelva	B4-W	9,70	(1,20)	22,00	0,56	(51)	2,5	9,1	10,5
Huesca	D2-Y	3,70	(2,20)	4,20	0,10	(685)	(24,5)	49,6	60,0
Jaén	C4-W	7,60	(1,70)	15,00	0,39	(284)	(4,9)	12,9	15,2
Las Palmas de G.C.	A3-V	9,20	(0,19)	38,00	0,60	(4)	3,9	8,5	9,9
León	E1-Z	2,30	(2,10)	0,83	0,02	(799)	(40,7)	283,0	345,0
Lleida	D3-Y	5,20	(1,90)	9,30	0,22	(516)	(14,2)	22,4	26,9
Logroño	D2-X	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(729)	(28,6)	72,7	88,2
Lugo	D1-X	1,20	(1,70)	(2,20)	(0,04)	(874)	-∞	(133,0)	(163,0)
Madrid	D3-Y	5,20	(2,20)	7,40	0,20	(551)	(16,0)	25,3	30,4
Málaga	C4-W	7,30	(1,00)	20,00	0,42	(254)	(3,9)	12,2	14,4
Murcia	B3-W	8,70	(0,94)	23,00	0,52	(117)	0,5	9,9	11,6
Orense	C2-W	2,40	(2,30)	0,33	0.0076	(813)	(46,8)	655,0	799,0
Oviedo	C1-X	1,50	(2,00)	(2,00)	(0,04)	(878)	-∞	(125,0)	(153,0)
Palencia	D1-Y	2,80	(2,30)	1,50	0,04	(773)	(34,6)	136,0	166,0
P. Mallorca	B3-W	8,20	(0,96)	23,00	0,48	(162)	(0,9)	10,5	12,4
Pamplona	D1-Y	3,90	(2,10)	4,80	0,12	(664)	(22,9)	43,2	52,2
Pontevedra	C1-W	3,20	(1,90)	3,90	0,08	(709)	(26,6)	60,2	73,0
Salamanca	D2-Z	5,50	(2,10)	8,40	0,22	(519)	(14,4)	22,7	27,2
San Sebastián	C1-W	3,80	(2,10)	4,70	0,11	(673)	(23,5)	45,6	55,1
S.C. de Tenerife	A3-V	9,40	(0,19)	38,00	0,62	20	4,6	8,3	9,6
Santander	C1-W	2,50	(1,90)	1,80	0,04	(772)	(34,5)	135,0	164,0
Segovia	D2-Z	5,30	(2,20)	7,70	0,21	(540)	(15,4)	24,3	29,2
Sevilla	B4-W	9,60	(1,40)	20,00	0,55	(76)	1,8	9,3	10,9
Soria	E1-Z	3,60	(2,10)	4,00	0,10	(692)	(25,1)	52,5	63,5
Tarragona	B3-W	6,40	(2,10)	10,00	0,29	(429)	(10,4)	17,5	20,9
Teruel	D2-Z	4,80	(2,10)	7,00	0,18	(578)	(17,4)	28,1	33,7
Toledo	C4-X	7,20	(2,10)	11,00	0,34	(364)	(7,8)	15,1	17,9
Valencia	B3-W	7,10	(1,80)	14,00	0,36	(336)	(6,8)	14,2	16,9
Valladolid	D2-Y	4,00	(2,30)	4,20	0,11	(673)	(23,5)	45,6	55,1
Vitoria	D1-Y	3,30	(2,20)	2,90	0,07	(729)	(28,6)	72,7	88,2
Zamora	D2-Y	4,10	(2,30)	4,80	0,12	(653)	(22,1)	40,4	48,8
Zaragoza	D3-X	4,90	(2,00)	7,80	0,19	(558)	(16,3)	25,9	31,2

## 8.4. Conclusiones del estudio de la rentabilidad de cool roofs

Se ha estimado que el coste de convertir un tejado convencional en cool roof con una pintura de alta calidad con reflectividad garantizada mínima del 60% y emitancia superior al 90% varía según el escenario entre:

- 1,91 €/m<sup>2</sup> si el tejado está en mal estado y debe repararse. Este coste es la diferencia entre finalizar la última capa de pintura con una pintura termorreflectante de alta calidad o una pintura convencional.
- 9,45 €/m<sup>2</sup> si el tejado está en buen estado y se contrata mano de obra para aplicar la pintura termorreflectante.
- 5,49 €/m<sup>2</sup> si el tejado está en buen estado y no se contrata mano de obra sino que el propietario, amigos, vecinos o voluntarios son lo que aplican la pintura termorreflectante.

Con estas premisas se concluye que la rentabilidad de invertir convertir tejados de edificios antiguos a cool roofs siempre es mayor, como ya se anticipaba en los capítulos anteriores, dado que los edificios recientes han sido construidos con un grado de aislamiento térmico mayor. Merece la pena recordar que la gran mayoría de los edificios españoles pueden clasificarse como antiguos (fueron construidos según la norma NBE-79, anterior al CTE-2006). Según las distintas tipologías de edificios y escenarios, pueden resumirse los resultados del análisis de rentabilidad como:

- **Edificios antiguos** (construidos antes del 2008):
  - **Tejados en mal estado:**
    - **Oscuros:** las inversiones en utilizar la opción cool roof en este caso son altamente rentables para toda España salvo para Lugo, Orense, Oviedo, Santander, Burgos y Palencia. Todas las principales ciudades españolas recuperarían la inversión antes de 3 años y con una TIR superior al 50% excepto Bilbao que recuperaría la inversión en unos 6 años con una TIR del 17%.
    - **Medios:** Si el tejado de partida es de color medio, la rentabilidad baja en magnitud pero sigue siendo positiva y

recomendable para toda España salvo para la zona del noroeste. A la lista de provincias que no recuperaría la inversión en el periodo de estudio de 10 años se añaden La Coruña, Vitoria y Logroño. Todas las grandes ciudades españolas se beneficiarían en este escenario con una tasa de rentabilidad aceptable, que para Madrid sería del 38%, para Barcelona del 150%. Bilbao estaría ya en la zona límite con una TIR del 4%.

- **Tejados en buen estado con mano de obra:** Las provincias andaluzas, el litoral mediterráneo y las Islas son las regiones que presentan una rentabilidad atractiva para tejados oscuros en buen estado al contratar mano de obra. Entre estas zonas rentables se encuentran Barcelona, Valencia, Sevilla o Murcia. Sin embargo, en el caso de tejados medios se reduce la rentabilidad, dejando de ser rentable para ciudades como Barcelona o Valencia, y sólo se beneficiarían las zonas de climas muy cálidos como Sevilla, Murcia o las Islas.
- **Tejados en buen estado sin mano de obra:** Este escenario es rentable para todas las grandes ciudades de España, salvo Bilbao, con tasas internas de retorno superiores al 10% para Madrid, 20% para Barcelona, 30% para Valencia y 60% para Sevilla. En el caso de tejados medios, Madrid deja de ser rentable y ciudades como Barcelona, Valencia y Sevilla mantienen una rentabilidad aceptable con una TIR mayor del 10%. Convertir los tejados que estén en buen estado a cool roofs sin incurrir en los costes de mano de obra incrementa la rentabilidad, cubriendo más zonas de España, lo que conduce a pensar que tendría mucho sentido organizar programas de voluntarios para realizar estas acciones como actualmente se lleva a cabo en ciudades como Nueva York, Chicago, Los Ángeles o Toronto (Hoag, 2015).
- **Edificios nuevos** (construidos después de 2008):

- **Tejados en mal estado:** Desde el punto de vista de la rentabilidad económica, sólo tendría sentido intervenir masivamente en edificios nuevos en el caso de tejados en mal estado. Todas las provincias de España se beneficiarían de la medida salvo la zona noroeste.
  - **Oscuros:** En las grandes ciudades sería rentable convertir tejados oscuros excepto en Bilbao. Barcelona y Madrid tienen una TIR aceptable, menor del 10% y para el resto de ciudades más pobladas la rentabilidad sigue siendo muy atractiva con tasas internas de retorno superiores al 40% para Valencia, Sevilla, Murcia y resto de capitales del sur.
  - **Medio:** Si el tejado de partida es de color medio, Madrid ya dejaría de ser rentable y aunque la TIR sigue siendo positiva, el VAN arrojaría una pérdida de 50 € y la inversión descontada se recuperaría a los 10,4 años.
- **Tejados en buen estado:**
  - **Oscuros:** Sólo tendría sentido el escenario de no contratar mano de obra con tejados oscuros para todas las provincias de Andalucía, Murcia, Alicante y las Islas. La rentabilidad sería aceptable con una TIR en torno al 10 % en Almería, Cádiz, Córdoba, Huelva, Las Palmas, Murcia, Palma de Mallorca, S.C. de Tenerife y Sevilla.
  - **Medios:** Para tejados medios, la inversión no sería recomendable en ninguna provincia. Sólo Cádiz y S.C. de Tenerife no perderían dinero en el periodo analizado, pero el VAN de 48 € y 20 € tampoco hacen recomendable la inversión. Murcia, Huelva y Las Palmas de G.C. estarían en la zona límite negativa. Para el resto de escenarios (contratando y sin contratar mano de obra) no sería rentable a nivel particular adaptar el tejado por motivos económicos.

Para tener otra perspectiva más clara de los resultados, se analizan a continuación los distintos escenarios para las ciudades españolas más pobladas en orden descendente según número de habitantes. De este modo es más sencillo adelantar de qué manera se aprovecharían mejor las inversiones en cool roofs. En la *Tabla 8-18* se detallan los resultados.

**Tabla 8-18. Tabla-resumen de rentabilidad de escenarios de inversión en cool roof en las principales capitales de provincias españolas.**

Ciudad	Antiguos		Modernos	
	Oscuros	Medios	Oscuros	Medios
Madrid	●	○	○	○
Barcelona	●	●	○	○
Valencia	●	●	○	○
Sevilla	●	●	●	○
Zaragoza	●	○	○	○
Málaga	●	●	●	○
Murcia	●	●	●	○
Palma de Mallorca	●	●	●	○
Las Palmas de G.C.	●	●	●	●
Bilbao	○	○	○	○

- Es rentable para todos los escenarios, incluso contratando mano de obra.
- Es rentable para tejados en mal estado y en buen estado sin contratar mano de obra.
- Es rentable sólo si el tejado está en mal estado.
- No es rentable para ningún escenario.

Se pueden agrupar las ciudades españolas más pobladas en cuatro grandes grupos según cómo se debería enfocar un despliegue masivo para optimizar los beneficios que se obtendrían de realizar inversiones masivas en cool roof:

- **Grupo 1: Sevilla, Málaga, Murcia, Palma de Mallorca y las Palmas de G.C.** En este caso, las inversiones se recuperarían siempre en edificios antiguos (mal estado y buen estado contratando y sin contratar mano de obra). Para edificios nuevos, sólo merece la pena intervenir si se puede hacer sin mano de obra en edificios de tejados oscuros.
- **Grupo 2: Barcelona y Valencia.** Para este grupo, deberían enfocarse los esfuerzos en los edificios antiguos. Se deben priorizar las actuaciones en

tejadados oscuros y recomendar las de tejados medios que pueden hacerse sin mano de obra.

- **Grupo 3: Madrid y Zaragoza.** En este caso lo más conveniente sería enfocarse en transformar los edificios antiguos. Se deben priorizar las actuaciones en tejados oscuros y recomendar las de tejados medios que pueden hacerse sin mano de obra.
- **Grupo 4: Bilbao y resto de ciudades del norte.** Para estas provincias, convendría estudiar la rentabilidad de otras opciones como el uso de tejados verdes, dado que los ahorros que proporcionan los cool roofs no son suficientes para justificar las inversiones.

Extrapolando esta clasificación al resto de provincias, se puede delimitar el territorio español en cuatro grandes zonas de actuación que pueden tomarse como base para decidir y priorizar las acciones que maximicen la rentabilidad de las inversiones en cool roofs. La distribución geográfica de las zonas se muestra en la Ilustración 10-1. Estas zonas y las acciones recomendadas en cada una se resumen a continuación:

- **Zona muy alta rentabilidad** (incluye Sevilla, Málaga, Murcia, Palma de Mallorca y las Palmas de G.C.):
  - Enfocar los esfuerzos en edificios antiguos. Comenzar por los oscuros y continuar con los claros.
  - Aprovechar para fomentar el empleo en estas zonas con cursos de formación especializados, dado que aún contratando mano de obra la inversión en cool roofs es rentable para los ciudadanos.
  - Cambiar la normativa para que sea siempre obligatorio utilizar materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.
- **Zona de alta rentabilidad** (incluye Barcelona y Valencia):
  - Enfocar las actuaciones en edificios antiguos de tejados oscuros.
  - Lanzar programas de voluntarios para adaptar edificios antiguos con tejados medios.



- Recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.
- **Zona de rentabilidad media** (incluye Madrid y Zaragoza):
  - Lanzar programas de voluntarios para adaptar tejados oscuros en edificios antiguos.
  - Recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados oscuros y en las nuevas edificaciones.
- **Zona desaconsejada para el uso de cool roofs:** (incluye Bilbao y las provincias del Noroeste).
  - Estudiar caso por caso la adecuación de utilizar cool roofs con datos locales y valorar la utilización de otras opciones como los tejados verdes.

## 8.5. Análisis de sensibilidad del estudio de la rentabilidad de cool roofs

No solo es interesante estudiar la distribución geográfica de la rentabilidad de convertir los tejados de las viviendas en cool roofs sino que es necesario una estimación de cómo se modifican los cálculos económicos desarrollados en función de diferentes parámetros de entrada.

Para ello, se ha desarrollado una herramienta en *Mathematica* que, dinámicamente, modifica los resultados obtenidos en el apartado 8.3 en función de diferentes parámetros de entrada como son parámetros físicos de emitancias, reflectancias o transmitancias, parámetros macroeconómicos como el IPC, la tasa de descuento o el precio de la electricidad y del gas, o parámetros propios del estudio como los años de la inversión. La herramienta puede verse en la *Ilustración 8-16*, donde la información de salida es recogida en una tabla que se modifica dinámicamente.

Los escenarios definidos en el apartado 8.3 han sido realmente conservadores, utilizando casos desfavorables como, por ejemplo, suponer un valor de la reflectividad de la pintura de 60. Sin embargo, el valor de la reflectividad de la pintura dada por Revetón es de 70. Utilizando la herramienta desarrollada en

*Mathematica* con datos más ajustados pueden extraerse conclusiones sobre la sensibilidad del estudio.

Como ha podido observarse en el apartado 8.3, el peor escenario en cuanto a rentabilidad, de forma general, correspondía a pintar tejados de edificios modernos contratando mano de obra especializada. Sin embargo, los resultados del análisis de sensibilidad han demostrado que sí que puede ser rentable para algunas regiones de España y en determinadas situaciones:

- Si los precios de la electricidad y el gas se incrementaran en un 50% respecto a los utilizados en el estudio, sería rentable pintar de blanco para Andalucía, provincias cercanas a ella como Badajoz, Murcia o Alicante y las zonas insulares.
- Si los precios de la electricidad y el gas se incrementaran en un 75%, la rentabilidad se extendería completamente a Extremadura, sur de Castilla-La Mancha, y el Levante español.
- Finalmente, si los precios de la electricidad y el gas se incrementaran en un 100% y el estudio se extendiera a 15 años, sería rentable pintar de blanco contratando mano de obra para toda la zona centro y sur de España y la zona mediterránea.

Esto demuestra que, incluso para el peor escenario de los presentados en el apartado 8.3, puede llegar a ser rentable convertir el tejado en buen estado en un cool roof para la mitad de la geografía española en función de los precios de la electricidad o del gas.

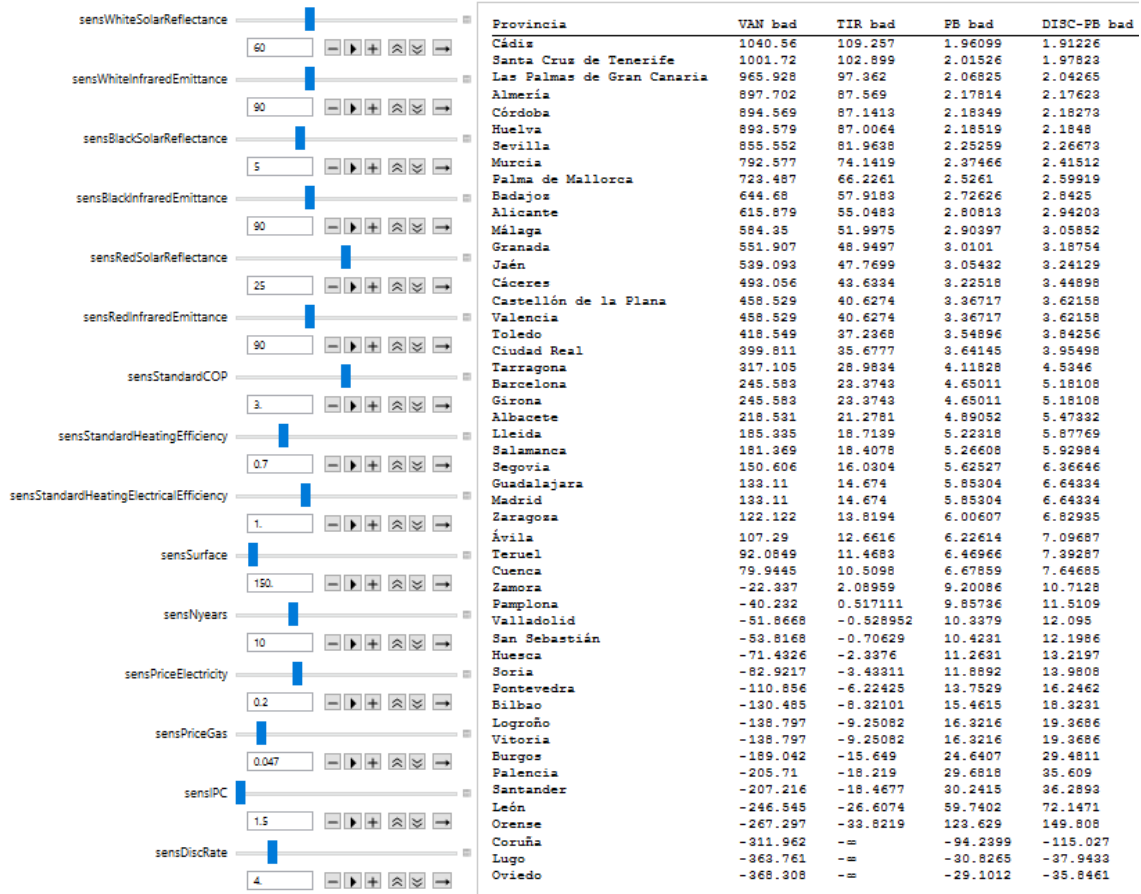


Ilustración 8-16. Herramienta dinámica desarrollada en *Mathematica* para el análisis de sensibilidad del estudio de la rentabilidad de cool roofs.



## 9. VALIDACIÓN DE RESULTADOS CONTRA OTRAS PUBLICACIONES

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en este trabajo, se ha realizado una simulación para las seis principales ciudades españolas (Barcelona, Bilbao, Madrid, Murcia, Sevilla y Valencia) en las mismas condiciones y con precios de la energía obtenidos de (European Union, 2010). La simulación utilizó los siguientes parámetros:

- Reflectancia solar: se incrementó de 10% a 40%
- Emitancia infrarroja: se mantuvo constante en 90%
- R-value o transmitancia térmica: 1,94 m<sup>2</sup>k/W (11 h ft<sup>2</sup> °F/Btu)
- COP: 2,3
- EER:
  - Calefacción de gas: 0,7
  - Calefacción eléctrica: 1

Posteriormente se realizó otra simulación en las mismas condiciones para algunas ciudades de Estados Unidos con condiciones climáticas en lo posible similares. Estas ciudades son: Atlanta, Austin, Chicago, Houston, Los Ángeles, Nueva York y Sacramento. Los resultados de esta simulación se verificaron sobre la herramienta *DOE Cool Roof Calculator* (ORNL, 2005b), documentada en la referencia (Petrie et al., 2001). Los precios de la energía estadounidense se obtuvieron de la EIA (EIA, 2011a, 2011b) en Junio de 2011.

Los resultados de la simulación para las ciudades españolas se muestran en la *Tabla 9-1*. Los de las ciudades americanas se presentan en la *Tabla 9-2*. Ambas tablas representan la variación de la demanda energética anual de aire acondicionado y calefacción en kWh y los ahorros económicos en €/m<sup>2</sup> por año a precios actuales. Comparando ambas tablas, se observa que el potencial de ahorro en España es mucho mayor debido a que el coste de la energía es mucho más alto que en Estados Unidos.

**Tabla 9-1. Ahorros detallados para ciudades españolas seleccionadas en demanda de energía (kWh/m<sup>2</sup> año) y coste (€/m<sup>2</sup>) para un R-value de 1,94 m<sup>2</sup>K/W (11 h ft<sup>2</sup> F/Btu) y un incremento en la reflectividad solar de 10% a 40%, COP= 2,3, EER gas= 0,7, EER eléctrica= 1.**

Ciudad	Zona	HDD °C -d	CDD °C -d	Irradiación kWh m <sup>2</sup> -d	Ahorro	Ahorro	Calefacción Gas		Calefacción Eléctrica	
					Refrig. kWh m <sup>2</sup> -a	Calefac. kWh m <sup>2</sup> -a	Precio €/kWh	Ahorro €/m <sup>2</sup> a	Precio €/kWh	Ahorro €/m <sup>2</sup> a
Barcelona	C2-W	1.300	531	4,3	6	(1,7)	0,047	0,4	0,2	0,18
Bilbao	C1-W	1.721	286	3,9	3,4	(2,1)	0,047	0,15	0,2	(0,13)
Madrid	D3-Y	2.431	580	4,4	6,4	(2,7)	0,047	0,38	0,2	0,021
Murcia	B3-W	661	835	5,1	8,6	(0,95)	0,047	0,68	0,2	0,56
Sevilla	B4-W	1.035	1.086	4,9	9,5	(1,4)	0,047	0,73	0,2	0,54
Valencia	B3-W	1.336	652	4,5	7	(1,7)	0,047	0,49	0,2	0,26

**Tabla 9-2. Ahorros detallados para ciudades de EEUU seleccionadas en demanda de energía (kWh/m<sup>2</sup> año) y coste (€/m<sup>2</sup>) para un R-value de 1,94 m<sup>2</sup>K/W (11 h ft<sup>2</sup> F/Btu) y un incremento en la reflectividad solar de 10% a 40%, COP= 2,3, EER gas= 0,7, EER eléctrica= 1, 1 Euro= 1 USD.**

Ciudad	Estado	HDD °C -d	CDD °C -d	Irradiación kWh m <sup>2</sup> -d	Ahorro	Ahorro	Calefacción Gas		Calefacción Eléctrica	
					Refrig. kWh m <sup>2</sup> -a	Calefac. kWh m <sup>2</sup> -a	Precio €/kWh	Ahorro €/m <sup>2</sup> a	Precio €/kWh	Ahorro €/m <sup>2</sup> a
Atlanta	GA	1.700,	890	4,7	8,5	(2,1)	0,055	0,098	0,071	0,11
Austin	TX	910	1.600,	4,9	11	(1,3)	0,037	0,31	0,078	0,28
Chicago	IL	3.600,	420	3,9	4,6	(3,4)	0,029	0,012	0,077	(0,11)
Houston	TX	860	1.600,	4,4	10	(1,2)	0,037	0,29	0,078	0,26
Los Angeles	CA	720	260	5	3,8	(1)	0,026	0,14	0,11	0,07
New York	NY	2.800,	560	4	5,9	(3)	0,033	0,18	0,12	(0,052)
Sacramento	CA	1.600,	640	4,9	7,3	(2)	0,026	0,27	0,11	0,13

Akbari (H. Akbari, 2005) realizó una simulación en el programa de simulación energética DOE-2 con los mismos parámetros utilizados en esta simulación. En la publicación se mencionan dos ciudades españolas: Barcelona y Madrid. Se estimó que Barcelona tenía un ahorro en la demanda de refrigeración de 258 kWh/100 m<sup>2</sup> o, lo que es lo mismo 2,58 kWh/m<sup>2</sup>. Como se puede observar en la *Tabla 9-1*, en esta simulación se estiman unos ahorros para Barcelona de 6 kWh/m<sup>2</sup>, que ajustado con el COP de la máquina de aire acondicionado, resultan en 2,61 kWh/m<sup>2</sup>, un dato que cuadra bastante bien con los 2,58 kWh/m<sup>2</sup> de Akbari. En el mismo estudio, Madrid tiene un ahorro en la demanda de refrigeración 3,62 kWh/m<sup>2</sup>. En esta simulación, el ahorro en la demanda de calefacción es de 2,78 kWh/m<sup>2</sup>. Pero Akbari utilizó un valor de CDD de 886 frente a los 580 que se utilizaron en este estudio (ver *Tabla 9-1*), por lo que la

comparativa suena razonable. Desafortunadamente, en la publicación de Akbari no se presentan datos de la irradiación solar que permitirían hacer una comparación más ajustada. En el mismo estudio de Akbari, Sacramento ahorra 3,2 kWh/m<sup>2</sup> en la demanda de refrigeración, dato que se ajusta bastante bien a los 3,17 kWh/m<sup>2</sup> obtenidos en este estudio tal y como muestra la *Tabla 9-2*. También la comparación de los resultados de Atlanta con 4,26 kWh/m<sup>2</sup> frente a los 3,7 kWh/m<sup>2</sup> obtenidos de la *Tabla 9-2*, teniendo en cuenta que Akbari utiliza un CDD de 1104 y en este estudio se utiliza el mismo valor de 890 que aparece en el DOE Cool Roof Calculator (ORNL, 2005b).





## 10. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

### 10.1. Conclusiones

El control de radiación en los tejados mediante la variación del color de su superficie (técnica conocida internacionalmente como Cool Roof), es un método económico y simple para mejorar el nivel de confort en los edificios en climas templados y cálidos. Una implantación a gran escala de esta técnica puede contribuir a reducir la contaminación y a bajar la demanda de potencia pico, resultando en ahorros económicos tanto para las compañías energéticas como para los usuarios.

Una implantación a gran escala en Andalucía puede ahorrar potencialmente 295.000 kWh anuales (un 2% del consumo de electricidad residencial), teniendo en cuenta sólo edificios residenciales con el tejado plano. Con los precios actuales, los usuarios podrían ahorrar 59 millones de euros al año en electricidad. La ausencia de producción de esta electricidad podría evitar la emisión de 136.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Estas cifras se han calculado asumiendo que todas las viviendas tienen calefacción eléctrica (caso peor).

Una vivienda con el tejado plano que sea de color oscuro en Cádiz con calefacción eléctrica, podría ahorrar un 19% (13% con un tejado rojo) de la demanda de energía termal pintando el tejado de blanco. Una casa en Huelva podría ahorrar entre el 10% y el 15% y una en Sevilla entre el 7% y el 10%.

Si se considera el efecto de los forzamientos radiativos en la atmósfera, instalar cool roofs en todas las residencias con tejado plano podría evitar potencialmente la emisión de entre 9,44 y 12 megatoneladas de CO<sub>2</sub>.

Expandiendo el estudio al resto de España, la instalación de tejados frescos resultaría en ahorros positivos en viviendas con calefacción de gas para todas las ciudades estudiadas salvo las tres provincias del noroeste: Oviedo, Lugo y La Coruña. Los ahorros máximos se obtienen en Gran Canaria (48% de reducción en el coste de la energía), Tenerife (48%), Cádiz (36%), Murcia (33%), Huelva (30%), Málaga (29%), Almería (29%) y Sevilla (28%), donde los

ahorros son mayores o iguales de 2 €/m<sup>2</sup> para edificios antiguos con tejados oscuros.

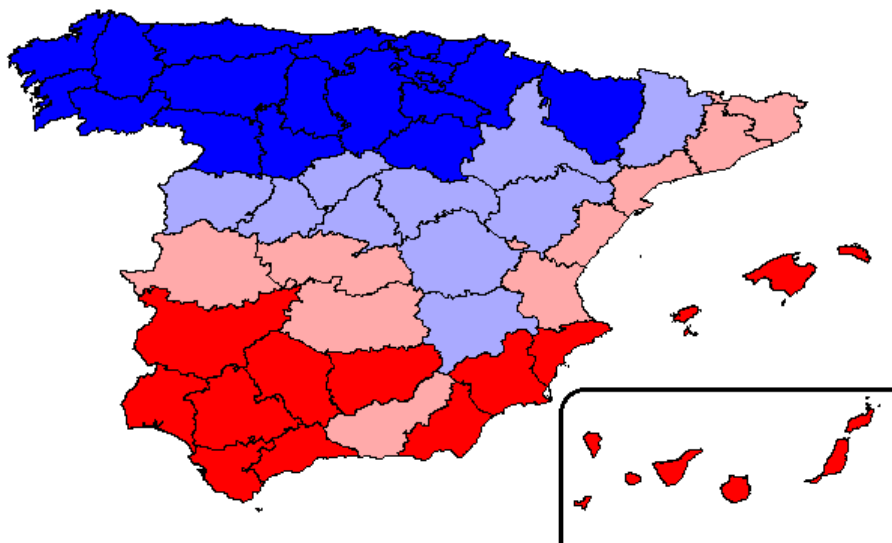
Las principales ciudades españolas obtendrían ahorros positivos que irían de los 0,2 a 0,76 euros por metro cuadrado en Madrid (del 7,4% al 11% de ahorro en coste de la energía), de 0,25 a 1,1 €/m<sup>2</sup> en Barcelona (del 12% al 18% del coste) y de entre 0,36 y 1,4 €/m<sup>2</sup> en Valencia (entre 14% y el 20% del coste), en estos casos considerando calefacción de gas.

Si se utilizara calefacción eléctrica, implantar tejados reflectivos en las provincias situadas más al norte resultaría en una penalización tanto en energía como en coste. La lista de ciudades con penalización incluye todas las de las provincias del norte incluidas en las zonas climáticas C1 (Bilbao, Coruña, Oviedo, Santander, San Sebastián, Pontevedra), C2 (Orense), D1 (Lugo, Palencia, Pamplona, Vitoria), D2 (Cuenca, Huesca, Logroño, Salamanca, Segovia, Teruel, Valladolid, Zamora), D3 (Albacete, Guadalajara, Lleida, Madrid, Zaragoza) y E1 (Ávila, Burgos, León, Soria). En todas estas provincias habría una penalización importante en la calefacción, resultando en un impacto neto negativo en el balance energético final. Este resultado negativo varía desde los -0,012 €/m<sup>2</sup> de un edificio nuevo con tejado de color medio en Albacete hasta los ya sí significativos -1,30 €/m<sup>2</sup> de un edificio antiguo con tejado oscuro en Orense. Pero en la actualidad, la mayoría de casas en estas regiones no utiliza calefacción eléctrica, sino de gas o de gasoil.

En general, aunque los ahorros económicos son significativos para la mayoría de las regiones (en torno a 1 €/m<sup>2</sup> anual en media), probablemente no son suficientes para justificar por ellos mismos la intervención en un tejado en buen estado si hay que contratar a otras personas para realizarla, por lo que debe prestarse atención a la ubicación geográfica del edificio. Sin embargo, en la construcción de un nuevo tejado o en la reparación o mantenimiento regular de un tejado, el coste marginal de aplicar una capa reflectiva es mínimo: de 0 a 2 €/m<sup>2</sup> para una pintura certificada de alta calidad.

Se puede delimitar el territorio español en cuatro grandes zonas de actuación que pueden tomarse como base para decidir y priorizar las acciones que maximicen la rentabilidad de las inversiones en cool roofs. Estas zonas se

representan geográficamente en la *Ilustración 10-1* y a continuación se resumen las acciones recomendadas para cada una de ellas:



**Ilustración 10-1. Zonas actuación según rentabilidad de inversiones en cool roofs.**

Para cada una de las zonas, se muestran a continuación las ciudades más pobladas de España que incluye y las acciones recomendadas para ese caso:

**■ Zona de muy alta rentabilidad** (incluye Sevilla, Málaga, Murcia, Palma de Mallorca y las Palmas de G.C.):

- Enfocar los esfuerzos en edificios antiguos. Comenzar por los de tejado oscuro y continuar con los tejados de colores medios (rojo, gris claro, verde, etc.).
- Aprovechar para fomentar el empleo en estas zonas con cursos de formación especializados, dado que aún contratando mano de obra la inversión en cool roofs es rentable para los ciudadanos.
- Cambiar la normativa para que sea siempre obligatorio utilizar materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.

**■ Zona de alta rentabilidad** (incluye Barcelona y Valencia):

- Enfocar las actuaciones en edificios antiguos de tejados oscuros.
- Lanzar programas de voluntarios para adaptar edificios antiguos con tejados de colores medios.

- Recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados y en las nuevas edificaciones.

■ **Zona de rentabilidad media** (incluye Madrid y Zaragoza):

- Lanzar programas de voluntarios para adaptar tejados oscuros en edificios antiguos.
- Recomendar siempre el uso de materiales termorreflectantes en las reparaciones de tejados oscuros y en las nuevas edificaciones.

■ **Zona desaconsejada para el uso de cool roofs:** (incluye Bilbao y las provincias del Noroeste).

- Estudiar caso por caso la adecuación de utilizar cool roofs con datos locales y valorar la utilización de otras opciones como los tejados verdes.

En todos los casos, a la hora de decidir si se quiere instalar un cool roof, además de los posibles ahorros económicos si se dispone de aire acondicionado, debe tenerse en cuenta la mejora del confort térmico dentro de la vivienda y otros beneficios como la reducción del deterioro del tejado o la reducción de la temperatura en las inmediaciones del edificio.

## 10.2. Recomendaciones

- **Desarrollo de legislación para incluir el uso de tejados frescos en la normativa vigente:** Estos resultados preliminares sugieren que debería revisarse la legislación vigente para incluir el uso de estas técnicas de control de radiación en los tejados o cool roof en España. Deberían definirse nuevos estándares en los códigos de construcción que incluyan el uso de cool roofs en la construcción y la rehabilitación de edificios en determinadas zonas geográficas. Un buen ejemplo de normativa es la "Title 24" vigente en California (Estados Unidos). Los resultados obtenidos, sugieren que sería prioritario actuar en Andalucía y en las principales provincias del Sur y la costa de Levante, además de las islas.
- **Ejecutar con urgencia una investigación piloto en una zona urbana de las que más se beneficiarían de los cool roofs** (Cádiz, Murcia o

Sevilla) con el fin de cuantificar los beneficios indirectos de una inversión masiva en cool roofs (reducción del efecto isla de calor urbana (temperatura ambiente), cuantificación de ahorros en la demanda pico en los días más calurosos, reducción de los costes de mantenimiento de los tejados debido al menor estrés térmico, reducción de la contaminación en el área, etc.). De esta manera, se podrían cuantificar y modelizar los verdaderos beneficios de este tipo de actuaciones que se derivan del uso colectivo de la medida en toda una zona.

- **Realización de campañas informativas entre la industria y los ciudadanos:** También deberían programarse campañas de sensibilización pública para promover el uso de cool roofs entre la población. No hay que olvidar que los mayores beneficios del uso de esta tecnología se obtienen de aplicaciones a gran escala en los núcleos urbanos, porque se reduce el efecto *isla de calor* mejorando el confort térmico y la contaminación de toda la zona en verano. Como se ha visto durante la investigación, adaptar los tejados sin añadir el coste de mano de obra es rentable para los ciudadanos. Se han desarrollado a nivel internacional algunos organismos que ayudan a poner en marcha planes para hacer conversiones masivas en los núcleos urbanos. Normalmente los dirige un ayuntamiento o institución similar. Algunos ejemplos de organizaciones de este tipo son el “European Cool Roof Council” (<http://coolroofcouncil.eu>), la “Global Cool Cities Alliance (GCCA)“, la “Globalcoolcities.org” (<http://www.globalcoolcities.org>) o la organización americana “Cities of Service”, que proporciona un kit paso a paso para organizar estas actividades de pintado colectivo en las ciudades americanas.

Se abren aquí dos vías interesantes cuya cuantificación debe ser fruto de futuras investigaciones:

- **Actuaciones institucionales y colaboraciones público-privadas:** Realizar actuaciones conjuntas a nivel regional formando grupos de trabajo para adaptar grandes núcleos urbanos, podría generar un número elevado de puestos de trabajo. El ciudadano podría afrontar el coste de los materiales y

la administración aportar la mano de obra. Sería una manera indirecta de recibir una subvención donde todas las partes ganarían: se reduciría el paro en la zona con lo que la administración recuperaría vía impuestos parte de la inversión. Al reducir la contaminación y la temperatura de la zona, se reducen también los costes médicos para los servicios públicos. Los ciudadanos tendrían un mayor confort térmico y se reducirían los picos de demanda de electricidad en hora punta, con lo que las empresas del sector energético podrían tener un ahorro considerable al reducir el dimensionamiento de las redes de distribución y el coste de la gestión de estos picos de demanda que en algunos días llegan incluso a generar interrupciones en el servicio. También la utilización masiva de productos de alta reflectividad o termorreflectantes, conllevaría a una bajada del precio al aumentar la demanda por las economías de escala en su producción.

- **Desarrollo de iniciativas ciudadanas para pintar los tejados:** Existen varios programas de voluntariado en otros países que han sido muy exitosos. Por ejemplo, el programa de la ciudad de Nueva York ha conseguido convertir 6 millones de pies cuadrados (unos 560.000 m<sup>2</sup>) a tejados frescos desde que fue creado en 2009. Iniciativas similares pueden encontrarse en Chicago, Pittsburgh, Melbourne y Washington D.C.
- **Realización de más investigación en España y Europa:** Sería deseable realizar más investigación sobre las ventajas de utilizar tejados reflectivos en España y en otras partes de Europa, en especial en Italia, Grecia y Francia, dado que sus mercados (incluyendo España) de aire acondicionado representan más de tres cuartos del mercado para el EU-27 (Riviere et al., 2008).
- **Revisión de la definición de zonas climáticas en España:** las inconsistencias en la definición de las diferentes zonas climáticas en España pueden estar causando un perjuicio económico significativo, dado que la utilización de un nivel inadecuado de aislamiento resulta en

una mayor demanda de energía. Estas inconsistencias pueden verse por ejemplo entre Barcelona y Oviedo, ambas perteneciendo a la zona C2 y con diferencias entre los CDD y HDD de casi el 50%.

### 10.3. Aportaciones

Durante la realización de esta tesis doctoral, se ha interactuado con diversos organismos internacionales para recabar información y para solucionar problemas y errores que fueron detectados en otras herramientas publicadas. Las aportaciones principales se pueden resumir en la siguiente lista que se desarrolla durante este apartado:

- Publicación de un artículo en revista internacional de alto impacto que hasta el momento ha sido citado desde los cinco continentes en 38 publicaciones internacionales de prestigio y 1 libro.
- Primera estimación económica para la aplicación de cool roofs en España y primer análisis de rentabilidad de esta técnica para un país europeo.
- Creado un modelo y una herramienta dinámica para el cálculo de ahorros y rentabilidad que puede ser utilizado para futuras investigaciones, tanto en España como en otros países.
- Detectados errores en el cálculo de zonas climáticas de España.
- Detectados y corregidos errores en la calculadora del mayor proyecto europeo del sector.
- Encontrado un error significativo en los datos de la NASA y analizado su impacto en la aplicación RETScreen (Natural Resources Canada, 2015).

#### 10.3.1. Publicación del artículo en revista internacional de alto impacto

Esta tesis doctoral ha dado lugar a la siguiente publicación:

*Boixo, S., Díaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. Energy, 38(1), 425-438.*

*Energy* es la revista internacional revisada por pares de más prestigio en este campo de investigación. Pertenece al grupo *Elsevier* y tiene las siguientes métricas de uso en octubre de 2015:

- Source Normalized Impact per Paper (SNIP): 2.548.
- SCImago Journal Rank (SJR): 2.576.
- Impact Factor: 4.844.
- 5-Year Impact Factor: 5.153.
- En el cuartil Q1 tanto en *Energía y Combustibles* como en *Termodinámica*.

A día 8 de octubre de 2015, dicho artículo (Boixo, Díaz-Vicente, Colmenar, & Castro, 2012) ha sido citado en 38 publicaciones internacionales de prestigio y 1 libro según Google Scholar y Scopus (ver *Anexo I. Referencias del Artículo Publicado* en *Energy*) por autores de los cinco continentes. Su distribución geográfica se recoge en la *Ilustración 10-2*.



**Ilustración 10-2. Distribución geográfica de las citas de la publicación Boixo, S., Díaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*, 38(1), 425-438.**



### **10.3.2. Primera estimación económica para la aplicación de cool roofs en España y primer análisis de rentabilidad de esta técnica para un país europeo**

Este trabajo constituye la primera estimación científica a nivel internacional de los ahorros potenciales de aplicar la técnica de cool roofs en España, de la determinación geográfica de las áreas que más podrían beneficiarse de su utilización y una cuantificación en ahorros y rentabilidad que ayude a tomar medidas adecuadas a las autoridades para su aplicación.

### **10.3.3. Modelo y herramienta dinámica interactiva para cálculos**

El modelo para el cálculo de los ahorros y rentabilidad utilizado en este trabajo, ha sido implementado mediante una herramienta dinámica que puede ser utilizada para futuras investigaciones, tanto en España como en otros países. La herramienta ha sido desarrollada en *Mathematica* y puede ser trasladada con facilidad a otras plataformas. El aspecto de parte de esta herramienta se muestra en el capítulo de *8.5 Análisis de sensibilidad del estudio de la rentabilidad de cool roofs* y en el *Anexo V. Código fuente en Mathematica* se incluye un resumen de las principales funciones desarrolladas para este trabajo.

### **10.3.4. Detectados errores en el cálculo de zonas climáticas de España**

Durante la investigación se han encontrado inconsistencias en la definición de las diferentes zonas climáticas en España pueden estar causando un perjuicio económico significativo, dado que la utilización de un nivel inadecuado de aislamiento resulta en una mayor demanda de energía. Estas inconsistencias pueden verse por ejemplo entre Barcelona y Oviedo, ambas perteneciendo a la zona C2 y con diferencias entre los CDD y HDD de casi el 50%. En el apartado *7.5 Inconsistencias en la definición de las zonas climáticas* se puede consultar más información sobre los hallazgos.

### **10.3.5. Detectados y corregidos errores en la calculadora del mayor proyecto europeo del sector**

Tal y como se ha comentado en el apartado *5.2.3 Proyecto “Cool Roof” de la Unión Europea: aplicación Cool Roofs-EU*, durante la realización de esta tesis doctoral se encontraron errores en la herramienta para cálculo de ahorros por cool-roofs para ciudades europeas desarrollada dentro del marco “Intelligent Energy Europe Programme” (Programa de Europa Energía Inteligente). Tras comunicar los hallazgos y la forma de solucionarlos a sus autores, la herramienta fue corregida.

### **10.3.6. Encontrado un error significativo en los datos de la NASA y analizado su impacto en la aplicación RETScreen**

Durante la investigación para obtener los datos climatológicos (HDD y CDD) se encontró un error significativo de inconsistencias en los datos de diversas herramientas de la NASA. Se analizaron los motivos se encontró que la conocida herramienta para realizar estudios de viabilidad de proyectos con energías limpias, denominada RETScreen (Natural Resources Canada, 2015) está utilizando CDD en base 10 para calcular los ahorros de los diversos escenarios de refrigeración. Esto no es muy consistente con el mercado residencial, dado que utilizar una temperatura de 10 grados centígrados para refrigerar un domicilio no es lógico y está incluso fuera de los rangos considerados como saludables por las organizaciones médicas internacionales. La inconsistencia quedó reconocida por los funcionarios de la Nasa consultados, aunque los autores de RETScreen no han sido todavía contactados. Esta tarea se deja planificada para las líneas de investigación futuras.

## **10.4. Líneas de investigación futuras**

- **Desarrollo de un modelo matemático más exacto para el cálculo de la reducción de la demanda energética:** Como se ha descrito en la sección *5.2 Herramientas disponibles* sería deseable desarrollar un modelo matemático mejor aproximado que los disponibles en la actualidad.

- **Ampliar estudio para edificios industriales y/o de servicios en España:** Aunque esta tesis doctoral se ha enfocado en el mercado residencial, sería conveniente ampliar el estudio a edificios industriales y de servicios. Dado que los horarios comerciales suelen coincidir con la mayor demanda de refrigeración (las horas de más irradiación solar), **los beneficios van a ser en casi todos los casos mayores que para las residencias**, ya que al ser generalmente superficies mayores, reducir el grado de degradación del tejado al sufrir menos estrés térmico es un ahorro nada despreciable. La rentabilidad será generalmente más alta que para los edificios residenciales, ya que los edificios de grandes superficies suelen tener personal dedicado al mantenimiento, por lo que no se añadiría coste de mano de obra a las intervenciones y la reducción del pico de demanda eléctrica (en las horas de más calor) puede llevar asociados ahorros considerables en la potencia contratada, ahorro que se ha desestimado en este estudio para las residencias particulares.

Otro efecto importante en las empresas, es **el aumento en la salud laboral y su impacto en la productividad**. En España hay muchas naves industriales con tejado de metal, algunas ni siquiera disponen de refrigeración, por lo que en su interior se alcanzan temperaturas muy altas e incluso poco salubres. Al pintar una superficie de metal con las pinturas adecuadas, se cambia la emitancia del tejado además de la reflectividad de la superficie, por lo que los ahorros en la demanda de refrigeración y la bajada de la temperatura del interior es todavía mayor que para edificios con tejados de hormigón, teja o revestimientos cerámicos.

- **Necesidad de adaptar escenarios de fotovoltaica:** Sería muy interesante estimar los efectos de las instalaciones fotovoltaicas en la demanda de refrigeración de los edificios, dado que la superficie negra de los paneles fotovoltaicos puede estar resultando en un incremento de la carga de refrigeración. Algunos trabajos preliminares en edificios comerciales en Estados Unidos para placas de amorfas (“thin-film” en inglés, que normalmente van pegadas a la superficie del edificio) estimaban una penalización de entre un 2,5% en el mejor caso (para

tejados bien aislados y máquinas de aire acondicionado eficientes) y un 22% para edificios antiguos con un COP bajo situadas en zonas de alta irradiación (Kriner, 2009). Esto significa que entre el 2,5 y el 22% de la energía generada por el panel fotovoltaico tendría que ser utilizada para compensar el aumento en la demanda de refrigeración causada por el área oscura del panel. Aunque la energía que generan los sistemas es normalmente mucho mayor que la penalización en refrigeración, es posible que el efecto sea lo suficientemente significativo como para deber ajustar los escenarios globales de producción de fotovoltaica para este tipo de placas que van directamente adheridas a las fachadas y tejados de los edificios.

Por el contrario, otro efecto contrario a considerar por los cool roofs, es la oportunidad de aumentar la eficiencia de las placas solares de doble cara (al absorber también energía reflejada por el tejado fresco) y de las placas en general por la menor temperatura del ambiente. La eficiencia de los paneles fotovoltaicos actuales, suele decrecer notoriamente con la temperatura. Del mismo modo, también se puede esperar una mejora del rendimiento de los colectores solares de tubo de vacío para producir energía térmica, al aumentar la radiación difusa en el área y que estos panel si captan a diferencia de los de placa plana.

- **Retomar comunicación con RETScreen** para que solucionen los parámetros de cálculo, que pueden estar llevando a conclusiones equivocadas en los análisis de rentabilidad. Este tipo de herramientas se suelen utilizar por instituciones administrativas o científicas para hacer cálculos a gran escala, por lo que el efecto multiplicativo de las inconsistencias puede tener un alto impacto económico y estar llevando a tomar decisiones inadecuadas.
- **Redefinir las zonas climáticas para el territorio español** dado que las inconsistencias encontradas en las zonas actuales, pueden estar causando un impacto económico alto. Los códigos de edificación actuales se basan en estas zonas climáticas para definir los distintos grados de aislamiento que deben instalarse en las edificaciones nuevas y en las rehabilitaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- AAE. (2009). Agencia Andaluza de Energía. Datos energéticos de Andalucía 2009. Recuperado 8 de octubre de 2013, a partir de <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es>
- Akbari, H. (2005). Energy saving potentials and air quality benefits of urban heat island mitigation. *Solar Energy*, 1-19. <http://doi.org/DE-AC02-05CH11231>
- Akbari, H., Konopacki, S., & Pomerantz, M. (1999). Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. *Energy*, 24(5), 391-407. [http://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00105-4](http://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00105-4)
- Akbari, H., Levinson, R., Miller, W. A., & Berdahl, P. (2005). Cool colored roofs to save energy and improve air quality. En *International Conference «Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment», May 2005, Santorini, Greece* (pp. 89-100).
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 94(3-4), 275-286. <http://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- ASHRAE. (1998). *ASHRAE handbook: Refrigeration systems and applications*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- Bansal, N. K., Garg, S. N., & Kothari, S. (1992). Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings. *Building and Environment*, 27(1), 31-37. [http://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90005-A](http://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90005-A)
- Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R., & Miller, W. A. (2008). Weathering of roofing materials – An overview. *Construction and Building Materials*, 22(4), 423-433. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.015>
- Bertoldi, P., & Atanasiu, B. (2009). Electricity consumption and efficiency trends in European Union. *European Commission, Joint Research Centre. Institute for Energy, Status Rep.*
- Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*, 38(1), 425-438. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.009>
- Bretz, S., & Akbari, H. (1994). Durability of high-albedo roof coatings. *Proceedings of the ACEEE*, 65-75.

- <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.2172/10180653>
- Bretz, S., Akbari, H., & Rosenfeld, A. (1998). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32(1), 95-101. [http://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00182-9](http://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00182-9)
- Buchanan, T., DeLallo, M., Schoff, R., White, J., & R., W. (2000). Evaluation of innovative fossil fuel power plants with CO<sub>2</sub> removal. *EPRI, Palo Alto, CA, US DOE–Office of Fossil Energy, Germantown, MD and US DOE/NETL, Pittsburgh, PA, Interim report, 1000316(1000316)*.
- Castro, M., Delgado, A., Argul, F. J., Colmenar, A., Yeves, F., & Peire, J. (2005). Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of Southern Spain. *Solar Energy*, 79(1), 86-95. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.022>
- Cool Metal Roofing. (2015). [coolmetalroofing.org](http://www.coolmetalroofing.org). Recuperado 20 de marzo de 2015, a partir de <http://www.coolmetalroofing.org/>
- Cueli, A. B. (2003). Potencial fotovoltaico en edificios de viviendas por Comunidades Autónomas. *Era Solar*, 114, 42-49.
- Cummings, J. B., Withers, C. R., Sonne, J., Parker, D., & Vieira, R. K. (2007). UCF recommissioning, green roofing technology, and building science training; final report. *A Report Prepared for the Project: Research Meets Application -- Building Commissioning and Roofing Technology Project*.
- CYPE Ingenieros. (2015). Generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros. Recuperado 15 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.generadordeprecios.info/>
- Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M., & Zornes, M. (2011). Resource Revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs. *McKinsey & Company*.
- Dobbs, R., Oppenheimer, J., Thompson, F., Mareels, S., Nyquist, S., & Sunil, S. (2013). Resource Revolution: Tracking global commodity markets Trends survey 2013. *McKinsey & Company*, 44.
- EIA. (2011a). Electric power monthly - average retail price of electricity to ultimate customers by end-use sector, by state. Recuperado 5 de septiembre de 2014, a partir de <http://www.eia.gov/electricity/monthly/>
- EIA. (2011b). Natural gas prices. Average residential price. Recuperado 21 de septiembre de 2014, a partir de [http://www.eia.gov/dnav/ng/ng\\_pri\\_sum\\_a\\_EPG0\\_PRS\\_DMcf\\_m.htm](http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_a_EPG0_PRS_DMcf_m.htm)
- Esteban-Parra, M. J., Rodrigo, F. S., & Castro-Díez, Y. (1995). Temperature trends and change points in the northern Spanish Plateau during the last

- 100 years. *International Journal of Climatology*, 15(9), 1031-1042.  
<http://doi.org/10.1002/joc.3370150909>
- European Union. (2010). Europe's Energy Portal. Natural gas prices. Households. Recuperado 4 de noviembre de 2013, a partir de <http://www.energy.eu/#Domestic>
- García Casals, X., Domínguez Bravo, J., Linares Llamas, P., & López García, Ó. (2005). Greenpeace Renovables 2050. *Greenpeace*. Greenpeace Spain.
- Givoni, B., & Hoffman, M. E. (1968). *Prediction of the thermal behavior of full-scale buildings*. Building Research Station.
- Gómez, A., Zubizarreta, J., Dopazo, C., & Fueyo, N. (2011). Spanish energy roadmap to 2020: Socioeconomic implications of renewable targets. *Energy*, 36(4), 1973-1985. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.046>
- Google. (2006). Google Earth. *Searcher*, 14(1), 24-25.  
[http://doi.org/10.1016/S1353-4858\(15\)30015-5](http://doi.org/10.1016/S1353-4858(15)30015-5)
- Hoag, H. (2015). How cities can beat the heat. Recuperado 30 de agosto de 2015, a partir de [http://www.nature.com/polopoly\\_fs/1.18228!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/524402a.pdf](http://www.nature.com/polopoly_fs/1.18228!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/524402a.pdf)
- Hoff, J. L. (2005). The economics of cool roofing: A local and regional approach. *Cool Roofing Symposium*.
- IDAE. (2010). Base de datos de aparatos domésticos de aire acondicionado eficientes. Recuperado 14 de mayo de 2013, a partir de <http://www.idae.es/index.php/idpag.659/relcategoria.1161/mod.pags/mem.detalle>
- IDAE. (2011a). *Entidades acreditadas - IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IDAE. (2011b). Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020.
- IEA. (2010). Edificios destinados principalmente a viviendas según la época de construcción por provincia. Recuperado 27 de abril de 2014, a partir de [http://www.juntadeandalucia.es:9002/anuario/anuario10/cap08/anuario10-8\\_2\\_07.xls](http://www.juntadeandalucia.es:9002/anuario/anuario10/cap08/anuario10-8_2_07.xls)
- INE. (2009). Encuesta de hogares y medioambiente 2008. Calefacción y aire acondicionado. Recuperado 5 de diciembre de 2013, a partir de [http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica\\_P&cid=1254735976601](http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254735976601)

- INE. (2014). Población por capitales de provincia y sexo. Recuperado 27 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.html?padre=517&dh=1>
- Izquierdo, M., Moreno-Rodríguez, A., González-Gil, A., & García-Hernando, N. (2011). Air conditioning in the region of Madrid, Spain: An approach to electricity consumption, economics and CO<sub>2</sub> emissions. *Energy*, *36*(3), 1630-1639. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.068>
- Izquierdo, S., Rodrigues, M., & Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, *82*(10), 929-939. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2008.03.007>
- Konopacki, S., Akbari, H., Pomerantz, M., Gabersek, S., & Gartland, L. (1997). Cooling energy savings of light-colored roofs for residential and commercial buildings in 11 U.S. metropolitan areas. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 117. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.2172/508151>
- Konopacki, S., Gartland, L. M., Akbari, H., & Rainer, L. (1998). Demonstration of energy savings of cool roofs. *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Kriner, S. (2009). Thin-Film Photovoltaics and Their Impact on a Commercial Building's Cooling Load. *Canadian Roofing Contractor&Design*, January/Fe.
- Levinson, R., & Akbari, H. (2010). Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency*, *3*(1), 53-109. <http://doi.org/10.1007/s12053-008-9038-2>
- Levinson, R., Akbari, H., Berdahl, P., Wood, K., Skilton, W., & Petersheim, J. (2010). A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *94*(6), 946-954. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.12.012>
- Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., & Bretz, S. (2005). Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy*, *33*(2), 151-170. [http://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00206-4](http://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00206-4)
- Levinson, R., Akbari, H., & Reilly, J. C. (2007). Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment*, *42*(7), 2591-2605. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.005>
- Levinson, R., Berdahl, P., Asefaw Berhe, A., & Akbari, H. (2005). Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. *Atmospheric Environment*, *39*(40), 7807-7824.



<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.037>

- Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I., & Levinson, R. (2010). Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO<sub>2</sub> offsets. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014005. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014005>
- Meteotest. (2010). Meteonorm. METEONORM, global meteorological database for solar energy and applied climatology. Recuperado 7 de mayo de 2015, a partir de <http://meteonorm.com/>
- Miller, W. A., Parker, D. S., & Kriner, S. A. (2004). Painted metal roofs are energy-efficient, durable and sustainable. *Cool Metal Roofing Coalition*, 1-13.
- Ministerio de Fomento. Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, Sobre condiciones térmicas en los edificios (1979).
- Ministerio de Fomento. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Complementarias (ITE), BOE 64 (1998).
- Ministerio de Fomento. Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006. Texto refundido con modificaciones del RD 1371/2007, de 19 de octubre y corrección de errores del BOE de 25 de enero de 2008, Documento Básico HE Ahorro de Energía (2006).
- Ministerio de Industria y Comercio. (2009). Calener. Programa de certificación energética de edificios. Recuperado 16 de febrero de 2015, a partir de <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/ProgramaCalener/Paginas/DocumentosReconocidos.aspx>
- Ministerio de Industria y Comercio. BOE. Resolución de 28 de diciembre de 2010, por la que se establece el coste de producción de energía eléctrica y las tarifas de último recurso a aplicar en el primer trimestre de 2011, Boletín oficial del estado 83160-83163 (2010).
- Ministerio de Industria y Comercio. (2010b). Energías renovables: situación y objetivos. Recuperado 4 de diciembre de 2014, a partir de <http://estaticos.expansion.com/estaticas/documentos/2010/04/renovables30.pdf>
- MIT. (2009). The MIT Design Advisor. Recuperado 24 de septiembre de 2015, a partir de <http://designadvisor.mit.edu/design/>
- Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14(6), 705-710. <http://doi.org/10.1002/joc.3370140609>

- Muñoz, I., Campra, P., & Fernández-Alba, A. R. (2010). Including CO<sub>2</sub>-emission equivalence of changes in land surface albedo in life cycle assessment. Methodology and case study on greenhouse agriculture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 672-681. <http://doi.org/10.1007/s11367-010-0202-5>
- NASA. (2012). NASA surface meteorology and solar energy: the POWER project. Recuperado 13 de junio de 2015, a partir de <http://power.larc.nasa.gov>
- Natural Resources Canada. (2015). RETScreen. Recuperado 11 de abril de 2015, a partir de <http://www.etscreen.net/ang/home.php>
- NREL. (1995). User's Manual for TMY2s (Typical Meteorological Years), NREL/SP-463-7668, and TMY2s, Typical Meteorological Years Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base, June 1995, CD-ROM.
- Oleson, K. W., Bonan, G. B., & Feddema, J. (2010). Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters*, 37(3), n/a-n/a. <http://doi.org/10.1029/2009GL042194>
- Ordóñez, J., Jadraque, E., Alegre, J., & Martínez, G. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2122-2130. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.001>
- ORNL. (2005a). DOE Cool Roof Calculator for low-slope or flat roofs. Recuperado 14 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/facts/CoolCalcEnergy.htm>
- ORNL. (2005b). Steep Slope Calculator. Recuperado 2 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/SteepSlopeCalc/index.htm>
- ORNL, & LBNL. (2010). Roof Savings Calculator (RSC). Beta Release v0.92. Recuperado 13 de junio de 2015, a partir de <http://rsc.ornl.gov/>
- Palomo del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2), 179-193. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7)
- Parker, D. S., & Barkaszi Jr., S. F. (1997). Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. *Energy and Buildings*, 25(2), 105-115. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01000-6](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01000-6)
- Parker, D. S., Barkaszi, S., Chandra, S., & Beal, D. (1995). Measured cooling energy savings from reflective roofing systems in Florida: field and laboratory research results. *Florida Solar Energy Center (FSEC) and*

- Lawrence Berkeley National Laboratory. FSEC-PF-331-98, (12), 489-500.*
- Parker, D. S., & Sherwin, J. R. (1998). Comparative summer attic thermal performance of six roof constructions. *ASHRAE Transactions, 104(2)*, 1084-1092.
- Parker, D. S., Sherwin, J. R., Sonne, J. K., & Barkaszi Jr., S. F. (1996). Demonstration of cooling savings of light colored roof surfacing in Florida commercial buildings: our savior's school. *Florida Solar Energy Center, 1-15.*
- Petrie, T. W., Atchley, J. A., Childs, P. W., & Desjarlais, A. O. (2001). Effect of solar radiation control on energy costs -- a radiation control fact sheet for low-slope roofs. *Proceedings on CD, Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes. December 2001. Paper 146. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc., (December).*
- Petrie, T. W., Atchley, J. A., Childs, P. W., & Desjarlais, A. O. (2007). Energy Savings for stucco walls coated with cool colors. *Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference.*
- Petrie, T. W., Wilkes, K. E., & Desjarlais, A. O. (2004). Effect of solar radiation control on electricity demand costs – an addition to the DOE Cool Roof Calculator. *Building Envelopes Group Engineering Science and Technology Division Oak Ridge National Laboratory, 0-17.*
- Ray, S. D. (2010). *Energy saving potential of various roof technologies. Mechanical Engineering.* Massachusetts Institute of Technology.
- Revetón. (2015). Página web de Revetón. Recuperado 24 de septiembre de 2015, a partir de <http://reveton.com/>
- Riviere, P., Adnot, J., L, G.-M., Legendre, S., Marchio, D., Nermond, G., ... Karatasou, S. (2008). *Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Economic and market analysis. Economic and Market analysis.*
- Romeo, L. M., Calvo, E., Valero, A., & De Vita, A. (2009). Electricity consumption and CO<sub>2</sub> capture potential in Spain. *Energy, 34(9)*, 1341-1350. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.035>
- Roofs-EU, C. (2010). Cool Roof Project. European Union. EU COOLROOFS tool. Recuperado 20 de junio de 2015, a partir de [http://pouliezos.dpem.tuc.gr/coolroof/coolcalcenergy\\_eu.html](http://pouliezos.dpem.tuc.gr/coolroof/coolcalcenergy_eu.html)
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.

- Energy and Buildings*, 28(1), 51-62. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00063-7](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00063-7)
- Silverman, D. (2008). The multi-colored houses and clean white roofs of bermuda. *Flickr*.
- Software, B. (2011). Degreedays.net. Recuperado 16 de noviembre de 2014, a partir de <http://www.degreedays.net/#generate>
- Solar Energy Laboratory, University Of Wisconsin, Madison, U. (1975). TRNSYS: The Transient Energy System Simulation Tool. *Version 15*.
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167-1174. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968-981. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), 2971-2979. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>
- The World Bank. (2015). Commodity markets outlook. *A World Bank Quarterly Report*, (July), 139.
- U. S. EPA. (2010). Reducing urban heat islands: compendium of strategies cool roofs.
- U.S. Department of Energy. (2013). EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data. Recuperado 6 de octubre de 2014, a partir de [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm?CFID=4054997&CFTOKEN=af6d6a54acab6e29-04A4DD35-A2C9-102F-8EE73310BF9C43B6](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm?CFID=4054997&CFTOKEN=af6d6a54acab6e29-04A4DD35-A2C9-102F-8EE73310BF9C43B6)
- United Nations. (2010). Energy for a sustainable future, 1-22.
- United Nations. (2013). United Nations decade of sustainable energy for all, 42539.
- Urban, B., & Glicksman, L. (2007). A rapid building energy model and interface for non-technical users. En *Proceedings of the 10 th ORNL* (pp. 1-13).
- Urban, B. J. (2007). *The MIT Design Advisor: simple and rapid energy simulation of early-stage building designs*. Massachusetts Institute of Technology.

- Urban, B., & Roth, K. (2010). Guidelines for selecting cool roofs. *U.S. Department of Energy*, (July), 1-23.
- Vázquez Vázquez, M., Izquierdo Belmonte, P., & Santos Navarro, J. M. (2008). Deficiencias del Código Técnico de la Edificación (CTE) en relación a las bases de datos climatológicas que utiliza. Análisis realizado para Galicia. En *XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 17-21 junio, 2008 Vigo, Galicia, España . Vol. 1, 2008, ISBN 978-84-612-4471-3 , págs. 243-248* (pp. 243-248).
- Wilkes, K. E. (1989). Model for roof thermal performance. *ORNL. Technical Report. Rep. Number. ORNL/CON-274*.
- Winandy, J. E., & Beaumont, R. (1995). Roof temperatures in simulated attics. *Research Paper - Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, (FPL-RP-543)*, 14 pp.
- Yagüe, C., Zurita, E., & Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 327-332. [http://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90004-X](http://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90004-X)



## **ANEXO I. REFERENCIAS DEL ARTÍCULO PUBLICADO EN ENERGY**

En este anexo se detallan todas las publicaciones que han hecho referencia al artículo a fecha de 8 de octubre de 2015, con un total de 38 artículos y 1 libro.

*Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. Energy, 38(1), 425-438.*

Abdel-Salam, M. R., Fauchoux, M., Ge, G., Besant, R. W., & Simonson, C. J. (2014). Expected energy and economic benefits, and environmental impacts for liquid-to-air membrane energy exchangers (LAMEEs) in HVAC systems: A review. *Applied Energy*, 127, 202-218.

Abdel-Salam, M. R., Ge, G., Fauchoux, M., Besant, R. W., & Simonson, C. J. (2014). State-of-the-art in liquid-to-air membrane energy exchangers (LAMEEs): A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 700-728.

Aguilar, J. L. C., Smith, G. B., Gentle, A. R., & Chen, D. (2013). Optimum integration of albedo, sub-roof R-value, and phase change material for cool roofs. In *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. Chambéry (France), 25-28 August 2013.

Anand, Y., Gupta, A., Maini, A., Gupta, A., Sharma, A., Khajuria, A., & Tyagi, S. K. (2014). Comparative thermal analysis of different cool roof materials for minimizing building energy consumption. *Journal of Engineering*, 2014.

Ananda, Y., Gupta, A., Maini, A., Gupta, A., Sharma, A., Khajuria, A., & Tyagi, S. K. Comparative thermal analysis of different cool roof materials for minimizing building energy.

Baldinelli, G., Bonafoni, S., Anniballe, R., Presciutti, A., Gioli, B., & Magliulo, V. (2015). Spaceborne detection of roof and impervious surface albedo: Potentialities and comparison with airborne thermography measurements. *Solar Energy*, 113, 281-294.

Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Mur-Pérez, F., & Castro-Gil, M. (2013). Impact of passive techniques and clean conditioning systems on comfort and economic feasibility in low-cost shelters. *Energy and Buildings*, 62, 414-426.

Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., & Castro-Gil, M. (2013). Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti. *Building and environment*, 59, 116-126.

- Chung, M. H., Park, J. C., & Ko, M. J. (2015). Effect of the solar radiative properties of existing building roof materials on the energy use in humid continental climates. *Energy and Buildings*.
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2013). Cool roofs for passive cooling: performance in different climates and for different insulation levels in Italy. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), 155-169.
- Dabaieh, M., Wanas, O., Hegazy, M. A., & Johansson, E. (2015). Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. *Energy and Buildings*, 89, 142-152.
- Diez, D. B. (2012). Laboratorio remoto de eficiencia energética integrado en redes de generación distribuida (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Educación a Distancia).
- Gao, Y., Xu, J., Yang, S., Tang, X., Zhou, Q., Ge, J., & Levinson, R. (2014). Cool roofs in China: Policy review, building simulations, and proof-of-concept experiments. *Energy Policy*, 74, 190-214.
- Gao, Y., Xu, J., Wang, Z., Zhao, K., Tang, X. An energy comparison among cool roof, green roof and conventional roof on an office building in Chongqing, China (2014) *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 32 (1), pp. 605-614.
- Gentle, A. R., & Smith, G. B. (2015). A subambient open roof surface under the mid-summer sun. *Advanced Science*.
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., & Simá, E. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, 80, 81-105.
- Hong, T., Koo, C., Kim, J., Lee, M., & Jeong, K. (2015). A review on sustainable construction management strategies for monitoring, diagnosing, and retrofitting the building's dynamic energy performance: Focused on the operation and maintenance phase. *Applied Energy*, 155, 671-707.
- Kolokotsa, D. Cool and reflective materials for the built environment.
- Kumar, R. (2015). Development of artificial neural network model to estimate global solar radiation and energy performance analysis of an institutional building.
- Li, D. H., Yang, L., & Lam, J. C. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications—a review. *Energy*, 54, 1-10.
- Mastrapostoli, E., Karlessi, T., Pantazaras, A., Kolokotsa, D., & Santamouris, M. Cool fluorocarbon coatings in industrial buildings: optical properties and energy performance.
- Mastrapostoli, E., Karlessi, T., Pantazaras, A., Kolokotsa, D., Gobakis, K., & Santamouris, M. (2014). On the cooling potential of cool roofs in cold climates: Use of cool fluorocarbon coatings to enhance the optical properties and the energy performance of industrial buildings. *Energy and Buildings*, 69, 417-425.



- Mendez-Vilas, A. (2012). Fuelling the future: advances in science and technologies for energy generation, transmission and storage. Universal-Publishers. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=uYByY-iTy-sC&pgis=1>
- Mohamed, H., Chang, J. D., & Alshayeb, M. (2015). Effectiveness of high reflective roofs in minimizing energy consumption in residential buildings in Iraq. *Procedia Engineering*, 118, 879-885.
- Morbee, J. Estimation of primary energy savings potential in EU fossil fuel power generation.
- Olivieri, F. (2013). Caracterización experimental y modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal (Doctoral dissertation, Arquitectura).
- Olsen, K. (2015). Evaluating urban design strategies for climate change adaptation in los angeles (Doctoral dissertation, California Polytechnic State University, San Luis Obispo).
- Pisello, A. L., & Cotana, F. (2014). The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. *Energy and Buildings*, 69, 154-164.
- Pisello, A. L., & Cotana, F. (2014). The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. *Energy and Buildings*, 69, 154-164.
- Pisello, A. L., Santamouris, M., & Cotana, F. On the analysis of cool roofs for cooling system efficiency.
- Pisello, A. L., Thiemann, A., Santamouris, M., & Cotana, F. (2013). Analysis of a Cool Roof System for Reducing Cooling Loads and Improving Cooling System Efficiency. In *Proceedings of CLIMA2013 International Conf. Prague* (pp. 16-18).
- Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.
- Revel, G. M., Martarelli, M., Emiliani, M., Celotti, L., Nadalini, R., De Ferrari, A., & Beckers, E. (2014). Cool products for building envelope—Part II: Experimental and numerical evaluation of thermal performances. *Solar Energy*, 105, 780-791.
- Revel, G. M., Martarelli, M., Emiliani, M., Gozalbo, A., Orts, M. J., Bengochea, M. Á. & Hermanns, S. (2014). Cool products for building envelope - Part I: Development and lab scale testing. *Solar Energy*, 105, 770-779.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703.
- Teixeira, C. F. B., & Labaki, L. C. (2014). Springtime monitoring of passive cool roofs in subtropical climate. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(11).

- Wolfe, D. M., & Goossen, K. W. (2015). Initial study on controllable roofing system to tailor building solar loads for increased HVAC efficiency. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(4), 044503.
- Zingre, K. T., Wan, M. P., & Yang, X. (2015). A new RTTV (roof thermal transfer value) calculation method for cool roofs. *Energy*, 81, 222-232.
- Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & Lee, I. Y. L. (2015). Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. *Energy*, 82, 813-826.

## ANEXO II. COEFICIENTES UTILIZADOS PARA EL AJUSTE POLINÓMICO DEL MÉTODO DE CÁLCULO

Los coeficientes utilizados en la Ecuación 4-4 y Ecuación 4-6 son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 a_1 = 6.166349 \cdot 10^{(+00)}, & a_2 = -6.149114 \cdot 10^{(-01)}, \\
 a_3 = 2.421292 \cdot 10^{(-02)}, & a_4 = -3.242013 \cdot 10^{(-04)}, \\
 a_5 = -4.067531 \cdot 10^{(-02)}, & a_6 = 4.050719 \cdot 10^{(-03)}, \\
 a_7 = -1.594409 \cdot 10^{(-04)}, & a_8 = 2.132209 \cdot 10^{(-06)}, \\
 a_9 = -4.038664 \cdot 10^{(-05)}, & a_{10} = 5.071835 \cdot 10^{(-06)}, \\
 a_{11} = -2.208129 \cdot 10^{(-07)}, & a_{12} = 3.121782 \cdot 10^{(-09)}, \\
 a_{13} = -1.901489 \cdot 10^{(-02)}, & a_{14} = 1.827197 \cdot 10^{(-03)}, \\
 a_{15} = -7.086481 \cdot 10^{(-05)}, & a_{16} = 9.417621 \cdot 10^{(-07)}.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 b_1 = -1.715558 \cdot 10^{(+01)}, & b_2 = 1.721291 \cdot 10^{(+00)}, \\
 b_3 = -6.827492 \cdot 10^{(-02)}, & b_4 = 9.184830 \cdot 10^{(-04)}, \\
 b_5 = 1.083800 \cdot 10^{(-01)}, & b_6 = -1.090608 \cdot 10^{(-02)}, \\
 b_7 = 4.328992 \cdot 10^{(-04)}, & b_8 = -5.817554 \cdot 10^{(-06)}, \\
 b_9 = 1.086734 \cdot 10^{(-04)}, & b_{10} = -1.505764 \cdot 10^{(-05)}, \\
 b_{11} = 6.819890 \cdot 10^{(-07)}, & b_{12} = -9.847479 \cdot 10^{(-09)}, \\
 b_{13} = 6.871741 \cdot 10^{(-02)}, & b_{14} = -6.648131 \cdot 10^{(-03)}, \\
 b_{15} = 2.590283 \cdot 10^{(-04)}, & b_{16} = -3.450568 \cdot 10^{(-06)}.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 c_1 = 1.843792 \cdot 10^{(+01)}, & c_2 = -1.849797 \cdot 10^{(+00)}, \\
 c_3 = 7.341480 \cdot 10^{(-02)}, & c_4 = -9.875173 \cdot 10^{(-04)}, \\
 c_5 = -1.122777 \cdot 10^{(-01)}, & c_6 = 1.129477 \cdot 10^{(-02)}, \\
 c_7 = -4.483983 \cdot 10^{(-04)}, & c_8 = 6.022056 \cdot 10^{(-06)}, \\
 c_9 = -8.646863 \cdot 10^{(-05)}, & c_{10} = 1.372025 \cdot 10^{(-05)}, \\
 c_{11} = -6.489757 \cdot 10^{(-07)}, & c_{12} = 9.580065 \cdot 10^{(-09)}, \\
 c_{13} = -8.252233 \cdot 10^{(-02)}, & c_{14} = 7.998026 \cdot 10^{(-03)}, \\
 c_{15} = -3.117334 \cdot 10^{(-04)}, & c_{16} = 4.150482 \cdot 10^{(-06)}.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 d_1 = 1.020846 \cdot 10^{(+00)}, & d_2 = -8.905603 \cdot 10^{(-02)}, \\
 d_3 = 3.355879 \cdot 10^{(-03)}, & d_4 = -4.480762 \cdot 10^{(-05)}, \\
 d_5 = 4.592476 \cdot 10^{(-03)}, & d_6 = -3.957861 \cdot 10^{(-04)}, \\
 d_7 = 1.213616 \cdot 10^{(-05)}, & d_8 = -9.878549 \cdot 10^{(-08)}, \\
 d_9 = 4.849194 \cdot 10^{(-06)}, & d_{10} = -1.189679 \cdot 10^{(-06)}, \\
 d_{11} = 8.289640 \cdot 10^{(-08)}, & d_{12} = -1.744763 \cdot 10^{(-09)}, \\
 d_{13} = 1.224311 \cdot 10^{(-02)}, & d_{14} = -1.278288 \cdot 10^{(-03)}, \\
 d_{15} = 5.099679 \cdot 10^{(-05)}, & d_{16} = -6.843651 \cdot 10^{(-07)}.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 e_1 = -2.694653 \cdot 10^{(-01)}, & e_2 = 7.774995 \cdot 10^{(-03)}, \\
 e_3 = -3.089922 \cdot 10^{(-04)}, & e_4 = 8.742061 \cdot 10^{(-06)}, \\
 e_5 = -2.706463 \cdot 10^{(-03)}, & e_6 = -2.985072 \cdot 10^{(-05)},
 \end{array}$$

e7 = 1.780932\*10<sup>(-05)</sup>, e8 = -5.367452\*10<sup>(-07)</sup>,  
e9 = -1.476107\*10<sup>(-06)</sup>, e10 = 3.095540\*10<sup>(-06)</sup>,  
e11 = -2.882777\*10<sup>(-07)</sup>, e12 = 6.828094\*10<sup>(-09)</sup>,  
e13 = -1.876501\*10<sup>(-02)</sup>, e14 = 1.956051\*10<sup>(-03)</sup>,  
e15 = -7.789254\*10<sup>(-05)</sup>, e16 = 1.042940\*10<sup>(-06)</sup>.

f1 = 1.675949\*10<sup>(-01)</sup>, f2 = -7.956414\*10<sup>(-03)</sup>,  
f3 = 4.658325\*10<sup>(-04)</sup>, f4 = -1.160538\*10<sup>(-05)</sup>,  
f5 = 6.686345\*10<sup>(-05)</sup>, f6 = 2.768591\*10<sup>(-04)</sup>,  
f7 = -2.691367\*10<sup>(-05)</sup>, f8 = 6.472895\*10<sup>(-07)</sup>,  
f9 = 3.307784\*10<sup>(-06)</sup>, f10 = -3.066733\*10<sup>(-06)</sup>,  
f11 = 2.795741\*10<sup>(-07)</sup>, f12 = -6.593542\*10<sup>(-09)</sup>,  
f13 = 9.807280\*10<sup>(-03)</sup>, f14 = -1.022154\*10<sup>(-03)</sup>,  
f15 = 4.063014\*10<sup>(-05)</sup>, f16 = -5.426564\*10<sup>(-07)</sup>.

## ANEXO III. CONTENIDO DEL CD-ROM

El CD-ROM que acompaña a esta memoria contiene las siguientes carpetas con los archivos generados durante la Tesis Doctoral:

1. **Excel:** donde se encuentran la hojas de cálculo generadas para:
  - a. El análisis de coordenadas para obtener las zonas climáticas.
  - b. Las comparaciones de HDD y CDD para calcular zonas climáticas.
  - c. Cálculo de precios de energía y demás variables utilizadas en la tesis
  - d. El análisis de rentabilidad del apartado *8 Costes y rentabilidad de los Cool Roofs*.
  - e. Comparativas con otras publicaciones y herramientas para validar los resultados.
2. **Mathematica:** en esta carpeta se incluye el código fuente que se ha desarrollado para los cálculos presentados en esta tesis y la herramienta dinámica creada para el estudio de la rentabilidad de instalar cool roofs para España.
3. **Memoria:** contiene la versión electrónica de esta memoria.
4. **Mondrian:** reúne los mapas geográficos de España presentados a lo largo de esta memoria.
5. **Publicación:** con la versión electrónica del artículo  
*Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. Energy, 38(1), 425-438.*
6. **Referencias:** contiene las referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo de esta Tesis.



## ANEXO IV. CURRICULUM VITAE

### Datos Personales

---

<b>Nombre</b>	<b>Marian Diaz Vicente</b>	
<b>Domicilio</b>	C / Ulises 111. Madrid 28043	
<b>Teléfonos</b>	Casa: (+34) 917348832	Móvil: (+34) 609980118
<b>E-mail</b>	<b>mariandiazv@gmail.com</b>	
<b>Educación</b>	<p>2004-2007 UNED. <i>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (Madrid).</i>  <b>Diploma Estudios Avanzados</b> (Sobresaliente). Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control.</p> <p>2007 Harvard Business School (Boston, EEUU). <b>Management &amp; Leadership Essentials Certificate</b></p> <p>1991-1996. <i>Universidad Complutense de Madrid (Madrid)</i>  <b>Ingeniero en Informática.</b> Premio especial fin de carrera. Premio Nacional “Chip de Oro”.</p>	

### Resumen Perfil Profesional

---

<b>Perfil</b>	<p>Consultor Internacional del área de estrategia y operaciones. Sus principales áreas de trabajo son Estrategia Corporativa, CRM, Estrategia de Sistemas, Rediseño de Procesos y puesta en marcha y gestión de Oficinas de Proyectos. Su experiencia se centra en la industria de Telecomunicaciones y Energía aunque ha trabajado en otras industrias. Ha dirigido numerosos proyectos en Europa y Latinoamérica y generalmente colabora con los clientes a primer nivel ejecutivo. En sus últimos años en Deloitte trabajó fundamentalmente en el desarrollo de negocio dirigiendo el programa de Innovación en consultoría para España, proponiendo, lanzando y coordinando nuevos productos y servicios.</p> <p>Ha colaborado con la Escuela de Negocios EOI-América impartiendo clases en el “Master Executive de Consultoría y Asesoría de Empresas”.</p> <p>Antes de unirse a Deloitte, trabajó cuatro años principalmente en tecnología en varios países europeos.</p>	
---------------	---	--

<b>Historial laboral</b>	<b>Asociación SFC-SQM Madrid. Miembro de la Junta Directiva. Vocal investigación.</b>	2012-Actualidad
	<b>Deloitte. Gerente Senior de Estrategia y Operaciones</b>	Ene. 1998 – 2010 Madrid, España
	<b>EOI-América. Profesor asociado master.</b>	Ene. 2003 – 2006. Madrid, España
	<b>Embajada de España en Italia: Oficina Comercial de Milán</b>	Oct. 1996 – Dic. 1997 Milán, Italia
	<b>Responsable del departamento de sistemas</b>	
	<b>Hewlett Packard Suiza. Central Europea. Ingeniero de Sistemas</b>	Ago. 1995 – Oct. 1995 Ginebra, Suiza
	<b>Hewlett Packard Española, S.A. Becario departamento IT</b>	Oct. 1993 - Ago. 1995 Madrid

---

<b>Idiomas</b>	Español	Idioma materno
	Inglés	Fluido hablado y escrito
	Italiano	Fluido socialmente
	Francés	Nivel avanzado

---

### Publicaciones seleccionadas

---

<b>2012. Energy</b>	<b>Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia</b> <i>Boixo, S., Díaz-Vicente, M., Colmenar, A., &amp; Castro, M. A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. Energy, 38(1), 425-438.</i>
<b>2008. Deloitte</b>	<b>La innovación en la empresa Española. Situación actual y perspectivas de futuro.</b>

---

<b>Formación Profesional</b>	Deloitte ('99-'08)	Deloitte (Madrid): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mastering Project Management</li> <li>• Behaviourial Interviewing</li> <li>• Utilizando Value Print 4.0 para construir mejores Business Cases.</li> <li>• Curriculum Strategy&amp;Operations (19 cursos)</li> </ul>
	Siebel ('00)	Siebel: Siebel Essentials (Amsterdam).
	SAP ('95-'99)	SAP: Sap CRM Middleware (Walldorf); TechEd Congress (Hamburgo); Sap Business to Business Procurement
	ICEX ('94)	C.I.S.I.C.R.E.T. (Centro de Implantación y soporte de la infraestructura informática y de comunicaciones de la Red Exterior y Territorial). Ministerio de Economía y Hacienda (Madrid): Soluciones Internet/Intranet, Administración Windows NT SERVER administration, Curso avanzado de redes.
	HP ('94)	Hewlett Packard(Madrid) Técnicas de negociación.
<b>Experiencia en paquetes informáticos</b>	Usuario avanzado Microsoft Office (Powerpoint, Excel, etc.) Certificada en Value Print 4.0. Herramienta de Business Cases Deloitte SAP R/3: Conocimiento técnico y funcional básico (FI, MM y SD). Siebel: Certificada en Siebel 2000.	



## **ANEXO V. CÓDIGO FUENTE EN MATHEMATICA**

A continuación se incluyen las funciones desarrolladas en *Mathematica* y que constituyen el código fuente del estudio completo presentado en esta Tesis.

Se han seleccionado las funciones principales desarrolladas para construir el modelo de análisis, así como las simulaciones para obtener los resultados del estudio.

El código fuente se estructura en:

- Definición de Constantes.
- Definición de Variables de entrada.
- Definición de Funciones de Cálculo.
- Estimación de ahorros para Andalucía.
- Estimación de ahorros para España.
- Extracto de comparativa de resultados contra otras publicaciones.
- Análisis de rentabilidad.
- Análisis de sensibilidad.

---

## Constants

```
kwh2btu = 3412;
therm2btu = 100 000;
C2F = 1.8(*Celsius 2 Farenheit*);
msq2ftsq = 10.76;
EUR2USR = 5.676(*K m^2/W to F ft^2 h/BTU*);
WhiteSolarReflectance = 60;
WhiteInfraredEmittance = 90;
BlackSolarReflectance = 5;
BlackInfraredEmittance = 90;
StandardCOP = 3;
StandardHeatingEfficiency = 0.7;
StandardHeatingElectricalEfficiency = 1;
RedSolarReflectance = 25; (*http://eetd.lbl.gov/coolroof/tile.htm#tile*)
RedInfraredEmittance = 90; (*http://eetd.lbl.gov/coolroof/tile.htm#tile*)

MetalWhiteSolarReflectance = 74;
(* Source Materis Paints: Values for Revsun Metal *)
MetalWhiteInfraredEmittance = 88;
(* Source Materis Paints: Values for Revsun Metal *)
MetalBlackSolarReflectance = 5; (* Dark metal roof *)
MetalBlackInfraredEmittance = 11;
MetalRedSolarReflectance = 25; (* Estimated for Materis Paints *)
MetalRedInfraredEmittance = 11; (*Estimated for Materis Paints *)
```

---

## Data

```
spanishData = {
  (* City, Climatic_zone CTE_2006-Climatic_zone NBE-CT-79,
  HDD (Annual °C-day, base temp 18°C), CDD, Insolation (kWh/m2/day) *)
  {"Cádiz", "A3-W", 533, 874, 5.42},
  (* Updated with new coordinates
  {"Gran Canaria", "A3-V", 86, 724, 6.19}, *)
  {"Las Palmas de Gran Canaria", "A3-V", 109, 674, 5.4},
  {"Santa Cruz de Tenerife", "A3-V", 107, 682, 5.62},
  {"Córdoba", "A3-X", 1282, 975, 4.86},
  {"Almería", "A4-W", 866, 833, 5.06},
  {"Castellón de la Plana", "B3-W", 1336, 652, 4.49}, (* Revised,
  NASA gives identical climatic data for Valencia and Castellon *)
  {"Murcia", "B3-W", 661, 835, 5.05},
  (* Not Updated with new coordinates 1014 857 4,65 *)
  {"Palma de Mallorca", "B3-W", 673, 762, 4.94},
  {"Tarragona", "B3-W", 1652, 577, 4.34},
  {"Valencia", "B3-W", 1336, 652, 4.49},
```

```

{"Alicante", "B4-W", 934, 768, 4.43},
{"Huelva", "B4-W", 850, 1105, 4.9},
{"Sevilla", "B4-W", 1035, 1086, 4.92},
(* {"Sevilla-Austin", "B4-W", 1630.0/C2F, 2965.0/C2F,
  1548.8*msq2ftsq/kwh2btu}, *)
{"Bilbao", "C1-W", 1721, 286, 3.91}, (* Coordinates revised and updated *)
(* {"Bilbao-Seattle", "C1-W", 4867/C2F, 127/C2F,
  1061.3*msq2ftsq/kwh2btu}, *)
{"Coruña", "C1-W", 1498, 135, 3.89},
{"Oviedo", "C1-X", 1885, 148, 3.37},
{"Pontevedra", "C1-W", 1733, 288, 4.11},
(* Changed to Pontevedra {"Vigo", "C1-W", 1733, 288, 4.11}, *)
{"Santander", "C1-W", 1753, 232, 3.88},
{"San Sebastián", "C1-W", 1944, 376, 3.85}, (* Revised,
NASA DOES NOT give identical climatic data for Bilbao and San
  Sebastian *)
{"Barcelona", "C2-W", 1300, 531, 4.31},
{"Girona", "C2-X", 1300, 531, 4.31}, (* Revised,
NASA gives identical climatic data for Barcelona and Girona *)
{"Orense", "C2-W", 2214, 227, 3.84},
{"Granada", "C3-Y", 1510, 872, 4.87},
(* NOT Updated with new coordinates *)
{"Jaén", "C4-W", 1510, 872, 4.75},
{"Málaga", "C4-W", 848, 790, 4.79},
{"Badajoz", "C4-X", 1222, 998, 4.75},
{"Cáceres", "C4-X", 1584, 818, 4.72},
{"Toledo", "C4-X", 1983, 776, 4.72},
{"Lugo", "D1-X", 1740, 126, 3.55},
{"Palencia", "D1-Y", 2519, 288, 4.06},
(* Updated with new coordinates *)
{"Pamplona", "D1-Y", 2281, 442, 3.86},
{"Vitoria", "D1-Y", 2393, 360, 3.8},
{"Cuenca", "D2-Z", 2516, 523, 4.44},
{"Huesca", "D2-Y", 2363, 395, 4.08},
{"Logroño", "D2-X", 2393, 360, 3.80},
{"Salamanca", "D2-Z", 2247, 601, 4.53},
{"Segovia", "D2-Z", 2390, 598, 4.39},
{"Teruel", "D2-Z", 2291, 521, 4.39},
{"Valladolid", "D2-Y", 2623, 420, 4.23},
{"Zamora", "D2-Y", 2499, 422, 4.40},
{"Albacete", "D3-Z", 1946, 625, 4.43},
{"Ciudad Real", "D3-Y", 1822, 812, 4.79},
{"Guadalajara", "D3-Y", 2431, 580, 4.40}, (* Revised,
NASA gives identical climatic data for Madrid and Guadalajara *)
{"Lleida", "D3-Y", 1896, 576, 4.45}, (* Updated with new coordinates *)
{"Madrid", "D3-Y", 2431, 580, 4.4},

```

```

{"Zaragoza", "D3-X", 2114, 555, 4.24}, (* Revised,
NASA gives identical climatic data for Lleida and Zaragoza *)
{"Ávila", "E1-Z", 2390, 598, 4.39},
{"Burgos", "E1-Z", 2469, 316, 3.96},
{"León", "E1-Z", 2522, 257, 4.08},
{"Soria", "E1-Z", 2649, 412, 4.25}
};
andaluciaData = {
(* City, Climatic_zone CTE_2006-Climatic_zone NBE-CT-79,
HDD (Annual °C-day, base temp 18°C), CDD, Insolation (kWh/m2/day),
Flat_Roof_Surface (m2) *)
{"Almería", "A4-W", 866, 833, 5.06, 12201868.16},
{"Cádiz", "A3-W", 533, 874, 5.42, 15242189.24},
{"Córdoba", "A3-X", 1282, 975, 4.86, 11422167.70},
{"Granada", "C3-Y", 1510, 872, 4.87, 6049432.31},
{"Huelva", "B4-W", 850, 1105, 4.9, 6348100.33},
(* Updated and consistent with spanishData *)
{"Jaén", "C4-W", 1510, 872, 4.75, 3258724.67},
(* Updated and consistent with spanishData *)
{"Málaga", "C4-W", 848, 790, 4.79, 18890580.55},
{"Sevilla", "B4-W", 1035, 1086, 4.92, 31056926.24}
};
spanishDataC = {
(* City, Climatic_zone CTE_2006-Climatic_zone NBE-CT-79,
HDD (Annual °C-day, base temp 18°C), CDD, Insolation (kWh/m2/day) *)
{"Barcelona", "C2-W", 1300, 531, 4.31},
{"Bilbao", "C1-W", 1721, 286, 3.91},
{"Madrid", "D3-Y", 2431, 580, 4.4},
(* {"Madrid886", "D3-Y", 2067, 886, 4.61}, *)
(* Source: Heatingdegreedays.net: HDD=2067 CDD=865 *)
{"Murcia", "B3-W", 661, 835, 5.05},
{"Sevilla", "B4-W", 1035, 1086, 4.92},
{"Valencia", "B3-W", 1336, 652, 4.49}
};
usData = {
(* City, state, HDD (Annual °F-day, base temp 65°F), CDD,
Insolation (Annual Average Btu/ft² per day) *)
(* {"Miami", FL ,141, 4126.5, 1556.8}, *)
(* {"Phoenix", AZ, 1153.5, 3814.5, 1838.6}, *)
{"Atlanta", "GA", 3089.5, 1611, 1477.5}, (* Similar to Valencia *)
{"Austin", "TX", 1630, 2965, 1548.8}, (* Similar climate to Barcelona *)
{"Chicago", "IL", 6449.5, 748.5, 1243.2}, (* Similar to Bilbao *)
{"Houston", "TX", 1552, 2810, 1405.5}, (* Similar to Sevilla *)
{"Los Angeles", "CA", 1291, 469.5, 1579.1},
(* Similar to Cadiz. Verificar Murcia *)
{"New York", "NY", 5089.5, 1001.5, 1268.3}, (* Similar to Madrid*)

```

```

{"Sacramento", "CA", 2793.5, 1144, 1557.5 }
(* Used to compare results with Akbari et Al. Akbari uses CDD
743 and DOE Calc *)
(*
{"Augusta", "GA", 2887,1778, 1435.8 },
{"Miami", "CA",2793.5,2516*C2F, 1556.8},
{"New Orleans", "CA",1464,2929, 1459.6 }
*)(* Used to compare results with Akbari et Al. Akbari. State is wrong,
CDD is wrong, should be Louisiana *)
};

USdataEur =
usData * Table[{1, 1, 1 / C2F, 1 / C2F, msq2ftsq / kwh2btu}, {Length[usData]}};

EuroToDollar = 1.40; (* Euro to dollar conversion rate *)

(* R-value as indicated in Spanish Building Code NBE-CT-79. m2K/W *)
Rvalue76 = {
{"V y W", 1 / 1.4},
{"X", 1 / 1.2},
{"Y", 1 / .9},
{"Z", 1 / .7}};

(* Valores máximos de K en kcal/h m2 °C (W/m2 °C)
Zona climática según mapa 2 (art.13.º)
V y W      X      Y      Z
1,20 (1,40) 1,03 (1,20) 0,77 (0,90) 0,60 (0,70)
*)
(* R-value as indicated in Spanish Building Code CTE-
2006. {Climatic zone, m2K/W} *)
Rvalue2006 = {
{"A", 2.0},
{"B", 2.22},
{"C", 2.44},
{"D", 2.63},
{"E", 2.86}};

(*After a long discussion,
we are now using 0.20 for electricity price. Based in a TUR Tariff of 0,
142319 Eur/KWh and adjusted with tax and a porcentage of the power
term. Source TUR: http://
www.endesaonline.es/ES/hogares/teguia/asesoramientotarifas/
tarifa\_electricidad\_tur/tarifas\_tur/index.asp *)
KWhPriceIberdrola = 0.20;
(* Gas Cost Spain in Eur per KWh*)
KWhPriceGas = 0.047;

```

```

(* New gas cost according to europe energy
portal: € 0.0469. Old cost 0.063 *)
(* Source: http://www.energy.eu/#Domestic *)

(* Price of natural gas per State in Dollars per Thousand Cubic
Feet. Jun 2011. Source http://
www.eia.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_a_EPG0_PRS_DMcf_m.htm *)
GasCostUS = {
  {"CA", 11.18}, (* California *)
  {"GA", 23.37}, (* Georgia *)
  {"IL", 12.51}, (* Illinois *)
  {"NY", 14.04}, (* New York *)
  {"TX", 15.85}}; (* Texas *)

cubicFeettoKWh = 303.1;
(* convert 1000 cubic feet of gas equivalent to kilowatt hours *)
GasCostUSKWh = GasCostUS * Table[{1, 1 / cubicFeettoKWh}, {Length[GasCostUS]};

(* Price of electricity per State in Dollars per KWh for Residential
use. Jun 2011. Source http://
www.eia.gov/cneaf/electricity/epm/table5_6_b.html *)
ElectricCostUS = {
  {"CA", .1508}, (* California *)
  {"GA", .0995}, (* Georgia *)
  {"IL", .1078}, (* Illinois *)
  {"NY", .1742}, (* New York *)
  {"TX", .1095}}; (* Texas *)

(* Data for Andalucía:
Colors:
  10% white
  70% red
  20% grey (we treat it as black)
Rvalue:
  95% old (pre 2006)
  5% new (post 2006) *)

PercentageWhiteAndalucia = 10;
PercentageRedAndalucia = 70;
PercentageGreyAndalucia = 20;

PercentageOldAndalucia = 95;
PercentageNewAndalucia = 5;

pConditioned = .574; (* % of houses with air conditioned in Andalucía *)

```

```

pHeated = .431; (* % of houses with active heating system in Andalusia *)

(*this is in kg/kwh, WWF*)
co2Emissions = 0.183;
co2EmissionsAndalusia = .4593; (* in kg/kWh,
source http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/nav/com/contenido.jsp?pag=/contenidos/doc\_estrategicos/datos\_energeticos\_2009\*)
co2EmissionsUSA = .718;

```

---

## Functions

```

(*Returns {CoolingLoad,HeatingLoad}.The input parameters are in
european units.The output parameters are {CoolingLoad,HeatingLoad}
in units of kwh/(m^2 year)*)
calculateLoads [HeatingDegreeDaysIn_, CoolingDegreeDaysIn_, SolarLoadIn_,
RValueIn_, SolarReflectance_, InfraredEmittance_] :=
Module[{EUR2USR = 5.676(*K m^2/W to F ft^2 h/BTU*),
C2F = 1.8(*Celsius 2 Farenheit*),
msq2ftsq = 10.76,
kwh2btu = 3412},
Module[{
HeatingDegreeDays = HeatingDegreeDaysIn * C2F,
CoolingDegreeDays = CoolingDegreeDaysIn * C2F,
SolarLoad = SolarLoadIn * kwh2btu / msq2ftsq, RValue = RValueIn * EUR2USR,
g8 = 6.166349 * 10^(+00), g9 = -4.067531 * 10^(-02),
g10 = -4.038664 * 10^(-05), g11 = -1.901489 * 10^(-02),
h8 = -6.149114 * 10^(-01), h9 = 4.050719 * 10^(-03),
h10 = 5.071835 * 10^(-06), h11 = 1.827197 * 10^(-03),
i8 = 2.421292 * 10^(-02), i9 = -1.594409 * 10^(-04),
i10 = -2.208129 * 10^(-07), i11 = -7.086481 * 10^(-05),
j8 = -3.242013 * 10^(-04), j9 = 2.132209 * 10^(-06),
j10 = 3.121782 * 10^(-09), j11 = 9.417621 * 10^(-07),
g14 = -1.715558 * 10^(+01), g15 = 1.083800 * 10^(-01),
g16 = 1.086734 * 10^(-04), g17 = 6.871741 * 10^(-02),
h14 = 1.721291 * 10^(+00), h15 = -1.090608 * 10^(-02),
h16 = -1.505764 * 10^(-05), h17 = -6.648131 * 10^(-03),
i14 = -6.827492 * 10^(-02), i15 = 4.328992 * 10^(-04),
i16 = 6.819890 * 10^(-07), i17 = 2.590283 * 10^(-04),
j14 = 9.184830 * 10^(-04), j15 = -5.817554 * 10^(-06),
j16 = -9.847479 * 10^(-09), j17 = -3.450568 * 10^(-06),
g20 = 1.843792 * 10^(+01), g21 = -1.122777 * 10^(-01),
g22 = -8.646863 * 10^(-05), g23 = -8.252233 * 10^(-02),
h20 = -1.849797 * 10^(+00), h21 = 1.129477 * 10^(-02),
h22 = 1.372025 * 10^(-05), h23 = 7.998026 * 10^(-03),
i20 = 7.341480 * 10^(-02), i21 = -4.483983 * 10^(-04),
i22 = -6.489757 * 10^(-07), i23 = -3.117334 * 10^(-04),

```

```

j20 = -9.875173 * 10^(-04), j21 = 6.022056 * 10^(-06),
j22 = 9.580065 * 10^(-09), j23 = 4.150482 * 10^(-06),
g28 = 1.020846 * 10^(+00), g29 = 4.592476 * 10^(-03),
g30 = 4.849194 * 10^(-06), g31 = 1.224311 * 10^(-02),
h28 = -8.905603 * 10^(-02), h29 = -3.957861 * 10^(-04),
h30 = -1.189679 * 10^(-06), h31 = -1.278288 * 10^(-03),
i28 = 3.355879 * 10^(-03), i29 = 1.213616 * 10^(-05),
i30 = 8.289640 * 10^(-08), i31 = 5.099679 * 10^(-05),
j28 = -4.480762 * 10^(-05), j29 = -9.878549 * 10^(-08),
j30 = -1.744763 * 10^(-09), j31 = -6.843651 * 10^(-07),
g34 = -2.694653 * 10^(-01), g35 = -2.706463 * 10^(-03),
g36 = -1.476107 * 10^(-06), g37 = -1.876501 * 10^(-02),
h34 = 7.774995 * 10^(-03), h35 = -2.985072 * 10^(-05),
h36 = 3.095540 * 10^(-06), h37 = 1.956051 * 10^(-03),
i34 = -3.089922 * 10^(-04), i35 = 1.780932 * 10^(-05),
i36 = -2.882777 * 10^(-07), i37 = -7.789254 * 10^(-05),
j34 = 8.742061 * 10^(-06), j35 = -5.367452 * 10^(-07),
j36 = 6.828094 * 10^(-09), j37 = 1.042940 * 10^(-06),
g40 = 1.675949 * 10^(-01), g41 = 6.686345 * 10^(-05),
g42 = 3.307784 * 10^(-06), g43 = 9.807280 * 10^(-03),
h40 = -7.956414 * 10^(-03), h41 = 2.768591 * 10^(-04),
h42 = -3.066733 * 10^(-06), h43 = -1.022154 * 10^(-03),
i40 = 4.658325 * 10^(-04), i41 = -2.691367 * 10^(-05),
i42 = 2.795741 * 10^(-07), i43 = 4.063014 * 10^(-05),
j40 = -1.160538 * 10^(-05), j41 = 6.472895 * 10^(-07),
j42 = -6.593542 * 10^(-09), j43 = -5.426564 * 10^(-07), f7, f13,
f19, f27, f33, f39, CoolingIndex, HeatingIndex},
f7 = (g8 + h8 * RValue + i8 * RValue^2 + j8 * RValue^3) +
(g9 + h9 * RValue + i9 * RValue^2 + j9 * RValue^3) * SolarReflectance +
(g10 + h10 * RValue + i10 * RValue^2 + j10 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +
(g11 + h11 * RValue + i11 * RValue^2 + j11 * RValue^3) * InfraredEmittance;
f13 = (g14 + h14 * RValue + i14 * RValue^2 + j14 * RValue^3) +
(g15 + h15 * RValue + i15 * RValue^2 + j15 * RValue^3) * SolarReflectance +
(g16 + h16 * RValue + i16 * RValue^2 + j16 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +
(g17 + h17 * RValue + i17 * RValue^2 + j17 * RValue^3) * InfraredEmittance;
f19 = (g20 + h20 * RValue + i20 * RValue^2 + j20 * RValue^3) +
(g21 + h21 * RValue + i21 * RValue^2 + j21 * RValue^3) * SolarReflectance +
(g22 + h22 * RValue + i22 * RValue^2 + j22 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +
(g23 + h23 * RValue + i23 * RValue^2 + j23 * RValue^3) * InfraredEmittance;
f27 = (g28 + h28 * RValue + i28 * RValue^2 + j28 * RValue^3) +
(g29 + h29 * RValue + i29 * RValue^2 + j29 * RValue^3) * SolarReflectance +
(g30 + h30 * RValue + i30 * RValue^2 + j30 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +
(g31 + h31 * RValue + i31 * RValue^2 + j31 * RValue^3) * InfraredEmittance;
f33 = (g34 + h34 * RValue + i34 * RValue^2 + j34 * RValue^3) +
(g35 + h35 * RValue + i35 * RValue^2 + j35 * RValue^3) * SolarReflectance +
(g36 + h36 * RValue + i36 * RValue^2 + j36 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +

```



```

    (g37 + h37 * RValue + i37 * RValue^2 + j37 * RValue^3) * InfraredEmittance;
f39 = (g40 + h40 * RValue + i40 * RValue^2 + j40 * RValue^3) +
    (g41 + h41 * RValue + i41 * RValue^2 + j41 * RValue^3) * SolarReflectance +
    (g42 + h42 * RValue + i42 * RValue^2 + j42 * RValue^3) * SolarReflectance^2 +
    (g43 + h43 * RValue + i43 * RValue^2 + j43 * RValue^3) * InfraredEmittance;
CoolingIndex = CoolingDegreeDays / 5000 * SolarLoad / 24 / 100;
HeatingIndex = HeatingDegreeDays / 10000;
{60000 * (f7 * CoolingIndex + f13 * CoolingIndex^2 + f19 * CoolingIndex^3) /
    kwh2btu * msq2ftsq,
    60000 * (f27 * HeatingIndex + f33 * HeatingIndex^2 + f39 * HeatingIndex^3) /
    kwh2btu * msq2ftsq}];
calculateLoads[1494.95, 856.55, 4.81, 1.5, 90, 90]

```

```

(*This function now takes kwh/(m^2 year) as input and gives
$/ (m^2 year) as output.*)
calculateCost[cl_, hl_, pHeatingCost_, pHeatingEfficiency_,
    pElectricityCost_, pCOP_] :=
    {cl * pElectricityCost / pCOP, hl * pHeatingCost / pHeatingEfficiency};
(*
Takes a city name, climate zone name, HDD & CDD in European units,
solar load (kWh/m2/day),
white and black reflectance and emittance (as a %), heating cost ($/Kwh),
heating efficiency (as "per one"), electricity cost ($/Kwh),
cooling efficiency COP (as "per one").
Outputs a list of city savings with format: city name,
climate zone name, cooling savings ($/(m2 year)),
heating savings (($/(m2 year)), savings in Cooling Load (KWh),
savings in Heating Load(KWh), percentage of savings in cooling load (%),
percentage of savings in total energy (%),
percentage of savings in total cost (%).
*)

```

```

calculateSavings[City_, ClimateZone_, HeatingDegreeDays_, CoolingDegreeDays_,
    SolarLoad_, RValue_, SolarReflectance_, InfraredEmittance_,
    BlackSolarReflectance_, BlackInfraredEmittance_, pHeatingCost_,
    pHeatingEfficiency_, pElectricityCost_, pCOP_] :=

```

```

Module[{CoolingLoad, HeatingLoad, BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad,
    CoolingCost, HeatingCost, BlackCoolingCost, BlackHeatingCost,
    CoolingSavings, HeatingSavings, TotalSavings, CitySavings},
{CoolingLoad, HeatingLoad} =
    calculateLoads[HeatingDegreeDays, CoolingDegreeDays, SolarLoad,
        RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance];
{BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad} =
    calculateLoads[HeatingDegreeDays, CoolingDegreeDays, SolarLoad,
        RValue, BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance];

```

```

{CoolingCost, HeatingCost} =
  calculateCost[CoolingLoad, HeatingLoad, pHeatingCost, pHeatingEfficiency,
    pElectricityCost, pCOP];
{BlackCoolingCost, BlackHeatingCost} =
  calculateCost[BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad, pHeatingCost,
    pHeatingEfficiency, pElectricityCost, pCOP];
CoolingSavings = BlackCoolingCost - CoolingCost;
HeatingSavings = BlackHeatingCost - HeatingCost;
CitySavings = {City, ClimateZone, CoolingSavings, HeatingSavings,
  BlackCoolingLoad - CoolingLoad, BlackHeatingLoad - HeatingLoad,
  (1 - CoolingLoad / BlackCoolingLoad) * 100,
  (1 - (CoolingLoad + HeatingLoad) / (BlackCoolingLoad + BlackHeatingLoad)) * 100,
   $\left(1 - \frac{\text{CoolingCost} + \text{HeatingCost}}{\text{BlackCoolingCost} + \text{BlackHeatingCost}}\right) * 100$ 
}
]

(*This function matches a character from the 2nd entry of city with
a character from the first entry of rvs. Returns the second entry on rvs*)
findRValue[city_, rvs_] :=
  Select[rvs,
    Length[Intersection[ToCharacterCode[city[[2]]], ToCharacterCode[#[[1]]]]] >
      0 &, 1][[1, 2]]

(*
Takes spanishData as an array of cities or regions
(see above for the format),
a list of rvals ({code,value}) in European units,
white and black reflectance and emittance (as a %), electricity cost ($/Kwh),
cooling efficiency COP (as "per one"), heating cost ($/Kwh),
heating efficiency (as "per one").
Outputs a list of city savings (see calculateSavings for the format)
*)

calculateSavingsArrayRValueList[spanishData_, RValueList_,
  SolarReflectance_, InfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_,
  BlackInfraredEmittance_, pElectricityCost_, pCOP_, pHeatingCost_,
  pHeatingEfficiency_] :=
Module[
  {cityNumber = Length[spanishData], globalSavings = {}, RValue, CitySavings},
  Do[
    RValue = findRValue[spanishData[[i]], RValueList];
    (* Returnns savings in EUR/m2 *)
    (* We transform pHeatingCost from $/kwh to $/therm *)
    CitySavings = calculateSavings[spanishData[[i, 1]], spanishData[[i, 2]],
      spanishData[[i, 3]], spanishData[[i, 4]], spanishData[[i, 5]],
      RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
      BlackInfraredEmittance, pHeatingCost, pHeatingEfficiency,

```

```

    pElectricityCost, pCOP];
AppendTo[globalSavings, CitySavings],
  {i, cityNumber}];
globalSavings
]

(* Same as calculateSavingsArrayRValueList but with an unique RValue *)
calculateSavingsArray[spanishData_, RValue_, SolarReflectance_,
  InfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_, BlackInfraredEmittance_,
  pElectricityCost_, pCOP_, pHeatingCost_, pHeatingEfficiency_] :=
Module[{cityNumber = Length[spanishData], globalSavings = {}, CitySavings},
  Do[
    (* Returns savings in EUR/m2 *)
    (* We transform pHeatingCost from $/kwh to $/therm *)
    CitySavings = calculateSavings[spanishData[[i, 1]], spanishData[[i, 2]],
      spanishData[[i, 3]], spanishData[[i, 4]], spanishData[[i, 5]],
      RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
      BlackInfraredEmittance, pHeatingCost, pHeatingEfficiency,
      pElectricityCost, pCOP];
    AppendTo[globalSavings, CitySavings],
      {i, cityNumber}];
  globalSavings
]

(* If list is a list of {name,value},
returns the first value corresponding to name *)
findElem[name_, list_] := Select[list, (First[#] == name) &][[1, 2]]

(*
Takes spanishData as an array of cities or regions
(see above for the format),
a list of prices({state,value}) for gas and electricity in US units,
white and black reflectance and emittance (as a %), rValue ,
cooling efficiency COP (as "per one"), heating cost ($/Kwh),
heating efficiency (as "per one"). To be used with USdataEUR
Outputs a list of city savings (see calculateSavings for the format)
*)
calculateSavingsArrayPriceList[spanishData_, RValue_, SolarReflectance_,
  InfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_, BlackInfraredEmittance_,
  pElectricityCostList_, pCOP_, pHeatingCostList_, pHeatingEfficiency_] :=
Module[{cityNumber = Length[spanishData], globalSavings = {},
  pHeatingCost, pElectricityCost, CitySavings},
  Do[
    pHeatingCost = findElem[spanishData[[i, 2]], pHeatingCostList] /
      EuroToDollar; (* returns cost of gas in euro/KWh *)
    pElectricityCost = findElem[spanishData[[i, 2]], pElectricityCostList] /

```

```

    EuroToDollar; (* returns cost of electricity in euro/KWh *)
(* Returns savings in EUR/m2 *)
CitySavings = calculateSavings[spanishData[[i, 1]], spanishData[[i, 2]],
    spanishData[[i, 3]], spanishData[[i, 4]], spanishData[[i, 5]],
    RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
    BlackInfraredEmittance, pHeatingCost, pHeatingEfficiency,
    pElectricityCost, pCOP];
AppendTo[CitySavings, pElectricityCost];
AppendTo[CitySavings, pHeatingCost];
AppendTo[globalSavings, CitySavings];,
    {i, cityNumber}];
globalSavings
]

calculateSavingsPercentage[City_, ClimateZone_, HeatingDegreeDays_,
    CoolingDegreeDays_, SolarLoad_, RValue_, SolarReflectance_,
    InfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_, BlackInfraredEmittance_,
    pHeatingCost_, pHeatingEfficiency_, pElectricityCost_, pCOP_] :=
Module[{CoolingLoad, HeatingLoad, BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad,
    CoolingCost, HeatingCost, BlackCoolingCost, BlackHeatingCost,
    CoolingSavings, HeatingSavings, TotalSavings, CitySavings},
{CoolingLoad, HeatingLoad} =
    calculateLoads[HeatingDegreeDays, CoolingDegreeDays, SolarLoad,
        RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance];
{BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad} =
    calculateLoads[HeatingDegreeDays, CoolingDegreeDays, SolarLoad,
        RValue, BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance];
{CoolingCost, HeatingCost} =
    calculateCost[CoolingLoad, HeatingLoad, pHeatingCost, pHeatingEfficiency,
        pElectricityCost, pCOP];
{BlackCoolingCost, BlackHeatingCost} =
    calculateCost[BlackCoolingLoad, BlackHeatingLoad, pHeatingCost,
        pHeatingEfficiency, pElectricityCost, pCOP];
CitySavings = {City, ClimateZone,
    
$$\left(1 - \frac{\text{CoolingCost} + \text{HeatingCost}}{\text{BlackCoolingCost} + \text{BlackHeatingCost}}\right) * 100\}$$

}
]

(*
Takes spanishData as an array of cities or regions
(see above for the format),
a list of rvalues ({code,value}) in European units,
white and black reflectance and emittance (as a %), electricity cost ($/Kwh),
cooling efficiency COP (as "per one"), heating cost ($/Kwh),
heating efficiency (as "per one").
Outputs a list of city percentage savings

```

```

(see calculateSavings for the format)
*)
calculateSavingsPercentageArrayRValueList[spanishData_, RValueList_,
SolarReflectance_, InfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_,
BlackInfraredEmittance_, pElectricityCost_, pCOP_, pHeatingCost_,
pHeatingEfficiency_] :=
Module[{cityNumber = Length[spanishData], globalSavings = {}, RValue,
CitySavings},
Do[
RValue = findRValue[spanishData[[i]], RValueList];
(* Returns savings in EUR/m2 *)
(* We transform pHeatingCost from $/kwh to $/therm *)
CitySavings = calculateSavingsPercentage[spanishData[[i, 1]],
spanishData[[i, 2]], spanishData[[i, 3]], spanishData[[i, 4]],
spanishData[[i, 5]], RValue, SolarReflectance, InfraredEmittance,
BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, pHeatingCost,
pHeatingEfficiency, pElectricityCost, pCOP];
AppendTo[globalSavings, CitySavings],
{i, cityNumber}]];
globalSavings
]

(* Calculates all savings for a type of heating
(gas or electricity). Returns economical savings and detailed
percetual savings. Outputs results in Latex Compatible Format. Outputs
the following tables:
- Economical results (4 tables). Two tables for gas heating and
two tables for electrical heating: first in alphabetical order,
second ordered by last value descending. Returns:
City Climatical_Zone €_Old_buildings_black_roof_savings €_Old
_buildings_red_roof_savings €_New_buildings_black_roof_savings
€_New_buildings_red_roof_savings
- Detailed savings: *)
calculateSpanishSavings[spanishData_, Rvalue76_, Rvalue2006_,
WhiteSolarReflectance_, WhiteInfraredEmittance_, BlackSolarReflectance_,
BlackInfraredEmittance_, RedSolarReflectance_, RedInfraredEmittance_,
KWhPriceIberdrola_, StandardCOP_, KWhPriceGas_, StandardHeatingEfficiency_,
KWhPriceIberdrola_, StandardHeatingElectricalEfficiency_] :=
Module[

{EconomicSavingsAlpha, EconomicSavingsDescending, eEconomicSavingsAlpha,
eEconomicSavingsDescending, DetailedSavingsAlphaOld,
DetailedSavingsDescendingOld, DetailedSavingsAlphaNew,
DetailedSavingsDescendingNew},
(* Gas savings *)
spainSavingsOldRed = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,

```

```

Rvalue76, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency];
spainSavingsOldBlack = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue76, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency];
spainSavingsNewRed = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue2006, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency];
spainSavingsNewBlack = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue2006, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency];
SpainGas = Transpose[{
Transpose[spanishData][[1]],
Transpose[spanishData][[2]],
(Transpose[spainSavingsOldBlack][[3]] +
Transpose[spainSavingsOldBlack][[4]]),
(* economic savings old buildings black *)
(Transpose[spainSavingsOldRed][[3]] + Transpose[spainSavingsOldRed][[4]]),
(* economic savings old buildings red *)
(Transpose[spainSavingsNewBlack][[3]] +
Transpose[spainSavingsNewBlack][[4]]),
(* economic savings new buildings black *)
(Transpose[spainSavingsNewRed][[3]] +
Transpose[spainSavingsNewRed][[4]])}];
(* economic savings new buildings black *)
EconomicSavingsAlpha = AccountingForm[Sort[SpainGas] // MatrixForm,
2, DigitBlock -> 3];
EconomicSavingsDescending =
AccountingForm[SortBy[SpainGas, -#[[3]] &] // MatrixForm, 2, DigitBlock -> 3];
(* Returns savings ordered by economical savings of black old buildings *)
(* Electrical savings *)
eSpainSavingsOldRed = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue76, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
eSpainSavingsOldBlack = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue76, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
eSpainSavingsNewRed = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue2006, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,

```

```

StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
eSpainSavingsNewBlack = calculateSavingsArrayRValueList[spanishData,
Rvalue2006, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
(* Outputs economical results. Two tables: first in alphabetical order,
second ordered by black old buildings value descending. Returns:
City Climatical_Zone €_Old_buildings_black_roof_savings €_Old
_buildings_red_roof_savings €_New_buildings_black_roof_savings
€_New_buildings_red_roof_savings *)
SpainElectrical = Transpose[{
Transpose[spanishData][[1]],
Transpose[spanishData][[2]],
(Transpose[eSpainSavingsOldBlack][[3]] +
Transpose[eSpainSavingsOldBlack][[4]]),
(Transpose[eSpainSavingsOldRed][[3]] +
Transpose[eSpainSavingsOldRed][[4]]),
(Transpose[eSpainSavingsNewBlack][[3]] +
Transpose[eSpainSavingsNewBlack][[4]]),
(Transpose[eSpainSavingsNewRed][[3]] +
Transpose[eSpainSavingsNewRed][[4]])}];
eEconomicSavingsAlpha = AccountingForm[Sort[SpainElectrical] // MatrixForm,
2, DigitBlock → 3];
eEconomicSavingsDescending =
AccountingForm[SortBy[SpainElectrical, -#[[3]] &] // MatrixForm,
2, DigitBlock → 3]; (* ordered by economical savings of black roofs *)

(* Calculate detailed percentual
savings: kwh_cooling kwh_heating energy_savings % energy_savings
% cost_savings*)(*cooling savings for dark roofs and red roofs:City,
Climatic_Zone,Savings in Cooling Load (KWh),savings in Heating Load (KWh),
percentage of savings in cooling load (%),
percentage of savings in total energy (%),
percentage of savings in total cost (%).*)

(*Old Buildings,black and red*)
OldBuildings = Transpose[{Transpose[spanishData][[1]],
Transpose[spanishData][[2]],
Transpose[eSpainSavingsOldBlack][[5]],
(* Cooling demand savings in kWh/m2, black roofs *)
Transpose[eSpainSavingsOldBlack][[6]],
(* Heating demand savings in kWh/m2, black roofs *)
Transpose[eSpainSavingsOldBlack][[9]],
(* Energy savings in % = Electrical savings, black roofs *)
Transpose[spainSavingsOldBlack][[9]],
(* Cost savings in % for Gas heating, black roofs *)

```

```

Transpose[eSpainSavingsOldRed][[5]],
(* Cooling demand savings in kWh/m2, red roofs *)
Transpose[eSpainSavingsOldRed][[6]],
(* Heating demand savings in kWh/m2, red roofs *)
Transpose[eSpainSavingsOldRed][[9]],
(* Energy savings in % = Electrical savings, red roofs *)
Transpose[spainSavingsOldRed][[9]]];
(* Cost savings in % for Gas heating, black roofs *)
DetailedSavingsAlphaOld = AccountingForm[Sort[OldBuildings] // MatrixForm,
  2, DigitBlock → 3];
DetailedSavingsDescendingOld =
AccountingForm[SortBy[OldBuildings, -#[[6]] &] // MatrixForm, 2,
  DigitBlock → 3]; (* Returns savings ordered by cost savings
for gas heating in % of black old buildings *)

(* New Buildings, black and red*)
NewBuildings = Transpose[{Transpose[spanishData][[1]],
  Transpose[spanishData][[2]],
  Transpose[eSpainSavingsNewBlack][[5]],
  Transpose[eSpainSavingsNewBlack][[6]],
  Transpose[eSpainSavingsNewBlack][[9]],
  Transpose[spainSavingsNewBlack][[9]],
  Transpose[eSpainSavingsNewRed][[5]],
  Transpose[eSpainSavingsNewRed][[6]],
  Transpose[eSpainSavingsNewRed][[9]],
  Transpose[spainSavingsNewRed][[9]]]};
DetailedSavingsAlphaNew =
AccountingForm[Sort[NewBuildings] // MatrixForm, 2, DigitBlock → 3];
DetailedSavingsDescendingNew =
AccountingForm[SortBy[NewBuildings, -#[[6]] &] // MatrixForm, 2,
  DigitBlock → 3];
(* Returns savings ordered by cost savings for gas heating in %
of black New buildings *)
{{EconomicSavingsAlpha, EconomicSavingsDescending},
 {eEconomicSavingsAlpha, eEconomicSavingsDescending},
 {DetailedSavingsAlphaOld, DetailedSavingsDescendingOld},
 {DetailedSavingsAlphaNew, DetailedSavingsDescendingNew}}
]

```

---

## Calculations

### Savings for Andalucia

Data for Andalucía:

Colors:



10% white

70% red

20% grey (we treat it as black)

Rvalue:

95% old (pre 2006)

5% new (post 2006)

```
calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,  
WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, RedSolarReflectance,  
RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceIberdrola,  
StandardHeatingElectricalEfficiency]
```

```
(*Calculate the savings matrix for the different Rvalue codes and  
colors in Andalucia*)
```

```
andaluciaSavingsOldRed = calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData,  
Rvalue76, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,  
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,  
StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
```

```
andaluciaSavingsOldBlack =  
calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,  
WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,  
BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola, StandardCOP,  
KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
```

```
andaluciaSavingsNewRed = calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData,  
Rvalue2006, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,  
RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,  
StandardCOP, KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
```

```
andaluciaSavingsNewBlack =  
calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue2006,  
WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,  
BlackInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola, StandardCOP,  
KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];
```

```
(*Total savings array (one entry per province) in Andalucia,  
adjusted with total surface and percentage of each type,  
and also percentage of air conditioning and heating*)
```

```
totalAndaluciaSavings =  
(Transpose[andaluciaSavingsOldRed][[3]] * pConditioned +  
Transpose[andaluciaSavingsOldRed][[4]] * pHeated) *  
PercentageOldAndalucia / 100 * PercentageRedAndalucia / 100 *  
Transpose[andaluciaData][[6]] +  
(Transpose[andaluciaSavingsOldBlack][[3]] * pConditioned +  
Transpose[andaluciaSavingsOldBlack][[4]] * pHeated) *  
PercentageOldAndalucia / 100 * PercentageGreyAndalucia / 100 *  
Transpose[andaluciaData][[6]] +
```

```

(Transpose[andaluciaSavingsNewRed][[3]] * pConditioned +
  Transpose[andaluciaSavingsNewRed][[4]] * pHeated) *
  PercentageNewAndalucia / 100 * PercentageRedAndalucia / 100 *
  Transpose[andaluciaData][[6]] +
(Transpose[andaluciaSavingsNewBlack][[3]] * pConditioned +
  Transpose[andaluciaSavingsNewBlack][[4]] * pHeated) *
  PercentageNewAndalucia / 100 * PercentageGreyAndalucia / 100 *
  Transpose[andaluciaData][[6]];
Transpose[{Transpose[andaluciaData][[1]], totalAndaluciaSavings}] //
  MatrixForm
total = Total[totalAndaluciaSavings]
(*This is an estimate fo the total
  savings: tola surface * estimate of old red roof savings * percentage
  fo air condiotining. Pretty close*)
Total[Transpose[andaluciaData][[6]]] * .9 * pConditioned

```

### Calculation for Spain

Regular roofs: economical savings with gas heating (alphabetical order and descending order) , economical savings with electrical hetaing (alphabetical order and descending order), detailed savings for old buildings (alphabetical order and descending order) and detailed savings for new buildings (alphabetical order and descending order).

```

calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76, Rvalue2006,
  WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
  BlackInfraredEmittance, RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance,
  KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency,
  KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency]

```

Metal Roofs: economical savings with gas heating (alphabetical order and descending order) , economical savings with electrical hetaing (alphabetical order and descending order), detailed savings for old buildings (alphabetical order and descending order) and detailed savings for new buildings (alphabetical order and descending order).

```

calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76, Rvalue2006,
  MetalWhiteSolarReflectance, MetalWhiteInfraredEmittance,
  MetalBlackSolarReflectance, MetalBlackInfraredEmittance,
  MetalRedSolarReflectance, MetalRedInfraredEmittance, KWhPriceIberdrola,
  StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency, KWhPriceIberdrola,
  StandardHeatingElectricalEfficiency]

```

### Andalucía

```

calculateSpanishSavings[andaluciaData, Rvalue76, Rvalue2006,
  WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
  BlackInfraredEmittance, RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance,
  KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency,
  KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency]

```

To calculate the co2 emissions, I use 1 for the \$/kwh, so the output is really kwh, and this

constant :

```
(*Calculate the savings matrix for the different Rvalue codes and
colors in Andalucia*)
andaluciaSavingsOldRedkWh =
  calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, RedSolarReflectance,
    RedInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsOldBlackkWh =
  calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
    BlackInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsNewRedkWh =
  calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue2006,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, RedSolarReflectance,
    RedInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsNewBlackkWh =
  calculateSavingsArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue2006,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
    BlackInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];

(*Total savings array (one entry per province) in Andalucia,
adjusted with total surface and percentage of each type,
and also percentage of air conditioning and heating*)
totalAndaluciaSavingskWh =
  (Transpose[andaluciaSavingsOldRedkWh][[3]] * pConditioned +
    Transpose[andaluciaSavingsOldRedkWh][[4]] * pHeated) *
    PercentageOldAndalucia / 100 * PercentageRedAndalucia / 100 *
    Transpose[andaluciaData][[6]] +
  (Transpose[andaluciaSavingsOldBlackkWh][[3]] * pConditioned +
    Transpose[andaluciaSavingsOldBlackkWh][[4]] * pHeated) *
    PercentageOldAndalucia / 100 * PercentageGreyAndalucia / 100 *
    Transpose[andaluciaData][[6]] +
  (Transpose[andaluciaSavingsNewRedkWh][[3]] * pConditioned +
    Transpose[andaluciaSavingsNewRedkWh][[4]] * pHeated) *
    PercentageNewAndalucia / 100 * PercentageRedAndalucia / 100 *
    Transpose[andaluciaData][[6]] +
  (Transpose[andaluciaSavingsNewBlackkWh][[3]] * pConditioned +
    Transpose[andaluciaSavingsNewBlackkWh][[4]] * pHeated) *
    PercentageNewAndalucia / 100 * PercentageGreyAndalucia / 100 *
    Transpose[andaluciaData][[6]]);
Total[totalAndaluciaSavingskWh]
Transpose[{Transpose[andaluciaData][[1]], totalAndaluciaSavingskWh}] //
```

```

MatrixForm
totalkWh = Total[totalAndaluciaSavingskWh]
(* Total savings in KWh for Andalucia, in kWh *)
totalCO2Andalucia = totalkWh * co2Emissions
(* Total CO2 emission offset for Andalucia with electrical heating,
in kg of CO2 using WWF*)
totalCO2Andalucia2 = totalkWh * co2EmissionsAndalucia
(* Total CO2 emission offset for Andalucia with electrical heating,
in kg of CO2 using WWF*)
totalCO2usa = totalkWh * co2EmissionsUSA
totalCO2Andalucia / Total[Transpose[andaluciaData][[6]]]
(* Total CO2 emission offset per m2 of flat roof for Andalucia with
electrical heating, in kg of CO2/m2 *)
totalCO2Andalucia /
(Total[Transpose[andaluciaData][[6]]] *
(PercentageRedAndalucia + PercentageGreyAndalucia) / 100)

```

To calculate the percentage savings, I also use 1 for the \$/kwh

```

(*Calculate the savings matrix for the different Rvalue codes and
colors in Andalucia*)
andaluciaSavingsOldRedPercentage =
  calculateSavingsPercentageArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, RedSolarReflectance,
    RedInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsOldBlackPercentage =
  calculateSavingsPercentageArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue76,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
    BlackInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsNewRedPercentage =
  calculateSavingsPercentageArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue2006,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, RedSolarReflectance,
    RedInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];
andaluciaSavingsNewBlackPercentage =
  calculateSavingsPercentageArrayRValueList[andaluciaData, Rvalue2006,
    WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
    BlackInfraredEmittance, 1(*$/kWh for electricity*), StandardCOP,
    1(*$/kWh for gas*), StandardHeatingElectricalEfficiency];

```

---

Comparative table: US vs Spain

(\* Convert Rvalue from to h·ft<sup>2</sup>·°F/Btu \*)

2 \* **EUR2USR**

(\*Convert gas price in \$/KWh to \$/Therm \*)

0.0463213460903992 / 0.03413

```

RValueC = 1.5;
WhiteSolarReflectance = 60;
(* Spain savings electricity *)
Print[
  "City Climatic_zone CoolingSAvings_Euro HeatingSavings_Euro
  CoolingSAvings_KWh HeatingSavings_KWh %Cooling_Savings_Energy
  %TotalSavings_Energy %TotalSavings_Cost"];
SpainSavingsOldBlackElec =
  calculateSavingsArray[spanishDataC, RValueC, WhiteSolarReflectance,
    WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance,
    KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceIberdrola,
    StandardHeatingElectricalEfficiency]
(* Spain savings gas *)
Print[
  "City Climatic_zone CoolingSAvings_Euro HeatingSavings_Euro
  CoolingSAvings_KWh HeatingSavings_KWh %Cooling_Savings_Energy
  %TotalSavings_Energy %TotalSavings_Cost"];
SpainSavingsOldBlackGas =
  calculateSavingsArray[spanishDataC, RValueC, WhiteSolarReflectance,
    WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance,
    KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency]
(* TotalSavings: City Climatic_zone HDD CDD ElecPrice GasPrice
  GasSavings ElecSavings *)
Print[
  "City Climatic_zone HDD CDD CoolingLoad_saving HeatingLoad_savings
  GasPrice GasSavings ElecPrice ElecSavings"];
SpainSavingsOldBlackLatex = AccountingForm[Transpose[{
  Transpose[spanishDataC][[1]],
  Transpose[spanishDataC][[2]],
  Transpose[spanishDataC][[3]],
  Transpose[spanishDataC][[4]],
  Transpose[spanishDataC][[5]],
  Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[5]],
  Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[6]],
  Table[KWhPriceGas, {Length[spanishDataC]}],
  (Transpose[SpainSavingsOldBlackGas][[3]] +
    Transpose[SpainSavingsOldBlackGas][[4]]),
  Table[KWhPriceIberdrola, {Length[spanishDataC]}],
  (Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[3]] +
    Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[4]])
}] // MatrixForm, 2, DigitBlock -> 3] // MatrixForm
(* City Climatic_zone HDD CDD ElecPrice GasPrice GasSavings
  ElecSavings *)

```

```

(* Madrid → New York, Los Angeles → Cadiz, Barcelona→ austin texas,
Valencia → Augusta, Bilbao→ Chicago *)
RValueC = 1.5;
(* US savings Gas *)
USSavingsOldBlackGas = calculateSavingsArrayPriceList[USdataEur,
  RValueC, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
  BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, ElectricCostUS,
  StandardCOP, GasCostUSKWh, StandardHeatingEfficiency];
(* US savings electricity *)
USSavingsOldBlackElec = calculateSavingsArrayPriceList[USdataEur,
  RValueC, WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance,
  BlackSolarReflectance, BlackInfraredEmittance, ElectricCostUS,
  StandardCOP, ElectricCostUS, StandardHeatingElectricalEfficiency];

```

Comparative with Akbari et Al (Cool Colored Roof to save energy and improve air quality)

```

RvalueAkbari = 1.94;
COPAkbari = 2.3;
SRBlackAkbari = 10;
SRCoolAkbari = 40;
RvalueAkbari * EUR2USR
SpainSavingsOldBlackElec =
  calculateSavingsArray[spanishDataC, RvalueAkbari, SRCoolAkbari,
    WhiteInfraredEmittance, SRBlackAkbari, BlackInfraredEmittance,
    KWhPriceIberdrola, COPAkbari, KWhPriceIberdrola,
    StandardHeatingElectricalEfficiency]
(* Spain savings gas *)
SpainSavingsOldBlackGas =
  calculateSavingsArray[spanishDataC, RvalueAkbari, SRCoolAkbari,
    WhiteInfraredEmittance, SRBlackAkbari, BlackInfraredEmittance,
    KWhPriceIberdrola, COPAkbari, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency]
Print[
  "City Climatic_zone CoolingSAvings_Euro HeatingSavings_Euro
  CoolingSAvings_KWh HeatingSavings_KWh %Cooling_Savings_Energy
  %TotalSavings_Energy %TotalSavings_Cost"];
Print[
  "City Climatic_zone HDD CDD Insolation CoolingLoadSAvings_KWh
  HeatingLoadSavings_KWh Gas_Price HeatingSavings_Euro
  Electricity_Price CoolingSavings_Euro"];
SpainSavingsOldBlackLatex = AccountingForm[Transpose[{
  Transpose[spanishDataC][[1]],
  Transpose[spanishDataC][[2]],
  Transpose[spanishDataC][[3]],
  Transpose[spanishDataC][[4]],
  Transpose[spanishDataC][[5]],
  Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[5]],
  Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[6]],
  Table[KWhPriceGas, {Length[spanishDataC]}],
  (Transpose[SpainSavingsOldBlackGas][[3]] +
    Transpose[SpainSavingsOldBlackGas][[4]]),
  Table[KWhPriceIberdrola, {Length[spanishDataC]}],
  (Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[3]] +
    Transpose[SpainSavingsOldBlackElec][[4]])
}] // MatrixForm, 2, DigitBlock -> 3]
(* City Climatic_zone cooling_savings heating_savings cooling_load
_savings heating_load_savings *)

```



```

USdataEur =
  usData * Table[{1, 1, 1 / C2F, 1 / C2F, msq2ftsq / kwh2btu}, {Length[usData]}}];
(* US savings Gas *)
USSavingsOldBlackGas =
  calculateSavingsArrayPriceList[USdataEur, RvalueAkbari, SRCoolAkbari,
  WhiteInfraredEmittance, SRBlackAkbari, BlackInfraredEmittance,
  ElectricCostUS, COPAkbari, GasCostUSKWh, StandardHeatingEfficiency]
(* US savings electricity *)
USSavingsOldBlackElec =
  calculateSavingsArrayPriceList[USdataEur, RvalueAkbari, SRCoolAkbari,
  WhiteInfraredEmittance, SRBlackAkbari, BlackInfraredEmittance,
  ElectricCostUS, COPAkbari, ElectricCostUS,
  StandardHeatingElectricalEfficiency]

```

Comparative with A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions, Energy and Buildings 39 (2007) 1167–1174.

Comparative with Parker et Al 1998, Measured and Simulated Performance of Reflective Roofing Systems in Residential Buildings

Comparative with Petrie

Comparative with Zinzi, Agnoli 2011: Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region

---

## Profitability

```
(* Constants *)
(* Source: http://www.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Aislamientos_e
_impermeabilizaciones/Impermeabilizaciones/Cubiertas_galerias_y
_balcones/NIG205_Sistema__REVETON__de_impermeabiliza.html *)
badConditionMaterialsCosts = 0.2 * 13.45 + 1.1 * 2.90 + 2 * 9.54
(* Imprimacion + geotextil + pintura reveton cubiertas *)
badConditionMaterialsCostsCool = 0.2 * 13.45 + 1.1 * 2.90 + 2 * 10.45
(* Imprimacion + geotextil + pintura reveton cubiertas *)
okConditionMaterialsCosts = 0.5 * 9.54 (* Pintura *)
okConditionMaterialsCostsCool = 0.5 * 10.45 (* Pintura *)
badConditionLaborCosts = 0.453 * (17.24 + 16.13) (* Oficial + ayudante *)
badConditionLaborCostsCool = 0.453 * (17.24 + 16.13) (* Oficial + ayudante *)
okConditionLaborCosts = 0.25 * 0.453 * (17.24 + 16.13)
(* Oficial + ayudante (0.25 porque se reducen los trabajos) *)
okConditionLaborCostsCool = 0.25 * 0.453 * (17.24 + 16.13)
(* Oficial + ayudante (0.25 porque se reducen los trabajos) *)
indirectPercentage = 5 (* indirect costs *)
expSurface = 150;
expNyears = 10;
expIPC = 1.9;
expDiscRate = 4.05;

(* Experiments *)
badCondition = (1 + indirectPercentage / 100) *
  (badConditionMaterialsCosts + badConditionLaborCosts)
okConditionCompany = (1 + indirectPercentage / 100) *
  (okConditionMaterialsCosts + okConditionLaborCosts)
okConditionYourself = (1 + indirectPercentage / 100) * okConditionMaterialsCosts
badConditionCool = (1 + indirectPercentage / 100) *
  (badConditionMaterialsCostsCool + badConditionLaborCostsCool)
okConditionCompanyCool =
  (1 + indirectPercentage / 100) *
  (okConditionMaterialsCostsCool + okConditionLaborCostsCool)
okConditionYourselfCool =
  (1 + indirectPercentage / 100) * okConditionMaterialsCostsCool

(* Function: profits *)
calculateProfitability[costsExperiments_, coolsaving_, heatpenalty_,
  surface_, nyears_, COP_, EER_, electricitycost_, gascost_, ipc_, discrate_] :=
Module[{},
  benefit = coolsaving * electricitycost / COP + heatpenalty * gascost / EER;
  benefits = Table[benefit * surface * (1 + ipc / 100) ^ i, {i, 0, nyears - 1}];
  costs = Table[0 * i, {i, 0, nyears - 1}];
  costs[[1]] = costsExperiments * surface;
  cashflow = benefits - costs;
```

```

cumulativeflow = Accumulate[benefits - costs];
discountedcashflow =
  cashflow / Table[(1 + discrate / 100) ^ i, {i, 0, nyears - 1}];
discountedcumulativecashflow = Accumulate[discountedcashflow];
van = TimeValue[Cashflow[cashflow], discrate / 100, 0];
(* Next condition allows to calculate properly the IRR. It is
  needed at least a positive value and a negative value *)
If[Length[Select[cashflow, # > 0 & , 1]] == 0 ||
  Length[Select[cashflow, # < 0 & , 1]] == 0,
  (* All numbers are positive or negative *)
  If[Length[Select[cashflow, # > 0 & , 1]] == 0, (* true *)
    tir = -Infinity, (* All numbers are negative *)
    tir = +Infinity (* All numbers are positive *)
  ],
  (* There are positive and negative numbers *)
  tir = r /. FindRoot[TimeValue[Cashflow[cashflow], r, 0] == 0,
    {r, discrate / 100}] (* false *)
];
tir = 100 * tir;
lineflow = Fit[cumulativeflow, {1, x}, x];
payback = x /. Solve[lineflow == 0, x];
discountedlineflow = Fit[discountedcumulativecashflow, {1, x}, x];
discountedpayback = x /. Solve[discountedlineflow == 0, x];
{van, tir, payback[[1]], discountedpayback[[1]]}
]

(* Function: 3 experiments with black roofs *)
calculateProfitsExperiments[coolsaving_, heatpenalty_, surface_,
  nyears_, COP_, EER_, electricitycost_, gascost_, ipc_, discrate_] :=
Module[{},
  {van1, tir1, payback1, discountedpayback1} =
    calculateProfitability[badConditionCool - badCondition, coolsaving,
      heatpenalty, surface, nyears, COP, EER, electricitycost, gascost,
      ipc, discrate];
  {van2, tir2, payback2, discountedpayback2} =
    calculateProfitability[okConditionCompanyCool, coolsaving,
      heatpenalty, surface, nyears, COP, EER, electricitycost, gascost,
      ipc, discrate];
  {van3, tir3, payback3, discountedpayback3} =
    calculateProfitability[okConditionYourselfCool, coolsaving,
      heatpenalty, surface, nyears, COP, EER, electricitycost, gascost,
      ipc, discrate];
  {van1, tir1, payback1, discountedpayback1, van2, tir2, payback2,
    discountedpayback2, van3, tir3, payback3, discountedpayback3}
]

```

```

(* Function: calculate 6 experiments (3 for black roofs and 3 for red roofs)
and generate a list *)
calculateArrayProfitsExperiments[dataCities_, surface_, nyears_, COP_,
EER_, electricitycost_, gascost_, ipc_, discrate_] :=
Module[{cityNumber = Length[dataCities], profitsResultsBlack = {},
profitsResultsRed = {}},
Do[
tmpProfitsBlack = calculateProfitsExperiments[dataCities[[i, 3]],
dataCities[[i, 4]], surface, nyears, COP, EER, electricitycost,
gascost, ipc, discrate];
AppendTo[profitsResultsBlack, Join[{dataCities[[i, 1]]}, tmpProfitsBlack]];
tmpProfitsRed = calculateProfitsExperiments[dataCities[[i, 7]],
dataCities[[i, 8]], surface, nyears, COP, EER, electricitycost,
gascost, ipc, discrate];
AppendTo[profitsResultsRed, Join[{dataCities[[i, 1]]}, tmpProfitsRed]],
{i, cityNumber}
];
{profitsResultsBlack, profitsResultsRed}
]

(* Examples *)
(* Sevilla, black bad condition *)
calculateProfitability[badConditionCool - badCondition, 38, -5.6, 150,
10, 3, 0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]
(* Sevilla, black ok condition contractor cool *)
calculateProfitability[okConditionCompanyCool, 38, -5.6, 150, 10, 3,
0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]
(* Sevilla, black ok condition yourself cool *)
calculateProfitability[okConditionYourselfCool, 38, -5.6, 150, 10, 3,
0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]
(* Sevilla, red bad condition *)
calculateProfitability[badConditionCool - badCondition, 24, -3.6, 150,
10, 3, 0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]
(* Sevilla, red ok condition contractor cool *)
calculateProfitability[okConditionCompanyCool, 24, -3.6, 150, 10, 3,
0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]
(* Sevilla, red ok condition yourself cool *)
calculateProfitability[okConditionYourselfCool, 24, -3.6, 150, 10, 3,
0.70, 0.20, 0.047, 1.9, 4.05]

```

#### Data calculation for Spain

```

tmpTables1 = calculateSpanishSavings [spanishData, Rvalue76, Rvalue2006,
WhiteSolarReflectance, WhiteInfraredEmittance, BlackSolarReflectance,
BlackInfraredEmittance, RedSolarReflectance, RedInfraredEmittance,
KWhPriceIberdrola, StandardCOP, KWhPriceGas, StandardHeatingEfficiency,
KWhPriceIberdrola, StandardHeatingElectricalEfficiency];

```

```

(* OLD ROOFS *)
dataOldRoofsTable = tmpTables1[[3, 1]][[1, 1]] ;
(* We need to extract a table from a table inside another table... *)
{profitsOldBlackRoofsResults, profitsOldRedRoofsResults} =
  calculateArrayProfitsExperiments[dataOldRoofsTable, expSurface,
    expNyears, StandardCOP, StandardHeatingEfficiency, KWhPriceIberdrola,
    KWhPriceGas, expIPC, expDiscRate];
(* {VAN, TIR, payback, discounted payback} for black roofs *)
alphaProfitsOldBlackRoofsResults =
  AccountingForm[Sort[profitsOldBlackRoofsResults] // MatrixForm, 3,
    DigitBlock → 3]; (* alphabetical order with two decimal *)
TableForm[alphaProfitsOldBlackRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
vanProfitsOldBlackRoofsResults =
  AccountingForm[SortBy[profitsOldBlackRoofsResults, -#[[2]] &] // MatrixForm,
    3, DigitBlock → 3]; (* order by van with two decimal *)
TableForm[vanProfitsOldBlackRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
(* {VAN, TIR, payback, discounted payback} for red roofs *)
alphaProfitsOldRedRoofsResults =
  AccountingForm[Sort[profitsOldRedRoofsResults] // MatrixForm, 3,
    DigitBlock → 3]; (* alphabetical order with two decimal *)
TableForm[alphaProfitsOldRedRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
vanProfitsOldRedRoofsResults =
  AccountingForm[SortBy[profitsOldRedRoofsResults, -#[[2]] &] // MatrixForm,
    3, DigitBlock → 3]; (* order by van with two decimal *)
TableForm[vanProfitsOldRedRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]

```

```

(* NEW ROOFS *)
dataNewRoofsTable = tmpTables1[[4, 1]][[1, 1]] ;
(* We need to extract a table from a table inside another table... *)
{profitsNewBlackRoofsResults, profitsNewRedRoofsResults} =
  calculateArrayProfitsExperiments[dataNewRoofsTable, expSurface,
    expNyears, StandardCOP, StandardHeatingEfficiency, KWhPriceIberdrola,
    KWhPriceGas, expIPC, expDiscRate];
(* {VAN, TIR, payback, discounted payback} for black roofs *)
alphaProfitsNewBlackRoofsResults =
  AccountingForm[Sort[profitsNewBlackRoofsResults] // MatrixForm, 3,
    DigitBlock → 3]; (* alphabetical order with two decimal *)
TableForm[alphaProfitsNewBlackRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
vanProfitsNewBlackRoofsResults =
  AccountingForm[SortBy[profitsNewBlackRoofsResults, -#[[2]] &] // MatrixForm,
    3, DigitBlock → 3]; (* order by van with two decimal *)
TableForm[vanProfitsNewBlackRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
alphaProfitsNewRedRoofsResults =
  AccountingForm[Sort[profitsNewRedRoofsResults] // MatrixForm, 3,
    DigitBlock → 3]; (* order by van with two decimal *)
TableForm[alphaProfitsNewRedRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
vanProfitsNewRedRoofsResults =
  AccountingForm[SortBy[profitsNewRedRoofsResults, -#[[2]] &] // MatrixForm,
    3, DigitBlock → 3]; (* order by van with two decimal *)
TableForm[vanProfitsNewRedRoofsResults,
  TableHeadings →
  {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
    "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
    "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]

```

---

## Sensitivity

### Data calculation for Spain

```
(* Old black roofs *)
Manipulate[
  tmpTablesOldBlackSens = calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76,
    Rvalue2006, sensWhiteSolarReflectance, sensWhiteInfraredEmittance,
    sensBlackSolarReflectance, sensBlackInfraredEmittance,
    sensRedSolarReflectance, sensRedInfraredEmittance, sensPriceElectricity,
    sensStandardCOP, sensPriceGas, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensStandardHeatingElectricalEfficiency];
  dataOldBlackTableSens = tmpTablesOldBlackSens[[3, 1]][[1, 1]] ;
  (* We need to extract a table from a table inside another table... *)
  {profitsOldBlackRoofsResultsSens, tmp} =
    calculateArrayProfitsExperiments[dataOldBlackTableSens, sensSurface,
    sensNyears, sensStandardCOP, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensPriceGas, sensIPC, sensDiscRate];
  vanProfitsOldBlackRoofsResultsSens =
    SortBy[profitsOldBlackRoofsResultsSens, -#[[2]] &];
  (* order by van with two decimal *)
  TableForm[vanProfitsOldBlackRoofsResultsSens,
    TableHeadings →
      {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
        "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
        "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
  ,
  {{sensWhiteSolarReflectance, 60}, 50, 80, 2},
  {{sensWhiteInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensBlackSolarReflectance, 5}, 1, 15, 1},
  {{sensBlackInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensRedSolarReflectance, 25}, 15, 35, 1},
  {{sensRedInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensStandardCOP, 3}, 1, 5, .5},
  {{sensStandardHeatingEfficiency, .7}, .1, 3, .1},
  {{sensStandardHeatingElectricalEfficiency, 1}, .1, 3, .1},
  {{sensSurface, 150}, 25, 2000},
  {{sensNyears, 10}, 5, 25, 5},
  {{sensPriceElectricity, .2}, .05, .6, .01},
  {{sensPriceGas, .047}, .03, .2, .001},
  {{sensIPC, 1.9}, 1, 100, .5},
  {{sensDiscRate, 4.05}, 2, 15, .1}
]
```

```

(* Old red roofs *)
Manipulate[
  tmpTablesOldRedSens = calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76,
    Rvalue2006, sensWhiteSolarReflectance, sensWhiteInfraredEmittance,
    sensBlackSolarReflectance, sensBlackInfraredEmittance,
    sensRedSolarReflectance, sensRedInfraredEmittance, sensPriceElectricity,
    sensStandardCOP, sensPriceGas, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensStandardHeatingElectricalEfficiency];
  dataOldRedTableSens = tmpTablesOldRedSens[[3, 1]][[1, 1]];
  (* We need to extract a table from a table inside another table... *)
  {tmp, profitsOldRedRoofsResultsSens} =
    calculateArrayProfitsExperiments[dataOldRedTableSens, sensSurface,
    sensNyears, sensStandardCOP, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensPriceGas, sensIPC, sensDiscRate];
  vanProfitsOldRedRoofsResultsSens =
    SortBy[profitsOldRedRoofsResultsSens, -#[[2]] &];
  (* order by van with two decimal *)
  TableForm[vanProfitsOldRedRoofsResultsSens,
    TableHeadings →
      {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
        "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
        "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
  ,
  {{sensWhiteSolarReflectance, 60}, 50, 80, 2},
  {{sensWhiteInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensBlackSolarReflectance, 5}, 1, 15, 1},
  {{sensBlackInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensRedSolarReflectance, 25}, 15, 35, 1},
  {{sensRedInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensStandardCOP, 3}, 1, 5, .5},
  {{sensStandardHeatingEfficiency, .7}, .1, 3, .1},
  {{sensStandardHeatingElectricalEfficiency, 1}, .1, 3, .1},
  {{sensSurface, 150}, 25, 2000},
  {{sensNyears, 10}, 5, 25, 5},
  {{sensPriceElectricity, .2}, .05, .6, .01},
  {{sensPriceGas, .047}, .03, .2, .001},
  {{sensIPC, 1.9}, 1, 100, .5},
  {{sensDiscRate, 4.05}, 2, 15, .1}
]

```



```

(* New black roofs *)
Manipulate[
  tmpTablesNewBlackSens = calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76,
    Rvalue2006, sensWhiteSolarReflectance, sensWhiteInfraredEmittance,
    sensBlackSolarReflectance, sensBlackInfraredEmittance,
    sensRedSolarReflectance, sensRedInfraredEmittance, sensPriceElectricity,
    sensStandardCOP, sensPriceGas, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensStandardHeatingElectricalEfficiency];
  dataNewBlackTableSens = tmpTablesNewBlackSens[[4, 1]][[1, 1]] ;
  (* We need to extract a table from a table inside another table... *)
  {profitsNewBlackRoofsResultsSens, tmp} =
    calculateArrayProfitsExperiments[dataNewBlackTableSens, sensSurface,
    sensNyears, sensStandardCOP, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensPriceGas, sensIPC, sensDiscRate];
  vanProfitsNewBlackRoofsResultsSens =
    SortBy[profitsNewBlackRoofsResultsSens, -#[[2]] &];
  (* order by van with two decimal *)
  TableForm[vanProfitsNewBlackRoofsResultsSens,
    TableHeadings →
      {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
        "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
        "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
  ,
  {{sensWhiteSolarReflectance, 60}, 50, 80, 2},
  {{sensWhiteInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensBlackSolarReflectance, 5}, 1, 15, 1},
  {{sensBlackInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensRedSolarReflectance, 25}, 15, 35, 1},
  {{sensRedInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensStandardCOP, 3}, 1, 5, .5},
  {{sensStandardHeatingEfficiency, .7}, .1, 3, .1},
  {{sensStandardHeatingElectricalEfficiency, 1}, .1, 3, .1},
  {{sensSurface, 150}, 25, 2000},
  {{sensNyears, 10}, 5, 25, 5},
  {{sensPriceElectricity, .2}, .05, .6, .01},
  {{sensPriceGas, .047}, .03, .2, .001},
  {{sensIPC, 1.9}, 1, 100, .5},
  {{sensDiscRate, 4.05}, 2, 15, .1}
]

```

```

(* New red roofs *)
Manipulate[
  tmpTablesNewRedSens = calculateSpanishSavings[spanishData, Rvalue76,
    Rvalue2006, sensWhiteSolarReflectance, sensWhiteInfraredEmittance,
    sensBlackSolarReflectance, sensBlackInfraredEmittance,
    sensRedSolarReflectance, sensRedInfraredEmittance, sensPriceElectricity,
    sensStandardCOP, sensPriceGas, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensStandardHeatingElectricalEfficiency];
  dataNewRedTableSens = tmpTablesNewRedSens[[4, 1]][[1, 1]];
  (* We need to extract a table from a table inside another table... *)
  {tmp, profitsNewRedRoofsResultsSens} =
    calculateArrayProfitsExperiments[dataNewRedTableSens, sensSurface,
    sensNyears, sensStandardCOP, sensStandardHeatingEfficiency,
    sensPriceElectricity, sensPriceGas, sensIPC, sensDiscRate];
  vanProfitsNewRedRoofsResultsSens =
    SortBy[profitsNewRedRoofsResultsSens, -#[[2]] &];
  (* order by van with two decimal *)
  TableForm[vanProfitsNewRedRoofsResultsSens,
    TableHeadings →
      {None, {"Provincia", "VAN bad", "TIR bad", "PB bad", "DISC-PB bad",
        "VAN contr", "TIR contr", "PB contr", "DISC-PB contr", "VAN yourself",
        "TIR yourself", "PB yourself", "DISC-PB yourself"}}]
  ,
  {{sensWhiteSolarReflectance, 60}, 50, 80, 2},
  {{sensWhiteInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensBlackSolarReflectance, 5}, 1, 15, 1},
  {{sensBlackInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensRedSolarReflectance, 25}, 15, 35, 1},
  {{sensRedInfraredEmittance, 90}, 85, 100, 1},
  {{sensStandardCOP, 3}, 1, 5, .5},
  {{sensStandardHeatingEfficiency, .7}, .1, 3, .1},
  {{sensStandardHeatingElectricalEfficiency, 1}, .1, 3, .1},
  {{sensSurface, 150}, 25, 2000},
  {{sensNyears, 10}, 5, 25, 5},
  {{sensPriceElectricity, .2}, .05, .6, .01},
  {{sensPriceGas, .047}, .03, .2, .001},
  {{sensIPC, 1.9}, 1, 100, .5},
  {{sensDiscRate, 4.05}, 2, 15, .1}
]

```