

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

TESIS DOCTORAL

METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS POR CALOR EN LAS CALLES MEDIANTE LA DISPOSICIÓN DE ARBOLADO

Doctorando: Iñigo Azcarate Mutiloa

Directores de Tesis: Dr. Juan Ángel Acero Alejandro
Dr. Eduardo Rojí Chandro

Bilbao, noviembre de 2023

Resumen

La necesidad de reducir el estrés térmico relacionado con el calor exige una reevaluación de la generación de sombra en los espacios urbanos exteriores con el objetivo de lograr ciudades más habitables y sostenibles.

El sombreado reduce la temperatura media radiante (T_{mrt}) en las zonas peatonales urbanas mejorando el confort térmico relacionado con el calor. La sombra puede ser proporcionada por los propios edificios urbanos en función de la altura de los mismos, la anchura de la calle, y la orientación de la misma. Resulta posible la generación de sombra adicional en las calles por medio de la disposición de arbolado en función de las necesidades derivadas de sus características.

En esta Tesis se presenta una metodología estableciendo los criterios para la evaluación de la necesidad de arbolado en las calles, proponiendo las correspondientes directrices para la implantación de elementos en las mismas, aunque centrando los objetivos de sombreado en sus zonas peatonales. La metodología está planteada para poder ser utilizada en cualquier localización geográfica, aunque el desarrollo y la aplicación de la misma se centra en la parte oriental de la cornisa cantábrica. Para ello, se procede previamente al planteamiento de un proceso de selección de especies de arbolado, eligiéndose las adecuadas para el sombreado urbano en la cornisa cantábrica y determinando sus principales características.

La metodología se basa en el desarrollo de fórmulas matemáticas para determinar las propiedades geométricas y la posición más adecuadas de los árboles a disponer en las calles en función de la orientación de las mismas, la anchura de sus zonas peatonales, y la altura de las edificaciones que la delimitan.

El desarrollo y la aplicación práctica de la metodología requieren la evaluación del confort térmico así como la determinación de la capacidad de sombreado de las especies de árbol seleccionadas. Para ello, se utiliza una combinación de técnicas de modelado y medición experimental para establecer y verificar las pautas propuestas para la disposición del arbolado.

La aplicación práctica de la metodología se lleva a cabo para dos calles con distintas orientaciones existentes en la ciudad de Bilbao, realizándose una propuesta de mejora para ambas.

Palabras clave: Temperatura media radiante (T_{mrt}), PET, SOLWEIG, geometría urbana, árboles, sombreado, CAN-EYE.

Agradecimientos

Quisiera mostrar mi agradecimiento en general a todas las personas que me han ayudado a lo largo del desarrollo de la Tesis y han contribuido a su elaboración.

A mis directores de Tesis Eduardo Rojí, quien me ha prestado su ayuda y colaboración desde los primeros pasos del proceso, y Juan Ángel Acero, que me ha transmitido su extenso conocimiento en la materia de la Tesis y ha continuado aportando su colaboración a pesar de encontrarse en el otro extremo del mundo.

A los compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica que me han proporcionado la ayuda y los medios técnicos necesarios para la elaboración de la Tesis, con mención especial a Jesús Cuadrado.

A todos los que me acompañan y han acompañado en mi carrera profesional de arquitecto, principalmente a Ramón Losada, quien en todo momento me ha animado a continuar con la elaboración de la Tesis poniendo a mi disposición su experiencia en la profesión y la universidad.

A mi madre, que siempre ha mostrado su incondicional apoyo y confianza en mí, y a mi hermana, que fue quien me animó y ayudó a enfocar la temática de la Tesis. Un recuerdo especial para mi difunto padre, que entre otras muchas cosas me enseñó a mantener una innegociable seriedad en el trabajo.

Y por supuesto a mi mujer Ainhoa, que siempre se encuentra a mi lado de manera paciente y positiva, habiéndome aportado sus conocimientos de biología necesarios para la Tesis, y a nuestros hijos Telmo y Urko, que son la alegría de nuestras vidas.

A todo el resto de mi familia y amigos, que consiguen hacer que la vida sea siempre un poco más agradable y alegre.

Índice

Resumen.....	I
Agradecimientos.....	III
Índice.....	V
Lista de Figuras.....	XI
Lista de Tablas.....	XIX

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto general y problemática.....	3
1.1.1 El devenir climático. Influencia en el clima oceánico húmedo.....	3
1.1.2 La parte oriental de la cornisa cantábrica. Situación climática y variaciones previstas en la CAPV.....	5
1.1.3 Repercusiones del cambio climático en el espacio urbano.....	7
1.1.4 La isla de calor (Urban Heat Island - UHI).....	8
1.1.5 La resiliencia urbana.....	9
1.1.6 Posibilidades de mitigación de la isla de calor.....	11
1.2 Objetivos de la Tesis.....	12
1.3 Estructura de la Tesis.....	13

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1 Conceptos relacionados con el confort térmico urbano.....	19
2.1.1 Urbanización del espacio público. Componentes y funciones.....	19
2.1.2 Habitabilidad, confort y bienestar. Influencia del espacio urbano.....	21
2.1.3 Criterios bioclimáticos en espacios abiertos.....	23
2.1.4 El confort térmico respecto al estrés por calor. Tmrt e índice PET.....	26
2.1.5 La radiación solar y el sombreado.....	30

2.1.6 Sombreado de los edificios. AR, SVF y orientación.....	31
2.1.7 El arbolado y el sombreado.....	36
2.1.7.1 Las especies autóctonas.....	37
2.1.7.2 Características morfológicas del arbolado. Geometría.....	38
2.1.7.3 Características fisiológicas. LAD, LAI y transmisividad.....	40
2.1.7.4 Superficie sombreada por los árboles.....	44
2.1.7.5 Otras características no relacionadas con el sombreado.....	46
2.1.8 Acabados superficiales de los pavimentos. Albedo y emisividad.....	47
2.1.9 Acabados superficiales de las fachadas.....	50
2.2 Condiciones meteorológicas en la parte oriental de la cornisa cantábrica.....	51
2.2.1 Posición solar y cuantificación de la radiación.....	51
2.2.2 Temperatura del aire.....	53
2.2.3 Combinación de parámetros meteorológicos.....	55
2.3 Herramientas de simulación.....	58
2.3.1 Modelo SOLWEIG- Umep.....	59
2.3.2 Modelo CAN-EYE.....	62

CAPÍTULO 3

INFLUENCIA DE FACTORES EN EL CONFORT TÉRMICO URBANO CON LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE LA PARTE ORIENTAL DE LA CORNISA CANTÁBRICA.....	67
3.1- Análisis preliminar de los factores que influyen en el confort térmico urbano. Condiciones generales de partida.....	69
3.2 Influencia de los factores meteorológicos.....	71
3.2.1 Influencia de la irradiancia y la temperatura del aire.....	72
3.2.2 Influencia de la velocidad del viento y la humedad relativa.....	76
3.3 Influencia de la geometría y orientación de la calle.....	78
3.3.1 Porcentajes de área sombreada en la calle.....	78
3.3.2 Orientaciones E-O (Este-Oeste) y N-S (Norte-Sur).....	83
3.3.3 Orientaciones NO-SE (Noroeste-Sureste) y NE-SO (Noreste-Suroeste).....	87

3.4 Influencia de los pavimentos	90
3.4.1 Influencia del albedo.....	92
3.4.2 Influencia de la emisividad.....	94
3.5 Influencia del sombreado	97
3.6 Conclusiones del análisis preliminar	101

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS POR CALOR

EN LAS CALLES MEDIANTE LA DISPOSICIÓN DE ARBOLADO	107
4.1 Proceso de selección de especies de arbolado para sombreado	109
4.2 Metodología para la definición y posicionamiento del arbolado en calles	113
4.2.1 Criterios para el establecimiento y utilización de las fórmulas.....	115
4.2.2 Criterios para la definición de especies de arbolado.....	119
4.3 Simulaciones mediante el modelo SOLWEIG	121
4.4 Mediciones experimentales	122
4.4.1 Mediciones de T _{mrt} : termómetro globo.....	123
4.4.2 Mediciones de temperatura de pavimentos: cámara termográfica.....	124
4.4.3 Transmisividad de las especies de arbolado seleccionadas: fotografías hemisféricas y estimaciones con el modelo CAN-EYE.....	125

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DE ESPECIES Y DESARROLLO

DE FÓRMULAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ARBOLADO	129
5.1 Especies de arbolado seleccionadas y descartadas	131
5.1.1 Especies descartadas.....	131
5.1.2 Especies seleccionadas.....	135
5.2 Obtención de transmisividad de las especies seleccionadas mediante fotografías hemisféricas	151
5.3 Geometría. Sombra generada	181

5.4 Fórmulas para la caracterización de arbolado según las distintas orientaciones de la calle	183
5.4.1 Orientación Este-Oeste (E-O).....	184
5.4.2 Orientación Norte-Sur (N-S).....	194
5.4.3 Orientación Noroeste-Sureste (NO-SE).....	211
5.4.4 Orientación Noreste-Suroeste (NE-SO).....	223
5.5 Plantación y crecimiento del arbolado	232
5.6 Adaptación de la metodología a otras localizaciones geográficas	235

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS POR CALOR EN LAS CALLES	239
6.1 Descripción de la aplicación práctica de la metodología en Bilbao.....	241
6.2 Validación del modelo SOLWEIG: mediciones experimentales en la c/Gran Vía.....	242
6.3 Aplicación práctica en calle de orientación Este-Oeste (E-O): c/ Gran Vía.....	251
6.3.1 Fase 1: modelado SOLWEIG (orientación E-O).....	251
6.3.2 Fase 2: definición de especies de arbolado (orientación E-O).....	253
6.3.3 Fase 3: propuesta de optimización del confort térmico y verificación de mejoras (orientación E-O).....	259
6.4 Aplicación práctica en calle de orientación Norte-Sur (N-S): c/ Dr. Areilza.....	264
6.4.1 Fase 1: modelado SOLWEIG (orientación N-S).....	265
6.4.2 Fase 2: definición de especies de arbolado (orientación N-S).....	267
6.4.3 Fase 3: propuesta de optimización del confort térmico y verificación de mejoras (orientación N-S).....	275
6.5 Valoración general de los resultados de la aplicación práctica	278

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES	281
7.1 Introducción	283
7.2 Aportaciones y conclusiones	284
7.3 Futuras líneas de investigación	288
REFERENCIAS	291

ANEXO I

MEDICIONES DE TMRT MEDIANTE TERMÓMETRO GLOBO EN EL PATIO DEL COLEGIO JESUITAK INDAUTXU DE BILBAO	305
A.I. Mediciones de Tmrt en el patio del colegio Jesuitak Indautxu de Bilbao	307

ANEXO II

IMÁGENES DE MEDICIONES DE TEMPERATURA DE PAVIMENTOS MEDIANTE CÁMARA TERMOGRÁFICA EN LAS CALLES GRAN VÍA Y DR. AREILZA DE BILBAO	311
--	------------

Lista de figuras

- Figura 1.1 Previsión de variación de temperatura media para la década de 2050 en las ciudades. Los colores representan la variación de temperatura media anual para un escenario mid-range= (media 2040-2069) - (media 1971-2000). Fuente: ARC3.2-Segundo Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático y las Ciudades (Rosenzweig et al, 2015).
- Figura 1.2 Principales regiones climáticas de la CAPV. Fuente: Euskadi.eus.
- Figura 2.1 Calle Dr. Areilza de Bilbao. Zonas peatonales, carril bici, carril rodado y aparcamientos.
- Figura 2.2 Niveles de percepción térmica en relación a los valores PET para distintos lugares del mundo (Heng & Chow 2019).
- Figura 2.3 Diferentes tipos de radiación que influyen en la Tmrt.
- Figura 2.4 Espectro de ondas electromagnéticas (Çengel & Ghajar, 2011).
- Figura 2.5 Esquema de sección de calle de orientación Este-Oeste representando la altitud solar en los solsticios de invierno y verano en Bilbao. Líneas de sombra proporcionadas por edificio y árboles cilíndricos o esféricos.
- Figura 2.6 Izquierda. Esquema general de relación entre el AR, la atenuación de la radiación de onda corta y el atrapamiento de la radiación de onda larga (Theeuwes et al., 2014). Derecha. Flujo teórico del aire por una calle. Influencia de los edificios y el arbolado (Kong et al., 2017).
- Figura 2.7 Izquierda. Esquema parámetros geométricos del árbol. Derecha. Forma de las copas de *Quercus robur* (cilíndrica-ovoidal), *Acer platanoides* (esférica) y *Cedrus atlantica* (cónica).
- Figura 2.8 Fotografías de la c/Gran Vía de Bilbao en enero (Izquierda) y en mayo (Derecha).
- Figura 2.9. Ejemplo de imágenes para métodos indirectos de no-contacto en el cálculo de LAI: (a) Nube de puntos TLS. (b) Mediciones de LAI-2200 por cinco anillos sensores. (c) Imágenes DHP (hemisféricas) (Wei et al, 2020).
- Figura 2.10 Ilustración de la transferencia de calor en el entorno pavimentado (Chen et al, 2019).
- Figura 2.11 Esquema de influencia del albedo de pavimentos exteriores y fachadas de los edificios en las calles (Salvati et al., 2021).
- Figura 2.12 Carta solar para latitud 43° (Ente Vasco de la Energía).
- Figura 2.13 Valores de irradiación diaria media para días despejados en función del mes. Obtenido del Atlas solar del País Vasco (Ente Vasco de la Energía).

- Figura 2.14 Temperaturas del aire máximas medias mensuales (Arriba) y máximas absolutas mensuales (Abajo) durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre entre los años 2011 y 2020. Fuente Euskalmet (datos obtenidos de la estación meteorológica de Deusto).
- Figura 2.15 Datos de irradiancia y temperatura del aire en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre del año 2021 considerando los días donde las mediciones han reflejado valores máximos de irradiancia (días despejados). Fuente: Euskalmet.
- Figura 2.16 Representación del proceso utilizado por el modelo SOLWEIG para la obtención de la T_{mrt} (Lindberg & Grimmond, 2011).
- Figura 3.1 Representación de los resultados de T_{mrt} y valores PET para POI 1 (Acera Norte) en las 3 hipótesis consideradas para valorar la influencia de la irradiancia y la temperatura del aire.
- Figura 3.2 Representación de los resultados de T_{mrt} y valores PET para POI 2 (Acera Sur) en las 3 hipótesis consideradas para valorar la influencia de la irradiancia y la temperatura del aire.
- Figura 3.3 Resultados de valores PET en POI 1 (Acera Norte) y POI 2 (Acera Sur) para valorar la influencia de la velocidad del viento.
- Figura 3.4 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Este-Oeste para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.
- Figura 3.5 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Norte - Sur para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.
- Figura 3.6 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Noroeste-Sureste (NO-SE) para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.
- Figura 3.7 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Noreste-Suroeste (NE-SO) para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.
- Figura 3.8 Resultados de valores T_{mrt} y PET en POI 1- Acera Norte y POI 2- Acera Sur en calle de orientación Este-Oeste (E-O). Anchura de calle 20 m. y AR 1.
- Figura 3.9 Resultados de valores T_{mrt} y PET en POI 1- Acera Oeste y POI 2- Acera Este en calle de orientación Norte-Sur (N-S). Anchura de calle 20 m. y AR 1.
- Figura 3.10 Resultados de valores T_{mrt} y PET en calles de orientación Norte-Sur (en aceras Oeste y Este) y orientación Este-Oeste (aceras Norte y Sur) de un día de verano despejado en Oporto, Portugal. Horario solar UTC. (Lau KK, Lindberg, Rayner & Thorsson, 2015).
- Figura 3.11 Resultados de valores T_{mrt} y PET en POI 1- Acera Noreste y POI 2- Acera Suroeste en calle de orientación Noroeste-Sureste (NO-SE). Anchura de calle 20 m. y AR 1.
- Figura 3.12 Resultados de valores T_{mrt} y PET en POI 1- Acera Noroeste y POI 2- Acera Sureste en calle de orientación Noreste-Suroeste (NE-SO). Anchura de calle 20 m. y AR 1.

- Figura 3.13 Representación de los resultados de Tmrt y valores PET para POI 1 (Acera Norte) para Albedo 0,1 - 0,2 - 0,3.
- Figura 3.14 Representación de los resultados de Tmrt y valores PET para POI 2 (Acera Sur) para Albedo 0,1 - 0,2 - 0,3.
- Figura 3.15 Temperaturas superficiales obtenidas mediante cámara termográfica (valores corregidos mediante utilización de termómetro con sonda para medición de temperatura de superficie) para los puntos P1 (acera Norte, imagen de la izquierda) y P2 (vial central, imagen de la derecha) de la c/Gran Vía de Bilbao a las 14:00 del día 3 de agosto de 2018.
- Figura 3.16 Temperaturas superficiales obtenidas mediante cámara termográfica (valores corregidos mediante utilización de termómetro con sonda de temperatura de superficie) para los puntos P4 (acera Oeste, imagen de la izquierda) y P5 (carril-bici en acera Oeste, imagen de la derecha) de la c/Dr. Areilza de Bilbao a las 14:00 del día 3 de agosto de 2018.
- Figura 3.17 Representación de los resultados de Tmrt y valores PET para POI 1 (Acera Norte) para situación sin árboles y con árboles (transmisividad 0,1 - 0,2).
- Figura 3.18 Comparativa de Tmrt y valores PET para las situaciones sin árboles y con árboles de transmisividad 0,1 a lo largo de todas las horas del día en una calle de orientación Este-Oeste.
- Figura 4.1 Secuencia del proceso para la selección de especies de arbolado urbano.
- Figura 4.2 Representación gráfica de la metodología propuesta.
- Figura 4.3 Esquema de acimut solar para las 11:00, las 14:00 y las 17:00 respecto al Norte.
- Figura 4.4 Instrumentos para la campaña de medición de Tmrt.
- Figura 4.5 Cámara termográfica testo 875i y termómetro con sonda de superficie.
- Figura 4.6 Izquierda: cámara fotográfica Canon PowerShot SX280 HS. Derecha: ejemplo imagen hemisférica de *Acer platanoides*.
- Figura 5.1 Ejemplo de especies con morfología inadecuada. De izquierda a derecha: *Abies alba*, *Cupressus sempervirens* y *Eleagnus angustifolia*.
- Figura 5.2 Ejemplo de especies ramosas desde la base. De izquierda a derecha: *Laurus nobilis*, *Tamarix gallica* y *Salix alba*.
- Figura 5.3 Ejemplo de especies caída de frutos. De izquierda a derecha: *Corylus avellana*, *Juniperus communis* y *Prunus avium*.
- Figura 5.4 Ejemplo de especies tóxicas e invasoras. De izquierda a derecha: *Acacia dealbata*, *Robinia pseudoacacia* y *Taxus baccata*.
- Figura 5.5 Ejemplo de especies afectadas por epidemia. De izquierda a derecha: *Ulmus minor* (características de su hoja en imagen central) y *Ulmus glabra*.
- Figura 5.6 Esquema geométrico de la superficie de pavimento sombreada por árboles esféricos a las 11:00, 14:00 y 17:00 del mes de junio. La línea continua representa la sombra proyectada.

- Figura 5.7 Esquema geométrico de la superficie de pavimento sombreada por árboles cónicos a las 11:00, 14:00 y 17:00 del mes de junio. La línea continua representa la sombra proyectada.
- Figura 5.8 Esquema de calle con orientación Este-Oeste, incluyendo posibles rotaciones de hasta $27,5^\circ$ respecto al eje geográfico E-O.
- Figura 5.9 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Norte.
- Figura 5.10 Diagramas de vista de planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la pared del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sur.
- Figura 5.11 Esquema de calle con orientación Norte-Sur, incluyendo posibles rotaciones de hasta $27,5^\circ$ respecto al eje geográfico N-S.
- Figura 5.12 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Oeste.
- Figura 5.13 Diagramas en planta y en alzado para corrección de distancia a fachada (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Oeste considerando las 11:00.
- Figura 5.14 Diagramas en direccionalidad Norte-Sur para el cálculo de separación entre árboles esféricos y cónicos.
- Figura 5.15 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Este.
- Figura 5.16 Diagramas en planta y en alzado para corrección de distancia a fachada (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Este considerando las 17:00.
- Figura 5.17: Esquema de calle con orientación Noroeste-Sureste, incluyendo posibles rotaciones de la calle de entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ (en el sentido de las agujas del reloj) respecto al eje geográfico E-O.
- Figura 5.18 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste.
- Figura 5.19 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste a las 14:00.
- Figura 5.20 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia "corregida" para las 17:00 desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste.

- Figura 5.21 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Suroeste.
- Figura 5.22 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por introducción del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Suroeste a las 14:00.
- Figura 5.23: Esquema de calle con orientación Noreste-Suroeste incluyendo posibles rotaciones de entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ (en el sentido contrario a las agujas del reloj) respecto al eje geográfico E-O.
- Figura 5.24 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste.
- Figura 5.25 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste a las 14:00.
- Figura 5.26 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia “corregida” para las 11:00 desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste.
- Figura 5.27 Diagramas de vista en planta y en para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la pared del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sureste.
- Figura 5.28 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sureste a las 14:00.
- Figura 5.29 Árboles recién plantados en la c/ María Díaz de Haro de Bilbao. Izquierda: *Acer opalus*. Centro: *Tilia platyphyllos*. Derecha: *Tilia tomentosa*.
- Figura 5.30 Genotipo y fenotipo. Posibles modificaciones en la geometría de los árboles en función de condicionantes internos y externos (Rotzer et al., 2020).
- Figura 5.31 Recorrido solar durante los meses del año para distintas latitudes. Izquierda superior: Bilbao (Latitud 43°). Derecha superior: Tenerife (latitud 28°). Izquierda inferior: Libreville (Latitud 0°). Derecha inferior: Johannesburgo (Latitud -26°). Fuente: SunEarthTools.com.
- Figura 6.1 Localización del área de estudio (c/Gran Vía) para las mediciones con termómetro globo. Los círculos verdes en planta representan los árboles existentes en la actualidad.

- Figura 6.2 Relación entre la localización de la estación meteorológica y el área de estudio.
- Figura 6.3 Izquierda: Imágenes hemisféricas hacia arriba para el cálculo la transmisividad de los árboles actuales mediante el modelo CAN-EYE. Derecha: Imagen del árbol *Tilia platyphyllos*.
- Figura 6.4 Comparación entre los resultados del modelo SOLWEIG y los de la campaña de medición in situ. Las mediciones se realizaron el 30 de agosto de 2019.
- Figura 6.5 Comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas con cámara termográfica y consideradas por el modelo SOLWEIG en los puntos P1 y P2 de la c/ Gran Vía.
- Figura 6.6 Comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas con cámara termográfica y consideradas por el modelo SOLWEIG en los puntos P4 y P5 de la c/ Dr. Areilza.
- Figura 6.7 Valores Tmrt y PET de los tres puntos (POI) considerados en la c/ Gran Vía según modelado SOLWEIG con datos meteorológicos del 30 de agosto de 2019. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.
- Figura 6.8 Esquema de sombreado en la zona peatonal Norte de la c/Gran Vía a las 14:00 y a las 17:00 del mes de junio mediante árboles esféricos.
- Figura 6.9 Comparación de los valores de Tmrt en el POI 3 entre el estado actual y la situación propuesta en la c/Gran Vía (sin árboles en la zona peatonal Sur donde se encuentra el POI 3). Modelado con las condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019.
- Figura 6.10 Comparación entre el estado actual y la propuesta de optimización. Porcentajes de área sombreada en la acera peatonal Norte de la c/Gran Vía.
- Figura 6.11 Distribución espacial de los valores de Tmrt de estado actual y propuesta de optimización en la c/ Gran Vía. Modelado SOLWEIG con las condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019.
- Figura 6.12 Comparación entre estado actual y propuesto. Valores de PET en el POI 1 para el 30 de agosto de 2019. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.
- Figura 6.13 Localización de la c/Dr. Areilza de Bilbao. Los círculos verdes representan los árboles existentes en la actualidad.
- Figura 6.14 Valores Tmrt y PET de los dos puntos (POI) considerados en la c/ Dr. Areilza según modelado SOLWEIG con datos meteorológicos del 21 de junio de 2017. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.
- Figura 6.15 Esquema de sombreado en la zona peatonal Oeste a las 14:00 el mes de junio (izquierda), mayo-julio (centro) y abril-agosto (derecha) mediante árboles cónicos.
- Figura 6.16 Comparación entre el porcentaje sombreado por árboles esféricos y cónicos obtenidos mediante fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00, y mediante corrección con parámetros de las 17:00 en la acera peatonal Este de la c/Dr. Areilza.

-
- Figura 6.17 Esquema de sombreado generado por árboles cónicos (Izquierda a las 14:00 y Derecha a las 17:00) para fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00 (parte superior) y corrección con parámetros de las 17:00 (parte inferior) en la acera peatonal Este.
- Figura 6.18 Comparación entre el estado actual y la propuesta de optimización. Porcentaje de área sombreada en la acera peatonal Oeste de la c/ Dr. Areilza.
- Figura 6.19 Distribución espacial de los valores de Tmrt de estado actual y propuesta de optimización para la c/ Dr. Areilza. Modelado con las condiciones meteorológicas del 21 de junio de 2017.
- Figura 6.19 Ejemplos de integración de arbolado en otras calles de Bilbao. Izquierda: zona San Mamés. Derecha: zona Abandoibarra.
- Figura A.I.1 Punto de medición e instrumentos para la campaña en el patio del colegio Jesuitak Indautxu.
- Figura A.I.2 Comparación entre los resultados del modelo SOLWEIG y los de la campaña de medición in situ realizada en el patio del colegio Jesuitak Indautxu el día 30 de agosto de 2019.

Lista de tablas

- Tabla 2.1 Estrategias bioclimáticas según características de las regiones climáticas mundiales. Elaboración propia a partir de la información obtenida del libro “Urbanismo Bioclimático” (Higuera, 2006).
- Tabla 2.2 Niveles PET en correspondencia con el índice PMV establecidos para Europa Central.
- Tabla 2.3 Tipologías de Local Climate Zones (LCZ) de mayor presencia en entornos urbanos europeos (Stewart & Oke 2012).
- Tabla 2.4 Parámetros orientativos de Aspect Ratio (AR), Sky View Factor (SVF), fracción de superficie construida y altura media de los edificios para tipologías de Local Climate Zones (LCZ) de mayor presencia en entornos urbanos europeos (Stewart & Oke 2012).
- Tabla 3.1 Esquemas gráficos de las distintas orientaciones de calle consideradas.
- Tabla 3.2 Datos meteorológicos correspondientes a los días 21 y 30 de junio de 2017. Irradiancia (R_a), Velocidad del viento (V_a), Temperatura del aire (T_a) y Humedad relativa (Hum). Obtenidos de Euskalmet- Estación de Deusto.
- Tabla 4.1 Baremo densidad de foliación – parámetro LAI.
- Tabla 4.2 Criterios iniciales para la elección del ámbito de utilización. H. max. significa altura máxima del árbol y Dc. med. diámetro de copa media.
- Tabla 5.1 Especies descartadas y criterios de descarte.
- Tabla 5.2 Número de especies por ámbito de utilización.
- Tabla 5.3 Especies recomendadas por ámbito geográfico de la cornisa cantábrica.
- Tabla 5.4 Diámetros de copa en función del diámetro del tronco a altura 1,30 m. Información obtenida de (Rotzer et al., 2020).
- Tabla 6.1 Condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019 y resultados modelo SOLWEIG.
- Tabla 6.2 Resultados de las Mediciones realizadas in situ.
- Tabla 6.3 Resultados del radio adecuado de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1) para árboles esféricos y cónicos en la acera Norte de la c/Gran Vía.
- Tabla 6.4 Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Norte de la c/Gran Vía a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.
- Tabla 6.5 Porcentajes de área sombreada para la acera Norte de la c/Gran Vía por cada forma de árbol propuesto y según separación de elementos. Se incluye también la situación actual.

Tabla 6.6	Resultados del radio adecuado de la copa (R_1), distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1), y separación para árboles esféricos y cónicos en la acera Oeste de la c/Dr. Areilza.
Tabla 6.7	Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Oeste de la c/Dr. Areilza a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.
Tabla 6.8	Áreas sombreadas para la acera Oeste de la c/Dr. Areilza por árboles esféricos y cónicos y en la situación actual.
Tabla 6.9	Resultados del radio de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos en la acera Este de la c/Dr. Areilza aplicando las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00.
Tabla 6.10	Resultados del radio de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos en la acera Este de la c/Dr. Areilza aplicando las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 17:00.
Tabla 6.11	Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Este de la c/Dr. Areilza a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.
Tabla A.I.1	Condiciones meteorológicas y resultados del modelo SOLWEIG para la campaña de medición en el patio del colegio Jesuitak Indautxu.
Tabla A.I.2	Resultados de las Mediciones realizadas en la campaña del patio del colegio Jesuitak Indautxu.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general y problemática

La comunidad internacional investigadora en materia climática viene concluyendo que diversas actividades humanas están cambiando el clima global en la tierra lo que conllevaría el incremento de riesgos para las ciudades y los espacios urbanos en general.

Estas conclusiones provienen de diferentes tipos de evidencias basadas en investigaciones que parten de la historia climática mundial y toman como referencia los registros climáticos pormenorizados en períodos recientes.

Los espacios urbanos y los ciudadanos han comenzado ya a experimentar los efectos derivados del cambio climático global, por lo que toma relevancia establecer de qué manera va a afectar el cambio climático a las ciudades. Entre otros efectos, se prevé que el calentamiento global multiplique los fenómenos climáticos extremos (por ejemplo inundaciones y sequías, u olas de calor y de frío) agravando los procesos de desertificación y erosión, lo cual conllevaría una pérdida generalizada de biodiversidad.

En septiembre de 2015, las Naciones Unidas añadieron el nuevo Objetivo nº11 para el Desarrollo Sostenible, el cual consiste en “Hacer las ciudades y los asentamientos urbanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (Rosenzweig et al, 2015).

1.1.1 El devenir climático. Influencia en el clima oceánico húmedo

Según el Segundo Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático y las Ciudades (ARC3.2) (Rosenzweig et al, 2015) preparado por el Urban Climate Change Research Network (UCCRN) para la Cumbre Climática de París de diciembre de 2015, las variaciones climáticas más relevantes acaecidas y previstas para los próximos años son las siguientes:

- La temperatura media anual (en 39 ciudades objeto de estudio del ARC3.2) se ha incrementado en un ratio de entre $0,12^{\circ}\text{C}$ y $0,45^{\circ}\text{C}$ por década en el período que va desde el año 1961 hasta el 2010.
- El incremento de la temperatura media anual (en 100 ciudades objeto de estudio del ARC3.2) está previsto que sea de entre $0,7^{\circ}\text{C}$ y $1,5^{\circ}\text{C}$ para la década de 2020, de entre $1,3^{\circ}\text{C}$ y $3,0^{\circ}\text{C}$ para la década de 2050 (Figura 1.1), y de entre $1,7^{\circ}\text{C}$ y $4,9^{\circ}\text{C}$ para la década de 2080.

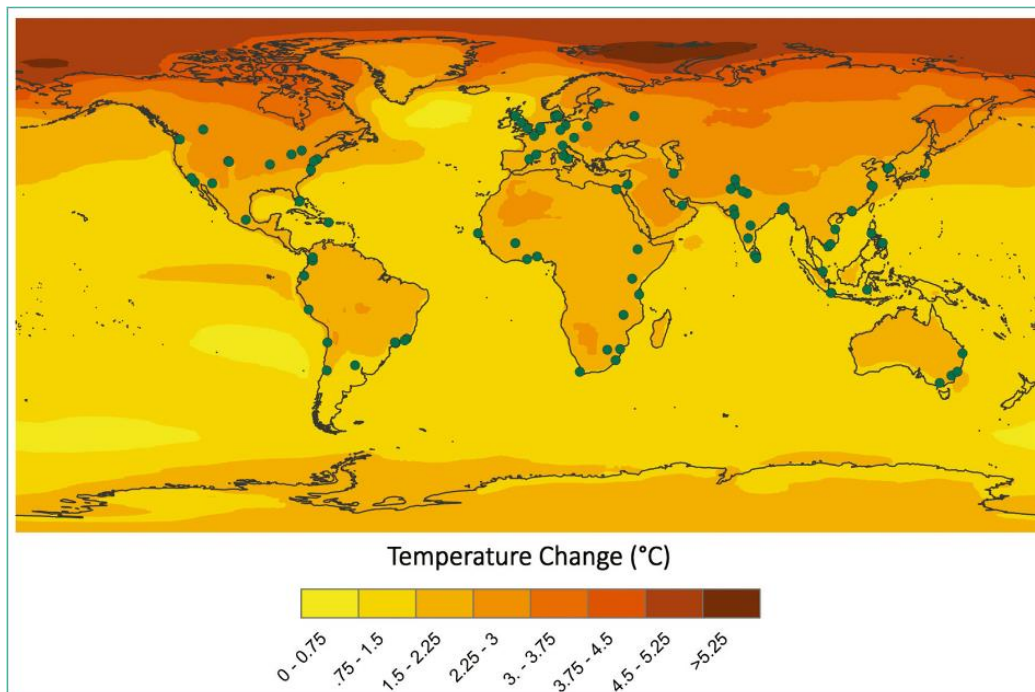


Figura 1.1 Previsión de variación de temperatura media para la década de 2050 en las ciudades.

Los colores representan la variación de temperatura media anual para un escenario mid-range= (media 2040-2069) - (media 1971-2000). Fuente: ARC3.2- Segundo Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático y las Ciudades (Rosenzweig et al, 2015).

- La variación de las precipitaciones medias anuales (en 100 ciudades objeto de estudio del ARC3.2) está prevista que sea de entre -7% y $+10\%$ para la década de 2020, de entre -9% y $+15\%$ para la década de 2050, y de entre -11% y $+21\%$ para la década de 2080.

- La elevación del nivel del mar (en 52 ciudades costeras objeto de estudio del ARC3.2) está prevista que sea de entre 4 y 19 cm. para la década de 2020, de entre 15 y 60 cm. para la década de 2050, y de entre 22 y 124 cm. para la década de 2080.

1.1.2 La parte oriental de la cornisa cantábrica. Situación climática y variaciones previstas en la CAPV

España, debido a la situación geográfica de la Península Ibérica, es uno de los países europeos más vulnerables al calentamiento global. Si bien no se prevé que sea la más afectada dentro de la Península, la cornisa cantábrica sufrirá asimismo la influencia del cambio climático.

La Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) representa una situación climática paradigmática dentro de la cornisa cantábrica: sus diferentes comarcas comprenden una región de la Península Ibérica situada en el cantábrico oriental, presentando una orografía compleja que modifica de forma importante los flujos de aire a través de los diferentes valles, lo cual propicia el desarrollo de brisas de mar, valle y ladera.

Su situación geográfica condiciona de forma importante su meteorología y su clima. Los principales factores determinantes del clima en la CAPV son su latitud (situada en latitudes medias 42^o-43^o), su distancia al mar (sus costas están bañadas por el mar Cantábrico) y su complejo relieve. Teniendo en cuenta estos tres elementos, se pueden distinguir tres grandes subregiones climáticas dentro de la CAPV (Figura 1.2):

- Vertiente Atlántica: subregión de temperaturas moderadas en invierno y verano, muy lluviosas a lo largo del año y con gran influencia oceánica en términos generales.

- Zona intermedia de transición: clima de características intermedias entre el clima oceánico y el mediterráneo.
- Subregión Sur: veranos secos y calurosos, e inviernos fríos. Pluviosidad relativamente débil a lo largo del año para estas latitudes (precipitaciones < 50 mm/mes).



Figura 1.2 Principales regiones climáticas de la CAPV. Fuente: Euskadi.eus

La pluviosidad en la Vertiente Atlántica es de 1.100 - 2.000 mm/año, mientras que en la Subregión Sur es de 700 - 900 mm/año. Respecto a la temperatura, la media anual es en general de 14°C-15 °C, con una oscilación intermensual de temperatura de 11°C-12°C en la Vertiente Atlántica y de 17°C-18°C en la Subregión Sur.

A su vez, las variaciones climáticas esperadas en la CAPV son las que se enumeran a continuación: (González-Aparicio & Hidalgo, 2012).

- En verano, el percentil 90 de la temperatura máxima muestra un incremento previsto de 1,9°C para el período 2020-2050, y de 3,5°C para el período 2070-2100.
- En invierno, los cambios del percentil 10 son de un incremento de 2,5°C en el período 2020-2050, y de 3,1°C en el período 2070-2100.

- Se prevé que las olas de frío desaparezcan a partir del año 2070, mientras que la frecuencia de las olas de calor en verano aumentará ligeramente, y las mismas tendrán una mayor duración.
- Disminución de las precipitaciones en verano (entre el 30% y el 50%) e incremento en invierno (entre el 5% y el 20%) para el año 2100.
- Incremento en un 40% de la precipitación extrema entre 2041 y 2080, y ascenso del nivel medio del mar de entre 29 y 49 cm.

1.1.3 Repercusiones del cambio climático en el espacio urbano

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es un organismo establecido conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Desde 1988 ha venido proporcionando las evaluaciones científicas y técnicas más autorizadas y objetivas en el ámbito climático.

Según establece este Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las principales repercusiones a tener en cuenta en los espacios urbanos de cara al futuro son las siguientes:

- Variaciones en la temperatura urbana: incremento de temperatura media urbana como consecuencia tanto del aumento de la temperatura media regional derivada del cambio climático, como del aumento de la extensión y población urbanas. Ello podría recíprocamente acentuarse por medio de los efectos derivados de la isla de calor.
- Sequías y escasez de agua, incrementándose las restricciones de abastecimiento, pudiendo incluso generar problemas de escasez de alimentos en suministros de reducida envergadura.

- Inundaciones de origen marítimo como consecuencia de la elevación del nivel del mar y oleadas de tormentas, pudiendo generar consecuencias negativas en ecosistemas y vegetación costera, propiedades privadas o actividades comerciales.
- Inundaciones en interior y peligros hidrológicos y geohidrológicos a escala urbana con posible destrucción de infraestructuras públicas y privadas, contaminación de fuentes de obtención de agua, y consiguientes enfermedades de origen hídrico.
- Aumento de enfermedades y epidemias en entornos urbanos derivados de la contaminación del aire y la contaminación del agua y los alimentos.

1.1.4 La isla de calor (Urban Heat Island-UHI)

El efecto conocido como isla de calor (UHI- Urban Heat Island) es una situación que principalmente suele darse en entornos urbanos, sobre todo en los de una considerable dimensión, consistente en la acumulación de calor por parte de los materiales mediante los cuales están contruidos y el impedimento que producen los edificios para la disipación de dicho calor acumulado (Oke, 1982; Santamouris, 2001), principalmente por la noche (Grimm et al., 2008; Salmond et al., 2016). La acumulación se ve también incrementada por la generación de calor de origen antropogénico que se da en los espacios urbanos (Yu & Hien, 2006).

Los materiales utilizados tradicionalmente para la construcción de los distintos elementos que componen la ciudad presentan unos valores medios de albedo (porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma) menores y de emisividad térmica mayores que en el medio rural (Doulos, Santamouris & Livada, 2004). La consecuencia directa es una mayor absorción y almacenamiento de energía solar incidente en los materiales urbanos (Chen et al, 2019).

Se prevé que las ciudades puedan experimentar un aumento del efecto isla de calor (UHI) como consecuencia del calentamiento global y el aumento de la población residente en las ciudades con la consecuente extensión de la superficie urbana (Oleson et al., 2015).

El calentamiento local en las ciudades como consecuencia del efecto isla de calor (UHI) incrementa las temperaturas urbanas, generando pérdidas económicas adicionales a las derivadas de mitigar el propio calentamiento global. Por consiguiente, las estrategias de adaptación de las ciudades al calentamiento local (UHI) conllevarían importantes futuros beneficios económicos a las propias ciudades (Estrada, Botzen & Tol, 2017).

1.1.5 La resiliencia urbana

La definición de resiliencia aplicada al urbanismo consiste en la capacidad de los espacios urbanos y los sistemas de los cuales dependen (incluso su población, empresas y gobiernos) para anticiparse, reducir, adaptarse y recuperarse de una manera eficiente ante los efectos de una circunstancia adversa.

El concepto de resiliencia no solamente incluye la capacidad de recuperarse de una circunstancia de impacto, sino que también consiste en evitar o minimizar la necesidad de acometer dicha recuperación, planteando estrategias a modo de prevención (IPCC WG2, 2014).

En términos generales, la resiliencia ante el clima de los espacios urbanos está fuertemente influenciada por los siguientes factores:

- Calidad de las edificaciones y construcciones.
- Efectividad del planeamiento urbano, principalmente en lo que respecta al uso del suelo.
- Calidad de las infraestructuras y servicios clave.

Muchas ciudades no están equipadas o configuradas en la actualidad para poder responder a los riesgos asociados al incremento de temperatura. A este respecto, y desde la perspectiva del uso del suelo, toma relevancia la consideración de las funciones de los ecosistemas urbanos y las infraestructuras verdes (vegetación) y azules (agua) en la urbanización del espacio público urbano (Sukkop & Werner, 1989; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Yu & Hien, 2006).

La restauración de los ecosistemas urbanos y la generación de zonas arboladas pueden contribuir entre otros a los siguientes aspectos (Fahmy, Sharples & Yahiya, 2010; Holst & Mayer, 2011).

- Adaptación al incremento de temperatura urbana y mitigación de sus principales efectos.
- Purificación del aire y disminución de los gases de efecto invernadero.
- Absorción del agua de lluvia y moderación de las temperaturas.

Cabe señalar que algunos otros aspectos para la mitigación de los efectos del cambio climático requieren formas urbanas densificadas, como por ejemplo una mayor efectividad del sistema de transporte público, el cual conllevaría una disminución de las emisiones de CO₂.

No obstante, los espacios urbanos pueden también requerir planteamientos menos densificados favoreciendo la generación de áreas abiertas y zonas verdes que posibiliten la gestión del agua de lluvia (tormentas) y reduzcan el sobrecalentamiento nocturno (efecto UHI) mejorando la ventilación en el espacio abierto (IPCC WG2, 2014).

La adaptación o anticipación a circunstancias no deseadas en una determinada zona puede conllevar claros beneficios para sus habitantes, como por ejemplo la mejora del confort térmico en los espacios urbanos.

1.1.6 Posibilidades de mitigación de la isla de calor.

La mitigación del efecto isla de calor (UHI) es uno de los mayores retos en el futuro para la sostenibilidad urbana. Algunos de los métodos generales de eficacia probada para conseguir el enfriamiento del entorno urbano son los siguientes (Akbari, Pomerantz & Taha, 2001; Gartland, 2008; IPCC WG3, 2014).

- Incremento de superficie de zonas verdes urbanas.
- Un mayor control de la incidencia de radiación solar directa, incrementando la superficie arbolada a modo de protección solar.
- Incremento en la apertura de espacios que permiten la ventilación y eliminación del calor acumulado por parte del viento.
- La utilización de mayor cantidad de materiales “fríos” o reflectivos que absorban una menor cantidad de radiación solar.

Para el caso concreto de Bilbao, el proyecto europeo RAMSES (2013-2017) desarrolló algunas soluciones y recomendaciones de diseño urbano para la mitigación del efecto de la isla de calor. Se analizó la implantación de estrategias “verdes” para la mitigación del riesgo de existencia de olas de calor en la ciudad, de manera que pudieran ser aplicadas en el planeamiento urbano de la misma (Lobaccaro & Acero, 2015; Lobaccaro et al., 2019).

Los resultados de dicho proyecto establecieron guías de diseño urbano para nuevos desarrollos o zonas urbanas ya consolidadas. Los factores considerados influyentes fueron los siguientes, distinguiéndose los mismos para nuevos desarrollos o zonas urbanas ya consolidadas:

Para las áreas de nueva creación:

- Altura de las edificaciones.
- Anchura de la calle.
- Porcentaje del área destinada a peatones.
- Porcentaje del área destinada al tráfico motorizado.

- Orientación del área y de las propias calles.
- Grado de exposición solar de las fachadas.

Para las áreas urbanas ya consolidadas:

- La elección de la adecuada posición del arbolado y el tipo de especie.
- La elección de una adecuada posición de las áreas verdes (central o lateral) y sus porcentajes.
- La elección del adecuado material para el pavimento urbano.

1.2 Objetivos de la Tesis

En relación a lo expuesto en este capítulo introductorio, y más concretamente a los aspectos relacionados con el diseño urbano para la mitigación del efecto de la isla de calor, el objetivo principal de esta Tesis es la presentación de una metodología para la implantación de árboles en calles urbanas centrandó las necesidades de sombreado en sus zonas peatonales, y aplicando la misma en la parte oriental de la cornisa cantábrica. Para ello, se sigue un proceso que incluye los siguientes pasos:

- Estudio preliminar a modo de descripción-evaluación de la influencia que tienen los distintos parámetros meteorológicos en el confort térmico urbano relacionado con el estrés por calor, tomando como referencia las condiciones concretas de la ciudad de Bilbao, la cual es la más extensa en la parte oriental de la cornisa cantábrica.
- Análisis de la repercusión de las características geométricas y orientación de las calles en el confort térmico relacionado con el estrés por calor, estimando a modo preliminar las necesidades de sombra para las zonas peatonales de las mismas.
- Valoración del grado de reducción de la temperatura media radiante (T_{mrt}) mediante el sombreado proporcionado por el arbolado en las calles.

- Proceso de selección de especies autóctonas adecuadas para la función de generación sombra en espacios urbanos de la cornisa cantábrica, completada con la obtención de la transmisividad de las especies escogidas mediante mediciones experimentales.
- Desarrollo de una metodología para establecer la distribución de árboles en calles urbanas, incluyendo ecuaciones matemáticas para evaluar la necesidad de arbolado, identificar las geometrías arbóreas apropiadas, y posicionar los elementos en las calles según su orientación, de modo que el mayor porcentaje posible de superficie de sus zonas peatonales pueda quedar sombreada en las horas de máxima exposición a la radiación solar directa.
- Aplicación de la metodología propuesta en dos casos reales, previa validación del modelo SOLWEIG a través de mediciones experimentales realizadas para uno de los casos de estudio.

Conviene remarcar que dentro de los objetivos de esta Tesis no se incluye la obtención de resultados minuciosamente precisos para la T_{mrt} , los valores PET o la transmisividad de las especies de arbolado, ya que los mismos están parcialmente condicionados por los períodos temporales de evaluación considerados, así como por las condiciones meteorológicas predominantes y el estado de la vegetación durante dichos períodos. No obstante, para los distintos modelados o mediciones de campo se utilizan parámetros meteorológicos reales además de casos de estudio verdaderos para la aplicación práctica de la metodología propuesta.

1.3 Estructura de la Tesis

La Tesis se estructura en 7 capítulos (además de las referencias) independientes aunque relacionados entre sí. Se añaden asimismo 2 Anexos, los cuales incluyen algunos de los resultados obtenidos en los diversos trabajos de campo realizados.

Tras la introducción del CAPÍTULO 1, en la que se presenta la problemática como consecuencia de las repercusiones derivadas del cambio climático y la isla de calor, en el CAPÍTULO 2 se realiza un repaso de los conceptos generales relacionados con el confort térmico urbano y más concretamente con los relativos al estrés por calor, a modo de estado del arte de la temática de la Tesis. Posteriormente, se describen las condiciones meteorológicas generales de la parte oriental de la cornisa cantábrica en lo que se refiere a la radiación solar y la temperatura del aire. En este capítulo también se presentan los modelos utilizados tanto para la estimación de la temperatura media radiante T_{mrt} y los valores PET (modelo SOLWEIG), así como para la caracterización de las propiedades fisiológicas (transmisividad) de las especies de arbolado seleccionadas (modelo CAN-EYE).

La finalidad del CAPÍTULO 3 consiste en un estudio preliminar para la evaluación de los factores que influyen en el confort térmico urbano relacionado con el estrés por calor, estableciendo el grado de repercusión de cada uno de ellos según las condiciones meteorológicas de la parte oriental de la cornisa cantábrica. En este capítulo se obtienen unas primeras conclusiones parciales necesarias para la propuesta de soluciones efectivas que se desarrollan en la Tesis.

En el CAPÍTULO 4 se presenta la metodología propuesta en la Tesis para la reducción de estrés por calor en las calles mediante la disposición de arbolado. En el mismo se incluye primeramente la descripción de las directrices del proceso de selección de especies de arbolado, y posteriormente se expone la propia metodología para la definición y posicionamiento del arbolado en calles. Asimismo, se describen los parámetros de configuración generales utilizados para las simulaciones con los modelos SOLWEIG y CAN-EYE, además de presentarse los procesos utilizados para las distintas mediciones experimentales realizadas a lo largo de la Tesis.

En el CAPÍTULO 5 se presentan los resultados correspondientes a la selección razonada de las especies de arbolado apropiadas para su plantación en los

entornos urbanos de la cornisa cantábrica. Se incluye asimismo el resumen de los parámetros biofísicos obtenidos empíricamente para las especies de arbolado seleccionadas mediante fotografías hemisféricas procesadas mediante el modelo CAN-EYE. Por otra parte, se presenta el desarrollo de las fórmulas matemáticas para la obtención de las características geométricas apropiadas y posicionamiento del arbolado en las calles en función de su anchura, orientación y altura de las edificaciones que las delimitan.

En el CAPÍTULO 6 se desarrollan los ejemplos de aplicación práctica de la metodología propuesta para reducir el estrés por calor en las calles. Previamente se presentan los resultados obtenidos en las mediciones experimentales realizadas mediante termómetro globo y cámara termográfica para el caso de estudio de la c/Gran Vía, llevadas a cabo con el objetivo de validar el modelo SOLWEIG. La aplicación práctica se realiza para las calles Gran Vía y Dr. Areilza de Bilbao, las cuales tienen una orientación Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente.

En el CAPÍTULO 7 se exponen las conclusiones finales basadas en los resultados y análisis de los capítulos anteriores. Asimismo, se proponen algunas nuevas líneas de investigación que podrían ser desarrolladas a partir del contenido de esta Tesis.

Por último, se incluyen las referencias bibliográficas más relevantes que se han tenido en consideración durante el desarrollo de la Tesis. Al final se adjuntan 2 Anexos con resultados adicionales correspondientes a los diversos trabajos de campo realizados en el desarrollo del proceso de investigación. En el ANEXO I se presentan los resultados de la campaña de medición mediante termómetro globo realizada en el colegio Jesuitak Indautxu de Bilbao, utilizada también para la validación del modelo SOLWEIG. En el ANEXO II se incluyen las imágenes que corresponden a la campaña realizada en las calles Gran Vía y Dr. Areilza de Bilbao mediante cámara termográfica, con el objetivo de comparar sus resultados con las temperaturas superficiales asumidas por el modelo SOLWEIG.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Conceptos relacionados con el confort térmico urbano

2.1.1 Urbanización del espacio público. Componentes y funciones

Las características geométricas de la urbanización del espacio público vienen condicionadas por el correspondiente planeamiento urbanístico a desarrollar de manera previa, y más concretamente por la disposición de las edificaciones dentro del espacio urbano.

El planeamiento urbanístico comprende distintas fases, siendo las más generales la ordenación estructural (planeamiento del término municipal en su totalidad) y la ordenación pormenorizada (planeamiento de un área o sector determinado del municipio), en las cuales la disposición de las edificaciones queda determinada. La última fase del proceso de planeamiento urbanístico es lo que se denomina urbanización, cuyo objetivo es la materialización de los espacios urbanos no edificados de carácter público incluyendo en los mismos todos los elementos constructivos y de equipamiento necesarios.

Los espacios no edificados de carácter público cumplen funciones de tránsito rodado así como de circulación y estancia de personas, posibilitando implícitamente el desarrollo de las actividades económicas y sociales que son a su vez generadoras de cohesión de la trama urbana.

Las funciones que se pueden encontrar en los distintos espacios de urbanización son muy variables, aunque tomando como referencia la calle como elemento vertebrador y más repetido en la trama urbana, se puede realizar una distinción principal entre zonas peatonales y no peatonales:

- Zonas peatonales: son aquellas utilizadas por los seres humanos y que excluyen el tránsito de vehículos motorizados consistiendo principalmente en aceras que discurren junto a las fachadas de las edificaciones sirviendo como acceso a las mismas.

Dentro de estas zonas peatonales, además de las aceras, podemos encontrar otros tipos de espacios como carriles bici o zonas verdes, siendo su acabado superficial variable y conteniendo elementos complementarios de la urbanización como son el mobiliario urbano o los árboles.

- Zonas no peatonales (rodadas): son aquellas que sirven para el tránsito o estacionamiento de vehículos motorizados y no son utilizables por personas a pie salvo en puntos de cruce concretos. Estos espacios se caracterizan por su exclusiva funcionalidad, tanto en lo que respecta a su dimensión (carriles rodados), pavimentación (tradicionalmente asfalto para rodadura) o ausencia de obstáculos (no existencia de mobiliario urbano u otros elementos de la urbanización). En este sentido, los elementos de arbolado no suelen estar presentes en las vías rodadas debido a los problemas funcionales y de visibilidad que pueden generar.

Cabe remarcar que la tendencia actual por parte de los planificadores urbanos es intentar priorizar las zonas peatonales sobre las motorizadas con el objetivo de obtener espacios urbanizados destinados principalmente a las personas.



Figura 2.1 Calle Dr. Areilza de Bilbao. Zonas peatonales, carril bici, carril rodado y aparcamientos.

En general, la inclusión de elementos de arbolado tiende a producirse en zonas peatonales, bien en zonas verdes incluidas en los mismos, o bien en calles o zonas pavimentadas. Las zonas verdes, cuando disponen de superficie más extensa, suelen albergar especies de arbolado de mayores dimensiones tanto por la posibilidad de separación de los elementos respecto a las fachadas como por las menores limitaciones que presentan estas zonas para el libre crecimiento del arbolado.

Las zonas pavimentadas a modo de espacios abiertos (por ejemplo plazas) también pueden disponer de especies de arbolado de grandes dimensiones, mientras que en las calles las dimensiones de los árboles tienen mayores limitaciones dependiendo de la anchura de las zonas peatonales de las mismas.

2.1.2 Habitabilidad, confort y bienestar. Influencia del espacio urbano

El concepto de habitabilidad en la Península Ibérica y más concretamente en España se encuentra principalmente fundamentada en el derecho a *disfrutar de una vivienda digna y adecuada*, centrándose los objetivos en el espacio edificado como elemento principal de la vida humana. Incluso la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE, 1999) lo incluye como uno de sus 3 pilares fundamentales: seguridad, funcionalidad y habitabilidad.

Sin embargo, el espacio urbano no edificado se erige como referencia fundamental en términos de confort y bienestar para la población, ya que en muchos casos la pérdida de las condiciones de habitabilidad (en el interior de los edificios) se desarrolla paralelamente a la insostenibilidad y deterioro de las condiciones de la trama urbana (espacios exteriores). En este contexto, la inclusión de zonas verdes y elementos de arbolado está suponiendo una herramienta eficaz para la regeneración de los espacios urbanos.

Los tres factores principales que se incluyen en el concepto de desarrollo sostenible están basados en las relaciones de los seres humanos, tanto entre

ellos mismos (económicos y sociales) como con el entorno inmediato (medioambientales).

De esta manera, el Consejo Internacional de Iniciativas Ambientales Locales (ICLEI) propuso la siguiente definición: *“el desarrollo sostenible es aquel que ofrece servicios ambientales, sociales y económicos básicos a todos los miembros de una comunidad sin poner en peligro la viabilidad de los entornos naturales, construidos y sociales de los que depende el ofrecimiento de estos servicios”*.

El concepto de calidad de vida pertenece a un mundo de carácter principalmente ideológico y en cierta manera subjetivo, siendo tarea complicada tanto su valoración de manera cuantitativa como el poder establecer criterios u objetivos generales a alcanzar por la colectividad.

Algunos autores señalan que si bien las posibilidades individuales (recursos económicos o tiempo libre) influyen en el concepto de calidad de vida, existen otros factores externos que pueden determinar la calidad de vida individual como son el equilibrio ecológico, social, cultural y mitológico (Rueda, 2004) que a su vez redundan en un bienestar físico, mental y social.

De este modo, diferentes autores han ido configurando cuatro ámbitos generales (Rueda, 2004) a tener en consideración para una estrategia de mejora de la calidad de vida y el bienestar de la población:

- 1- Aspectos generales: trabajo, educación, sanidad, vivienda y equipamientos.
- 2- Calidad ambiental: atmosférico, acústico, la calidad del agua, etc.
- 3- Naturaleza psicosocial: relaciones familiares e interpersonales, ocio, tiempo libre, etc.
- 4- Orden sociopolítico: participación social, seguridad personal y jurídica, etc.

A este respecto, la inclusión de vegetación y zonas verdes en los entornos urbanos está considerado como un factor de carácter transversal principalmente para la mejora de los mencionados tres primeros puntos: son parte de los equipamientos públicos a prever en el planeamiento urbano, disminuyen la polución y el ruido entre otros, y tienen una influencia positiva en el bienestar psicológico y social de la población. Asimismo, son elementos fundamentales para la inclusión de planteamientos bioclimáticos en los entornos urbanos.

2.1.3 Criterios bioclimáticos en espacios abiertos

En lo que respecta a la calidad ambiental del espacio urbano, el concepto de arquitectura o urbanismo bioclimático consiste en el diseño de edificaciones y espacios urbanos adaptándose o aprovechando las determinadas condiciones climáticas del lugar con el objetivo de disminuir el impacto ambiental sobre el entorno mediante la reducción del consumo de energía y garantizando el confort de los habitantes.

En términos generales, para el establecimiento de unos adecuados criterios bioclimáticos es necesario un estudio previo de las características del lugar consistente en la especificación del entorno físico y las condiciones climáticas (Higuera, 2006):

- Especificación del entorno físico:
 - Geomorfología: topografía, altimetría, orografía y orientación.
 - Agua: estado de aguas superficiales y subterráneas.
 - Subsuelo: características geotécnicas.
 - Vegetación: determinación de especies autóctonas.
 - Paisaje: análisis de particularidades paisajísticas.
 - Factores artificiales: localización de focos de contaminación.

- Especificación de las condiciones climáticas:
 - Soleamiento: análisis de carta solar local.

- Viento: frecuencia de direcciones principales.
- Humedad del aire y precipitaciones.
- Aire: temperatura, polución y contaminación acústica.

En el libro “Urbanismo Bioclimático” (Higueras, 2006) se clasifican las regiones climáticas mundiales en cuatro grandes grupos: regiones frías, templadas, cálidas áridas y cálidas húmedas. Para estas cuatro tipologías de regiones climáticas mundiales se establecen diversas estrategias de carácter bioclimático, que en lo que respecta a los espacios públicos urbanos se resumen en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Estrategias bioclimáticas según características de las regiones climáticas mundiales. Elaboración propia a partir de la información obtenida del libro “Urbanismo Bioclimático” (Higueras, 2006).

	Tipología regiones climáticas mundiales			
	Frías	Templadas	Cálidas áridas	Cálidas húmedas
Espacios públicos	Protegidos del viento, abiertos y con áreas periódicamente en sombra.	Amplias áreas de césped con sombreado de arbolado.	Protección solar total o parcial. Evitar áreas pavimentadas e introducir láminas de agua.	Distancias peatonales mínimas y sombreadas.
Paisaje	Topografía variable con carácter irregular.	Paseos peatonales de trazado libre.	Concentración de zonas verdes y vegetales a modo de oasis.	Topografía llana con superficies de agua.
Vegetación	Barreras compuestas por vegetación perenne y orientadas NE-SO.	Árboles de hoja perenne para protección del viento y de hoja caduca para sombreado.	Elemento importante: sombra, absorción de la radiación y evapotranspiración.	Sombreado mediante arbolado con ramajes en altura para no interferencia con las brisas.

Asimismo, el citado libro establece también una serie de directrices bioclimáticas de carácter genérico tomando como referencia las condiciones climáticas de distintas ciudades de la Península Ibérica y considerando los diferentes elementos que componen la trama urbana, es decir, el sistema general viario (calles) y el sistema general de espacios libres y zonas verdes (plazas y parques).

Sistema general viario (calles):

Condiciones de diseño por soleamiento:

- Se debe realizar un análisis de orientación de las calles: las que presentan una directriz Norte-Sur disponen de más horas de soleamiento “garantizadas”, mientras que en las de directriz Este-Oeste las horas de sol vienen condicionadas por la elevación solar y la altura de las edificaciones.
- Lograr un buen soleamiento en invierno y sombra en verano.

Condiciones de diseño por viento:

- Análisis del régimen de vientos en el ámbito local.
- Consideración de velocidades del viento.

Sistema general de espacios libres y zonas verdes:

Beneficios climáticos que ofrecen las zonas verdes (Sukkop & Werner, 1989):

- Mejora de las condiciones climáticas: humedad y temperatura.
- Reducción de contaminación ambiental: sumideros de la polución.
- Freno de la velocidad del viento.
- Amortiguación de ruidos de baja frecuencia.

Beneficios sociales que ofrecen las zonas verdes:

- Salud física del individuo: espacios sin contaminación atmosférica o acústica.
- Bienestar mental o emocional derivadas de las cualidades estéticas naturales.
- Cohesión social proporcionando espacios de relación social.

En consecuencia, tanto en las calles como en los espacios libres y zonas verdes cobra importancia adoptar medidas respecto al estrés por calor durante los meses más calurosos del año con el objetivo de mejorar el confort térmico de las personas en los espacios urbanos. No obstante, se ha de considerar que estas

medidas podrían llegar a ser contraproducentes en invierno para zonas templadas, por lo que las decisiones a tomar deben ser compatibles con este factor, como por ejemplo la elección de arbolado de hoja caduca para el sombreado, de manera que durante los meses de invierno no atenúen la radiación solar directa en los espacios exteriores.

2.1.4 El confort térmico respecto al estrés por calor. T_{mrt} e índice PET

El ser humano es homotérmico: mantiene una temperatura interior constante ante las condiciones exteriores. La definición de confort térmico que se recoge en la norma ISO 7730 (AENOR, 2006) se corresponde como “*aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico*”, en el que se incluyen, además de las circunstancias térmicas del entorno, las de la propia persona física.

El confort térmico se puede medir mediante diferentes índices, siendo uno de los más utilizados el índice PET (Physiologically Equivalent Temperature) derivado del modelo de balance sobre el equilibrio térmico del cuerpo humano MEMI (Mayer & Hoppe, 1987).

El índice PET se define como la temperatura fisiológica equivalente a cualquier lugar interior o exterior, siendo equivalente a la temperatura del aire a la que en un supuesto entorno interior, en el balance de calor del cuerpo humano (metabolismo de trabajo de 80 W de actividad ligera añadida al metabolismo básico y resistencia al calor de la ropa de 0,9) se mantienen temperaturas internas y cutáneas iguales a los de las condiciones que se están evaluando (Hoppe, 1999).

Para el supuesto ambiente interior se consideran las siguientes condiciones:

- La temperatura radiante media es igual a la temperatura del aire ($T_{mrt}=T_a$)
- La velocidad del aire se establece en 0,1 m/s.
- La presión de vapor de agua se establece en 12 hPa (aproximadamente equivalente a una humedad relativa del 50% a $T_a=20^\circ\text{C}$).

Por consiguiente, para el cálculo del índice PET, los parámetros meteorológicos que se tienen en cuenta son los siguientes:

- Temperatura del aire (°C)
- Flujos de radiación de onda larga y onda corta (W/m²)
- Humedad relativa del aire (%)
- Velocidad del aire (m/s)

Para el cálculo del índice PET se toma también en consideración información relativa a las características fisiológicas de las personas (edad, sexo, altura, peso, actividad y resistencia de la ropa a la transmisión de calor).

La relación entre la percepción térmica y los valores PET varía según las distintas localizaciones del planeta en función de sus condiciones climáticas. A modo de referencia, en la Figura 2.2 se representan los niveles de percepción térmica en relación a los valores PET para distintos lugares del mundo (Heng & Chow 2019).

City (Köppen - Geiger classification)	Strong cold (°C)	Moderate cold (°C)	Slight cold (°C)	No stress/ Neutral T (season) (°C)	Slight heat (°C)	Moderate heat (°C)	Strong heat (°C)
Tianjin, China (Dfa) ^a	<-11	-6	11	15.6 (when air temperature > 0 °C)	24	31	36
Rome, Italy (Csa) ^b		5	21	26.9 (summer) 24.9 (winter)	29	37	45
Central Europe (Cfb) ^c	< 8	13	18	NA*	23	29	>35
Glasgow, UK (Cfb) ^d		1	10	14.2	18	27	
Curitiba, Brazil (Cfb) ^d			13	19.2	25	37	
Sydney, Australia (Cfa) ^e				24			
Belo Horizonte, Brazil (Cwb) ^f			19	27.7 (summer) 15.9 (winter)	27		
Sun Moon Lake, Taiwan (Cwb) ^g	14	18	22	27.2	34	38	42
Taichung City, Taiwan (Cwa) ^h			21	25.6 (summer) 23.7 (winter)	29		
Changsha, China (Cfa) ⁱ			24	27.9	31	35	39
Tempe, USA (Bwh) ^j			19	28.6	38		
Rio de Janeiro, Brazil (Aw) ^d				NA*	22	36	49
Dar Es Salaam, Tanzania (Aw) ^k		15	23	27.2	31	40	48
Guayaquil, Ecuador (Aw) ^l				26.9 (dry) 21.9 (wet) 25.7 (both)	31.3		
Singapore, Singapore (Af) ⁱ			24	28.1	30	34	38

Figura 2.2 Niveles de percepción térmica en relación a los valores PET para distintos lugares del mundo (Heng & Chow 2019).

Además del índice PET, también se suelen utilizar los siguientes índices para la medida del confort térmico:

- PMV (Predicted Mean Vote) (AENOR 2006): refleja la opinión de un grupo numeroso de personas sobre su sensación térmica estableciendo siete niveles de confort de -3 (Muy Frío), 0 (Confort-neutro) a +3 (Muy caluroso).
- PPD (Percentage of People Dissatisfied): establece diversos niveles de confort en correspondencia con el índice PMV.
- CP (Cooling Power): establece diez niveles de confort en función de la temperatura ambiente media y la velocidad del viento (Santamouris, Gaitani, Spanou et al, 2012).

Los niveles de percepción térmica según el índice PET establecidos para Europa Central se presentan en la Tabla 2.2, indicándose también su correlación con el índice PMV (Matzarakis & Mayer 1997):

Tabla 2.2 Niveles PET en correspondencia con el índice PMV establecidos para Europa Central.

PET (°C)	Percepción térmica	Grado de estrés fisiológico	PMV
41	Mucho calor	Estrés por calor extremo	3,5
35	Calor	Estrés por calor elevado	2,5
29	Templado	Estrés por calor moderado	1,5
23	Ligeramente templado	Ligero estrés por calor	0,5
18	Confortable	No estrés térmico	-0,5
13	Ligeramente fresco	Ligero estrés por frío	-1,5
8	Fresco	Estrés por frío moderado	-2,5
4	Frío	Estrés por frío	-3,5
	Mucho frío	Estrés por frío extremo	

Por su parte, y derivada de los parámetros meteorológicos considerados para el cálculo del índice PET, la temperatura media radiante (T_{mrt}) determina la medida

del calor generada por las propias condiciones meteorológicas y por los materiales en el entorno urbano como consecuencia de la radiación solar, resultando ser el parámetro más relevante para el confort térmico especialmente en días despejados bajo la influencia de la radiación solar directa (Acero & Herranz-Pascual, 2015).

El concepto de T_{mrt} se define como “la temperatura uniforme en un recinto imaginario en el que la transferencia del calor radiante desde el cuerpo humano iguala la transmisión del calor radiante en dicho recinto”. Dicho recinto se presenta de manera teórica representando el entorno real, por lo que la T_{mrt} indica el intercambio de calor radiante entre el cuerpo humano y el ambiente que lo rodea (Figura 2.3). La fórmula para su medición queda establecida en la norma ISO 7726 (AENOR, 2002).

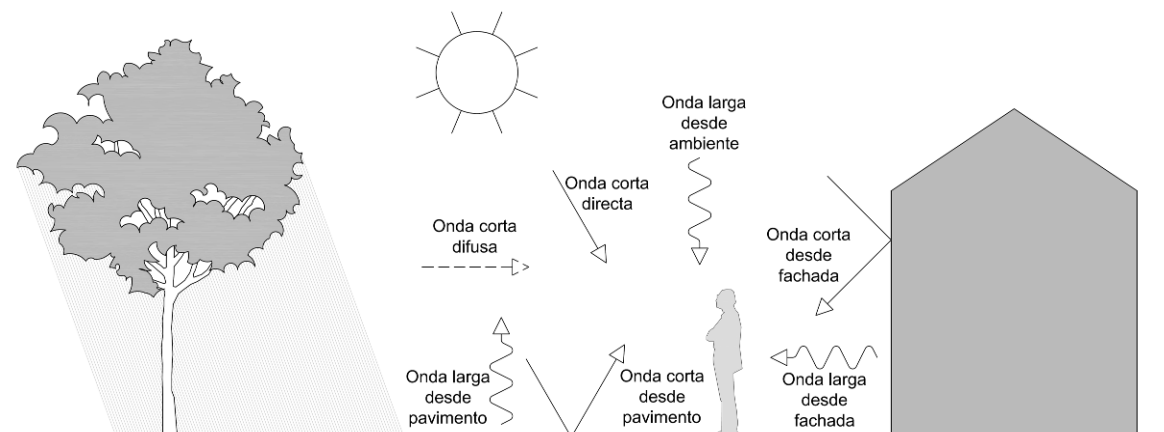


Figura 2.3 Diferentes tipos de radiación que influyen en la T_{mrt} .

La radiación solar (directa y difusa) es el factor clave en la determinación de la T_{mrt} tanto de manera directa (exposición del cuerpo humano a la misma) como de manera no directa (reflejo de radiación y calentamiento superficial de pavimentos y fachadas). Está demostrado que la diferencia entre la temperatura media radiante de una zona expuesta al sol y la de otra en sombra puede llegar a alcanzar los 25°C (Mayer & Hoppe, 1987).

2.1.5 La radiación solar y el sombreado

La radiación es un proceso en el cual la energía se transmite por el espacio sin necesidad de un medio material. Esta energía puede ser reflejada o en cambio absorbida, aumentando así la energía interna de los materiales, la cual a su vez puede ser reemitida por los mismos.

En general, la radiación se clasifica según su longitud de onda, tal como se representa en la Figura 2.4. En lo que respecta a la radiación térmica, la misma se distingue en:

- Radiación de onda media y corta ($0,40 \mu\text{m} - 0,76 \mu\text{m}$) (Çengel & Ghajar, 2011): se corresponde con la radiación solar.
- Radiación de onda larga ($0,76 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$) (Çengel & Ghajar, 2011): radiación reemitida por los materiales existentes en la atmósfera o por la propia tierra.

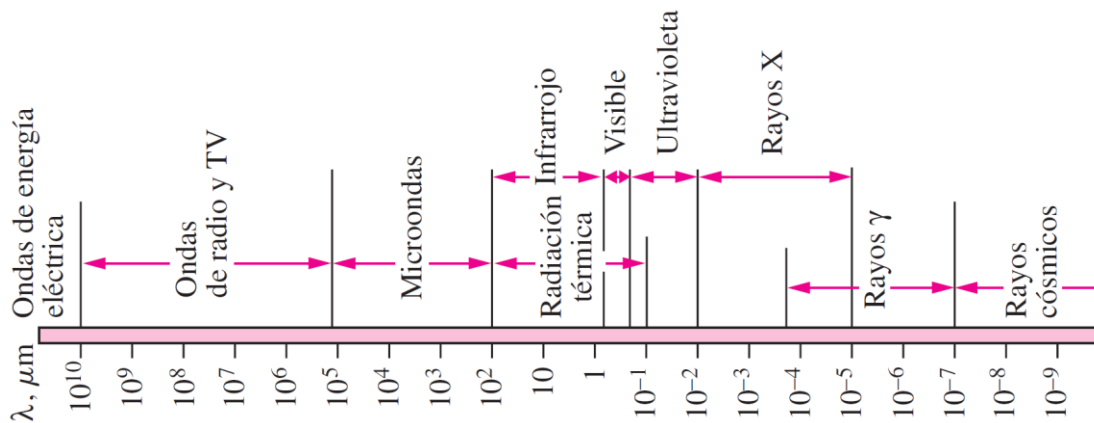


Figura 2.4 Espectro de ondas electromagnéticas (Çengel & Ghajar, 2011)

La radiación solar queda cuantificada por las siguientes magnitudes:

- Irradiancia (W/m^2): también denominada “radiación”, es la magnitud de radiación solar incidente por cada unidad de superficie. Para las superficies urbanizadas, se toma como referencia el plano horizontal pavimentado.

- Irradiación (Wh/m^2): es la magnitud que mide la energía de radiación solar incidente por unidad de superficie para un período de tiempo determinado.

La cantidad de radiación solar queda también condicionada por la posición del sol, la cual queda a su vez determinada por la altitud (elevación angular del sol respecto al plano horizontal) y acimut (ángulo de la posición solar en planta respecto al Norte geográfico). Estos dos parámetros que determinan la posición solar son cambiantes a lo largo de todos los días del año.

La sombra de los edificios y los árboles son los factores más efectivos para reducir la radiación solar y por consiguiente la T_{mrt} , tal como se ha demostrado en estudios previos desarrollados tanto en calles sin árboles (Ali-Toudert & Mayer, 2006; Ndetto & Matzarakis, 2013; Qaid & Ossen, 2015) como en calles arboladas (Shashua-Bar & Hoffman, 2003; Gómez-Muñoz, Porta-Gándara, & Fernández, 2010; Tan, Lau, & Ng, 2016; Morakinyo & Lam, 2016; Altunkasa & Uslu, 2020) .

2.1.6 Sombreado de los edificios. AR, SVF y orientación

Los edificios son los principales elementos estructurales de la morfología urbana y su influencia en el confort térmico urbano depende principalmente de su capacidad para sombrear los espacios públicos exteriores.

Por consiguiente, dichas posibilidades de mejora del confort térmico respecto al estrés por calor dependen de la anchura del espacio no edificado (calle) y su proporción con la altura de los edificios que las delimitan (Oke, 1988; Ali-Toudert & Mayer, 2006; Qaid & Ossen, 2015; Morakinyo & Lam, 2016), lo cual a su vez está también influenciado por la altitud solar en cada momento del año tal como se representa en la Figura 2.5.

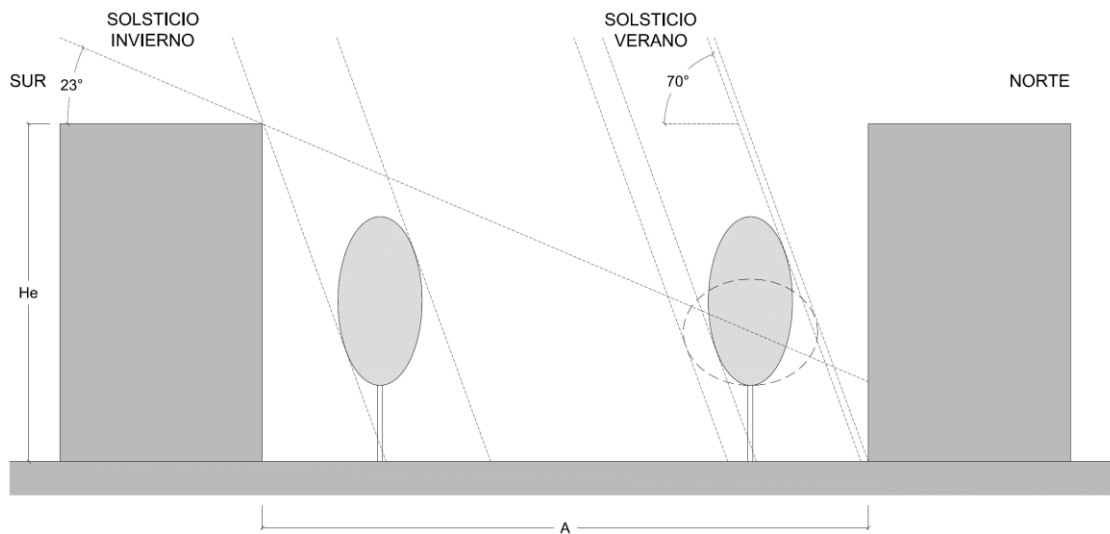


Figura 2.5 Esquema de sección de calle de orientación Este-Oeste representando la altitud solar en los solsticios de invierno y verano en Bilbao. Líneas de sombra proporcionadas por edificio y árboles cilíndricos o esféricos.

Los parámetros generalmente considerados para cuantificar la sombra generada por las edificaciones y de los cuales depende la mejora del confort térmico respecto al estrés por calor son los siguientes:

- AR (Aspect Ratio): relación entre la altura de las edificaciones que delimitan la calle y anchura de la misma (He / A). Cuanto mayor es el ratio AR, la superficie de calle afectada por el sombreado de las edificaciones será también mayor (Ali- Toudert & Mayer, 2006; Ndetto & Matzarakis, 2013; Theeuwes et al., 2014) aunque el atrapamiento de la radiación de onda larga reemitida por los diferentes materiales será también de mayor magnitud, tal como se representa en la Figura 2.6.

No obstante, esta influencia dependerá también de la orientación geográfica de la calle así como de la latitud y de la época del año.

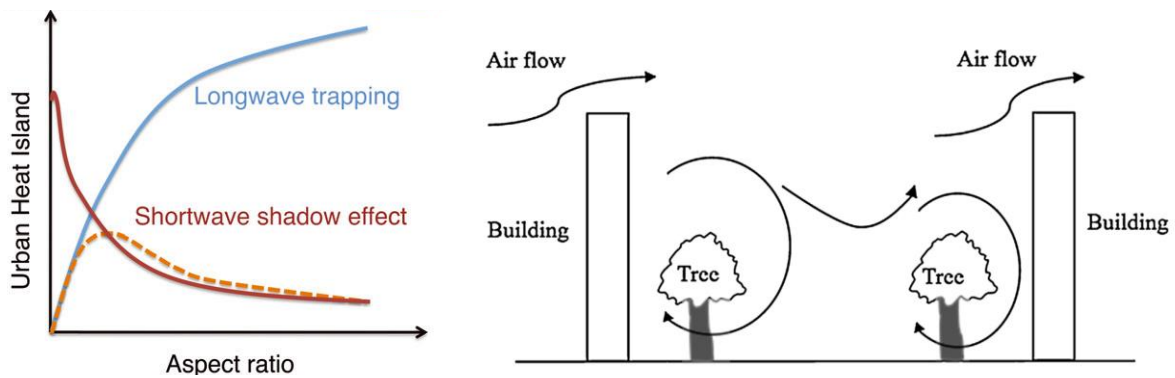


Figura 2.6 Izquierda. Esquema general de relación entre el AR, la atenuación de la radiación de onda corta y el atrapamiento de la radiación de onda larga (Theeuwes et al., 2014). Derecha. Flujo teórico del aire por una calle. Influencia de los edificios y el arbolado (Kong et al., 2017).

- SVF (Sky View Factor): se define como la fracción de cielo visible desde un punto concreto de la calle considerando las edificaciones y los demás elementos urbanos, y en términos generales se puede estimar con la expresión $SVF = \cos[\arcsin(2H/W)]$ (Shashua-Bar & Hoffman, 2003).

Un elevado valor SVF (debido a una baja altura de las edificaciones en relación a la anchura de la calle) conlleva un bajo nivel de sombreado, lo que puede causar un deficiente confort térmico en verano, mientras que un reducido valor SVF producirá un alto nivel de sombreado, generando un efecto no deseado durante el invierno (Shashua-Bar & Hoffman, 2003; Ali-Toudert & Mayer, 2006; Qaid & Ossen, 2015; Morakinyo & Lam, 2016).

- Orientación del eje de la calle: condicionará directamente la superficie afectada por el sombreado de los edificios durante las distintas horas del día (Masmoudi & Mazouz, 2004; Holst & Mayer, 2011).

Su tipificación se efectúa en función del ángulo en planta que forma el eje de la calle respecto a la línea Norte-Sur geográfica (Ali-Toudert & Mayer, 2006; Qaid & Ossen, 2015; Morakinyo & Lam, 2016).

Considerando que las horas centrales del día coinciden con los momentos de mayor radiación solar y que los espacios peatonales tienden a situarse cercanos a las fachadas de los edificios, una orientación de la calle Norte-Sur posibilitará una mayor incidencia de la radiación solar en la totalidad de la superficie de la calle en dichas horas centrales (en ciudades situadas en latitudes Norte como Bilbao), mientras que en una orientación de la calle Este-Oeste la incidencia será mayor en la parte Norte de la misma.

Las variables AR y SVF junto con otras variables definen las tipologías de desarrollos urbanos en relación al clima. Esta clasificación de áreas urbanas se conoce como Local Climate Zones (LCZ) (Stewart & Oke 2012).

En la Tabla 2.3 se representan las características de los LCZs que pueden aparecer en mayor medida en entornos urbanos europeos, mientras que en la Tabla 2.4 se indican los parámetros orientativos de AR, SVF, fracción de superficie construida y altura media de los edificios para cada LCZ considerado.

Estos LCZs que se corresponden con los espacios urbanos se clasifican en general en función de la densidad de edificación respecto a la superficie urbana, distinguiéndose entre Compact (densidad elevada) y Open (densidad reducida).

Dentro de cada grupo, se considera asimismo la altura de las edificaciones, estableciéndose tres niveles: gran altura (edificios de más de 9 pisos), media altura (edificios de entre 3 y 9 pisos) y baja altura (edificios de hasta 3 pisos).

Tabla 2.3 Tipologías de Local Climate Zones (LCZ) de mayor presencia en entornos urbanos europeos (Stewart & Oke 2012).

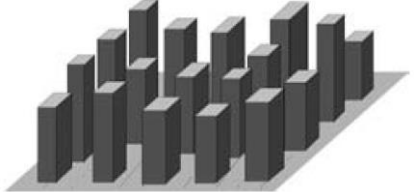
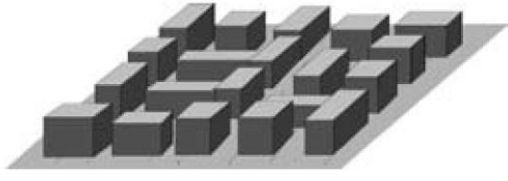
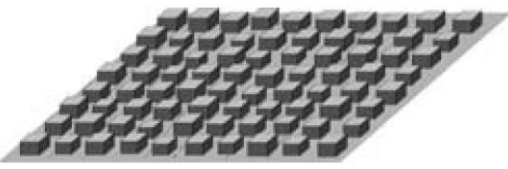
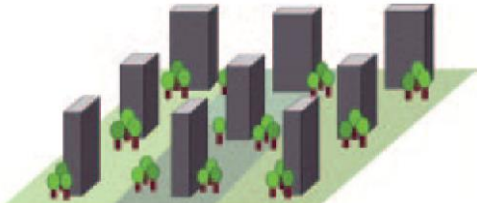

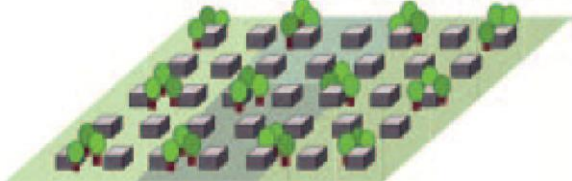
Local Climate Zone (LCZ)	Definición
<p>LCZ 1 Compact high-rise (Gran altura-compacto)</p> 	<p>Mezcla densa de edificios altos de decenas de pisos. Pocos o ningún árbol. Cobertura del suelo en su mayor parte pavimentada. Materiales de construcción de hormigón, acero, piedra y vidrio.</p>
<p>LCZ 2 Compact mid-rise (Media altura-compacto)</p> 	<p>Mezcla densa de edificios de mediana altura (3 a 9 pisos). Pocos o ningún árbol. Cobertura del suelo en su mayor parte pavimentada. Materiales de construcción de piedra, ladrillo, teja y hormigón.</p>
<p>LCZ 3 Compact low-rise (Baja altura-compacto)</p> 	<p>Mezcla densa de edificios de poca altura (1-3 pisos). Pocos o ningún árbol. Cobertura del suelo en su mayor parte pavimentada. Materiales de construcción de piedra, ladrillo, teja y hormigón.</p>
<p>LCZ 4 Open high-rise (Gran altura-abierto)</p> 	<p>Disposición abierta de edificios altos a decenas de pisos. Abundancia de cobertura permeable del suelo (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción de hormigón, acero, piedra y vidrio.</p>
<p>LCZ 5 Open mid-rise (Media altura-abierto)</p> 	<p>Disposición abierta de edificios de mediana altura (3 a 9 pisos). Abundancia de cobertura permeable del suelo (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción de hormigón, acero, piedra y vidrio.</p>
<p>LCZ 6 Open low-rise (Baja altura-compacto)</p> 	<p>Disposición abierta de edificios de poca altura (1-3 pisos). Abundancia de cobertura terrestre permeable (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción de madera, ladrillo, piedra, tejas y hormigón.</p>

Tabla 2.4 Parámetros orientativos de Aspect Ratio (AR), Sky View Factor (SVF), fracción de superficie construida y altura media de los edificios para tipologías de Local Climate Zones (LCZ) de mayor presencia en entornos urbanos europeos (Stewart & Oke 2012).

Local Climate Zone (LCZ)	Aspect Ratio (AR) de la calle	Sky View factor (SVF)	Fracción de sup.construida	Altura media de los edificios
LCZ 1 Compact high-rise	> 2	0,2 - 0,4	40 - 60	> 25
LCZ 2 Compact midrise	0,75 - 2,00	0,3 - 0,6	40 - 70	10 - 25
LCZ 3 Compact low-rise	0,75 - 1,50	0,2 - 0,6	40 - 70	3 - 10
LCZ 4 Open high-rise	0,75 - 1,25	0,5 - 0,7	20 - 40	> 25
LCZ 5 Open midrise	0,30 - 0,75	0,5 - 0,8	20 - 40	10 - 25
LCZ 6 Open low-rise	0,30 - 0,75	0,6 - 0,9	20 - 40	3 - 10

En lo que respecta a la vertiente cantábrica y la CAPV en concreto, en general las tipologías de Local Climate Zones (LCZ) más características serían la LCZ 2 (Media altura - compacto) en núcleos urbanos y la LCZ 6 (Media altura-abierto) en zonas de viviendas de baja densidad.

2.1.7 El arbolado y el sombreado

Los árboles interactúan con la radiación solar atenuando la misma principalmente mediante sus hojas, las cuales son capaces de reflejar y absorber la radiación, proyectando su efecto de sombra (Aminipouri et al., 2019). Por lo tanto, presentan un comportamiento que reduce de manera demostrable el estrés térmico relacionado con el calor, aunque también debe tenerse en cuenta que los árboles reducen la SVF, obstaculizando la disipación de la radiación de onda larga ascendente e influyendo así, principalmente por la noche en el confort térmico de los peatones cercanos (Lindberg, Holmer, Thorsson & Rayner, 2014).

La magnitud de la atenuación solar varía en función de cada especie de arbolado y sus respectivas características estructurales (morfológicas y fisiológicas), como

son la densidad de foliación, la altura, el diámetro de la copa o la proximidad entre elementos (Berry, Livesley & Aye, 2013; Morakinyo, Kong, Lau, Yuan, Ng, 2017).

La efectividad del sombreado generado por los árboles para la mejora del confort térmico relacionado con el estrés por calor disminuye con el aumento de la profundidad de los espacios urbanos, es decir, cuando la proporción entre la altura de los edificios y la anchura de las calles es mayor (Morakinyo, Kong, Lau, Yuan, Ng, 2017).

Además de por medio del sombreado, los árboles son capaces de generar beneficios adicionales para la mejora del confort térmico relacionado con el estrés por calor mediante la evapotranspiración que es el proceso mediante el cual la vegetación absorbe agua del terreno para después emitirla en el ambiente, produciéndose una transformación de calor sensible en calor latente. En consecuencia, la vegetación consigue disminuir la temperatura del aire a través de la evapotranspiración (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Kong et al., 2017). Sin embargo, el aumento de la humedad en ambientes muy húmedos (trópicos) podría repercutir de manera negativa en el confort térmico.

2.1.7.1 Las especies autóctonas

Se consideran especies autóctonas aquellas que han existido en un lugar o ecosistema concreto previamente a cualquier intervención humana. Ello se debe a que las condiciones para el desarrollo de dichas especies se satisfacen en un lugar geográfico concreto, en función de los aspectos climatológicos, geológicos o de entorno natural (Kotzen, 2003).

Aunque algunas especies no sean consideradas autóctonas, cabe la posibilidad de que pudieran catalogarse como asimiladas: aunque su implantación en un lugar concreto se haya debido a la acción del hombre, sus requerimientos de desarrollo son adaptables al nuevo medio sin afectar al resto de flora y fauna existente.

2.1.7.2 Características morfológicas del arbolado. Geometría

Las características geométricas parciales de las especies arbóreas (Figura 2.7) que influyen directamente en la cantidad de superficie pavimentada sombreada que pueden generar son las siguientes (Pinty, Gobron, Widlowski y Verstraete, 2003; Morakinyo & Lam, 2016):

- (H) Altura total del árbol
- (Ht) Altura del tronco
- (Dc o 2R) Diámetro de la copa
- (Hc) Altura de la copa

La copa de un árbol puede presentar diferentes apariencias geométricas y generar distinta cobertura de sombra. En general, la forma de las copas puede asemejarse a una geometría cilíndrica-ovoidal, esférica o cónica. Para la determinación de la forma, independientemente de su aspecto visual, es posible realizar una clasificación de las especies arbóreas en función de la relación entre el diámetro de la copa en su punto de anchura máxima y la altura de la misma (Hongbing, Jun, Yonghong & Li, 2010).



Figura 2.7 Izquierda. Esquema parámetros geométricos del árbol. Derecha. Forma de las copas de *Quercus robur* (cilíndrica-ovoidal), *Acer platanoides* (esférica) y *Cedrus atlantica* (cónica).

La forma y dimensiones de la copa de los árboles influyen directamente en el área horizontal sombreada generada por el mismo. A igualdad de volumen, la cantidad

de sombra generada por un árbol de copa ancha (esférica) es considerablemente mayor que la generada por uno de copa estrecha (cilíndrica-ovoidal) cuando el ángulo solar respecto la horizontal se encuentra entre los 55° y 75° . En cambio, la cantidad de sombra generada por un árbol de copa alta sería algo superior cuando el ángulo solar se encuentra entre 35° y 45° (Kotzen, 2003). Sobre todo en el primer caso, una altura de tronco que posibilite el tránsito peatonal bajo la copa aumenta asimismo el área de pavimento sombreada.

A modo de ejemplo en relación a la orientación de las calles, teniendo en cuenta que una forma de copa ancha proporciona una mayor superficie sombreada cuando el ángulo solar respecto la horizontal es alto (Kotzen, 2003), una calle de orientación Norte-Sur requerirá especies de copa ancha a ambos lados de la calle para proteger las horas centrales del día, mientras que una calle de orientación Este-Oeste podría disponer de arbolado de copa más estrecha en el lado Sur de la misma, siempre que resultara necesario.

Acerca de la necesidad de una reevaluación de la sombra en los espacios urbanos al aire libre, se debe considerar que el efecto directo de los árboles en la reducción de la T_{mrt} en condiciones de estrés por calor está espacialmente restringido a las áreas de sombra que generan y, por lo tanto, está relacionado con la superficie de las zonas a considerar, las características de la vegetación y el número de unidades de árbol en dicho espacio (Lindberg, Thorsson, Rayner & Lau, 2016).

Sin embargo, aún faltan herramientas para la toma de decisiones que puedan evaluar el alcance del sombreado y su efecto sobre el confort térmico relativo al estrés por calor (Altunkasa & Uslu, 2020). Es por eso que en esta Tesis se presenta una metodología para el diseño de árboles en calles urbanas. Además, mientras que otros trabajos han centrado la atención en toda la superficie de la calle al estudiar su sombreado (Peeters et al., 2020), en este caso el análisis de las necesidades de sombreado se centra en sus zonas peatonales.

2.1.7.3 Características fisiológicas. LAD, LAI y transmisividad

La densidad foliar es también un factor relevante a la hora de cuantificar la capacidad de atenuación solar de una especie particular de árbol (Berry, Livesley y Aye, 2013; Morakinyo et al., 2017; Kong et al., 2017).

En las zonas climáticas donde el sombreado del arbolado resulta solamente necesario en los meses más calientes del año, son preferibles las especies de hoja caduca, es decir, aquellas cuyas hojas caen en las estaciones menos calurosas del año (otoño- invierno) proporcionando un adecuado sombreado cuando éste es necesario (primavera- verano) aunque sin interferir en la captación solar durante las estaciones frías (Brown, Vanos, Kenny & Lenzhotzer, 2015) tal como se representa en la Figura 2.8.

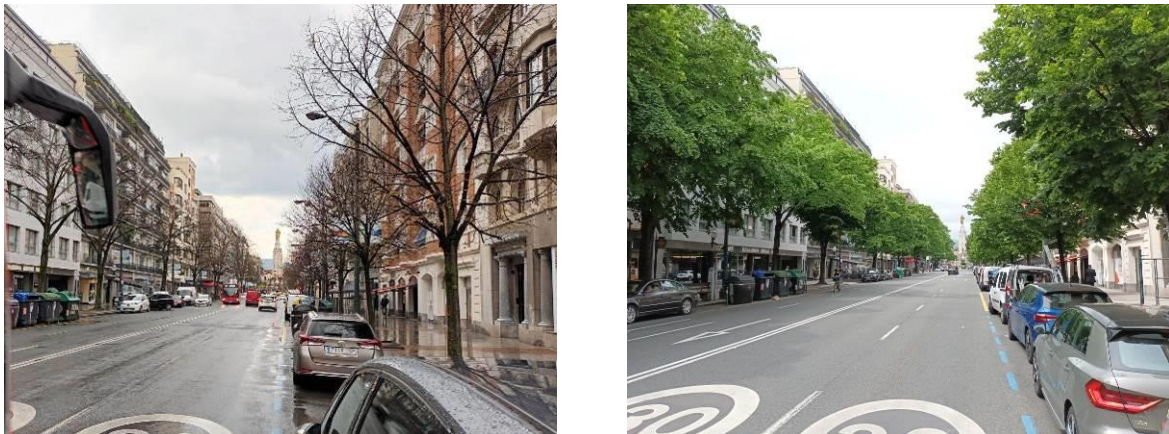


Figura 2.8 Fotografías de la c/Gran Vía de Bilbao en enero (Izquierda) y en mayo (Derecha).

Las especies de hoja perenne, dado que sus hojas se mantienen en el árbol durante todas las estaciones, atenúan la radiación solar de manera uniforme durante todo el año, pudiendo generar un indeseado sombreado cuando las temperaturas son bajas.

La densidad de foliación es un parámetro determinante en la capacidad de sombreado que puede ofrecer una especie de arbolado. El parámetro más utilizado que determina esta característica es el denominado índice de área foliar

LAI (Leaf Area Index), el cual es una variable adimensional (m^2/m^2) que fue primeramente definida como el total de superficie (a una cara) del tejido fotosintético de una planta por cada unidad de superficie de suelo en proyección (Watson, 1947). Dicho de otra manera, sería la cantidad de m^2 de hoja que debe atravesar la radiación solar por cada m^2 que incidirá en el suelo. Este parámetro tiene relación directa con otros parámetros como el LAD (Leaf Area Density, m^2/m^3) que es la mitad de la superficie total de hoja (por todas la caras) por cada unidad de volumen de la copa arbórea (Chen & Black, 1992).

El LAI y el LAD dependen de la composición de cada especie, la estación del año o las condiciones microclimáticas de cada lugar, siendo un parámetro dinámico para cada especie que varía día a día principalmente en primavera y otoño en las especies de hoja caduca, o incluso año a año (Welles, 1990; Weiss, Smith, Jonckheere & Coppin, 2004).

Por otro lado, existen parámetros que pueden determinar la cantidad de radiación solar que atraviesa la foliación o la cobertura vegetal de un árbol, como son el factor de sombra (nivel de atenuación solar) o el rango de transmisividad. Ambos expresan la misma magnitud aunque de manera inversa.

Lógicamente existe una relación proporcional entre el LAI y la transmisividad de un árbol; cuanto más elevado es el índice LAI, menor será la transmisividad del mismo, haciendo posible la incidencia de una menor cantidad de radiación solar en cada unidad de superficie de pavimento. El parámetro LAI se convierte en un indicador fundamental para evaluar la capacidad de mejora de las condiciones de confort térmico relativo al estrés por calor del arbolado urbano (Morakinyo, Kong, Lau, Yuan & Ng, 2017).

Los procedimientos para el cálculo empírico del parámetro LAI de los árboles se clasifican en dos tipos principales: métodos directos e indirectos (Jonckheere et al, 2004), existiendo a su vez para cada grupo diversas técnicas que se exponen a continuación.

- Métodos directos: son los más exactos y a la vez los más laboriosos.
 - Recolección de hojas: pueden tratarse de métodos de cosecha (muestreo destructivo de una pequeña cantidad de árboles representativos, a partir del cual se mide el área foliar y la distribución vertical del área foliar hoja por hoja) o métodos de no-cosecha (consisten en la recolección de hojarasca durante el período de caída de las hojas utilizando lo que se llaman trampas de basura).
 - Técnicas de determinación de área de hoja: pueden ser planimétricos (basado en el principio de correlación entre el área foliar individual y el número de unidades de área cubiertas por esa hoja en un plano horizontal) o gravitacionales (correlacionan el peso seco de las hojas y el área de la hoja usando proporciones predeterminadas de área de hojas verdes y peso seco).
- Métodos indirectos:
 - Métodos de contacto: pueden ser mediante agrupaciones de puntos inclinados (contando los contactos del cuadrante de puntos con elementos de marquesina “verdes”) o técnicas alométricas (dependen de las relaciones entre el área foliar como tal y cualquier dimensión del elemento de la planta leñosa que lleva la biomasa de la hoja verde).
 - Métodos de no-contacto: Son métodos ópticos, que consideran que la radiación interceptada por una capa de la copa de un árbol depende de la irradiancia incidente, la estructura de la copa y las propiedades ópticas. Parten de la expresión:

$$T(\vartheta, \alpha) = \frac{P_s}{(P_s + P_{ns})} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

donde:

$T(\vartheta, \alpha)$ es la fracción de espacio (gap fraction) para un rango de ángulos cenitales (ϑ) y ángulos acimutales (α)

P_s es la fracción de cielo en una región (ϑ, α) y

P_{ns} es la fracción de vegetación en una región (ϑ, α).

Dentro de estos métodos de no-contacto encontramos por ejemplo los correspondientes al escaneado láser terrestre (TLS) (Joncheere et al, 2004), analizador de copa LAI-2200, o las fotografías hemisféricas de las copas de arbolado, pudiendo éstas últimas ser procesadas por distintos modelos como Hemiview, Scanopy, GLA o CAN-EYE (esquemas de cada método representados en la Figura 2.9).

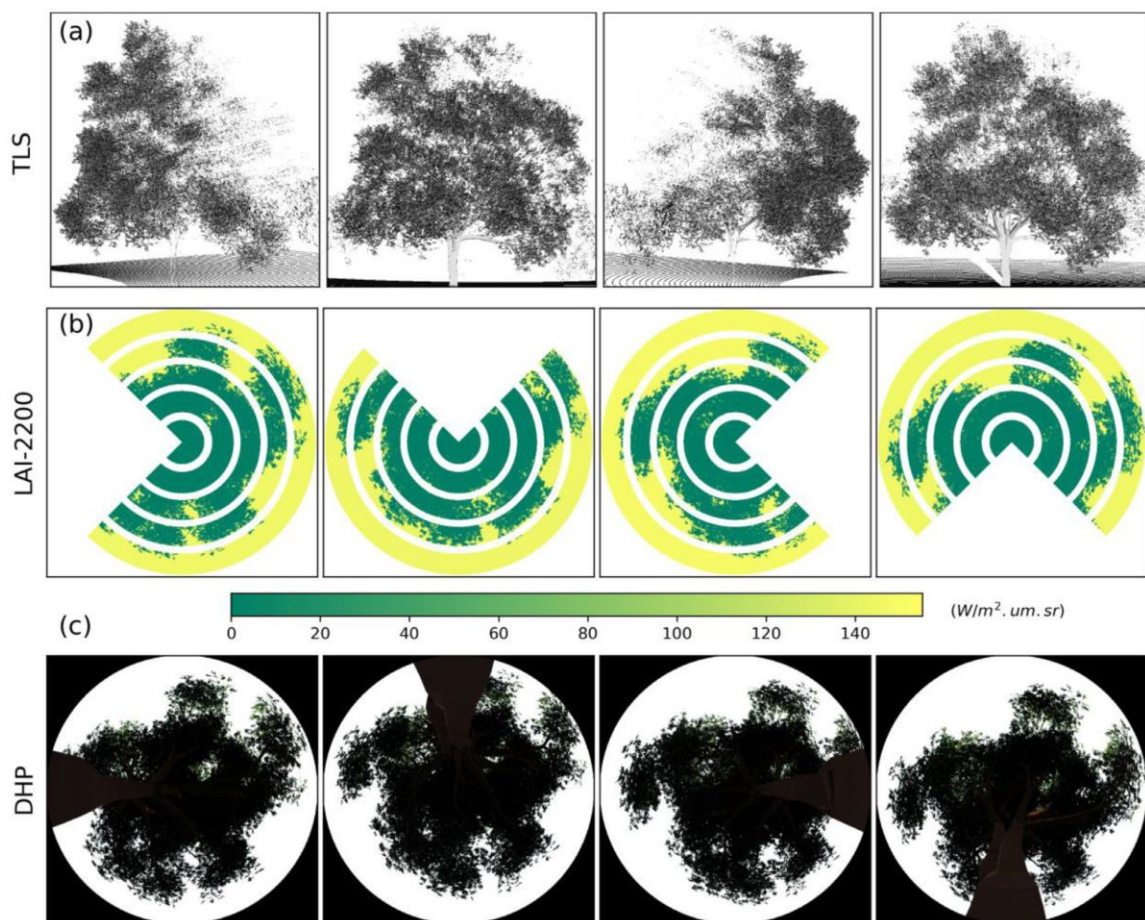


Figura 2.9. Ejemplo de imágenes para métodos indirectos de no-contacto en el cálculo de LAI: (a) Nube de puntos TLS. (b) Mediciones de LAI-2200 por cinco anillos sensores. (c) Imágenes DHP (hemisféricas). (Wei et al, 2020).

Estudios recientes han mostrado inconsistencias en los citados 3 métodos indirectos de no contacto (Wei et al, 2020). No obstante, las fotografías hemisféricas, cuya gran ventaja es que se trata de una técnica que es notablemente más barata y accesible que el resto de alternativas, han demostrado ser un adecuado método indirecto para medir varios componentes de la estructura de las copas y el régimen de luz bajo el arbolado (Joncheere et al, 2004). En primer lugar, la fotografía hemisférica proporciona la Gap Fraction (fracción de energía incidente que se transmite por la copa del árbol considerando la vegetación de la misma como un cuerpo negro) en todas las direcciones cenitales; en segundo lugar, permite estimar la Gap Fraction bajo un amplio rango de condiciones de iluminación (Martínez, Camacho-de Coca & García Haro, 2006).

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario añadir que la densidad de foliación de un árbol, así como su LAI/LAD o la transmisividad del mismo son parámetros dinámicos que varían en el tiempo y entre distintos elementos de arbolado, por lo que lo realmente interesante es alcanzar una estimación de sus valores, incluso planteándose el mismo a nivel comparativo entre las distintas especies contempladas.

2.1.7.4 Superficie sombreada por los árboles

Dado que la radiación solar directa es el factor crítico en la T_{mrt} , y ésta a su vez influye de manera relevante en el índice PET, la cantidad de superficie sombreada en una calle se convierte en un objetivo relevante de manera que el confort térmico relativo al estrés por calor pueda quedar atenuado en el mayor área peatonal posible.

En este sentido, la geometría urbana y la orientación de las calles cobran asimismo una influencia relevante. Varios estudios han determinado y/o cuantificado el área de pavimento sombreado por las edificaciones (Ndetto & Matzarakis, 2013; Qaid & Ossen, 2015). Uno de los indicadores más remarcables

en este aspecto sigue siendo el área sombreada parcial (PSA) o Partial Shaded Area of open space in cluster (Shashua-Bar & Hoffman, 2003).

Para el cálculo del PSA de una calle en cada instante se toman en consideración las variables relativas a la geometría de la calle (anchura de calle y altura de las edificaciones), la orientación de la misma, además de la posición solar (acimut y altitud solar). De esta manera, y en términos generales, se establece la siguiente expresión (Ecuación 2.2) (Shashua-Bar & Hoffman, 2003):

$$PSA_{(t)} = \frac{X_t}{W} = \frac{\cos(e - e_t) \times H}{\tan(B_t) \times W} \times \frac{H}{W} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

donde:

$PSA_{(t)}$ Partial Shaded Area (área sombreada parcial) en cada momento

X_t representa la anchura de área sombreada en la calle

W es la anchura total de la calle

H es la altura de las edificaciones que generan sombra en la calle

e representa el acimut de la calle

e_t representa el acimut solar en cada momento

B_t representa la altitud solar en cada momento

Adaptando la expresión general a las orientaciones Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente, se obtienen las siguientes expresiones (Ecuaciones 2.3 y 2.4) (Shashua-Bar & Hoffman, 2003):

$$\text{Orientación Este- Oeste } (e=0^\circ) \quad PSA_{(t)} = \frac{\cos(e_t) \times H}{\tan(B_t) \times W} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$\text{Orientación Norte - Sur } (e=90^\circ) \quad PSA_{(t)} = \frac{\sin(e_t) \times H}{\tan(B_t) \times W} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

No obstante, estas expresiones son dependientes de la posición solar en cada momento y tanto la altitud y acimut solares son variables en cada instante y

cambiantes a lo largo de todos los días del año. Por otra parte, en los estudios realizados no se realiza la distinción entre áreas peatonales y no peatonales que pueden encontrarse en las calles.

2.1.7.5 Otras características no relacionadas con el sombreado

Independientemente de las cualidades que presenten los árboles para las funciones de sombreado, éstos deben poder adaptarse a las diversas condiciones del entorno urbano en el cual van a habitar. En este sentido, se consideran relevantes los siguientes condicionantes específicos para la elección de especies en función de su adaptación al entorno urbano:

- Tolerancia al calor: resistencia a las altas temperaturas.
- Tolerancia a la “pavimentación”, bajo la cual las tierras presentan una mayor compacidad dificultando el enraizamiento del árbol.
- Tolerancia a la salinidad: en caso de ubicaciones cercanas al litoral.

Por otra parte, la plantación de arbolado en los entornos urbanos puede igualmente llegar a generar efectos negativos sobre la población (Vogt, Gillner, Hofmann et al, 2017).

Las principales desventajas a tener en cuenta en este sentido son las siguientes:

- Daños físicos o materiales causados por caídas de hojas, frutos o ramas sobre las personas, propiedades o infraestructuras.
- Repercusión económica en las labores de mantenimiento de los elementos arbóreos así como de sus partes desprendidas.
- Excesiva atenuación lumínica en los espacios públicos abiertos y las edificaciones, además de reducción de ventilación de los espacios urbanos delimitados (calles).

2.1.8 Acabados superficiales de los pavimentos. Albedo y emisividad

La elección del pavimento en función de sus características ópticas y térmicas toma relevancia de cara a reducir las temperaturas superficiales. Tanto el albedo como la emisividad térmica son propiedades que influyen directamente en el intercambio de flujo de calor en la superficie de un material luego su temperatura superficial (Doulos, Santamouris & Livada, 2004; Chen et al, 2019).

Los materiales utilizados tradicionalmente para la construcción urbana presentan unos valores de albedo (porcentaje de radiación solar reflejada) menores que los existentes en el medio rural (Doulos, Santamouris & Livada, 2004), por lo que la absorción de energía por parte de estos materiales ocasiona un mayor almacenamiento de calor en los mismos. Como consecuencia, y en función de sus valores de emisividad térmica (capacidad de un material para liberar el calor absorbido a través de radiación infrarroja), la difusión de calor por parte de dichos materiales será de mayor magnitud, por lo que el enfriamiento del ambiente resultará más dificultoso y más lento que en el medio rural, especialmente por la noche (Figura 2.10).

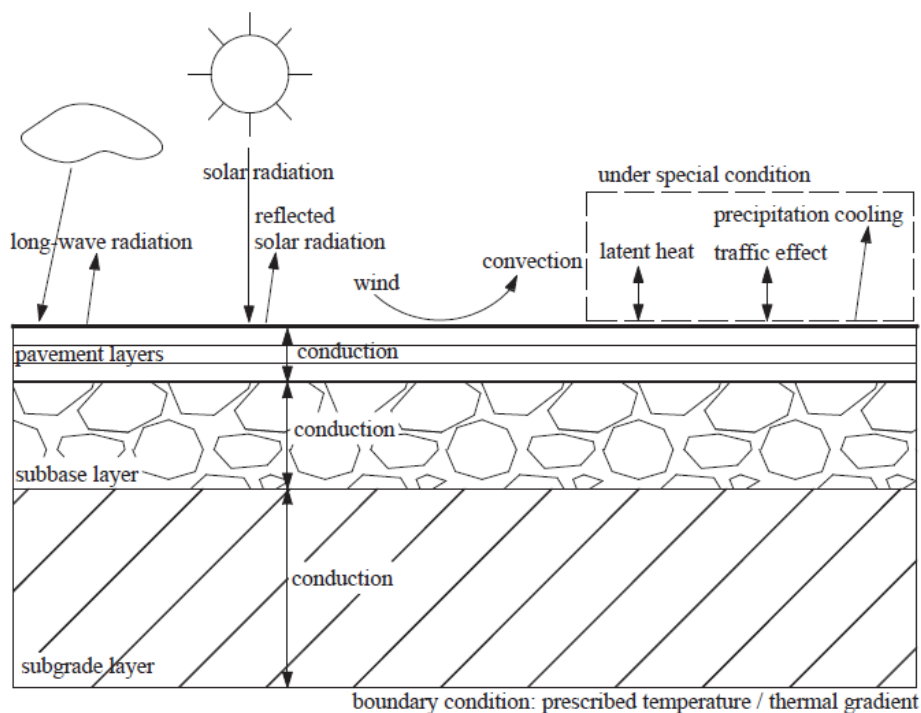


Figura 2.10. Ilustración de la transferencia de calor en el entorno pavimentado (Chen et al, 2019).

Se conoce como albedo al porcentaje de radiación solar que cualquier superficie es capaz de reflejar respecto a la radiación que incide sobre la misma, presentándose como un parámetro comprendido entre 0 y 1.

Cuanto mayor es el albedo de un material, su capacidad de reflejar la radiación solar será más elevada. En general, las superficies de colores claros tienen una mayor capacidad de reflexión de la radiación solar que los colores oscuros, los cuales absorben una mayor cantidad de calor (Akbari, Pomerantz & Taha, 2001; Santamouris et al, 2012).

En lo que respecta a la emisividad, señalar que la radiación térmica, la cual no requiere de un medio para llevarse a cabo, es la emisión de calor por parte de un material como resultado de las transiciones energéticas de sus moléculas, átomos y electrones. Dicha radiación es emitida en forma continua por toda la materia cuando su temperatura está por encima del cero absoluto, incrementándose el calor emitido al aumentar dicha temperatura (Çengel & Ghajar, 2011).

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro (teórico) por unidad de tiempo y unidad de superficie se expresa mediante la siguiente Ecuación 2.5 (Çengel & Ghajar, 2011) conocida como la Ley de Stefan – Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

donde:

E_b es la energía de radiación en (W/m²)

σ representa la constante de Stefan-Boltzmann= $5,67 \times 10^{-8}$ (W / m² K⁴)

T es la temperatura absoluta de la superficie en (K)

La radiación térmica es absorbida o emitida en la parte superficial de un material, por lo que se suele hablar de propiedades relativas a la radiación de las superficies de los materiales opacos.

La emisividad de una superficie se representa como la proporción entre la radiación emitida por la superficie de una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se denota por (ϵ) y es un parámetro comprendido entre 0 y 1. Es decir, la emisividad térmica cuantifica la capacidad de una superficie de un material para liberar calor a través de radiación.

Por consiguiente, la energía emitida (E) por un material determinado dependerá asimismo de su emisividad (ϵ) y la temperatura (T) a la que se encuentre su parte superficial, según la Ecuación 2.6:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{Ecuación 2.6}) \quad (\text{Çengel \& Ghajar, 2011})$$

Los valores de albedo y emisividad aproximada de los materiales utilizados tradicionalmente como acabado en los pavimentos de espacios exteriores se presentan en la Tabla 2.6 (Santamouris et al, 2012; Cohen et al, 2020).

Tabla 2.6 Valores orientativos de albedo y emisividad de los materiales más utilizados como acabado superficial en los espacios exteriores.

Tipo	Albedo	Emisividad
Asfalto	0,05 - 0,20	0,90 - 0,95
Hormigón	0,10 - 0,35	0,70 - 0,95
Cerámico	0,30	0,90
Piedra	0,20 - 0,30	0,85 - 0,95
Granito	0,10 - 0,20	0,85
Agua	0,05	0,98
Césped	0,15 - 0,25	0,95
Tierra	0,25	0,95
Madera	0,30 - 0,40	0,95

La disposición de un tipo de pavimento y su color exterior condicionarán la radiación de onda corta (solar) reflejada en el mismo, así como radiación de onda larga emitida (Figura 2.10) en función de sus valores de albedo y emisividad respectivamente.

2.1.9 Acabados superficiales de las fachadas

El acabado superficial de las fachadas, principalmente en función de sus características de reflexión solar o albedo, puede condicionar la Tmrt a nivel de calle y por lo tanto el confort térmico en las zonas públicas peatonales tal como se muestra en el esquema de la Figura 2.11.

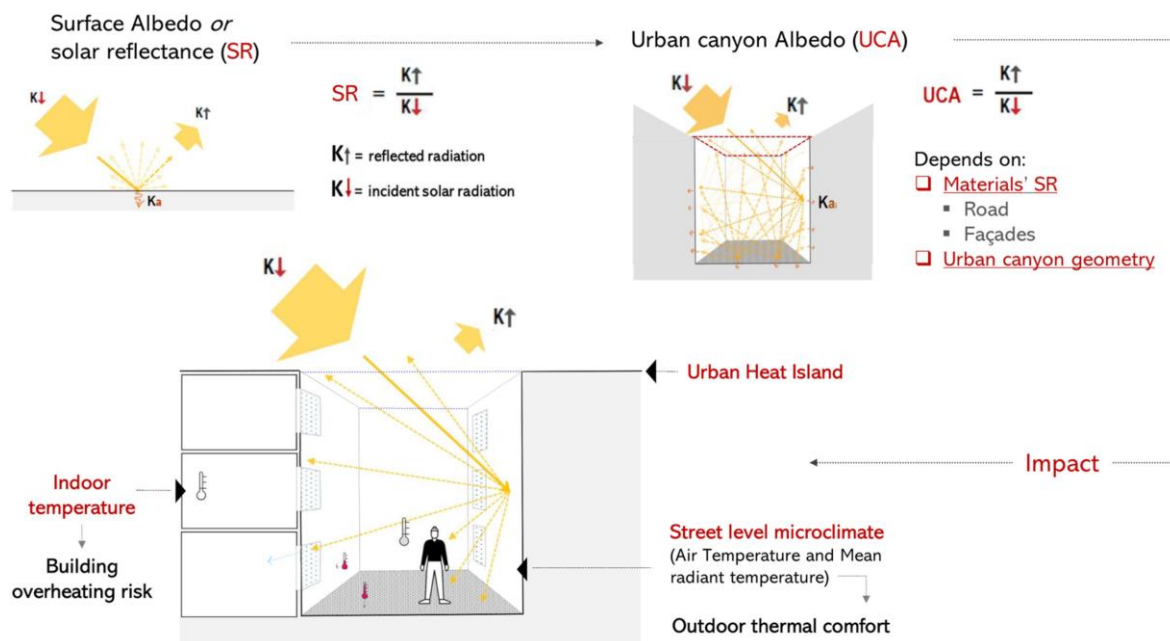


Figura 2.11 Esquema de influencia del albedo de pavimentos exteriores y fachadas de los edificios en las calles (Salvati et al., 2021).

Acerca de las fachadas frías, las cuales presentan una mayor reflexión solar, en otros estudios (Nazarian et al., 2019) se ha concluido que no es posible establecer directrices universales concretas acerca de la efectividad de las mismas en la mitigación de la isla de calor, ya que el grado de influencia del albedo de las fachadas en el confort térmico exterior depende de otros factores como son la morfología urbana, el diseño de las edificaciones, o la interacción humana con los mismos (ocupación y acondicionamiento interior del aire).

La influencia del albedo de las fachadas puede llegar a ser reducida o incluso no deseable en algunos casos, ya que puede empeorar el confort térmico exterior

debido al aumento de las inter-reflexiones que conducen a una mayor T_{mrt} a nivel de calle (Lee & Mayer, 2018; Salvati et al., 2021).

También se ha demostrado (Salvati et al., 2021) que las variaciones en el albedo de los materiales de fachada o incluso el pavimento de las calles no pueden llegar a tener el mismo potencial de mitigación del estrés por calor en las calles que el efecto producido por la sombra de los árboles; el aumento del albedo de las fachadas puede incluso empeorar el confort térmico para los peatones, mientras que la sombra de los árboles plantados en el lugar correcto conduce en todo caso a una reducción del estrés por calor en las calles (Lee & Mayer, 2018).

Por otra parte es también necesario tener en cuenta que la generación de sombra en las fachadas de los edificios y la utilización de materiales fríos en las mismas pueden llegar a conllevar ahorros en la energía para la refrigeración del interior de hasta el 60% según estudios llevados a cabo para ciudades mediterráneas (Zinzi, 2016).

Sin embargo, cabe remarcar que las fachadas son en la mayor parte de los casos elementos privados sobre las cuales no debieran tener influencia (en el soleamiento de las mismas) las medidas aplicables a los entornos urbanos, las cuales son de iniciativa pública. Asimismo, en el diseño de las fachadas de las edificaciones se pueden llegar a plantear soluciones para generar su propio sombreado mediante la aplicación de medidas bioclimáticas en caso de que resultara beneficioso.

2.2 Condiciones meteorológicas en la parte oriental de la cornisa cantábrica

2.2.1 Posición solar y cuantificación de la radiación

En la Figura 2.12 se representan la altitud y acimut solares para los distintos meses del año en la latitud de 43° (vertiente cantábrica).

CARTA SOLAR LATITUD 43 GRADOS

ALTURA DEL SOL (GRADOS)

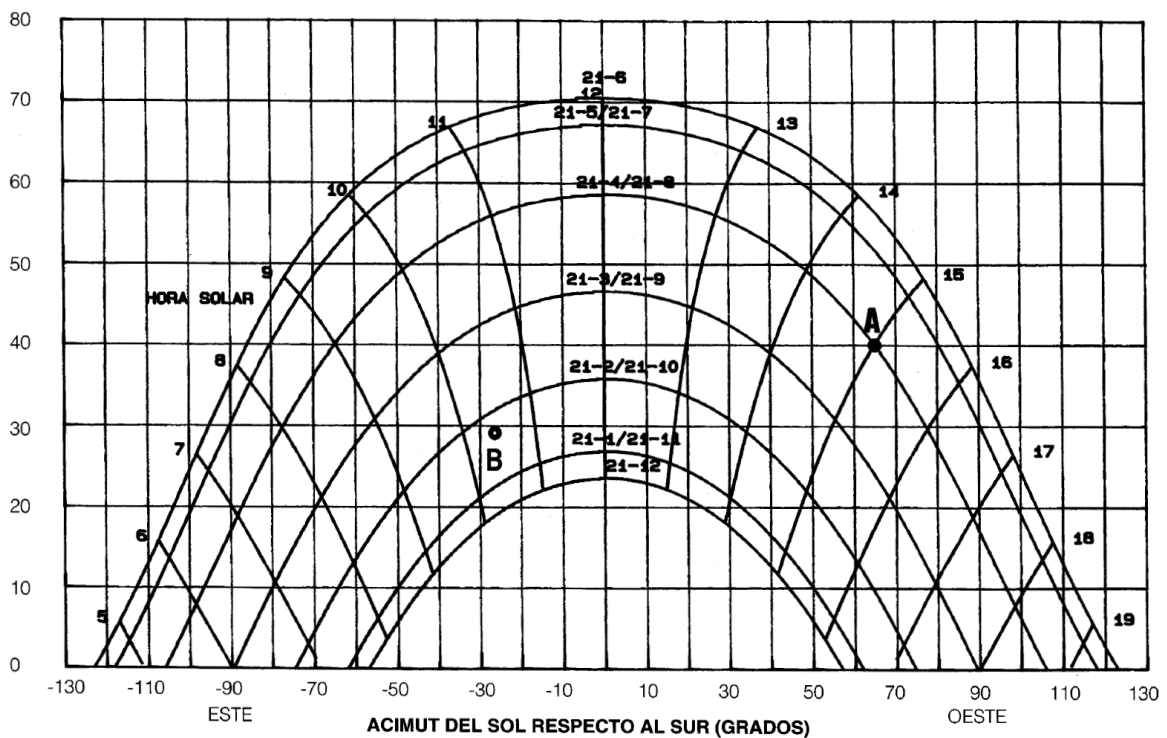


Figura 2.12 Carta solar para latitud 43° (Ente Vasco de la Energía).

En lo que respecta a la cuantificación de las magnitudes, la Figura 2.13 representa los valores de irradiación mensual media para la CAPV obtenidos del Atlas solar de País Vasco (Ente Vasco de la Energía).

Contemplando la radiación directa y difusa, los meses en los que la irradiación solar supera los 8.000 (Wh/m²) son los comprendidos entre abril y agosto, mientras que en los meses de marzo y septiembre los valores de irradiación también superan los 6.000 (Wh/m²) y 7.000 (Wh/m²) respectivamente.

Los meses de junio y julio son los meses donde la irradiación mensual media es más alta, alcanzado valores de hasta casi 10.000 (Wh/m²).

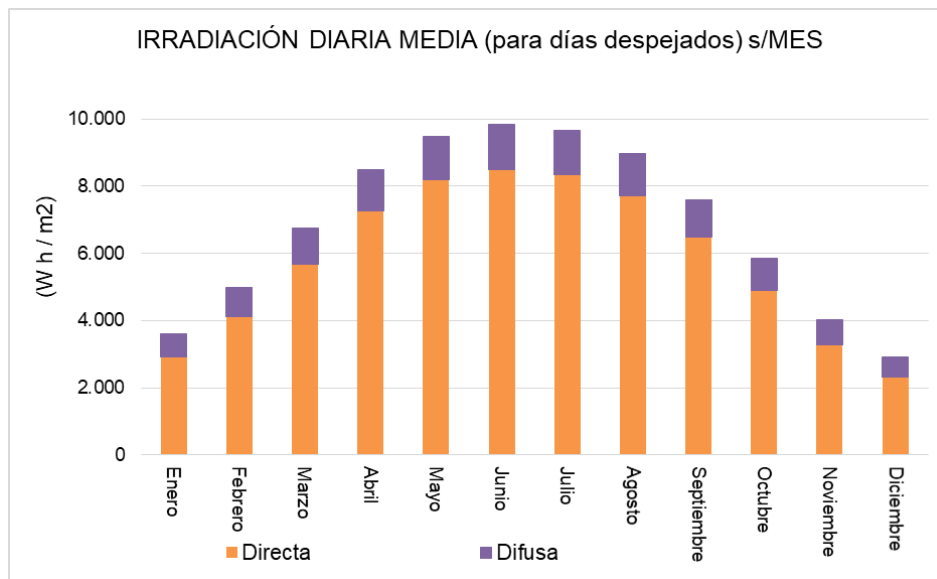


Figura 2.13 Valores de irradiación diaria media para días despejados en función del mes. Obtenido del Atlas solar del País Vasco (Ente Vasco de la Energía).

2.2.2 Temperatura del aire

La temperatura del aire es otro parámetro meteorológico que influye de manera relevante en el confort térmico urbano. Los valores de temperatura del aire son variables a lo largo de los días y los distintos meses, dependiendo asimismo de las circunstancias meteorológicas particulares de cada año. A modo de referencia, en la Figura 2.14 se representan las temperaturas del aire máximas medias mensuales y máximas absolutas mensuales durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre entre los años 2011 y 2020.

Los valores han sido obtenidos de los informes correspondientes al apartado “Climatología de Euskadi- Climatología mes a mes” disponibles en la página web de la Agencia Vasca de Meteorología Euskalmet. En dichos informes mensuales se incluyen valores cuantitativos correspondientes a precipitaciones y temperatura del aire recogidos por cinco estaciones meteorológicas de la CAPV. En la Figura 2.14 se representan los datos meteorológicos obtenidos en la estación de Deusto. En los gráficos se representan los valores de temperaturas máximas medias mensuales y máximas absolutas mensuales al considerarse éstos valores los más susceptibles de generar influencia en el confort térmico relacionado con el calor.

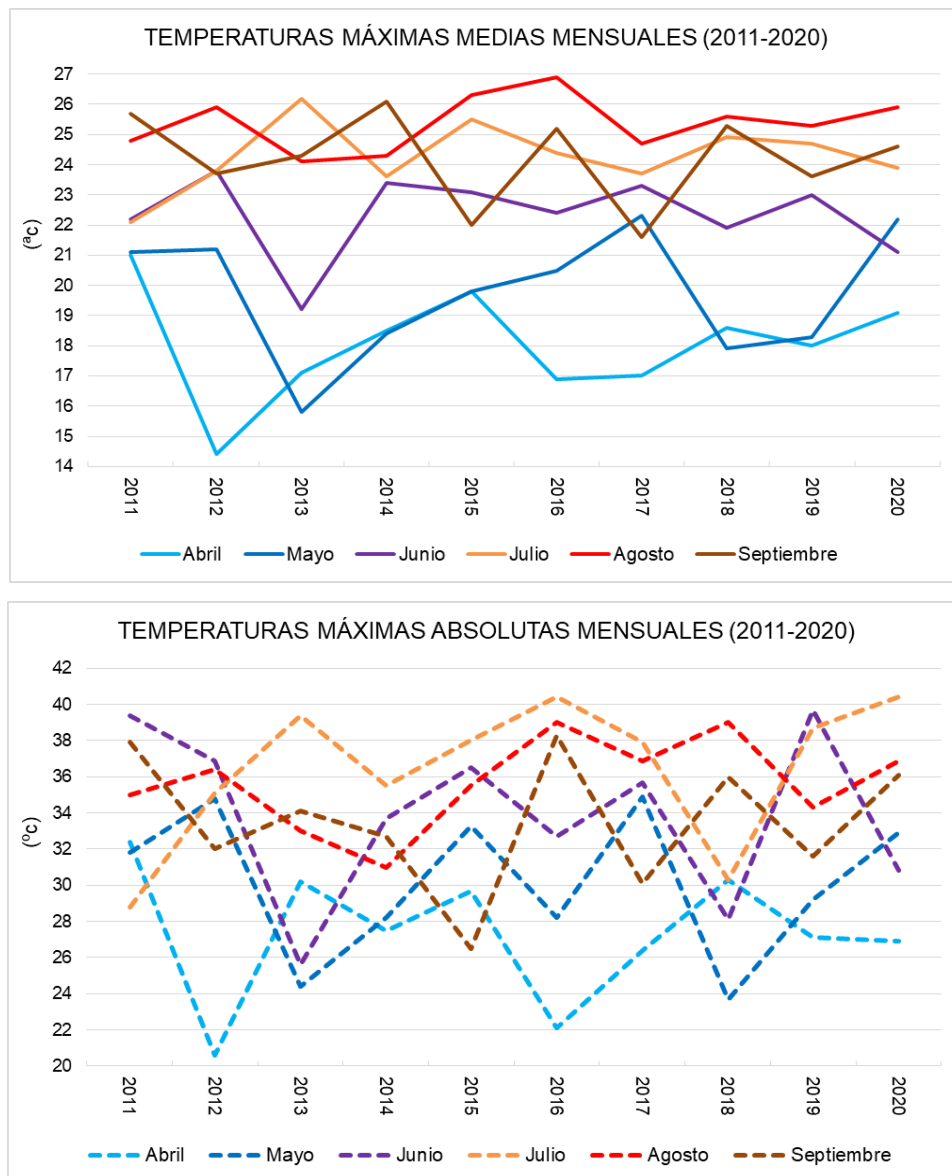


Figura 2.14 Temperaturas del aire máximas medias mensuales (Arriba) y máximas absolutas mensuales (Abajo) durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre entre los años 2011 y 2020. Fuente Euskalmet (datos obtenidos de la estación meteorológica de Deusto).

Las temperaturas máximas absolutas mensuales presentan una mayor variabilidad en sus valores, mientras que las temperaturas máximas medias mensuales, al ser algo más regulares, permiten una lectura algo más concluyente en lo que respecta a los 10 años considerados. En general, los meses en los que los valores de temperatura máxima media son más altos son agosto (con valores comprendidos entre 24 °C y 27 °C) y julio (valores entre 23 °C y 27 °C). Junio presenta valores comprendidos entre 21 °C y 24°C (salvo el excepcional caso del

año 2013), mientras que septiembre presenta valores que van desde los 21°C hasta los 26°C, aunque de una manera llamativamente poco regular, con gráfico a modo de diente de sierra. Por su parte, los meses de abril (valores entre 14°C y 21°C) y mayo (valores entre 16°C y 22°C) presentan en general niveles inferiores al resto de meses considerados.

La gráfica correspondiente a las temperaturas máximas absolutas va también en cierta consonancia a lo indicado en los párrafos anteriores: en agosto los valores oscilan entre los 30°C y 40°C, mientras que en julio oscilan entre los 28°C y los 41°C. Por su parte, en junio (entre 26°C y 40°C) y septiembre (entre 26°C y 38°C) se han podido alcanzar valores muy elevados en años concretos. En abril (valores entre 20°C y 32°C) y mayo (entre 24°C y 35°C) los valores en general son más bajos, aunque también se pueden alcanzar máximos de niveles bastante elevados.

2.2.3 Combinación de parámetros meteorológicos

Considerando la combinación de los parámetros de irradiación y temperatura del aire expuestos anteriormente, los meses en principio más desfavorables desde el punto de vista del confort térmico relacionado con el calor parecen ser los de junio, julio y agosto. No obstante, los niveles de irradiación media diaria en los meses de abril y mayo también arrojan valores elevados, por lo que la posible circunstancia de que los valores de temperatura del aire pudieran ser puntualmente elevados en estos meses ocasionaría asimismo situaciones de estrés por calor a tener en consideración.

En lo que respecta a septiembre, los valores de irradiación son inferiores a los correspondientes a los meses entre abril y agosto, aunque en lo que respecta a la temperatura del aire, la misma ofrece valores bastante elevados por lo que las situaciones de estrés por calor podrían ser también significativas.

Por otra parte, los valores de irradiancia y temperatura del aire varían a lo largo de las distintas horas del día. A modo de ejemplo, en la Figura 2.15 se muestran los datos de irradiancia y temperatura del aire para la franja horaria comprendida entre las 09:00 y las 21:00 (hora local de la CAPV UTC+2) para los meses comprendidos entre abril y septiembre del año 2021 (fuente: Euskalmet), considerando para los mismos los días donde las mediciones de irradiancia reflejaron valores máximos en cada mes, es decir, los días despejados.

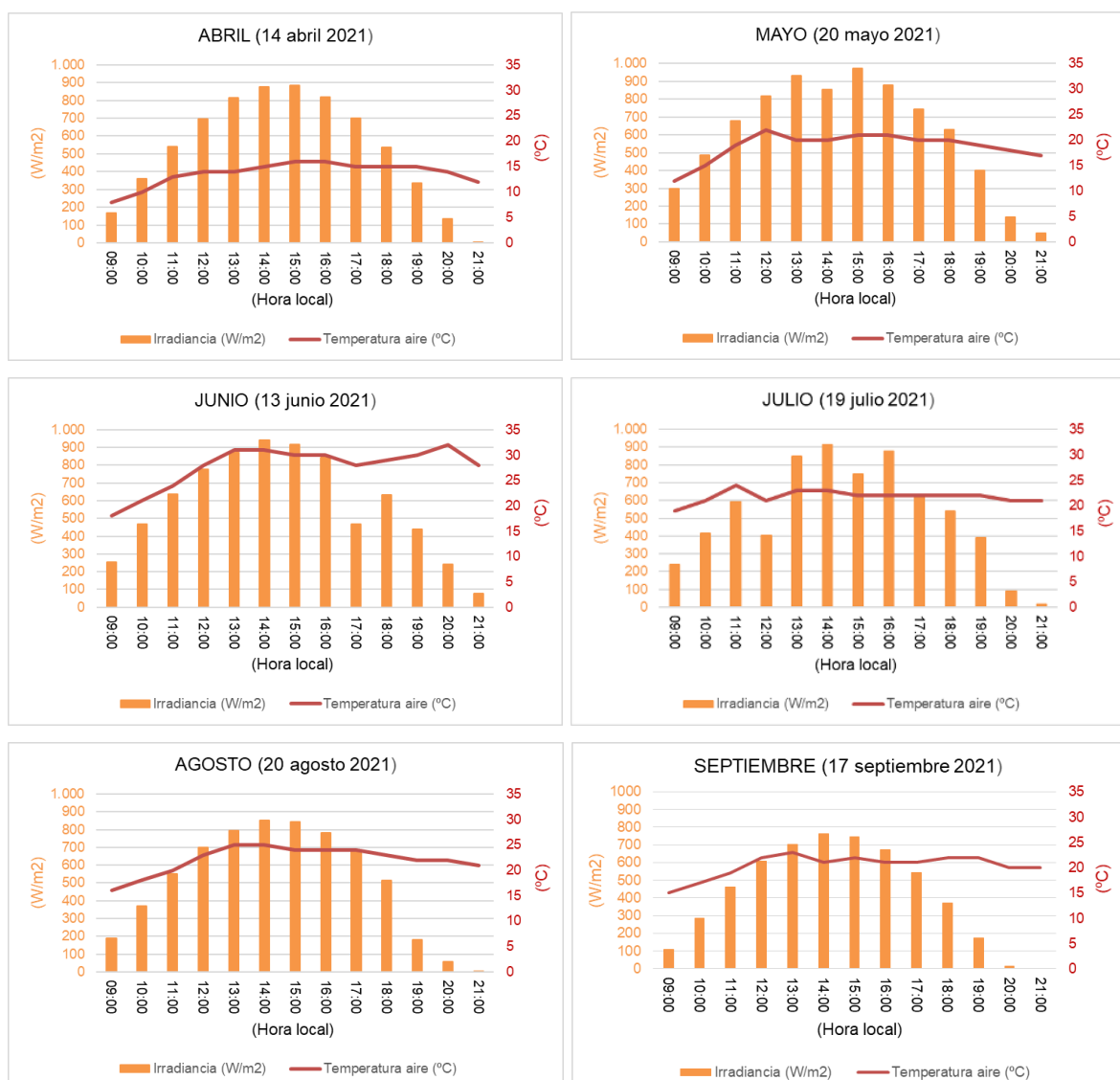


Figura 2.15 Datos de irradiancia y temperatura del aire en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre del año 2021 considerando los días donde las mediciones han reflejado valores máximos de irradiancia (días despejados). Fuente: Euskalmet.

En abril, los valores de irradiancia llegaron a ser superiores a 600 W/m^2 entre las 12:00 y las 17:00, resultando los valores máximos cercanos a 900 W/m^2 a las 14:00 y las 15:00. La temperatura del aire se mantuvo estable y cercana a los 15°C entre las 11:00 y las 20:00.

En mayo, la irradiancia ofreció valores superiores a 600 W/m^2 entre las 11:00 y las 18:00 h., con valores máximos superiores a 900 W/m^2 a las 13:00 y las 15:00. La temperatura del aire se mantuvo estable y cercana a 20°C entre las 12:00 y las 18:00.

En junio, la irradiancia fue superior a 600 W/m^2 entre las 11:00 y las 18:00, con valores máximos superiores o cercanos a 900 W/m^2 entre las 13:00 y las 16:00. La temperatura del aire fue cercana a los 30°C entre las 12:00 y las 20:00.

En julio los valores de irradiancia llegaron superiores a 600 W/m^2 entre las 13:00 y las 17:00, con temperatura casi constante de 20°C entre las 9:00 y las 21:00. Cabe indicar que los valores de irradiancia no son del todo representativos a los meses de julio debido a las condiciones extraordinarias ocurridas en julio de 2021, donde los días despejados fueron muy escasos.

En agosto la irradiancia ofreció valores superiores a 700 W/m^2 entre las 12:00 y las 17:00, con niveles máximos ligeramente superiores a 800 W/m^2 a las 14:00 y las 15:00. En cuanto a la temperatura, la misma llegó a ser superior a 20°C entre las 11:00 y las 21:00, con valores máximos cercanos a 25°C entre las 11:00 y las 17:00.

Por último, en septiembre la irradiancia llegó a valores superiores a 600 W/m^2 entre las 12:00 y las 16:00, con niveles máximos superiores a 700 W/m^2 a las 14:00 y las 15:00. En cuanto a la temperatura, la misma fue aproximada a 20°C entre las 12:00 y las 21:00.

2.3 Herramientas de simulación

Además de las mediciones reales llevadas a cabo, en el desarrollo de la Tesis se han realizado distintas simulaciones relativas al confort térmico utilizando el modelo SOLWEIG, mediante el cual se han calculado la T_{mrt} y los valores PET en distintas situaciones y en función de distintos parámetros meteorológicos reales (radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento).

Existen asimismo otros modelos de simulación de la T_{mrt} e índices PET como puede ser RayMan, el cual calcula la T_{mrt} (e incluso los valores PET, PMV y otros) únicamente para un punto concreto introduciendo información adicional a la meteorológica como valores SVF, fotografías hemisféricas, nubosidad o temperaturas de superficie (Matzarakis, Rutz & Mayer, 2007). Por su parte el modelo ENVI-met estima la T_{mrt} (incluso los valores PET) para un espacio bidimensional horizontal según la trayectoria solar, introduciéndose parámetros meteorológicos adicionales como la presión de vapor o dirección del viento (Bruse & Fleer, 1998)

No obstante, para un cálculo de la T_{mrt} bidimensional horizontal en resoluciones temporales aproximadas, SOLWEIG parece ser la opción preferible entre los tres modelos (Chen, Lin & Matzarakis, 2014).

Un modelo más reciente como es Mr.T puede ser utilizados para la estimación de la T_{mrt} introduciendo datos meteorológicos, pero incluyendo mediciones de temperaturas superficiales en la geometría urbana (Cohen et al., 2020).

Por otra parte, mediante el modelo CAN-EYE, el cual se englobaría dentro de los métodos indirectos de no-contacto, se han estimado los parámetros biofísicos de las copas de los árboles a partir de fotografías hemisféricas tomadas in-situ para las distintas especies seleccionadas.

El procesado de imágenes hemisféricas también se puede llevar a cabo mediante otras herramientas como Hemiview (Rich, 1990), Scanopy (Rich et al., 1993) o GLA (Frazer, Canham & Lertzman, 2000). Estos programas permiten importar imágenes hemisféricas y analizarlas mediante técnicas de segmentación de la imagen (Martínez, Camacho-de Coca & García Haro, 2006), aunque se ha optado por la utilización del modelo CAN-EYE al tratarse de una técnica contrastada y accesible para la determinación de los parámetros de las copas de los árboles relacionados con la sistemática de la Tesis (especialmente PAI y fAPAR).

Al respecto de las simulaciones de T_{mrt} y el cálculo de la transmisividad de los árboles, indicar que existe también un modelo de más reciente creación denominado STMRT (Li et al., 2023). Este modelo ha sido desarrollado para calcular la T_{mrt} bajo la sombra de un árbol, considerando la transmisión de radiación a través del mismo en función del ángulo de inclinación de sus hojas.

2.3.1 Modelo SOLWEIG- Umep

SOLWEIG (SOlar and LongWave Environmental Irradiance Geometry) es un modelo para la evaluación de las variaciones espaciales de los flujos de radiación 3D y la estimación de la temperatura media radiante (T_{mrt}) en entornos urbanos (Lindberg, Holmer & Thorsson, 2008). El modelo se encuentra actualmente incluido dentro del “plugin” UMEP (Urban Multiscale Environmental Predictor) correspondiente al software libre de Sistema de Información Geográfica QGIS. El valor de T_{mrt} se puede calcular mediante el modelo SOLWEIG con un grado de precisión suficiente (Katzschner & Thorsson, 2009).

La estimación de T_{mrt} en el modelo se obtiene considerando los flujos de radiación de onda corta (K_i) y onda larga (L_i) que se determinan por separado en seis direcciones ($i = 1-6$, hacia arriba, hacia abajo y desde los cuatro puntos cardinales) junto con el factor angular (F) y absorción (c_k) de las entradas de radiación global de onda corta, temperatura del aire y humedad relativa. Para determinar la T_{mrt} , en primer lugar se calcula la densidad de flujo radiante media

(R_{str}) mediante la Ecuación 2.7 (Lindberg, Holmer, & Thorsson, 2008), definida como la suma de la radiación de onda larga y de onda corta en tres dimensiones, junto con los factores angulares y de absorción individuales de un elemento dado (Lindberg & Grimmond, 2011).

$$R_{str} = c_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + e_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad (\text{Ecuacion 2.7})$$

donde:

R_{str} representa la densidad de flujo radiante media

K_i y L_i representan, respectivamente, los flujos de radiación de onda corta y de onda larga ($i = 1-6$)

F_i representa los factores angulares entre una persona y las superficies circundantes

c_k representa el coeficiente de absorción de la radiación de onda corta (valor estándar 0,7)

e_p representa la emisividad del cuerpo humano (valor estándar 0,97)

Luego, se calcula la T_{mrt} mediante la Ecuación 2.8 a partir de R_{str} (Lindberg, Holmer, & Thorsson, 2008) aplicando la ley de Stefan Boltzmann:

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{R_{str} / (e_p \sigma) + 273.15} \quad (\text{Ecuacion 2.8})$$

donde:

σ representa la constante de Stefan-Boltzmann= $5,67 \times 10^{-8}$ (W / m² K⁴)

En la Figura 2.16 se representa el proceso que utiliza el modelo SOLWEIG para la obtención de la T_{mrt} . Los dos principales grupos de datos de entrada en el modelo están relacionados con el terreno y la meteorología. Es necesario incluir un modelo digital de superficie (DSM) que recopila datos tanto sobre las condiciones del terreno como sobre la altura de los edificios. Además, otra información imprescindible consiste en los píxeles que ocupan los edificios, por lo

que es necesario incluir el Modelo Digital de Elevación (DEM), que se utiliza en conjunto con la DSM.

Asimismo, resulta posible incluir una composición superficial del pavimento exterior utilizando distintas clases de material, aunque para esta opción (Land Cover Fraction Grid) únicamente están disponibles los materiales estándar establecidos en el modelo (asfaltado, césped, tierra desnuda y agua) con sus correspondientes valores de albedo y emisividad.

Los datos meteorológicos requeridos son la radiación de onda corta entrante (W / m^2), velocidad del viento (m/s), temperatura del aire ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%), todos ellos clasificados por variables relacionadas con el tiempo: año, día del año y hora.

El modelo también requiere información sobre los parámetros de entorno físico y las condiciones de exposición humana. En el primer caso, es necesario incluir valores de albedo y emisividad de las fachadas de los edificios, así como del pavimento en caso de no utilizarse la opción de composición superficial del pavimento (Land Cover Fraction Grid).

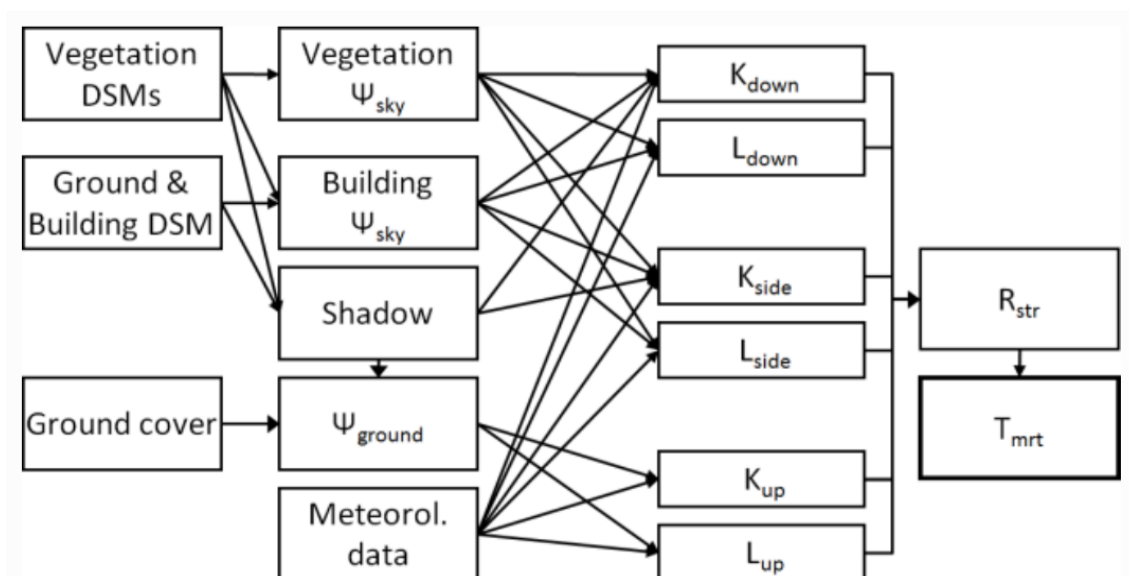


Figura 2.16 Representación del proceso utilizado por el modelo SOLWEIG para la obtención de la T_{mrt} (Lindberg & Grimmond, 2011).

La relevante influencia de los árboles en la estimación de la T_{mrt} se basa principalmente en su capacidad de proyectar sombra, por lo que es importante modelar y posicionar los elementos de arbolado en el modelo (Lindberg & Grimmond, 2011). La generación de arbolado 3D se crea en el llamado Canopy Digital Surface Model (CDSM), donde cada árbol puede tener su propia forma (excepto la cónica, la cual debe ser asimilada) y propiedades geométricas. También es necesario introducir el valor de transmisividad de la radiación de onda corta a través de elementos de arbolado. A partir de lo descrito, el modelo SOLWEIG genera patrones de sombra y factores de vista del cielo (SVF).

Para la estimación de la T_{mrt} , es necesaria la introducción de tres parámetros relativos a la exposición humana: la absorción de radiación de onda corta, la absorción de radiación de onda larga y la postura de la persona. Las últimas versiones de SOLWEIG también ofrecen la posibilidad de estimar los valores de PET teniendo en cuenta entradas de datos humanos adicionales como son la edad, la altura, la tasa metabólica, la ropa, el peso y el sexo.

2.3.2 Modelo CAN-EYE

CAN-EYE es un software libre desarrollado por el laboratorio EMMAH del Instituto Nacional de Investigación de Agricultura de Francia. El modelo está diseñado en Matlab para estimar los parámetros LAI, PAI, FVC, ALA y fAPAR propios de la estructura de la copa de un árbol, partiendo de su fracción de huecos (Gap Fraction) en base a imágenes reales en color. (Martínez, Camacho-de Coca & García Haro, 2006). Estos mencionados parámetros de la copa de un árbol se definen como:

- LAI (Leaf Area Index): variable adimensional (m^2/m^2) descrita en el apartado 2.1.7.3.
- PAI (Plant Area Index): variable adimensional (m^2/m^2) que se refiere al sumatorio de superficie (considerando una sola cara) de las hojas, los tallos y las ramas del árbol, por unidad de superficie de suelo.

- FVC (Fractional Vegetation Cover) es la fracción de suelo que quedaría cubierta por la vegetación.
- ALA (Average Leaf inclination Angle): es el ángulo medio de inclinación de las hojas del árbol (Wang & Jarvis 1988).
- fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) se define como la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la copa del árbol; es decir, expresa la capacidad de la copa del árbol para absorber energía (Fensholt et al., 2004).
- Gap Fraction (fracción de huecos de la copa del árbol): es un parámetro de la copa del árbol para medir la fracción de energía incidente que se transmite a través del mismo considerando su vegetación como un cuerpo negro (Weiss, Smith, Jonckheere & Coppin, 2004).

Los métodos basados en la medición de la Gap-Fraction tienden a proporcionar una estimación del LAI no del todo correcta, ya que utilizando los métodos indirectos (entre ellos los relacionados con las fotografías hemisféricas) no es posible desgranar las hojas de los tallos, ramas o tronco de los árboles. Incluso el enmascaramiento de algunas partes de la planta (posible en el modelo CAN-EYE) podría conducir a una subestimación del valor LAI. Por consiguiente, todos los resultados del modelo CAN-EYE se corresponden con el índice PAI (Plant Area Index) y no con el LAI.

Para la obtención de los citados parámetros, la información sobre el árbol se puede tomar a partir de imágenes hemisféricas que se pueden obtener hacia arriba o hacia abajo, aunque en el caso de los árboles, se recomienda obtenerlas desde la parte inferior del elemento. Este tipo de imágenes se pueden tomar con una cámara digital equipada con una lente angular (también llamada ojo de pez), que proyecta las coordenadas angulares de un objeto en un plano (Jonckheere et al, 2004).

El modelo CAN-EYE ofrece la posibilidad de procesar hasta 20 imágenes, siendo recomendable utilizar al menos 8 para analizar la fracción de brecha (Gap

Fraction) de la copa. El procedimiento del modelo consta de tres partes: (Martínez, Camacho-de Coca & García Haro, 2006).

- (1) estimación de fracción de huecos (Gap Fraction) bidireccional.
- (2) integración de acimut para obtener una fracción de huecos (Gap Fraction) monodireccional, que se define como la fracción de suelo observada para cada ángulo cenital, e integrada para todo el rango acimutal.
- (3) derivación de los parámetros biofísicos LAI, PAI, FVC, ALA, fAPAR y agrupamiento (Clumping).

La estimación de los parámetros LAI y PAI se realiza mediante la inversión del modelo de Poisson. El modelo de Poisson utilizado por CAN-EYE considera una inclinación foliar simétrica, y se caracteriza partiendo de un parámetro solitario, que es el ángulo medio de las hojas (ALA, 0° - 90°) (Wang & Jarvis 1988).

En lo que respecta a los resultados de CAN-EYE, el modelo proporciona varios tipos para el fAPAR (al tratarse de un valor que varía en función de la posición solar), los cuales son computados de dos modos generales. Para ambos casos el modelo ofrece los resultados medidos (instantáneos) y modelados (computado), según lo siguiente:

- 1- “Black sky” fAPAR: corresponde a la componente directa de la radiación (irradiancia del sol en una sola dirección).
- 2- “White sky” (diffuse) fAPAR: se corresponde con la componente difusa de la radiación

El valor fAPAR, al tratarse de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la copa del árbol, se relaciona directamente con el concepto de factor de sombra, por lo que la transmisividad de las especies de arbolado queda asimilada como la diferencia entre la unidad (100%) y el propio valor fAPAR (Transmisividad= $1 - \text{fAPAR}$).

Los resultados del fAPAR, PAI y ALA se presentan según distintas estimaciones: *effective* (efectivo) y *true* (verdadero). Dado que el modelo CAN-EYE puede considerar sólo una parte del rango del ángulo cenital a partir de las imágenes hemisféricas, existe una alta probabilidad de que existan píxeles mixtos en parte de los ángulos de visión cenital. Por consiguiente, a modo de corrección de los valores *effective*, se introduce el denominado grado de *clumping* de la cubierta, resultando en consecuencia los valores *true* superiores a los *effective* para estructuras que presentan agrupamiento (hojas).

El modelo CAN-EYE calcula los distintos parámetros según los diferentes métodos establecidos: CAN-EYE V5.1, CAN-EYE V6.1, Miller, LAI2000, 3, 4, 5 anillos (Weiss, Smith, Jonckheere & Coppin, 2004). El CAN-EYE V6.1 supone que el valor verdadero debe estar cerca del anillo cenital a 57° , pudiendo considerarse esta restricción más eficiente al no basarse en ninguna suposición.

CAPÍTULO 3

INFLUENCIA DE FACTORES EN EL CONFORT TÉRMICO URBANO CON LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE LA PARTE ORIENTAL DE LA CORNISA CANTÁBRICA

3.1- Análisis preliminar de los factores que influyen en el confort térmico urbano. Condiciones generales de partida

En el presente capítulo se realiza un análisis preliminar del grado de influencia de los distintos factores que repercuten en el confort térmico urbano, aunque considerando en los modelados distintas condiciones meteorológicas reales correspondientes en todo caso a la parte oriental de la cornisa cantábrica, de manera que los resultados obtenidos resulten significativos y propios para esta localización geográfica.

En general, los factores que se analizan son:

- Meteorológicos
- Orientación de la calle
- Pavimentos
- Sombreado mediante arbolado

No se analiza la influencia que podrían generar los materiales de las fachadas al ser ésta reducida (Lee & Mayer, 2018; Salvati et al., 2021) y tratarse de elementos privados y diversos sobre los que en la practicidad no se puede actuar dentro de las medidas a establecer para los elementos urbanos exteriores.

El análisis de la influencia se lleva a cabo mediante el modelo SOLWEIG (Lindberg, Holmer y Thorsson, 2008) obteniendo a partir del mismo los resultados correspondientes a la temperatura media radiante T_{mrt} y el índice PET para las distintas situaciones planteadas. Los niveles de percepción térmica del índice PET que se representan en las gráficas son los establecidos para Europa Central.

Para los modelados presentados en este capítulo, el pavimento considerado en general para las zonas peatonales de las calles tiene unos valores de albedo y emisividad de 0,10 y 0,90 respectivamente, excepto en el modelado realizado para el apartado 3.4.1 donde el albedo se presenta como variable. Tanto el

albedo y la emisividad de las fachadas utilizados, como los parámetros de exposición humana y los necesarios para el cálculo de PET, se han correspondido con los valores estándar del modelo SOLWEIG empleados en general para la Tesis y que se describen en el apartado 4.3.

En los modelados se introducen por un lado las condiciones meteorológicas obtenidas de Euskalmet correspondientes al día 21 de junio de 2017, al tratarse de una fecha con altura solar máxima y unos valores de irradiancia elevados (se corresponden con los valores de un día despejado del mes de junio según el Atlas Solar del País Vasco, y elevados de acuerdo a la escala anual establecida en el Atlas) además de presentar temperaturas que superan las máximas medias mensuales entre 2011-2020 para el mes de junio.

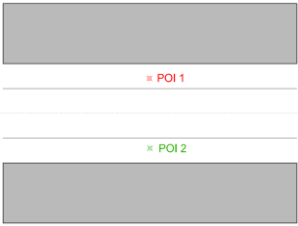
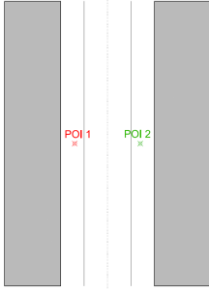
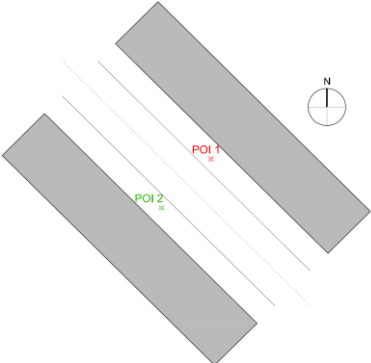
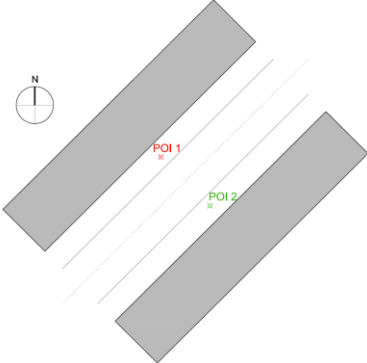
Por otro lado, se utilizan también las condiciones meteorológicas del día 30 de junio de 2017 por ser sus valores de irradiancia no correspondientes a días despejados (valores inferiores a los considerados para el mes de junio en el Atlas Solar del País Vasco) y presentar temperaturas inferiores a las máximas medias mensuales entre 2011-2020 para el mes de junio.

Los dominios considerados en general para los modelados se corresponden con calles de 20 m. de anchura y 60 m. de longitud, contemplándose las 4 orientaciones representadas en la Tabla 3.1. Los POIs (Points Of Interest) considerados en el modelo se encuentran a una distancia de 3 m. respecto a las fachadas en cada caso.

La altura de los edificios considerada es de 20 m. en general, excepto para el apartado donde se valora la influencia del AR en el porcentaje de sombreado generado, para el cual se contemplan distintas alturas de las edificaciones.

En los siguientes apartados se plantean distintas hipótesis o escenarios presentando en ellos una variabilidad de los parámetros que se pretenden analizar en cada caso.

Tabla 3.1 Esquemas gráficos de las distintas orientaciones de calle consideradas.

	
Este-Oeste (E-O)	Norte-Sur (N-S)
	
Noroeste-Sureste (NO-SE)	Noreste-Suroeste (NE-SO)

3.2 Influencia de los factores meteorológicos

Para el análisis de los factores meteorológicos se utiliza un esquema de calle de orientación Este-Oeste (según Tabla 3.1) debido a que en esta situación se va a disponer de un punto de estudio expuesto permanentemente a la radiación solar directa (POI 1) y otro bajo la sombra de la edificación en las horas centrales del día (POI 2).

Los datos meteorológicos se corresponden con los siguientes días:

- (A) 21 de junio de 2017 (valores de irradiancia y temperatura del aire más elevados)
- (B) 30 de junio de 2017 (valores de irradiancia y temperatura del aire más bajos)

Los datos meteorológicos relativos a irradiancia (R_a), velocidad del viento (V_a), temperatura del aire (T_a) y humedad relativa (Hum) obtenidos de Euskalmet (correspondientes a la estación de Deusto) para los días señalados se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos meteorológicos correspondientes a los días 21 y 30 de junio de 2017. Irradiancia (R_a), Velocidad del viento (V_a), Temperatura del aire (T_a) y Humedad relativa (Hum). Obtenidos de Euskalmet- Estación de Deusto.

Hora	(A) Datos meteorológicos 21-06-2017				(B) Datos meteorológicos 30-06-2017			
	R_a (W/m^2)	V_a (m/s)	T_a ($^{\circ}C$)	Hum (%)	R_a (W/m^2)	V_a (m/s)	T_a ($^{\circ}C$)	Hum (%)
09:00	302	4	19	79	36	2	14	83
10:00	487	5	25	59	132	4	15	83
11:00	656	4	28	50	314	3	15	84
12:00	785	2	30	42	299	2	17	76
13:00	878	1	33	35	233	2	16	84
14:00	921	2	35	32	249	4	15	80
15:00	903	4	34	40	361	4	16	72
16:00	850	6	32	42	228	6	17	63
17:00	735	5	33	37	346	4	16	62
18:00	590	4	33	40	129	7	17	61
19:00	428	4	32	47	52	5	16	63
20:00	242	6	31	50	53	4	15	78
21:00	78	5	28	59	66	4	15	69

3.2.1 Influencia de la irradiancia y la temperatura del aire:

En este apartado se consideran 3 hipótesis resultantes de combinar los datos meteorológicos correspondientes a los días 21 (A) y 30 (B) de junio de 2017:

- HIPÓTESIS 1: Día de cielo despejado con elevada temperatura. Datos de Irradiancia (A) y Temperatura (A) elevados.
- HIPÓTESIS 2: Día nuboso con elevada temperatura. Datos Irradiancia (B) bajos y Temperatura (A) elevados.
- HIPÓTESIS 3: Día nuboso con baja temperatura. Datos de Irradiancia (A) elevados y Temperatura (B) bajos.

Para los dos puntos considerados de la calle modelada de orientación E-O, los resultados tanto de T_{mrt} como de PET en las distintas horas diurnas se representan en la Figuras 3.1 y 3.2.

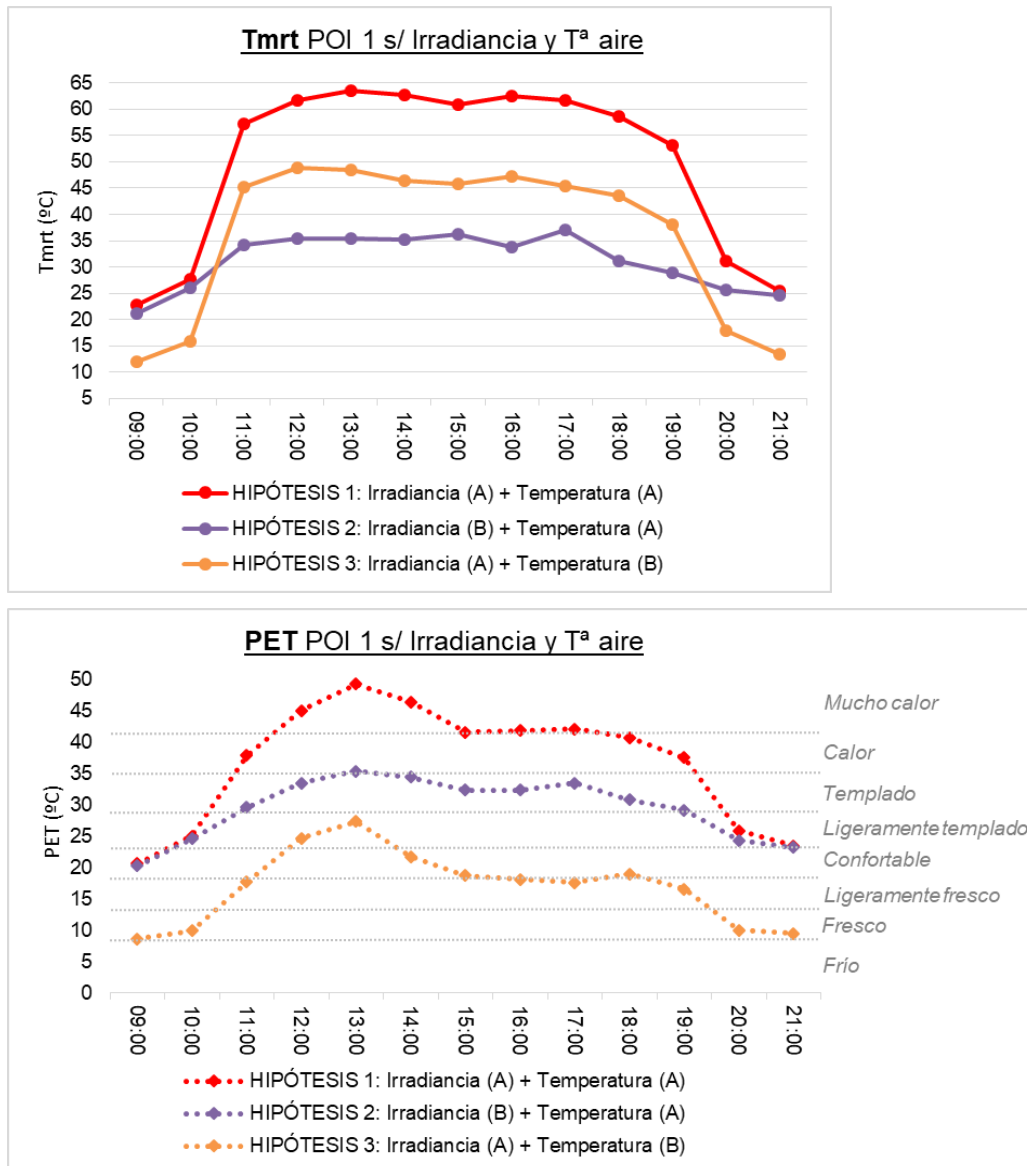


Figura 3.1 Representación de los resultados de T_{mrt} y valores PET para POI 1 (Acera Norte) en las 3 hipótesis consideradas para valorar la influencia de la irradiancia y la temperatura del aire.

En la acera Norte (POI 1), en lo que respecta a la T_{mrt} , a igualdad de temperatura del aire, la disminución de irradiancia produce una disminución de aproximadamente 25°C-30°C en horas de mayor exposición solar. Por su parte, a igualdad de irradiancia, la disminución de la temperatura del aire produce una

disminución de aproximadamente 15°C en horas con exposición solar. En la Hipótesis 2, con valores de irradiancia más bajos, en las horas centrales del día la T_{mrt} se mantiene alrededor de los 30°C-35°C, en valores cercanos a la temperatura del aire. En cuanto a los valores PET, cuando la temperatura del aire es elevada, el aumento de irradiancia conlleva un aumento de entre 10°C-15°C en las horas centrales del día. Por otro lado, cuando la irradiancia es elevada, la disminución de la temperatura del aire conlleva una disminución de 25°C-30°C en horas centrales.

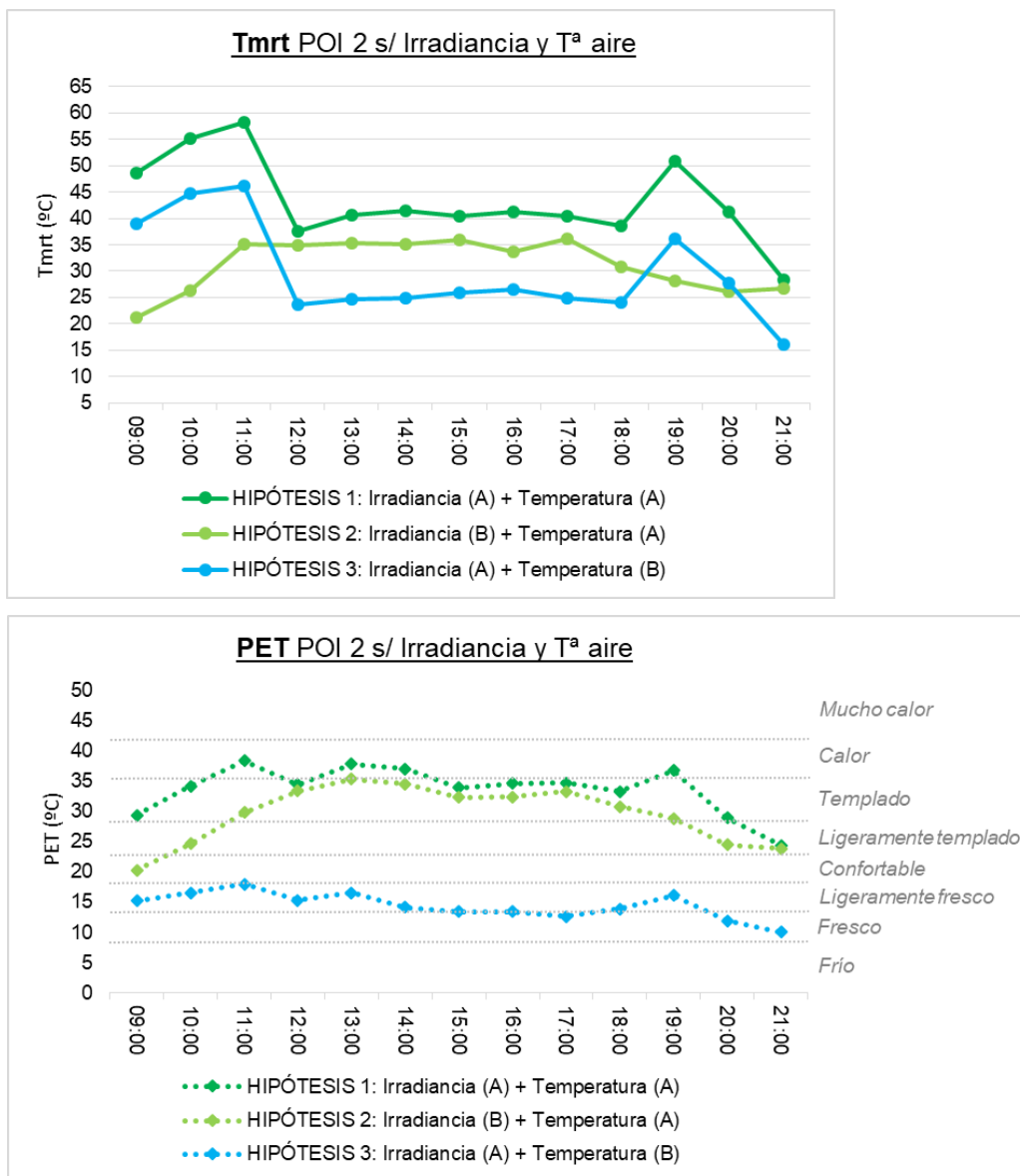


Figura 3.2 Representación de los resultados de T_{mrt} y valores PET para POI 2 (Acera Sur) en las 3 hipótesis consideradas para valorar la influencia de la irradiancia y la temperatura del aire.

Sobre los valores de T_{mrt} en el punto considerado de la acera Sur (POI 2), a igualdad de temperatura del aire, y aunque el punto esté en una situación de sombra, la irradiancia difusa produce un aumento de aproximadamente 5°C entre las 12:00 y 18:00. Por otra parte, en una situación de igual irradiancia la disminución de la temperatura del aire produce una disminución en la T_{mrt} de aproximadamente 15°C en horas con exposición solar.

En lo que respecta a los valores PET, cuando la temperatura del aire es elevada y en horas de sombra, el aumento de irradiancia conlleva un aumento de los mismos de entre 2°C - 3°C . El aumento pasa a ser de 7°C - 8°C a la mañana (11:00) y a la tarde (19:00) debido a la existencia de sombra a esas horas.

Por otro lado, con iguales niveles de irradiancia los índices PET disminuyen aproximadamente 20°C , es decir, un descenso más acusado que el propio descenso de la temperatura del aire.

Por lo tanto, las consideraciones que se pueden extraer son:

- En los días de baja irradiancia (días no despejados), los índices PET son similares a la temperatura del aire, mientras que en las zonas sombreadas, independientemente de los niveles de irradiancia, los índices PET están también principalmente condicionados por la temperatura del aire.
- La exposición solar directa en los días de cielo despejado es la que lleva a alcanzar niveles de “calor” o “mucho calor” siempre que las temperaturas no sean bajas (Figura 3.1 valores PET).
- La radiación difusa tiene influencia en los índices PET de los puntos situados en sombra, aunque con una influencia bastante más reducida que cuando estos puntos están expuestos a la radiación solar directa.

Otros estudios han determinado que la temperatura del aire, según las condiciones climáticas futuras previstas, va a ser el factor dominante en los cambios de Tmrt (Lau KK, Lindberg, Rayner & Thorsson, 2015) ya que además de a sí misma afecta también a la temperatura de los materiales y por lo tanto a los flujos de radiación de onda larga en todas direcciones. Este hecho queda demostrado en la repercusión de la temperatura del aire en la Tmrt durante las horas que no existe una exposición a la radiación solar directa.

Estudios realizados en Bilbao (Lobaccaro & Acero, 2015) han obtenido resultados en los que con temperaturas del aire intermedias a las consideradas en la comparativa de este apartado (23°C-24°C), es una Tmrt elevada (superior a 55°C) la que lleva los valores PET a unos niveles de calor.

Por otra parte, los resultados de este otro estudio también han confirmado que con valores de Tmrt más reducidos ($\leq 45^{\circ}\text{C}$) los valores PET se van aproximando a los valores correspondientes a la temperatura del aire.

3.2.2 Influencia de la velocidad del viento y la humedad relativa

Según los modelados realizados, la diferencia de humedad relativa influye de manera muy reducida en los índices PET, por lo que se opta por no representar dicha variación de manera gráfica (la humedad relativa no influye en la Tmrt).

Por ejemplo, tomando como referencia las condiciones meteorológicas correspondientes al 21 de junio de 2017 (A), y comparándolas con una circunstancia en la que la humedad relativa se contempla duplicada respecto a los valores de dicho día (entre las 11:00 y las 20:00 oscila entre 50% y 32%) tanto en los puntos expuestos al sol como en los puntos de sombra, el incremento de los valores PET oscila entre 0,2 y 1°C.

Para valorar la influencia de la velocidad del viento en el confort térmico se representa gráficamente la comparación de los resultados obtenidos de los

modelados por una parte a partir de los datos meteorológicos correspondientes al día 21 de junio de 2017 (A), y por otro introduciendo los mismos datos pero reduciendo al mínimo la velocidad del viento (el SOLWEIG permite dicha reducción hasta 1 m/s).

Atendiendo a los resultados, en lo que respecta a los índices PET, los resultados se representan en la Figura 3.3.

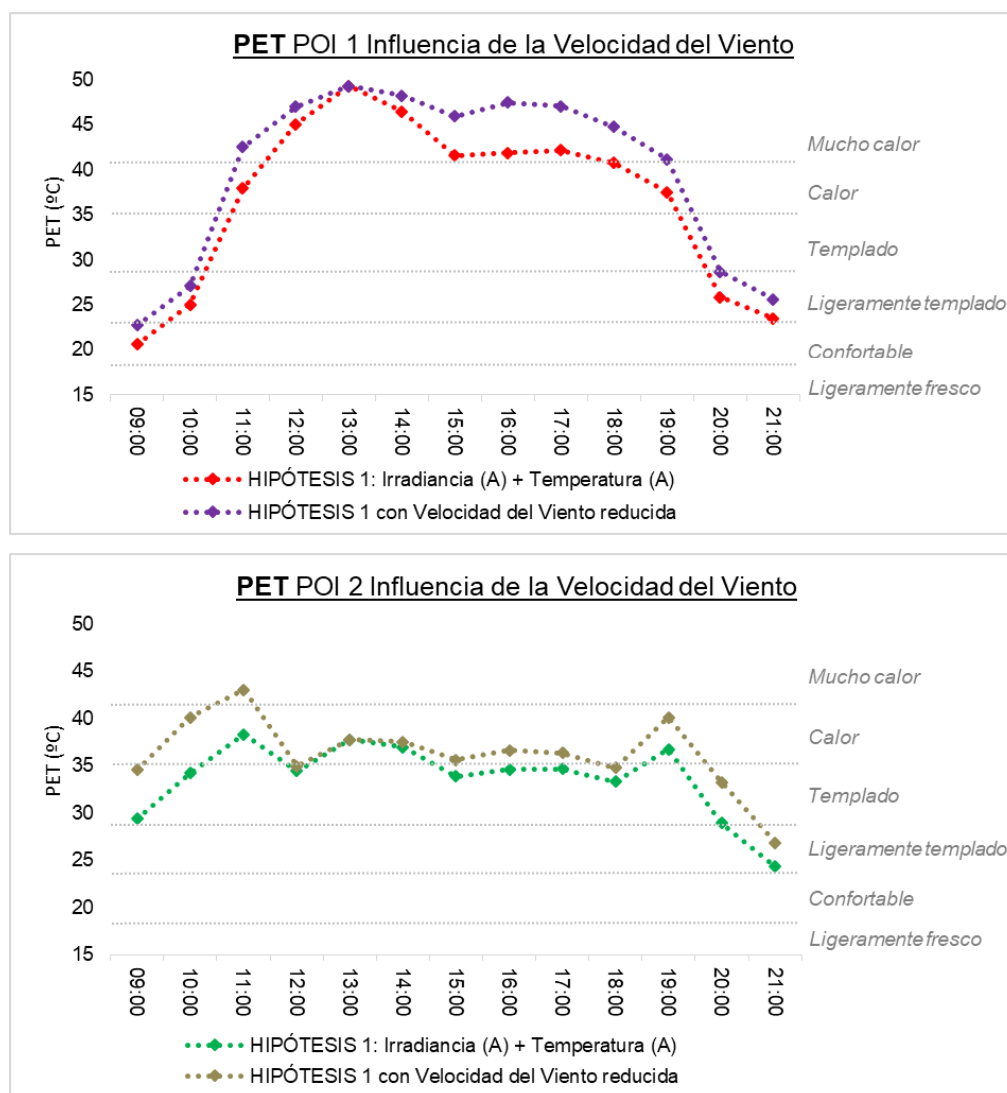


Figura 3.3 Resultados de valores PET en POI 1 (Acera Norte) y POI 2 (Acera Sur) para valorar la influencia de la velocidad del viento.

En el punto considerado de la acera Norte (POI 1) durante las horas con mayor exposición solar (11:00-18:00) los valores PET se reducen entre 5°C y 6°C para aumentos de la velocidad del viento de entre 3 y 4 m/s (exceptuando a las 13:00 donde la velocidad del viento era de 1 m/s el 21 de junio de 2017). En horas de menor irradiancia (10:00 y 20:00), la reducción de PET es de aproximadamente 2°C-3°C para un aumento de entre 4 y 5 m/s en la velocidad del viento.

Otro estudio realizado en Bilbao (Lobaccaro & Acero, 2015) ha obtenido resultados similares con reducciones de los índices PET de 5°C y 6°C derivados del aumento de la velocidad del viento de 3 m/s en circunstancias donde la T_{mrt} ofrecía valores elevados de entre 55°C y 65°C.

En el mismo estudio también se hace referencia a que los valores de velocidad del viento están muy influenciados por la disposición de las edificaciones, tanto por su orientación como por la altura de las mismas.

En la acera Sur (POI 2) durante las horas con exposición solar directa (10:00 y 19:00) los valores PET se reducen entre 4°C y 3°C con aumentos de la velocidad del viento de 4 y 3 m/s respectivamente. En las horas sin exposición solar directa (12:00-18:00) la reducción de PET es de entre 2°C y 3°C aproximadamente para aumentos de la velocidad del viento de entre 3 y 4 m/s respectivamente.

En términos generales, el aumento de la velocidad del viento tiene una influencia muy reducida en la T_{mrt} , pero sí tiene repercusión en los índices PET. Dicha reducción es más significativa en puntos con exposición solar directa.

3.3 Influencia de la geometría y orientación de la calle

3.3.1 Porcentajes de área sombreada en la calle

En las siguientes Figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se representan gráficamente los porcentajes de superficie de pavimento de calles sombreados por las

edificaciones en función de la orientación de las mismas (representadas en la Tabla 3.1) y sus características geométricas (valores AR). Indicar que los porcentajes se han calculado respecto a la superficie total de las calles.

Para el cálculo de los porcentajes de superficie sombreada, se toman en consideración los meses entre abril y agosto a las horas dentro del intervalo con mayor radiación solar (11:00, 14:00 y 17:00 horario UTC+2), y los valores de AR más representativos en las tramas urbanas (0,50 - 1,00 - 1,50) para las distintas orientaciones contempladas.

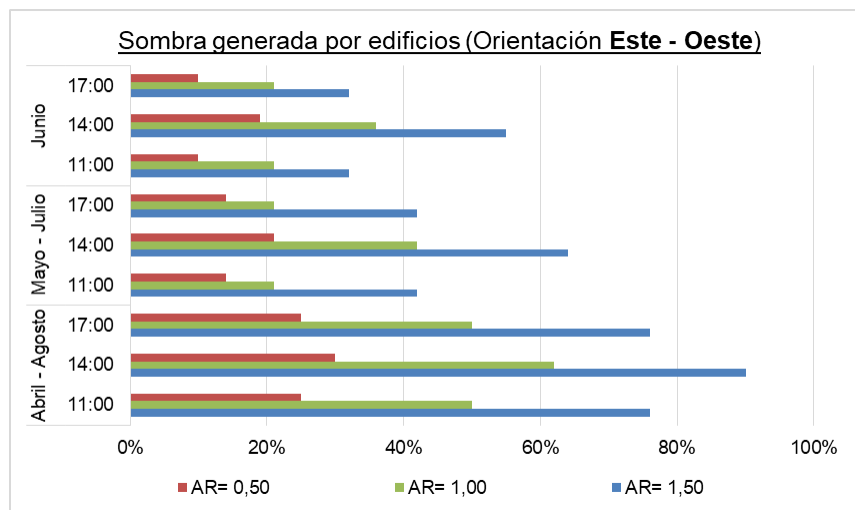


Figura 3.4 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Este-Oeste para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.

En la orientación Este-Oeste, los edificios generan un mayor porcentaje de sombra a las 14:00. Cuando AR= 1,00, dichos porcentajes oscilan entre el 35% de junio y el 65 % de agosto, mientras que a las 11:00 y a las 17:00 los valores oscilan entre el 20% de junio y el 50% de agosto.

Por otra parte, el aumento de AR conlleva un aumento casi proporcional de los porcentajes de superficie de calle sombreada prácticamente a todas horas durante los distintos meses.

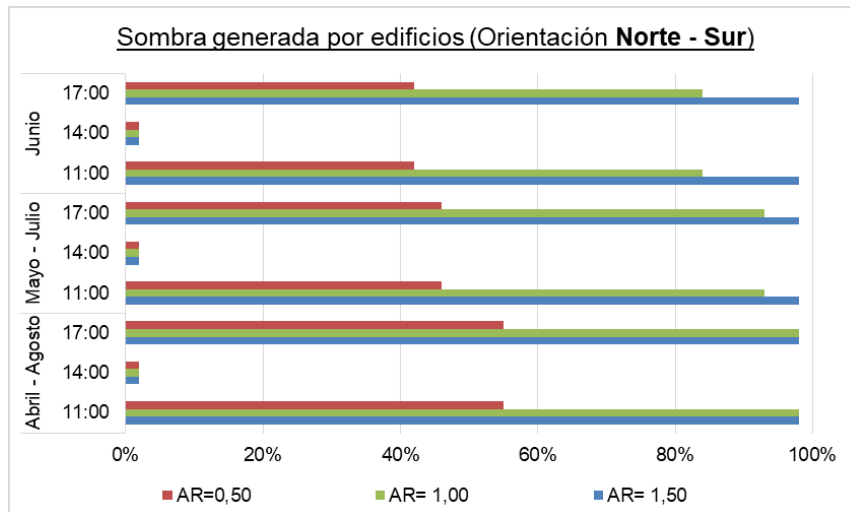


Figura 3.5 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Norte - Sur para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.

En la orientación Norte-Sur los porcentajes de sombra son muy elevados a las 11:00 y a las 17:00 (con AR=1,00 entre el 85% de junio y el 100% de agosto). Por su parte, en todos los meses y para todos los AR considerados, el porcentaje de sombreado es muy reducido a las 14:00. En esta orientación Norte-Sur las diferencias entre porcentajes para AR=0,50 y AR=1,00 son bastante más significativas que entre las que se obtienen para valores AR entre 1,00 y 1,50.

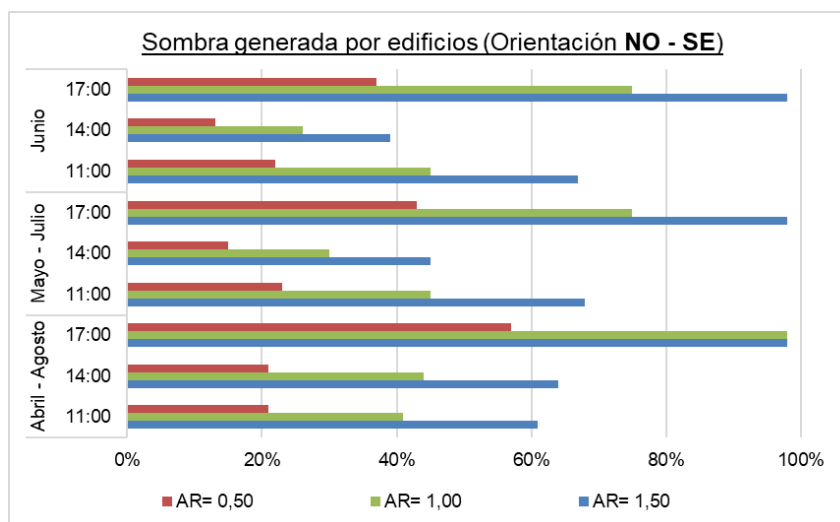


Figura 3.6 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Noroeste-Sureste (NO-SE) para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.

En la orientación Noroeste-Sureste, los porcentajes de sombra son superiores en general a las 17:00 (con AR=1,00 entre el 75% de junio y el 100% de agosto). Los porcentajes son también reducidos a las 14:00 (con AR=1,00 entre 25% de junio y el 45 % de agosto) e intermedios a las 11:00 (aunque más cercanos a los de las 14:00), resultando ser bastante similares para todos los meses considerados.

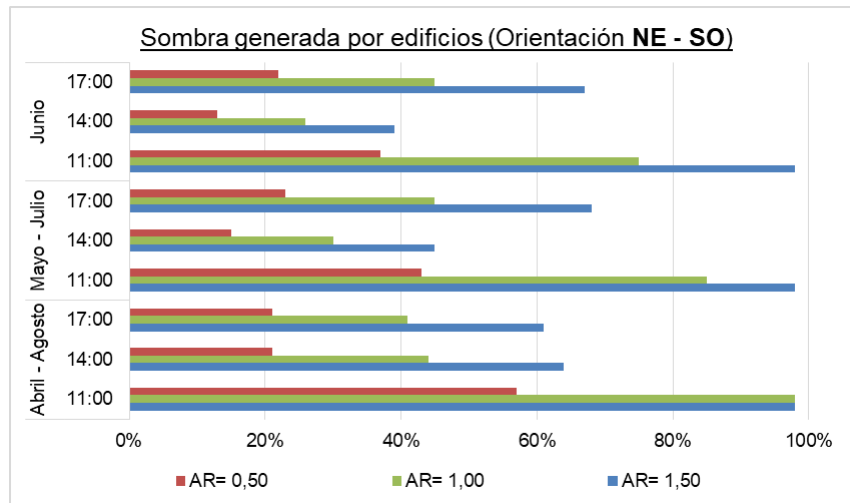


Figura 3.7 Resultados de porcentajes de sombra generados por los edificios en calles de orientación Noreste-Suroeste (NE-SO) para AR 0,50 - AR 1,00 - AR 1,50.

En una orientación Noreste-Suroeste de la calle, los porcentajes de sombra son en general muy superiores a las 11:00, resultando ser con AR=1,00 entre el 75% de junio y el 100% de agosto. Los porcentajes son reducidos a las 14:00 (con AR=1,00 entre el 25% de junio y el 45 % de agosto). Los porcentajes son intermedios a las 17:00 (aunque más cercanos a los de las 14:00), y muy similares para todos los meses considerados.

En esta orientación también el aumento de AR conlleva un aumento casi proporcional de los porcentajes de superficie de calle sombreada prácticamente a todas horas durante los distintos meses.

Por consiguiente, las consideraciones que se pueden extraer respecto a las orientaciones de las calles y la influencia del AR en las mismas son:

- La orientación de calle Este-Oeste es en la que las edificaciones generan un menor porcentaje de superficie de calle sombreada.
- La orientación Norte-Sur genera muy poco porcentaje de sombra en la hora central del día (14:00), aunque para un $AR=1,00$ a la mañana y a la tarde se generan grandes porcentajes de superficies sombreadas.
- Las orientaciones Noroeste-Sureste y Noreste-Suroeste presentan superficies sombreadas intermedias, aunque con valores muy variables en área sombreada y bastante superiores en general a la orientación Este-Oeste.
- En el caso de $AR=0,50$, los porcentajes de superficie de calle sombreada son reducidos (inferiores al 50% prácticamente en todos los meses y a todas horas) para todas las orientaciones consideradas.

Otro estudio realizado para distintas orientaciones de las calles (Ali-Toudert & Mayer, 2006) ha concluido que las calles $AR= 0,50$ sufren un alto estrés por calor independientemente de las orientaciones de las mismas. Asimismo, para una orientación Este-Oeste y en su lado Norte, el estrés por calor se da en amplios intervalos de tiempo incluso para valores AR superiores debido a las limitaciones de sombra generada por los edificios. En orientaciones Norte-Sur los valores máximos de PET para $AR \geq 1$ se da en reducidos intervalos de tiempo, mientras que las orientaciones Noroeste-Sureste y Noreste-Suroeste, para los mismos valores AR , proporcionan condiciones de sombra bastante apropiadas.

También ha sido concluido previamente que las condiciones de atenuación de estrés por calor dependen principalmente del Partial Shaded Area (PSA) (Shashua-Bar & Hoffman, 2003), el cual a su vez depende de la orientación de las calles y la altura de los edificios. En este y otros estudios (Nasrollahi, Namazi & Taleghani, 2021) también se hace mención a las diferencias entre los intervalos

horarios con situaciones de estrés por calor para las orientaciones Este-Oeste y Norte-Sur, tal como se menciona en el párrafo anterior.

No obstante, cabe indicar que los porcentajes calculados en este apartado son respecto a la totalidad de la superficie de la calle, sin diferenciarse zonas peatonales o rodadas. Asimismo, en estas gráficas no se distingue si las zonas sombreadas son a uno u otro lado de las calles.

Por consiguiente, se considera necesario analizar las circunstancias de confort térmico considerando puntos situados en cada uno de los lados de la calle (aceras) para cada orientación.

En los siguientes apartados se presenta un análisis de los niveles de confort térmico (T_{mrt} y PET) en dichos puntos considerados peatonales para las distintas orientaciones. El objetivo de este análisis es valorar las franjas horarias en las que cada punto considerado presenta unas condiciones de estrés por calor.

3.3.2 Orientaciones E-O (Este-Oeste) y N-S (Norte-Sur)

Las geometrías de calle consideradas en este apartado se corresponden con los dominios descritos en el apartado 3.1 (calles de 20 m. de anchura y edificios de 20 m. de altura), y la posición de los POI se encuentran igualmente a 3 m. de las fachadas, es decir, en una zona que en condiciones normales sería peatonal. Se analizan las orientaciones Este-Oeste (E-O) y Norte-Sur (N-S).

Para los modelados se utilizan condiciones meteorológicas desfavorables en cuanto a estrés térmico por calor, introduciéndose los datos correspondientes al día 21 de junio de 2017 (A).

En la Figura 3.8 se representan gráficamente los valores de T_{mrt} y PET obtenidos en la franja horaria entre las 09:00 y 21:00 para los dos puntos considerados en la calle de orientación Este- Oeste (acera Norte y acera Sur).

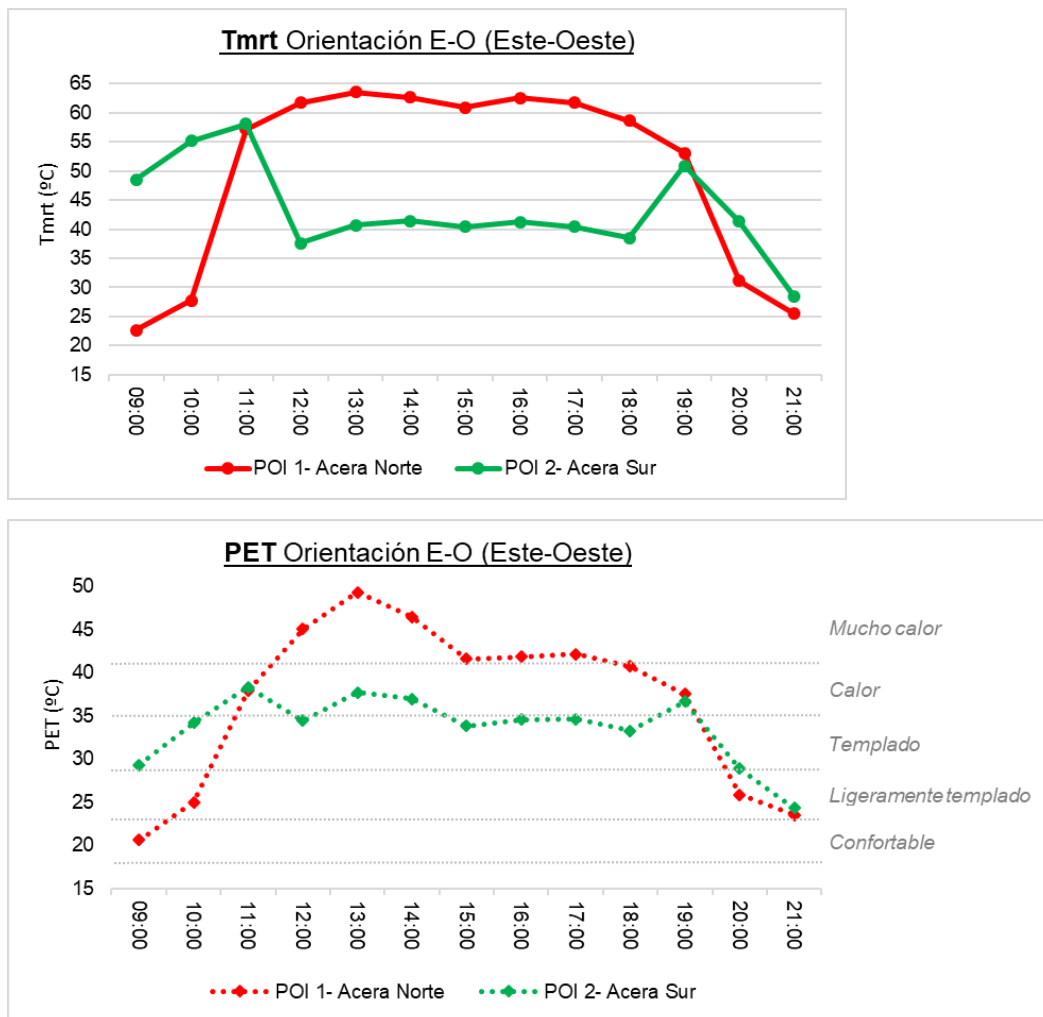


Figura 3.8 Resultados de valores Tmrt y PET en POI 1- Acera Norte y POI 2- Acera Sur en calle de orientación Este-Oeste (E-O). Anchura de calle 20 m. y AR 1.

En la acera Norte, los valores de Tmrt son superiores a 50°C entre las 11:00 y las 19:00, resultando los valores máximos (>60°C) entre las 12:00 y las 17:00. En consecuencia, los valores PET llegan a niveles de “calor” (>35 °C) entre las 11:00-19:00, con niveles de “mucho calor” (>42°C) entre las 12:00 y las 17:00. El valor máximo de PET (49°C) se da a las 13:00, que es cuando la velocidad del viento es más baja (1 m/s).

En la acera Sur los valores de Tmrt superan los 50°C a las 11:00 y a las 19:00, es decir, cuando los niveles de radiación son significativos y los edificios no generan sombra en los mismos. No obstante, en el intervalo 12:00-18:00 los valores de Tmrt son cercanos a 40°C. Por lo tanto, los niveles PET son de “calor” (>35 °C) a

las 11:00 y a las 19:00, además de entre las 13:00 y las 14:00, aunque en estos últimos casos debido a la elevada temperatura del aire y baja velocidad del viento.

Por consiguiente, las necesidades de sombreado mediante arbolado parecen necesarias en la acera Norte entre las 11:00 y las 19:00, aunque sobre todo entre las 12:00 y las 17:00. En la acera Sur no parece ser necesario el sombreado mediante arbolado en las horas centrales, ya que los valores PET están influenciados principalmente por la temperatura del aire.

En la Figura 3.9 se representan gráficamente los valores de Tmrt y PET obtenidos para la franja horaria entre las 09:00 y 21:00 en los dos puntos considerados en la calle de orientación Norte-Sur (acera Oeste y acera Este).

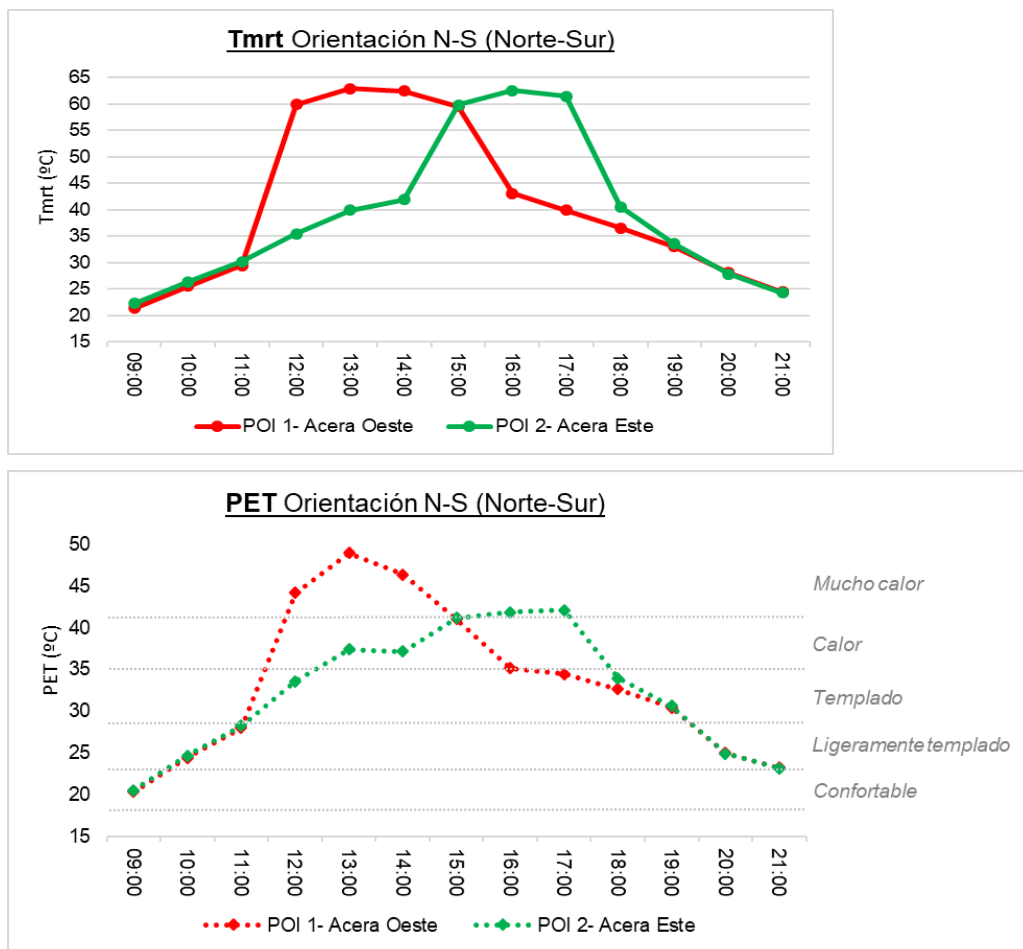


Figura 3.9 Resultados de valores Tmrt y PET en POI 1- Acera Oeste y POI 2- Acera Este en calle de orientación Norte-Sur (N-S). Anchura de calle 20 m. y AR 1.

En la acera Oeste los valores de Tmrt son superiores a los 60°C entre las 12:00 y las 15:00, siendo los valores inferiores a 45°C en el resto de horas del día. Por lo tanto, los valores PET arrojan niveles de “mucho calor” (>42°C) entre 12:00-15:00. Los niveles son asimismo cercanos a “calor” a las 16:00 y 17:00, debido principalmente a la alta temperatura del aire. En la acera Este los valores de Tmrt superiores a 60°C se dan entre las 15:00 y las 17:00, resultando los valores inferiores a 45°C en el resto de horas del día. En consecuencia, los valores PET ofrecen niveles de “mucho calor” (>42°C) entre 15:00-17:00, y niveles de “calor” (>35 °C) a las 13:00 y a las 14:00 debido igualmente a la alta temperatura del aire.

En este caso el sombreado mediante arbolado en la acera Oeste es necesario entre las 12:00 y las 15:00, aunque también resultaría procedente entre las 16:00 y las 17:00. En la acera Este, la necesidad queda establecida entre las 13:00 y las 17:00.

Otros estudios realizados para ciudades europeas, como el que se representa en la Figura 3.10 (Lau KK, Lindberg, Rayner & Thorsson, 2015) también han demostrado que los máximos valores de Tmrt en calles de orientación Norte-Sur se dan al mediodía en un intervalo horario más reducido y determinado por la altura de las edificaciones.

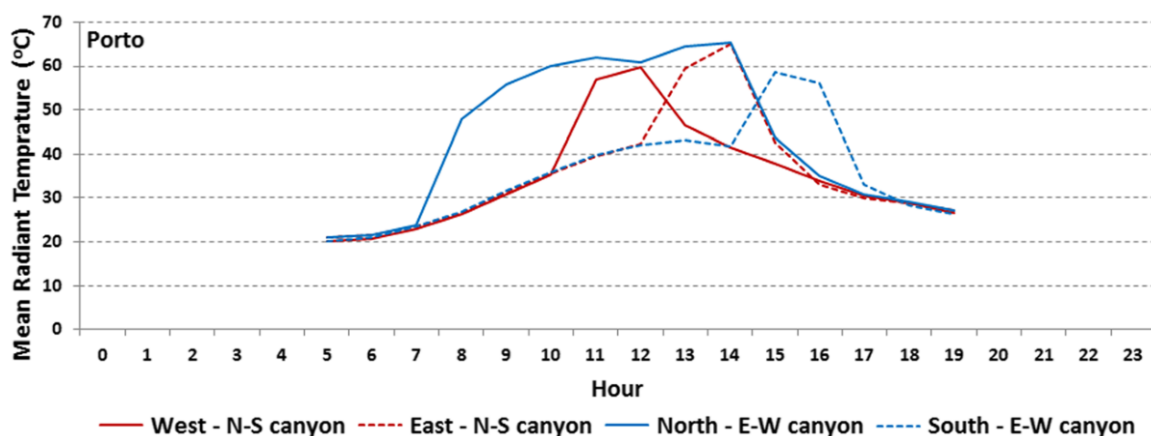


Figura 3.10 Resultados de valores Tmrt y PET en calles de orientación Norte-Sur (en aceras Oeste y Este) y orientación Este-Oeste (aceras Norte y Sur) de un día de verano despejado en Oporto, Portugal. Horario solar UTC. (Lau KK, Lindberg, Rayner & Thorsson, 2015).

En cambio, en ese mismo estudio (Lau KK, Lindberg, Rayner & Thorsson, 2015) en calles de orientación Este-Oeste los valores elevados de Tmrt se dan en la acera Norte en un intervalo horario más amplio, siendo la diferencia de Tmrt respecto a la acera Sur de aproximadamente 20°C.

En ese estudio los valores máximos de Tmrt en calles de orientación Norte-Sur y Este-Oeste no presentan grandes diferencias, aunque los momentos del día e intervalos horarios en los que se producen los valores máximos son distintos para cada calle y acera.

También se ha demostrado en otros estudios mediante comparativas realizadas entre calles de orientación Este-Oeste y Norte- Sur (Shashua-Bar & Hoffman, 2003), que la plantación de arbolado puede disminuir la repercusión de la orientación de la calle y la geometría urbana, mejorando las condiciones de confort, siempre en función del área parcial sombreada (PSA).

3.3.3 Orientaciones NO-SE (Noroeste-Sureste) y NE-SO (Noreste-Suroeste)

Las geometrías de calle consideradas en este apartado son las descritas en el apartado 3.1 y los puntos analizados (POI) se sitúan a 3 m. de las fachadas. Se utilizan condiciones meteorológicas del día 21 de junio de 2017 (A) y son analizadas las orientaciones Noroeste-Sureste (NO-SE) y Noreste-Suroeste (NE-SO).

En la Figura 3.11 quedan representados los valores de Tmrt y PET obtenidos para la franja horaria entre las 09:00 y 21:00 en los dos puntos considerados en la calle de orientación Noroeste-Sureste (acera Noreste y acera Suroeste).

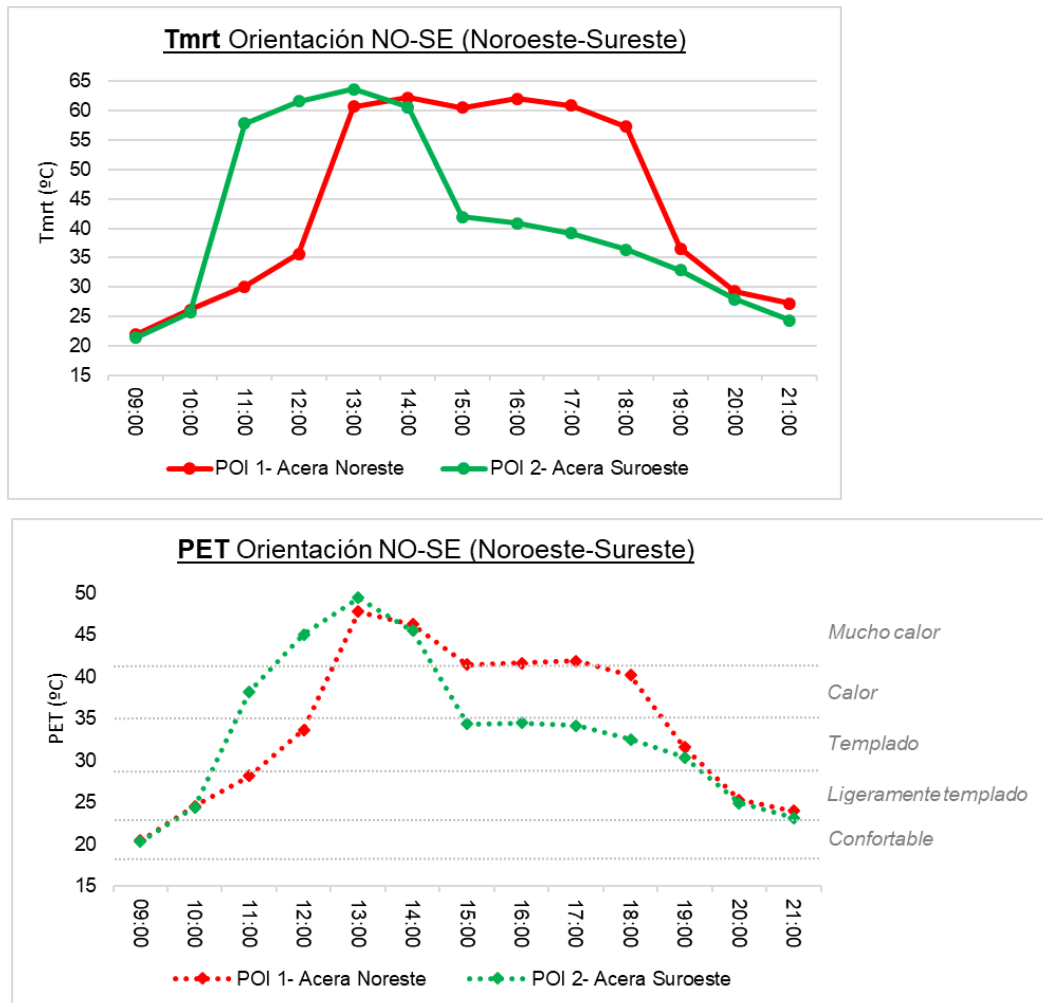


Figura 3.11 Resultados de valores Tmrt y PET en POI 1- Acera Noreste y POI 2- Acera Suroeste en calle de orientación Noroeste-Sureste (NO-SE). Anchura de calle 20 m. y AR 1.

En la acera Noreste los valores de Tmrt son superiores a 55°C entre las 13:00 y las 18:00, resultando inferiores a 40°C en el resto de horas del día. Los valores PET ofrecen nivel de “mucho calor” (>42°C) a las 13:00 y a las 14:00, mientras que son de “calor” entre las 15:00 y las 18:00.

En la acera Suroeste los valores de Tmrt son superiores a 55°C entre las 11:00 y las 14:00, siendo inferiores a 45°C en el resto de horas del día. Los valores PET son de “mucho calor” (>42°C) entre las 12:00 y las 14:00, y de “calor” (>35°C) a las 11:00. Los niveles son cercanos a “calor” entre las 15:00 y las 17:00, debido principalmente a las altas temperaturas del aire a esas horas.

Las necesidades de sombreado mediante arbolado en la acera Noreste se sitúan entre las 13:00 y las 18:00, pero sobre todo a las 13:00 y las 14:00. En la acera Suroeste la necesidad se sitúa principalmente entre las 11:00 y las 14:00, aunque también entre las 15:00 y las 17:00.

En la Figura 3.12 se representan los valores de Tmrt y PET obtenidos para la franja horaria entre las 09:00 y 21:00 en los dos puntos considerados en la calle de orientación Noreste-Suroeste (acera Noroeste y acera Sureste).

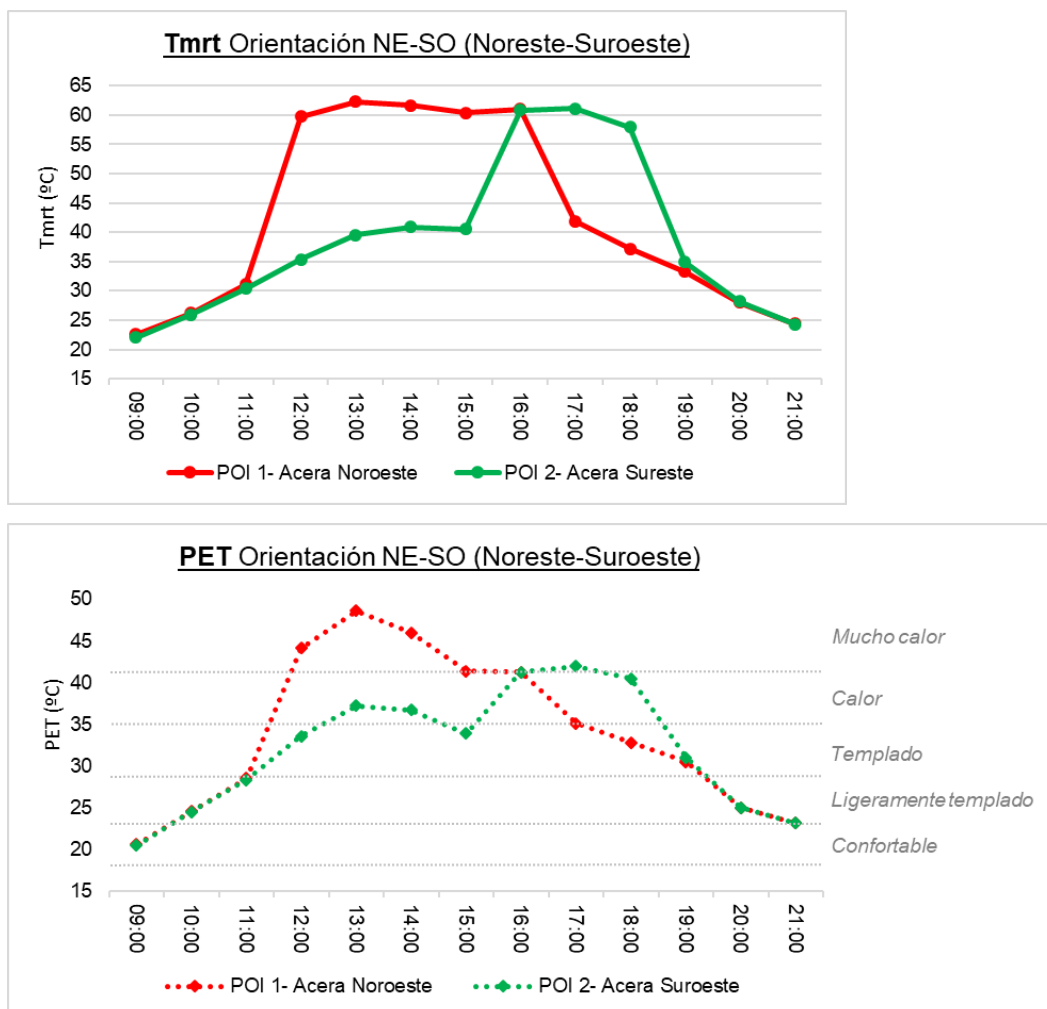


Figura 3.12 Resultados de valores Tmrt y PET en POI 1- Acera Noroeste y POI 2- Acera Sureste en calle de orientación Noreste-Suroeste (NE-SO). Anchura de calle 20 m. y AR 1.

En la acera Noroeste los valores de Tmrt son superiores a 60°C entre las 12:00 y las 16:00, resultando ser inferiores a 45°C en el resto de horas consideradas. Los

valores PET son de “mucho calor” ($>42^{\circ}\text{C}$) entre las 12:00 y las 16:00, y de “calor” a las 17:00.

En la acera Sureste los valores de T_{mrt} son superiores a 55°C entre las 16:00 y las 18:00, mientras que son inferiores a 45°C en el resto de horas. Los niveles PET son de “mucho calor” ($>42^{\circ}\text{C}$) a las 17:00, y de “calor” ($>35^{\circ}\text{C}$) entre 16:00 y a las 18:00, aunque también a las 13:00 y las 14:00 sobre todo debido a la alta temperatura y baja velocidad del aire.

Las necesidades de sombreado en la acera Noroeste se sitúan entre las 12:00 y las 17:00, pero sobre todo entre las 12:00 y las 14:00. En la acera Sureste la necesidad se localiza entre las 13:00 y las 18:00, sobre todo entre las 16:00 y las 18:00.

En otros estudios también se ha demostrado (Qaid & Ossen, 2015) que en las calles para orientaciones Noreste-Suroeste los valores de T_{mrt} elevado se trasladan hacia un intervalo horario más hacia la mañana en la acera Noroeste, y más hacia la tarde en la acera Sureste, aunque siempre en función del AR de la calle.

3.4 Influencia de los pavimentos

En este apartado se pretende valorar la influencia en el confort térmico de los pavimentos en función de sus principales parámetros térmicos como son el albedo y la emisividad.

Sin embargo, cabe señalar que el modelo SOLWEIG, aunque en el mismo se introducen los valores de albedo y emisividad de los pavimentos, tiene limitaciones a la hora de establecer la temperatura superficial de los mismos, por lo que el modelo no presenta la exactitud necesaria para investigar los efectos en la T_{mrt} resultante de la modificación de los parámetros emisividad de los pavimentos.

El modelo SOLWEIG distingue los siguientes tipos de radiación en sentido ascendente para calcular la T_{mrt} , es decir, radiación proveniente de los pavimentos:

- K_{up} : radiación ascendente de onda corta correspondiente a la radiación reflejada por el pavimento en función de su valor de albedo.
- L_{up} : radiación ascendente de onda larga en función de los valores de emisividad del material y la temperatura de la superficie.

En el caso de un material en equilibrio radiativo (considerándose éste como el momento expuesto a radiación solar directa que es cuando se da un intercambio de energía interior-exterior), el distinto valor de emisividad no genera diferencia en la onda larga emitida, ya que los materiales con baja emisividad generan una temperatura superficial correspondiente más alta (siendo el metal el ejemplo más claro) para irradiar el calor acumulado, considerando una misma cantidad de onda corta absorbida.

Esto significa que en horas diurnas con existencia de radiación solar directa, en teoría un distinto valor de emisividad del material de pavimento no tiene una repercusión relevante en la T_{mrt} . Adicionalmente, conviene recordar que los materiales utilizados en la pavimentación de espacios exteriores presentan unos valores de emisividad de limitada variabilidad, la cual oscila entre aproximadamente 0,7 y 0,95.

Sin embargo, el modelo SOLWEIG sí modifica la radiación ascendente de onda corta (K_{up}) correspondiente a la radiación reflejada por el pavimento en función de su valor de albedo. Por lo tanto, se considera que se puede realizar una valoración de la influencia del albedo en la T_{mrt} para una emisividad del material constante y en la franja horaria donde existe radiación solar.

3.4.1 Influencia del albedo

La variación de albedo en el pavimento repercute en el valor K_{up} que establece el SOLWEIG a modo de radiación ascendente de onda corta correspondiente a la reflejada por el pavimento. Para el análisis de la influencia del albedo se utiliza el esquema de calle de orientación Este-Oeste disponiéndose de un punto de estudio expuesto permanentemente a la radiación solar directa (POI 1), y otro bajo la sombra de la edificación en las horas centrales del día. Para los modelados se utilizan las condiciones meteorológicas del día 21 de junio de 2017 (A), y para el pavimento se establece un valor de emisividad constante de 0,9. Los resultados para T_{mrt} y valores PET se representan en las Figuras 3.13 y 3.14.

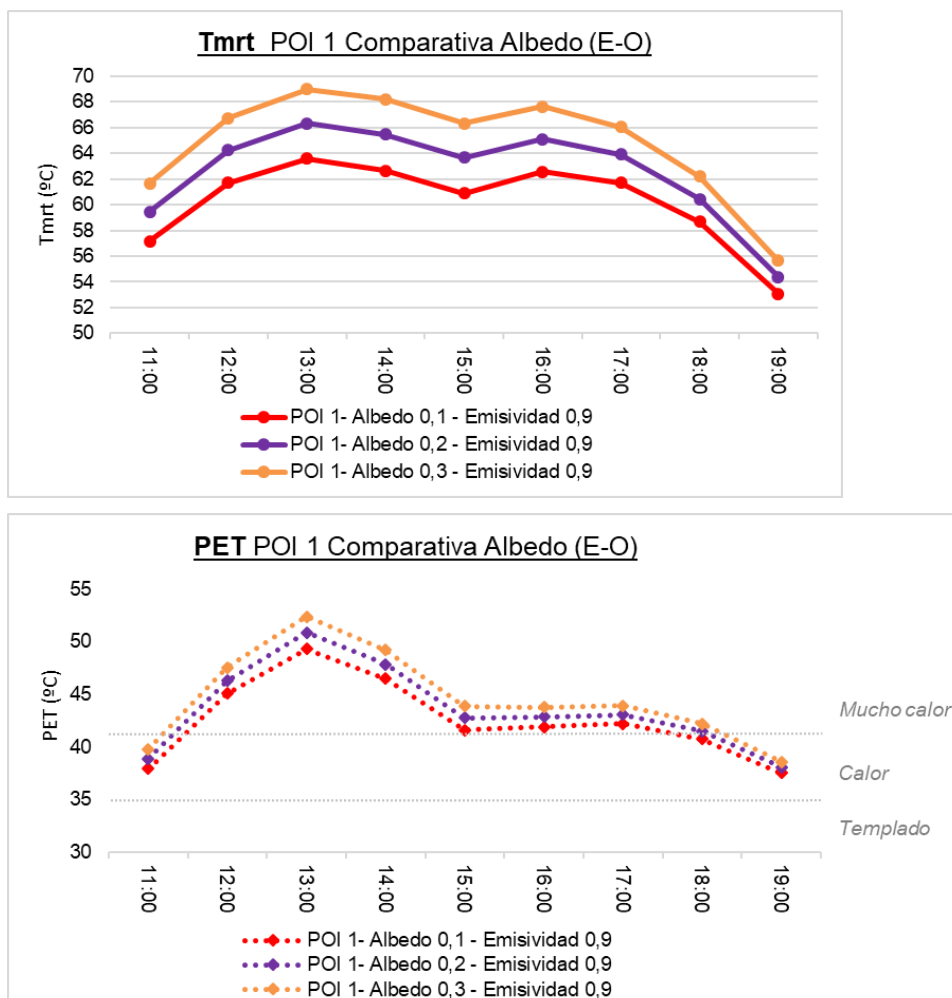


Figura 3.13 Representación de los resultados de T_{mrt} y valores PET para POI 1 (Acera Norte) para Albedo 0,1 - 0,2 - 0,3.

En la acera Norte (POI 1), entre las 12:00 y las 17:00 los valores de Tmrt se incrementan aproximadamente 3°C por cada décima que sube el valor de albedo. A las 18:00 y sobre todo a las 19:00 dado que disminuye la radiación solar directa, la Tmrt aumenta entre 1,5 y 2°C por cada décima que sube el valor de albedo. Entre las 12:00 y las 17:00 los valores de PET aumentan aproximadamente entre 1°C y 2°C por cada décima que sube el valor de Albedo. A las 18:00 y 19:00 dado que disminuye la radiación solar directa, el aumento de los valores PET es más reducido, incluso inferior a 1°C.

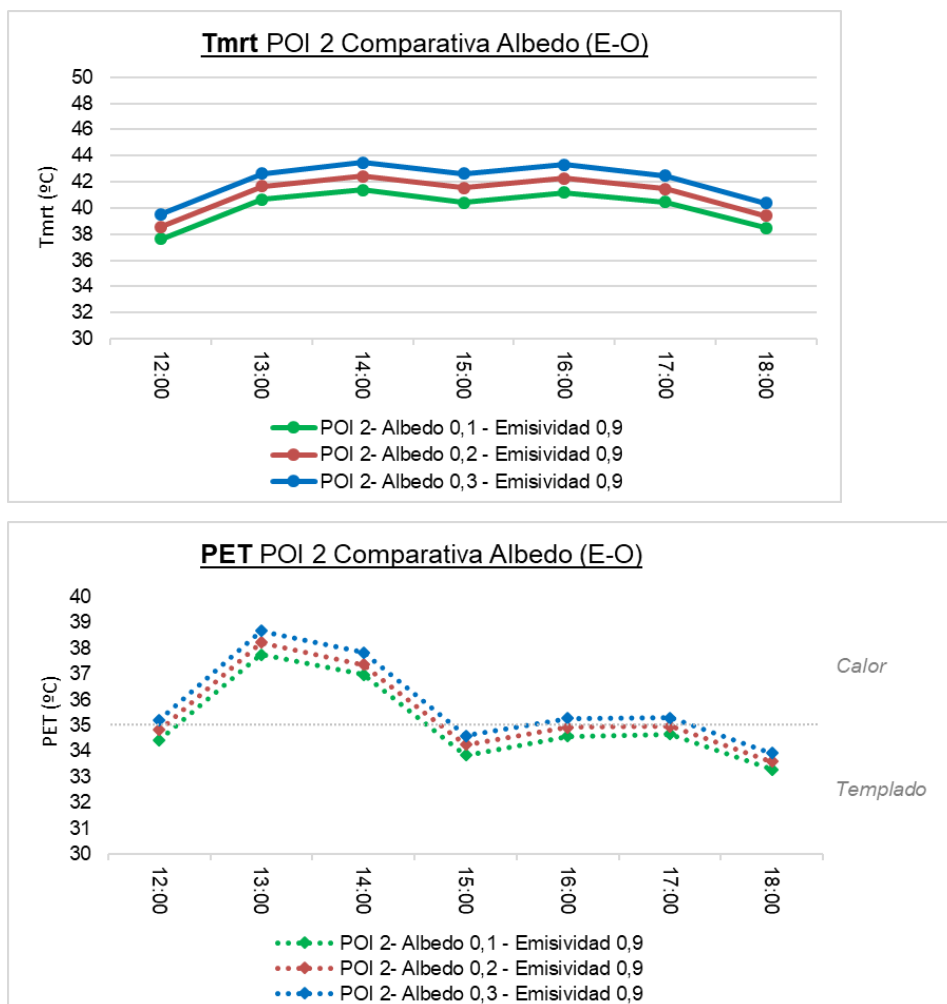


Figura 3.14 Representación de los resultados de Tmrt y valores PET para POI 2 (Acera Sur) para Albedo 0,1 - 0,2 - 0,3.

En la acera Sur (POI 2) entre las 12:00 y las 18:00 los valores de Tmrt se incrementan menos de 1°C por cada décima que sube el valor de Albedo. El

incremento de la T_{mrt} es prácticamente constante en la franja horaria considerada (12:00-18:00) por cada décima que sube el valor de albedo. Entre las 12:00 y las 18:00 los valores PET se incrementan alrededor de $0,5^{\circ}\text{C}$ por cada décima que sube el valor de albedo.

Por consiguiente, respecto al albedo, las consideraciones son las siguientes:

- En puntos con mayor exposición solar directa, el incremento de T_{mrt} por incremento de albedo también es mayor. En los modelados realizados, en momentos de exposición solar, por cada 2 décimas que sube el albedo, la T_{mrt} puede llegar a subir entre 4°C y 5°C , aunque todo ello depende asimismo de los niveles de radiación.

Por consiguiente, en zonas expuestas a la radiación solar, el aumento del albedo conlleva un perjuicio en las horas en las que existe una radiación solar directa.

- El albedo también tiene influencia en puntos de sombra debido a la radiación difusa. No obstante, dado que la radiación difusa es más uniforme y de magnitud más reducida, genera un perjuicio en el confort térmico (aumento de T_{mrt} y de PET) también más reducida.

En otros estudios también ha quedado demostrado que el aumento de albedo reduce el confort térmico por calor a nivel de peatón, siendo más acentuado en zonas donde los niveles de irradiancia son superiores (Taleghani & Berardi, 2018). Concretamente en este estudio realizado en Toronto, el aumento de albedo en el pavimento desde 0,1 a 0,3 producía un incremento en los valores PET de 3°C - 4°C en zonas expuestas al sol en las horas centrales del día.

3.4.2 Influencia de la emisividad

Con fecha 3 de agosto de 2018 se realizó una campaña de medición de las temperaturas superficiales de los pavimentos en la c/ Gran Vía y la c/ Dr. Areilza

de Bilbao (extracto de las mediciones representadas en las Figuras 3.15 y 3.16), tal como se describe en el apartado 4.4.2.

Dicha campaña de medición se llevó a cabo con el objetivo de comparar sus resultados con las temperaturas superficiales consideradas por el modelo SOLWEIG (resultados completos representados en el Anexo II), a pesar de las limitaciones que tiene el modelo SOLWEIG a la hora de calcular las temperaturas superficiales de los pavimentos tal como se ha comentado anteriormente.

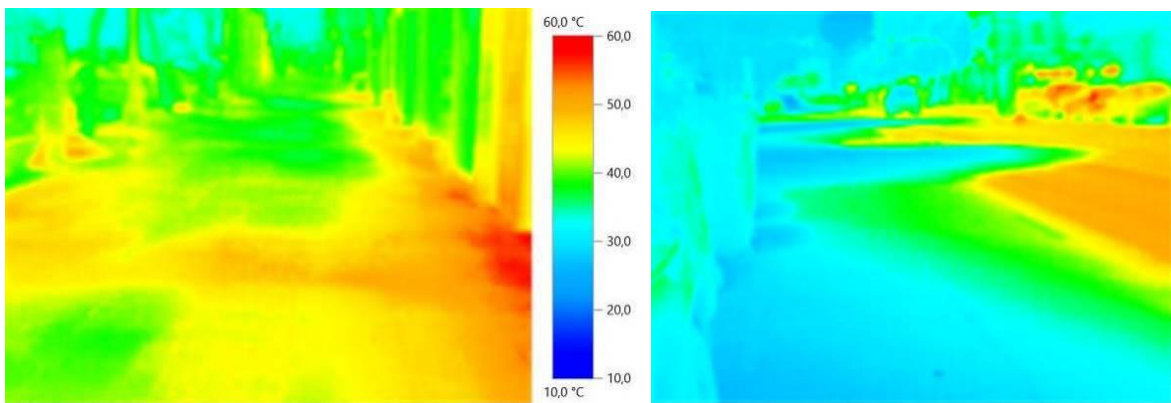


Figura 3.15 Temperaturas superficiales obtenidas mediante cámara termográfica (valores corregidos mediante utilización de termómetro con sonda para medición de temperatura de superficie) para los puntos P1 (acera Norte, imagen de la izquierda) y P2 (vial central, imagen de la derecha) de la c/Gran Vía de Bilbao a las 14:00 del día 3 de agosto de 2018.

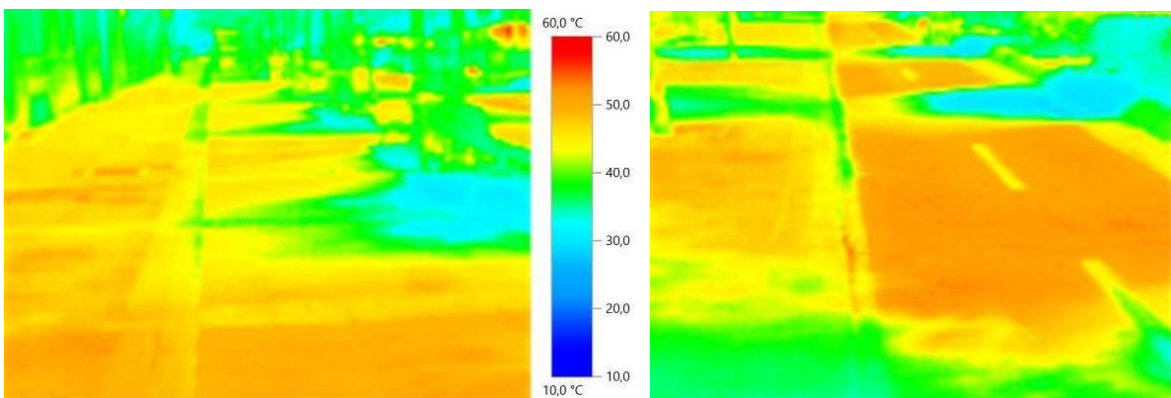


Figura 3.16 Temperaturas superficiales obtenidas mediante cámara termográfica (valores corregidos mediante utilización de termómetro con sonda de temperatura de superficie) para los puntos P4 (acera Oeste, imagen de la izquierda) y P5 (carril-bici en acera Oeste, imagen de la derecha) de la c/Dr. Areilza de Bilbao a las 14:00 del día 3 de agosto de 2018.

Asimismo, en la campaña de medición realizada quedaron de manifiesto las notables diferencias de temperatura superficial para un mismo material (de misma emisividad) cuando está expuesto a la radiación solar directa o cuando está cubierto por la sombra. También son manifiestas las diferencias de temperatura entre dos zonas cubiertas por la sombra en función de si su exposición solar haya sido más reciente.

Por ejemplo, en la figura 3.15 (derecha) se observa que la diferencia de temperatura superficial del asfalto en el vial central entre las zonas expuestas a la radiación solar y las de sombra pueden alcanzar los 25°C, mientras que en las zonas sombreadas en ese momento por los edificios las diferencias pueden alcanzar aproximadamente 10°C siendo superiores para las que han estado expuestas al sol más recientemente.

También se pueden observar diferencias de temperatura similares en la Figura 3.16 (imagen de la izquierda) para el pavimento de baldosa de hormigón para la acera Oeste.

Estas relevantes diferencias de temperatura superficial conllevarán una mayor cantidad de radiación ascendente de onda larga (según Ecuación 2.6), repercutiendo en los valores de T_{mrt} de manera más relevante en los momentos en los que el pavimento no está expuesto a la radiación solar directa (proporcionalmente la afección será mayor debido a la menor cantidad de radiación de onda corta).

Incluso la afección será más significativa en puntos donde previamente haya existido dicha exposición solar directa, debido a que los materiales presentarán una mayor temperatura y por lo tanto emitirán una mayor cantidad de radiación.

3.5 Influencia del sombreado

El objetivo de este apartado es realizar una valoración de la repercusión que puede tener en los valores de Tmrt y PET la sombra generada por el arbolado en función de sus características fisiológicas.

La atenuación de la radiación solar directa proporcionada por el arbolado queda condicionada por la capacidad de su foliación o cobertura vegetal a la hora absorber la radiación.

Dicha capacidad puede ser determinada por distintos índices tal como se ha mencionado anteriormente, aunque en el caso del modelo SOLWEIG el parámetro que se utiliza es el rango de transmisividad, el cual consiste en un valor comprendido entre 0 (el árbol atenúa la totalidad de la radiación) y 1 (el árbol no atenúa cantidad de radiación alguna).

El análisis de la influencia que puede tener la transmisividad de los árboles sobre la Tmrt y los valores PET para las áreas sombreadas se realiza considerando tres hipótesis en función de la existencia a no de arbolado y de la densidad de foliación sus copas. Las hipótesis son las siguientes:

- 1- No existencia de árboles (exposición solar directa).
- 2- Con árboles de transmisividad 0.10 (alta densidad de foliación).
- 3- Con árboles de transmisividad 0.30 (densidad de foliación media).

Para los modelados se utilizan las condiciones meteorológicas correspondientes al día 21 de junio de 2017 (A), y para el pavimento se establece un valor de albedo de 0,1 y una emisividad de 0,9. Asimismo, se utiliza el esquema de calle de orientación Este-Oeste, de manera que exista un punto de estudio expuesto permanentemente a la radiación solar directa (POI 1 en la acera Norte). Los resultados se exponen en la Figura 3.17.

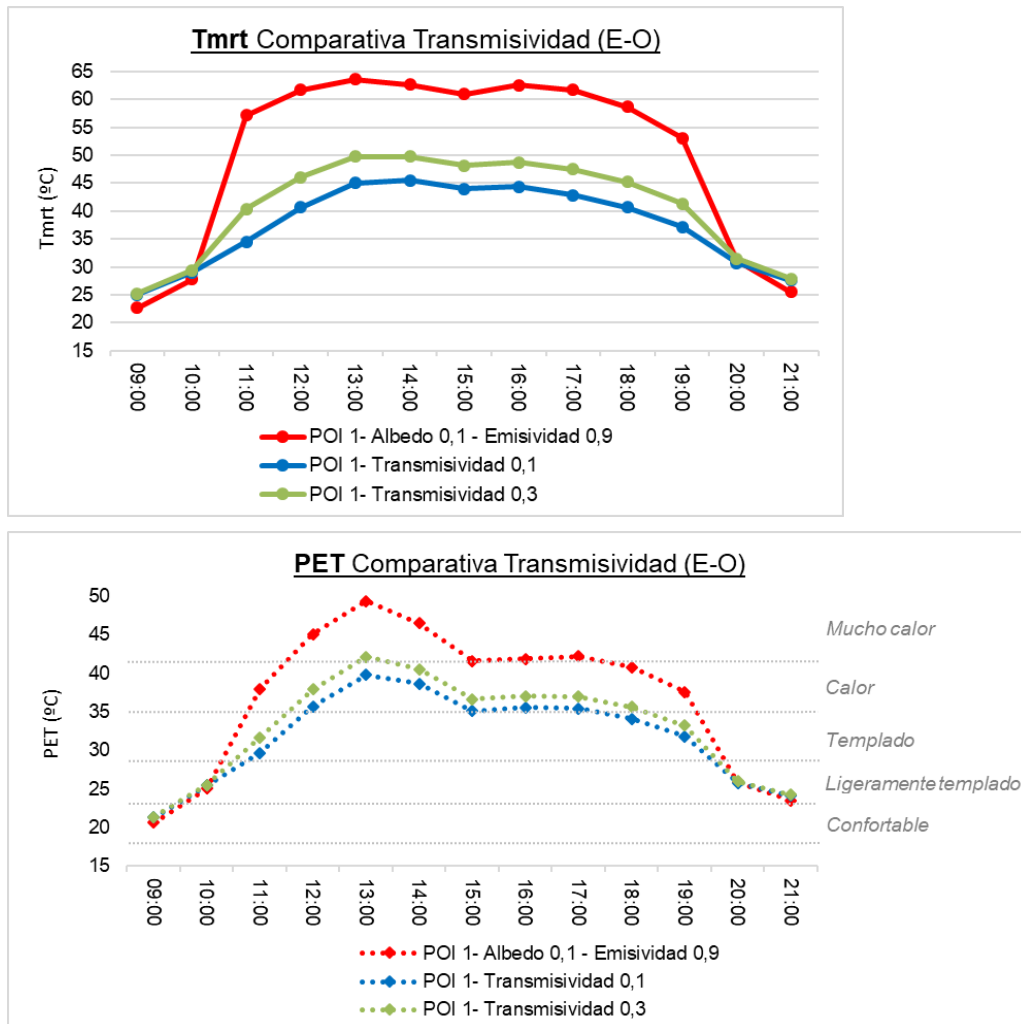


Figura 3.17 Representación de los resultados de Tmrt y valores PET para POI 1 (Acera Norte) para situación sin árboles y con árboles (transmisividad 0,1 - 0,2).

En la acera Norte (POI1) el sombreado mediante arbolado con transmisividad de 0,10 genera una reducción de los valores de Tmrt de entre 20°C-25°C en las horas comprendidas entre las 11:00 y las 17:00. La reducción es de entre 15-20°C a las 18:00 y las 19:00. El sombreado mediante árboles de transmisividad 0,30 genera una reducción de Tmrt de 15°C-20°C en las horas comprendidas entre las 11:00 y las 17:00, siendo la reducción de entre 10°C y 15°C entre las 18:00 y las 19:00.

El sombreado mediante arbolado de transmisividad 0,10 reduce los valores PET entre 5°C y 10°C en las horas comprendidas entre las 11:00 y las 19:00, siendo la reducción mayor cuanto más elevado es el PET. El sombreado mediante arbolado

de transmisividad 0,30 reduce los valores PET entre 5°C y 7°C en las horas comprendidas entre las 11:00 y las 18:00, siendo la reducción inferior a 5°C a las 19:00. En las horas centrales donde la radiación directa es superior, la reducción de T_{mrt} es aproximadamente 4°C superior cuando la transmisividad del arbolado es de 0,10 respecto a una transmisividad de 0,30.

En un repaso realizado a los estudios llevados a cabo en diversas localizaciones del mundo (Kong et al., 2017), se puede observar que en todos los casos la sombra del arbolado genera una reducción de los valores de T_{mrt} y PET, aunque dichas reducciones resultan muy variables según las circunstancias climáticas. El aumento de los valores LAI (luego la reducción de la transmisividad) y una mayor atenuación de la radiación solar por parte del arbolado, conllevan una mayor reducción de los valores de T_{mrt} y PET en todas las localizaciones.

En los estudios realizados en climas subtropicales se ha demostrado una reducción de los valores de T_{mrt} de hasta 26°C (Tan, Lau, & Ng, 2016) y también en el grado de reducción de los valores PET, los cuales pueden llegar a disminuir entre 5°C y 7°C en las horas centrales del día (Morakinyo & Lam, 2016), habiéndose demostrado la repercusión de los árboles con distintos índices LAI.

Otros estudios realizados para climas oceánicos húmedos han cuantificado una reducción de T_{mrt} de 16°C para una atenuación de la radiación solar por parte del arbolado del 80% (transmisividad de 0,2), y de 22°C para una atenuación del 95% (transmisividad 0,05) (Lindberg & Grimmond, 2011).

Por otra parte, analizando la repercusión de la disposición de arbolado a lo largo de todas las horas del día incluyendo las horas nocturnas, se puede comprobar que la disposición del mismo dificulta la disipación del calor como se puede comprobar en las siguientes gráficas, comparando la situación 1 (sin arbolado) y la situación 2 (arbolado de transmisividad 0,1). Los resultados se exponen gráficamente en la Figuras 3.18.

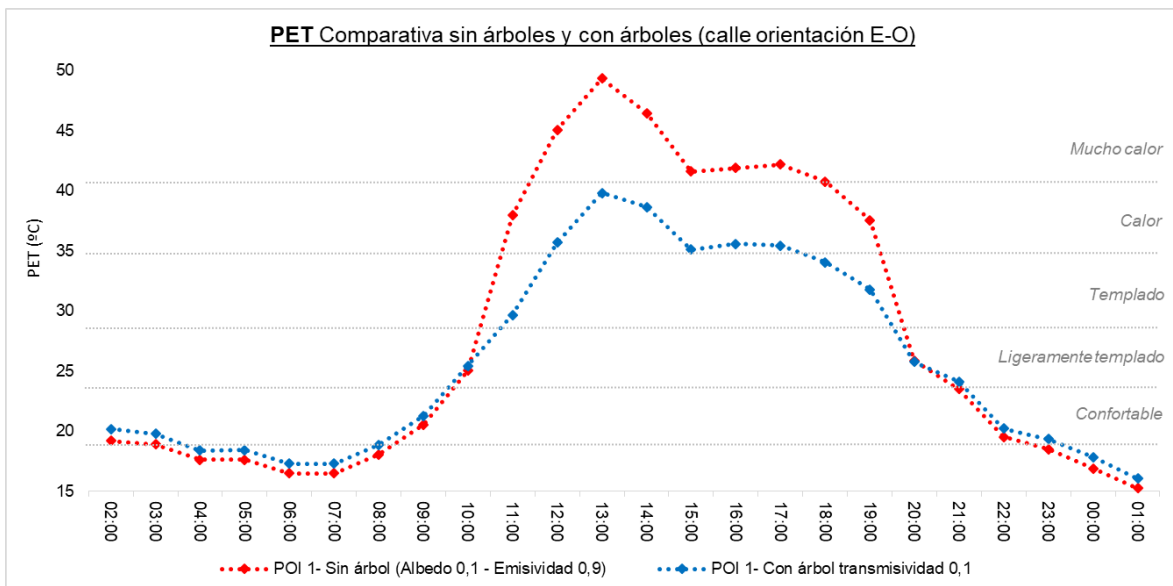
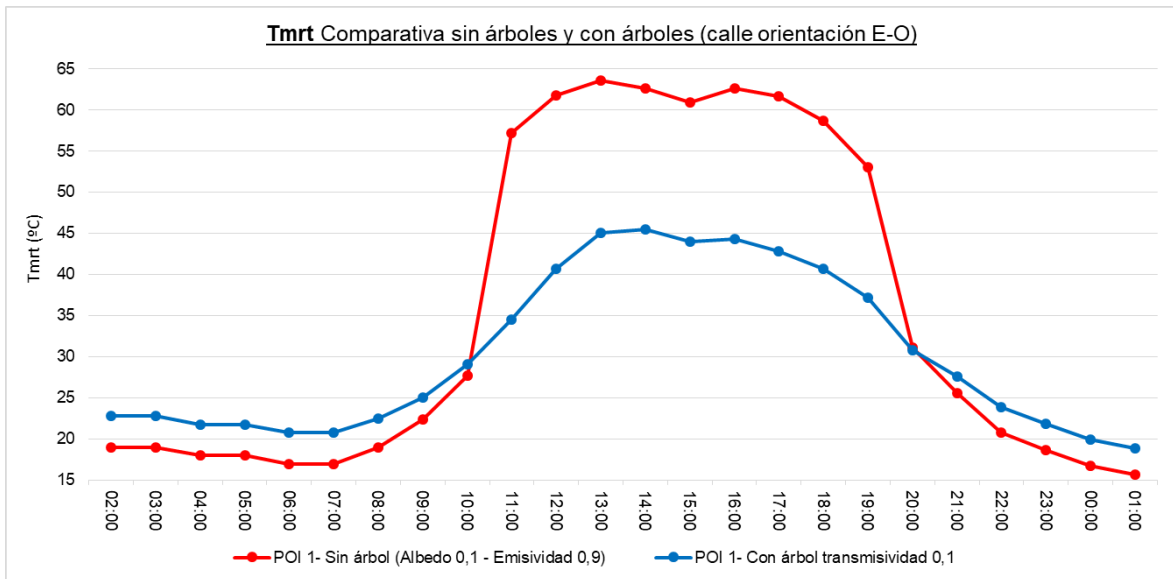


Figura 3.18 Comparativa de Tmrt y valores PET para las situaciones sin árboles y con árboles de transmisividad 0,1 a lo largo de todas las horas del día en una calle de orientación Este-Oeste.

En lo que respecta a la Tmrt, la disposición de arbolado supone una reducción de entre 20°C y 25°C en las horas de mayor radiación solar, mientras que dicho arbolado supone un aumento de aproximadamente 4°C en las horas nocturnas donde la radiación solar es nula. En cuanto a los valores PET, la disposición de arbolado supone una reducción de entre 5°C y 10°C en las horas centrales del día, mientras que conlleva un aumento de aproximadamente 1°C en horas nocturnas.

Según otros estudios, la disminución de SVF derivado del incremento de la altura de las edificaciones (mayores AR) genera dificultades a la disipación de calor en las calles (Theeuwes et al., 2014), de la misma manera que la reducción de los valores de SVF debido a la existencia de arbolado obstaculiza asimismo la disipación de la radiación de onda larga ascendente (Lindberg, Holmer, Thorsson & Rayner, 2014).

3.6 Conclusiones del análisis preliminar

Las conclusiones que se obtienen de los distintos análisis realizados en este capítulo son los siguientes:

Factores meteorológicos

- El factor que más influencia directa tiene en el confort térmico (índice PET) es la temperatura del aire, principalmente en los puntos de sombra donde existe una correspondencia aproximada entre ambos valores.
- La exposición a la radiación solar directa aumenta de manera significativa los valores PET, pudiéndolos llevar hasta niveles de “calor” o “mucho calor”. Cuanto más elevada es la temperatura del aire, el incremento de los valores PET por irradiación adicional es proporcionalmente mayor.
- El aumento de la velocidad del viento reduce los índices PET en mayor grado en los puntos expuestos a la radiación solar que en los puntos ubicados en sombra.

Orientación de la calle

Teniendo en consideración el análisis realizado para las distintas orientaciones en un escenario con ausencia total de arbolado para todos los casos, se puede concluir que:

- La diferencia de confort térmico entre las aceras es muy significativa en las calles de orientación Este-Oeste: en la acera Norte se produce una situación de estrés por calor a lo largo de prácticamente todas las horas diurnas debido a su exposición solar directa de manera continua.
- La orientación Norte-Sur es donde los puntos de ambas aceras presentan una T_{mrt} elevada en una franja horaria más reducida, por lo que resulta la orientación más equilibrada ya que el estrés térmico por calor se produce en un menor intervalo de tiempo (Ali-Toudert & Mayer, 2006; Nasrollahi, Namazi & Taleghani, 2021).
- En la orientación Noroeste-Sureste, se amplía la franja horaria con elevados valores de T_{mrt} respecto a la orientación N-S, principalmente en los puntos situados en la acera Noreste.
- La orientación Noreste-Suroeste ofrece un intervalo horario de elevados valores T_{mrt} algo superior (en la acera Noroeste) al de la orientación N-S, por lo que esta orientación presentaría una situación más equilibrada que la anterior.

En consecuencia, y considerando la no existencia de arbolado, sobre todo la orientación Norte-Sur y también la Noreste-Suroeste son las que aparentemente presentan unas condiciones de sombreado de los edificios más apropiada para reducir el intervalo horario de estrés por calor.

En otros estudios también se ha concluido que la orientación Norte-Sur es la más adecuada de cara a reducir la T_{mrt} en las horas diurnas (Lau, Ren, Ho & NG, 2016).

No obstante, conviene remarcar que los puntos considerados para cada orientación ($AR=1,00$) se sitúan cercanos a las fachadas (3 m. de distancia respecto las mismas), por lo que en función de la anchura de los espacios

peatonales y la altura de las edificaciones, todos los casos podrían requerir de sombreado adicional por medio del arbolado.

Este análisis de las distintas orientaciones proporciona también información relevante acerca de la franja horaria a tener en consideración para la posible ubicación del arbolado en cada situación.

Pavimentos

- El incremento de T_{mrt} y los valores PET es más elevado en puntos expuestos a la radiación solar directa que en puntos ubicados en sombra cuando el albedo de los pavimentos es más elevado. Ello se debe a que los pavimentos expuestos a radiación solar directa reflejan una mayor cantidad de dicha radiación que los pavimentos ubicados en sombra.

- No obstante, el aumento del albedo repercute teóricamente en una menor acumulación de energía en los pavimentos, por lo que la emisión de calor en horas nocturnas resultaría también ser menor.

- Independientemente de las limitaciones del modelo SOLWEIG para calcular la temperatura superficial de los pavimentos, los valores de emisividad no parecen tener una repercusión reseñable en las horas diurnas, aunque teóricamente unos valores de emisividad más reducidos conllevarían una menor emisión de radiación de onda larga por parte de los pavimentos en horas nocturnas.

Es necesario remarcar que, tal como se ha indicado, los baremos de albedo y emisividad existentes en los materiales tradicionalmente utilizados como pavimento en los entornos urbanos son bastante limitados, por lo que su repercusión en el confort térmico quedaría asimismo acotada.

No obstante, es posible una mejora en este aspecto mediante la utilización de los denominados pavimentos “fríos” (cool pavements). Por ejemplo, se ha

demostrado que pavimentos mediante baldosas lisas y colores claros han resultado ser más frescos que los que son más ásperos (Santamouris et al, 2012). Por otra parte, los pavimentos permeables y/o porosos consiguen unas características más frescas debido a la evaporación del agua retenida en los mismos (Nwakaire et al, 2020).

Sombreado mediante arbolado

- Lógicamente, cuanto menor es la transmisividad del arbolado la reducción de la T_{mrt} y en consecuencia de los valores PET también es mayor especialmente en zonas expuestas a la radiación solar directa.
- No obstante, el sombreado generado por el arbolado de densidad de foliación media (valores de transmisividad aproximados a 0,30) también es capaz de reducir significativamente los valores de T_{mrt} y de PET.
- En general los árboles de mayor dimensión proporcionan mejores prestaciones para espacios peatonales de mayor anchura, en vez de disponer más elementos de arbolado.
- En los puntos donde no es imprescindible el arbolado (puntos con sombra de edificios por ejemplo) resulta preferible no tenerlo para no retener calor emisor de tarde-noche.

Conclusiones generales

Una vez analizada la influencia que generan los distintos factores en el confort térmico relacionado con el estrés por calor, las conclusiones generales que se pueden obtener en este Capítulo de cara a plantear la metodología propuesta en esta Tesis, son las siguientes:

-
- La generación de sombreado para reducir la radiación solar directa es la medida más efectiva para la reducción del estrés por calor en los espacios exteriores, ya que, aunque la temperatura del aire es un factor determinante en los valores PET, la variación de la misma resulta técnicamente inviable en la actualidad.
 - La generación de sombra mediante la disposición de arbolado (u otros elementos urbanos capaces de generar sombra) de manera complementaria a la sombra generada por los edificios es la medida más eficaz para la reducción de la radiación solar directa, luego del estrés por calor en los espacios abiertos.
 - Sin embargo, dado que la existencia del arbolado dificulta la disipación de calor en las calles, la disposición del mismo debe ajustarse a las necesidades reales de generación de sombreado, cobrando especial relevancia la adecuada elección de las especies (en función de su geometría y densidad de foliación-transmisividad) y la correcta ubicación de elementos, de manera que la sombra sea generada en la máxima superficie posible de los espacios peatonales expuestos a la radiación solar.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS POR CALOR EN LAS CALLES MEDIANTE LA DISPOSICIÓN DE ARBOLADO

4.1 Proceso de selección de especies de arbolado para sombreado

Como paso previo a la metodología general, en este apartado se pretenden establecer las directrices del proceso de selección de especies arbóreas para su posible disposición en zonas urbanizadas, determinándose los principales criterios a utilizar según los condicionantes que influyen en su capacidad de sombreado (Spangenberg, 2010).

La intención del establecimiento del proceso de selección de especies de arbolado que se propone es el de que pueda ser utilizado en cualquier ubicación geográfica.

No obstante, el objetivo principal del proceso planteado es realizar una selección concreta de especies arbóreas para su utilización en los espacios urbanos de la parte oriental de la cornisa cantábrica, especificándose sus principales parámetros de carácter morfológico y fisiológico, y añadiéndose sus características de adaptación al entorno urbano. Se propone además su posible ámbito de utilización según sus características geométricas y las distintas tipologías de espacios urbanos contemplados.

La selección es complementada mediante la obtención experimental de la transmisividad de las distintas especies de arbolado escogidas mediante un método indirecto de no-contacto consistente en la obtención de fotografías hemisféricas que luego serán procesadas en el modelo CAN-EYE.

El proceso para la selección (o descarte) de especies de arbolado para el sombreado urbano consiste en un planteamiento donde las características de cada especie de arbolado se van sometiendo a distintos requisitos para valorar la aptitud de cada una para la función de sombreado.

La secuencia del proceso propuesto comprende los siguientes pasos, los cuales están representados en la Figura 4.1.

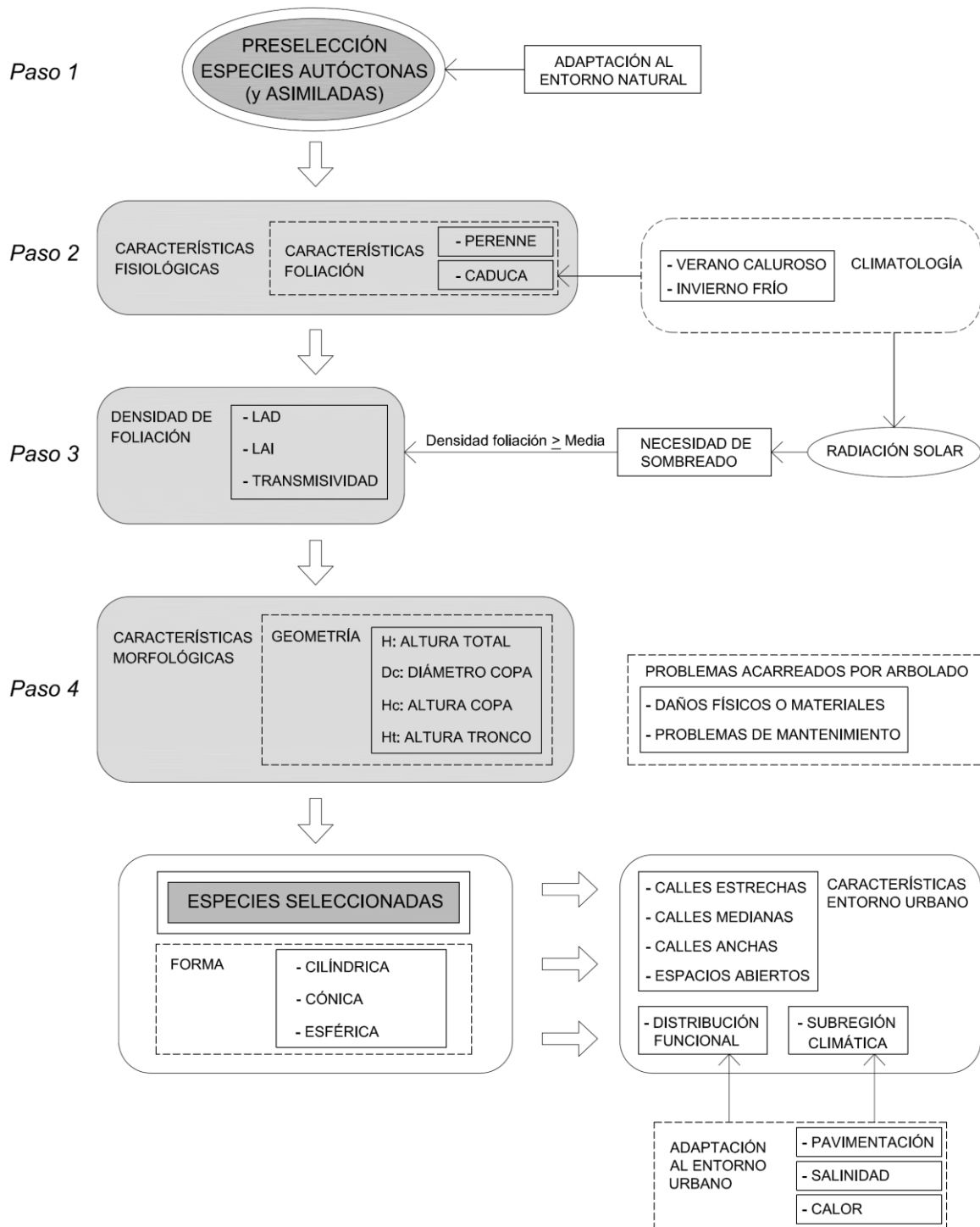


Figura 4.1 Secuencia del proceso para la selección de especies de arbolado urbano.

- *Paso 1*- Preselección de especies autóctonas y asimiladas: Se realiza una primera preselección de aproximadamente 60 especies de arbolado características de la parte oriental de la cornisa cantábrica (Aizpuru, Catalán & Garín, 1996; Pérez, 2003).

- **Paso 2-** Análisis de características fisiológicas y condicionantes climatológicos: Aunque en general se consideran más adecuadas las especies de hoja caduca para no interferir el soleamiento en los meses de invierno (Brown, Vanos, Kenny & Lenzhotzer, 2015), en un principio no se descarta la posibilidad de utilizar especies de hoja perenne para espacios abiertos.

Si bien no tiene relación directa con su capacidad de sombreado, se toma en consideración si la especie es invasora, es decir, si se encuentra incluida en el Real Decreto 630/2013 por el que se regula el catálogo español de especies exóticas invasoras.

- **Paso 3-** Análisis de densidad de foliación respecto a la radiación solar: En un principio se consideran adecuadas para el sombreado aquellas especies que presentan una densidad de hojas media o alta.

En la Tabla 4.1 se muestra el baremo relacional contemplado inicialmente a modo de referencia entre la densidad de foliación y los parámetros LAI de las especies, incluyéndose algunas de ellas a modo de ejemplo (Sabaté, Gracia & Sánchez, 2002; Pinty, Gobron, Widlowsky & Verstraete, 2003).

Tabla 4.1 Baremo densidad de foliación – parámetro LAI.

Densidad de foliación	LAI (m ² /m ²)	Ejemplos especies
Baja	LAI < 3,0	<i>Larix decidua</i> - <i>Pinus pynaster</i>
Media	3,0 < LAI < 5,0	<i>Betula alba</i> - <i>Quercus ilex</i>
Alta	LAI ≥ 5,0	<i>Fagus sylvatica</i> - <i>Platanus hispánica</i>

- **Paso 4-** Características morfológicas: Se toman en consideración las características geométricas o formales que repercutan en la capacidad de sombreado de las especies, de manera que posteriormente puedan adaptarse a las dimensiones de los espacios a sombrear.

Una excesiva altura de los árboles, en función de la forma de su copa así como de la anchura y orientación de la calle, generará sombra no deseada en

las fachadas de los edificios afectando negativamente en la iluminación natural y soleamiento de los espacios interiores (Hongbing, Jun & Yonghong, 2010). Se considera una morfología inadecuada por altura excesiva cuando la relación entre la anchura media de la copa y la altura media del árbol es inferior a 0,3 ($Dc.med / H.med < 0,3$).

Se toma asimismo en consideración una posible altura insuficiente del árbol en función de la altura de su tronco debido a su repercusión en el área sombreada resultante (Kotzen, 2003). Por otro lado, debido a razones de tránsito peatonal, es necesario que los árboles dispongan una altura libre mínima de tronco de 2,20 metros, de manera que se puedan garantizar las condiciones de accesibilidad de las personas.

Por otra parte, si bien los siguientes parámetros no se contemplan como criterio de descarte, se toman en consideración estas características adicionales de las especies:

- Adaptación al calor, el pavimento y la salinidad: se consideran estas características de comportamiento de las especies en el entorno urbano.
- Problemas acarreados por arbolado urbano: se contemplan aspectos como los daños físicos o materiales, así como problemas de mantenimiento que pueda generar el arbolado.

Los criterios utilizados para la elección del posible ámbito de utilización de cada especie se describen en la Tabla 4.2, en función de la correspondencia entre sus características geométricas y la anchura de las calles. Para ello, se toman en consideración calles estrechas (anchura ≤ 12 m.), calles medianas (12 m. $<$ anchura ≤ 20 m.), calles anchas (20 m. $<$ anchura ≤ 30 m.) y espacios abiertos (anchura > 30 m.). No obstante, estos posibles ámbitos de utilización son meramente orientativos, ya que la verdadera elección de la especie de arbolado vendrá condicionada por las dimensiones de las zonas peatonales.

Tabla 4.2 Criterios iniciales para la elección del ámbito de utilización. H. max. significa altura máxima del árbol y Dc. med. diámetro de copa media.

	H, max.	Dc. med.	Foliación	Adaptación pavimento
Calles estrechas	≤ 10 m.	≤ 6 m.	Caduca (*)	Media o alta
Calles medianas	≤ 25 m.	≤ 15 m.	Caduca	Indiferente
Calles anchas	≤ 30 m.	≤ 20 m.	Caduca	Indiferente
Espacios abiertos	Indiferente	Indiferente	Caduca o perenne	Indiferente

(*) Ante la escasez de especies para aceras estrechas se admiten especies de hoja perenne

Las especies que no resulten descartadas en el proceso serán consideradas seleccionadas para su disposición en entornos urbanos con el objetivo de generar sombra.

4.2 Metodología para la definición y posicionamiento del arbolado en calles

En este apartado se presenta la metodología central de la Tesis para determinar la distribución de árboles en calles urbanas, incluyendo la creación de ecuaciones matemáticas para identificar geometrías arbóreas apropiadas a disponer en dichas calles, de modo que el mayor porcentaje posible de superficie de sus zonas peatonales pueda quedar sombreado en las horas de máxima radiación solar directa. Para ello, se toman como puntos de partida la orientación de la calle, la altura de los edificios que la delimitan, y la geometría (anchura) de las zonas peatonales incluidas en ellas.

Una vez obtenidas las propiedades geométricas arbóreas apropiadas, se debe proceder a la elección de una especie arbórea determinada, para lo cual previamente se lleva a cabo una selección de especies autóctonas adecuadas para la función de generar sombra según se describe en el apartado anterior.

A la hora de determinar los espacios a sombrear, en lugar de la superficie completa de la calle, la metodología considera como objetivo las superficies peatonales.

El desarrollo de la metodología comprende 3 Fases (representadas gráficamente en la Figura 4.2) que a su vez consideran los siguientes factores:

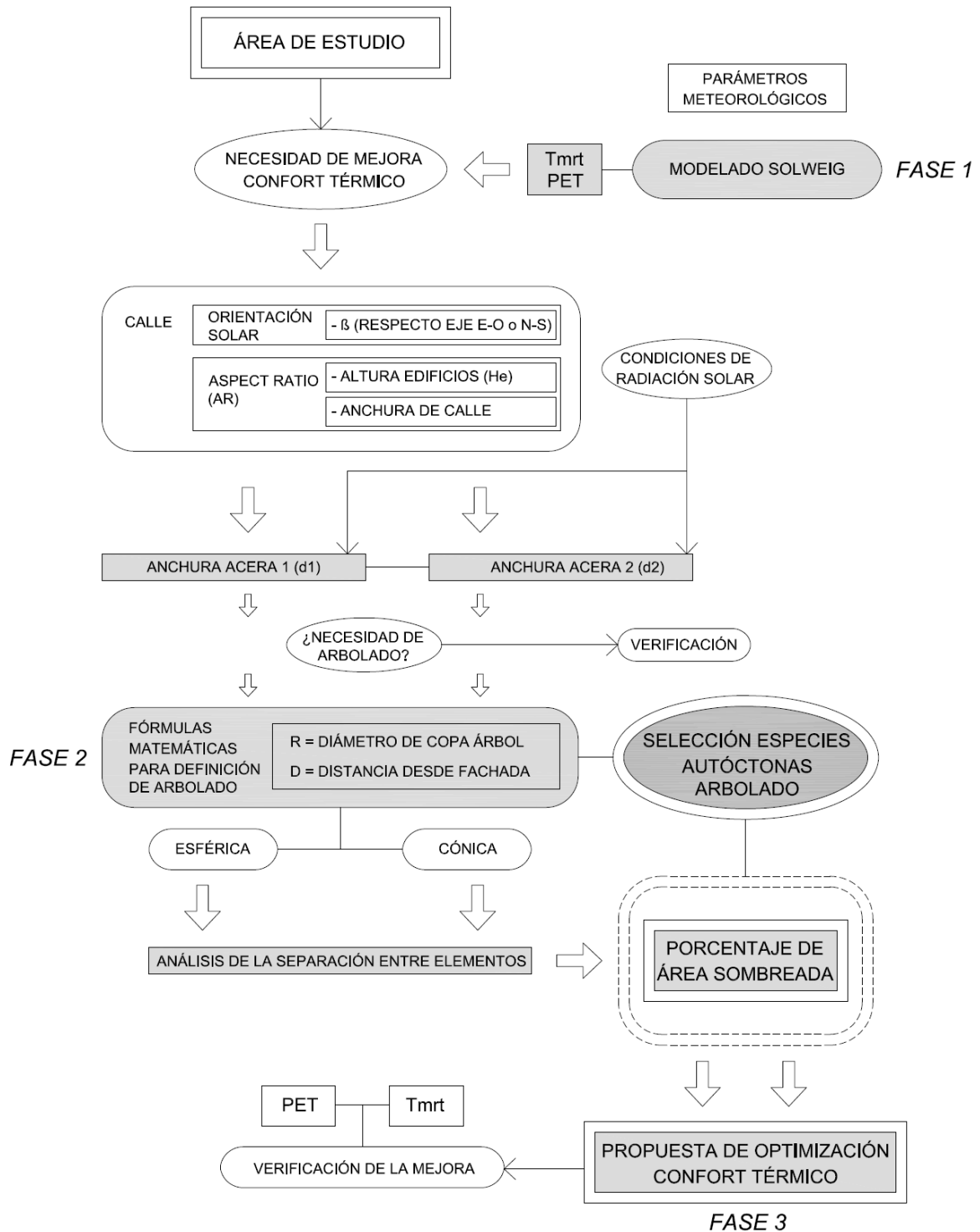


Figura 4.2 Representación gráfica de la metodología propuesta.

- FASE 1: Modelado mediante SOLWEIG del área de estudio en su situación actual para valorar la necesidad de mejora del confort térmico relacionado con el calor en sus zonas peatonales. En caso de existir momentos del día en niveles de “calor” o “mucho calor”, la propuesta de mejora será necesaria.
- FASE 2: Establecimiento de fórmulas matemáticas (distinguiendo las aceras peatonales de calles con distinta orientación) para evaluar la necesidad de arbolado, determinar las características apropiadas de los elementos en función de su geometría, y establecer su ubicación en una posición adecuada dentro de las zonas peatonales. Asimismo, se establece el espaciamiento entre árboles para maximizar el porcentaje de superficie peatonal sombreada, aunque sin interferir en la iluminación natural de los edificios.
- FASE 3: Propuesta de optimización del confort térmico relacionado con el calor definiendo una especie de arbolado concreta y posicionando los elementos en la calle. Finalmente se debe verificar la mejora, realizando un modelado mediante SOLWEIG de la solución de optimización propuesta comparándola al estado actual, y analizando su repercusión en la T_{mrt} y los valores PET para cada caso.

4.2.1 Criterios para el establecimiento y utilización de las fórmulas

La orientación y geometría de la calle así como las condiciones de radiación solar de los meses con mayor estrés térmico por calor del año son los factores iniciales para decidir si los árboles son necesarios en cada lado de la calle. Posteriormente se establecerán las características adecuadas para el tipo de árboles a plantar.

Para ello es necesario conocer la trayectoria del sol en las diferentes épocas del año, información que se obtiene del atlas solar del País Vasco (Ente Vasco de la Energía. Ikerlan SCoop., 1999) considerando los que teóricamente son los meses con mayor estrés térmico por calor del año, es decir, desde abril hasta septiembre.

No obstante, en este sentido cabe indicar que si bien el mes de septiembre también resulta un mes desfavorable en cuanto a estrés por calor atendiendo a sus parámetros meteorológicos medios (irradiancia y temperatura), para la generación y aplicación de las fórmulas matemáticas que se plantean no ha sido tenido en cuenta. La razón se debe, según las comprobaciones realizadas, a que las altitudes solares en septiembre son bastante más reducidas que en el resto de meses considerados (46° de altura para las 14:00 y 31° de altura para las 11:00 y las 17:00), por lo que la aplicación de la mismas en las fórmulas distorsionaría de sobremanera los valores de radio de copa de árbol, pero principalmente las distancias de plantación de los árboles respecto a la fachada.

Para las fórmulas se consideran tres horas específicas del día: 11:00, 14:00 y 17:00 (UTC+2) debido a que el intervalo horario con mayores cantidades de radiación solar directa es entre las 11:00 y las 17:00, mientras que la hora de mayor radiación es la hora central del día (14:00). De esta forma, las circunstancias y variables correspondientes a las tres horas mencionadas son tenidas en cuenta para la verificación de la necesidad de disponer árboles en cada lado de la calle.

La elección de las horas y los meses considerados, además de responder a las razones previamente esgrimidas, permiten también una simplificación en el desarrollo y aplicación de las fórmulas debido a la correspondencia que ofrecen algunos de los parámetros para las distintas situaciones. Por ejemplo, la altitud y acimut solares son iguales para abril y agosto, mientras que la altitud solar y el acimut respecto al eje Norte-Sur es igual a las 11:00 y a las 17:00 (Figura 4.3).

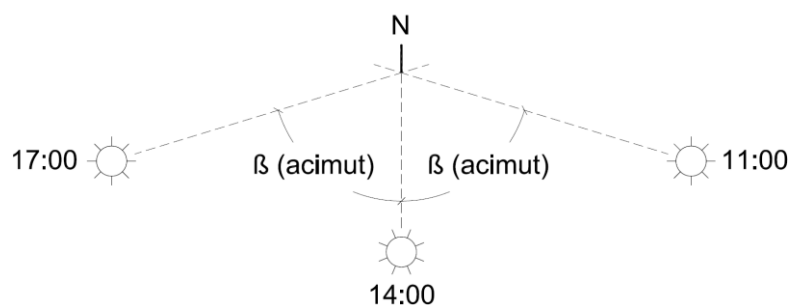


Figura 4.3 Esquema de acimut solar para las 11:00, las 14:00 y las 17:00 respecto al Norte.

En general, las variables correspondientes al momento central del día (14:00) de los distintos meses son las que se introducirán en las fórmulas para obtener las características de los árboles (radio de la copa), ya que el estrés térmico relacionado con el calor suele ser crítico a esa hora.

Las características apropiadas y el posicionamiento se obtendrán tanto para árboles esféricos como cónicos con el objetivo de poder analizar las mejoras proporcionadas por cada tipo de árbol y paralelamente disponer de un abanico más amplio de especies utilizables de cara a su posterior elección definitiva.

Sin embargo, y en función del análisis llevado a cabo para las distintas orientaciones, en algunos casos se realizarán comprobaciones y/o correcciones introduciendo las variables correspondientes a alguna de las otras dos horas consideradas (11:00 y 17:00).

En términos generales, se trazan los siguientes OBJETIVOS DE SOMBREADO Y CRITERIOS para el establecimiento y utilización de las fórmulas:

Verificación de necesidad de arbolado:

- La verificación de la necesidad de arbolado para cada hora contemplada (11:00, 14:00 y 17:00) se realizará introduciendo los valores de altitud y acimut solar correspondientes al mes de junio, que es cuando los edificios generan una superficie sombreada más reducida.
- Se establece un objetivo de sombreado de las zonas peatonales por parte de los edificios situado en el 70% (Peeters et al., 2020) para cada hora en el mes de junio, ya que en el resto de meses la superficie sombreada por los edificios será siempre superior.

Cálculo de los radios de copa de los árboles (R):

- Se calculan para las 14:00 debido a que a esa hora los niveles de radiación solar son los más elevados a lo largo del día, además de ser el momento en el que la posición solar es más alta, por lo que es también el momento donde se solicitarán mayores dimensiones geométricas en el arbolado para sombrear una misma superficie de pavimento.
- Las fórmulas se plantean inicialmente de manera que a las 14:00 la totalidad de la anchura de la zona peatonal correspondiente quede sombreada. Los valores de altitud solar introducidos en las fórmulas serán los correspondientes a los meses de abril-agosto, mayo-julio y junio.

Una vez obtenidos el radio y las distancias para los distintos meses tanto para árboles esféricos como cónicos, finalmente se adoptará el radio de mayor dimensión redondeando la cifra hacia arriba.

Cálculo de las distancias de los árboles respecto a las fachadas (D):

- En general se calculan para las 14:00, introduciéndose en las fórmulas los radios obtenidos anteriormente para cada mes (abril-agosto, mayo-julio y junio) y sus variables solares correspondientes. Posteriormente, se adoptará como distancia final el promedio realizado entre los valores obtenidos. Se llevará a cabo el mismo procedimiento para las orientaciones en las que se calcule la separación (S) entre árboles.
- En caso de necesidad de corrección del radio y la posición del árbol para las 11:00 o 17:00, dado que los niveles de radiación solar son más reducidos a esas horas, mediante las fórmulas se pretenderá sombrear al menos el 70% de la superficie de pavimento de las áreas peatonales. Se introducirán las variables correspondientes a abril-agosto, mayo-julio y junio, realizándose posteriormente un promedio entre ellos.

En lo que respecta a la adopción de valores para los radios y las distancias, mediante los criterios fijados se pretende generar un equilibrio para los distintos meses: la distancia final adoptada, debido al promedio realizado y a las propias variables solares, se acercará más a las distancias obtenidas para mayo-julio y junio. A modo de compensación, para los árboles esféricos (para los cónicos los radios obtenidos serán iguales en los distintos meses) dado que se elige el radio mayor obtenido el cual se corresponderá con el mes de junio para las 14:00 (y de valor muy similar al de mayo-julio), se equilibra la diferencia de distancia del árbol a fachada adoptada respecto al resultado obtenido para abril-agosto, por medio de la adopción de un mayor radio que el obtenido para estos últimos meses.

A la hora de establecer el porcentaje mínimo de superficie peatonal sombreada se ha tomado como referencia otro estudio en el que los objetivos para el índice PMSF (Percentage of Minimum Shading Footprint - porcentaje mínimo de cobertura de la huella de sombra) eran del 60% en el caso de árboles con densidades foliación altas y del 70% para el caso de árboles con densidades de foliación medias (Peeters et al., 2020). Cabe remarcar que, si bien el objetivo teórico se traza en sombrear el 70% en las tres horas consideradas, queda asumido que debido a distintos factores estos valores no van a poder ser siempre alcanzables. Lo que se pretende es que los porcentajes que se obtengan se acerquen el máximo posible al objetivo planteado.

4.2.2 Criterios para la definición de especies de arbolado

Una vez utilizadas las fórmulas matemáticas, procede escoger las especies de arbolado que se ajustan a las características geométricas calculadas. Las especies se escogen a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2, según las siguientes directrices:

- Forma de la copa: resulta conveniente escoger especies con forma de copa esférica o cónica. En caso de correcciones del radio y/o posición del arbolado para las 11:00 y para las 17:00, se elegirán árboles con forma de copa cónica.

- Radio de la copa: se elegirán de las especies cuyo radio de copa medio se asemeje a los valores obtenidos mediante las fórmulas, o en su caso, algo superiores. Asimismo, resulta preferible elegir el máximo número de especies para posteriormente someterlas a otros criterios.

Previamente a la elección de la especie concreta y atendiendo a las distancias de plantación establecidas en las fórmulas matemáticas, procede llevar a cabo una comprobación de la superficie sombreada que genera el arbolado en las zonas peatonales en las cuales resulta necesario. Esta comprobación se realiza tanto para árboles esféricos como cónicos contemplando los distintos meses (desde abril a agosto) y en las horas consideradas (11:00, 14:00 y 17:00).

En consecuencia, los criterios de selección, según orden de preferencia, serán los siguientes:

- Criterio 1: Superficie sombreada. Las especies según la forma de su copa (esférica o cónica) que mayor promedio de porcentaje de superficie sombreada generen serán las susceptibles de ser elegidas para su plantación tomando como referencia el objetivo del 70% establecido para todas las horas y meses.
- Criterio 2: Transmisividad. Es un criterio de elección relevante por la repercusión que tiene la transmisividad de la radiación solar en la mejora del confort térmico relacionado con el estrés por calor. Se priorizará la elección de especies que presenten una menor transmisividad.
- Criterio 3: Adaptación al entorno urbano dependiendo de la localización geográfica del municipio. Se atenderá al comportamiento de las especies respecto al calor (según región climática), salinidad (municipios costeros) y el pavimento, aunque en este último caso es suficiente con que la adaptación sea media.

4.3 Simulaciones mediante el modelo SOLWEIG

Las simulaciones mediante el modelo SOLWEIG se utilizan para estimar la T_{mrt} y los valores PET en puntos indicados de una calle para las distintas horas del día. El modelado se utiliza tanto en la Fase 1 de la metodología propuesta en la cual se determina el confort térmico de un área de estudio en su estado actual, así como en la Fase 3 en la cual se verifica la mejora del confort térmico considerando la propuesta de optimización. Los criterios y la configuración general utilizada para los distintos modelados ha sido la siguiente:

- El Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) utilizado ha sido el ETRS89 / UTM zone 30N, que es el que corresponde a la cornisa cantábrica. Las bases introducidas para los distintos modelados geométricos han consistido en mapas topográficos reales introducidos en el modelo en coordenadas UTM.
- Los datos meteorológicos introducidos para cada caso son reales habiéndose obtenido de la base de datos proporcionada por Euskalmet para cada día y hora. Los parámetros que se han introducido en todos los modelados han sido la irradiancia (W/m^2), temperatura del aire ($^{\circ}C$), velocidad del viento (m/s) y humedad relativa (%). Dentro de los datos meteorológicos, se ha activado la opción de estimación de la radiación de onda corta directa y difusa a partir de la radiación global.
- La franja horaria utilizada para los modelados en general ha sido desde las 9:00 hasta las 21:00 en hora local de verano (UTC+2), habiéndose introducido los parámetros meteorológicos correspondientes para cada hora en punto.
- Para las fachadas de los edificios, debido a que tanto en general como en los casos de estudio suelen estar construidas con diferentes materiales, se han asumido los valores estándar para las mismas: albedo 0,2 y emisividad 0,7.

- El albedo y la emisividad introducida para los pavimentos ha sido variable en función de los pavimentos existentes en los casos de estudio o los objetivos de los modelados concretos. No se ha utilizado la opción Land Cover Fraction Grid debido a que la misma está limitada a los materiales estándar del modelo.
- Para el cálculo de la Tmrt, la exposición humana ha sido considerada sobre la base de una postura de pie, con valores de coeficiente de absorción estándar de 0,7 y 0,97 para radiaciones de onda corta y onda larga respectivamente (Lindberg, Holmer y Thorsson, 2008). Asimismo, se ha activado la opción por defecto de considerar el cuerpo humano como un cilindro en vez de como una caja.
- Para el cálculo de los valores PET se han utilizado los parámetros estandarizados del modelo (edad: 35 años, altura: 1,80; tasa metabólica: 80 W / m²; ropa: 0,9; peso: 75 kg; sexo: hombre).

El modelo ofrece resultados numéricos de la Tmrt y valores PET para puntos concretos que se pueden posicionar según su interés (POI- Points Of Interest), y también ofrece imágenes gráficas de distribución de los valores Tmrt dentro del área de estudio modelizada.

Los resultados de Tmrt y PET se han utilizado principalmente para introducir las en las distintas gráficas, mientras que los mapas de Tmrt se han empleado para representar a modo comparativo el estado actual de los casos de estudio con las propuestas de mejora. Los niveles de percepción térmica del índice PET que se representan en las gráficas son los establecidos para Europa Central.

4.4 Mediciones experimentales

Tanto el proceso de selección de especies de arbolado para sombreado como la metodología para la definición y posicionamiento de los elementos han sido respaldadas por diversas mediciones experimentales, las cuales han sido

realizadas a lo largo del desarrollo de la Tesis con el objetivo de validar empíricamente los postulados y resultados obtenidos.

En general, las mediciones experimentales se han utilizado para validar las simulaciones realizadas mediante el modelo SOLWEIG y para la estimación de los parámetros biofísicos de las especies de arbolado seleccionadas empleando el modelo CAN-EYE.

4.4.1 Mediciones de Tmrt: termómetro globo

Las distintas mediciones mediante termómetro globo han sido realizadas para obtener la Tmrt real en distintos casos de estudio localizados en Bilbao, con el objetivo de compararlos posteriormente con los resultados obtenidos en simulaciones realizadas mediante el modelo SOLWEIG.

Para estas simulaciones se han utilizado las mismas condiciones meteorológicas de los días de medición, de manera que el modelo haya podido ser validado.

Las campañas de medición se han realizado mediante un termómetro globo TESTO Globe (diámetro = 150 mm. y color negro) y un datalogger Testo 480, todo ello complementado con un termo-anemómetro Testo 405i (Figura 4.4).



Figura 4.4 Instrumentos para la campaña de medición de Tmrt.

La ubicación de los sensores ha sido posicionada a una altura aproximada de 1 m. mediante un trípode, ya que el termómetro globo requiere diez minutos para una medición realmente estable de la T_g en cada punto (VDI 3787, 2008, Johansson, Thorsson, Emmanuel y Krüger, 2014).

Una vez recopilados todos los datos experimentales en cada punto y a cada hora concreta, la temperatura media radiante (T_{mrt}) en los distintos puntos se ha ido obteniendo mediante la expresión representada en la Ecuación 4.1 (ASHRAE, 2001), (Thorsson, Lindberg, Eliasson y Holmer, 2007).

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V_a^{0.6}}{e D^{0.4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

donde:

T_g es la temperatura del termómetro globo ($^{\circ}\text{C}$)

V_a es la velocidad del viento (m / s)

T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

D es el diámetro del globo (mm)

e es la emisividad del globo (0,95 para el globo negro)

Por último, se ha realizado una comparativa entre estos valores T_{mrt} obtenidos en las mediciones con los resultados de las simulaciones mediante SOLWEIG analizando las diferencias y sus posibles razones.

4.4.2 Mediciones de temperatura de pavimentos: cámara termográfica

Con el objetivo de poder comparar las temperaturas superficiales de pavimento exterior reales con las que considera el modelo SOLWEIG en sus simulaciones (a pesar de las limitaciones del modelo en este aspecto), se han realizado también mediciones experimentales en dos calles de Bilbao.

Las mediciones se han llevado a cabo mediante la cámara termográfica modelo Testo 875i (Figura 4.5), y para corregir las temperaturas superficiales en el procesado de imágenes termográficas se ha utilizado paralelamente un termómetro con sonda para medición de temperatura de superficie (Figura 4.5).



Figura 4.5 Cámara termográfica testo 875i y termómetro con sonda de superficie.

Posteriormente, se han realizado modelados mediante SOLWEIG en las zonas de estudio considerando las mismas condiciones meteorológicas de los días de medición experimental, para poder comparar así las temperaturas superficiales de pavimento en ambos casos.

4.4.3 Transmisividad de las especies de arbolado seleccionadas: fotografías hemisféricas y estimaciones con el modelo CAN-EYE

De cara a medir las características biofísicas de las copas y principalmente la transmisividad de las especies de arbolado previamente seleccionadas, en fechas comprendidas entre los meses de junio, julio y agosto se han ido tomando fotografías hemisféricas hacia arriba de las diversas especies.

Posteriormente, se han procesado las imágenes en el modelo CAN-EYE, obteniendo principalmente los valores FAPAR de las copas de los árboles

(Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida) a partir de su Gap-Fraction (Jonckheere et al., 2004).

Las imágenes han sido obtenidas mediante una cámara Canon PowerShot SX280 HS (Figura 4.6) desde el pie de cada árbol en sentido ascendente (ejemplo de fotografía hemisférica en Figura 4.6). Para cada árbol se han obtenido un mínimo de 9 imágenes hemisféricas las cuales han sido procesadas mediante el modelo CAN-EYE.



Figura 4.6 Izquierda: cámara fotográfica Canon PowerShot SX280 HS. Derecha: ejemplo imagen hemisférica de *Acer platanoides*.

Los parámetros generales utilizados en el modelo han sido los estándares consistiendo en una resolución angular del zénit de 10° , una resolución angular del acimut de 20° y un círculo de interés de 60° . El dominio de integración f_{Cover} ha sido de 0- 20° .

Para cada una de las fotografías hemisféricas se ha utilizado la opción máscara para aislar del cálculo de parámetros la parte de las imágenes correspondiente al tronco de los árboles.

La clasificación del pixelado se ha realizado en el modo simplificado de píxeles no mezclados y eligiendo la opción de cielo, de manera que el modelo estima que el resto de píxeles se corresponden con las de la otra clase (vegetación). Los índices de brillo de cielo utilizados en general han sido de 0,75 para el caso de

fotografías obtenidas en días totalmente despejados, y de 0,50-0,60 para fotografías tomadas en días no totalmente despejados. En todos los casos, se ha comprobado de manera visual la correspondencia entre las imágenes originales y las modeladas con los colores de clasificación.

En lo que respecta a los resultados proporcionados por el modelo, se han tomado en consideración los siguientes valores para cada especie:

- PAI: se adopta el valor de “true” PAI (verdadero) medido según método CAN-EYE V 6.1.
- ALA: se adopta el valor de “true” ALA (verdadero) medido según método CAN-EYE V 6.1.
- Transmisividad ($=1 - \text{FAPAR}$). Al tratarse el FAPAR de un valor dinámico, queda representado según el intervalo establecido entre “Black sky” - “White sky”, y “measured” (instantáneos) - “modeled” (computado) respectivamente. Por lo tanto, la transmisividad se cuantifica a modo de intervalo numérico.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DE ESPECIES Y DESARROLLO DE FÓRMULAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ARBOLADO

5.1 Especies de arbolado seleccionadas y descartadas

En este apartado se procede a presentar los resultados del proceso de selección (y descarte) de especies descrito en el capítulo anterior a partir de las inicialmente preseleccionadas.

5.1.1 Especies descartadas

Los motivos de descarte de las especies de arbolado provienen principalmente de sus características morfológicas, aunque también en menor grado de sus características fisiológicas o su densidad de foliación.

En lo que respecta a las características morfológicas, el descarte de especies se ha realizado principalmente por la altura del árbol: una reducida altura condiciona su capacidad de sombreado mientras que una altura excesiva en proporción a la anchura de su copa, además de generar sombra no deseada en las fachadas de los edificios, conlleva dificultades para su plantación en calles estrechas o medianas. Sin embargo, una excesiva altura, siempre que la anchura de su copa sea proporcionada según el baremo establecido, no es obstáculo para la disposición de especies en espacios abiertos, excepto cuando exista una razón adicional para su descarte.

Las características fisiológicas que han conllevado el descarte de especies han sido sobre todo la no caducidad de las hojas y la reducida densidad de foliación, ya que este aspecto influye directamente en la transmisividad (o índice LAI).

Asimismo, varias especies han sido descartadas por ser invasoras, es decir, por dificultar el crecimiento de otras especies o generar interferencias en los ecosistemas naturales o urbanos. En la Tabla 5.1 se describen las especies y los criterios por los que se han descartado añadiéndose las respectivas observaciones e indicando si adicionalmente presentan otros inconvenientes para su plantación en entornos urbanos.

Tabla 5.1 Especies descartadas y criterios de descarte.

Nombre botánico	Nombre común	CM	CF	DF	Observaciones.	I	PA
<i>Abies alba</i>	Abeto	X	X		Altura de tronco insuficiente. Perenne.		
<i>Acacia dealbata</i>	Mimosa	X	X		Altura insuficiente. Invasora.	X	X
<i>Ailanthus altissima</i>	Ailanto		X		Especie invasora.	X	X
<i>Arbutus unedo</i>	Madroño	X	X		Perenne y especie invasora.	X	X
<i>Ceratonia siliqua</i>	Algarrobo	X			Altura insuficiente. Utilizada para cultivos.		X
<i>Cornus sanguinea</i>	Cornejo	X	X		Altura insuficiente e invasora.	X	X
<i>Corylus avellana</i>	Avellano	X			Ramosa desde la base y caída de frutos.		X
<i>Crataegus monogyna</i>	Majuelo	X			Demasiado ramosa desde la base y espinosa.		
<i>Cupressus sempervirens</i>	Ciprés	X	X		Morfología inadecuada. Copa estrecha. Perenne.		
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	Árbol paraíso	X			Morfología irregular. Ramosa desde la base.		X
<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalipto blanco	X			Morfología inadecuada. Copa estrecha.		
<i>Ficus carica</i>	Higuera	X			Demasiado ramosa desde la base		
<i>Ilex aquifolium</i>	Acebo	X	X		Especie salvaje protegida.		
<i>Juniperus communis</i>	Enebro	X			Ramosa desde la base. Caída de frutos.		X
<i>Juniperus oxycedrus</i>	Enebro rojo	X			Ramosa desde la base. Caída de frutos.		X
<i>Larix decidua</i>	Alerce		X	X	Baja densidad de foliación.		
<i>Laurus nobilis</i>	Laurel	X	X		Ramosa desde base y perenne.		
<i>Malus sylvestris</i>	Manzano silvestre	X			Ramosa desde base. Utilizada para cultivos.		X
<i>Olea europaea</i>	Olivo	X			Ramosa desde base. Utilizada para cultivos.		
<i>Pinus pinaster</i>	Pino marítimo		X		Perenne y poco utilizada en entornos urbanos.		
<i>Populus nigra</i>	Chopo	X			Morfología inadecuada. Copa estrecha.		
<i>Prunus avium</i>	Cerezo	X			Generalmente para cultivos. Caída de frutos.		X
<i>Prunus spinosa</i>	Endrino	X			Altura insuficiente y espinosa.		X
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinia		X		Uso extendido aunque invasora.	X	X
<i>Salix alba</i>	Sauce blanco	X			Ramosa desde la base.		
<i>Salix atrocinerea</i>	Sauce cenizo	X		X	Altura insuficiente y copa poco densa.		
<i>Tamarix gallica</i>	Tamariz	X		X	Altura insuficiente. Ramosa desde la base.		
<i>Taxus baccata</i>	Tejo común		X		Lento crecimiento y partes tóxicas. Invasora.	X	X
<i>Ulmus glabra</i>	Olmo		X		Especie afectada por epidemia.		
<i>Ulmus minor</i>	Olmo común		X		Especie afectada por epidemia.		

CRITERIOS DE DESCARTE

CM Características Morfológicas
CF Características Fisiológicas
DF Densidad de Foliación

OTRAS CONSIDERACIONES

I Especie Invasora
PA Problemas Acarreados

En la Figura 5.1 se muestran algunos ejemplos de especies con morfología inadecuada para su plantación en entornos urbanos. Las razones principales son una altura de tronco insuficiente (*Abies alba*), forma de copa cilíndrica con excesiva altura (*Cupressus sempervirens*) o una morfología irregular además de un aspecto ramoso (*Eleagnus angustifolia*).



Figura 5.1 Ejemplo de especies con morfología inadecuada. De izquierda a derecha: *Abies alba*, *Cupressus sempervirens* y *Eleagnus angustifolia*.

Las especies que son ramosas desde la base no son adecuadas para su plantación en entornos urbanos donde se debe garantizar la accesibilidad del tránsito peatonal (altura $\geq 2,20$ m.) y en su caso también la del tránsito rodado, que requeriría una mayor altura de tronco. En la Figura 5.2 se muestran algunos ejemplos de especies ramosas desde la base.



Figura 5.2 Ejemplo de especies ramosas desde la base. De izquierda a derecha: *Laurus nobilis*, *Tamarix gallica* y *Salix alba*.

La caída de frutos es uno de los posibles problemas acarreados por algunas especies debido a los posibles daños que pueden generar en las personas o los bienes, además de las labores de mantenimiento adicional que conllevan (Figura 5.3).



Figura 5.3 Ejemplo de especies caída de frutos. De izquierda a derecha: *Corylus avellana*, *Juniperus communis* y *Prunus avium*.

Por su parte, las especies tóxicas e invasoras se definen según la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad como “aquellas que se introducen o establecen en un ecosistema o hábitat natural o seminatural y que son un agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor, o por el riesgo de contaminación genética”. En la Figura 5.4 se muestran algunos ejemplos de especies invasoras.



Figura 5.4 Ejemplo de especies tóxicas e invasoras. De izquierda a derecha: *Acacia dealbata*, *Robinia pseudoacacia* y *Taxus baccata*.

Cabe reseñar el descarte de las especies *Ulmus minor* y *Ulmus glabra* (Figura 5.5) que aunque presentan unas características a priori adecuadas para la generación de sombra, en los últimos años han estado afectadas por una epidemia (grafiosis) que puede provocar la muerte del árbol.



Figura 5.5 Ejemplo de especies afectadas por epidemia. De izquierda a derecha: *Ulmus minor* (características de su hoja en imagen central) y *Ulmus glabra*.

5.1.2 Especies seleccionadas


Las especies inicialmente preseleccionadas que no han sido descartadas se consideran susceptibles de ser utilizadas en los entornos urbanos para funciones de sombreado. Se presentan sus siguientes características principales:


- Características morfológicas: forma, altura (H) máxima y media, y diámetro de copa (anchura Dc) media.
- Características fisiológicas: hoja, densidad de foliación y transmisividad.
- Adaptación al entorno urbano (calor, pavimento y salinidad) y posible ámbito de utilización.


Los valores de transmisividad indicados han sido los obtenidos de manera empírica mediante la toma de fotografías hemisféricas y su posterior procesado en el modelo CAN-EYE (resultados en apartado 5.2). Por su parte, la densidad de foliación indicada ha sido obtenida de la bibliografía o fuentes disponibles, no habiendo sido derivada proporcionalmente a partir de la transmisividad obtenida

empíricamente, ya que ésta también depende de otros factores como son la dimensión de hoja, su inclinación o nivel de agrupamiento.


Cabe señalar que las dimensiones de anchura de copa y altura media indicadas para cada especie de arbolado se corresponden con circunstancias de crecimiento de arbolado en hábitats naturales. Su plantación en entornos urbanos, y en mayor medida en zonas pavimentadas, podría conllevar modificaciones en su forma y dimensiones (Rotzer et al., 2020). Por otra parte, las podas y labores de mantenimiento a llevar a cabo en los entornos urbanos podrían asimismo facilitar un control de las formas y dimensiones de la copa de los árboles.

Especie:	<i>Acer campestre</i>	Arce menor
	Características Morfológicas	
	Forma: Esférica	
	Altura (H) media: 13 m.	
	Altura (H) máxima: 20 m.	
	Anchura (Dc) media: 13 m.	
Características Fisiológicas		
Hoja: Caduca		
Densidad foliación: Media		
Transmisividad: 0,22 – 0,28		
Adaptación al entorno urbano		
Calor: Alta		
Pavimento: Alta		
Salinidad: Media		
Ámbito utilización: Calles medianas		

Especie:	<i>Acer opalus</i>	Acirón
	Características Morfológicas	
	Forma: Cónica	
	Altura (H) media: 9 m.	
	Altura (H) máxima: 15 m.	
	Anchura (Dc) media: 7 m.	
Características Fisiológicas		
Hoja: Caduca		
Densidad foliación: Alta		
Transmisividad: 0,08 – 0,11		
Adaptación entorno urbano		
Calor: Alta		
Pavimento: Media		
Salinidad: Media		
Ámbito utilización: Calles medianas		


Especie:	<i>Acer platanoides</i>	Arce real
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	15 m.
	Altura (H) máxima:	25 m.
	Anchura (Dc) media:	9 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,07 – 0,17	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Falso plátano
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	25 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	15 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,12 – 0,17	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

Especie:	<i>Aesculus hippocastanum</i>	Castaño de indias
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cilíndrica - Ovoidal
	Altura (H) media:	25 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	20 m
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,10 – 0,25	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	


Especie:	<i>Alnus glutinosa</i>	Aliso
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	18 m.
	Altura (H) máxima:	25 m.
	Anchura (Dc) media:	12 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,12 – 0,19	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	


Especie:	<i>Betula alba</i>	Abedul
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	18 m.
	Altura (H) máxima:	20 m.
	Anchura (Dc) media:	15 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,17 – 0,26	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Carpinus betulus</i>	Carpe
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	17 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	12 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,05 – 0,17	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles anchas	


Especie:	<i>Castanea sativa</i>	Castaño
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	20 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	16 m
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,08 – 0,13	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles anchas	


Especie:	<i>Catalpa bignonioides</i>	Catalpa común
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	10 m.
	Altura (H) máxima:	15 m.
	Anchura (Dc) media:	9 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,06 – 0,10	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	


Especie:	<i>Cedrus atlantica</i>	Cedro del Atlas
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	35 m.
	Altura (H) máxima:	40 m.
	Anchura (Dc) media:	25 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Perenne	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,36 – 0,40	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

Especie:	<i>Celtis australis</i>	Almez
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	15 m.
	Altura (H) máxima:	25 m.
	Anchura (Dc) media:	14 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,06 – 0,12	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Cercis siliquastrum</i>	Árbol del amor
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	5 m.
	Altura (H) máxima:	12 m.
	Anchura (Dc) media:	5 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,05 – 0,13	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	


Especie:	<i>Fagus sylvatica</i>	Haya
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	21 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	21 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,10 – 0,17	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Baja	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	


Espezie:	<i>Fraxinus excelsior</i>	Fresno
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	30 m.
	Altura (H) máxima:	35 m.
	Anchura (Dc) media:	22 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,12 – 0,19	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

Espezie:	<i>Juglans regia</i>	Nogal
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	20 m.
	Altura (H) máxima:	25 m.
	Anchura (Dc) media:	13 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,09 – 0,14	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles anchas	


Espezie:	<i>Ligustrum lucidum</i>	Aligustre
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	5 m.
	Altura (H) máxima:	8 m.
	Anchura (Dc) media:	5 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Perenne	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,00 – 0-03	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles estrechas	


Especie:	<i>Magnolia grandiflora</i> Magnolia común
	Características Morfológicas
	Forma: Cónica
	Altura (H) media: 13 m.
	Altura (H) máxima: 25 m.
	Anchura (Dc) media: 9 m.
Características Fisiológicas	
Hoja: Perenne	
Densidad foliación: Alta	
Transmisividad: 0,14 – 0,16	
Adaptación entorno urbano	
Calor: Media	
Pavimento: Media	
Salinidad: Media	
Ámbito utilización: Espacios abiertos	


Especie:	<i>Platanus hispanica</i> Plátano común
	Características Morfológicas
	Forma: Esférica
	Altura (H) media: 22 m.
	Altura (H) máxima: 35 m.
	Anchura (Dc) media: 20 m.
Características Fisiológicas	
Hoja: Caduca	
Densidad foliación: Alta	
Transmisividad: 0,06 – 0,08	
Adaptación entorno urbano	
Calor: Alta	
Pavimento: Alta	
Salinidad: Baja	
Ámbito utilización: Espacios abiertos	


Especie:	<i>Populus alba</i> Álamo blanco
	Características Morfológicas
	Forma: Cilíndrica - Ovoidal
	Altura (H) media: 27 m.
	Altura (H) máxima: 30 m.
	Anchura (Dc) media: 20 m.
Características Fisiológicas	
Hoja: Caduca	
Densidad foliación: Media	
Transmisividad: 0,05 – 0,11	
Adaptación entorno urbano	
Calor: Media	
Pavimento: Alta	
Salinidad: Baja	
Ámbito utilización: Calles anchas	


Especie:	<i>Prunus cerasifera</i>	Ciruelo
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	5 m.
	Altura (H) máxima:	10 m.
	Anchura (Dc) media:	5 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,10 – 0,19	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles estrechas	


Especie:	<i>Quercus faginea</i>	Roble carrasqueño
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	12 m.
	Altura (H) máxima:	20 m.
	Anchura (Dc) media:	12 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,14 – 0,15	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Quercus ilex</i>	Encina
	Características Morfológicas	
	Forma:	Esférica
	Altura (H) media:	15 m.
	Altura (H) máxima:	35 m.
	Anchura (Dc) media:	14 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Perenne	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,12 – 0,16	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	


Especie:	<i>Quercus pyrenaica</i>	Rebollo
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	15 m.
	Altura (H) máxima:	25 m.
	Anchura (Dc) media:	12 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,06 – 0,11	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Quercus robur</i>	Roble
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cilíndrica - Ovoidal
	Altura (H) media:	25 m.
	Altura (H) máxima:	40 m.
	Anchura (Dc) media:	14 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,09 – 0,17	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Alta	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

Especie:	<i>Sorbus aucuparia</i>	Azarollo
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cilíndrica - Ovoidal
	Altura (H) media:	10 m.
	Altura (H) máxima:	15 m.
	Anchura (Dc) media:	5 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,15 – 0,18	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Sorbus domestica</i>	Sorbo
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	15 m.
	Altura (H) máxima:	20 m.
	Anchura (Dc) media:	8 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Media	
Transmisividad:	0,09 – 0,11	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Alta	
Pavimento:	Media	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Calles medianas	

Especie:	<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilo común
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	32 m.
	Altura (H) máxima:	40 m.
	Anchura (Dc) media:	21 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,05 – 0,10	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Baja	
Salinidad:	Baja	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

Especie:	<i>Tilia tomentosa</i>	Tilo plateado
	Características Morfológicas	
	Forma:	Cónica
	Altura (H) media:	27 m.
	Altura (H) máxima:	30 m.
	Anchura (Dc) media:	17 m.
Características Fisiológicas		
Hoja:	Caduca	
Densidad foliación:	Alta	
Transmisividad:	0,07 – 0,09	
Adaptación entorno urbano		
Calor:	Media	
Pavimento:	Alta	
Salinidad:	Media	
Ámbito utilización:	Espacios abiertos	

En general, las especies seleccionadas presentan dimensiones geométricas grandes, por lo que la mayoría de ellas son susceptibles de ser utilizadas en calles de anchura como mínimo mediana.

Un análisis cuantitativo de los resultados ofrece los siguientes números de especies utilizables en cada tipología de espacio urbano, representados en la Tabla 5.2. Se indican el número de especies según su tipo de foliación además del número de especies con tolerancia media o alta al calor, el pavimento o la salinidad.

Tabla 5.2 Número de especies por ámbito de utilización.

	Nº total	Foliación		Aptitud al entorno		
		Caduca	Perenne	Calor	Pavimento	Salinidad
Calles estrechas	2	1	1	2	2	1
Calles medianas	12	12	0	10	10	9
Calles anchas	4	4	0	3	2	1
Espacios abiertos	11	8	3	8	6	5

Se obtiene un reducido número de especies utilizables en calles estrechas (por lo que se ha optado por incluir dos especies de hoja perenne) aunque a este respecto conviene indicar que este tipo de calles tiende a presentar valores de AR mayores, por lo que la superficie de calle afectada por el sombreado de las edificaciones es mayor.

En cuanto a las calles de anchura mediana, la cual es una tipología muy frecuente en los núcleos urbanos de la parte oriental de la cornisa cantábrica, se han obtenido para las mismas 12 tipos de especies a las cuales se podrían sumar las 2 especies obtenidas para las calles estrechas al considerarse también adaptables.

Por lo tanto, se obtienen 14 especies de arbolado utilizables en calles de hasta 20 m. de anchura (medianas), de las cuales más del 85% presenta una tolerancia al

pavimento media o alta, lo que se considera relevante debido a la dificultad de disponer zonas verdes en este tipo de calles.

Se obtienen otras 15 especies para su utilización en calles anchas o espacios abiertos, de las cuales más del 50% presenta una tolerancia al pavimento media o alta, aunque en este tipo de espacios existe una mayor posibilidad de disponer zonas verdes. En todo caso, en estos espacios de mayor amplitud resultaría más efectiva la utilización de árboles de grandes dimensiones.

La mayoría de especies seleccionadas son de hoja caduca, aunque también se han incluido algunas especies de hoja perenne para su utilización en calles estrechas y espacios abiertos, ya que éstos últimos suelen presentar superficies lo suficientemente extensas como para que la existencia de áreas sombreadas en los mismos no generen inconvenientes en época invernal, al existir también zonas soleadas.

Respecto a la tolerancia al ambiente salino, el abanico de especies utilizables es más reducida para todas las tipologías de calles, por lo que la elección de especies para áreas cercanas a la costa quedaría aún más restringida.

A la hora de elegir una especie de arbolado concreta conviene tener en cuenta algunas otras características que pueden presentar los espacios urbanos:

- Subregión climática: la vertiente atlántica, en zonas cercanas a la costa, requerirá una mayor adaptación a la salinidad, mientras que para la zona interior se necesitarán mayores tolerancias al calor.
- Distribución funcional de la calle: condicionará el adecuado posicionamiento del arbolado en la sección de la calle. Dado que es más apropiada la plantación de arbolado en zonas peatonales, aunque se deberá contemplar la distancia mínima de los elementos de arbolado respecto a las fachadas.

- Orientación de la calle: será determinante para determinar si es procedente disponer el arbolado en uno o a ambos lados de la calle, ya que, por ejemplo, en una hipotética calle de orientación Este-Oeste, el lado Sur de la misma estará sombreada por las edificaciones la mayor parte de las horas del día (Theeuwes, Steeneveld, Ronda, Heusinkveld et al, 2014).
- Separación entre elementos: vendrá condicionada por las características morfológicas del arbolado y su adecuación a la distribución funcional de la calle.

De cara a una recomendación de especies, procede utilizar los criterios que se enumeran a continuación. Respecto a las características morfológicas, se opta por recomendar especies con forma esférica o cónica, ya que su capacidad de sombreado es superior a las de forma cilíndrica-ovoidal (Kotzen, 2003).

En cuanto a las características fisiológicas, se considera suficiente que las especies presenten una densidad de foliación media o alta para atenuar la transmisión de radiación solar directa.

Por otra parte, se ha considerado relevante que, dado que el objetivo es la generación de sombra, las especies presenten un grado aceptable de tolerancia al calor, aunque deban también poder adaptarse a los períodos invernales. Es asimismo recomendable una adecuada adaptabilidad de las especies a las zonas pavimentadas.

En la Tabla 5.3 se presentan las especies consideradas como recomendables para su plantación en los entornos urbanos, determinándose su adaptabilidad a las tres subregiones climáticas de la parte oriental de la cornisa cantábrica.

Tabla 5.3 Especies recomendadas por ámbito geográfico de la cornisa cantábrica.

		Vertien. atlántica (*)	Zona intermedia	Zona interior
Calles estrechas	<i>Ligustrum lucidum</i>	SI	SI	SI
	<i>Prunus cerasifera</i>	NO	SI	SI
Calles medianas	<i>Acer opalus</i>	SI	SI	SI
	<i>Acer platanoides</i>	SI	SI	SI
	<i>Catalpa bignonioides</i>	SI	SI	SI
	<i>Celtis australis</i>	SI	SI	SI
	<i>Quercus pyrenaica</i>	SI	SI	SI
	<i>Sorbus domestica</i>	SI	SI	SI
Calles anchas	<i>Tilia tomentosa</i>	SI	SI	SI
Espacios abiertos	<i>Platanus hispanica</i>	NO	SI	SI
	<i>Quercus Ilex</i>	SI	SI	SI

(*) Consideradas como tales las zonas costeras.

La mayoría de estas especies se utilizan de manera bastante habitual en los entornos urbanos, lo que también se considera indicativo acerca de su idoneidad para las funciones contempladas en el presente estudio.

Según las directrices planteadas para el proceso de selección de especies arbóreas, las principales conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

- Se ha obtenido un interesante abanico de especies de arbolado (29 especies en total) utilizables en entornos urbanos para el sombreado. Se han seleccionado especies utilizables en todas las tipologías de calle contempladas.
- Las especies con un mayor volumen de copa proporcionarán una mayor superficie de sombra, por lo que se recomienda la utilización de especies con forma de copa esférica o cónica, aunque su plantación en calles de anchura reducida será más complicada por su posible influencia en las fachadas de los edificios.

- Se observan mayores dificultades para seleccionar especies aptas para calles estrechas, donde sus dimensiones están más limitadas, por lo que se deberá prever un mayor agrupamiento de unidades para la obtención de áreas de sombra más extensas.
- Las dificultades para integrar el arbolado en calles de anchura reducida lleva a pensar en la posibilidad de una redistribución funcional de la calle según la cual se podría conseguir una más adecuada zonificación respecto a la radiación solar y unas mayores posibilidades de disposición de arbolado.
- 9 de las 29 especies seleccionadas presentan una baja tolerancia a las zonas pavimentadas, donde las tierras presentan una mayor compacidad y existe un menor aporte de agua atmosférica. Por otro lado, 23 de las 29 especies seleccionadas tienen una tolerancia aceptable (media o alta) al calor lo que hace posible su utilización en cualquiera de las tres subregiones climáticas contempladas.
- Casi la mitad de las especies seleccionadas presentan una baja tolerancia a los ambientes salinos, por lo que el número de especies utilizables en los entornos urbanos de las zonas costeras es más restringido.

En este proceso se ha propuesto una metodología para la selección de especies de arbolado aptas para el sombreado, lo que no restringe la posible utilización con otros fines de especies no seleccionadas en base a las directrices empleadas.

Las propiedades de foliación han sido un factor determinante en la elección de especies, siendo las de hoja caduca las más adecuadas para su utilización en entornos urbanos de zonas climáticas donde las necesidades de sombreado se reducen a los períodos más calurosos del año. Las características morfológicas inadecuadas han supuesto la principal causa de descarte para las especies no seleccionadas.

5.2 Obtención de transmisividad de las especies seleccionadas mediante fotografías hemisféricas

En este apartado se presentan los resúmenes de las características biofísicas de las especies de arbolado seleccionadas obtenidas según el procedimiento expuesto en el apartado 4.4.3.

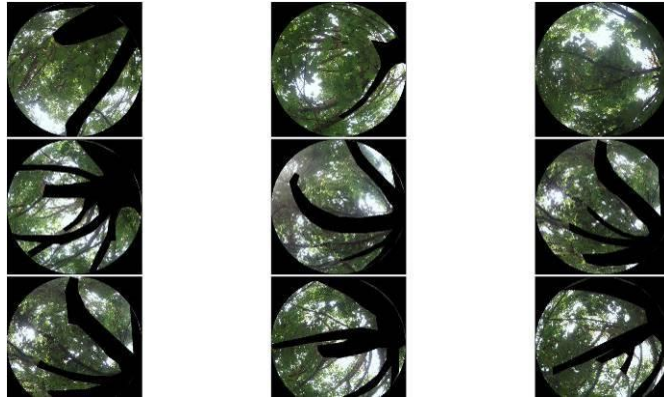
Conviene remarcar que los resultados biofísicos expuestos para cada especie no se consideran totalmente precisos debido a que los mismos pueden estar parcialmente influenciados por diversos factores como pueden ser el estado de la vegetación en el día en el que se obtienen las fotografías hemisféricas o los niveles de luminosidad en el momento de su obtención. Asimismo, es necesario tener en cuenta que los valores PAI y la transmisividad son parámetros dinámicos que varían día a día incluso año a año para cada especie.

Por lo tanto, asumiendo que las técnicas de medición utilizadas pueden presentar cierto grado de incertidumbre, el principal objetivo de los resultados obtenidos es la confirmación de que los valores de fracción de radiación absorbida son adecuados para la reducción del estrés térmico por calor. Igualmente, los resultados proporcionan una estimación a modo comparativo para las características de las distintas especies al haberse utilizado en todos los casos los mismos criterios para el procesado de fotografías en el modelo CAN-EYE.

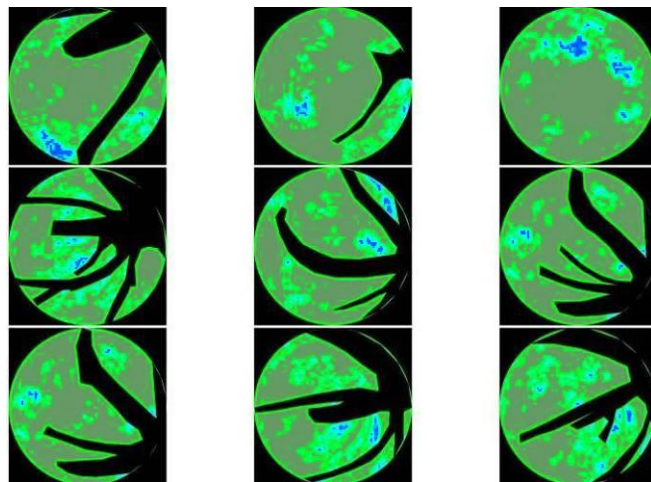
Los documentos gráficos representados para cada especie se corresponden con las fotografías hemisféricas procesadas (incluyendo las máscaras introducidas para la no consideración de los troncos), los resultados de clasificación del pixelado, y la gap-fraction bidireccional. Los parámetros biofísicos medios presentados son la transmisividad, el PAI y el ALA. Para la transmisividad (considerada =1 - FAPAR) se adopta un valor dinámico según el intervalo “Black sky” - “White sky”, y “measured” (instantáneos) - “modeled” (computado) respectivamente. Para el PAI y el ALA se adoptan los valores “true” medidos según el método CAN-EYE V 6.1.

Especie: **Acer campestre** Arce menor

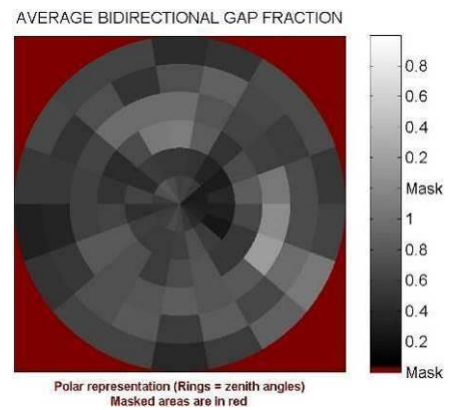
Fotografías hemisféricas



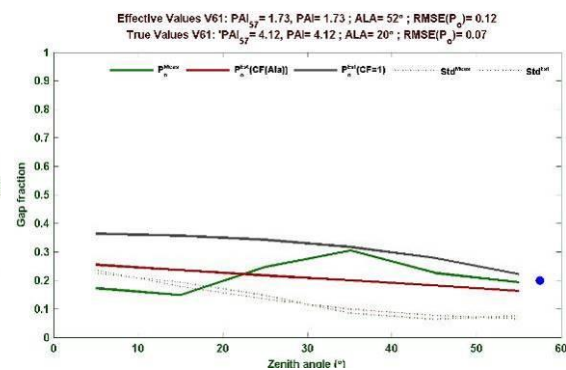
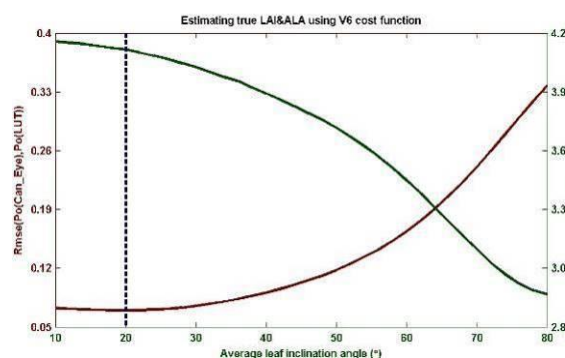
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



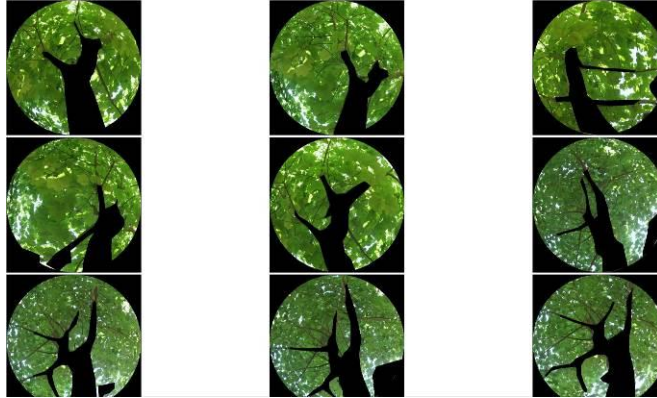
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.72	0.73
MEASURED FAPAR	0.78	0.78

Resultados (resumen):

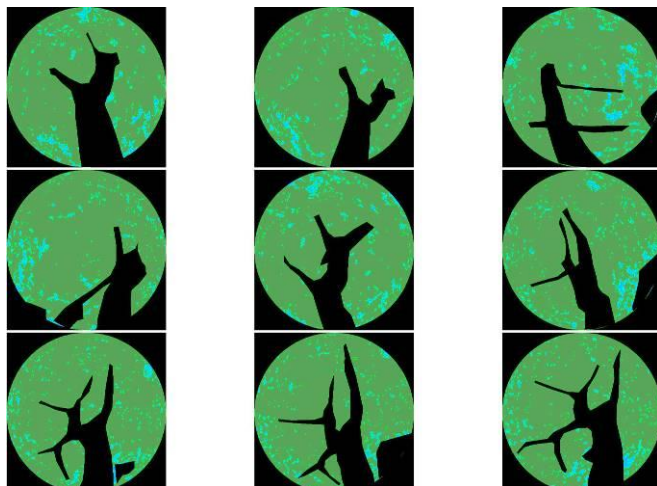
Transmisividad: 0,22 – 0,28
 PAI: 4,12
 ALA: 20°

Especie: **Acer opalus** Acirón

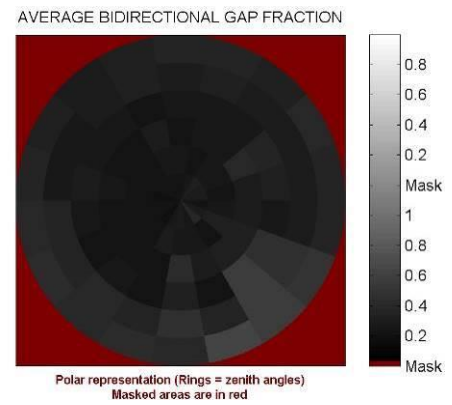
Fotografías hemisféricas



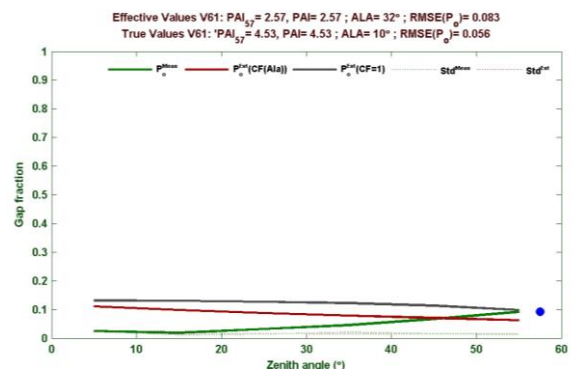
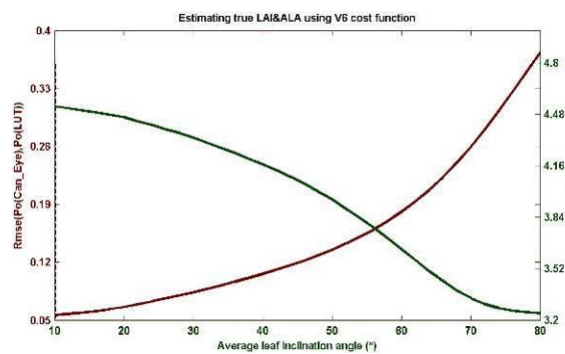
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



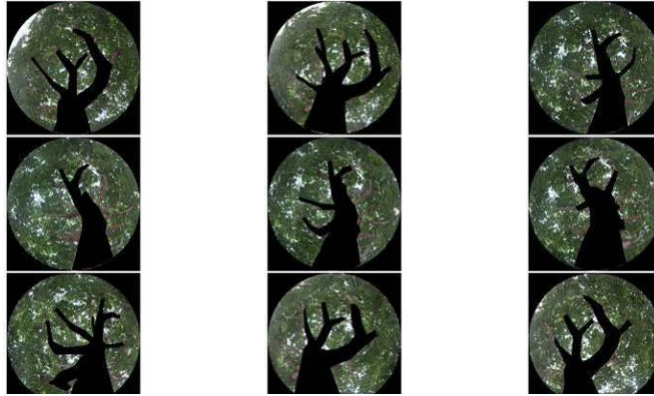
Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,08 – 0,11
 PAI: 4,53
 ALA: 10°

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.89	0.88
MEASURED FAPAR	0.95	0.92

Especie: **Acer platanoides** Arce real

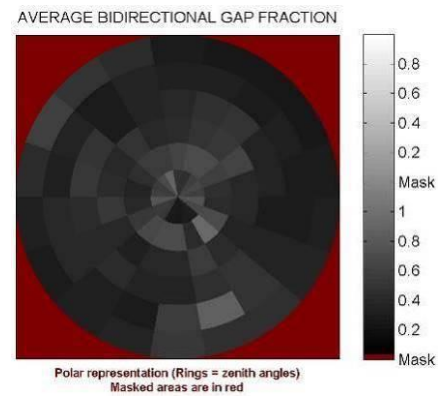
Fotografías hemisféricas



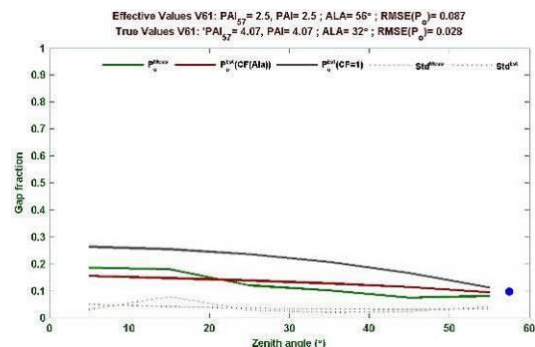
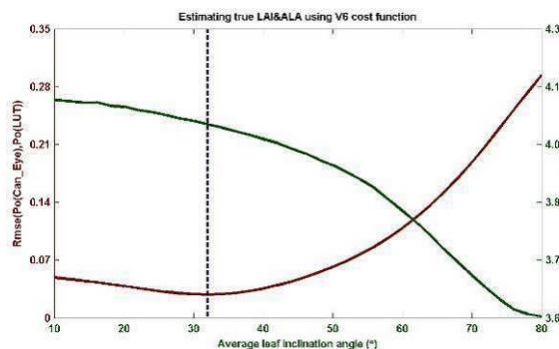
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.88	0.83
MEASURED FAPAR	0.93	0.89

Resultados (resumen):

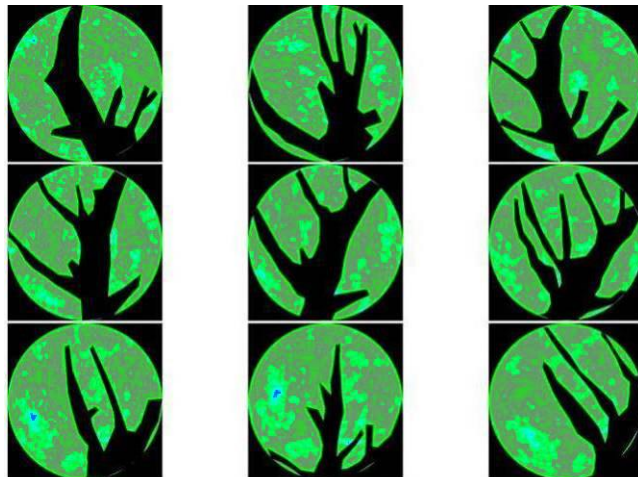
Transmisividad: 0,07 – 0,17
 PAI: 4,07
 ALA: 32°

Especie: **Acer pseudoplatanus** Falso plátano

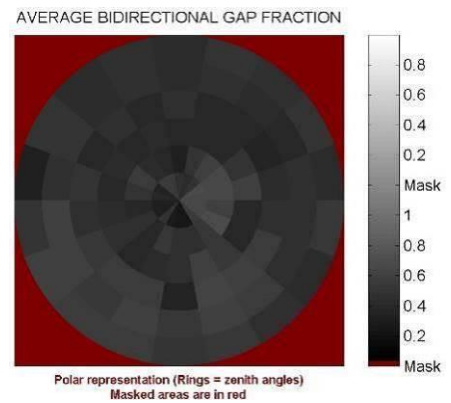
Fotografías hemisféricas



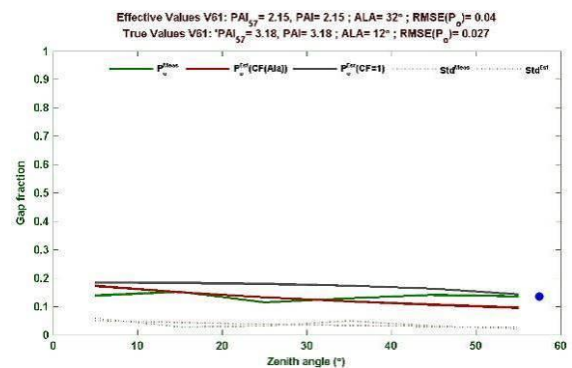
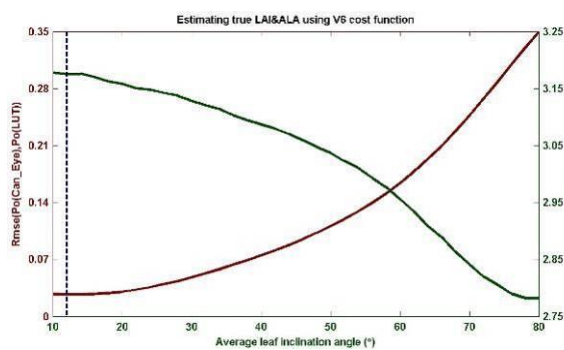
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



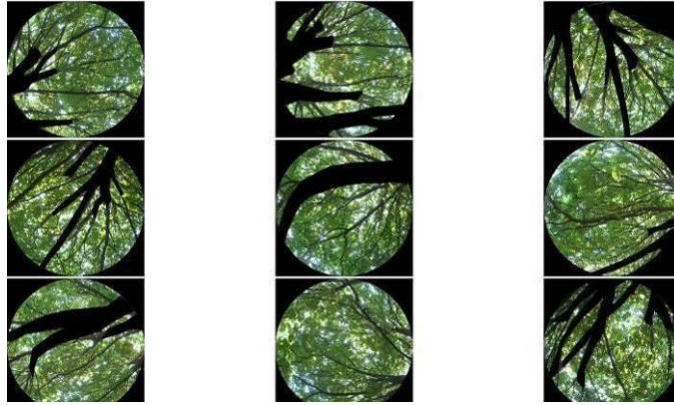
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.86	0.83
MEASURED FAPAR	0.88	0.86

Resultados (resumen):

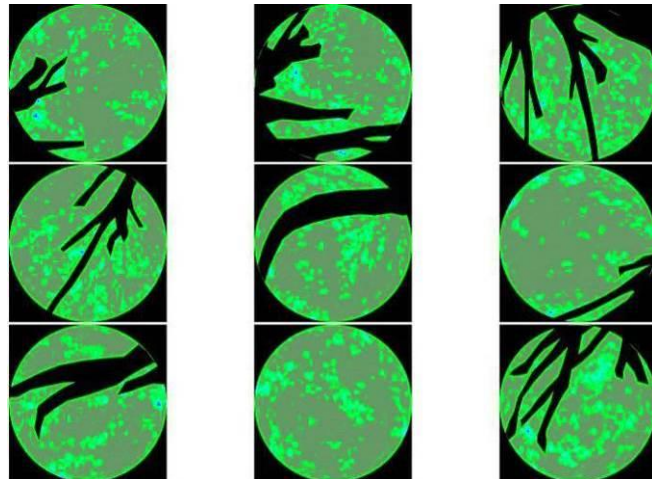
Transmisividad: 0,12 – 0,17
 PAI: 3,18
 ALA: 12°

Especie: ***Aesculus hippocastanum*** Castaño de indias

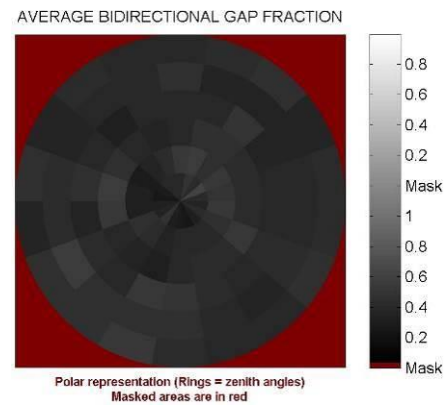
Fotografías hemisféricas



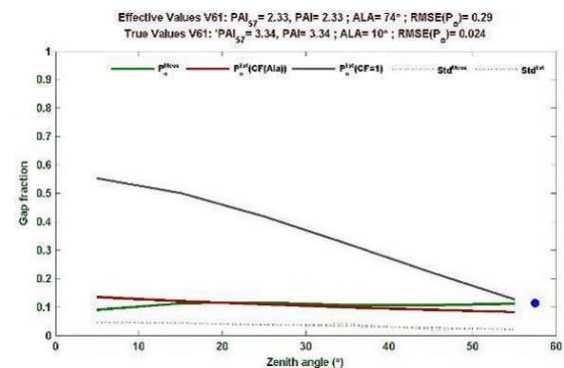
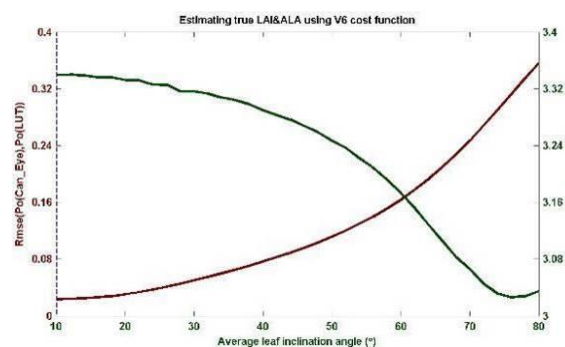
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



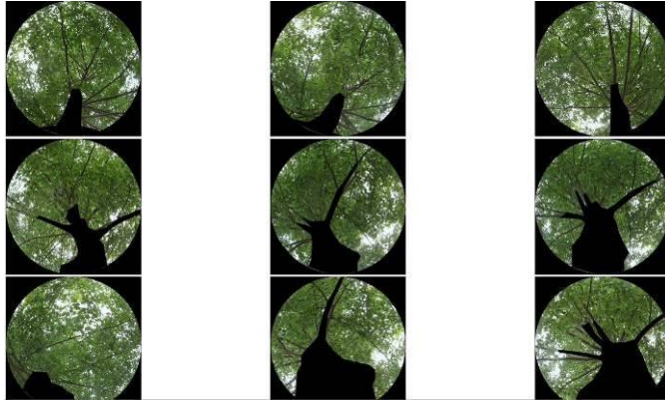
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.71	0.75
MEASURED FAPAR	0.90	0.89

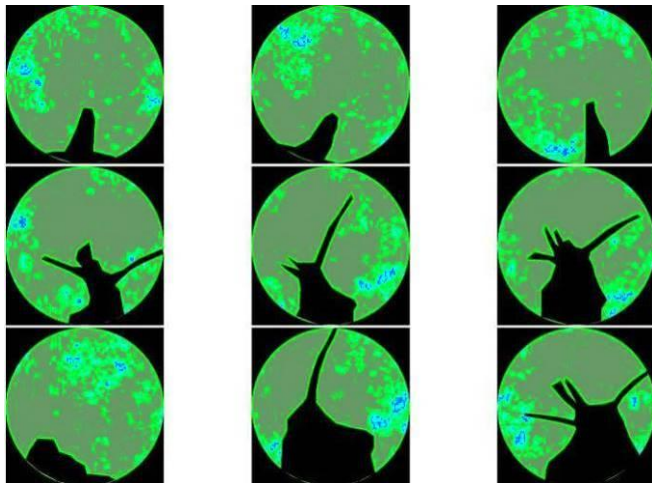
Transmisividad: 0,10 – 0,25
 PAI: 3,34
 ALA: 10°

Especie: ***Alnus glutinosa*** Aliso

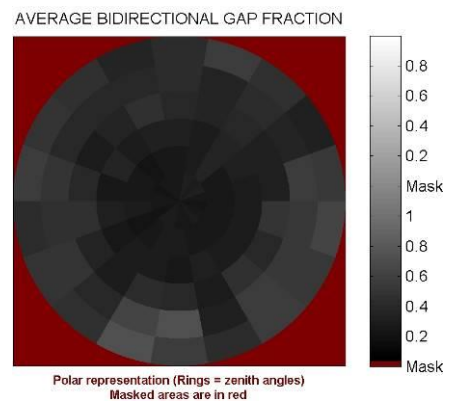
Fotografías hemisféricas



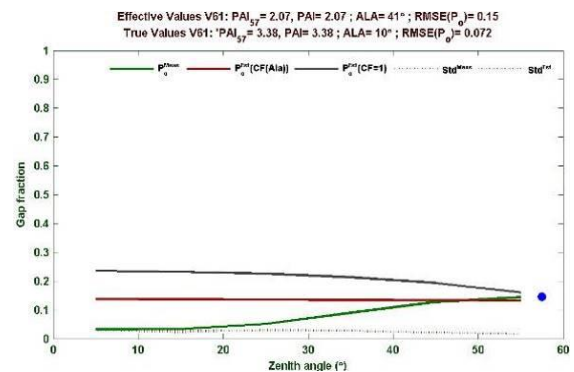
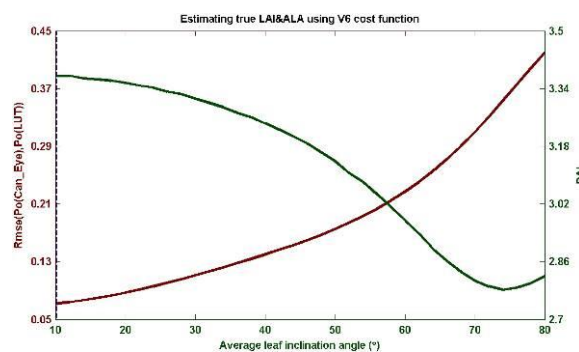
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



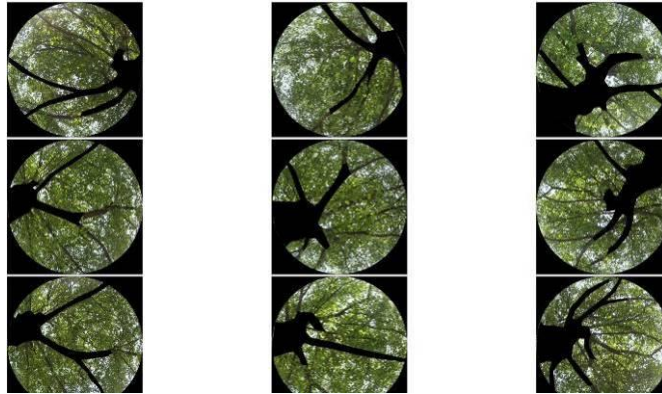
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.84	0.81
MEASURED FAPAR	0.88	0.89

Resultados (resumen):

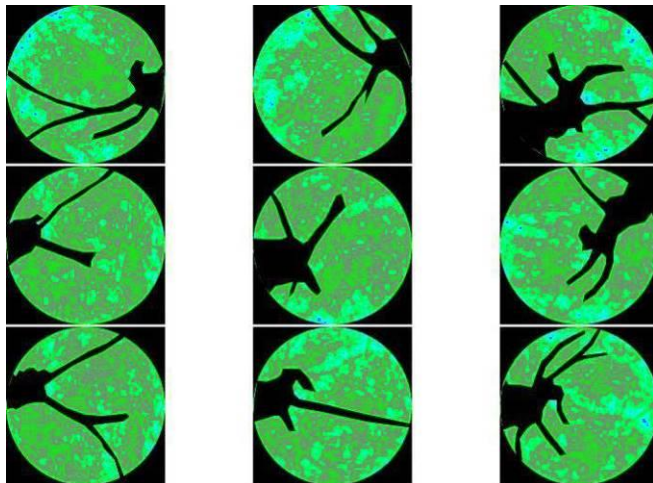
Transmisividad: 0,12 – 0,19
 PAI: 3,38
 ALA: 10°

Especie: **Betula alba** Abedul

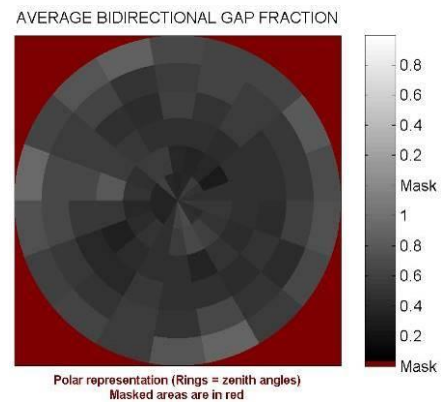
Fotografías hemisféricas



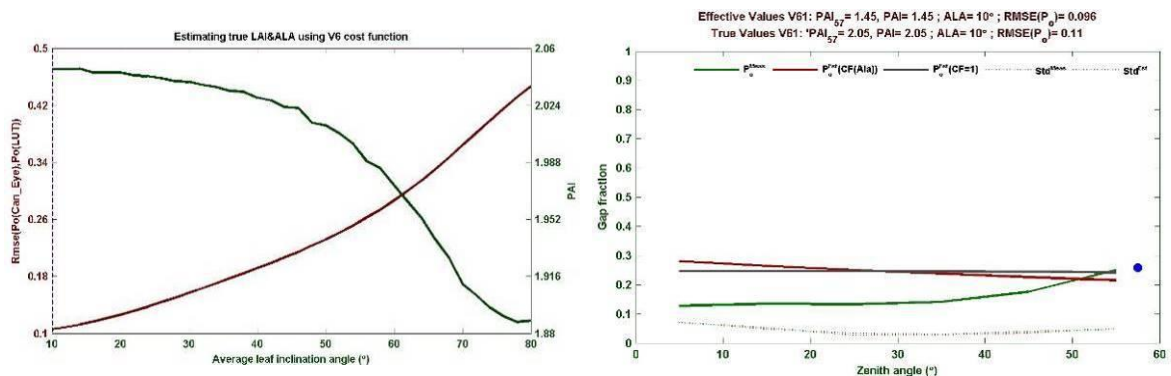
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



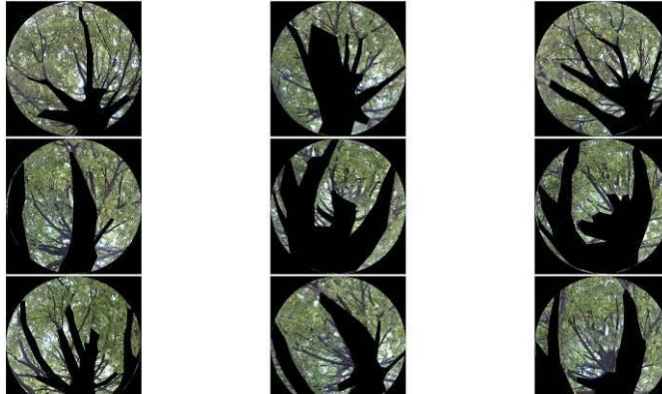
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.76	0.74
MEASURED FAPAR	0.83	0.80

Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,17 – 0,26
 PAI: 2,05
 ALA: 10°

Especie: ***Carpinus betulus*** Carpe

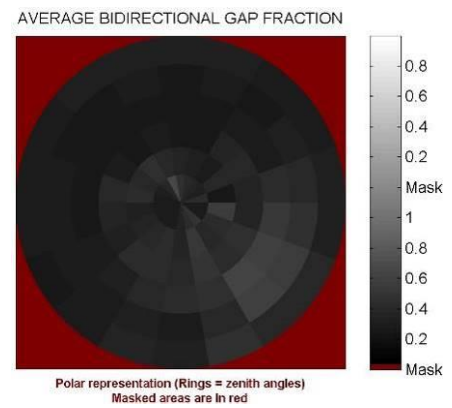
Fotografías hemisféricas



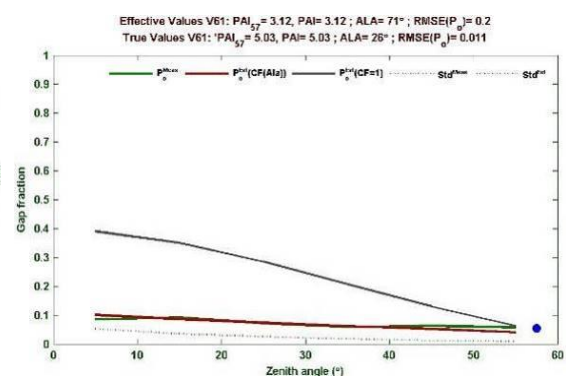
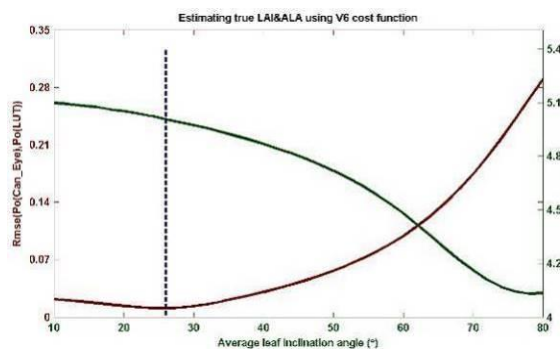
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



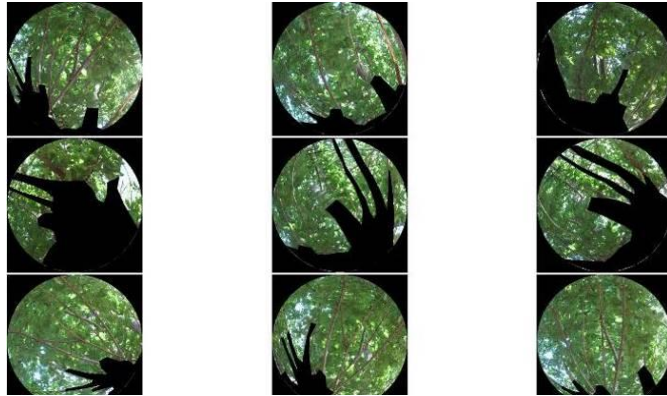
Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,05 – 0,17
 PAI: 5,03
 ALA: 26°

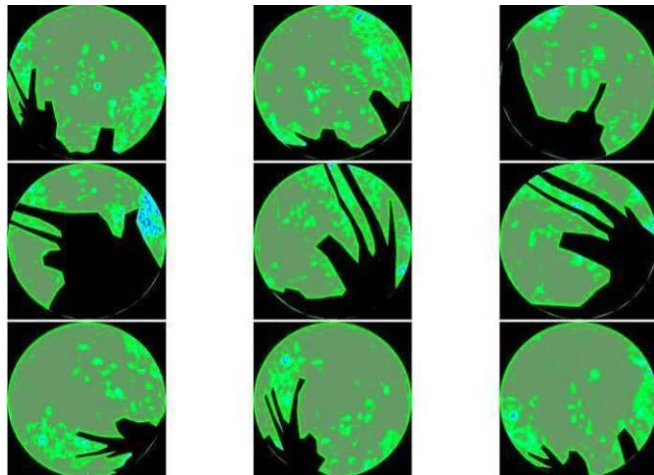
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.91	0.83
MEASURED FAPAR	0.95	0.92

Especie: ***Castanea sativa*** Castaño

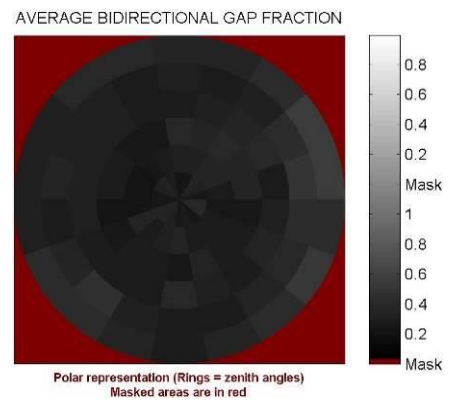
Fotografías hemisféricas



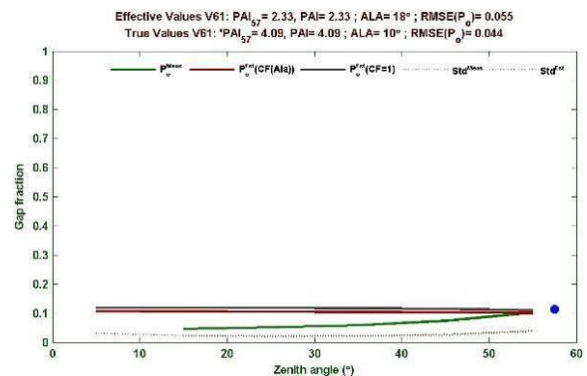
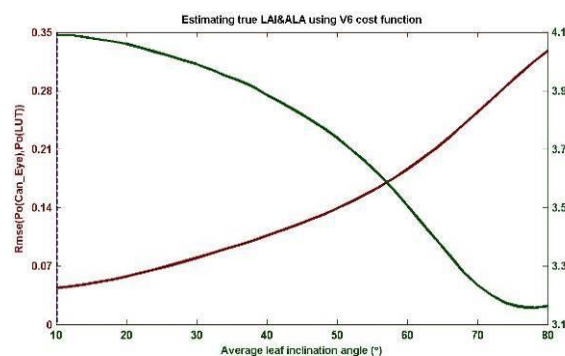
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



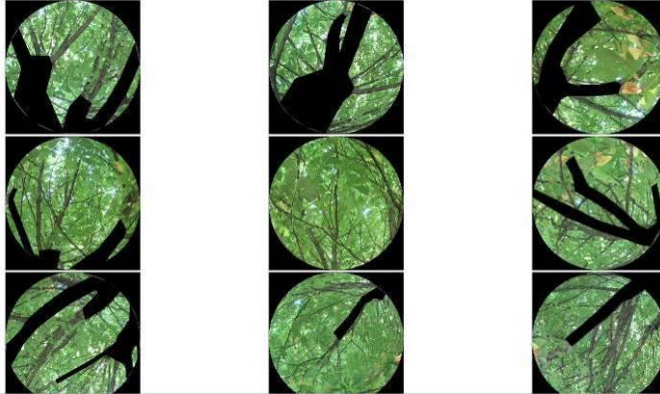
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.89	0.87
MEASURED FAPAR	0.92	NaN

Resultados (resumen):

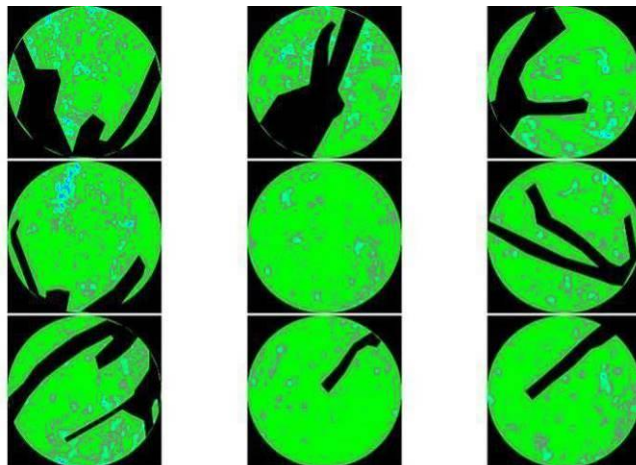
Transmisividad: 0,08 – 0,13
 PAI: 4,09
 ALA: 10°

Especie: **Catalpa bignonioides** Catalpa común

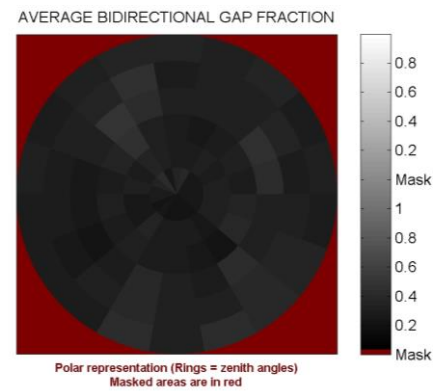
Fotografías hemisféricas



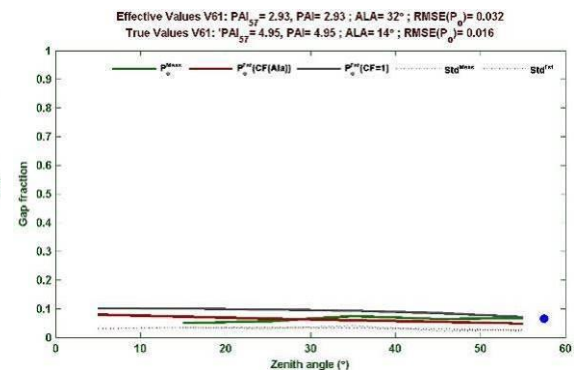
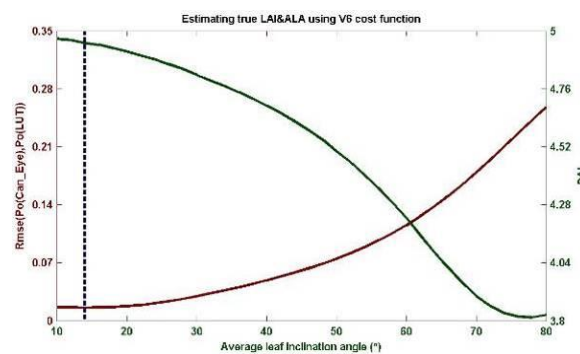
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



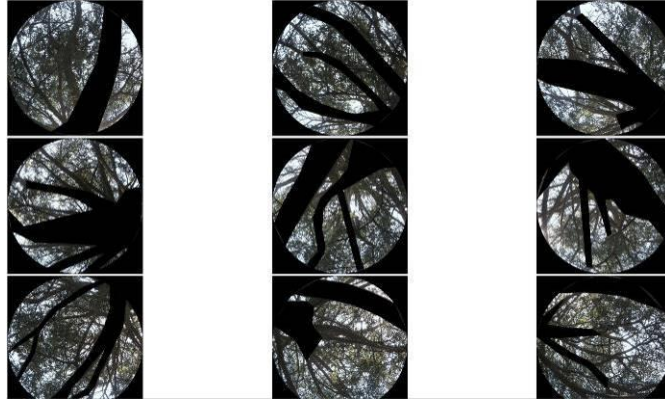
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.92	0.90
MEASURED FAPAR	0.94	NaN

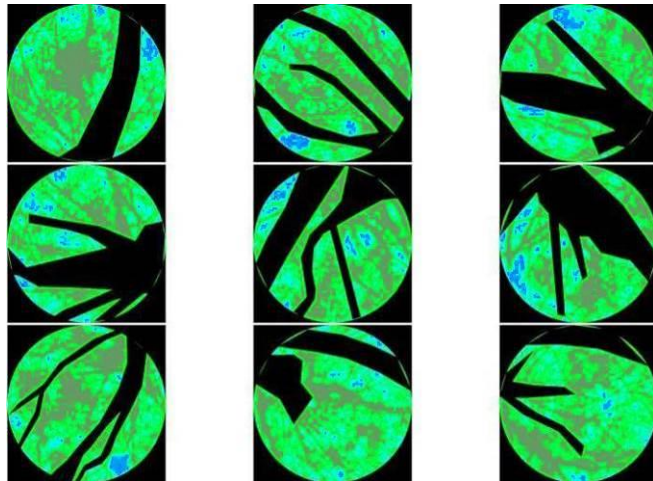
Transmisividad: 0,06 – 0,10
 PAI: 4,95
 ALA: 14°

Especie: ***Cedrus atlantica*** Cedro del Atlas

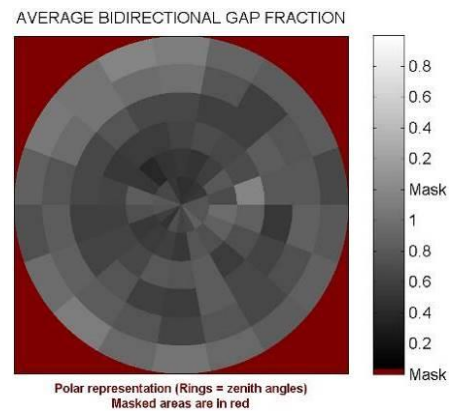
Fotografías hemisféricas



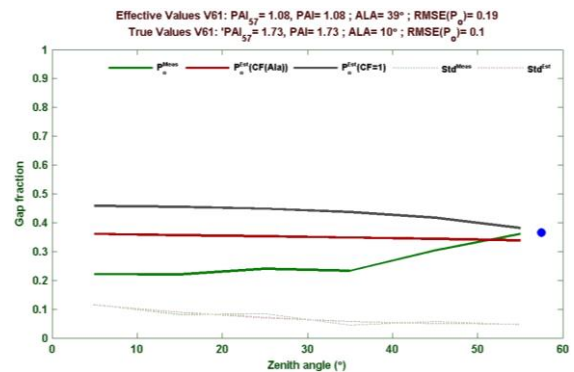
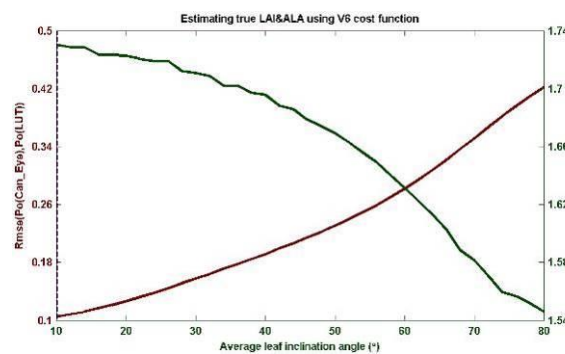
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



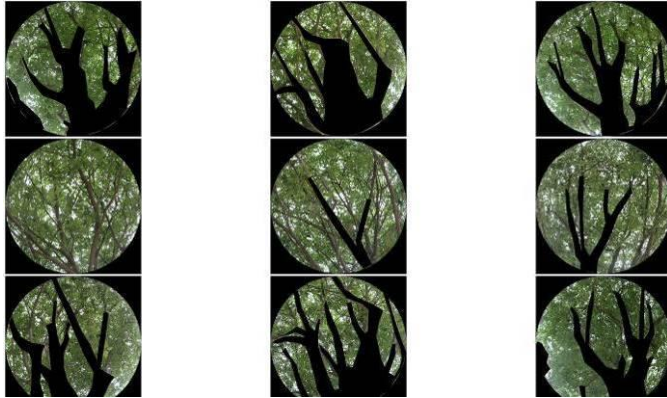
Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,36 – 0,40
 PAI: 1,73
 ALA: 10°

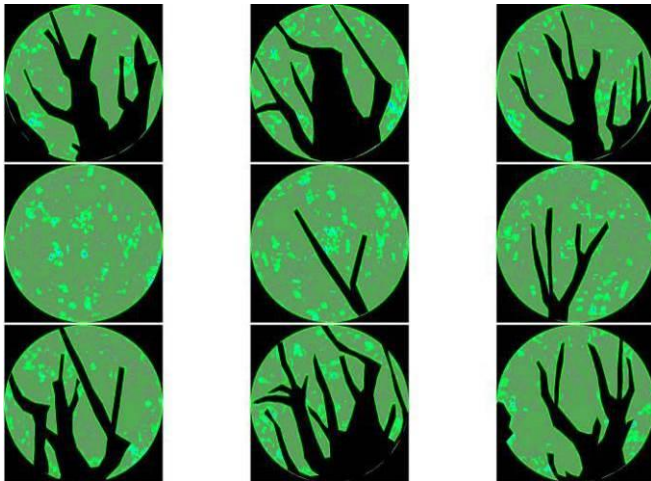
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.60	0.60
MEASURED FAPAR	0.74	0.71

Especie: ***Celtis australis*** Almez

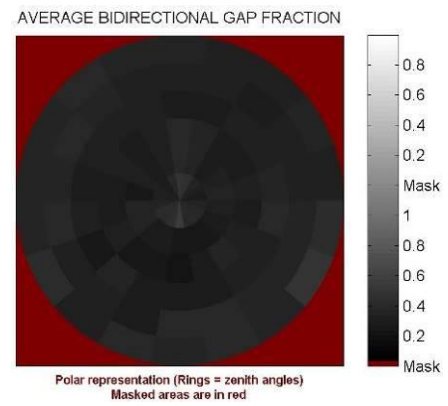
Fotografías hemisféricas



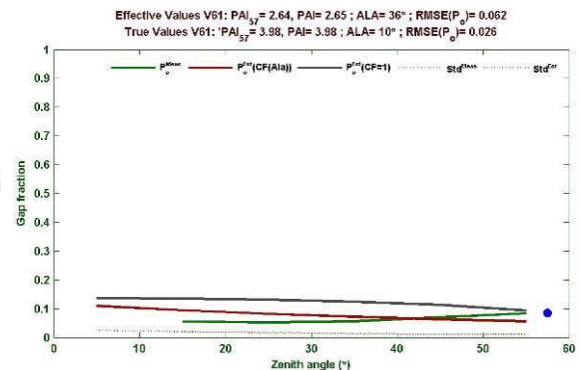
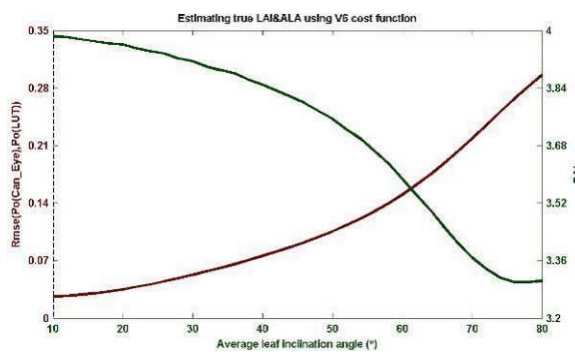
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



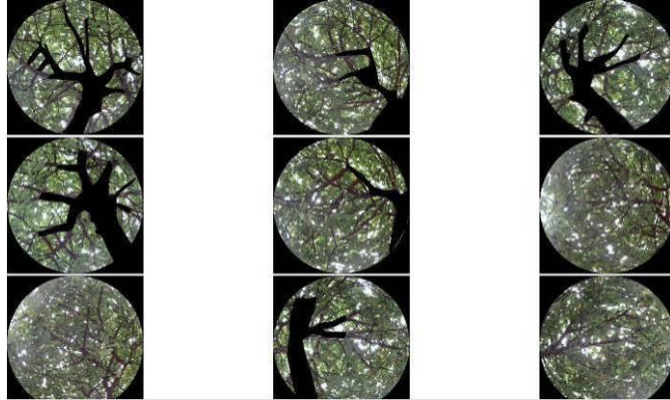
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.90	0.88
MEASURED FAPAR	0.94	NaN

Resultados (resumen):

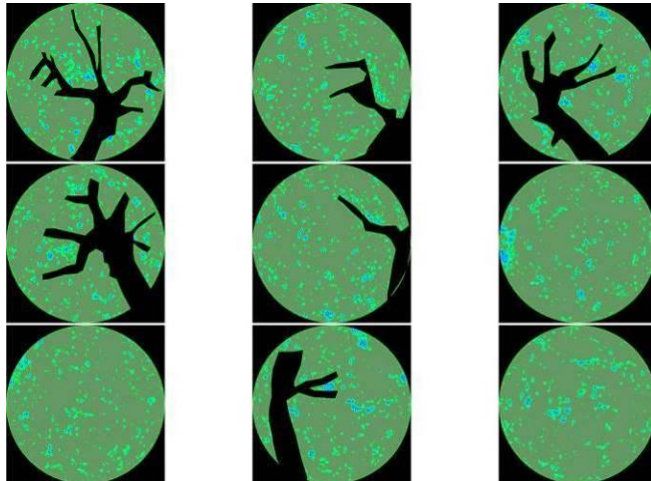
Transmisividad: 0,06 – 0,12
 PAI: 3,98
 ALA: 10°

Especie: ***Cercis siliquastrum*** **Árbol del amor**

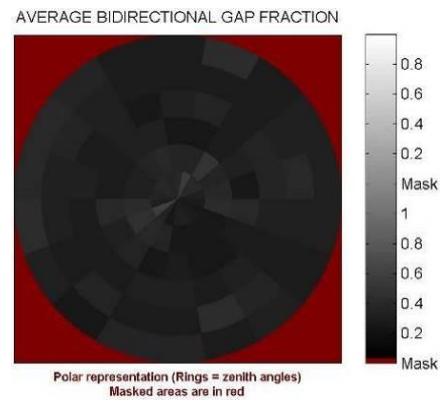
Fotografías hemisféricas



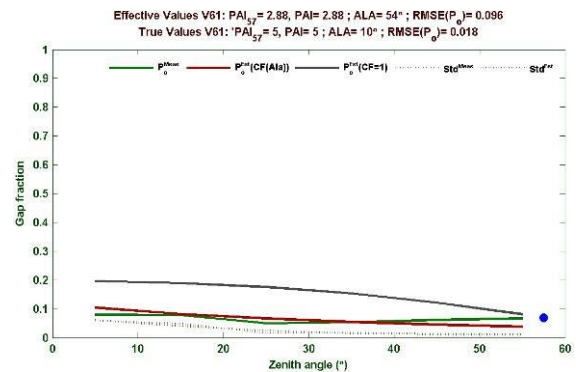
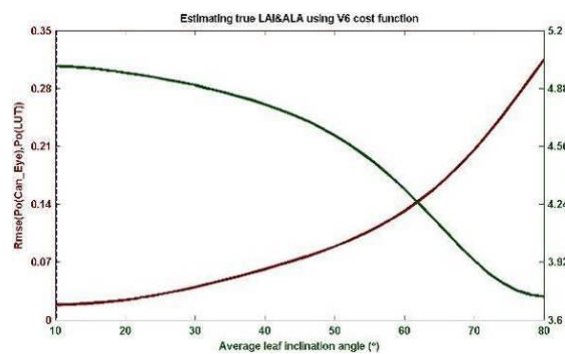
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



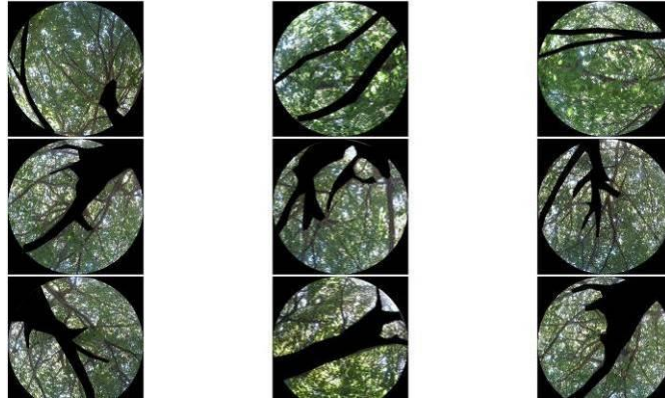
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.89	0.87
MEASURED FAPAR	0.95	0.92

Resultados (resumen):

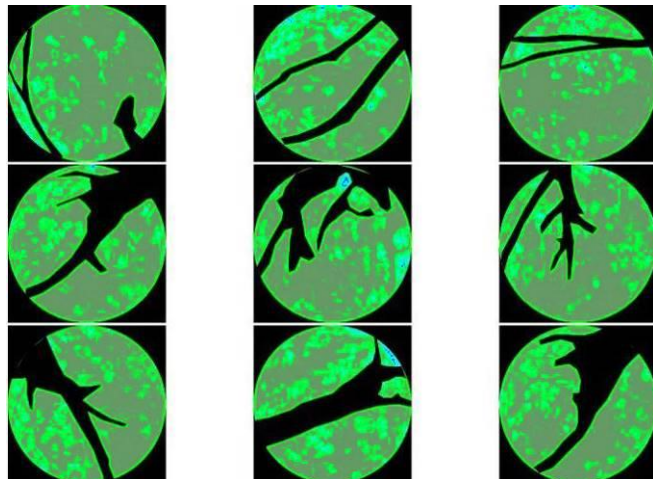
Transmisividad: 0,05 – 0,13
 PAI: 5,00
 ALA: 10°

Especie: ***Fagus sylvatica*** Haya

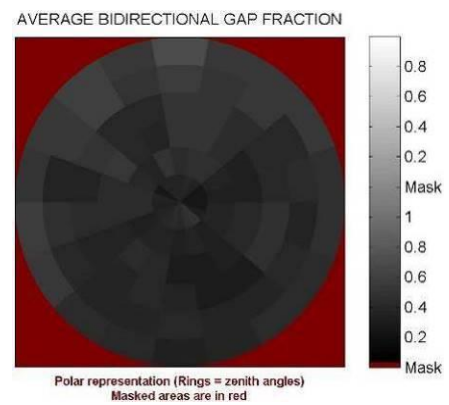
Fotografías hemisféricas



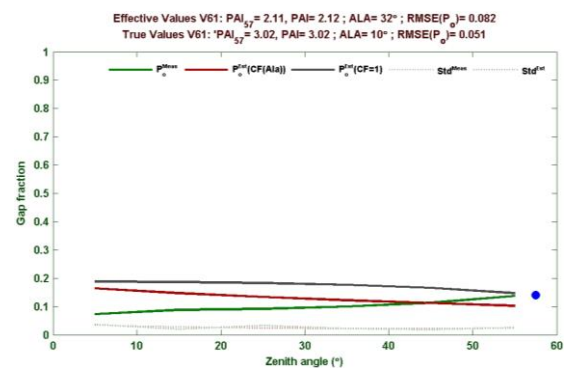
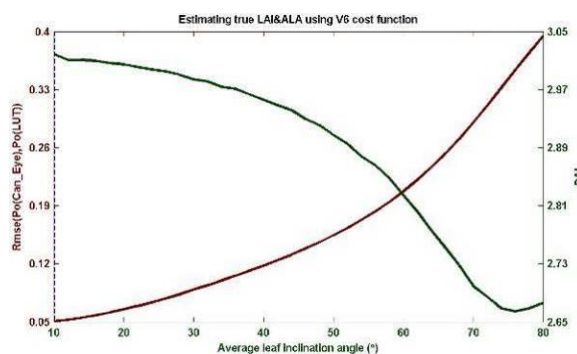
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



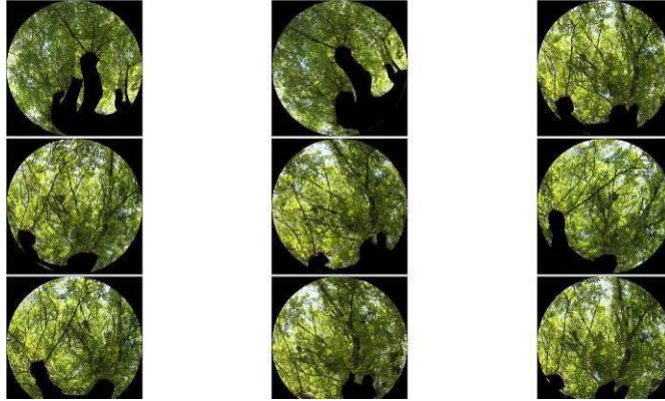
Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,10 – 0,17
 PAI: 3,02
 ALA: 10°

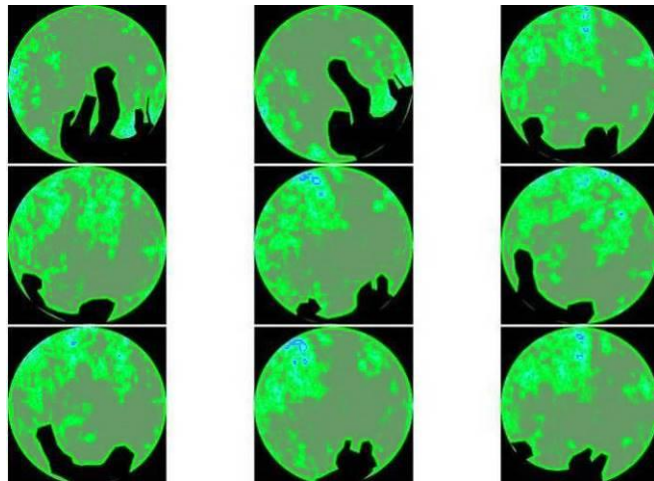
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.84	0.83
MEASURED FAPAR	0.90	0.88

Especie: ***Fraxinus excelsior*** Fresno

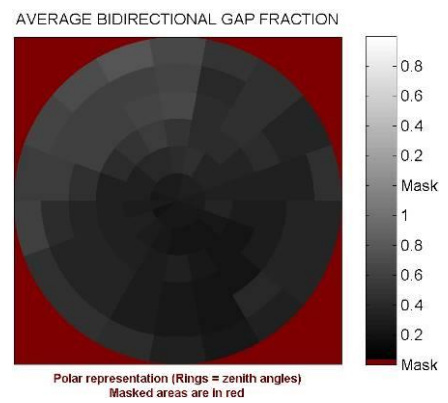
Fotografías hemisféricas



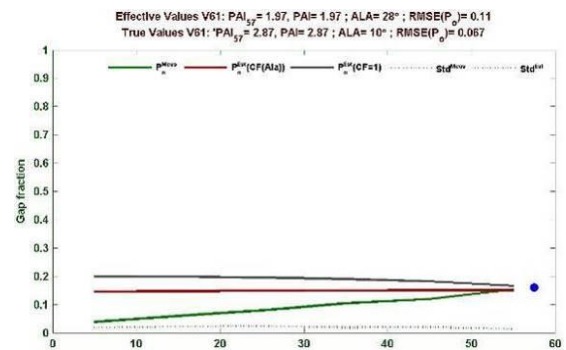
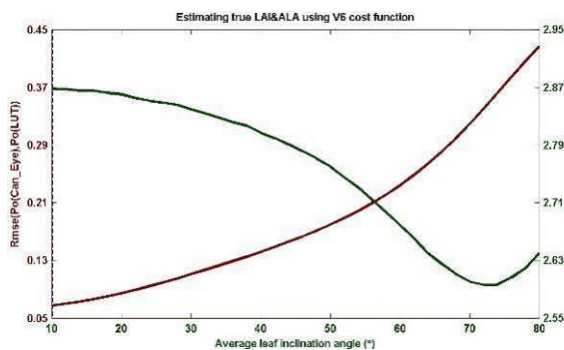
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



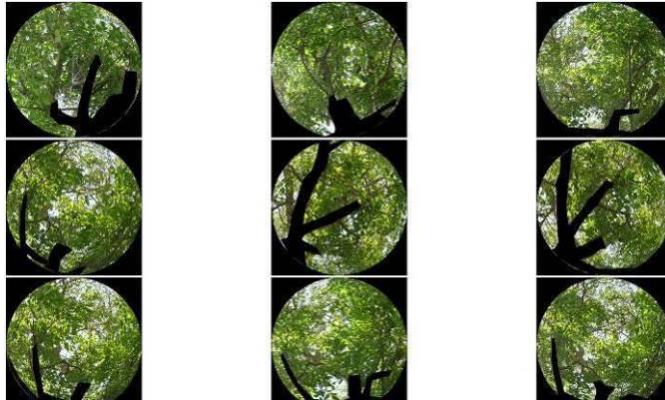
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.84	0.81
MEASURED FAPAR	0.88	0.87

Resultados (resumen):

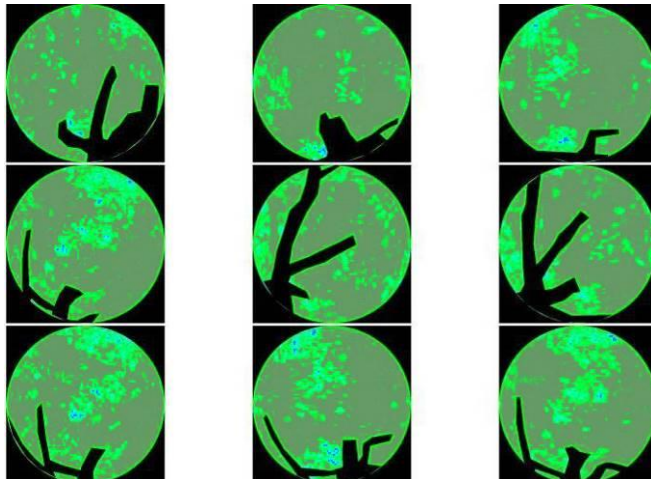
Transmisividad: 0,12 – 0,19
 PAI: 2,87
 ALA: 10°

Especie: **Juglans regia** Nogal

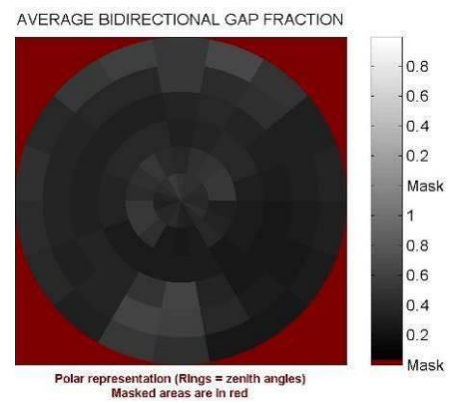
Fotografías hemisféricas



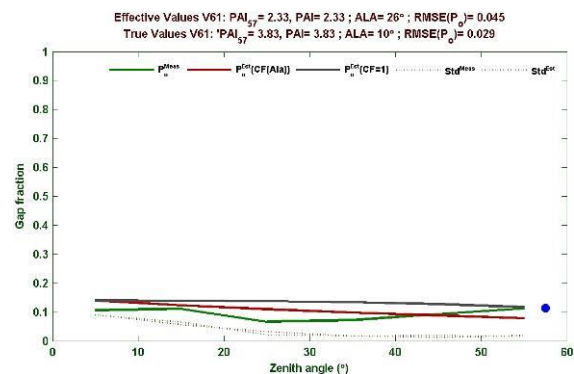
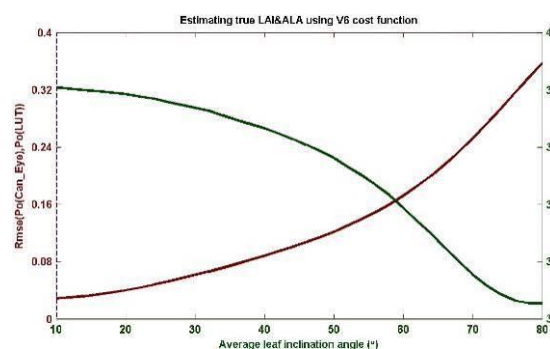
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



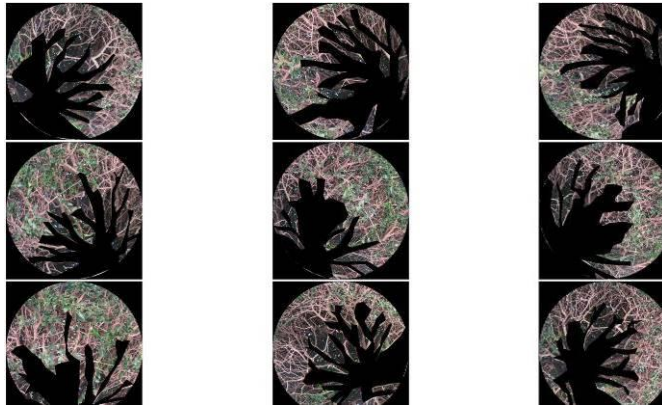
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.89	0.86
MEASURED FAPAR	0.91	0.89

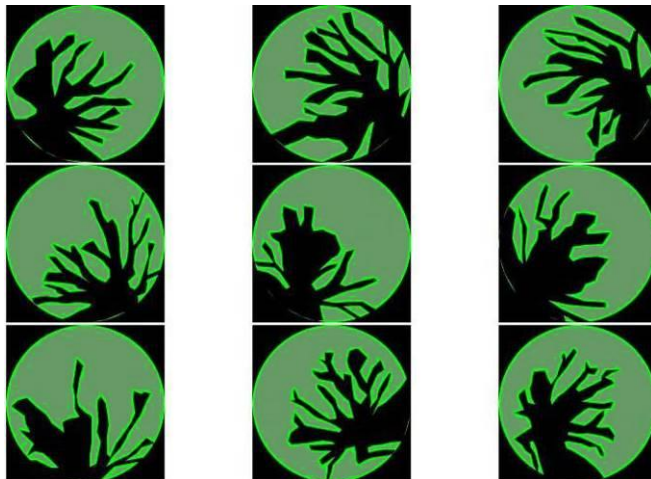
Transmisividad: 0,09 – 0,14
 PAI: 3,83
 ALA: 10°

Especie: ***Ligustrum lucidum*** Aligustre

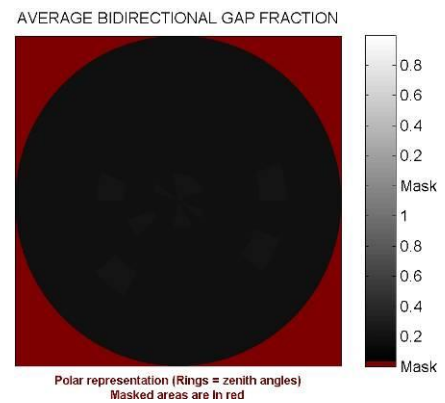
Fotografías hemisféricas



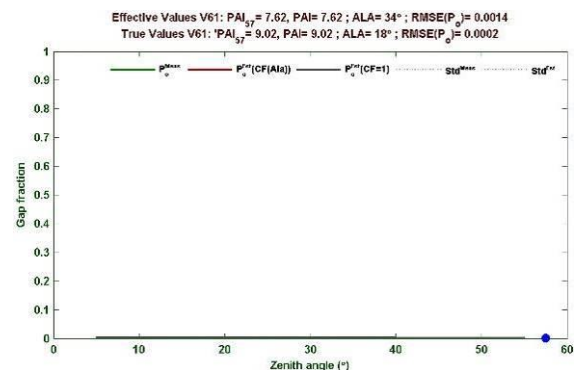
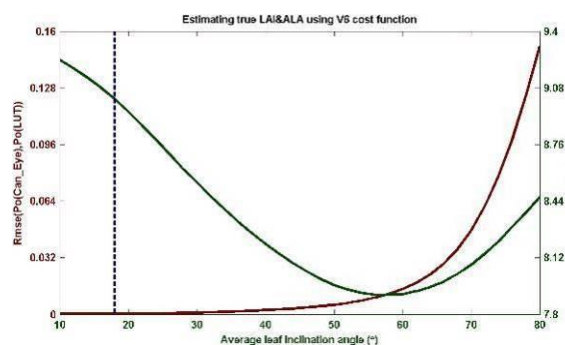
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



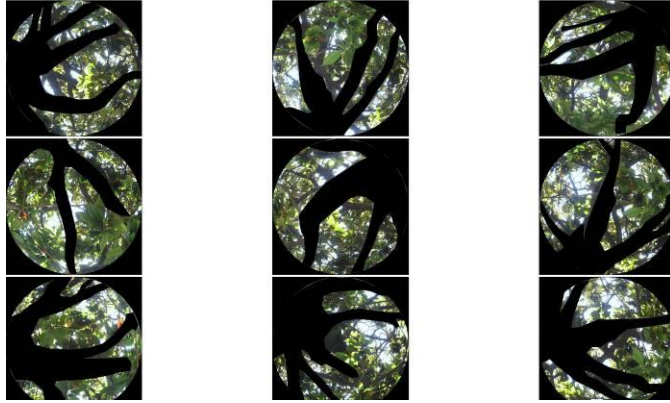
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	1.00	0.97
MEASURED FAPAR	1.00	0.97

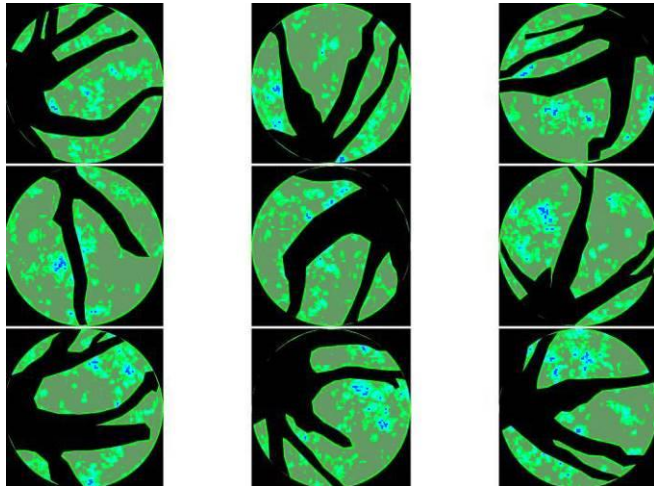
Transmisividad: 0,00 – 0,03
 PAI: 9,02
 ALA: 18°

Especie: **Magnolia grandiflora** Magnolia común

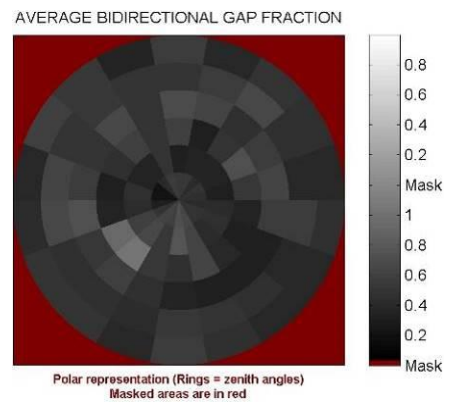
Fotografías hemisféricas



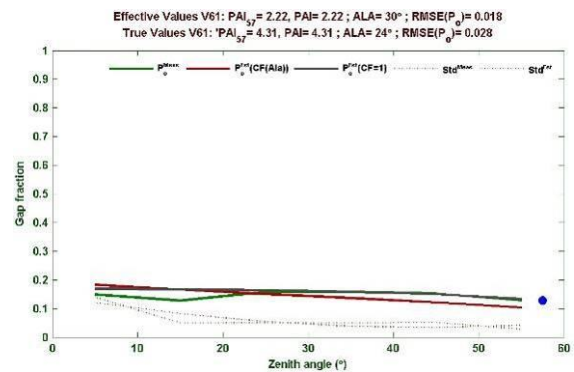
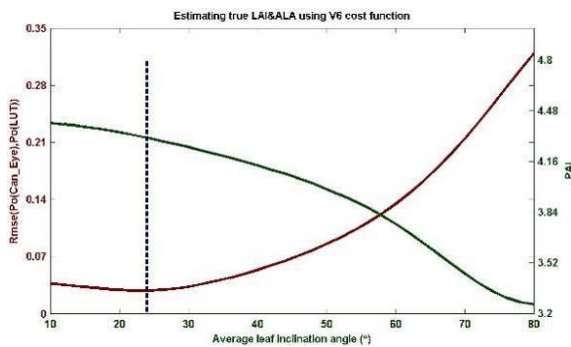
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



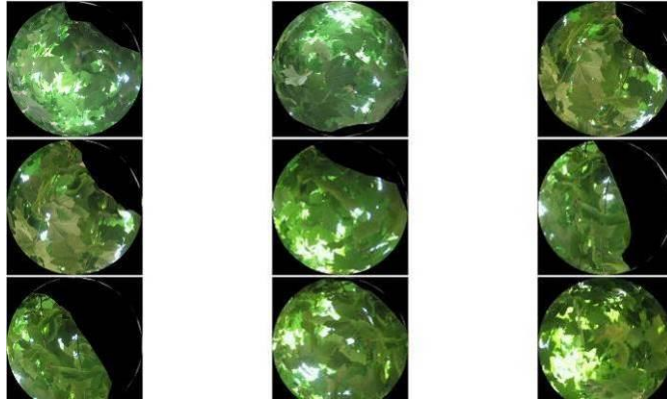
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.86	0.84
MEASURED FAPAR	0.86	0.85

Resultados (resumen):

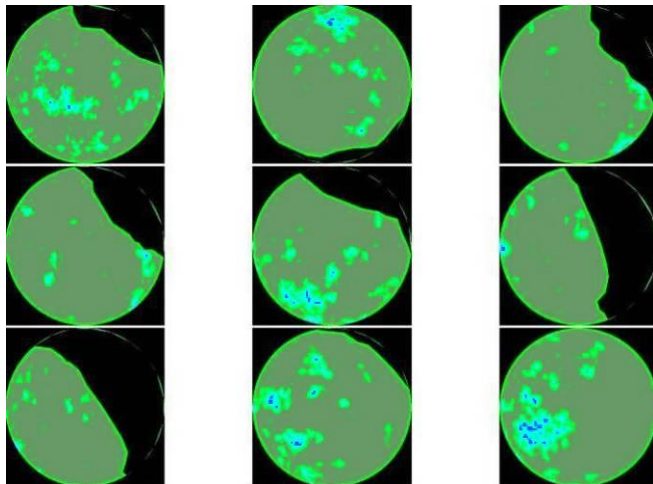
Transmisividad: 0,14 – 0,16
 PAI: 4,31
 ALA: 24°

Especie: **Platanus hispanica** Plátano común

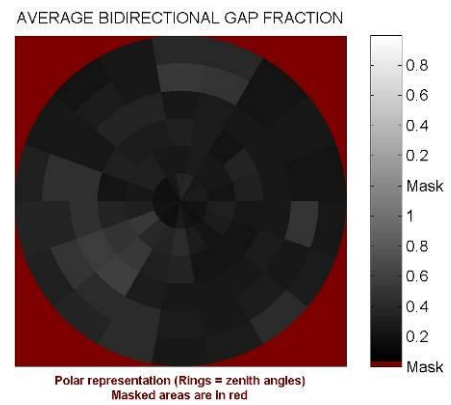
Fotografías hemisféricas



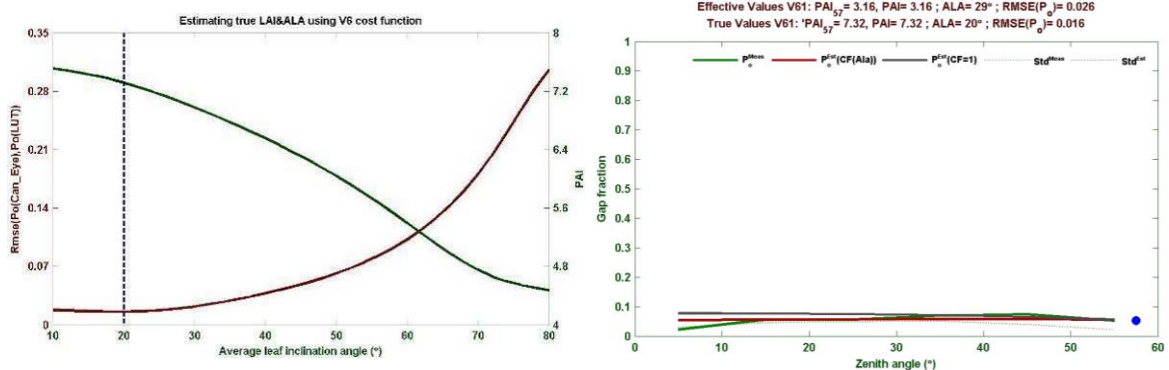
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



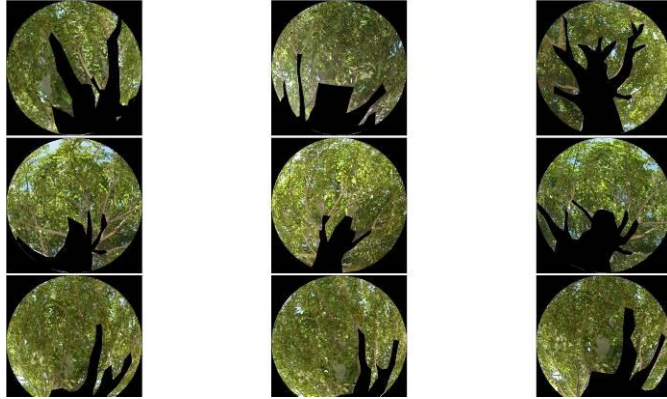
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.94	0.92
MEASURED FAPAR	0.94	0.92

Resultados (resumen):

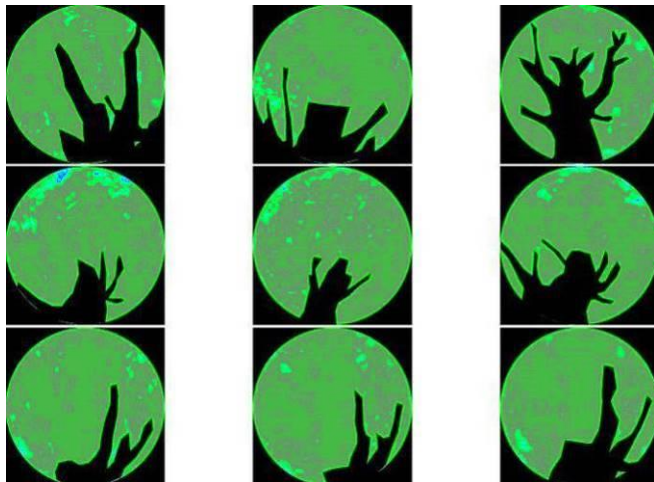
Transmisividad: 0,06 – 0,08
 PAI: 7,32
 ALA: 20°

Especie: **Populus alba** Álamo blanco

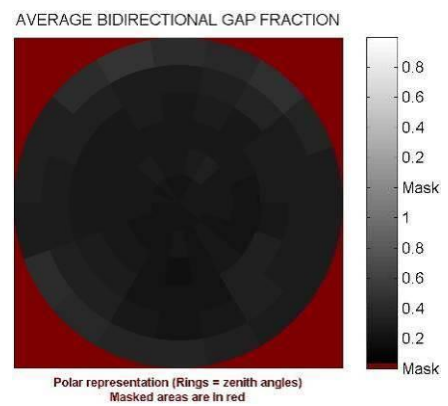
Fotografías hemisféricas



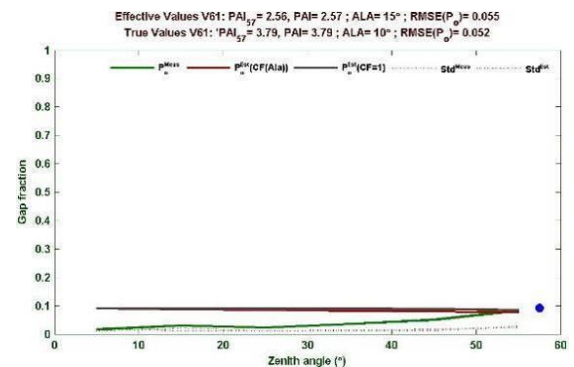
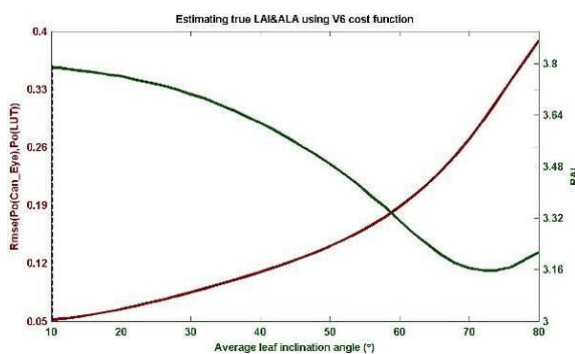
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



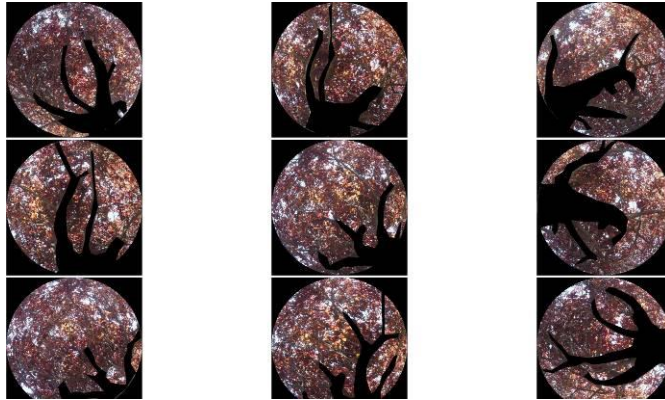
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.92	0.89
MEASURED FAPAR	0.95	0.92

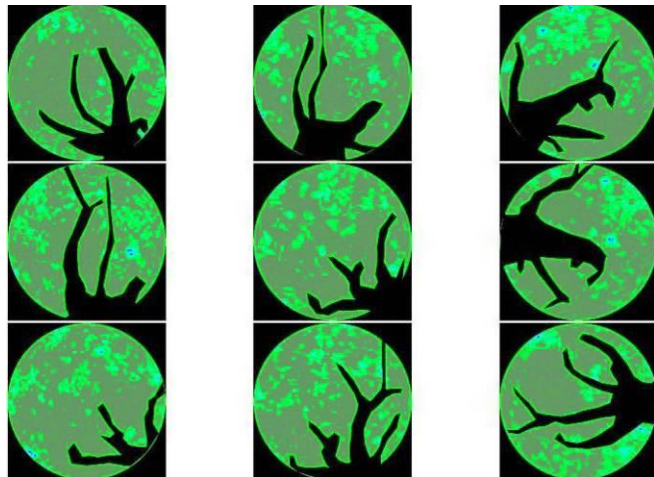
Transmisividad: 0,05 – 0,11
 PAI: 3,79
 ALA: 10°

Especie: **Prunus cerasifera** Ciruelo

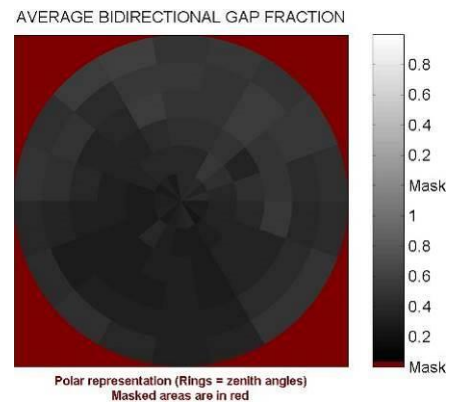
Fotografías hemisféricas



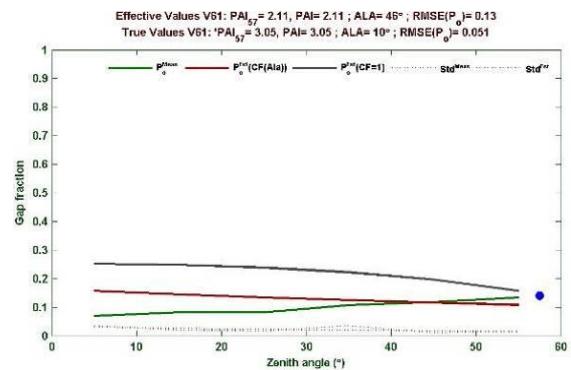
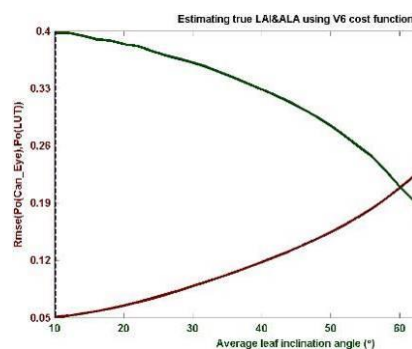
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



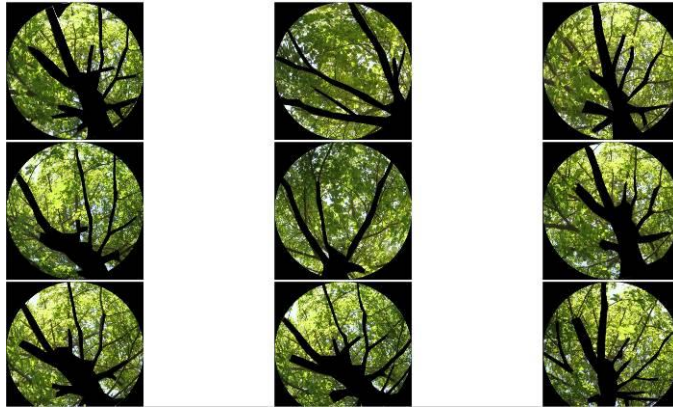
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.81	0.81
MEASURED FAPAR	0.90	0.88

Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,10 – 0,19
 PAI: 3,05
 ALA: 10°

Especie: **Quercus faginea** Roble carrasqueño

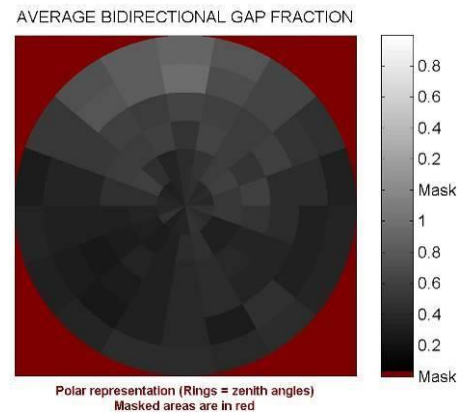
Fotografías hemisféricas



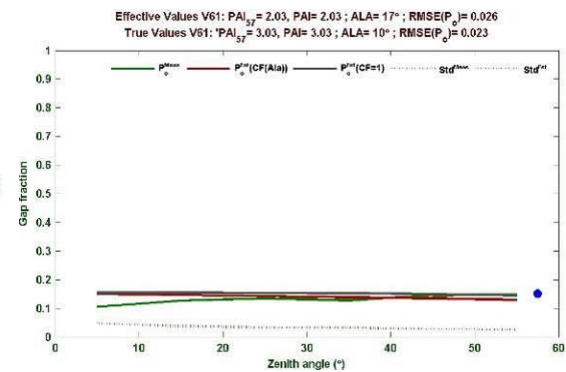
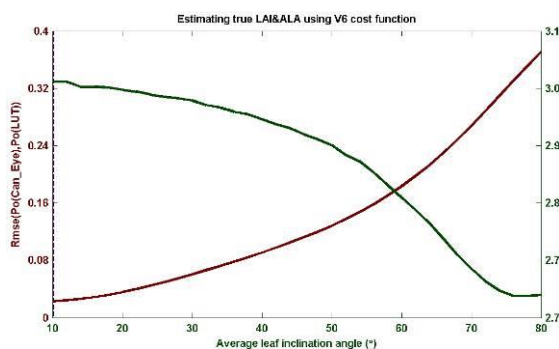
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



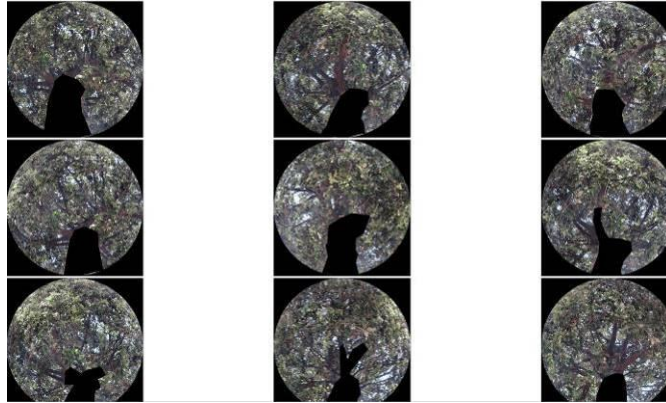
Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,14 – 0,15
 PAI: 3,03
 ALA: 10°

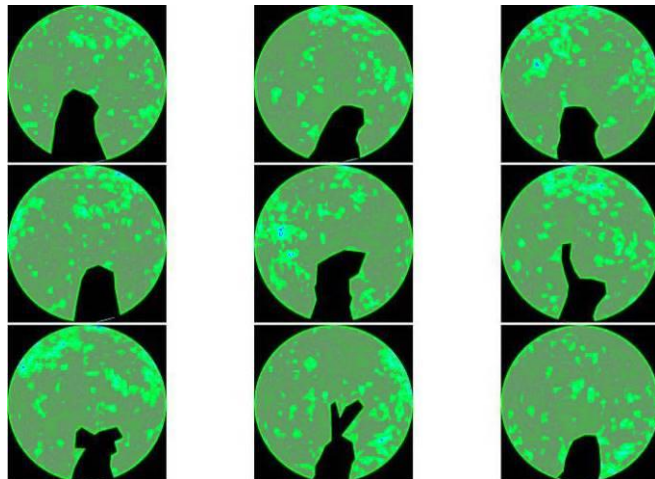
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.86	0.84
MEASURED FAPAR	0.87	0.85

Especie: **Quercus ilex** Encina

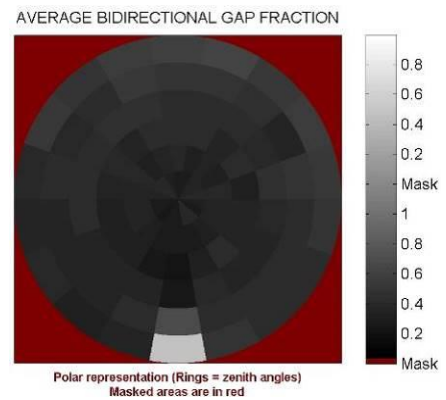
Fotografías hemisféricas



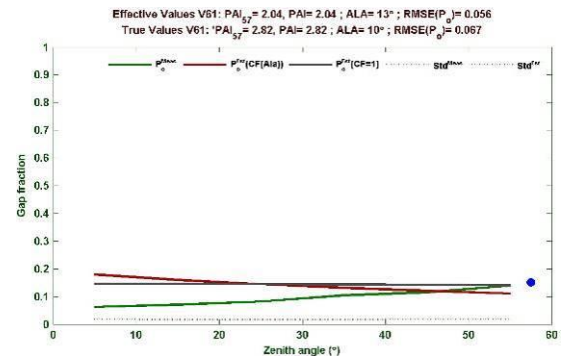
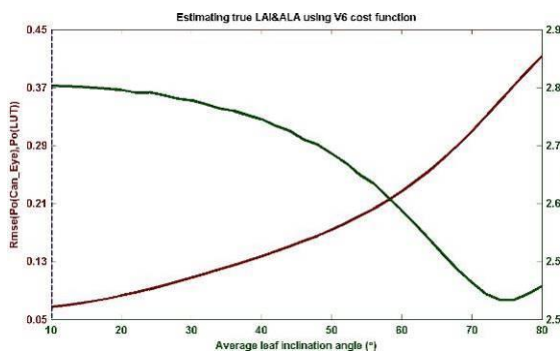
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



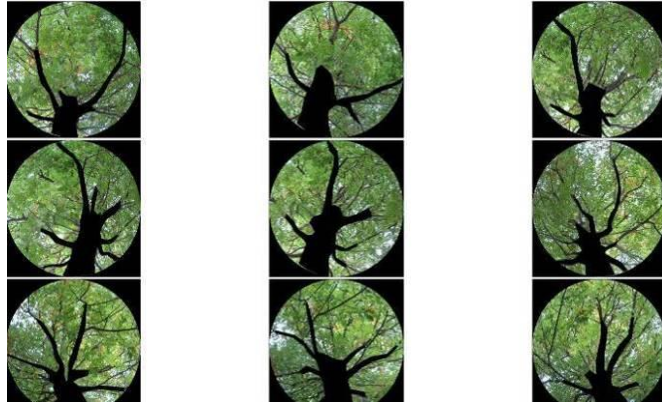
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.86	0.84
MEASURED FAPAR	0.88	0.87

Resultados (resumen):

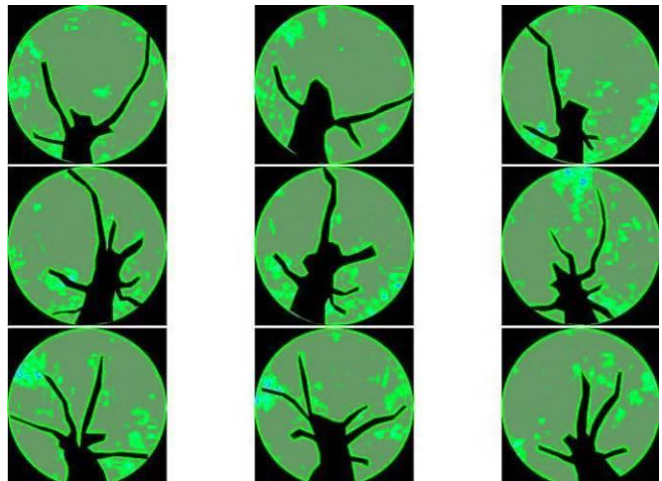
Transmisividad: 0,12 – 0,16
 PAI: 2,82
 ALA: 10°

Especie: **Quercus pyrenaica** Rebollo

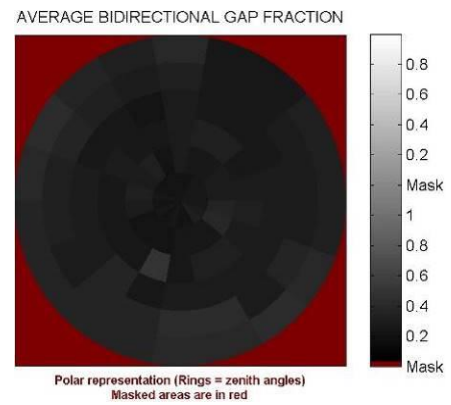
Fotografías hemisféricas



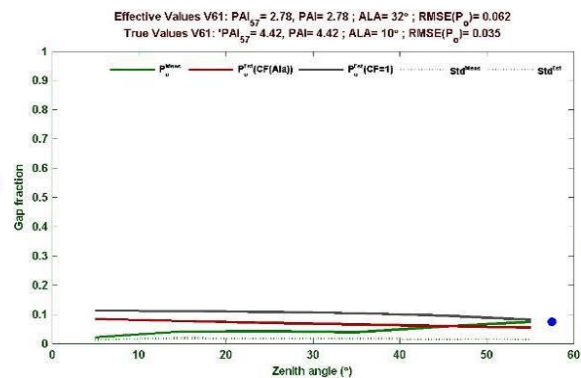
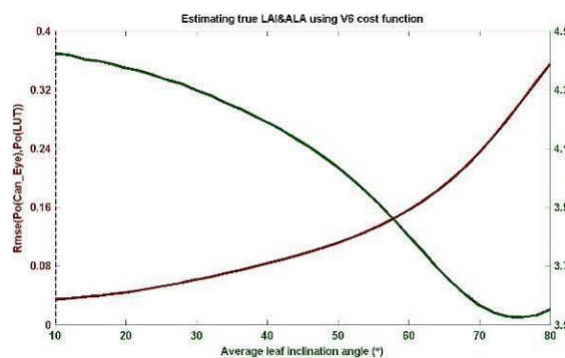
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



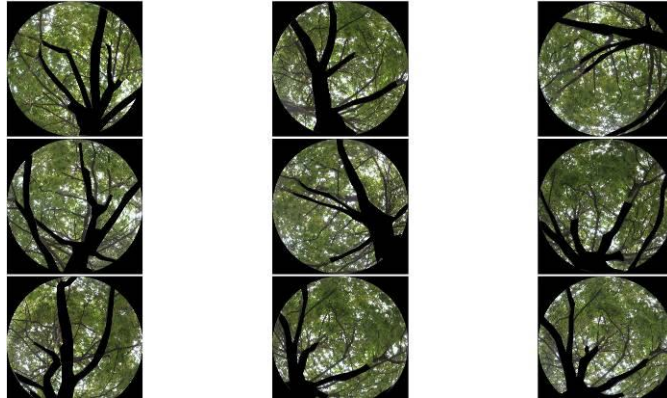
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.92	0.89
MEASURED FAPAR	0.94	0.93

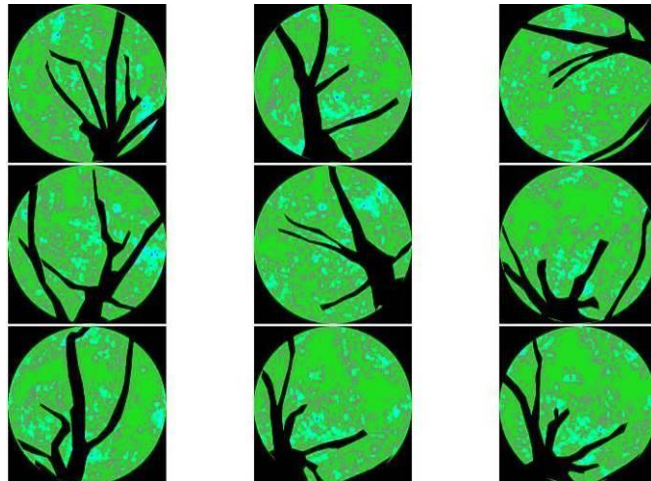
Transmisividad: 0,06 – 0,11
 PAI: 4,42
 ALA: 10°

Especie: **Quercus robur** Roble

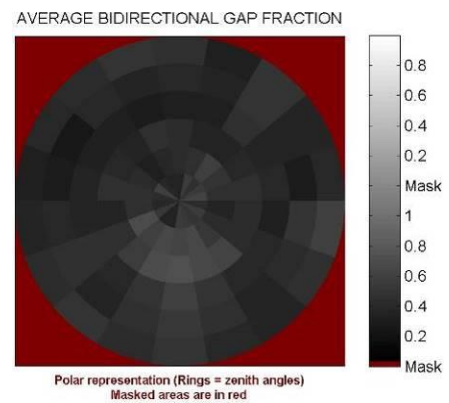
Fotografías hemisféricas



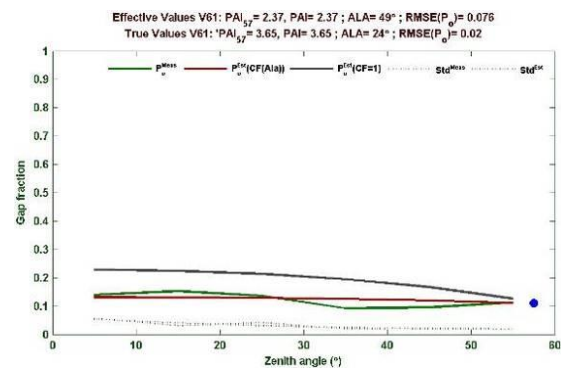
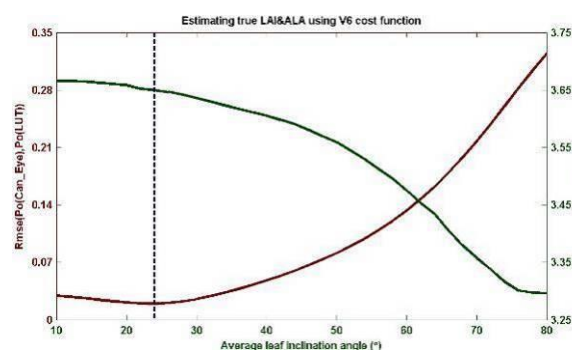
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



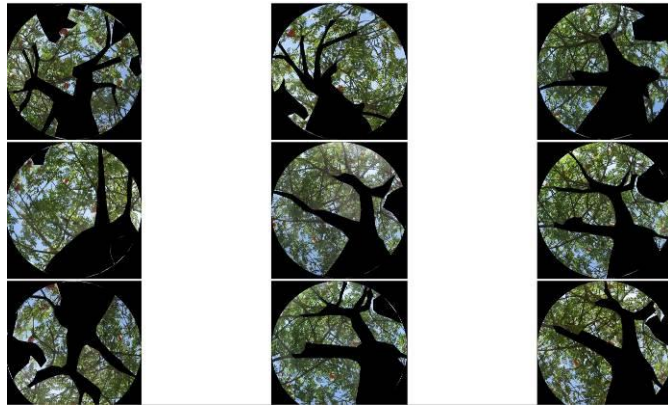
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.85	0.83
MEASURED FAPAR	0.91	0.88

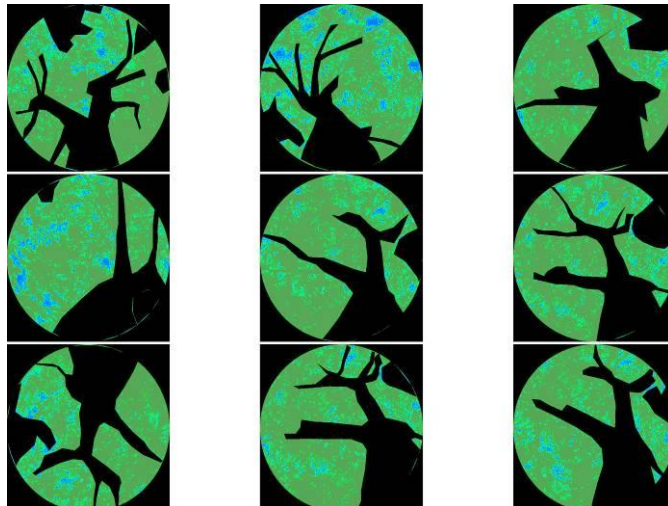
Transmisividad: 0,09 – 0,17
 PAI: 3,65
 ALA: 24°

Especie: **Sorbus aucuparia** Azarollo

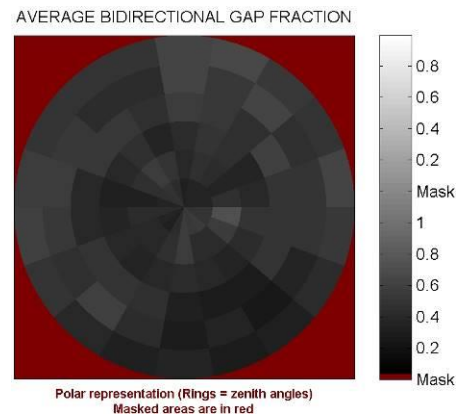
Fotografías hemisféricas



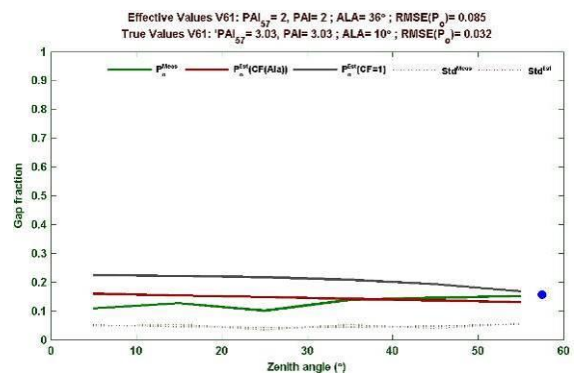
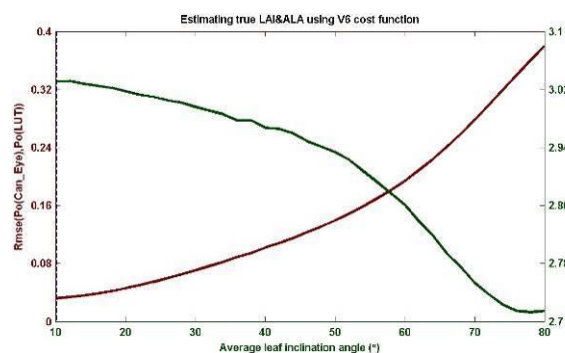
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



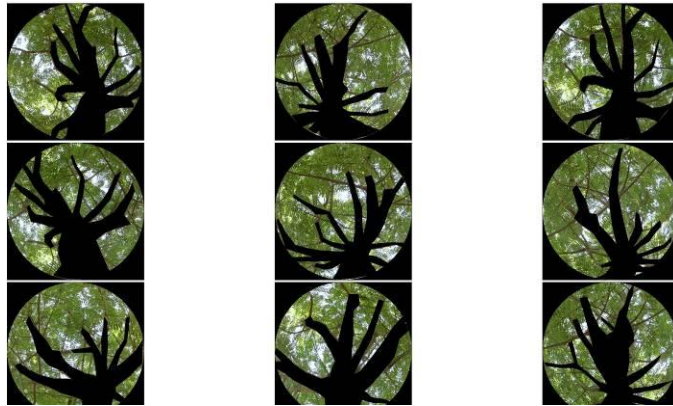
Resultados (resumen):

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.82	0.81
MEASURED FAPAR	0.88	0.85

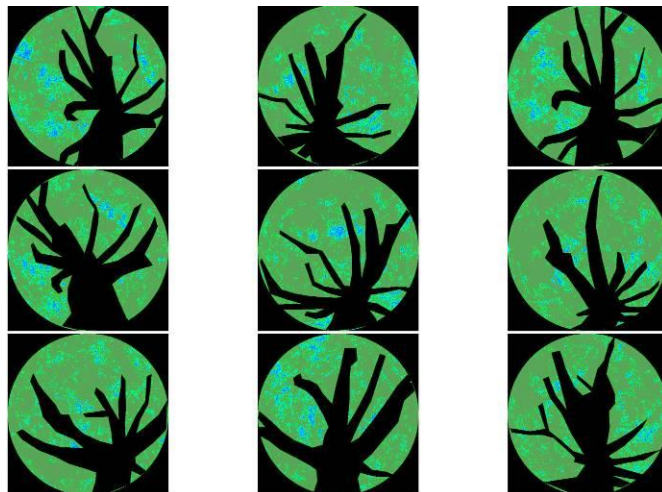
Transmisividad: 0,15 – 0,18
 PAI: 3,03
 ALA: 10°

Especie: **Sorbus domestica** Sorbo

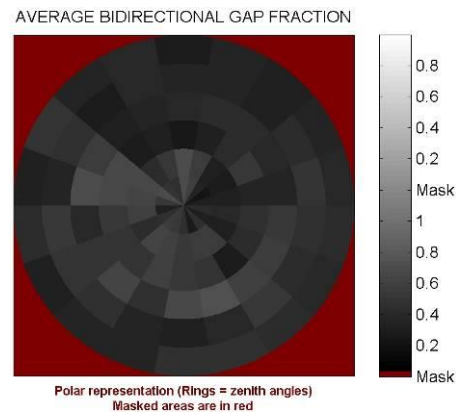
Fotografías hemisféricas



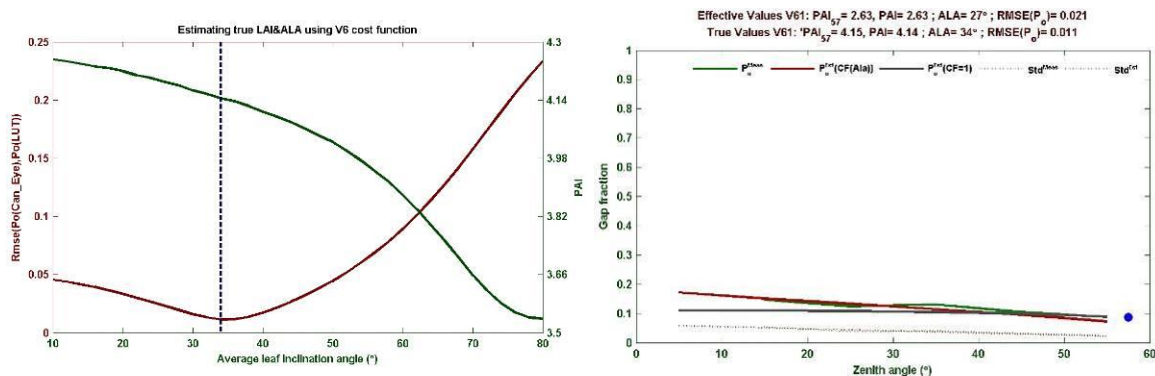
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



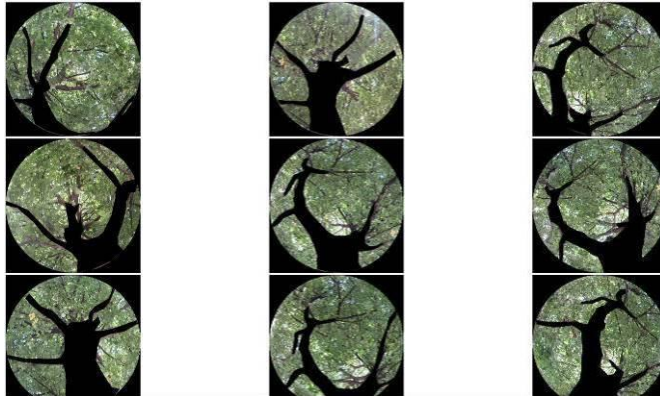
	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.91	0.89
MEASURED FAPAR	0.90	NaN

Resultados (resumen):

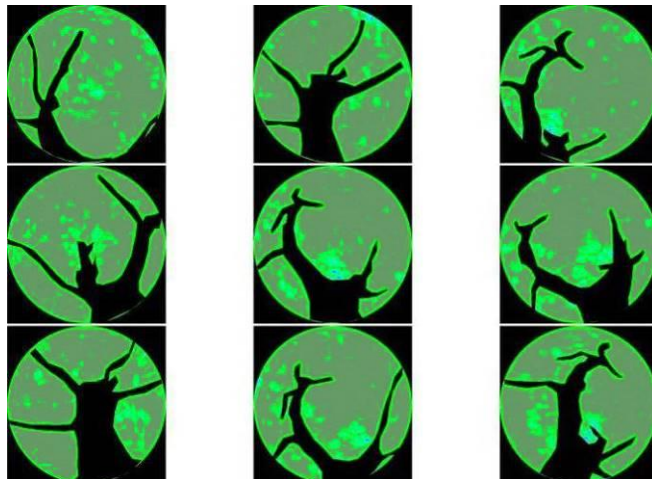
Transmisividad: 0,09 – 0,11
 PAI: 4,15
 ALA: 34°

Especie: ***Tilia platyphyllos*** Tilo común

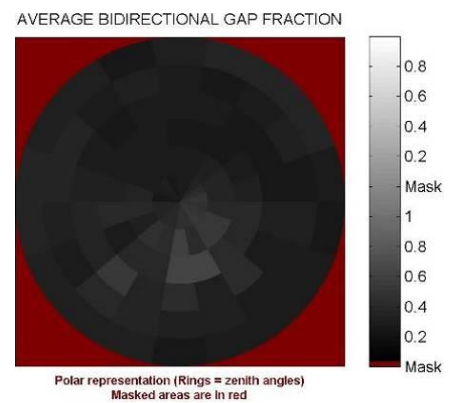
Fotografías hemisféricas



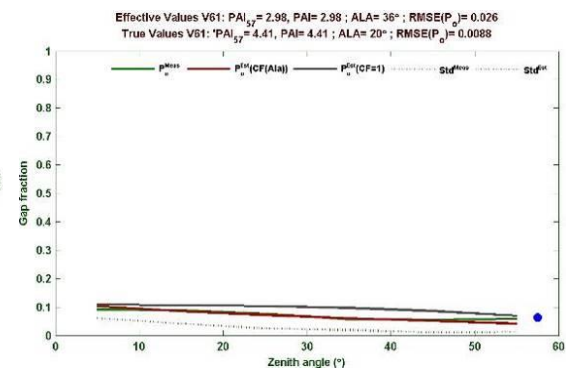
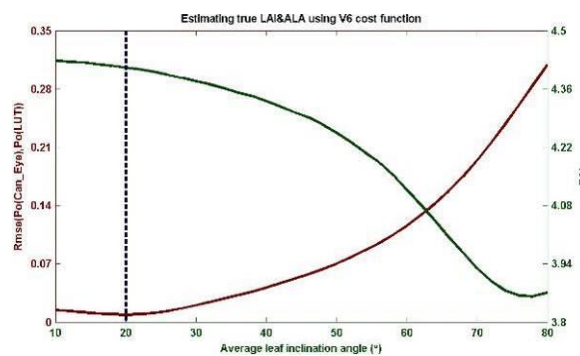
Resultados de clasificación:



Gap fraction:



Variables biofísicas medias:



Resultados (resumen):

Transmisividad: 0,05 – 0,10
 PAI: 4,41
 ALA: 20°

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.92	0.90
MEASURED FAPAR	0.95	0.92

5.3 Geometría. Sombra generada

La sombra proyectada por los árboles en el pavimento de las zonas exteriores cobra gran relevancia dentro del objetivo de sombrear el mayor porcentaje posible de las zonas peatonales. La sombra proyectada por cada árbol depende de las dimensiones del mismo aunque varía de manera permanente en función de la posición solar de cada momento.

A continuación se plantean las ecuaciones para calcular la superficie de sombra proyectada en el pavimento tanto por árboles esféricos (Ecuación 5.1) como por árboles cónicos (Ecuaciones 5.2 y 5.3).

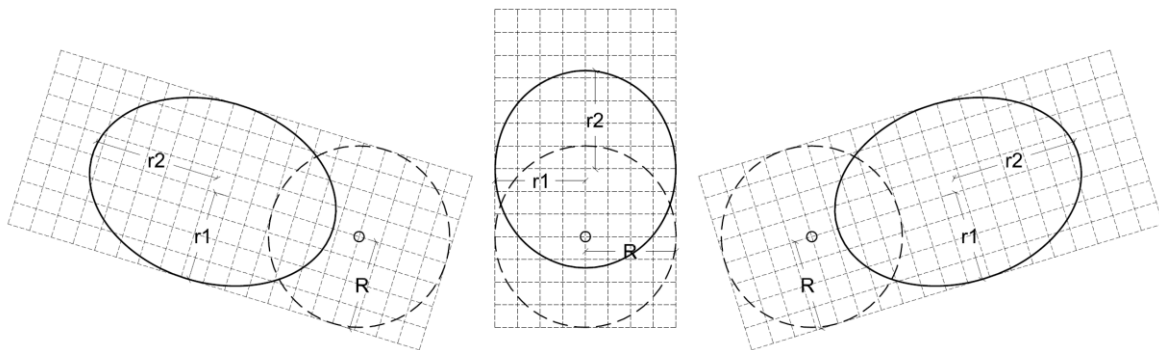


Figura 5.6 Esquema geométrico de la superficie de pavimento sombreada por árboles esféricos a las 11:00, 14:00 y 17:00 del mes de junio. La línea continua representa la sombra proyectada.

Para árboles esféricos, la superficie sombreada de pavimento (A) se obtiene en función del radio de la copa de los árboles (R) y la altitud solar por hora y mes (α), según el esquema representado en la Figura 5.6:

$$A = \pi \times r_1 \times r_2$$

$$r_1 = R \quad \text{y} \quad r_2 = \left[R \times \cos(90 - \alpha) + \frac{R \times \sin(90 - \alpha)}{\tan \alpha} \right]$$

$$A = \pi \times R \times \left[R \times \cos(90 - \alpha) + \frac{R \times \sin(90 - \alpha)}{\tan \alpha} \right]$$

$$A = \pi \times R^2 \times \left[\cos (90-\alpha) + \frac{\sin (90-\alpha)}{\tan \alpha} \right] \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

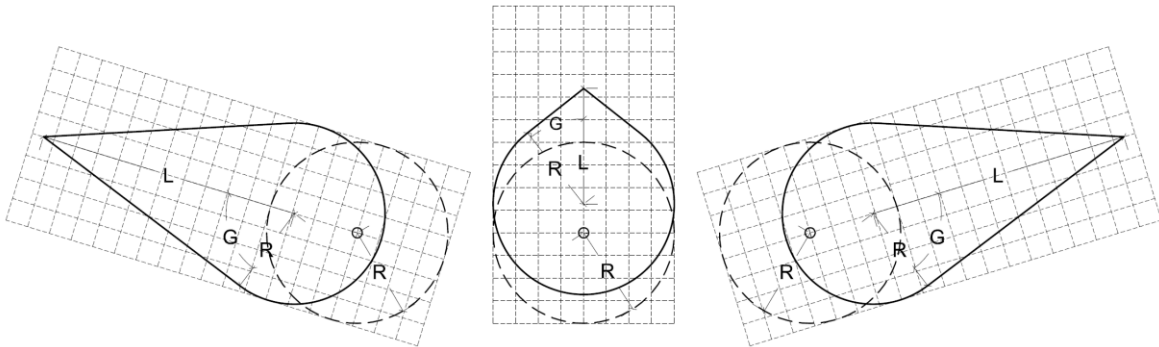


Figura 5.7 Esquema geométrico de la superficie de pavimento sombreada por árboles cónicos a las 11:00, 14:00 y 17:00 del mes de junio. La línea continua representa la sombra proyectada.

Para árboles cónicos, de acuerdo con el esquema representado en la Figura 5.7 donde (R) es el radio de la copa de los árboles, (H) es la altura de la copa de los árboles y (α) es la altitud solar por hora y mes, el área sombreada de pavimento se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$A = \left[\pi \times R^2 \times \left(1 - \frac{2G}{360} \right) \right] + \left[2 \times \left(\frac{R \times L \times \sin G}{2} \right) \right]$$

$$L = \frac{H}{\tan \alpha} \quad \text{y} \quad \cos G = \frac{R}{L}$$

$$\cos G = \frac{R \times \tan \alpha}{H} \quad \text{por lo que} \quad G = \arccos \left(\frac{R \times \tan \alpha}{H} \right)$$

Posteriormente, se consideran dos posibilidades dependiendo de la altura (H) de la copa cónica del árbol:

$$\text{si } \frac{R \times \tan \alpha}{H} < 1$$

$$A = \pi \times R^2 \times \left[1 - \frac{2 \times \arccos \left(\frac{R \times \tan \alpha}{H} \right)}{360} \right] + \left[R \times \frac{H}{\tan \alpha} \times \sin \left(\arccos \frac{R \times \tan \alpha}{H} \right) \right]$$

(Ecuación 5.2)

$$\text{si } \frac{R \times \tan \alpha}{H} \geq 1$$

$$A = \pi \times R^2 \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

5.4 Fórmulas para la caracterización de arbolado según las distintas orientaciones de la calle

En este apartado se desarrollan y obtienen las fórmulas matemáticas para las distintas orientaciones que permiten por un lado valorar la necesidad de arbolado en las zonas peatonales de una calle, para después obtener sus características morfológicas adecuadas de cara a poder elegir una especie y determinar su posición dentro de dicha calle.

En cuanto a las variables a utilizar en las fórmulas para cada hora y mes considerados, la altitud solar media y el acimut son los siguientes:

- A las 11:00 (posición solar Este)
 - 40° de altitud y 65° de acimut para abril y agosto.
 - 46° de altitud y 73° de acimut para mayo y julio.
 - 49° de altitud y 76° de acimut para junio.

- A las 14:00 (posición solar Sur)
 - 59° de altitud y 0° de acimut para abril y agosto.
 - 67° de altitud y 0° de acimut para mayo y julio.
 - 70° de altitud y 0° de acimut para junio.

- A 17:00 (posición solar Oeste):
 - 40° de altitud y 65° de acimut para abril y agosto.
 - 46° de altitud y 73° de acimut para mayo y julio.
 - 49° de altitud y 76° de acimut para junio.

5.4.1 Orientación Este-Oeste (E-O)

Las condiciones para la comprobación de la necesidad de plantación de árboles y las fórmulas que se proponen en este apartado son válidas y específicas para una orientación Este-Oeste, incluyendo posibles rotaciones de la calle (β) de hasta 27,5° respecto al eje geográfico E-O (Figura 5.8).

Indicar que para esta orientación E-O, si bien el ángulo de la calle con respecto al eje E-O se considera positivo en el sentido de las agujas del reloj, en caso de utilizar ángulos negativos, la totalidad de las fórmulas incluidas en este apartado seguirían siendo igual de válidas, aunque se debería introducir dichos ángulos (β) en valor negativo, principalmente en las Ecuaciones 5.4 y 5.9. En estas ecuaciones los senos (sin) se tomarán siempre en valor positivo.

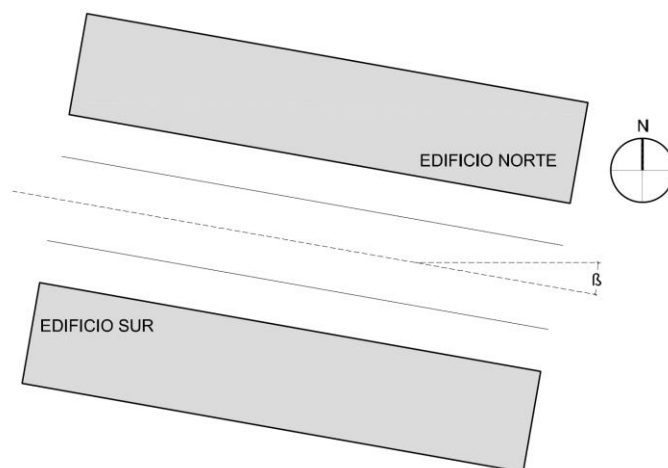


Figura 5.8 Esquema de calle con orientación Este-Oeste, incluyendo posibles rotaciones de hasta 27,5° respecto al eje geográfico E-O.

Acera Norte

En primer lugar, se debe verificar la necesidad de árboles, considerando la sombra que generan los edificios en la acera peatonal Norte. Las ecuaciones 5.4

están formuladas para verificar el sombreado proporcionado por los edificios Sur (línea de sombra del edificio según el esquema que se muestra en la Figura 5.10) durante el mes de junio que es el mes más desfavorable (en que los edificios generan el área de sombra más reducida en la calle). Estas expresiones se utilizan para comprobar si la superficie de la zona peatonal Norte está sombreada por edificios a las tres horas consideradas. De lo contrario, la sombra adicional proporcionada por los árboles se vuelve necesaria.

$$\text{A las 11:00, si } W - 0,3 d_1 > \frac{He}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi - \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 14:00, si } \frac{W - 0,3 d_1}{\cos \beta} > \frac{He}{\tan \alpha} \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 17:00, si } W - 0,3 d_1 > \frac{He}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

(Ecuaciones 5.4)

donde:

α representa la altitud solar por hora y mes (junio)

φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)

β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera positivo en el sentido de las agujas del reloj)

W representa el ancho total de la calle.

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Norte.

He representa la altura de los edificios del Sur.

Se considera que la necesidad de árboles durante al menos dos de las tres horas evaluadas (con base en la Ecuaciones 5.4) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Norte. Se toma como referencia la totalidad de la calle menos el 30% de la acera Norte ($W - 0,3 d_1$) siempre con la intención inicial de tener sombreada al menos el 70% de superficie de la propia acera Norte.

En la elaboración de las fórmulas matemáticas para la obtención de sus características morfológicas, se prevén dos formas diferentes de árbol: esférico y cónico. En los esquemas gráficos de la Figura 5.9 la sombra de los árboles toca la intersección entre la fachada y el borde de la zona peatonal debido a que el objetivo es sombrear la superficie de la zona peatonal, pero sin interferir en la iluminación natural y soleamiento de los edificios que forman la calle.

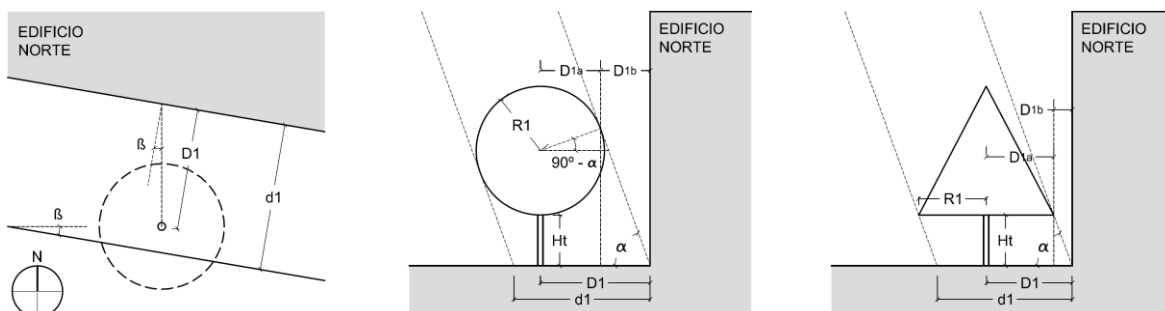


Figura 5.9 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Norte.

Se definen dos conjuntos de fórmulas (Ecuaciones 5.5 y 5.6 para esféricas y Ecuaciones 5.7 y 5.8 para cónicas) para determinar el radio apropiado de la copa de los árboles (R_1) y la distancia desde el árbol hasta la fachada del edificio (D_1) de la acera peatonal Norte.

Las fórmulas están preparadas para ajustar el tamaño del árbol al ancho de la zona peatonal considerando la hora central del día (a las 14:00) durante los meses considerados.

El proceso desarrollado para la obtención de las fórmulas es el siguiente:

Para árboles esféricos

El radio se obtiene en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar (α) y el ancho de la zona peatonal Norte (d_1), siguiendo los esquemas que se muestran en la Figura 5.9:

$$\frac{2 \times R_1}{\cos (90-\alpha)} = \frac{d_1}{\cos \beta}$$

$$2 \times R_1 \times \cos \beta = d_1 \times \cos (90-\alpha)$$

$$R_1 = \frac{d_1 \times \cos (90-\alpha)}{2 \times \cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la pared del edificio (D_1) se deriva de la suma de las distancias parciales (D_{1a} y D_{1b}) de acuerdo con el esquema representado en la Figura 5.9.

$$\frac{D_1}{\cos \beta} = D_{1a} + D_{1b}$$

$$D_{1a} = R_1 \times \cos (90-\alpha) \quad \text{y} \quad D_{1b} = \frac{R_1 \times \sin (90-\alpha) + R_1 + H_t}{\tan \alpha}$$

$$\frac{D_1}{\cos \beta} = R_1 \times \cos (90-\alpha) + \frac{R_1 \times \sin (90-\alpha) + R_1 + H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left[R_1 \times \cos (90-\alpha) + \left(\frac{R_1 \times \sin (90-\alpha) + R_1 + H_t}{\tan \alpha} \right) \right] \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

donde:

R_1 es el radio de copa obtenido según las variables de cada mes

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Norte

H_t representa la altura del tronco supuesta (3 m.)

Para árboles cónicos

El radio se obtiene en función de la orientación de la calle (β) y el ancho de la zona peatonal Norte (d_1), según los esquemas representados en la Figura 5.9:

$$2 \times R_1 = \frac{d_1}{\cos \beta}$$

$$2 \times R_1 \times \cos \beta = d_1$$

$$R_1 = \frac{d_1}{2 \times \cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.7})$$

La distancia D_1 también se deriva de la suma de las distancias parciales (D_{1a} y D_{1b}), donde (α) es la altitud solar y (H_t) representa la altura del tronco supuesta de 3 m.:

$$\frac{D_1}{\cos \beta} = D_{1a} + D_{1b}$$

$$D_{1a} = R_1 \quad \text{y} \quad D_{1b} = \frac{H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left(R_1 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.8})$$

donde:

R_1 es el radio de copa obtenido

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

d_1 representa el ancho de la zona peatonal norte

H_t representa la altura del tronco supuesta (3 m.)

La altura de las copas de los árboles cónicos variará según la especie, pero en general, se puede decir que esta altura en las distintas especies seleccionadas tiende a ser similar al diámetro de la copa, especialmente para árboles pequeños y medianos. Por consiguiente, estableciendo la altura solar a las 14:00 en los meses entre abril y agosto, la altura de la copa en los árboles cónicos no tendrá un especial impacto en el cálculo propuesto (solo alguna leve influencia en los meses de abril y agosto) por lo que dicha altura no es considerada en las fórmulas.

Tanto para árboles esféricos como cónicos, la única condición práctica a tener en cuenta es una distancia mínima obligatoria de 1,00 m desde la copa del árbol hasta la fachada del edificio.

Por último, se seleccionarán el radio de copa más grande (el obtenido para el mes de junio) y una distancia a fachadas igual a la media entre las obtenidas para los distintos meses considerados. La razón para elegir el radio más grande para árboles esféricos es debido a que dichos radios serán necesarios para el mes en el que tanto la altitud solar como los niveles de radiación son más altos (junio), mientras que la utilización de la media entre las distancias obtenidas hasta las fachadas para los distintos meses equilibra la posición del árbol de manera que se sombreen los espacios peatonales, aunque evitando una relevante interferencia en la iluminación natural a las fachadas.

Después de calcular las propiedades geométricas de los tipos de árboles esféricos y cónicos adecuados para cada período de tiempo, es necesario establecer un espacio conveniente entre los árboles para lograr el mayor efecto de sombra posible sobre la acera peatonal.

No obstante, y tal como se demostrará en la aplicación práctica, para la orientación Este-Oeste será necesaria una separación entre árboles lo mínima posible, considerando la misma con una distancia de 0,50 m. entre las copas de los elementos contiguos.

Acera Sur

En primer lugar se debe verificar si los árboles son necesarios considerando la sombra que ofrecen los edificios en la acera peatonal Sur de acuerdo con el esquema que se muestra en la Figura 5.10. En este sentido, el mes de junio es cuando los edificios generan la menor zona de sombra en la acera peatonal Sur. Las siguientes expresiones (Ecuaciones 5.9) se definen para verificar el sombreado proporcionado por los edificios Sur (línea de sombra del edificio) durante las diferentes horas (a las 11:00, 14:00 y 17:00). Por lo tanto, estas expresiones se utilizan para verificar si el 70 % de la superficie de la zona peatonal Sur está sombreada por edificios a las tres horas consideradas en junio. Se considera positivo el ángulo β respecto al eje Este-Oeste en el sentido de las agujas del reloj.

A las 11:00, si	$0,7 d_2 > \frac{He}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi - \beta)$	Sombreado adicional (árbol) necesario.
A las 14:00, si	$\frac{0,7 d_2}{\cos \beta} > \frac{He}{\tan \alpha}$	Sombreado adicional (árbol) necesario.
A las 17:00, si	$0,7 d_2 > \frac{He}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta)$	Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.9)

donde:

- α representa la altitud solar por hora y mes (junio)
- φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)
- β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera positivo en el sentido de las agujas del reloj)
- d_2 representa el ancho de la zona peatonal Sur.
- He representa la altura del edificio Sur.

La necesidad de árboles durante al menos dos de las tres horas consideradas (según las Ecuaciones 5.9) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Sur.

Siguiendo el mismo procedimiento que en la acera Norte, también se definen dos conjuntos de fórmulas para la acera Sur de cara a obtener las propiedades más adecuadas de las copas de los árboles esféricos (Ecuaciones 5.10 y 5.11) o cónicos (Ecuaciones 5.12 y 5.13), según la Figura 5.10.

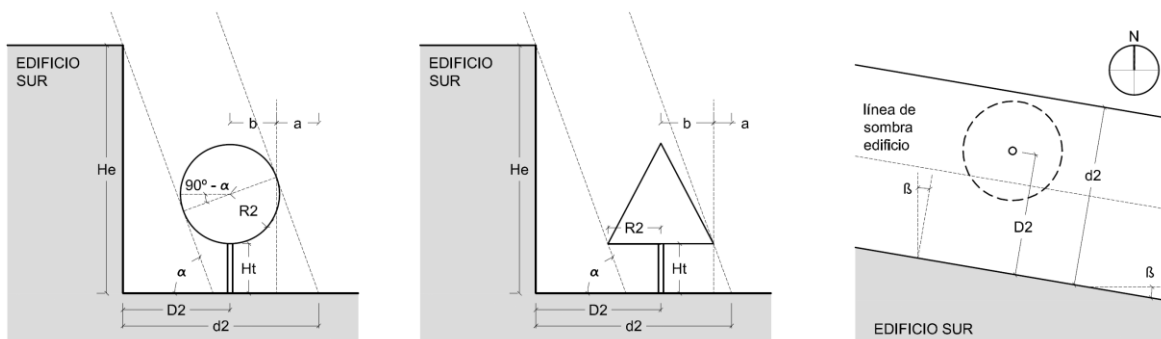


Figura 5.10 Diagramas de vista de planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la pared del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sur.

El proceso desarrollado para la obtención de dichas fórmulas es el siguiente:

Para árboles esféricos

El radio se obtiene en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar considerada (α), el ancho de la zona peatonal Sur (d_2) y la altura del edificio Sur (H_e), siguiendo los esquemas que se muestran en la Figura 5.10:

$$\frac{d_2}{\cos \beta} = \frac{H_e}{\tan \alpha} + \frac{2 \times R_2}{\cos (90 - \alpha)}$$

$$R_2 = \left(\frac{d_2}{\cos \beta} - \frac{H_e}{\tan \alpha} \right) \times \frac{\cos (90 - \alpha)}{2} \quad (\text{Ecuación 5.10})$$

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) se deriva de la suma de las distancias parciales (a y b), de acuerdo con el esquema representado en la Figura 5.10.

$$\frac{D_2}{\cos \beta} + a + b = \frac{d_2}{\cos \beta}$$

$$D_2 = d_2 - (a + b) \times \cos \beta$$

$$a = \frac{R_2 \times \sin (90-a) + R_2 + H_t}{\tan \alpha} \quad \text{y} \quad b = R_2 \times \cos (90-\alpha)$$

$$D_2 = d_2 - \left[R_2 \times \cos (90-\alpha) + \left(\frac{R_2 \times \sin (90-\alpha) + R_2 + H_t}{\tan \alpha} \right) \right] \times \cos \beta$$

(Ecuación 5.11)

donde:

R_2 es el radio de copa obtenido según las variables de cada mes

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle a lo largo del eje E-O.

d_2 representa el ancho de la zona peatonal Sur.

H_e representa la altura del edificio Sur

H_t representa la altura del tronco supuesta (de 3 m)

Para árboles cónicos

El radio también se obtiene dependiendo de la orientación de la calle (β), la altitud solar considerada (α), el ancho de la zona peatonal sur (d_2) y la altura del edificio sur (H_e) según los esquemas representados en la Figura 5.10:

$$\frac{H_e}{\tan \alpha} + (2 \times R_2) = \frac{d_2}{\cos \beta}$$

$$R_2 = \frac{\frac{d_2}{\cos \beta} - \frac{He}{\tan \alpha}}{2}$$

(Ecuación 5.12)

La distancia D_2 también se deriva de la suma de las distancias parciales (a y b) según el esquema de la Figura 5.10, donde H_t representa la altura del tronco supuesta de 3 m.:

$$\frac{D_2}{\cos \beta} + a + b = \frac{d_2}{\cos \beta}$$

$$D_2 = d_2 - (a + b) \times \cos \beta$$

$$b = R_2 \quad \text{y} \quad a = \frac{H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_2 = d_2 - \left(R_2 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta$$

(Ecuación 5.13)

donde:

R_2 es el radio de copa obtenido

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle a lo largo del eje E-O.

d_2 representa el ancho de la zona peatonal Sur.

He representa la altura del edificio Sur

H_t representa la altura del tronco supuesta (de 3 m)

A modo de advertencia, y según se comprueba en la aplicación práctica, los radios obtenidos para una orientación de ángulo (β) positivo, funciona bien a las 14:00 y las 17:00, aunque en menor grado a las 11:00. En caso de ángulo (β) negativo se obtendrían menores porcentajes de superficie sombreada a las 17:00. Por consiguiente, se podría valorar la posibilidad de aumentar el radio obtenido manteniendo la posición obtenida, aunque cumpliendo en todo caso la separación mínima de 1 m. respecto a las fachadas.

5.4.2 Orientación Norte-Sur (N-S)

La comprobación de la necesidad de plantación de árboles y las fórmulas que se proponen en este apartado son específicas para una orientación de calle Norte-Sur, incluyendo posibles rotaciones de la calle (β) de hasta $27,5^\circ$ respecto al eje geográfico N-S (Figura 5.11).

Para la orientación N-S, el desarrollo de las fórmulas para cada acera incluidas este apartado se plantea considerando el ángulo (β) de la calle con respecto al eje N-S positivo, es decir en el sentido de las agujas del reloj. En caso ángulos negativos (sentido contrario a las agujas del reloj), las fórmulas deben ser adaptadas tal como se lleva a cabo en la última sección de este apartado.

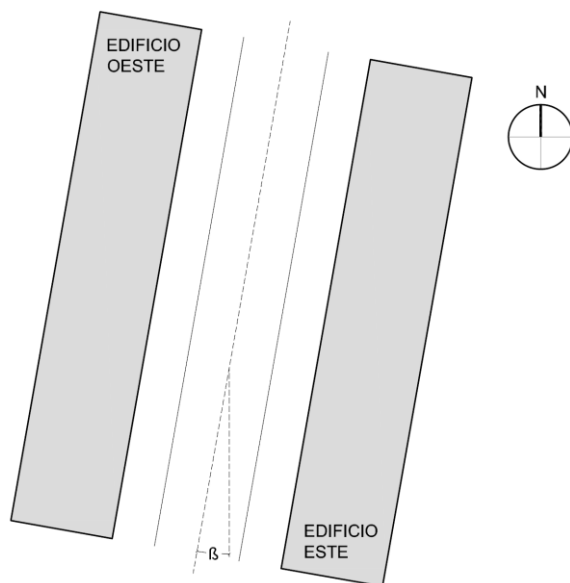


Figura 5.11 Esquema de calle con orientación Norte-Sur, incluyendo posibles rotaciones de hasta $27,5^\circ$ respecto al eje geográfico N-S.

Acera Oeste (considerando positivo el ángulo β)

Siguiendo el criterio mantenido en otras orientaciones, las ecuaciones 5.14 sirven para verificar la necesidad de árboles en función de la sombra que generan tanto el edificio Este como el edificio Oeste (línea de sombra del edificio según el esquema que se muestra en la Figura 5.15) durante el mes de junio. Las siguientes expresiones se utilizan para comprobar si la superficie de la zona peatonal Oeste está sombreada por edificios a las tres horas consideradas.

A las 11:00, si $W - 0,3 d_1 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos (90 - \varphi - \beta)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 14:00, si $W - 0,3 d_1 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin \beta$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 17:00, si $0,7 d_1 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \cos (90 - \varphi + \beta)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.14)

donde:

α representa la altitud solar por hora y mes (junio)

φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)

β representa la orientación de la calle con respecto al eje N-S (se considera siempre positivo al ser en el sentido de las agujas del reloj)

W representa el ancho total de la calle.

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Oeste.

He_1 representa la altura de los edificios del Oeste.

He_2 representa la altura de los edificios del Este.

En las ecuaciones se toma como referencia la totalidad de la calle menos el 30% de la acera Oeste ($W - 0,3 d_1$) o el 70% de la acera Oeste ($0,7 d_1$).

Para esta orientación, dado que en la hora central del día lo presumible es que se requiera la disposición de arbolado (excepto para la combinación de ángulos β y valores AR elevados), se considera que el arbolado es necesario con la única condición que se requiera para las 14:00.

En caso de necesidad para alguna otra hora considerada (según las ecuaciones 5.14, y presumiblemente para las 11:00) se realizarán los ajustes correspondientes para el posicionamiento del arbolado en la acera Oeste.

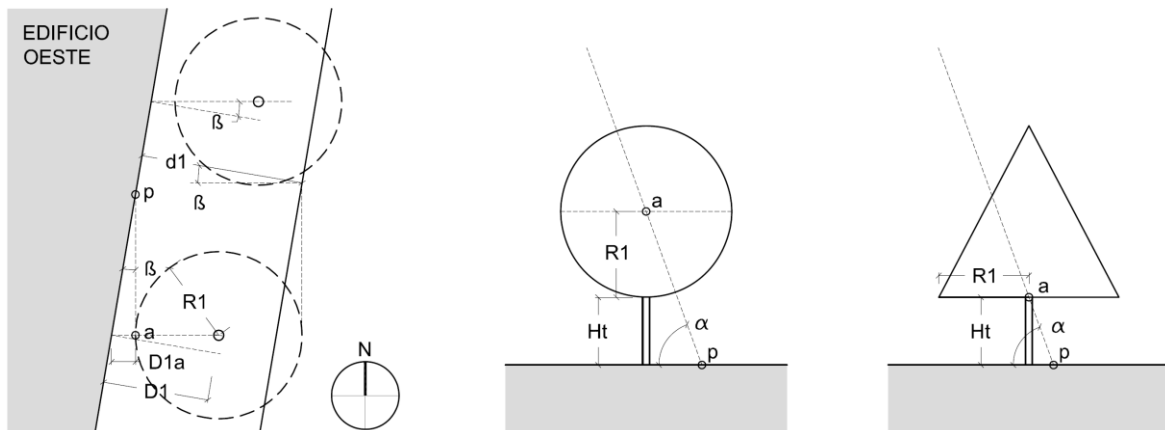


Figura 5.12 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Oeste.

Las fórmulas están inicialmente preparadas para ajustar el tamaño del árbol al ancho de la zona peatonal considerando la hora central del día (14:00). No obstante, y para el caso en el que según las ecuaciones 5.14 resultara necesario arbolado para las 11:00, se establecen fórmulas para determinar una corrección del radio y de la posición del árbol considerando esta hora.

La Ecuación 5.15 sirve para calcular el radio (R_1) de árboles esféricos y cónicos para los parámetros correspondientes a las 14:00. Las Ecuaciones 5.16 establecen la distancia a fachada (D_1) para árboles esféricos con parámetros correspondientes a las 14:00, o en su caso permiten realizar las correcciones de radio y distancias a fachada para las 11:00.

Las Ecuaciones 5.17 sirven para calcular las distancias hasta fachada (D_1) de los árboles cónicos para las 14:00 o para realizar las correcciones de radio y distancias a fachada para las 11:00.

Para la obtención de las fórmulas, en lo que respecta al radio, el proceso desarrollado y el resultado es el mismo para los árboles esféricos y cónicos, mientras que para la separación respecto a la fachada el resultado es diferente para cada caso.

Para la obtención del radio (R_1) de árboles esféricos y cónicos

Se obtiene en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar (α) y el ancho de la zona peatonal Oeste (d_1), siguiendo los esquemas que se muestran en la Figura 5.12:

$$2 \times R_1 \times \cos \beta = d_1$$

$$R_1 = \frac{d_1}{2 \times \cos \beta}$$

(Ecuación 5.15)

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1), la cual es distinta para árboles esféricos y cónicos, se deriva de la separación de la copa respecto a la fachada (D_{1a}). Según lo representado en el esquema de la Figura 5.12, tenemos:

$$D_1 = (D_{1a} + R_1) \times \cos \beta$$

Para la distancia (D_1) en árboles esféricos y posibles correcciones a las 11:00

La distancia para las 14:00 se obtiene a partir de las siguientes expresiones según la Figura 5.12:

$$D_{1a} = \left(\frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \quad (\text{siempre que sea superior a 1 m.})$$

$$D_1 = \left[\left[\left(\frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \right] + R_1 \right] \times \cos \beta$$

(Ecuación 5.16.1)

donde:

R_1 es el radio de copa obtenido

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle respecto al eje N-S

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Oeste

 H_t representa la altura del tronco supuesta (3 m.)

En caso de que no se garantizara la distancia mínima de 1 m. desde el árbol hasta la fachada, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$D_1 = 1 + R_1 \quad (\text{Ecuación 5.16.2})$$

Para el caso en el que, según las ecuaciones 5.14 resultara necesario arbolado para las 11:00, se recomienda analizar una corrección del radio y de la posición del árbol para mejorar el porcentaje de superficie sombreada a dicha hora, con el objetivo de obtener como mínimo un 70%. Se establece ese límite dado que según comprobaciones realizadas mayores porcentajes requerirían que los árboles se tuvieran que posicionar fuera de la zona peatonal.

Para ello, se parte de una distancia desde la línea de sombreado hasta fachada del 70% de la anchura de la acera (d_1), y se tomará como punto de referencia el centro del árbol (esfera).

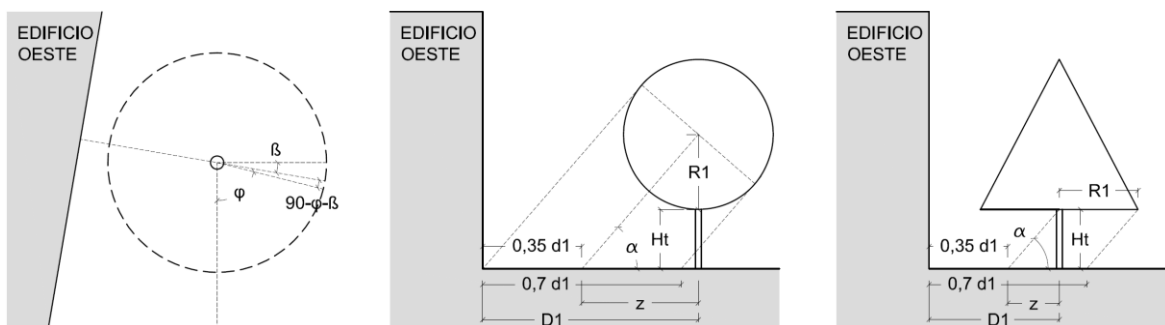


Figura 5.13 Diagramas en planta y en alzado para corrección de distancia a fachada (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Oeste considerando las 11:00.

Por lo tanto, para árboles esféricos, tenemos según la Figura 5.13:

$$\frac{0,35 d_1}{\cos (90-\varphi-\beta)} = \frac{R_1}{\sin \alpha}$$

$$R_1 = \frac{0,35 d_1 \times \sin \alpha}{\cos (90-\varphi-\beta)}$$

(Ecuación 5.16.3)

La distancia desde fachada se obtiene a partir de las siguientes expresiones según la Figura 5.13.

$$z = \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi-\beta)$$

(Ecuación 5.16.4)

No obstante, indicar que tal como se ha demostrado en el capítulo correspondiente a la aplicación práctica para la acera Este, extrapolando los resultados obtenidos con las fórmulas de corrección para las 11:00, su utilización en árboles esféricos conllevaría una mejora en los porcentajes de superficie sombreada a esa hora, aunque también una considerable reducción de los porcentajes de sombra generada a las 14:00.

Para la distancia (D_1) en árboles cónicos y posibles correcciones a las 11:00

La distancia para las 14:00 se obtiene a partir de las siguientes expresiones, según la Figura 5.12:

$$D_{1a} = \left(\frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \quad (\text{siempre que sea superior a 1 m.})$$

$$D_1 = \left[\left[\left(\frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \right] + R_1 \right] \times \cos \beta$$

(Ecuación 5.17.1)

En caso de que no se garantizara la distancia mínima de 1 m. desde el árbol hasta la fachada, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$D_1 = 1 + R_1 \quad (\text{Ecuación 5.17.2})$$

Para el caso en el que, según las ecuaciones 5.16, resultara necesario arbolado para las 11:00, se recomienda analizar una corrección para el radio y la posición del árbol. Según la Figura 5.13, tenemos:

$$0,35 d_1 = R_1 \times \cos (90-\varphi-\beta)$$

$$R_1 = \frac{0,35 d_1}{\cos (90-\varphi-\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.17.3})$$

$$z = \frac{H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi-\beta) \quad (\text{Ecuación 5.17.4})$$

Indicar que tal como se ha demostrado en el Capítulo correspondiente a la aplicación práctica para la acera Este, extrapolando los resultados, la utilización de las fórmulas de corrección para las 11:00 horas en árboles cónicos conllevaría la obtención de mayores radios de copa, por lo que se consiguen mayores porcentajes de superficie sombreada sobre todo para las 11:00, e incluso para las 14:00.

Separación (S) entre árboles

En lo que respecta a la separación entre elementos de arbolado, para la obtención de las fórmulas se distingue entre árboles esféricos y cónicos según el esquema de la Figura 5.14:

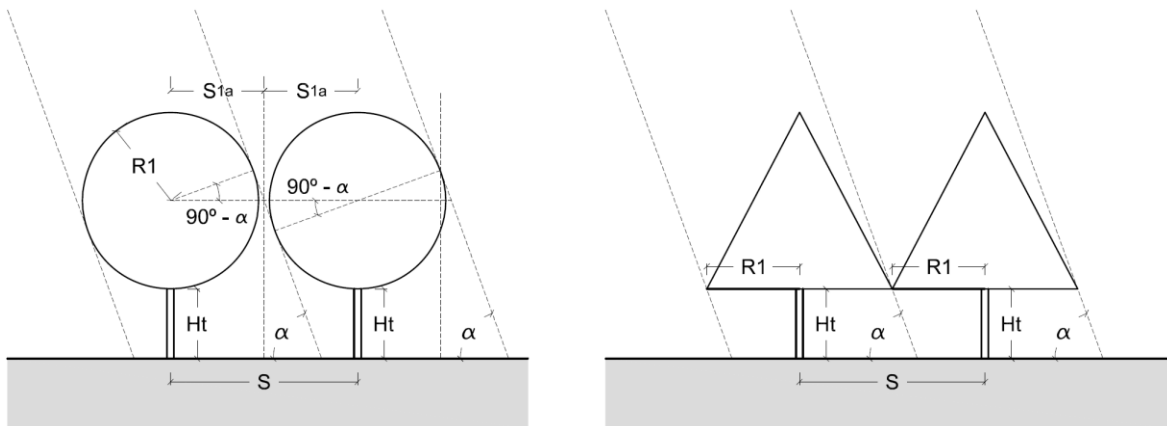


Figura 5.14 Diagramas en direccionalidad Norte-Sur para el cálculo de separación entre árboles esféricos y cónicos.

Para árboles esféricos, la separación se obtiene mediante la Ecuación 5.18 en función del radio de la copa del árbol (R_1) y la altitud solar (α), partiendo de la siguiente expresión:

$$S = 2 \times S_{1a} \quad \text{siendo}$$

$$S_{1a} = \frac{R_1}{\cos(90^\circ - \alpha)}$$

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos(90^\circ - \alpha)} \quad \text{(Ecuación 5.18)}$$

En cuanto a los árboles cónicos, según se puede ver en los esquemas gráficos, la separación debe ser lo mínima posible, por lo que se aplica una distancia mínima entre copas de 0,50 m., por lo que la expresión (Ecuación 5.19) quedaría:

$$S = (2 \times R_1) + 0,50 \quad \text{(Ecuación 5.19)}$$

donde (R_1) es el radio de la copa del árbol.

Para la obtención de la separación en cada tipo de árbol se introducirán las variables correspondientes a abril-agosto, mayo-julio y junio, para posteriormente adoptarse el promedio entre ellos.

Acera Este (considerando positivo el ángulo β)

Las Ecuaciones 5.20 la determinan la necesidad de árboles en función de la sombra que generan tanto el edificio Este como el edificio Oeste (línea de sombra del edificio según el esquema que se muestra en la Figura 5.15) durante el mes de junio. Las siguientes expresiones se utilizan para comprobar si la superficie de la zona peatonal Este está sombreada por edificios a las tres horas consideradas.

A las 11:00, si	$0,7 d_2 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin (\varphi + \beta)$	Sombreado adicional (árbol) necesario.
-----------------	--	--

A las 14.00, si	$0,7 d_2 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin \beta$	Sombreado adicional (árbol) necesario.
-----------------	--	--

A las 17:00, si	$W - 0,3 d_2 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin (\varphi - \beta)$	Sombreado adicional (árbol) necesario.
-----------------	--	--

(Ecuaciones 5.20)

donde:

- α representa la altitud solar por hora y mes (junio)
- φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)
- β representa la orientación de la calle con respecto al eje N-S (se considera siempre positivo en el sentido de las agujas del reloj)
- d_1 representa el ancho de la zona peatonal Oeste.
- He_1 representa la altura del edificio Oeste.
- He_2 representa la altura del edificio Este.

Dado que en la hora central del día lo presumible es también que se requiera la disposición de arbolado, se considera que el arbolado es necesario con la única condición que se requiera para las 14:00. En caso de necesidad para alguna otra hora considerada (según las ecuaciones 5.20 y presumiblemente para las 17:00) se analizarán los ajustes correspondientes para el posicionamiento del arbolado.

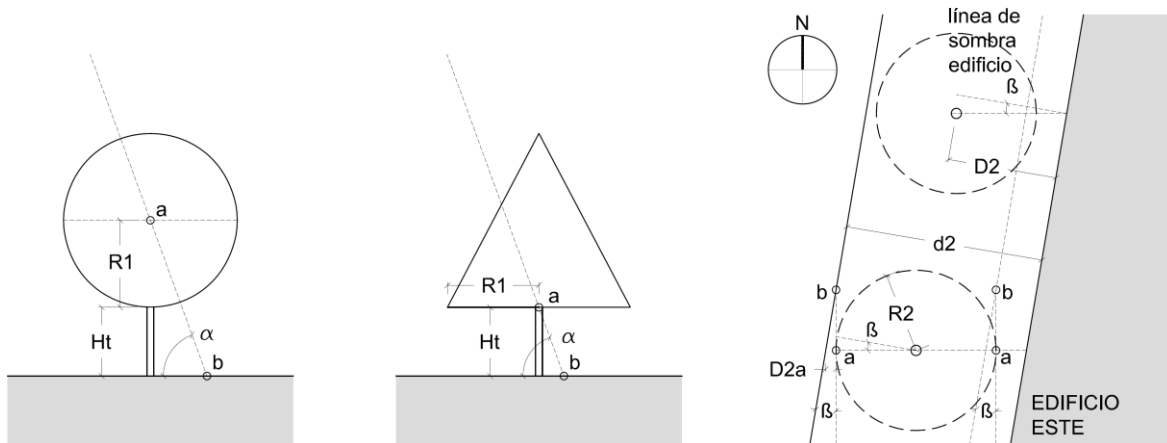


Figura 5.15 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Este.

Las fórmulas están inicialmente preparadas para ajustar el tamaño del árbol al ancho de la zona peatonal para las 14:00, aunque también se establecen fórmulas para determinar una posible corrección del radio y de la posición del árbol para las 17:00.

La Ecuación 5.21 permite calcular el radio (R_2) de árboles esféricos y cónicos para los parámetros correspondientes a las 14:00. Las Ecuaciones 5.22 establecen la distancia a fachada (D_2) para árboles esféricos con parámetros correspondientes a las 14:00, o en su caso permiten realizar las correcciones de radio y distancias a fachada para las 17:00.

Las Ecuaciones 5.23 sirven para calcular las distancias hasta fachada (D_2) de los árboles cónicos para las 14:00 o para realizar las correcciones de radio y distancias a fachada para las 17:00.

Para la obtención de las fórmulas, en lo que respecta al radio, el proceso desarrollado y el resultado es el mismo para los árboles esféricos y cónicos, mientras que para la separación respecto a la fachada el resultado es diferente en cada caso.

Para la obtención del radio (R_2) de árboles esféricos y cónicos

Se obtiene en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar (α) y el ancho de la zona peatonal Este (d_2), siguiendo los esquemas que se muestran en la Figura 5.15, en función de la anchura de calle no sombreada por el edificio.

$$2 \times R_2 = \left[d_2 - \left(\frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin \beta \right) \right] \times \cos \beta$$

$R_2 = \frac{\left[d_2 - \left(\frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin \beta \right) \right] \times \cos \beta}{2}$	(Ecuación 5.21)
--	-----------------

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2), la cual es distinta para árboles esféricos y cónicos, se deriva de la separación de la copa respecto a la fachada (D_{2a}). Según lo representado en el esquema de la Figura 5.15, tenemos:

$$D_2 = d_2 - \left[(D_{2a} + R_2) \times \cos \beta \right]$$

Para la distancia (D_2) en árboles esféricos y posibles correcciones a las 17:00

Partiendo de la Figura 5.15, tenemos:

$$D_{2a} = \frac{H_t + R_2}{\tan \alpha} \times \tan \beta$$

$$D_2 = d_2 - \left[\left(\frac{H_t + R_2}{\tan \alpha} \times \tan \beta \right) + R_2 \right] \times \cos \beta$$

(Ecuación 5.22.1)

Para el caso en el que, según las ecuaciones 5.20 resultara necesario el arbolado para las 17:00, se recomienda analizar una corrección de la posición del árbol para mejorar el porcentaje de superficie sombreada a dicha hora, con el objetivo de obtener como mínimo un 70%. Para ello, se parte de una distancia desde el punto de sombreado hasta fachada del 70% de la anchura de la acera ($0,7 d_2$), y se tomará como punto de referencia el centro del árbol (esfera).

Por lo tanto, para árboles esféricos, tenemos según la Figura 5.16:

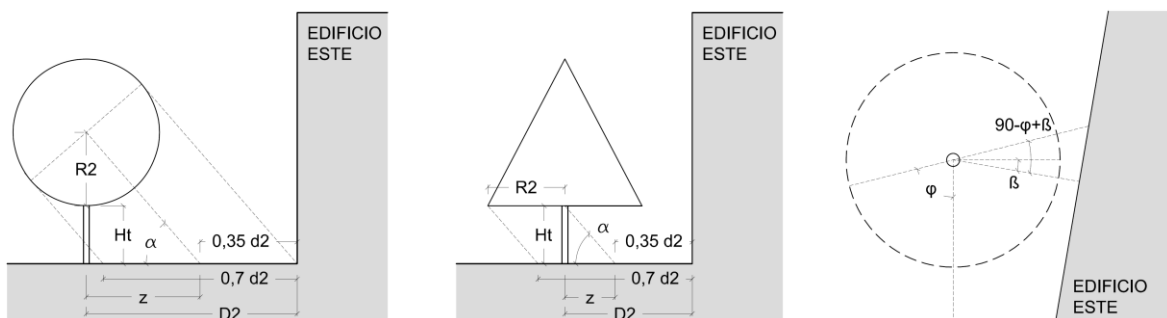


Figura 5.16 Diagramas en planta y en alzado para corrección de distancia a fachada (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Este considerando las 17:00.

$$\frac{0,35 d_2}{\cos (90-\varphi+\beta)} = \frac{R_2}{\sin \alpha}$$

$$R_2 = \frac{0,35 d_2 \times \sin \alpha}{\cos (90-\varphi+\beta)}$$

(Ecuación 5.22.2)

$$z = \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha}$$

$$D_2 = \left[0,35 d_2 + \frac{H_t + R_2}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi+\beta)$$

(Ecuación 5.22.3)

Remarcar que tal como se ha demostrado en el capítulo correspondiente a la aplicación práctica, la utilización de la corrección para las 17:00 en árboles esféricos conllevaría una mejora en los porcentajes de superficie sombreada a esa hora, aunque también una considerable reducción de los porcentajes de sombra generada a las 14:00.

Para la distancia (D_2) en árboles cónicos y posibles correcciones a las 17:00

Partiendo de la Figura 5.15, tenemos:

$$D_{2a} = \frac{H_t}{\tan \alpha} \times \tan \beta$$

$$D_2 = d_2 - \left[\left(\frac{H_t \times \tan \beta}{\tan \alpha} + R_2 \right) \times \cos \beta \right] \quad (\text{Ecuación 5.23.1})$$

Para el caso en el que según las ecuaciones 5.20 resultara necesario arbolado para las 17:00, se recomienda analizar una corrección de la posición del árbol. Según la Figura 5.16, tenemos:

$$0,35 d_2 = R_2 \times \cos (90-\varphi+\beta)$$

$$R_2 = \frac{0,35 d_2}{\cos (90-\varphi+\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.23.2})$$

$$z = \frac{H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_2 = \left[0,35 d_2 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi+\beta) \quad (\text{Ecuación 5.23.3})$$

Para los árboles cónicos, tal como se ha demostrado en el capítulo correspondiente a la aplicación práctica, la utilización de las fórmulas de

corrección para las 17:00 horas conlleva la obtención de mayores radios de copa, por lo que se consiguen mayores porcentajes de superficie sombreada sobre todo para las 17:00, e incluso para las 14:00.

Tanto para árboles esféricos y cónicos, las expresiones obtenidas serán utilizables siempre que el resultado garantice una separación mínima de la copa del árbol respecto a la fachada de 1 m.

Separación (S) entre árboles

En lo que respecta a la separación entre elementos de arbolado, se utilizarán las mismas fórmulas obtenidas para la acera Este.

Para árboles esféricos, la separación se obtiene de la misma manera que en la acera Oeste, en función del radio de la copa del árbol (R_2) y la altitud solar (α) a las 14:00, mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos (90 - \alpha)} \quad (\text{Ecuación 5.24})$$

Para la obtención de la separación en cada tipo de árbol se introducirán las variables correspondientes a abril-agosto, mayo-julio y junio, para posteriormente adoptarse el promedio entre ellos.

En cuanto a los árboles cónicos se aplica una distancia mínima entre copas de 0,50 m. (Ecuación 5.25). Se utilizaría también esta fórmula para los árboles esféricos en caso de que la anterior (Ecuación 5.24) no garantizara una distancia mínima entre copas de 0,50 m.

$$S = (2 \times R_2) + 0,50 \quad (\text{Ecuación 5.25})$$

donde (R_2) es el radio de la copa del árbol en la acera Este.

Ángulo β negativo en la orientación N-S

En caso ángulos (β) respecto al eje N-S negativos (sentido contrario a las agujas del reloj), la aplicación de las fórmulas para cada acera se deberá adaptar tal como se indica a continuación.

En general, para la acera Este se aplicarán las fórmulas presentadas para la acera Oeste a lo largo del apartado y viceversa, es decir, para la acera Oeste se aplicarán las fórmulas presentadas para la acera Este, aunque todo ello con las siguientes matizaciones.

Acera Este con ángulo β negativo

Para la comprobación de la necesidad de arbolado a las distintas horas se utilizarán las (Ecuaciones 5.14 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$\text{A las 11:00, si } 0,7 d_2 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos (90 - \varphi + \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 14:00, si } W - 0,3 d_2 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin \beta \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 17:00, si } W - 0,3 d_2 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \cos (90 - \varphi - \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

(Ecuaciones 5.14 bis)

Para el cálculo de los radios para árboles esféricos y cónicos con parámetros correspondientes a las 14:00 se utilizará la (Ecuación 5.15 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$R_2 = \frac{d_2}{2 \times \cos \beta} \quad \text{(Ecuación 5.15 bis)}$$

Para las distancias de los árboles esféricos respecto a las fachadas a las 14:00 y la obtención de los radios y las distancias corregidas para las 17:00 se utilizarán las (Ecuaciones 5.16 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$D_2 = \left[\left(\frac{H_t + R_2}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \right] + R_2 \quad \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.16.1 bis})$$

$$D_2 = 1 + R_2 \quad (\text{Ecuación 5.16.2 bis})$$

$$R_2 = \frac{0,35 d_2 \times \sin \alpha}{\cos (90-\varphi-\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.16.3 bis})$$

$$D_2 = \left[0,35 d_2 + \frac{H_t + R_2}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi-\beta) \quad (\text{Ecuación 5.16.4 bis})$$

Para las distancias de los árboles cónicos respecto a las fachadas a las 14:00 y la obtención de los radios y las distancias corregidas para las 17:00 se utilizarán las (Ecuaciones 5.17 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$D_2 = \left[\left(\frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \sin \beta \right] + R_2 \quad \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.17.1 bis})$$

$$D_2 = 1 + R_2 \quad (\text{Ecuación 5.17.2 bis}) \quad * \text{ si la distancia de la copa a fachada} < 1 \text{ m.}$$

$$R_2 = \frac{0,35 d_2}{\cos (90-\varphi-\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.17.3 bis})$$

$$D_2 = \left[0,35 d_2 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi-\beta) \quad (\text{Ecuación 5.17.4 bis})$$

Para las separaciones entre árboles se utilizará la Ecuación 5.18 bis para árboles esféricos y la Ecuación 5.19 bis para árboles cónicos:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos(90 - \alpha)} \quad (\text{Ecuación 5.18 bis})$$

$$S = (2 \times R_2) + 0,50 \quad (\text{Ecuación 5.19 bis})$$

Acera Oeste con ángulo β negativo

Para la comprobación de la necesidad de arbolado a las distintas horas se utilizarán las (Ecuaciones 5.20 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$\text{A las 11:00, si } W - 0,3 d_1 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin(\varphi - \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 14.00, si } 0,7 d_1 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin \beta \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

$$\text{A las 17:00, si } 0,7 d_1 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin(\varphi + \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

(Ecuaciones 5.20 bis)

Para el cálculo de los radios para árboles esféricos y cónicos con parámetros correspondientes a las 14:00 se utilizará la (Ecuación 5.21 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$R_1 = \frac{\left[d_1 - \left(\frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin \beta \right) \right] \times \cos \beta}{2} \quad (\text{Ecuación 5.21 bis})$$

Para las distancias de los árboles esféricos respecto a las fachadas a las 14:00 y la obtención de los radios y las distancias corregidas para las 11:00 se utilizarán las (Ecuaciones 5.22 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$D_1 = d_1 - \left[\left(\frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \times \tan \beta \right) + R_1 \right] \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.22.1 bis})$$

$$R_1 = \frac{0,35 d_1 \times \sin \alpha}{\cos (90-\varphi+\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.22.2 bis})$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi+\beta) \quad (\text{Ecuación 5.22.3 bis})$$

Para las distancias de los árboles cónicos respecto a las fachadas a las 14:00 y la obtención de los radios y las distancias corregidas para las 11:00 se utilizarán las (Ecuaciones 5.23 bis) introduciendo el ángulo β en valor positivo:

$$D_1 = d_1 - \left[\left(\frac{H_t \times \tan \beta}{\tan \alpha} + R_1 \right) \times \cos \beta \right] \quad (\text{Ecuación 5.23.1 bis})$$

$$R_1 = \frac{0,35 d_1}{\cos (90-\varphi+\beta)} \quad (\text{Ecuación 5.23.2 bis})$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (90-\varphi+\beta) \quad (\text{Ecuación 5.23.3 bis})$$

Para las separaciones entre árboles se utilizará la Ecuación 5.24 bis para árboles esféricos y la Ecuación 5.25 bis para árboles cónicos:

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos (90 - \alpha)} \quad (\text{Ecuación 5.24 bis})$$

$$S = (2 \times R_1) + 0,50 \quad (\text{Ecuación 5.25 bis})$$

5.4.3 Orientación Noroeste- Sureste (NO-SE)

Las condiciones para la comprobación de la necesidad de plantación de árboles y las fórmulas que se proponen en este apartado son válidas y específicas para una orientación Noroeste- Sureste, incluyendo posibles rotaciones de la calle (β) entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ respecto al eje geográfico E-O (en el sentido de las agujas del reloj,

según Figura 5.17). Indicar que en esta orientación el ángulo de rotación de la calle será positivo en todos los casos.

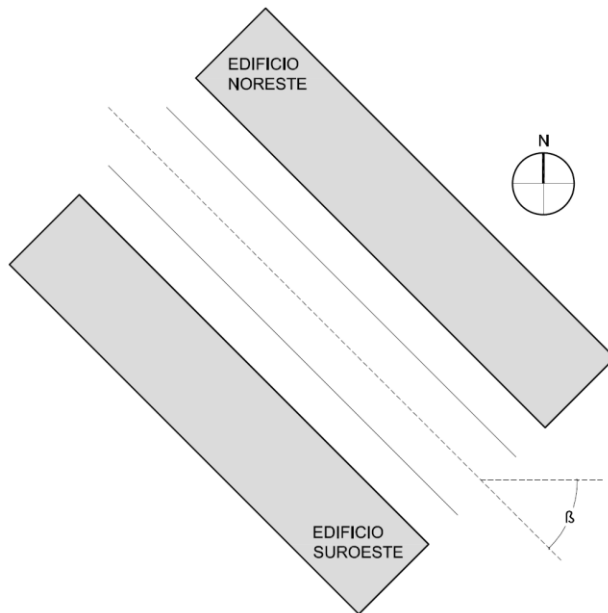


Figura 5.17: Esquema de calle con orientación Noroeste-Sureste, incluyendo posibles rotaciones de la calle de entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ (en el sentido de las agujas del reloj) respecto al eje geográfico E-O.

Acera Noreste

La verificación de la necesidad de árboles se realiza mediante las ecuaciones 5.26 considerando la sombra que generan los edificios (línea de sombra según Figura 5.21) para el mes de junio, siguiendo con el criterio de que el 70% de la superficie de la acera quede sombreada a las tres horas consideradas.

A las 11:00, si $0,7 d_1 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin (\beta - 90 + \varphi)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 14:00, si $\frac{W - 0,3 d_1}{\cos \beta} > \frac{He_2}{\tan \alpha}$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 17:00, si $W - 0,3 d_1 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.26)

donde:

- α representa la altitud solar por hora y mes (junio)
- φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)
- β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera siempre positivo al ser en el sentido de las agujas del reloj)
- W representa el ancho total de la calle.
- d_1 representa el ancho de la zona peatonal Noreste.
- He_1 representa la altura del edificio Noreste.
- He_2 representa la altura del edificio Suroeste.

Se considera que la necesidad de árboles durante al menos dos de las tres horas evaluadas (principalmente a las 14:00) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Noreste.

Se definen varias fórmulas: la Ecuación 5.28 permite calcular el radio (R_1) de árboles esféricos y cónicos para los parámetros correspondientes a las 14:00. Las Ecuaciones 5.29 establecen la distancia a fachada (D_1) para árboles esféricos con parámetros correspondientes a las 14:00, o en su caso permiten realizar las correcciones de distancia a fachada para las 17:00. Las Ecuaciones 5.30 sirven para calcular las distancias hasta fachada (D_1) de los árboles cónicos para las 14:00 o para realizar las correcciones de las distancias a fachada para las 17:00. Los esquemas gráficos de ubicación y separación entre árboles en esta acera Noreste se representan en la Figura 5.18.

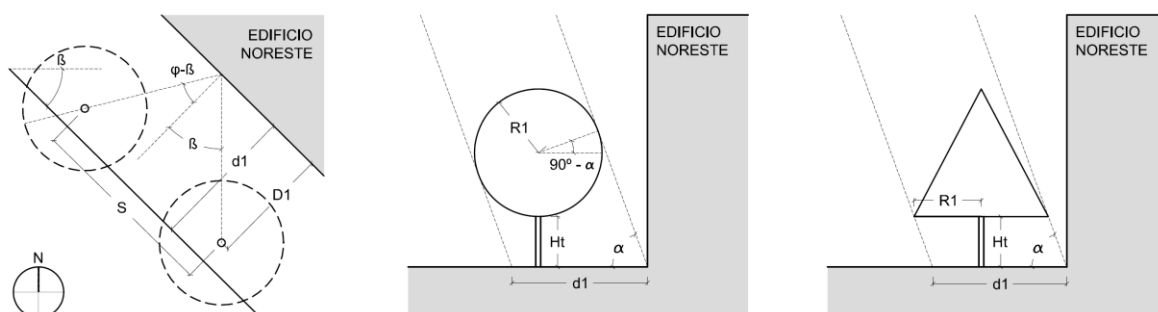


Figura 5.18 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste.

Para la obtención del radio (R₁) de árboles esféricos y cónicos

Para la obtención del radio se parte de las expresiones utilizadas para las otras orientaciones. Para la orientación E-O (acera Norte) como para la orientación N-S (acera Oeste), los radios en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar (α) y el ancho de la zona peatonal Norte (d_1) se obtenían de la siguiente manera:

En la orientación E-O para árboles esféricos tenemos
$$R_1 = \frac{d_1 \times \cos(90-\alpha)}{2 \times \cos \beta}$$

En la orientación E-O para árboles cónicos tenemos
$$R_1 = \frac{d_1}{2 \times \cos \beta}$$

En orientación N-S para cónicos y esféricos tenemos
$$R_1 = \frac{d_1}{2 \times \cos \beta}$$

Para esta orientación intermedia, tal como se observa en el diagrama de la Figura 5.19, a las 14:00 el factor de la altitud solar (α) queda suprimido debido a la oblicuidad de la calle, mientras que la aplicación de la orientación de la calle genera un exceso de sombra en los edificios Noreste, por lo que a esta hora la expresión queda reducida a:

$$R_1 = \frac{d_1}{2}$$

(Ecuación 5.28)

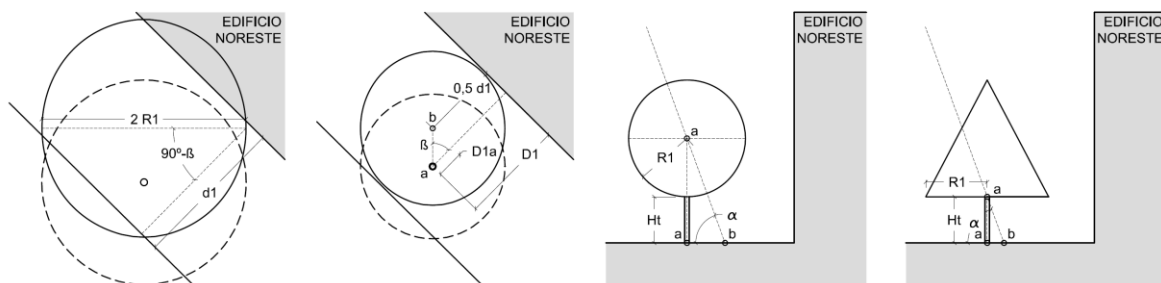


Figura 5.19 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste a las 14:00.

Para la distancia (D_1) en árboles esféricos y posibles correcciones a las 17:00

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1) se obtiene considerando que el centro de la sombra arrojada por el mismo se encuentre en el centro de la zona peatonal Noreste a las 14:00, por lo que según la Figura 5.19 tenemos:

$$D_1 = 0,5 d_1 + D_{1a}$$

$$D_{1a} = \frac{R_1 + H_t}{\tan \alpha} \times \cos \beta$$

$D_1 = 0,5 d_1 + \left(\frac{R_1 + H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta$	(Ecuación 5.29.1)
--	-------------------

donde:

R_1 es el radio de copa obtenido

α representa la altitud solar por hora (14:00) y mes

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Noreste

H_t representa la altura del tronco supuesta (3 m.)

En caso de que resultara necesaria la sombra a las 17:00 según las Ecuaciones 5.26, se recomienda analizar una corrección únicamente de la posición del árbol para mejorar el porcentaje de superficie sombreada a dicha hora, con el objetivo de obtener como mínimo un 70%.

En esta orientación no se realiza una corrección del radio para las 17:00 ya que no procede la utilización del factor de la altitud solar (α) debido a la oblicuidad de la calle.

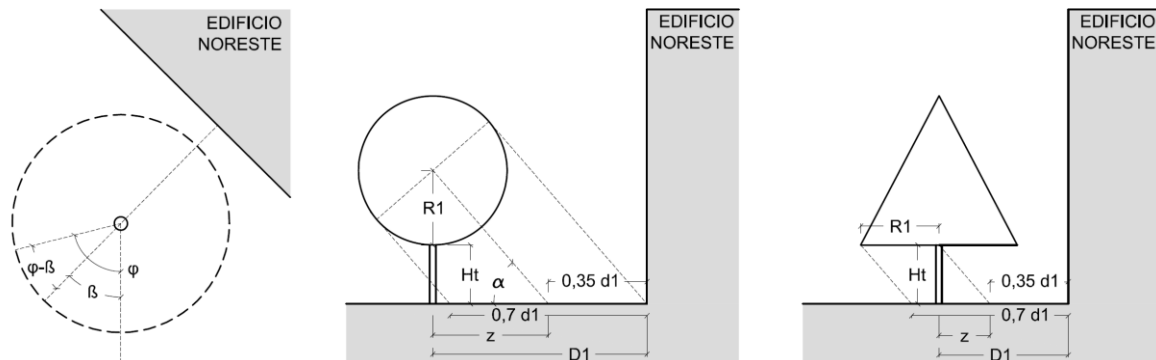


Figura 5.20 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia “corregida” para las 17:00 desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noreste.

Por lo tanto, para árboles esféricos, tenemos según la Figura 5.20:

$$z = \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right] \times \cos (\varphi - \beta) \quad (\text{Ecuación 5.29.2})$$

Para la distancia (D_1) en árboles cónicos y posibles correcciones a las 17:00

La distancia se obtiene asimismo según el esquema de la Figura 5.19.

$$D_{1a} = \frac{H_t}{\tan \alpha} \times \cos \beta$$

$$D_1 = 0,5 d_1 + \left(\frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.30.1})$$

Para la corrección de la posición del árbol a las 17:00 en caso de que resultara necesaria, según la Figura 5.20 se obtiene:

$$z = \frac{H_t}{\tan \alpha}$$

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (\varphi - \beta) \quad (\text{Ecuación 5.30.2})$$

Separación (S) entre árboles

La separación entre elementos de arbolado en la acera Noreste se calcula según el esquema de la Figura 5.18, válido para árboles esféricos como cónicos. Tomando en consideración las variables correspondientes a las 14:00 se obtiene:

$$2 \times R_1 = S \times \cos \beta$$

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.31})$$

No obstante, y considerando que para esta orientación en la acera Noreste el caso más desfavorable para la separación del arbolado se produce a las 17:00, siempre que fuera necesario el arbolado a esta hora, conviene hacer una corrección introduciendo el factor de acimut en esta hora:

$$2 \times R_1 = S \times \cos (\varphi - \beta)$$

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos (\varphi - \beta)}$$

Asimismo, de cara al acimut que se produce a las 17:00, los meses más desfavorables serían los de abril-agosto, por lo que en la fórmula se puede introducir el valor $\varphi = 65^\circ$, quedando la expresión de esta manera:

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos (65^\circ - \beta)} \quad (\text{Ecuación 5.32})$$

donde:

S representa la separación entre elementos de arbolado (m)

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

R_1 representa el radio de los árboles de la acera Noreste (m)

Las consideraciones realizadas anteriormente respecto a la altura de las copas de los árboles cónicos serían aplicables también para esta orientación Noroeste-Sureste, en el que dicho factor tampoco tendrá un especial impacto en el cálculo propuesto.

Acera Suroeste

La verificación de la necesidad de árboles se realiza mediante las Ecuaciones 5.33 considerando la sombra que generan los edificios (línea de sombra según Figura 5.21) en el mes de junio para las tres horas consideradas, y con el objetivo del 70% de superficie sombreada.

A las 11:00, si $W - 0,3 d_2 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin (\beta - 90 + \varphi)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 14:00, si $\frac{0,7 d_2}{\cos \beta} > \frac{He_2}{\tan \alpha}$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 17:00, si $0,7 d_2 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.33)

donde:

α representa la altitud solar por hora y mes (junio)

φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)

β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera siempre positivo al ser en el sentido de las agujas del reloj)

W representa el ancho total de la calle

d_2 representa el ancho de la zona peatonal Suroeste.

He_1 representa la altura del edificio Noreste.

He_2 representa la altura del edificio Suroeste.

La necesidad de árboles durante dos de las tres horas consideradas (es decir, en caso de ser necesaria para las 14:00) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Suroeste.

Se definen las siguientes fórmulas: Ecuación 5.34 para calcular el radio (R_1) de árboles esféricos y cónicos para los parámetros correspondientes a las 14:00. La Ecuación 5.35 establece la distancia a fachada (D_1) para árboles esféricos con parámetros correspondientes a las 14:00. La Ecuación 5.36 permite calcular las distancias hasta fachada (D_1) de los árboles cónicos para las 14:00.

El radio se contempla únicamente considerando las 14:00, ya que según comprobaciones realizadas, el cálculo del radio introduciendo las variables correspondientes a las 11:00 generaría radios excesivamente elevados.

No resulta tampoco procedente la corrección de la posición del arbolado a las 11:00, ya que para un ángulo de orientación de la calle (β) reducido cercano a $27,5^\circ$ los árboles se acercarían en exceso a la fachada, y con un ángulo (β) cercano a $67,5^\circ$ los árboles se alejarían en exceso, en ambos casos, penalizando el sombreado para las 14:00.

Para ángulos (β) intermedios, la posición del arbolado sería similar al conseguido mediante los parámetros de las 14:00.

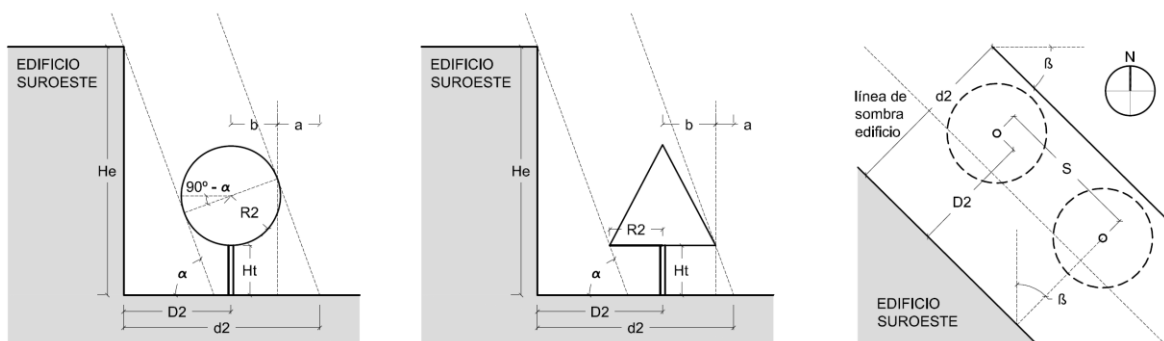


Figura 5.21 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Suroeste.

Para la obtención del radio (R_2) de árboles esféricos y cónicos

Las fórmulas para determinar el radio apropiado de la copa de los árboles (R_2) y la distancia desde el árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de la acera peatonal Suroeste se obtienen según el siguiente proceso, debiendo introducirse en las mismas las variables correspondientes a las 14:00 durante los meses considerados.

Tanto para la orientación E-O (acera Sur) como para la orientación N-S (acera Este), los radios en función de la orientación de la calle (β), la altitud solar (α) y el ancho de la zona peatonal (d_2) son los siguientes, siguiendo el esquema de la Figura 5.22:

En la orientación E-O para árboles esféricos tenemos:

$$R_2 = \left(\frac{d_2}{\cos \beta} - \frac{H_e}{\tan \alpha} \right) \times \frac{\cos (90 - \alpha)}{2}$$

En la orientación E-O para árboles cónicos tenemos:

$$R_2 = \frac{\frac{d_2}{\cos \beta} - \frac{H_e}{\tan \alpha}}{2}$$

En orientación N-S para cónicos y esféricos tenemos

$$R_2 = \frac{\left[d_2 - \left(\frac{H_{e2}}{\tan \alpha} \times \sin \beta \right) \right] \times \cos \beta}{2}$$

Para esta orientación Noroeste-Sureste intermedia, tal como se observa en el diagrama de la Figura 5.22, a las 14:00, el factor de la altitud solar (α) queda suprimido en su consideración del radio de los árboles esféricos (no así en el de la sombra de los edificios) debido a la oblicuidad de la calle, mientras que la introducción de la orientación de la calle genera un exceso de sombra que

trasciende al área de la acera, por lo que a esta hora la expresión queda reducida a la siguiente:

$$R_2 = \frac{\left(d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \right)}{2} \quad (\text{Ecuación 5.34})$$

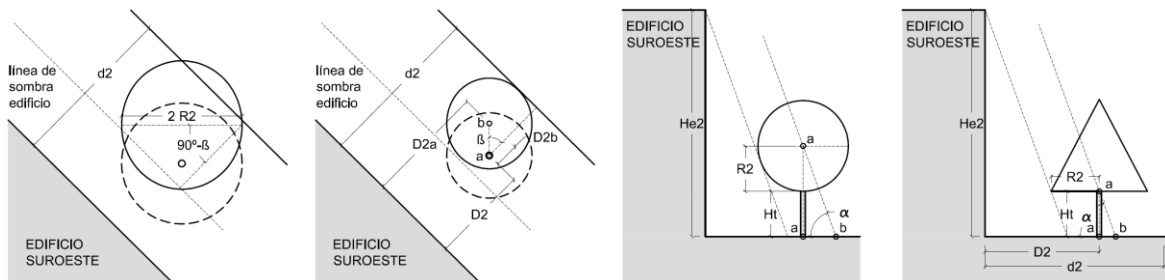


Figura 5.22 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por introducción del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Suroeste a las 14:00.

Para la distancia (D_2) en árboles esféricos

Las distancias desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) se obtienen mediante las siguientes expresiones según los esquemas de la Figura 5.22, donde (H_t) representa la altura del tronco supuesta (de 3 m):

$$D_2 = D_{2a} - D_2$$

$$D_{2a} = d_2 - \left(\frac{d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos \beta}{2} \right)$$

$$D_{2b} = \frac{R_2 + H_t}{\tan \alpha} \times \cos \beta$$

$$D_2 = d_2 - \left(\frac{d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos \beta}{2} \right) - \frac{R_2 + H_t}{\tan \alpha} \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.35})$$

Para la distancia (D_2) en árboles cónicos

La distancia D_2 para los árboles cónicos se obtiene de la misma manera que para los árboles esféricos, aunque con el ajuste del parámetro D_{2b} :

$$D_{2b} = \frac{Ht}{\tan \alpha} \times \cos \beta$$

Con lo que se obtiene:

$$D_2 = d_2 - \left(\frac{d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos \beta}{2} \right) - \frac{Ht}{\tan \alpha} \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.36})$$

Separación (S) entre árboles

En lo que respecta a la separación entre los elementos de arbolado, al igual que en el caso de la acera la acera Noreste, se barajan dos hipótesis:

En general, la separación entre los elementos de arbolado será:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.37})$$

No obstante, en caso de que sea necesaria la plantación de arbolado para las 17:00 según la condición indicada anteriormente, la separación será:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos (65^\circ - \beta)} \quad (\text{Ecuación 5.38})$$

donde:

S representa la separación entre elementos de arbolado (m)

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

R_2 representa el radio de los árboles de la acera Suroeste (m)

5.4.4 Orientación Noreste- Suroeste (NE-SO)

Las condiciones para la comprobación de la necesidad de plantación de árboles y las fórmulas que se proponen en este apartado son válidas y específicas para una orientación Noreste-Suroeste, incluyendo posibles rotaciones de la calle (β) de entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ (en el sentido contrario a las agujas del reloj según la Figura 5.23) respecto al eje geográfico E-O. En esta orientación también el ángulo de rotación de la calle será positivo en todos los casos.

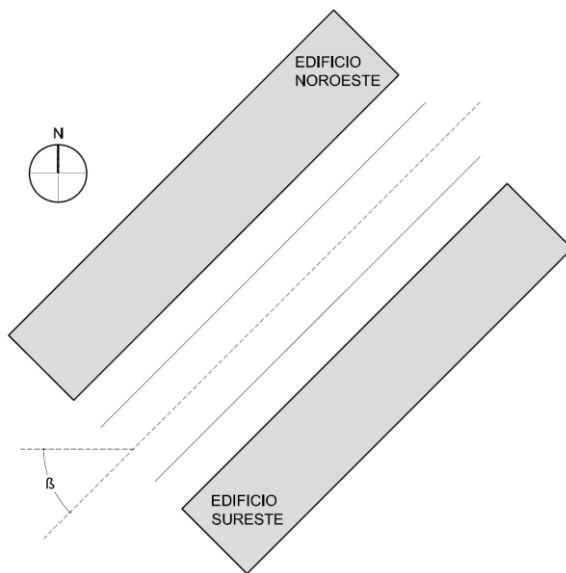


Figura 5.23: Esquema de calle con orientación Noreste-Suroeste incluyendo posibles rotaciones de entre $27,5^\circ$ y $67,5^\circ$ (en el sentido contrario a las agujas del reloj) respecto al eje geográfico E-O.

Acera Noroeste

La verificación de la necesidad de árboles se realiza mediante las ecuaciones 5.39, considerando la sombra que brindan los edificios (línea de sombra según Figura 5.27) para el mes de junio. Se traza también como objetivo que el 70% de la superficie de la acera quede sombreada.

$$\text{A las 11:00, si } W - 0,3 d_1 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta) \quad \text{Sombreado adicional (árbol) necesario.}$$

A las 14:00, si
$$\frac{W - 0,3 d_1}{\cos \beta} > \frac{He_2}{\tan \alpha}$$

Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 17:00, si
$$0,7 d_1 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin (\varphi - 90 + \beta)$$

Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.39)

donde:

α representa la altitud solar por hora y mes (junio)

φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)

β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera positivo en el sentido contrario a las agujas del reloj)

W representa el ancho total de la calle.

d_1 representa el ancho de la zona peatonal Noroeste.

He_1 representa la altura del edificio Noroeste.

He_2 representa la altura del edificio Sureste.

Se considera que la necesidad de árboles durante al menos dos de las tres horas evaluadas (principalmente a las 14:00) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Noroeste.

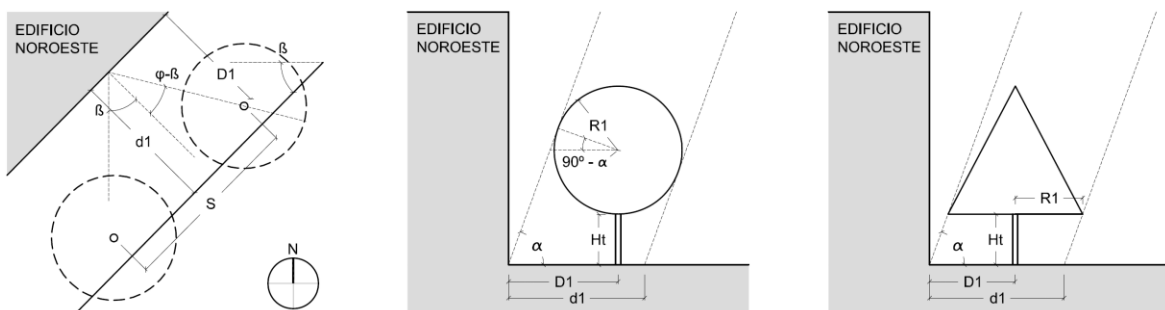


Figura 5.24 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación de árboles hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste.

Los esquemas gráficos de ubicación y separación entre árboles en esta acera Noroeste se representan en la Figura 5.24.

Para el cálculo del radio (R_1) de árboles esféricos y cónicos

Para esta orientación Noreste-Suroeste intermedia, y tal como ocurría en la Acera Noreste de la orientación NO-SE, según se observa en el diagrama de la Figura 5.25, a las 14:00 el factor de la altitud solar (α) queda suprimido debido a la oblicuidad de la calle, mientras que la aplicación de la orientación de la calle genera un exceso de sombra en los edificios Noroeste, por lo que para calcular el radio se utiliza la misma Ecuación 5.28:

$$R_1 = \frac{d_1}{2} \quad (\text{Ecuación 5.28})$$

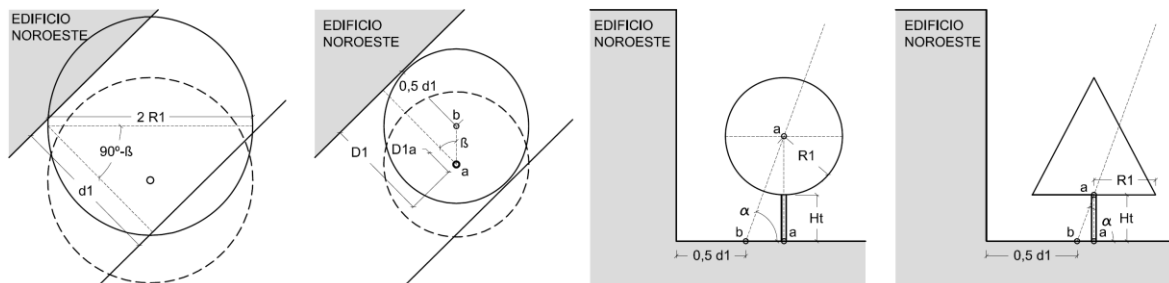


Figura 5.25 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste a las 14:00.

Para la distancia (D_1) en árboles esféricos y posibles correcciones a las 11:00

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1), se obtiene también considerando que el centro de la sombra arrojada por el mismo se encuentre en el centro de la zona peatonal Noroeste a las 14:00 (Figura 5.25), por lo que se utiliza la misma Ecuación 5.29:

$$D_1 = 0,5 d_1 + \left(\frac{R_1 + H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.29.1})$$

En caso de que resultara necesaria la sombra a las 11:00 según las Ecuaciones 5.39, se recomienda analizar una corrección de la posición del árbol para mejorar el porcentaje de superficie sombreada a dicha hora, con el objetivo de obtener como mínimo un 70%.

En esta orientación tampoco se propone una corrección del radio para las 11:00 al no proceder la utilización del factor de la altitud solar (α) debido a la oblicuidad de la calle.

Por lo tanto, para árboles esféricos y según la Figura 5.26, podría utilizarse la misma Ecuación 5.29.2:

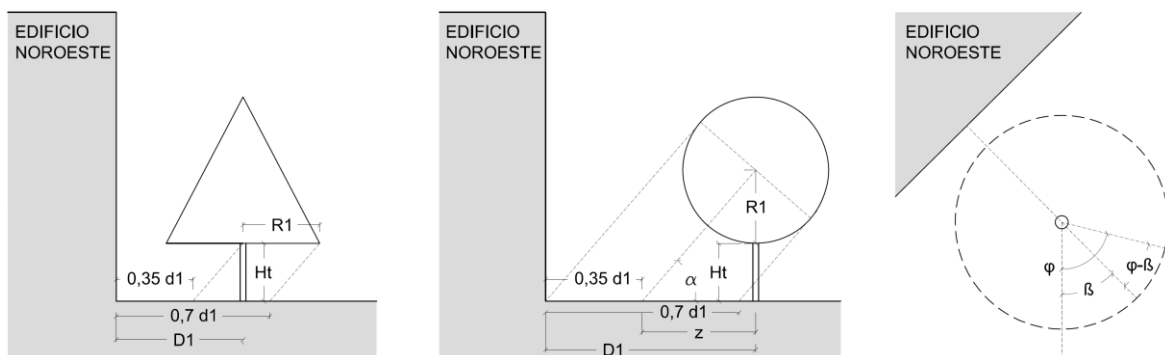


Figura 5.26 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia “corregida” para las 11:00 desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_1) de árboles esféricos y cónicos para la acera Noroeste.

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t + R_1}{\tan \alpha} \right] \times \cos (\varphi - \beta) \quad (\text{Ecuación 5.29.2})$$

Para la distancia (D_1) en árboles cónicos y posibles correcciones a las 11:00

Para la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1) se utiliza la ecuación 5.30.1:

$$D_1 = 0,5 d_1 + \left(\frac{H_t}{\tan \alpha} \right) \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.30.1})$$

Para la corrección de la posición del árbol a las 11:00 en caso de que resultara necesaria y según la Figura 5.26, podría asimismo utilizarse la Ecuación 5.30.2:

$$D_1 = \left[0,35 d_1 + \frac{H_t}{\tan \alpha} \right] \times \cos (\varphi - \beta) \quad (\text{Ecuación 5.30.2})$$

Separación (S) entre árboles:

En lo que respecta a las separaciones entre elementos y según la Figura 5.24, en caso de que los árboles fueran necesarios solamente a las 14:00, se utilizaría la Ecuación 5.31:

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.31})$$

En caso de que se necesitara el arbolado también a las 11:00, se utilizaría la Ecuación 5.32:

$$S = \frac{2 \times R_1}{\cos (65^\circ - \beta)} \quad (\text{Ecuación 5.32})$$

donde:

S representa la separación entre elementos de arbolado (m)

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

R_1 representa el radio de los árboles de la acera Noroeste (m)

Acera Sureste

La verificación de la necesidad de árboles se realiza mediante las Ecuaciones 5.40, considerando la sombra que generan los edificios (línea de sombra según Figura 5.27) sobre la acera Sureste en el mes de junio (se considera el objetivo de que el 70% de la superficie quede sombreada):

A las 11:00, si $0,7 d_2 > \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \sin (90 - \varphi + \beta)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 14:00, si $\frac{0,7 d_2}{\cos \beta} > \frac{He_2}{\tan \alpha}$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

A las 17:00, si $W - 0,3 d_2 > \frac{He_1}{\tan \alpha} \times \sin (\beta - 90 + \varphi)$ Sombreado adicional (árbol) necesario.

(Ecuaciones 5.40)

donde:

α representa la altitud solar por hora y mes (junio)

φ representa el acimut solar por hora (11:00 y 17:00) y mes (junio)

β representa la orientación de la calle con respecto al eje E-O (se considera positivo en el sentido contrario a las agujas del reloj)

d_2 representa el ancho de la zona peatonal Sureste.

He_1 representa la altura del edificio Noroeste.

He_2 representa la altura del edificio Sureste.

La necesidad de árboles durante al menos dos de las tres horas consideradas (es decir, en caso de ser necesaria para las 14:00) es motivo suficiente para plantar árboles en la acera Sureste.

El radio se contempla únicamente considerando las 14:00, ya que según comprobaciones realizadas, el cálculo del radio introduciendo las variables correspondientes a las 17:00 generaría valores excesivamente elevados.

No resulta tampoco procedente la corrección de la posición del arbolado a las 17:00, ya que para un ángulo de orientación de la calle (β) reducido cercano a $27,5^\circ$ los árboles se acercarían en exceso a la fachada, y con un ángulo (β) cercano a $67,5^\circ$ los árboles se alejarían en exceso, en ambos casos, penalizando el sombreado para las 14:00.

Para ángulos (β) intermedios, la posición del arbolado sería similar al conseguido mediante los parámetros de las 14:00.

Para la obtención del radio (R_2) de árboles esféricos y cónicos

Las fórmulas para determinar el radio apropiado de la copa de los árboles (R_2) y la distancia desde el árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de la acera peatonal Sureste son las siguientes, debiendo introducirse en las mismas las variables correspondientes a las 14:00 durante los meses considerados.

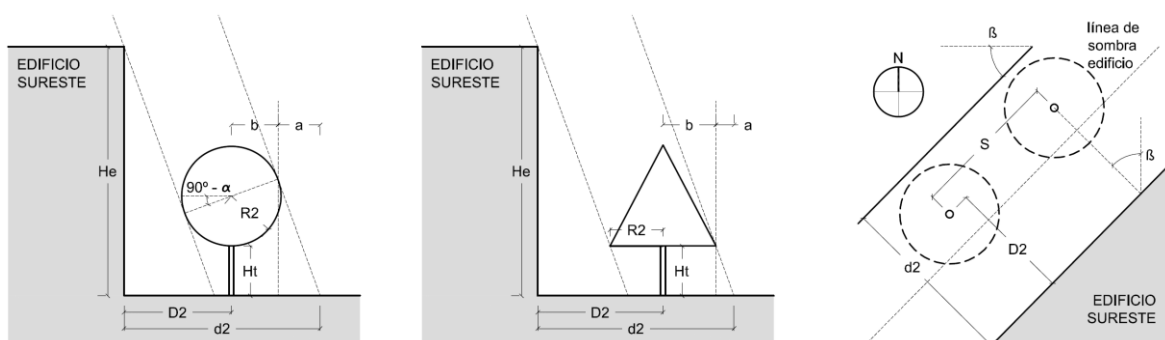


Figura 5.27 Diagramas de vista en planta y en alzado para calcular el radio óptimo de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación hasta la pared del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sureste.

Para esta orientación igualmente, tal como se observa en el diagrama de la Figura 5.28, a las 14:00, el factor de la altitud solar (α) queda suprimido en su

consideración del radio para los árboles esféricos (no así en el de la sombra de los edificios) debido a la oblicuidad de la calle, mientras que la aplicación de la orientación de la calle genera un exceso de sombra que trasciende al área de la acera, por lo que para el cálculo del radio a las 14:00 se utiliza la Ecuación 5.34:

$$R_2 = \frac{\left(d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \right)}{2} \quad (\text{Ecuación 5.34})$$

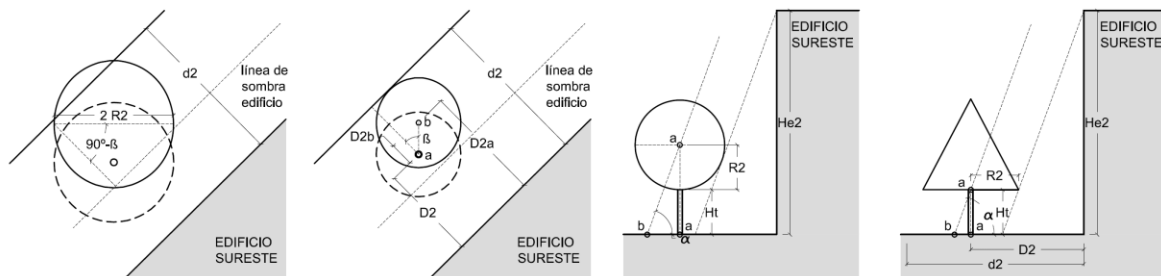


Figura 5.28 Izquierda: diagrama de demostración del exceso de sombra generado por aplicación del ángulo de orientación (β). Derecha: diagramas de vista en planta y en alzado para calcular la distancia desde el punto de plantación hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos para la acera Sureste a las 14:00.

Para la distancia (D_2) de los árboles esféricos

La distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) se obtiene mediante la Ecuación 5.35 para árboles esféricos según los esquemas de la Figura 5.28, donde (H_t) representa la altura del tronco supuesta de 3 m.:

$$D_2 = d_2 - \left(\frac{d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos \beta}{2} \right) - \frac{R_2 + H_t}{\tan \alpha} \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.35})$$

Para la distancia (D_2) de los árboles cónicos

La distancia D_2 para árboles cónicos se obtiene mediante la Ecuación 5.36 para árboles cónicos según los esquemas de la Figura 5.28:

$$D_2 = d_2 - \left(\frac{d_2 - \frac{He_2}{\tan \alpha} \times \cos \beta}{2} \right) - \frac{Ht}{\tan \alpha} \times \cos \beta \quad (\text{Ecuación 5.36})$$

Separación (S) entre árboles

La separación entre los elementos de arbolado, en general, se calculará mediante la Ecuación 5.37:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos \beta} \quad (\text{Ecuación 5.37})$$

En caso de que sea necesaria la plantación de arbolado para las 17:00, la separación será:

$$S = \frac{2 \times R_2}{\cos (65^\circ - \beta)} \quad (\text{Ecuación 5.38})$$

donde:

S representa la separación entre elementos de arbolado (m)

β representa la orientación de la calle respecto al eje E-O

R_2 representa el radio de los árboles de la acera Sureste (m)

5.5 Plantación y crecimiento del arbolado

Resulta necesario hacer una valoración de las necesidades constructivas para la plantación de la especie de árbol elegida, así como una aproximación a los plazos de crecimiento que ofrece la misma. La propuesta de optimización irá dando resultado a medida que se alcancen dimensiones similares a las estimadas.

Lógicamente, la integración de los árboles y su plantación constructiva resulta más sencilla en las zonas de nuevo desarrollo urbano que en las áreas existentes. En este sentido, indicar que la inclusión de arbolado es obligatoria en áreas urbanas de nuevo desarrollo de acuerdo con la legislación local (estándares urbanísticos). También será más dificultosa la plantación de árboles en una superficie peatonal totalmente pavimentada que en una con un área verde integrada.

Sobre el crecimiento de los árboles, la propuesta de optimización irá dando resultado a medida que se vayan alcanzando dimensiones similares a las estimadas. Los árboles podrían ser transportados al sitio propuesto, aunque cuanto más avanzado sea su crecimiento, más difícil será plantarlos en el espacio urbano.

Por otra parte, el crecimiento de los árboles y su vida útil dependerá de muchas condiciones aunque principalmente de las características del suelo bajo el pavimento, donde el enraizamiento es más complicado en suelos pedregosos o excesivamente compactos. También dependerá de su grado de exposición a la radiación solar, la cual puede ser cambiante en caso de estar sometidos a la sombra de los edificios (Rotzer et al., 2020).

Por ejemplo, en el caso concreto del *Acer opalus* se pueden percibir dos fases de crecimiento: plantones jóvenes (edad 2-5 años) y plantones viejos (edad 6-10 años) (Quero, Gomez-Aparicio, Zamora, & Maestre, 2008). La especie madura a

los 10 años y tiene un ciclo de vida medio de 40 años, con un máximo de 80 años. (Favillier et al., 2015).

La oferta comercial local para plantación de árboles oscila generalmente entre los 12 y 20 cm. de diámetro de tronco, que son las dimensiones de los árboles que se suelen plantar en espacios urbanos. Aunque es difícil precisarlo con exactitud, estas dimensiones del tronco podrían considerarse para el caso del *Acer opalus* en una fase de crecimiento entre plántones jóvenes y viejos. A modo de referencia, en la Tabla 5.4 se representa la relación entre el diámetro de la copa y el diámetro del tronco de algunas especies de arbolado seleccionadas (Rotzer et al., 2020).

Tabla 5.4 Diámetros de copa en función del diámetro del tronco a altura 1,30 m. Información obtenida de (Rotzer et al., 2020).

	Diámetro de tronco			
	10 cm.	20 cm.	30 cm.	40 cm.
<i>Acer pseudoplanus</i>	4,38 m.	6,34 m.	7,88 m.	9,18 m.
<i>Aesculus hippocastanum</i>	4,62 m.	7,00 m.	8,94 m.	10,62 m.
<i>Alnus glutinosa</i>	3,80 m.	5,96 m.	7,76 m.	9,36 m.
<i>Carpinus betulus</i>	4,92 m.	8,64 m.	10,80 m.	12,64 m.
<i>Fagus sylvatica</i>	5,98 m.	8,30 m.	10,04 m.	11,50 m.
<i>Fraxinus excelsior</i>	3,58 m.	5,46 m.	6,98 m.	8,30 m.
<i>Quercus robur</i>	3,10 m.	5,48 m.	7,62 m.	9,64 m.
<i>Sorbus aucuparia</i>	4,08 m.	5,60 m.	6,76 m.	7,72 m.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.29 se representan algunas especies de árboles recién plantadas en la c/ María Días de Haro de Bilbao. Las especies de árbol representadas son *Acer opalus*, *Tilia platyphyllos* y *Tilia tomentosa*, indicándose en las imágenes las dimensiones de copa y altura de tronco aproximadas en el momento de su plantación.



Figura 5.29 Árboles recién plantados en la c/ María Díaz de Haro de Bilbao. Izquierda: *Acer opalus*. Centro: *Tilia platyphyllos*. Derecha: *Tilia tomentosa*.

El *Acer opalus* recién plantado tiene una anchura de copa de 2,30 m. y altura de copa 4,40 m. frente a los 7 m. de anchura media y 9 m. de altura media que suele llegar a alcanzar. Por su parte, las especies *Tilia platyphyllos* y *Tilia tomentosa* de la imagen presentan una anchura de copa aproximada de 3,50 m., muy por debajo de la anchura media que pueden llegar a alcanzar.

En relación al crecimiento, también es necesario remarcar que la forma genéticamente determinada de un árbol en condiciones ideales (genotipo) puede resultar modificada, dando como resultado al llamado fenotipo.

En el caso de entornos urbanos, la forma y dimensiones de la copa de los árboles tiende a modificarse debido a componentes inanimados (Rotzer et al., 2020) o antropogénicos derivados del mantenimiento. La Figura 5.30 muestra algunas posibles modificaciones en la geometría de los árboles debido a distintos condicionantes.

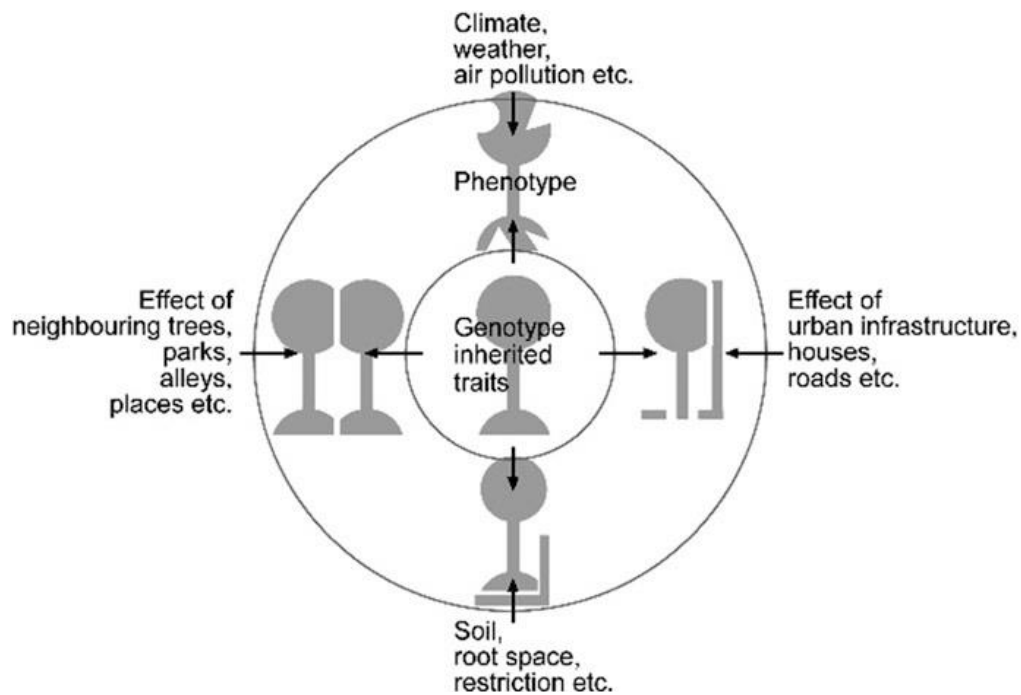


Figura 5.30 Genotipo y fenotipo. Posibles modificaciones en la geometría de los árboles en función de condicionantes internos y externos (Rotzer et al., 2020).

Actualmente se están desarrollando distintos modelos para determinar el crecimiento del arbolado urbano, lo cual es crucial para el diseño de la vegetación en las ciudades (Rotzer et al., 2020).

5.6 Adaptación de la metodología a otras localizaciones geográficas

La metodología planteada podría ser aplicada en otras ubicaciones geográficas que estuvieran afectadas por el estrés térmico relacionado con el calor. No obstante, las fórmulas matemáticas planteadas en este capítulo solamente serían utilizables para localizaciones donde el recorrido solar se mantuviera en el lado Sur respecto al eje geográfico Este-Oeste para los meses más calurosos del año.

Tal como se puede observar en la Figura 5.31, ese límite podría quedar establecido en latitudes superiores al paralelo 29° , ya que para el caso de Tenerife, situado en latitud 28° , la posición del sol a las 11:00 y las 17:00 del día 21 de junio quedaría ya situado hacia al Norte respecto al eje geográfico Este-

Oeste. Asimismo, para esas latitudes superiores al paralelo 29°, los meses en los que las condiciones meteorológicas son más calurosas quedarían incluidos en el intervalo que se ha considerado para la cornisa cantábrica (abril - agosto).

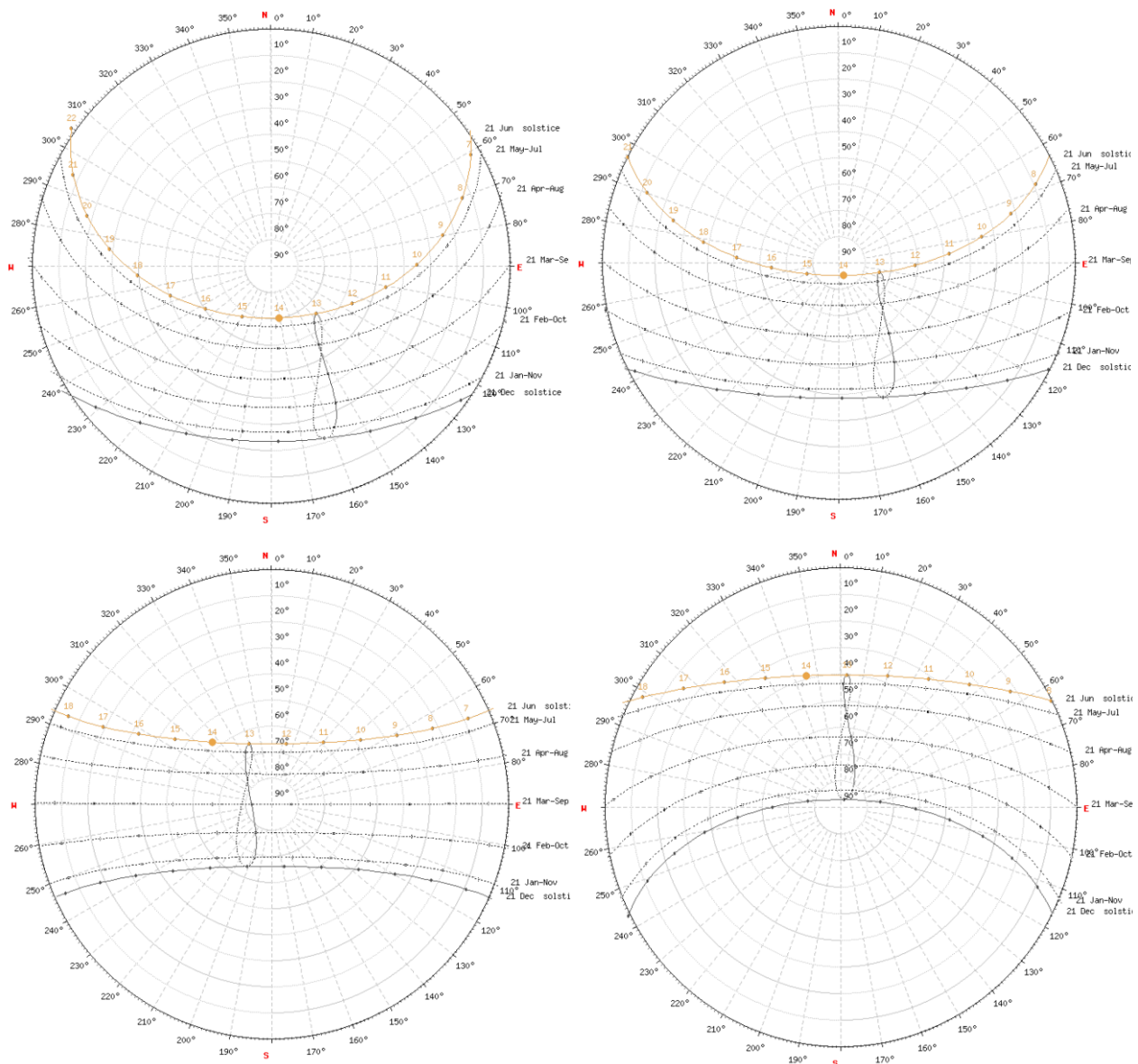


Figura 5.31 Recorrido solar durante los meses del año para distintas latitudes. Izquierda superior: Bilbao (Latitud 43°). Derecha superior: Tenerife (latitud 28°). Izquierda inferior: Libreville (Latitud 0°). Derecha inferior: Johannesburgo (Latitud -26°). Fuente: SunEarthTools.com.

Además, en latitudes más bajas, los meses más cálidos del año varían respecto a lo considerado en este capítulo. Por ejemplo, en Libreville (latitud 0°), los meses más calurosos son entre enero y mayo, si bien las condiciones meteorológicas

son cálidas a lo largo de todo el año. En el caso de Johannesburgo (latitud -26°), los meses más calurosos del año son entre septiembre y marzo.

En el caso de localizaciones de latitud superior a 29° , las fórmulas planteadas en este capítulo resultan válidas, aunque los valores de los parámetros utilizados tanto para la evaluación de los momentos críticos relacionados con el calor como en la obtención de dimensiones y distancia de los árboles respecto a las fachadas deberían adaptarse a la ubicación geográfica concreta. En general, los criterios que se deberían considerar son los siguientes:

- Seleccionar los parámetros de los meses con mayor estrés térmico por calor del año en la ubicación geográfica correspondiente, determinando por un lado los intervalos horarios en los que la radiación solar directa es mayor, y por otro lado la hora con valores máximos de radiación.
- Definición de los valores de altitud solar (α) y acimut solar (φ) para las horas y los meses considerados según lo señalado en el párrafo anterior para la ubicación geográfica en estudio.

Posteriormente, la evaluación de las condiciones para la necesidad de árboles y la aplicación de las fórmulas matemáticas para determinar las características del arbolado en las calles puede realizarse según su orientación, el ancho de sus zonas peatonales, el ancho total de la calle y la altura de los edificios.

Además de dimensionar las propiedades geométricas de los árboles y su posicionamiento adecuado, con carácter previo, cada ubicación geográfica debería contar con un listado de especies arbóreas autóctonas aptas para la generación de sombra, del que se podría elegir la más adecuada en cada caso.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS POR CALOR EN LAS CALLES

6.1 Descripción de la aplicación práctica de la metodología en Bilbao

Los ejemplos de aplicación de práctica de la metodología propuesta se llevan a cabo en las siguientes dos calles de distintas orientaciones de Bilbao:

- c/Gran Vía (latitud $43,25^\circ$ y longitud $2,96^\circ\text{O}$), la cual tiene una orientación Este-Oeste (E-O). En este caso se realiza la aplicación de la metodología relacionándola con las campañas de medición realizadas en el lugar.
- c/ Dr. Areilza (latitud $43,15^\circ$ y longitud $2,56^\circ\text{O}$), la cual tiene una orientación Norte-Sur (N-S).

La ciudad de Bilbao es la más grande de la cornisa Norte de la Península Ibérica y se caracteriza por un clima templado húmedo, generalmente sin estación seca, y moderado en cuanto a temperatura y niveles de precipitación. Sin embargo, la temperatura del aire puede llegar a superar excepcionalmente los 40°C en los meses de verano (Acero, Arrizabalaga, Kupski, & Katschner, 2013).

El procedimiento adoptado para cada calle consiste en la aplicación de las 3 Fases propuestas en la metodología:

- Fase 1: Modelado de la situación existente, teniendo en cuenta el pavimento existente y la actual distribución de árboles en las aceras peatonales.
- Fase 2: Evaluación de la necesidad y determinación de las características geométricas adecuadas y posicionamiento de árboles a partir de la aplicación de las fórmulas matemáticas. Análisis de la influencia de variaciones de la forma de copa (esférica y cónica) y posición de los árboles en cada acera, considerando también la separación entre los mismos.
- Fase 3: Propuesta de optimización para la mejora del confort térmico definiendo una especie de arbolado concreta, y verificación de las mejoras respecto el estado actual. Análisis de resultados.

6.2 Validación del modelo SOLWEIG: mediciones experimentales en la c/Gran Vía

Mediciones mediante termómetro globo

Con el objetivo de validar el modelo SOLWEIG, el 30 de agosto de 2019 se realizó una campaña de medición in situ en la calle Gran Vía de Bilbao (latitud 43,25° y longitud 2,96°O). Posteriormente, se llevó a cabo el modelado SOLWEIG de la zona con los mismos parámetros meteorológicos para comparar los resultados con los obtenidos en las mediciones experimentales realizadas.

La calle Gran Vía es un ejemplo significativo de configuración de calles urbanas en Bilbao: tiene 30 m. de ancho y los edificios a ambos lados tienen 30 m. de altura. La orientación es Este-Oeste, con una inclinación de 17° hacia el Sur en el extremo Este.

El ancho de ambas aceras peatonales es de 7 m. y el espacio central restante consiste en una vía asfaltada de 4 carriles complementada por aparcamientos. Dentro de ambas zonas peatonales existen árboles cuyas copas presentan diámetros de aproximadamente 5 m. en la acera Norte y 8 m. en la acera Sur.

La campaña de medición se llevó a cabo en tres puntos diferentes (Point Of Interest - POI) dentro de la calle (Figura 6.1), seleccionados en base a los siguientes criterios:

- POI 1: ubicado en la acera Norte, y expuesto directamente a la radiación solar en todo momento.
- POI 2: ubicado en la acera Norte, y localizado en todo momento bajo la sombra de los árboles.
- POI 3: ubicado en la acera Sur, y ubicado en todo momento bajo la sombra del edificio y/o de los árboles.

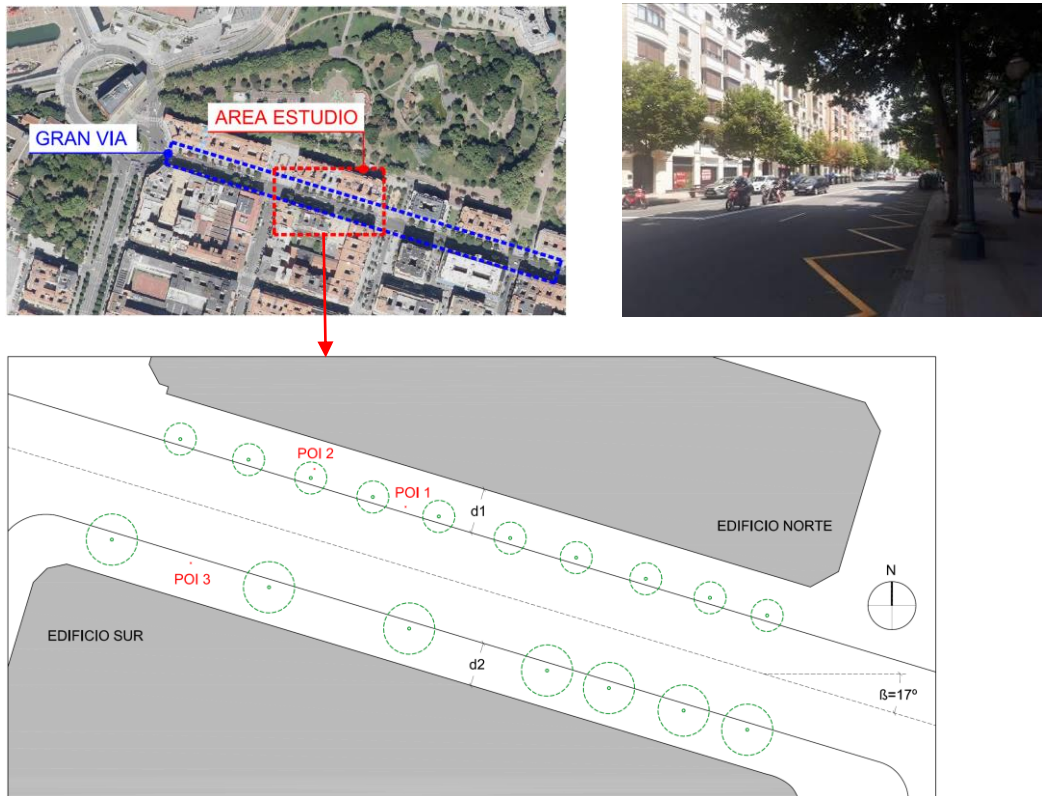


Figura 6.1 Localización del área de estudio (c/Gran Vía) para las mediciones con termómetro globo. Los círculos verdes en planta representan los árboles existentes en la actualidad.

Los datos de temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), irradiancia solar (W / m^2) y condiciones de humedad relativa (%) se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana (estación de Deusto - Figura 6.2), mientras que la temperatura del globo ($^{\circ}\text{C}$) y la velocidad del viento (m / s) se midieron in situ.



Figura 6.2 Relación entre la localización de la estación meteorológica y el área de estudio.

En función de la distancia a la que se encuentra y su correspondiente entorno, la estación meteorológica de Deusto podría ser considerada como perteneciente a otro microclima. Sin embargo, aunque la radiación de onda larga es un contribuyente relevante para la T_{mrt} , la radiación de onda corta descendente es relativamente constante en días despejados. Dado que el estrés por calor exterior ocurre principalmente durante estos días (es decir, condiciones de alta radiación solar de onda corta), las variables utilizadas provenientes de la estación meteorológica pueden considerarse como representativas del área de estudio.

La campaña de medición se realizó mediante un termómetro globo TESTO Globe (diámetro = 150 mm. y color negro), un datalogger Testo 480 y un termotanómetro Testo 405i (Figura 4.3). Las fotografías hemisféricas de los árboles existentes se obtuvieron mediante una cámara Canon PowerShot SX280HS con lente ojo de pez (Figura 4.5).

La temperatura del globo no se pudo tomar simultáneamente en los diferentes puntos de interés debido a sus necesidades de estabilización. En consecuencia, los períodos de medición para cada hora se realizaron en intervalos de 30 minutos aproximadamente, comenzando 15 minutos antes de cada hora exacta, hasta 15 minutos después de esa hora. Por otro lado, se vincularon a los resultados los conjuntos de datos promediados de las otras condiciones meteorológicas dentro del referido intervalo de 30 minutos.

La transmisividad de los árboles existentes en la calle (*Tilia platyphyllos*, Figura 6.3) se calculó con el modelo CAN-EYE. Las imágenes hemisféricas hacia arriba obtenidas desde debajo del árbol fueron derivadas al modelo, y los resultados de los valores de transmisividad para los árboles existentes fueron de aproximadamente 0,10.

En general, el modelado mediante SOLWEIG se llevó a cabo en las siguientes condiciones:

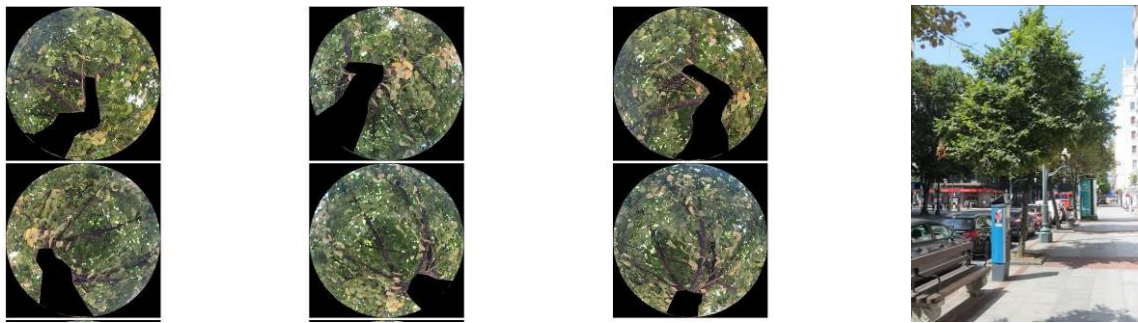


Figura 6.3 Izquierda: Imágenes hemisféricas hacia arriba para el cálculo la transmisividad de los árboles actuales mediante el modelo CAN-EYE. Derecha: Imagen del árbol *Tilia platyphyllos*.

Los datos meteorológicos correspondieron a los recopilados el 30 de agosto de 2019, día de la campaña de medición (irradiancia, temperatura del aire y humedad relativa obtenidas de la estación meteorológica, y la velocidad del viento medida in situ). El pavimento de la zona peatonal de la calle es de granito pulido, cuyos valores de albedo y emisividad son de 0,15 y 0,85 respectivamente (Bretz, S., Akbari, Rosenfeld y Taha, 1992; OPTOTHERM, 2018). Como las fachadas de los edificios que delimitan la calle están construidas con diferentes materiales (principalmente superficies pétreas claras), se asumieron los valores estándar del modelo para ellas: albedo 0,2 y emisividad 0,7.

Tabla 6.1 Condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019 y resultados modelo SOLWEIG.

Hora	Condiciones meteorológicas (Euskalmet)				Resultados SOLWEIG		
	Rad (W/m ²)	Va (m/s)	Ta (°C)	Hum (%)	POI 1 T _{mrt} (°C)	POI 2 T _{mrt} (°C)	POI 3 T _{mrt} (°C)
09:00	90	1	22	77	16,9	19,4	16,4
10:00	354	1	22	76	20,4	21,7	23,1
11:00	331	1	24	66	32,3	25,6	24,5
12:00	481	1	25	61	41,3	29,2	26,8
13:00	773	1	26	56	54,0	33,1	28,0
14:00	813	2	26	59	53,8	33,9	29,0
15:00	805	2	25	64	52,1	33,2	28,8
16:00	740	2	26	64	52,6	33,2	29,3
17:00	614	2	25	66	49,1	30,0	27,9
18:00	474	2	24	71	27,1	26,9	25,3
19:00	270	1	23	71	22,1	24,1	21,8
20:00	52	1	22	70	17,4	20,4	17,2
21:00	1	1	22	73	16,3	20,8	16,0

Tabla 6.2 Resultados de las Mediciones realizadas in situ.

Hora	Ta (°C)	Va (m/s)	POI 1		POI 2		POI 3	
			Tg (°C)	T _{mrt} (°C)	Tg (°C)	T _{mrt} (°C)	Tg (°C)	T _{mrt} (°C)
09:00	22	0,2	24,9	25,0	24,3	24,4	25,6	25,8
10:00	22	0,8	26,8	27,4	26,0	26,5	26,0	26,5
11:00	24	0,4	27,2	27,4	25,6	25,7	25,7	25,8
12:00	25	1,3	39,7	41,8	29,7	30,4	26,9	27,2
13:00	26	1,4	43,9	46,5	31,1	31,9	28,7	29,1
14:00	26	2,5	45,4	49,3	33,5	35,2	29,5	30,3
15:00	25	1,9	43,2	46,4	33,2	34,8	28,6	29,3
16:00	26	1,6	41,7	44,2	32,5	33,6	28,2	28,6
17:00	25	2,4	39,3	42,3	30,7	32,0	27,9	28,6
18:00	24	1,8	29,3	30,3	29,9	31,0	27,7	28,4
19:00	23	0,6	27,8	28,3	26,8	27,2	26,2	26,5
20:00	22	0,2	25,3	25,4	25,1	25,2	24,8	24,9
21:00	22	0,3	25,1	25,3	24,7	24,8	23,9	24,0

A partir de los resultados de la campaña de medición in situ del caso de estudio, la Tabla 6.2 representa los valores de T_{mrt} obtenidos mediante la Ecuación 4.1, mientras que en la Tabla 6.1 se reflejan los resultados del modelado. La Figura 6.4 muestra los valores de T_{mrt} de la campaña de medición en comparación con los resultados del modelo SOLWEIG en las mismas condiciones meteorológicas.

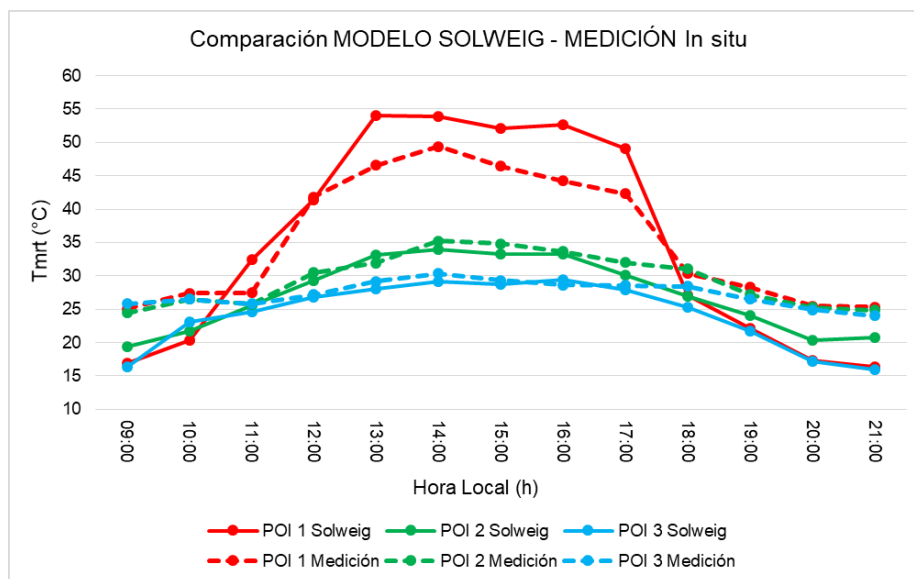


Figura 6.4 Comparación entre los resultados del modelo SOLWEIG y los de la campaña de medición in situ. Las mediciones se realizaron el 30 de agosto de 2019.

En general, las comparaciones gráficas (Figura 6.4) entre los resultados de la campaña de medición y el modelo de SOLWEIG muestran una tendencia similar para los valores de T_{mrt} en los distintos POI a lo largo de las horas de luz. En el POI 1, donde hay exposición directa a la radiación solar en todo momento, las horas críticas para T_{mrt} son entre las 11:00 y las 17:00.

Dentro de este intervalo de tiempo, los valores de T_{mrt} según el modelo fueron superiores a los medidos, variando la diferencia entre 0°C y 7°C . En el POI 2 y en el POI 3, donde la sombra de los árboles y los edificios es continua entre las 11:00 y las 17:00, los valores diurnos medidos y modelados fueron bastante similares. Sin embargo, antes de las 11:00 y después de las 17:00, los valores de T_{mrt} modelados en los tres puntos de interés fueron inferiores a los valores medidos presentando una diferencia máxima de 8°C .

En el primer caso, la razón podría ser una sobreestimación del modelo de los flujos de onda corta probablemente debido a una nubosidad ligeramente diferente entre el sitio y la estación meteorológica (2 km al Oeste) en la que se recopilaron los datos meteorológicos relativos a la radiación. En el segundo caso, los resultados de otros estudios para validar el modelo de SOLWEIG han demostrado que, por un lado, la radiación solar se subestima en alturas solares matutinas y vespertinas muy bajas (Lindberg, Holmer y Thorsson, 2008) y por otro, que los valores de temperatura superficial de los materiales también parecen estar subestimados, disminuyendo así la influencia de la radiación de onda larga en el cálculo de T_{mrt} (Lindberg, Holmer y Thorsson, 2008; Lindberg y Grimmond, 2011).

Es por ello que se ha calculado el ECM (Error Cuadrático medio) y el RECM (Raíz del Error Cuadrático Medio) entre las 11:00 y las 19:00 de cara a valorar las diferencias entre los resultados del modelado y las mediciones. En este intervalo horario, en general el ECM es de $2,83^{\circ}\text{C}$ y el RECM de $3,72^{\circ}\text{C}$, aunque considerando únicamente los POI 2 y POI 3 (por razones de diferencias de nubosidad) el ECM sería de $1,59^{\circ}\text{C}$ y el RECM de $2,05^{\circ}\text{C}$. Otros estudios en

Bilbao (Acero & Arrizabalaga, 2018) han obtenido también valores de RECM de entre 1,00°C y 2,07°C.

A modo de conclusión, las mediciones generales y las técnicas de modelado de SOLWEIG muestran perfiles diurnos de T_{mrt} similares que también han sido representados en otros estudios de validación (Lindberg, Holmer y Thorsson, 2008; Lindberg et al., 2018). Estos resultados acreditan la fiabilidad e idoneidad del modelo de SOLWEIG para la evaluación de T_{mrt} en el contexto de un entorno urbano.

Mediciones mediante cámara termográfica

La campaña de medición de temperaturas superficiales de pavimentos mediante cámara termográfica fue realizada con fecha 3 de agosto de 2018 y se llevó a cabo en tres zonas diferentes de la c/Gran Vía (dos de ellas coincidentes con los puntos de medición mediante termómetro globo) y en otras tres de la c/ Dr. Areilza, comprobándose las temperaturas de superficie en puntos concretos de las mismas, siendo el intervalo para la obtención de imágenes de 2 horas entre las 10:00 y las 20:00. La ubicación de los puntos fue la siguiente:

- P1: ubicado en la acera Norte de la c/ Gran Vía.
- P2: ubicado en el carril rodado de la c/ Gran Vía.
- P3: ubicado en la acera Sur de la c/ Gran Vía.
- P4: ubicado en la acera Oeste de la c/ Dr. Areilza.
- P5: ubicado en el carril bici (lado Oeste) de la c/ Dr. Areilza.
- P6: ubicado en la acera Este de la c/ Dr. Areilza.

Paralelamente, y con el objetivo de compararlas con las temperaturas superficiales consideradas por el modelo, se realizó un modelado mediante SOLWEIG con los datos meteorológicos obtenidos de Euskalmet correspondientes al mismo día 3 de agosto de 2018.

El modelo SOLWEIG realiza un cálculo de la temperatura de la superficie de los pavimentos (aunque con las limitaciones mencionadas en el apartado 3.4) para establecer los valores L_{up} correspondientes a la radiación ascendente de onda larga en función de los valores de emisividad del material y la temperatura de la superficie.

En lo que respecta a la c/Gran Vía, la cual presenta una orientación Este-Oeste, las mediciones se realizaron en sendos puntos con radiación solar directa en la práctica totalidad de la franja horaria: P1 ubicado en la zona de tráfico rodado cercano a la acera Norte y P2 en la acera Norte. La comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas y consideradas por el modelo SOLWEIG se representan en la Figura 6.5.

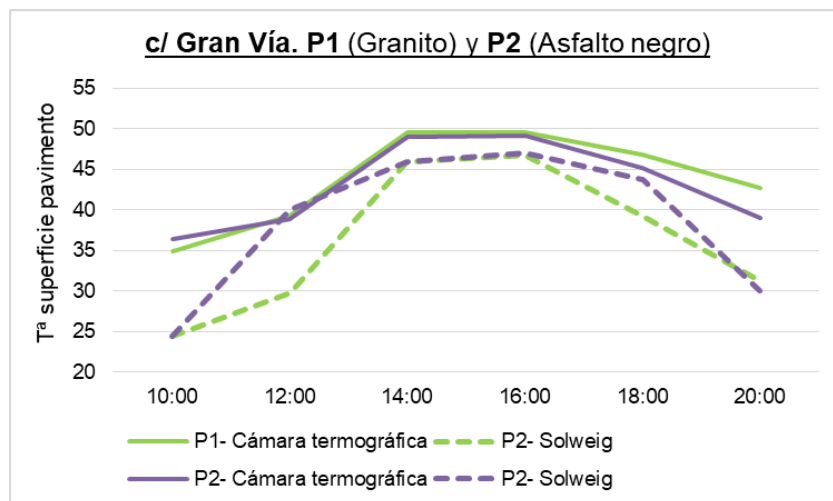


Figura 6.5 Comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas con cámara termográfica y consideradas por el modelo SOLWEIG en los puntos P1 y P2 de la c/ Gran Vía.

Las temperaturas calculadas por el modelo SOLWEIG son en general inferiores a los valores medidos mediante la cámara termográfica. Las diferencias entre temperaturas son mucho más acusadas a las horas con menor radiación solar, es decir, a las 10:00 y a las 20:00 (de aproximadamente 10°C en ambos puntos), mientras que en las horas centrales la diferencia es más reducida (4°C a las 12:00 y 3°C a las 16:00 para ambos puntos). A las 12:00 la temperatura del modelo y la

medida es prácticamente la misma y muy similar a las 18:00 para el punto situado en la sombra, mientras que a esas horas las diferencias son acusadas para el punto expuesto al sol (9°C y 7°C respectivamente).

En lo que respecta a la c/ Dr. Areilza, la cual presenta una orientación Norte- Sur, las mediciones se realizaron en sendos puntos (P4 y P5) situados en la acera Oeste, donde la radiación solar directa incide aproximadamente entre las 11:00 y las 16:00. La comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas y consideradas por el modelo SOLWEIG se representan en la Figura 6.6.

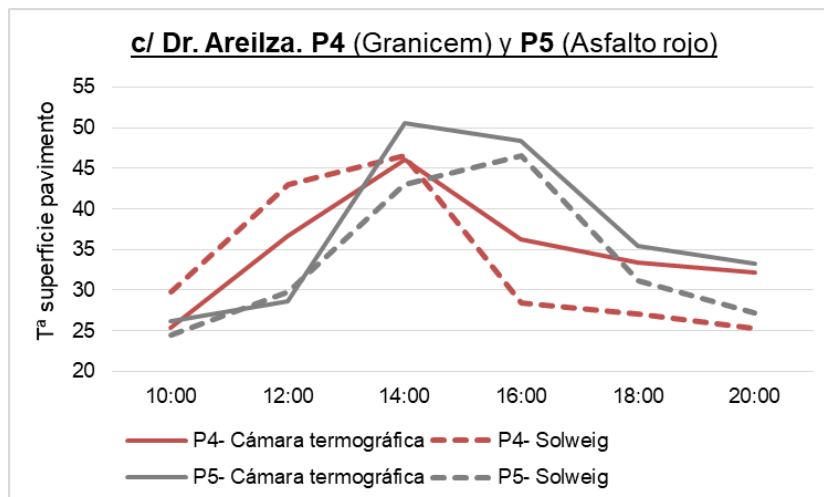


Figura 6.6 Comparativa entre los valores de temperatura de superficie de pavimento medidas con cámara termográfica y consideradas por el modelo SOLWEIG en los puntos P4 y P5 de la c/ Dr. Areilza.

En general las temperaturas calculadas por el modelo SOLWEIG son inferiores a las medidas mediante cámara termográfica, excepto para el P4 entre las 10:00 y las 14:00, aunque ello puede deberse a su cercanía a la fachada.

En el punto P4 las diferencias son mayores entre las 16:00 y las 20:00 (en momentos no expuestos a la radiación solar directa), siendo de aproximadamente 7°C. En el punto P5 la mayor diferencia se da a las 14:00 (7°C) y a las 20:00 (5°C).

De las gráficas comparativas puede concluirse que los resultados de la campaña de medición y el modelo de SOLWEIG muestran una tendencia similar para los valores de temperatura superficial de los pavimentos en los distintos puntos considerados a lo largo de las horas de luz, aunque las diferencias pueden llegar a ser muy significativas, siendo más acusadas a las horas en las que la radiación directa es menor y también en los puntos con mayor exposición solar.

Asimismo, la subestimación de la temperatura superficial del pavimento en el modelo SOLWEIG respecto a las mediciones puede estar también condicionada por el hecho de que el modelo no considera correctamente la acumulación de calor a lo largo del día.

6.3 Aplicación práctica en calle de orientación Este-Oeste (E-O): c/ Gran Vía

Según la descripción de la c/Gran Vía realizada en el apartado anterior (representada en la Figura 6.1) los parámetros generales de la calle son los siguientes:

$\beta = 17^\circ$ (orientación de la calle con respecto al eje E-O, ángulo positivo)

$W = 30$ m. (anchura total de la calle)

$d_1 = 7$ m. (anchura de la zona peatonal Norte)

$d_2 = 7$ m. (anchura de la zona peatonal Sur)

$H_e = 30$ m. (altura de los edificios Sur)

6.3.1 Fase 1: modelado SOLWEIG (orientación E-O)

Dado que en esta calle se ha realizado una campaña de medición de la T_{mrt} in situ, el modelado mediante SOLWEIG se realiza según los datos meteorológicos correspondientes al día 30 de agosto de 2019 (día de la campaña de medición). Estos datos se reflejan en la Tabla 6.1: la irradiancia, temperatura del aire y humedad relativa están obtenidas de la estación meteorológica de Deusto, y la velocidad del aire fue medida in situ (redondeada para el modelado).

Para el modelado se consideran los mismos tres puntos (Point Of Interest - POI) que en la campaña de medición. Los parámetros variables introducidos en el modelo son los mencionados en el apartado anterior: al pavimento de la zona peatonal (granito gris claro) se le consideran valores de albedo y emisividad de 0,15 y 0,85 respectivamente. La transmisividad de los árboles existentes, la cual ha sido obtenida mediante el modelo CAN-EYE, es de 0,10.

Los resultados de Tmrt y PET para los puntos considerados se representan en la siguiente Figura 6.7.



Figura 6.7 Valores Tmrt y PET de los tres puntos (POI) considerados en la c/ Gran Vía según modelado SOLWEIG con datos meteorológicos del 30 de agosto de 2019. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.

En cuanto a la T_{mrt} , en el POI 1 (acera Norte) se producen valores $>50^{\circ}\text{C}$ en las horas centrales del día (entre las 13:00 y las 17:00).

Por su parte, en el POI 2 y POI 3 los valores no superan los 35°C a lo largo del día. En el POI 3 los valores T_{mrt} son casi 5°C inferiores a los del POI 2 entre las 13:00 y las 16:00.

En lo que respecta al PET, en el POI 1, entre las 13:00 y las 16:00 se dan valores de nivel “calor”, alcanzándose casi dicho nivel a las 17:00. En el POI 2 (sombra de árboles existentes en acera Norte) entre las 12:00 y las 17:00 los valores son de ligeramente templado, resultando similares aunque algo inferiores en el POI 3.

Las gráficas de la Figura 6.7 muestran similitud con las de la Figura 3.8 aunque en este caso la existencia de árboles en ambas aceras reduce la franja horaria de la exposición solar directa, sobre todo en la acera Norte.

6.3.2 Fase 2: definición de especies de arbolado (orientación E-O)

Acera Norte

Los árboles en la acera Norte resultan necesarios debido a que el edificio Sur no puede generar sombra en ningún punto de la zona peatonal Norte durante las 3 horas consideradas para el mes de junio, según comprobación realizada aplicando las Ecuaciones 4.4.

En consecuencia, se utilizan las ecuaciones 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 para definir las propiedades geométricas adecuadas y su posición para árboles esféricos y cónicos con el objetivo de proporcionar sombra en la acera peatonal Norte durante los períodos de abril a agosto. Los resultados se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resultados del radio adecuado de la copa (R_1) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1) para árboles esféricos y cónicos en la acera Norte de la c/Gran Vía.

	Abril / Agosto	Mayo / Julio	Junio	Adoptada
R_1 esférica (m)	3,14	3,37	3,43	3,50
D_1 esférica (m)	7,14	6,22	5,88	6,40
R cónica (m)	3,66	3,66	3,66	3,70
D_1 cónica (m)	5,22	4,71	4,54	4,80

A la vista de los resultados, se escogen algunas especies de arbolado que presentan características geométricas similares a las necesarias, a partir de las especies seleccionadas en el apartado 5.1.2. Dicha elección se presenta en la Tabla 6.4, incluyéndose en la misma cinco posibles tipos de árboles (2 esféricos y 3 cónicos) y sus respectivas propiedades geométricas.

Tabla 6.4 Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Norte de la c/Gran Vía a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.

Especie	Forma copa	Altura media	Radio copa medio	Densid. foliación
<i>Acer opalus</i>	Cónica	9,00 m.	3,50 m.	Alta
<i>Acer platanoides</i>	Esférica	15,00 m.	4,50 m.	Alta
<i>Catalpa bignonioides</i>	Esférica	10,00 m.	4,50 m.	Alta
<i>Magnolia grandiflora</i>	Cónica	13,00 m.	4,50 m.	Alta
<i>Sorbus domestica</i>	Cónica	15,00 m.	4,00 m.	Media

Según los resultados representados en la Tabla 6.3, para los árboles esféricos se requiere un mayor diámetro y una distancia más reducida a la fachada del edificio cuando el ángulo de altitud solar es mayor (junio), mientras que en el caso de los árboles cónicos, el diámetro es constante para todos los meses considerados, pero se requiere una menor distancia a las fachadas del edificio cuando la altitud solar es mayor (junio).

La geometría de los árboles y su distinto espaciamiento conlleva diferentes porcentajes de superficies sombreadas en la acera Norte. La influencia de las geometrías esféricas y cónicas y de la distancia entre los árboles (separación mínima de copas = 0,50 m) en la sombra generada se representa en la Tabla 6.5.

En la misma se indican los porcentajes de superficie de acera peatonal sombreada generados en cada situación en función de la geometría y de las distintas separaciones entre elementos de arbolado considerados, presentándose en comparación con el área sombreada en la situación actual existente.

La superficie sombreada de pavimento generada por los árboles esféricos y cónicos en cada situación se ha medido mediante una herramienta de dibujo CAD (Figura 6.8) a partir de la superficie sombreada por cada tipo de árbol (esférico o cónico) de acuerdo con las Ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 desarrolladas en el apartado 5.3.

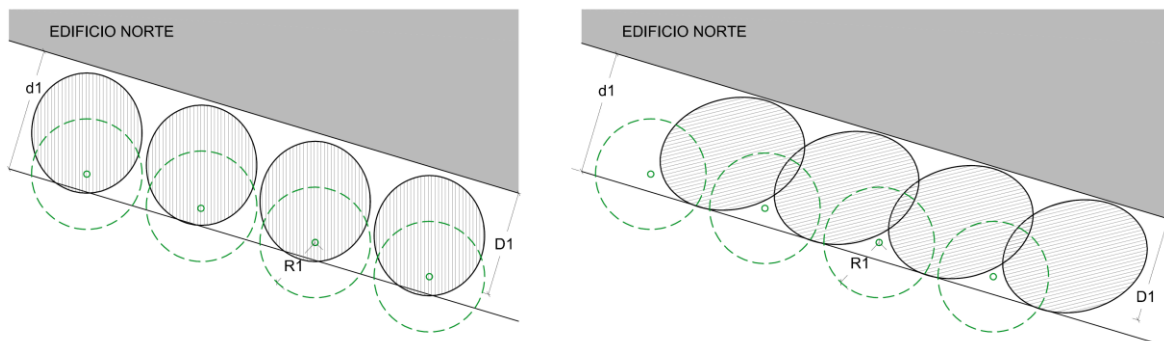


Figura 6.8 Esquema de sombreado en la zona peatonal Norte de la c/Gran Vía a las 14:00 y a las 17:00 del mes de junio mediante árboles esféricos.

La razón por la que se tiene que utilizar la herramienta de dibujo CAD para calcular los porcentajes de áreas sombreadas en cada caso es que, especialmente a las 11:00 y las 17:00 las sombras generadas por los árboles se superponen entre sí, por lo que el simple cálculo considerando el área sombreada generada por cada unidad de árbol conllevaría resultados menos exactos.

Tabla 6.5 Porcentajes de área sombreada para la acera Norte de la c/Gran Vía por cada forma de árbol propuesto y según separación de elementos. Se incluye también la situación actual.

		Abril / Agosto			Mayo / Julio			Junio		
Separación copas		11:00	14:00	17:00	11:00	14:00	17:00	11:00	14:00	17:00
Esférica	0,50 m,	75,7%	71,8%	63,4%	58,9%	77,6%	80,7%	56,2%	78,6%	89,2%
	1,00 m,	75,5%	70,5%	61,9%	58,3%	73,7%	78,1%	55,4%	74,6%	86,3%
	1,50 m,	75,0%	67,2%	60,5%	57,6%	70,5%	76,3%	54,0%	71,2%	82,5%
Cónica	0,50 m,	83,3%	80,2%	78,1%	75,7%	81,5%	87,6%	73,8%	79,2%	90,0%
	1,00 m,	82,3%	76,3%	76,8%	75,0%	77,7%	86,4%	72,7%	75,6%	88,6%
	1,50 m,	81,4%	72,7%	74,4%	74,6%	74,0%	84,0%	71,8%	72,0%	86,1%
Actual	Variable	37,4%	31,2%	39,0%	27,6%	29,1%	37,1%	24,5%	28,0%	35,4%

En junio, el área de sombra proporcionada por los árboles esféricos y cónicos (valores calculados) es similar a las 14:00 y las 17:00, aunque la sombra que generan los árboles cónicos es ligeramente superior. En cualquier caso, las áreas sombreadas en ambos casos casi triplican la sombra generada por los árboles actuales.

En mayo y julio la diferencia de porcentaje de superficie sombreada por los árboles cónicos es aún mayor a las 14:00 y las 17:00 respecto a los esféricos. En general, la diferencia respecto al estado actual es menor que en el caso de junio, aunque los porcentajes de superficie sombreada son siempre más del doble que los existentes.

La misma tendencia se observa para abril y agosto; la sombra generada por los árboles cónicos es aún mayor que la de los esféricos, y la diferencia en ambos casos respecto al estado actual real también disminuye.

En cuanto a la separación entre árboles, para una orientación Este-Oeste, cuanto más cerca están, más superficie sombreada generan. Observando los resultados, se puede decir que a las 14:00 durante los diferentes meses, cuando la distancia entre árboles se incrementa en 0,50 m., las áreas sombreadas descienden en

más de un 3%. A las 17:00, la disminución es cercana al 2%, y a las 11:00 ronda el 1%. Por consiguiente, la distancia entre árboles tiene su mayor influencia a las 14:00, la hora del día con mayor cantidad de radiación solar directa.

Cabe señalar que los árboles de forma cónica, dependiendo de su altura, generan superficies sombreadas más grandes en las fachadas del edificio Norte, lo que puede afectar las condiciones de luz natural dentro de los edificios (Hongbing, Jun, Yonghong y Li, 2010).

Por otro lado, la posición de los árboles cónicos debe estar en un punto más central de la zona peatonal influyendo así en la distribución funcional de la calle, mientras que los árboles de forma esférica pueden ubicarse más cerca del borde de la acera. Este hecho es relevante porque la mayoría de las calles de Bilbao están ocupadas por carriles de circulación y aparcamientos, por lo que el ancho de la zona peatonal tiende a ser reducido.

Además, las plantas bajas de los edificios suelen ser de uso comercial cuyas actividades a menudo ocupan parte del área de la acera peatonal. Estas razones, así como la disposición necesaria del mobiliario urbano o los carriles bici y las distancias recomendadas entre el tráfico peatonal y motorizado, sugieren que los árboles colocados en el borde de la acera peatonal dan como resultado diseños más funcionales.

Acera Sur

La acera Sur no necesita árboles según los resultados de las ecuaciones 5.9; realizando la comprobación para todos los meses considerados, el porcentaje de acera peatonal Sur sombreada por edificios a las 14:00 y 17:00 es del 100% de abril a agosto, mientras que a las 11:00 es del 50% en abril y agosto, y 0% en mayo, junio y julio. Aplicando las ecuaciones 5.9, solo en una de las tres horas consideradas (a las 11:00) los árboles son necesarios para sombreado en junio.

La Figura 6.9 muestra la repercusión para el 30 de agosto de 2019 que conllevaría la supresión de los árboles existentes en la zona peatonal Sur. Se puede observar que la influencia de la supresión se concentra durante la mañana (a las 10:00 y 11:00), donde con la supresión existiría un pico en los valores de T_{mrt} , principalmente a las 10:00.

Teniendo en cuenta que el confort térmico relacionado con el calor es más favorable en ese momento del día que durante las otras dos horas consideradas, según la metodología no se propondría la colocación de árboles en la acera peatonal Sur para la propuesta de mejora.

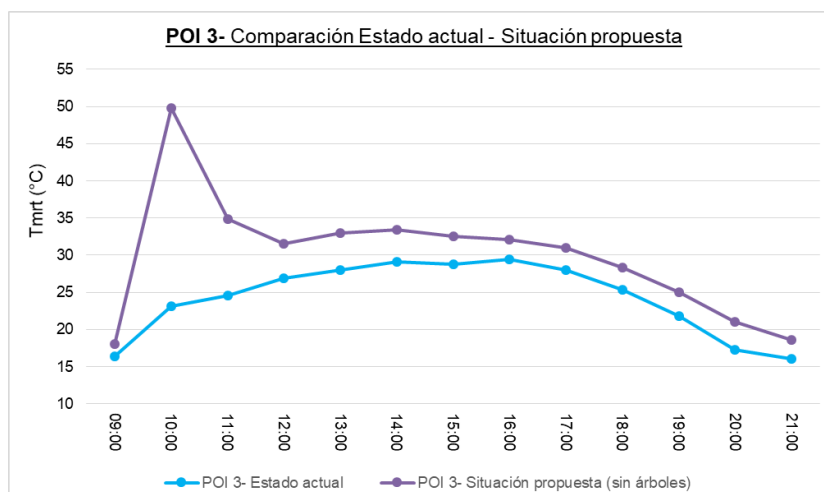


Figura 6.9 Comparación de los valores de T_{mrt} en el POI 3 entre el estado actual y la situación propuesta en la c/Gran Vía (sin árboles en la zona peatonal Sur donde se encuentra el POI 3).

Modelado con las condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 5.9 (a las 14:00) y considerando un objetivo del 70% de superficie sombreada como adecuado, se podría concluir que los árboles comenzarían a ser necesarios en la acera Sur a partir de un ancho de acera de 15,73 m.

Por ejemplo, a modo referencia, si el ancho de la acera sur (d_2) fuera de 18 m. y se aplicaran las Ecuaciones 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, se obtendrían las siguientes dimensiones del árbol, considerando las 14:00 del mes de junio:

Esférico: $R_2 = 3,41$ m. Distancia desde la fachada del edificio $D_2 = 12,15$ m.

Cónica: $R_2 = 3,64$ m. Distancia desde la fachada del edificio $D_2 = 13,41$ m.

En este caso hipotético, los radios de los árboles esféricos y cónicos seguirían siendo muy similares, pero los esféricos, a diferencia de los resultados para la acera Norte, deberían ubicarse más cerca de las fachadas del edificio Sur.

6.3.3 Fase 3: propuesta de optimización del confort térmico y verificación de mejoras (orientación E-O)

Teniendo en cuenta las Fases anteriores y sus resultados se propone una situación de optimización (Fase 3) donde se combinan y aplican las condiciones más favorables: el tipo de árbol elegido para la acera Norte de la calle es cónico, con una separación entre copas de 0,50 m.

Se elige la especie *Acer opalus* (transmisividad de 0,10 y densidad de foliación alta) con un diámetro de 7 m. y una altura de 9 m. No se incluyen árboles en la acera Sur.

Las propiedades geométricas apropiadas de los árboles, plantados lo más cerca posible, aumentarían la superficie sombreada de la acera Norte como se representa en la gráfica de la Figura 6.10 (resultados numéricos en la Tabla 6.5).

Por su parte, las imágenes de la Figura 6.11 representan gráficamente la diferencia de T_{mrt} que se podría alcanzar entre el estado actual y la propuesta de optimización: la T_{mrt} en las horas centrales del día se pueden reducir hasta 23°C (Figuras 6.7 y 6.11), considerando las condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019.

Unas condiciones de mayor radiación solar (junio o julio) podrían tener incluso un mayor impacto en la reducción de T_{mrt} . Además, esta reducción de T_{mrt} será

generada en un promedio de casi el 80% de la superficie de la acera Norte entre abril y agosto.

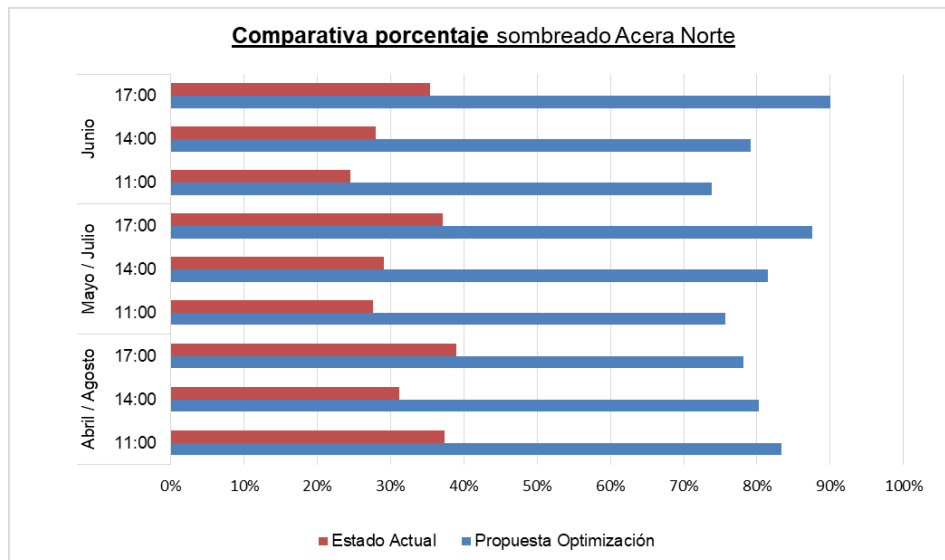


Figura 6.10 Comparación entre el estado actual y la propuesta de optimización. Porcentajes de área sombreada en la acera peatonal Norte de la c/Gran Vía.

Según se observa en la Figura 6.11, a las 11:00, en la situación propuesta queda sombreada una mayor superficie de la acera Norte, aunque en la acera Sur la Tmrt es en general algo superior debido a la existencia de árboles en la actualidad.

A las 14:00, en la situación propuesta las áreas con Tmrt superior a 40°C son más reducidas en la acera Norte. En la acera Sur los árboles siguen atenuando la radiación difusa aun estando bajo la sombra del edificio, aunque las diferencias no son muy significativas.

A las 17:00, en el estado actual existen grandes áreas de la acera Norte con Tmrt cercano a 50°C mientras que en la situación propuesta prácticamente todo el área peatonal queda sombreado.

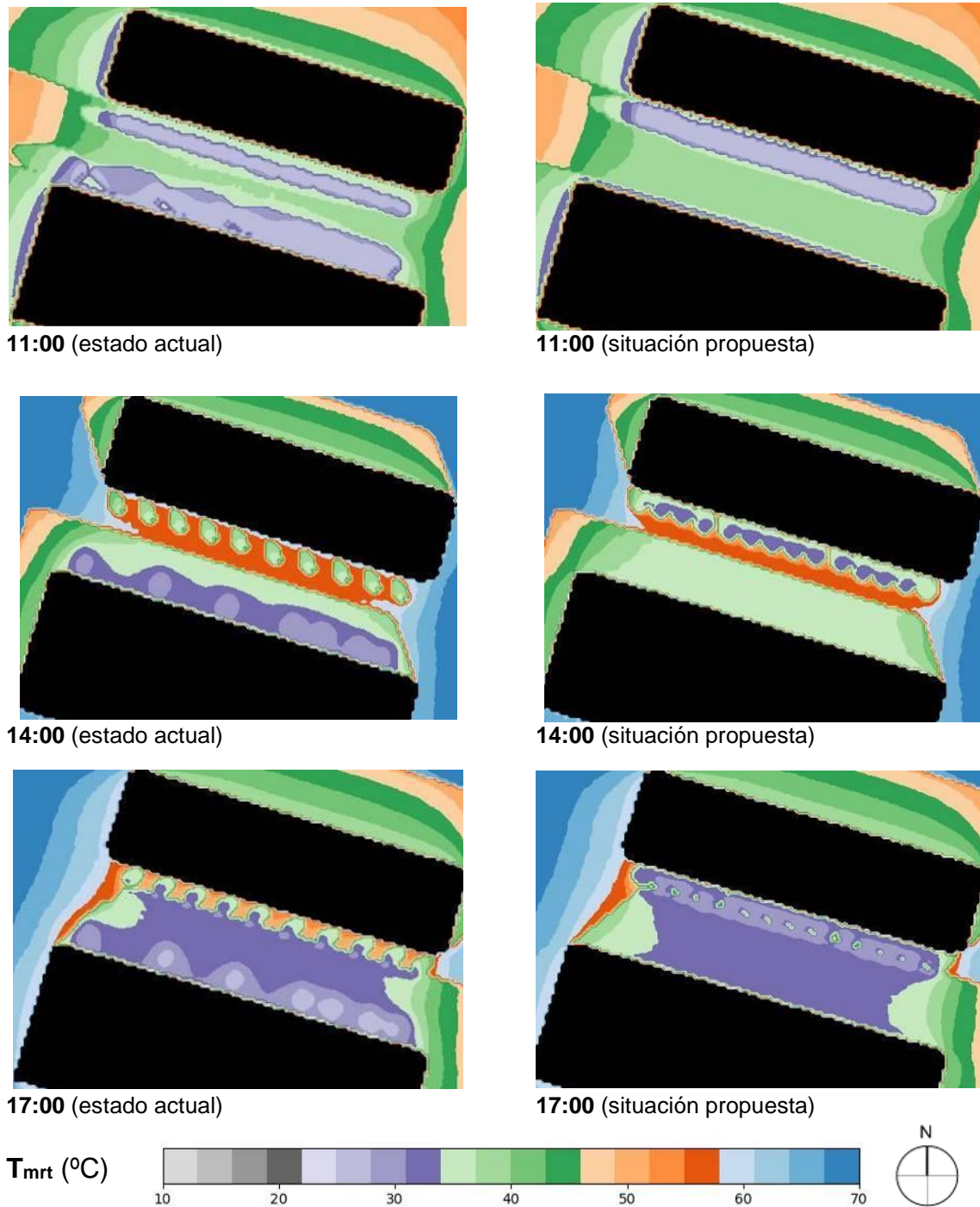


Figura 6.11 Distribución espacial de los valores de T_{mrt} de estado actual y propuesta de optimización en la c/ Gran Vía. Modelado SOLWEIG con las condiciones meteorológicas del 30 de agosto de 2019.

A la vista de los resultados del caso estudiado, y en relación a la plantación de arbolado, se puede afirmar que:

- Las propiedades geométricas, posicionamiento y espaciado de los árboles existentes en la actualidad para ese tramo de la c/Gran Vía de Bilbao son inapropiados dado que el porcentaje del área sombreada en las zonas peatonales se puede mejorar considerándose las fechas más cálidas del año.
- Los árboles existentes en la zona peatonal Sur de la calle únicamente tienen un impacto relevante en los valores de T_{mrt} a las 10:00 y las 11:00 debido a que la acera peatonal Sur está sombreada por el edificio Sur durante el resto de horas diurnas. La radiación solar directa en esas dos horas es menor que en las otras horas consideradas (14:00 y 17:00), por lo que el impacto de la supresión de árboles en la T_{mrt} sería muy reducida.

La disminución de la T_{mrt} repercute directamente en los valores PET (Figura 6.12), cuya reducción es más notable en las horas centrales del día. Según la escala de niveles PET para Europa Central (Matzarakis & Mayer 1997) los resultados muestran que los valores se reducen en dos niveles de percepción entre las 13:00 y las 17:00: de “calor” a “ligeramente templado”. A las 11:00, 12:00 y 18:00, la reducción es desde un nivel “ligeramente templado” hasta “confortable”. En general, la metodología propuesta proporciona un nivel de confort “ligeramente templado” casi continuo en las horas centrales del día.

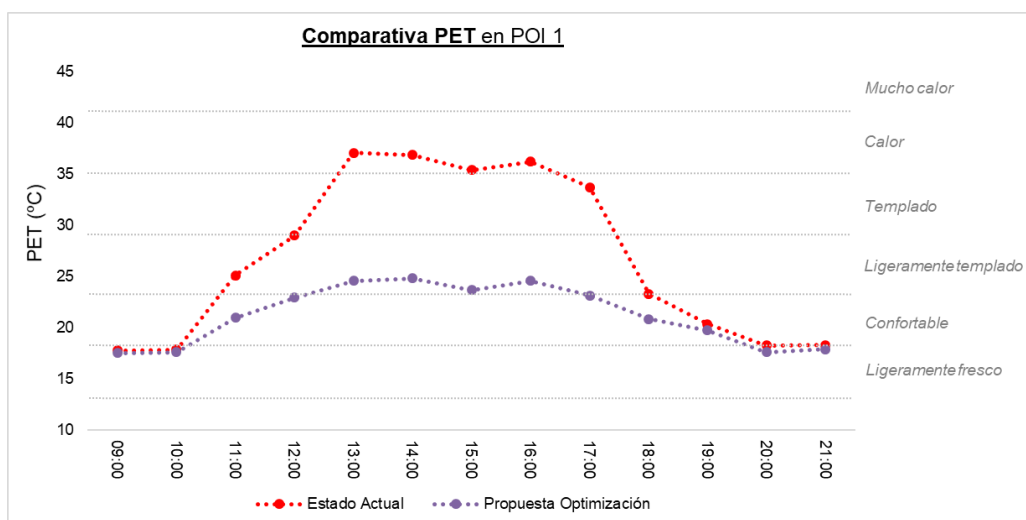


Figura 6.12 Comparación entre estado actual y propuesto. Valores de PET en el POI 1 para el 30 de agosto de 2019. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.

El promedio de casi el 80% de superficie sombreada en la acera peatonal Norte, en la cual se reduce significativamente la T_{mrt} , es muy superior al porcentaje existente en el estado actual. Por otro lado, tomando como referencia los objetivos del 60 % y el 70% para el índice PMSF (porcentaje mínimo de cobertura de la huella de sombra) en el caso de disposición de árboles con densidades de foliación altas y medias respectivamente contemplados en otros estudios (Peeters et al., 2020), los resultados pueden también valorarse como positivos.

Los resultados han mostrado que en la propuesta de optimización durante las horas consideradas entre abril y agosto el área sombreada es siempre mayor al 70% de la superficie de la zona peatonal Norte en el caso de que se utilicen árboles cónicos. En el caso de los árboles esféricos, los porcentajes para las 11:00 no han resultado tan favorables.

Se puede concluir que los resultados son satisfactorios, remarcando que las áreas sombreadas corresponden a zonas peatonales. En consecuencia, los porcentajes de superficies sombreadas, la verificación realizada mediante la herramienta de dibujo CAD según los esquemas representados en la Figura 6.8 y la comprobación de los limitados beneficios que brindan los árboles existentes en la acera Sur (Figura 6.9) validan la efectividad de las fórmulas matemáticas en la orientación Este-Oeste para obtener las características adecuadas de los árboles y su posicionamiento en la calle.

En otros estudios se ha llegado también a la conclusión de que en las aceras Sur de calles con orientación Este-Oeste puede que no sean necesarios los árboles en función de la altura de los edificios (Lee, Mayer & Kuttler, 2020), mientras que la mejora en la acera Norte puede llegar a ser de 2 niveles PET de acuerdo a la escala térmica de ASHRAE.

Otros trabajos también han demostrado (Zhao, Sailor & Wentz, 2020) que una mayor densidad de árboles (menor separación entre elementos) trae mayores beneficios en el confort térmico por calor siempre que no exista una superposición

de copas. En el mismo se hace también hincapié a la necesidad de disponer los árboles en fila de manera que no se produzcan obstáculos y sea posible la generación de corredores de ventilación en las calles.

Finalmente, si bien se ha formulado la propuesta de optimización en línea con los criterios de la metodología propuesta por tratarse de un entorno urbano existente, en una aplicación hipotéticamente real, la eliminación de los árboles existentes en la zona peatonal Sur no se consideraría procedente debido a que su existencia no genera perjuicio alguno que conlleve un empeoramiento de las condiciones de confort térmico.

6.4 Aplicación práctica en calle de orientación Norte-Sur (N-S): c/ Dr. Areilza

La calle Dr. Areilza, zona de estudio para la orientación N-S, tiene 30 m. de ancho y los edificios a ambos lados tienen 30 m. de altura. La orientación es Norte-Sur, con una inclinación de 17° hacia el Oeste en el extremo Sur. El ancho de la acera peatonal situada en el Oeste es de 14 m. y la situada en el Este de 8 m.

El espacio central restante consiste en una vía rodada asfaltada de 1 carril con aparcamientos a un lado. Dentro de ambas zonas peatonales, existen elementos dispersos de árboles con diámetros de copa de aproximadamente 5 m. tanto en la acera Oeste como en la Este (Figura 6.13).

Por consiguiente, los parámetros de la calle son:

$\beta = 17^\circ$ (orientación de la calle con respecto al eje N-S, ángulo positivo)

$W = 30$ m. (anchura total de la calle)

$d_1 = 14$ m. (anchura de la zona peatonal Oeste)

$d_2 = 8$ m. (anchura de la zona peatonal Este)

$He_1 = 30$ m. (altura de los edificios Oeste)

$He_2 = 30$ m. (altura de los edificios Este)

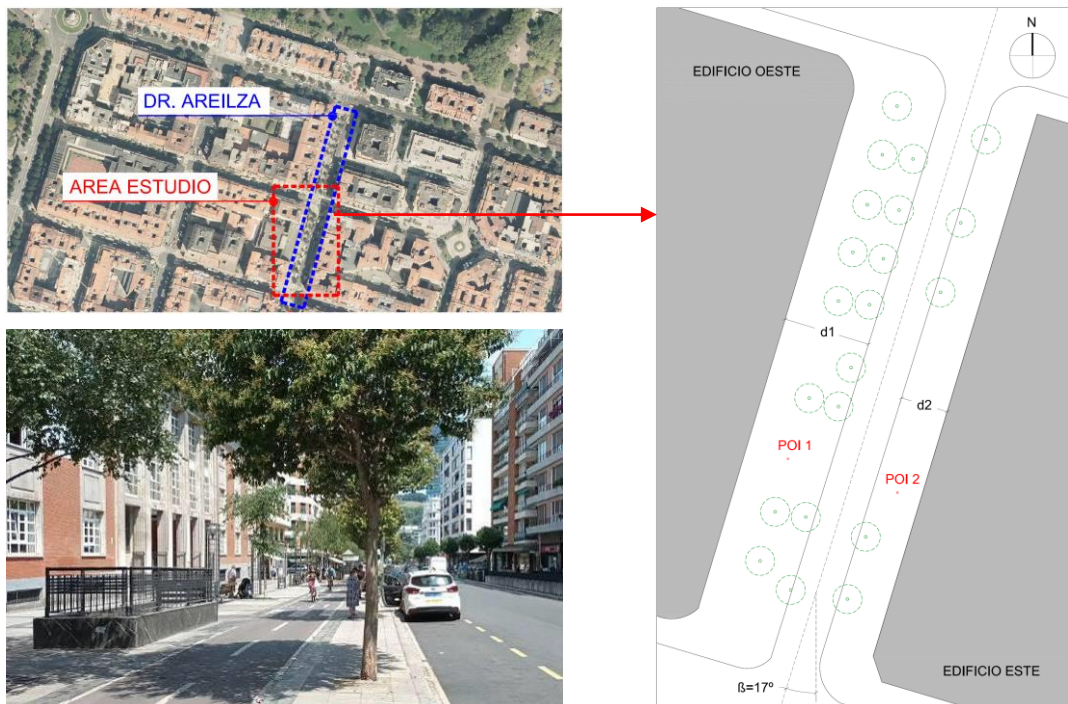


Figura 6.13 Localización de la c/Dr. Areilza de Bilbao. Los círculos verdes representan los árboles existentes en la actualidad.

6.4.1 Fase 1: modelado SOLWEIG (orientación N-S)

El modelado SOLWEIG se realiza según los datos meteorológicos obtenidos de la estación de Deusto correspondientes al día 21 de junio de 2017 los cuales están reflejados en la Tabla 3.1.

Para el modelado se consideran dos puntos diferentes dentro de la calle (Point Of Interest - POI):

- POI 1: ubicado en la acera Oeste y no sombreado por ningún árbol. Expuesto a la radiación solar directa cuando no está sombreado por los edificios.
- POI 2: ubicado en la acera Este, y no sombreado por ningún árbol. Expuesto a la radiación solar directa cuando no está sombreado por los edificios.

Al pavimento de la zona peatonal (baldosa de hormigón de color claro) se le consideran valores de albedo y emisividad de 0,20 y 0,85, respectivamente. La transmisividad de los árboles existentes se considera de 0,10.

Los resultados de Tmrt y PET para los puntos considerados se representan en la siguiente Figura 6.14.

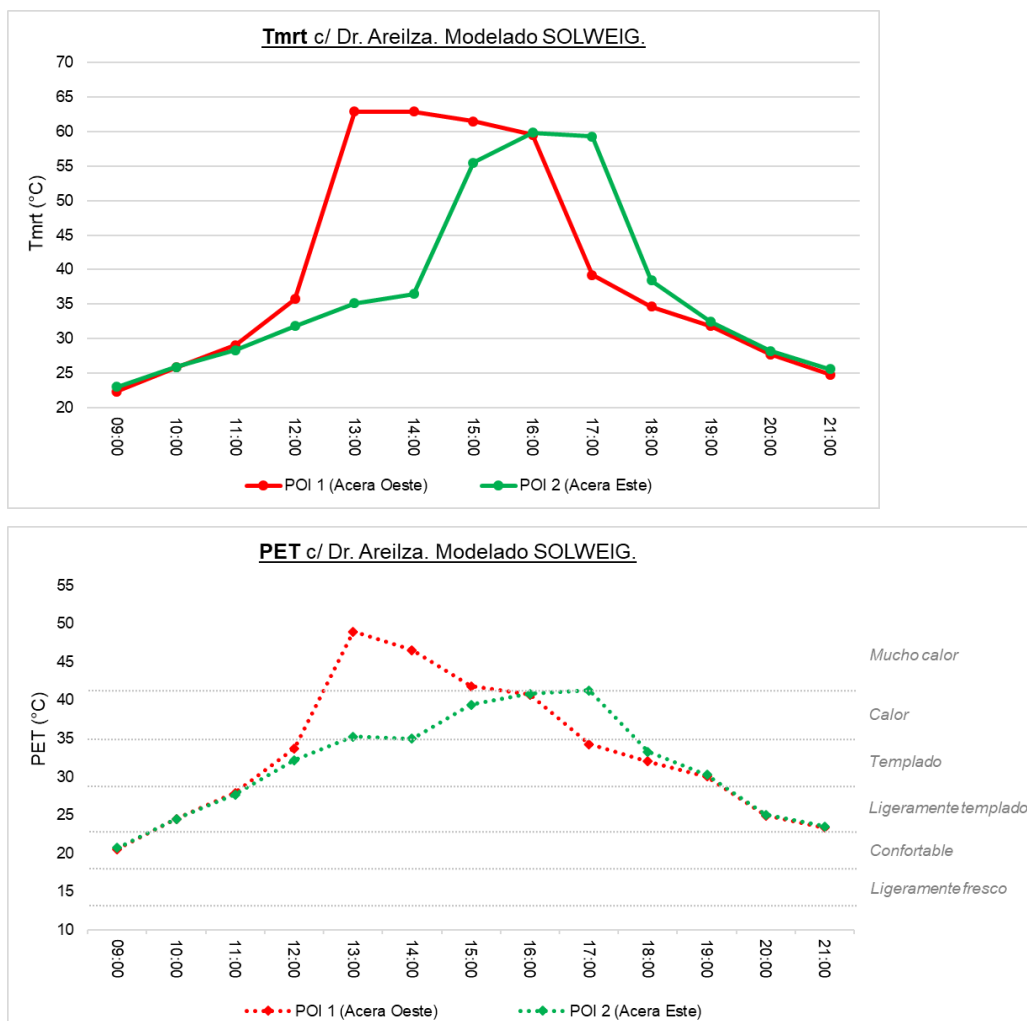


Figura 6.14 Valores Tmrt y PET de los dos puntos (POI) considerados en la c/ Dr. Areilza según modelado SOLWEIG con datos meteorológicos del 21 de junio de 2017. Niveles de percepción térmica del índice PET para Europa Central.

En el POI 1 (acera Oeste) se producen valores muy altos de Tmrt, siendo iguales o superiores a los 60°C entre las 13:00 y las 16:00, ya que en general la acera Oeste no se encuentra bajo la sombra de los edificios a esas horas. Ello conlleva

valores PET de niveles “mucho calor”, principalmente a las 13:00 y las 14:00 (50°C y 47°C) respectivamente. En el resto de horas del día, los niveles de Tmrt están por debajo de 40°C y los valores PET se mantienen por debajo de los 35°C a una escala “templada”.

En el POI 2 (acera Este) los valores de Tmrt son superiores a los 55°C entre las 15:00 y las 17:00, conllevando a su vez unos niveles de PET de “calor” e incluso alcanzando niveles de “mucho calor” (41°C) a las 17:00. En el resto del día los niveles de Tmrt están también por debajo de 40°C y los valores PET se mantienen asimismo por debajo de los 35°C a una escala “templada”.

Previamente a la aplicación de las fórmulas, la franja horaria donde se atisba que la sombra del arbolado va a resultar necesaria queda referenciada para cada una de las dos aceras según los gráficos de la Figura 6.14, aunque en todo caso resulta necesario considerar las respectivas anchuras de cada acera.

6.4.2 Fase 2: definición de especies de arbolado (orientación N-S)

Acera Oeste

Aplicando las ecuaciones 5.14, se comprueba que la única hora en que es necesario el arbolado en la acera Oeste son las 14:00, condición suficiente para su disposición. No obstante, dado que en el resto de horas no son necesarios los árboles, no resulta procedente la realización de ajustes condicionados por la posición solar de las 11:00 y 17:00. Este hecho queda también corroborado por los resultados obtenidos en el modelado y reflejados en el apartado anterior mediante los gráficos de la Figura 6.14.

En consecuencia, se utiliza la ecuación 5.15 para determinar el radio de los árboles esféricos y cónicos, la ecuación 5.16.1 para definir la posición de los árboles esféricos, y la ecuación 5.17.1 para definir la posición de los árboles cónicos. En los casos en los que las posiciones obtenidas no han garantizado la

separación mínima de 1 m. de la copa respecto la fachada del edificio, se han utilizado las Ecuaciones 5.16.2 y 5.17.2 para ubicar los árboles. La separación entre árboles se obtiene mediante las ecuaciones 5.18 para los esféricos y 5.19 para los cónicos. La totalidad de los resultados se presentan en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Resultados del radio adecuado de la copa (R_1), distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_1), y separación para árboles esféricos y cónicos en la acera Oeste de la c/Dr. Areilza.

	Abril / Agosto	Mayo / Julio	Junio	Adoptada
R_1 esférica (m)	7,32	7,32	7,32	7,40
D_1 esférica (m)	8,73	8,32 (*)	8,32 (*)	8,40
S separación esf. (m)	15,59	15,91	17,08	16,20
R cónica (m)	7,32	7,32	7,32	7,40
D_1 cónica (m)	8,32 (*)	8,32 (*)	8,32 (*)	8,40
S separación con. (m)	15,14	15,14	15,14	15,20

(*) Se ha utilizado la fórmula que garantiza una distancia mínima de 1 m. a fachada.

En base a los resultados se eligen las especies de arbolado que presentan características geométricas similares a los resultados obtenidos a partir de las especies seleccionadas en el apartado 5.1.2. Dicha elección se presenta en la Tabla 6.7 con seis posibles tipos de árboles (3 esféricos y 3 cónicos) y sus respectivas propiedades geométricas.

Tabla 6.7 Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Oeste de la c/Dr. Areilza a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.

Especie	Forma copa	Altura media	Radio copa medio	Densid. Foliación
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Cónica	25,00 m.	7,50 m.	Media
<i>Betula alba</i>	Esférica	18,00 m.	7,50 m.	Media
<i>Castanea sativa</i>	Cónica	20,00 m.	8,00 m.	Alta
<i>Celtis australis</i>	Esférica	15,00 m.	7,00 m.	Alta
<i>Quercus ilex</i>	Esférica	15,00 m.	7,00 m.	Media
<i>Tilia tomentosa</i>	Cónica	27,00 m.	8,50 m.	Alta

Dado que se ha utilizado la misma ecuación 5.15 para su cálculo, la cual es independiente de la altitud solar, se obtiene el mismo diámetro de copa (R_1) tanto para árboles esféricos como para cónicos.

La distancia a fachada es también igual en ambos casos, ya que se ha utilizado el criterio de mantener una distancia mínima de 1 m. desde la copa hasta la fachada. En lo que respecta a la separación entre elementos, las obtenidas para los árboles esféricos son 1 m. superiores que las obtenidas para los cónicos.

La superficie sombreada de pavimento en cada situación por medio de los árboles esféricos y de los cónicos se ha medido mediante una herramienta de dibujo CAD según se representa en la Figura 6.15. Únicamente se ha calculado la superficie de pavimento sombreada para las 14:00 de los distintos meses considerados, que es la hora en la que han resultado ser necesarios los árboles.

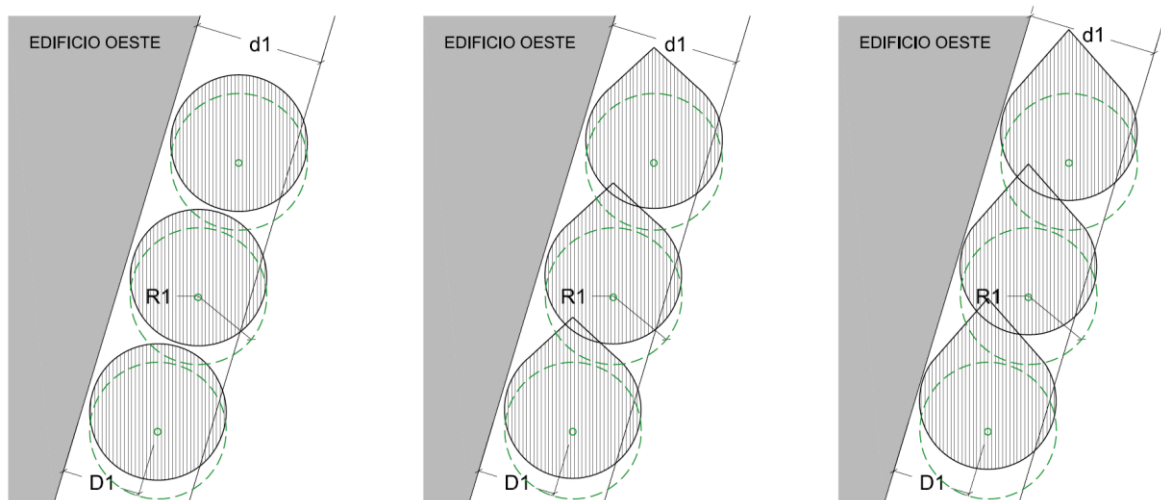


Figura 6.15 Esquema de sombreado en la zona peatonal Oeste a las 14:00 el mes de junio (izquierda), mayo-julio (centro) y abril-agosto (derecha) mediante árboles cónicos.

Los porcentajes de superficie sombreada en la acera Oeste para cada tipo de árbol, además de los correspondientes a la situación actual se representan en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Áreas sombreadas para la acera Oeste de la c/Dr. Areilza por árboles esféricos y cónicos y en la situación actual.

		Abril / Agosto	Mayo / Julio	Junio
	Separación	14:00	14:00	14:00
Esférica	16,20 m,	81,36 %	79,47 %	78,64%
Cónica	15,20 m,	83,61 %	82,53 %	81,90 %
Actual	Variable	27,16 %	25,30 %	24,78 %

En todos los meses considerados, para las 14:00, el porcentaje de superficie sombreada por árboles esféricos y cónicos es bastante parecida, aunque en todo caso algo superior para los árboles cónicos (alrededor de 2 o 3 puntos porcentuales en todos los meses). En ambos casos las superficies obtenidas son muy superiores a las del estado actual, triplicando los porcentajes de pavimento sombreado en todos los meses respecto a los existentes en la actualidad.

Por consiguiente, se puede concluir que en la acera Oeste, para las 14:00 los árboles de forma cónica son algo más adecuados para la generación de sombra, teniendo en cuenta que los radios y las distancias a fachada son equivalentes para los dos tipos de árbol.

Sin embargo, dadas las pequeñas diferencias y que las superficies sombreadas son superiores al 75%, también se considera adecuada la elección de árboles esféricos.

En lo que respecta al posicionamiento del arbolado respecto a la funcionalidad de la calle, tal como se aprecia en la Figura 5.8, es necesario tener en cuenta que existe un carril bici en la acera Oeste de la calle Dr. Areilza. Este carril bici se sitúa a 9 m. de las fachadas, por lo que la posición obtenida para los árboles sería adecuada al no interferir en su trazado.

Acera Este

Mediante la aplicación de las ecuaciones 5.20 se comprueba que en esta acera los árboles resultan necesarios tanto para las 14:00 como para las 17:00. Por lo tanto, resulta procedente analizar un posible ajuste del radio y las posiciones de los árboles para las 17:00. En consecuencia, para esta acera se va a realizar una comparativa de superficies sombreadas aplicando por una parte las ecuaciones que corresponden a los parámetros de las 14:00, y por otra las que corresponden a los de las 17:00.

Mediante las ecuaciones 5.21, 5.22.1 y 5.23.1 se obtienen los valores para las dimensiones de radio (R_2) y distancias a fachadas (D_2) con los parámetros correspondientes a las 14:00. La separación entre árboles se obtiene mediante la ecuación 5.25 que garantiza una distancia mínima de 0,50 m. entre copas. En la Tabla 6.9 se representan los resultados obtenidos.

Tabla 6.9 Resultados del radio de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos en la acera Este de la c/Dr. Areilza aplicando las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00.

	Abril / Agosto	Mayo / Julio	Junio	Adoptada
R_2 esférica (m)	1,31	2,04	2,30	2,30
D_2 esférica (m) (*)	6,00	5,42	5,24	5,60
S separación esf. (m)	-	-	-	5,10 (*)
R_2 cónica (m)	1,31	2,04	2,30	2,30
D_2 cónica (m)	6,22	5,67	5,48	5,80
S separación con. (m)	-	-	-	5,10 (*)

(*) Se adopta la distancia que garantiza una separación de 0,50 m. entre copas.

Aplicando las ecuaciones 5.22.2, 5.22.3, 5.23.2 y 5.23.3 en las que se introducen los parámetros correspondientes a las 17:00, se obtienen las dimensiones de radio (R_2) y distancias a fachadas (D_2) que se representan en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Resultados del radio de la copa (R_2) y la distancia desde el punto de plantación del árbol hasta la fachada del edificio (D_2) de árboles esféricos y cónicos en la acera Este de la c/Dr. Areilza aplicando las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 17:00.

	Abril / Agosto	Mayo / Julio	Junio	Adoptada
R_2 esférica (m)	2,42	2,43	2,47	2,50
D_2 esférica (m) (*)	6,88	6,67	6,47	6,70
S separación esf. (m)	5,64	5,28	5,26	5,50 (**)
R_2 cónica (m)	3,77	3,38	3,27	3,80
D_2 cónica (m)	4,74	4,72	4,64	4,80 (*)
S separación con. (m)	-	-	-	8,10 (**)

(*) Se ha utilizado la fórmula que garantiza una distancia mínima de 1 m. a fachada.

(**) Se adopta la distancia que garantiza una separación de 0,50 m. entre copas.

Los porcentajes de superficie sombreada en la acera Este para cada tipo de árbol con las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00 y de las 17:00 se representan en la Figura 6.16.

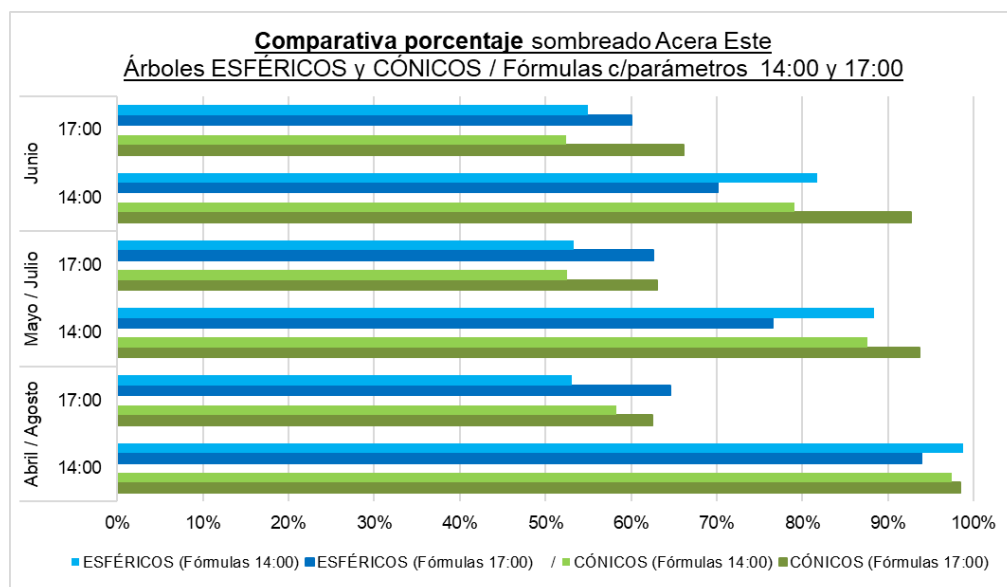


Figura 6.16 Comparación entre el porcentaje sombreado por árboles esféricos y cónicos obtenidos mediante fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00, y mediante corrección con parámetros de las 17:00 en la acera peatonal Este de la c/ Dr. Areilza.

Comparando los resultados de superficies sombreadas representadas en la Figura 5.11 se puede comprobar que para los árboles esféricos, utilizando las fórmulas para las 17:00 se obtienen superficies sombreadas a esa hora superiores en 5 puntos porcentuales para el mes de junio, y entre 10 y 11 para mayo-julio abril-agosto.

Sin embargo, la reducción de superficie para las 14:00 es significativa en el mes de junio y los meses de mayo-julio, siendo de hasta 12 puntos porcentuales.

En cuanto a los árboles cónicos, y dado que el diámetro de copa obtenido es superior utilizando las fórmulas para las 17:00 por lo que la distancia a fachada también puede ser inferior, el aumento del porcentaje sombreado a las 17:00 es más significativo principalmente para junio (superior a los 12 puntos porcentuales), aunque también se obtienen valores superiores para los meses de mayo-julio y abril-agosto.

Se obtienen valores de sombreado también superiores de superficie sombreada para la hora central del día, sobre todo para junio (13 puntos porcentuales) y mayo-julio (6 puntos porcentuales).

El aumento de superficie sombreada por los árboles cónicos se debe al aumento del radio utilizando las fórmulas para las 17:00, y también debido a que su geometría proporciona áreas de sombra ubicadas en planta más cerca del punto de plantación del árbol cuando la altitud solar es menor en comparación a las formas de copa esféricas (Figura 6.17).

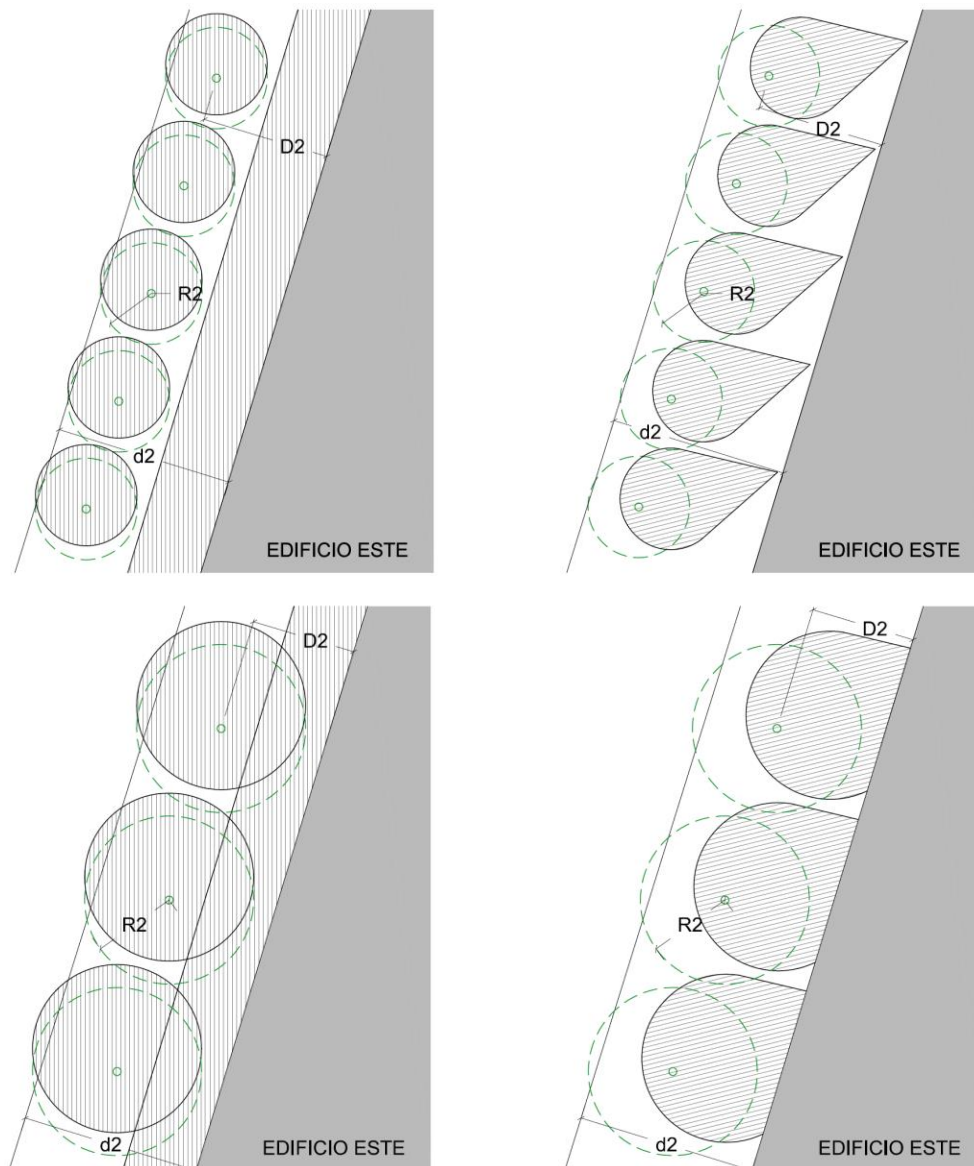


Figura 6.17 Esquema de sombreado generado por árboles cónicos (Izquierda a las 14:00 y Derecha a las 17:00) para fórmulas correspondientes a los parámetros de las 14:00 (parte superior) y corrección con parámetros de las 17:00 (parte inferior) en la acera peatonal Este.

En cuanto al coeficiente de 0,7 utilizado en las fórmulas de corrección para las 17:00, y aunque se hayan obtenido porcentajes de superficie inferiores al 70% para esa hora (60% para el caso más desfavorable en los árboles cónicos), se ha comprobado que dicho coeficiente resulta equilibrado para que la posición de los árboles no se aleje demasiado de fachada y afecte por un lado al sombreado de las 14:00 y por otro pueda quedar fuera de la zona peatonal, sobre todo cuando los valores de AR son menores.

Por consiguiente, se concluye que en la orientación Norte-Sur en caso de utilizarse las fórmulas de ajuste para las 17:00 en la acera Este (y para las 11:00 en la acera Oeste), las mismas deberán utilizarse planteándose formas de árbol cónicas, ya que para las esféricas, debido a la influencia de una la altitud solar (α) más reducida, se obtendrían radios de copa más reducidos y los árboles se posicionarían excesivamente lejos de las fachadas penalizando la sombra generada a las 14:00.

En base a los resultados obtenidos tanto utilizando las fórmulas para las 14:00 como para las 17:00, se escogen las especies de arbolado que presentan características geométricas similares a partir de las especies seleccionadas en el apartado 5.1.2.

Dicha elección se presenta en la Tabla 6.11 con cinco posibles tipos de árboles y sus respectivas propiedades geométricas.

Tabla 6.11 Propiedades generales de las especies escogidas para la acera Este de la c/Dr. Areilza a partir de las seleccionadas en el apartado 5.1.2.

Especie	Forma copa	Altura media	Radio copa medio	Densid. Foliación
<i>Acer opalus</i>	Cónica	9,00 m.	3,50 m.	Alta
<i>Cercis siliquastrum</i>	Esférica	5,00 m.	2,50 m.	Media
<i>Ligustrum lucidum</i>	Esférica	5,00 m.	2,50 m.	Alta
<i>Prunus cerasifera</i>	Esférica	5,00 m.	2,50 m.	Media
<i>Sorbus domestica</i>	Cónica	15,00 m.	4,00 m.	Media

6.4.3 Fase 3: propuesta de optimización del confort térmico y verificación de mejoras (orientación N-S)

En la propuesta de optimización (Fase 3) el tipo de árbol elegido para la acera Oeste de la calle es esférico, ya que las opciones cónicas, si bien ofrecen unas superficies sombreadas ligeramente superiores, disponen de alturas de copa y de árbol elevados, lo que podría generar una mayor interferencia en el aporte de luz

natural a las fachadas. Por consiguiente, se opta por la especie *Celtis australis* con un diámetro de copa de 14 m. y una altura media de 15 m., presentando una densidad de foliación alta.

La Figura 6.18 refleja el aumento de superficie sombreada que ofrece para las 14:00 la propuesta de optimización respecto al estado actual.

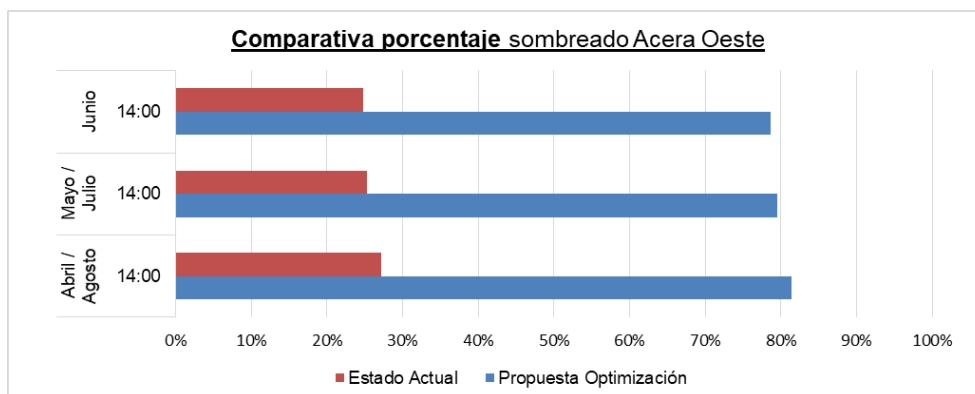


Figura 6.18 Comparación entre el estado actual y la propuesta de optimización. Porcentaje de área sombreada en la acera peatonal Oeste de la c/ Dr. Areilza.

En todos los meses se alcanzan porcentajes de sombreado de aproximadamente el 80% de la acera peatonal Oeste, por lo que los resultados se valoran como positivos.

En lo que respecta a la Acera Este, se selecciona la especie *Acer opalus*, la cual tiene un diámetro de 7 m. (árbol cónico de radio obtenido mediante las fórmulas correspondientes a los parámetros de las 17:00) y una altura de 9 m. presentando asimismo una densidad de foliación alta. Las superficies sombreadas obtenidas (representadas en la Figura 6.16) son superiores al 60% para las 17:00 en todos los meses considerados, y superiores al 90% para las 14:00 en todos los casos.

Las imágenes de la Figura 6.19 representan la diferencia de Tmrt que se podría alcanzar entre el estado actual y la propuesta de optimización.

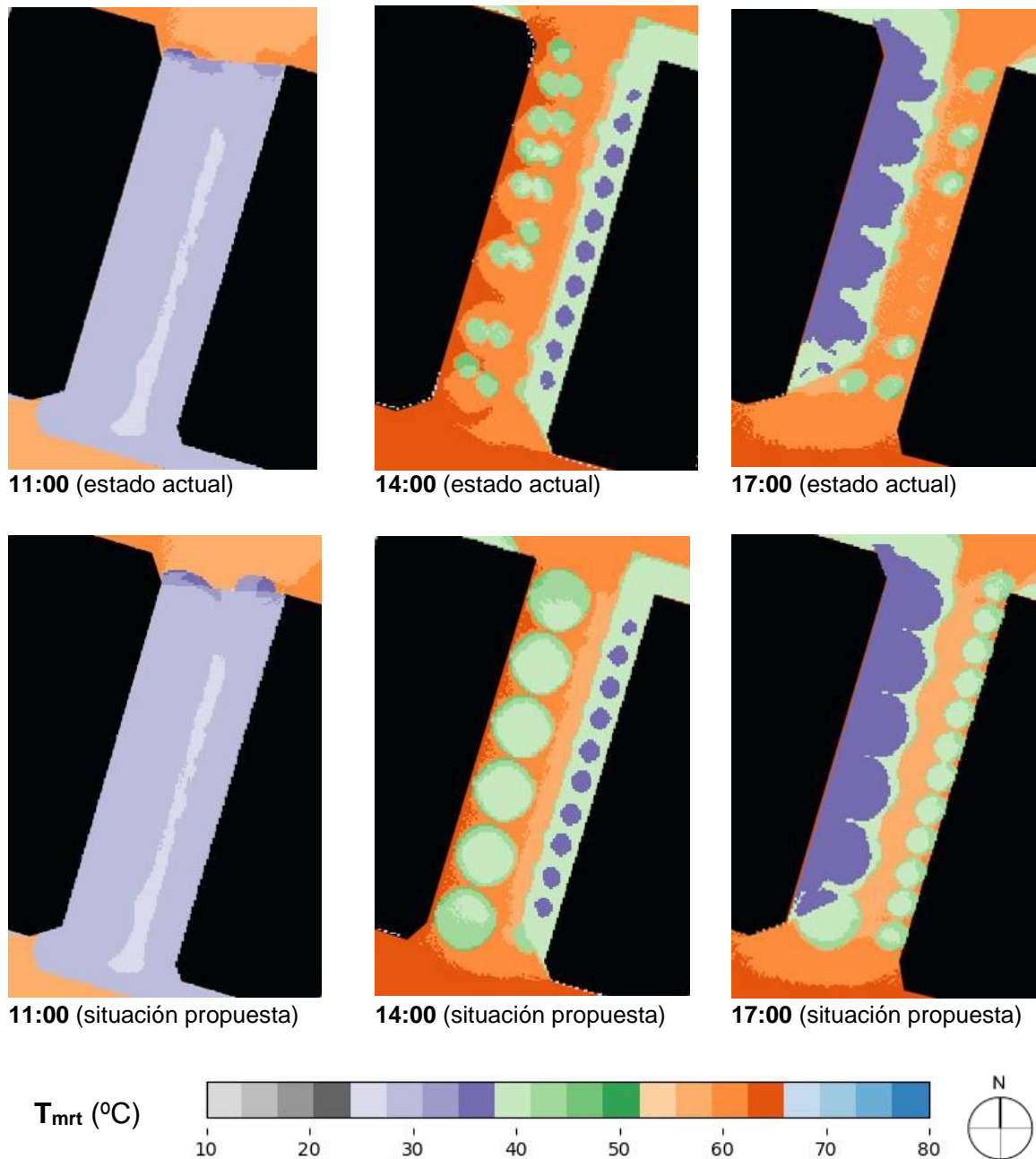


Figura 6.19 Distribución espacial de los valores de T_{mrt} de estado actual y propuesta de optimización para la c/ Dr. Areilza. Modelado con las condiciones meteorológicas del 21 de junio de 2017.

Las imágenes correspondientes al estado actual reflejan principalmente las necesidades de sombreado para la acera Oeste a las 14:00 y para la acera Este a las 17:00. Dichas necesidades quedan aliviadas en la situación de optimización propuesta, ya que la cantidad de superficie donde la reducción de T_{mrt} es superior a 20°C es mucho mayor que en el estado actual.

Por su parte, los valores de T_{mrt} en el estado actual y en la propuesta de optimización para las 11:00 son muy similares, lo que da validez a las Ecuaciones 5.14, a través de las cuales se consideraba no necesaria la sombra de los árboles para esa hora.

En base a los resultados del caso estudiado y en relación a la plantación de arbolado, se puede afirmar que tanto las propiedades geométricas como el posicionamiento y espaciado de los árboles existentes en la actualidad para el tramo de la c/Dr. Areilza estudiado son inadecuadas debido a que el porcentaje del área sombreada en las zonas peatonales se puede mejorar de manera significativa.

6.5 Valoración general de los resultados de la aplicación práctica

La reducción de los valores de T_{mrt} derivada de la sombra de los árboles en las horas centrales del día es muy relevante desde el punto de vista del confort térmico relativo al estrés por calor. Tal como también ha quedado demostrado en otros estudios, en la ubicación geográfica considerada (Norte de la Península Ibérica), en días despejados durante los meses más cálidos del año se pueden alcanzar fácilmente valores de T_{mrt} de 50 a 60 °C (Lobaccaro & Acero, 2015) en función de la exposición solar acumulada diaria en el área de estudio.

Las horas consideradas en la metodología y los casos de aplicación práctica se corresponden con las centrales del día (de 11:00 a 17:00), aunque las situaciones de estrés por calor podrían también darse extendiendo dicho intervalo horario hasta las 9:00 y las 19:00 respectivamente en función del mes y los matices relacionados con la orientación de la calle y la situación geográfica.

En cuanto a la aplicación real de los resultados, existen ejemplos de calles en Bilbao donde se han integrado árboles en agrupaciones similares a las establecidas en la metodología. Estos ejemplos (Figura 6.19) corresponden tanto a áreas consolidadas del centro de la ciudad (zona de San Mamés) como a otras

áreas con desarrollos urbanos más recientes (zona de Abandoibarra). En ambos casos los árboles tienen densidades de copa similares a las propuestas en la metodología.



Figura 6.19 Ejemplos de integración de arbolado en otras calles de Bilbao. Izquierda: zona San Mamés. Derecha: zona Abandoibarra.



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7.1 Introducción

La mejora del confort térmico relacionado con el estrés por calor en los entornos urbanos por medio del sombreado proporcionado por los árboles es un tema de especial interés para los profesionales de la arquitectura y el urbanismo, debido a los condicionantes meteorológicos existentes y la prevista repercusión del cambio climático en los mismos.

La metodología que se ha propuesto en esta Tesis está diseñada para su aplicación en el desarrollo y construcción de calles urbanas nuevas o existentes. Los planteamientos propuestos podrían también tenerse en cuenta a la hora de tomar decisiones acerca de las distribuciones funcionales de las propias calles.

Esta Tesis se ha centrado por un lado en la selección de especies arbóreas autóctonas de la cornisa cantábrica de la Península Ibérica apropiadas para la generación de sombra, y por otro en el establecimiento de criterios y fórmulas matemáticas para evaluar las necesidades y determinar las propiedades geométricas y posición adecuadas de los árboles a plantar en las calles en función de las características y orientación de las mismas. De este modo, resulta posible proponer la plantación de especies arbóreas concretas a partir de las previamente seleccionadas, teniendo en cuenta sus características geométricas y su densidad de foliación.

Para todo ello se han utilizado técnicas de modelado y medición, habiéndose validado la idoneidad del modelo SOLWEIG mediante métodos experimentales.

La metodología general propuesta para obtener las características geométricas y la posición de los árboles se puede adaptar a cualquier ubicación geográfica. Asimismo, las fórmulas planteadas pueden ser incluso utilizadas para latitudes superiores al paralelo 29°, aplicándose en las mismas los parámetros meteorológicos locales y seleccionándose previamente especies arbóreas adecuadas para cada localización.

7.2 Aportaciones y conclusiones

Las principales aportaciones de esta Tesis son las siguientes:

- Análisis preliminar del grado de influencia de los distintos factores a considerar en el confort térmico urbano relacionado con el estrés por calor según las condiciones meteorológicas reales de la parte oriental de la cornisa cantábrica.
- Selección (y descarte) y caracterización de especies arbóreas autóctonas de la cornisa cantábrica de la Península Ibérica apropiadas para la generación de sombra.
- Establecimiento de criterios y fórmulas matemáticas para evaluar la necesidad de arbolado y determinar las propiedades geométricas adecuadas y posición de los árboles a plantar en función de las características y orientación de la calle. Posteriormente podrán elegirse especies arbóreas concretas a partir de las previamente seleccionadas.
- Aplicación práctica de la metodología planteada en dos calles de orientación Este-Oeste y Norte-Sur de Bilbao.

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas para cada una de las aportaciones indicadas.

Análisis preliminar del grado de influencia de los distintos factores a considerar en el confort térmico urbano relacionado con el estrés por calor

- En los momentos o puntos no expuestos a la radiación solar directa, el factor que mayor influencia directa tiene en el confort térmico (índice PET) es la temperatura del aire.

- La exposición a la radiación solar directa aumenta de manera significativa los valores PET. Cuanto más elevada es la temperatura del aire, el incremento de los valores PET por irradiancia (radiación solar) adicional es proporcionalmente mayor.
- La velocidad del viento tiene repercusión en la reducción de los valores PET, resultando más significativa en puntos con exposición solar directa donde los valores de T_{mrt} son también más elevados.
- Principalmente la orientación Norte-Sur, y en menor medida aunque también la Noreste-Suroeste presentan unas condiciones más apropiadas de sombreado por parte los edificios a la hora de reducir el intervalo horario de estrés por calor en las calles.
- El sombreado generado por el arbolado de densidad de foliación media (valores de transmisividad aproximados a 0,30) también es capaz de reducir significativamente los valores de T_{mrt} .
- La disposición de las edificaciones y la consiguiente orientación de las calles tiene una repercusión muy relevante en la franja horaria en las que las zonas exteriores se ven expuestas a la radiación solar directa. No obstante, la disposición de dichas edificaciones y las consiguientes orientaciones de las calles están condicionadas por múltiples factores urbanísticos, topográficos o históricos (morfología de la trama urbana existente) por lo que el margen de maniobra en este sentido queda reducido a los nuevos desarrollos urbanos.
- Los árboles de mayor dimensión son una opción preferible para espacios peatonales de mayor anchura en vez de disponer más elementos de arbolado, ya que se retiene menos radiación de onda larga ascendente. Por lo tanto, en caso de no existir necesidad de tráfico rodado, el arbolado central de dimensión grande es una buena solución recomendada. Asimismo, una menor cantidad de elementos y su disposición en fila evitan

la existencia de obstáculos en la generación de corredores de ventilación en las calles.

Selección (y descarte) y caracterización de especies arbóreas autóctonas para la generación de sombra

- Las propiedades de foliación han sido un factor determinante en la elección de especies, siendo las de hoja caduca las más adecuadas para su utilización en entornos urbanos de zonas climáticas donde las necesidades de sombreado se reducen a los períodos más cálidos. Los valores de transmisividad obtenidos empíricamente para las especies seleccionadas son apropiados, siendo en general inferiores a 0,20.
- Se ha obtenido un interesante abanico de especies de arbolado (29 especies en total) utilizables para el sombreado de entornos urbanos de la cornisa cantábrica. Se han seleccionado especies utilizables en todas las tipologías de calle (estrechas, medianas, anchas) en base a sus características geométricas.
- Las dificultades para integrar el arbolado en calles de anchura reducida (con espacios peatonales también estrechos) lleva a pensar en la posibilidad de una redistribución funcional de la calle según la cual se podría conseguir una más adecuada zonificación respecto a la radiación solar y unas mayores posibilidades de disposición de arbolado.

Establecimiento de criterios y fórmulas matemáticas para determinar las propiedades geométricas adecuadas de los árboles

- Dadas la anchura media (D_c) mínima de copa de las especies seleccionadas y considerando la distancia mínima de 1 m. desde las mismas hasta las fachadas de los edificios, los espacios peatonales deben disponer de una anchura mínima de 3,50 m. para posibilitar la plantación de arbolado.

- En términos generales, y para todas las orientaciones en las distintas horas consideradas, cuando la separación entre elementos de arbolado es menor, el porcentaje de superficie peatonal sombreada es mayor.
- La posición de los árboles respecto las fachadas de los edificios obtenida mediante las fórmulas matemáticas propuestas debe poder adecuarse a las necesidades funcionales de las calles teniendo en cuenta las actividades implantadas en las plantas bajas de los edificios, la disposición de mobiliario urbano, o la existencia de carriles bici.
- Dado que las dimensiones de los árboles tienen sus límites en el momento de ser plantados, la elección de árboles de menor dimensión de copa ofrecerá resultados con una mayor inmediatez en el tiempo que los árboles de grandes dimensiones.

Aplicación práctica de la metodología planteada

- Los árboles de forma cónica, al estar su perímetro horizontal de mayor diámetro más cerca de la superficie de pavimento, generan un mayor porcentaje de superficie peatonal sombreada para todas las horas consideradas. No obstante, dependiendo de su altura, también pueden generar mayores superficies sombreadas en las fachadas de los edificios, y su posición en muchos casos debe estar en un punto más central de las zonas peatonales influyendo así en la distribución funcional de la calle.
- No obstante, dado que las diferencias en las superficies sombreadas no son tan significativas, también se considera adecuada la elección de árboles esféricos.
- En caso de resultar necesario un ajuste de la geometría del árbol y su posición respecto a las fachadas para las 11:00 o para las 17:00, las mismas deberán realizarse planteándose árboles de forma cónica.

7.3 Futuras líneas de investigación

A modo de continuación de la presente Tesis, se abren una serie de posibles líneas de investigación para incidir en la mejora del confort térmico en los entornos urbanos:

- Determinación de criterios para la implantación de árboles en espacios urbanos que no sean calles como son las plazas o los parques, atendiendo a sus necesidades funcionales.
- Estudiar la influencia que la plantación de diferentes tipos de árboles podría tener sobre el confort térmico no relacionado con el calor en los meses más fríos del año, teniendo en cuenta que para el clima templado del Norte de la Península Ibérica la sombra generada en las calles urbanas es valiosa durante el verano aunque podría ser perjudicial durante el invierno.
- Análisis de las posibilidades de generación de sombra en las zonas peatonales mediante la disposición de elementos no vegetales de manera permanente o estacionaria, y en posible combinación con los elementos de arbolado.
- Estudio de la implantación de arbolado en combinación con otros elementos de urbanización que optimicen la disipación del calor como acabados vegetales o láminas de agua.
- Análisis de la repercusión que podría tener el cambio climático en las distintas especies de arbolado.
- Aplicación de modelos CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para evaluar el efecto que produce la disposición de arbolado en la distribución espacial del viento.

- Evaluar el efecto de la evapotranspiración en diferentes situaciones de estrés térmico analizando su impacto concreto en el caso de la cornisa cantábrica.

REFERENCIAS

Referencias

01. Acero, J. A., Arrizabalaga, J., Kupski, S., & Katzschner, L. (2013). Deriving an urban climate map in coastal areas with complex terrain in the Basque Country (Spain). *Urban Climate* 4, 35-60.
02. Acero, J. A., & Herranz-Pascual, K. (2015). A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment* 93, 245-257.
03. Acero, J.A. & Arrizabalaga, J. (2018). Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. *Theoretical and Applied Climatology* 131, 455-469.
04. Aizpuru I., Catalán P., Garín F. (1996). Euskal Herriko zuhaitz eta zuhaisken liburua. Vitoria- Gasteiz. Servicio Central de publicaciones del Gobierno Vasco.
05. Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70 (3), 295–310.
06. Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41-2, 94-108.
07. Altunkasa, C., & Uslu, C. (2020). Use of outdoor microclimate simulation maps for a planting design to improve thermal comfort. *Sustainable Cities and Society* 57, Article 102137.
08. Aminipouri, M., Rayner, D., Lindberg, F., Thorsson, S., Knudby, A.J., Zickfeld, K., & Krayenhoff, E. S. (2019). Urban tree planting to maintain outdoor thermal comfort under climate change: The case of Vancouver's local climate zones. *Building and Environment* 158, 226-236.
09. ASHRAE. (2001). ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). *Fundamentals Handbook 2001 (SI edition)*. ISBN: 1883413885.

10. Asociación Española de Normalización AENOR (2002). Norma UNE-EN ISO 7726- Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas.
11. Asociación Española de Normalización AENOR (2006). Norma UNE-EN ISO 7730- Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
12. Azcarate, I., Acero, J. A., & Arrizabalaga, J. (2019). Metodología de selección de especies de arbolado para el sombreado urbano en la parte oriental de la cornisa Cantábrica. *Informes de La Construcción* 71 (556), 322-333.
13. Azcarate, I., Acero, J. A., Garmendia, L. & Rojí, E. (2021). Tree layout methodology for shading pedestrian zones: thermal comfort study in Bilbao (Northern Iberian Peninsula). *Sustainable Cities and Society* 72, Article 102996.
14. Berry, R., Livesley, S. J., & Aye, L. (2013). Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Building and Environment* 69, 91-100.
15. Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97(3):147-155.
16. Bretz, S., Akbari, H., Rosenfeld, A., & Taha, H. (1992). Implementation of solar-reflective surfaces: Materials and utility programs. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
17. Brown, R.D., Vanos, J., Kenny, N., Lenzholzer, S.. (2015). Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning* 138:118-31.
18. Bruse, M., Fleer, H. (1998) Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13 (3-4), 373–384.

19. Brysse, K., Oreskes, N., O'Reilly, J., Oppenheimer, M. (2013) Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Global Environmental Change* 23(1), 327-337.
20. Chen, J.M., Black, T.A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment* 15, 421–429.
21. Chen, Y.C., Lin, T.P., Matzarakis, A. (2014) Comparison of mean radiant temperature based on globe thermometer, six direction radiation method and modeling simulations- a case study in Freiburg, Germany, *Theoretical and Applied Climatology* 118, 535–551.
22. Chen, J., Wang, H., & Xie, P. (2019). Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering* 158, 113755.
23. Cohen, S., Palatchi, Y., Palatchi, D. P., Shashua-Bar, L., Lukyanov, V., Yaakov, Y., Matzarakis, A., Tanny, J., Potchter, O. (2020). Mean radiant temperature in urban canyons from solar calculations, climate and surface properties-theory, validation and 'Mr.T' software. *Building and Environment* 178, 106927.
24. Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. (4ª edición). México D.F. McGraw Hill.
25. Dimoudi, A., Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the, urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings* 35(1):69-76.
26. Doulos, L., Santamouris, M., Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy* 77, 231-249.
27. Ente Vasco de la Energía. Ikerlan SCoop. (1999). Atlas de radiación solar del País Vasco.
28. Estrada, F., Botzen, W. & Tol, R. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change* 7, 403–406.
29. Fahmy, M., Sharples, S., & Yahiya, M. (2010). LAI based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in Cairo, Egypt. *Building and Environment* 45-2, 345-357.

30. Favillier, A., Lopez-Sáez, J., Corona, C., Trappman, D., Toe, D., Stoffel, M., Rovera, G. & Berger, F. (2015). Potential of two submontane broadleaved species (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) to reveal spatiotemporal patterns of rockfall activity. *Geomorphology* 246, 35-47.
31. Fensholt, R., Sandholt, I., & Rasmussen, M. S. (2004). Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 91(3), 490-507.
32. Frazer, G. W., Canham, C. D., & Lertzman, K. P. (2000). Gap Light Analyzer (GLA), version 2.0. *Bulletin of the Ecological Society of America* 81 (3): 191-197.
33. Gartland, L. (2008). Heat Island: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas. Earthscan, London.
34. Gómez-Muñoz, V. M., Porta-Gándara, M.A., & Fernández, J. L. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning* 94-3, 149-157.
35. González-Aparicio, I. & Hidalgo, J. (2012). Dynamically based future daily and seasonal temperature scenarios analysis for the northern Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology* 32, 1825-1833.
36. Grahn, P., Stigsdotter, U.K. (2010) The relation between perceived sensory dimensions of urban green space and stress restoration. *Landscape and Urban Planning* 94(3), 264-275.
37. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science* 319, 756-760.
38. Gulyás, Á., Unger, J., & Matzarakis, A. (2006). Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements. *Building and Environment* 41-12, 1713-1722.
39. Hartig T. (2008). Green space, psychological restoration, and health inequality. *The Lancet* 372(9650):1614-1615.

40. Heng, S.L., Chow, W.T.L. (2019). How “hot” is too hot? Evaluating acceptable outdoor thermal comfort ranges in an equatorial urban park. *International Journal of Biometeorology* 63, 801–816.
41. Higuera, E. (2006). Urbanismo bioclimático. Cuadernos de investigación urbanística. Editorial Gustavo Gili.
42. Holst, J., & Mayer, H. (2011). Impacts of street design parameters on human biometeorological variables. *Meteorologische Zeitschrift* (20), 541-552.
43. Hongbing, W., Jun, Q., Yonghong, H., & Li, D. (2010). Optimal tree design for daylighting in residential buildings. *Building and Environment* 45-12, 2594-2606.
44. Höpfe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43(2), 71-75.
45. Hwang, R., Lin, T., & Matzarakis, A. (2011). Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 46-4, 863-870.
46. IPCC WG2. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group II. Impacts, adaptation and vulnerability. Chapter 8: Urban areas.
47. IPCC WG3. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change. Mitigation of climate change. Working Group III. Chapter 12: Human settlements, infrastructure, and spatial planning.
48. Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – the need for standardization. *Urban Climate* 10, 346-366.
49. Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121-1, 19-35.
50. Katzschner, L., & Thorsson, S. (2009). Microclimatic investigations as tool for urban design. Paper presented at the Barret Seventh International Conference on Urban Climate. Yokohama, Japan.

51. Klemm, W., Heusinkveld, B.G., Lenzholzer, S., van Hove, B. (2015) Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning* 138, 87-98.
52. Kong, L., Lau, K. K., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., & Ng, E. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society* 31, 12-25.
53. Kotzen, B. (2003). An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development. *Journal of Arid Environments* 55-2, 231-274.
54. Kumar, P. & Sharma, A. (2020). Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort- A review. *Sustainable Cities and Society* 61, Article 102297.
55. Lau K.K., Ren C., Ho J., Ng E. (2016). Numerical modelling of mean radiant temperature in high-density sub-tropical urban environment. *Energy and Buildings* 114, 80-86.
56. Lau, K.K., Lindberg, F., Rayner, D., Thorsson, S. (2015). The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: a study of three European cities. *International Journal of Biometeorology* 59 (7), 799-814.
57. Lee, H., Mayer, H. (2018). Thermal comfort of pedestrians in an urban street canyon is affected by increasing albedo of building walls. *International Journal of Biometeorology* 62, 1199-1209.
58. Lee, H., Mayer, H., & Kuttler, W. (2020). Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under central european conditions. *Urban Forestry & Urban Greening* 48, 126558.
59. Li, Z., Feng, X., Sun, J., Li, C., Yu, W., Fang, Z. (2023) STMRT: A simple tree canopy radiative transfer model for outdoor mean radiant temperature. *Building and Environment* 228, Article 109846.

60. Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 – modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology* 52, 697-713.
61. Lindberg, F., & Grimmond, C. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105, 311-323.
62. Lindberg, F., Holmer, B., Thorsson, S. & Rayner, D. (2014). Characteristics of the mean radiant temperature in high latitude cities-implications for sensitive climate planning applications. *International Journal of Biometeorology* 58, 613-627.
63. Lindberg, F., Thorsson, S., Rayner, D. & Lau, K. (2016). The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustainable Cities and Society* 25, 1-12.
64. Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C. W., Sun, T., & Zhang, Z. (2018). Urban multi-scale environmental predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling and Software* 99, 70-87.
65. Lobaccaro, G., Acero, J.A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate* 14, 251-267.
66. Lobaccaro, G., Acero, J.A., Sanchez Martinez, G., Padro, A., Laburu, T., Fernandez, G. (2019). Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(19), 3574.
67. Martínez, B., Camacho-de Coca, F., García Haro, F.J. (2006). Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de Teledetección* 26, 5-17.
68. Masmoudi, S., & Mazouz, S. (2004). Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions. *Energy and Buildings* 36-7, 710-719.

69. Matzarakis, A., Mayer, H. (1997). Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology* 41, 34-39.
70. Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments- Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51(4), 323-334.
71. Mayer, H, & Hoppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* 38-1, 43-49.
72. Morakinyo, T. E., & Lam, Y. F. (2016). Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment* 103, 262-275.
73. Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment* 115, 1-17.
74. Nasrollahi, N., Namazi, Y., Taleghani, M. (2021). The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. *Sustainable Cities and Society* 65, Article102638.
75. Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J., Norford, L. (2019). Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate. *Energy & Buildings* 187, 144-162.
76. Ndetto, E. L., & Matzarakis, A. (2013). Effects of urban configuration on human thermal condition in a typical tropical African coastal city. *Advances in Meteorology* 2013 (ID 549096), 12 pages.
77. Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4(3), 115-123.
78. Nwakaire, C. M., Onn, C. C., Yap, S. P., Yuen, C. W., & Onodagu, P. D. (2020). Urban heat island studies with emphasis on urban pavements: A review. *Sustainable Cities and Society* 63, 102476.
79. Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108 (455), 1-24.
80. Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103–113.

81. Oleson, K. W., Monaghan, A., Wilhelmi, O., Barlage, M., Brunzell, N., Feddema, J., Hu, L., Steinhoff, D.F. (2015). Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change* 129 (3-4), 525-541.
82. OPTOTHERM (2018). Thermal imaging. Emissivity values. Retrieved from <https://www.optothermcom/emiss-table.htm>
83. Park M., Hagishima A., Tanimoto J., Narita K. (2012). Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment* 56, 38-46.
84. Peeters, A., Shashua-Bar, L., Meir, S., Shmulevich, R. R., Caspi, Y., Weyl, M. & Angel, N. (2020). A decision support tool for calculating effective shading in urban streets. *Urban Climate* 30, Article 100672.
85. Pérez, F.P. (2003). Euskal Herriko zuhaitzak. ADEVE. (Asociación para la Defensa de las Especies en Vías de Extinción).
86. Pinty, B., Gobron, N., Widlowski, J. & Verstraete, M. (2003). Allometric relationships of selected European tree species. *Betula pubescens*, *Fagus sylvatica*, *Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*. Ispra (Italy): European Commission- Joint Research Centre.
87. Qaid, A., & Ossen, D. R. (2015). Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. *International Journal of Biometeorology* 59-6, 657-677.
88. Quero, J.L., Gomez-Aparicio, L., Zamora, R., & Maestre, F. (2008). Shifts in the regeneration niche of an endangered tree (*Acer opalus* ssp. *granatense*) during ontogeny: Using an ecological concept for application. *Basic and applied Ecology* 9, 635-644.
89. Rich, P. M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews* 5, 13-29.
90. Rich, P. M., Clark, D. B., Clark, D. A. & Oberbauer, S. F. (1993). Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65, 107-127.

91. Rosenzweig C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ali Ibrahim, S. (2015). ARC3.2 Summary for City Leaders. Urban Climate Change Research Network. Columbia University. New York.
92. Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Grote, R., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2020). Modelling Urban Tree Growth and Ecosystem Services: Review and Perspectives. In: Cánovas, F.M., Lüttge, U., Risueño, MC., Pretzsch, H. Progress in Botany Vol. 82.
93. Rueda, S. (2004) Habitabilidad y calidad de vida. *Cuadernos de Investigación urbanística* 42, 29-33.
94. Sabaté, S., Gracia, C.A., Sánchez, A. (2002) Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management* 162(1), 23-37.
95. Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., et al. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health* 15(1), 95.
96. Salvati, A., Kolokotroni, M., Kotopouleas, A., Watkins, R., Giridharan, R., & Nikolopoulou, M. (2021). Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates. *Building and Environment*, Article 108459.
97. Santamouris, M. (2001). On the built environment - the urban influence. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, 3–18. Routledge, New York.
98. Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., et al. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment* 53, 128-136.
99. Shashua-Bar, L., & Hoffman, M E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings* 35-1, 61-68.
100. Spangenberg, J. (2010) Nature in megacities. São Paulo/Brazil – a case study, PhD thesis. Weimar. Bauhaus-Universität.

101. Stewart, I.D., Oke, T. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1879-1900.
102. Sukopp, H., Werner, P. (1989) Naturaleza en las ciudades. Desarrollo de flora y fauna en áreas urbanas. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
103. Taleghani, M., & Berardi, U. (2018). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate* 24, 449-459.
104. Tan, Z., Lau, K. K., & Ng, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings* 114, 265-274.
105. Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., van, H L., & Holtslag, A. A. M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 140 (684), 2197-2210.
106. Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27(14), 1983-1993.
107. Vogt J, Gillner S, Hofmann M, et al. (2017) Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning* 157, 14-25.
108. VDI 3787. (2008). Part 2, environmental meteorology – methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level; Part I: Climate. Beuth Verlag, Berlin.
109. Wang, Y. P., & Jarvis, P. G. (1988). Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology* 43, 319-321.
110. Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11(41), 41-76.

111. Wei, S., Yin, T., Dissegna, M. A., Whittle, A. J., Ow, G. L. F., Yusof, M. L. M., et al. (2020). An assessment study of three indirect methods for estimating leaf area density and leaf area index of individual trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 292-293, 108101.
112. Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1):37-53.
113. Welles, J.M. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5 (1), 31-43.
114. Wolch, J.R., Byrne, J., Newell, J.P. (2014) Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities “just green enough”. *Landscape and Urban Planning* 12, 234-244.
115. Yu, C., Hien, W.N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* 38 (2), 105-120.
116. Zhao, Q., Sailor, D. J., & Wentz, E.A. (2018). Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment. *Urban Forestry & Urban Greening* 32, 81-91.
117. Zinzi, M. (2016). Exploring the potentialities of cool facades to improve the thermal response of Mediterranean residential buildings. *Solar Energy* 135, 386–397.

ANEXO I

MEDICIONES DE TMRT MEDIANTE TERMÓMETRO GLOBO EN EL PATIO DEL COLEGIO JESUITAK INDAUTXU DE BILBAO

A.I. Mediciones de T_{mrt} en el patio del colegio Jesuitak Indautxu de Bilbao

El 21 de agosto de 2019 se realizó una campaña de medición in situ mediante termómetro globo en el patio del colegio Jesuitak Indautxu de Bilbao (latitud $43,15^\circ$ y longitud $2,56^\circ O$). El patio en el cual se realizaron las mediciones es un espacio abierto privado. La medición se llevó a cabo en un único punto del patio (Figura A.I.1) el cual está continuamente expuesto a la radiación solar directa a lo largo de todas las horas del día.

Los datos de temperatura del aire ($^\circ C$), irradiancia solar (W / m^2) y condiciones de humedad relativa (%) se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana (estación de Deusto), mientras que la temperatura del globo ($^\circ C$) y la velocidad del viento (m/s) se midieron in situ.

La campaña de medición se realizó también mediante el termómetro globo TESTO Globe (diámetro = 150 mm. y color negro), el datalogger Testo 480 y el termo-anemómetro Testo 405i (Figura A.I.1). La ubicación de los sensores estaba a una altura aproximada de 1 m. La temperatura media radiante (T_{mrt}) para cada hora de luz se obtuvo con la expresión representada en la Ecuación 4.1.



Figura A.I.1 Punto de medición e instrumentos para la campaña en el patio del colegio Jesuitak Indautxu.

La temperatura del globo y la velocidad del viento se tomaron de manera continua a lo largo del día, aunque con el objetivo de facilitar el cálculo de la T_{mrt} se representan únicamente los resultados de las horas en punto.

El modelado mediante SOLWEIG se llevó a cabo con los datos meteorológicos correspondientes al 21 de agosto de 2019, día de la campaña de medición (irradiancia, temperatura del aire y humedad relativa obtenidas de la estación meteorológica, y la velocidad del viento medida in situ, aunque redondeada).

El pavimento del patio es de asfalto gris, cuyos valores de albedo y emisividad son de 0,18 y 0,95 respectivamente (valores establecidos en el modelo SOLWEIG). Para las fachadas se asumen los valores estándar de albedo 0,2 y emisividad 0,7 (aunque estos valores no tienen influencia en los resultados al estar el punto de medición muy alejado de las mismas). La exposición humana fue considerada sobre la base de una postura de pie con valores de coeficiente de absorción estándar de 0,7 y 0,97 para radiaciones de onda corta y onda larga respectivamente.

Tabla A.I.1 Condiciones meteorológicas y resultados del modelo SOLWEIG para la campaña de medición en el patio del colegio Jesuitak Indautxu.

Hora	Condiciones meteorológicas (Euskalmet)				Resultados SOLWEIG
	Rad (W/m ²)	Va (m/s)	Ta (°C)	Hum (%)	T_{mrt} (°C)
09:00	254	1	19	79	14,3
10:00	350	1	19	70	26,9
11:00	425	1	21	66	27,7
12:00	708	1	22	55	33,2
13:00	845	1	24	55	35,7
14:00	849	1	24	54	34,2
15:00	922	1	25	47	36,0
16:00	519	1	24	50	40,0
17:00	629	1	25	50	45,7
18:00	509	1	24	53	40,8
19:00	362	1	24	59	34,5
20:00	126	1	23	51	24,7
21:00	22	1	22	60	19,4

Tabla A.I.2 Resultados de las Mediciones realizadas en la campaña del patio del colegio Jesuitak Indautxu.

Hora	Ta (°C)	Va (m/s)	Tg (°C)	T _{mrt} (°C)
09:00	19	0,6	19,2	19,2
10:00	19	0,7	20,5	20,7
11:00	21	0,2	24,1	24,3
12:00	22	0,5	25,2	25,5
13:00	24	0,2	36,9	37,5
14:00	24	1,2	35,0	36,6
15:00	25	0,2	40,6	41,3
16:00	24	0,4	37,9	39,0
17:00	25	0,2	40,7	41,3
18:00	24	0,1	39,2	39,7
19:00	24	0,2	36,2	36,7
20:00	23	0,4	25,4	25,6
21:00	22	0,3	22,5	22,5

A partir de los resultados de la campaña de medición del caso de estudio, la Figura A.I.2 representa los valores de T_{mrt} obtenidos mediante la Ecuación 4.1 en comparación con los resultados del modelo SOLWEIG en las mismas condiciones meteorológicas.

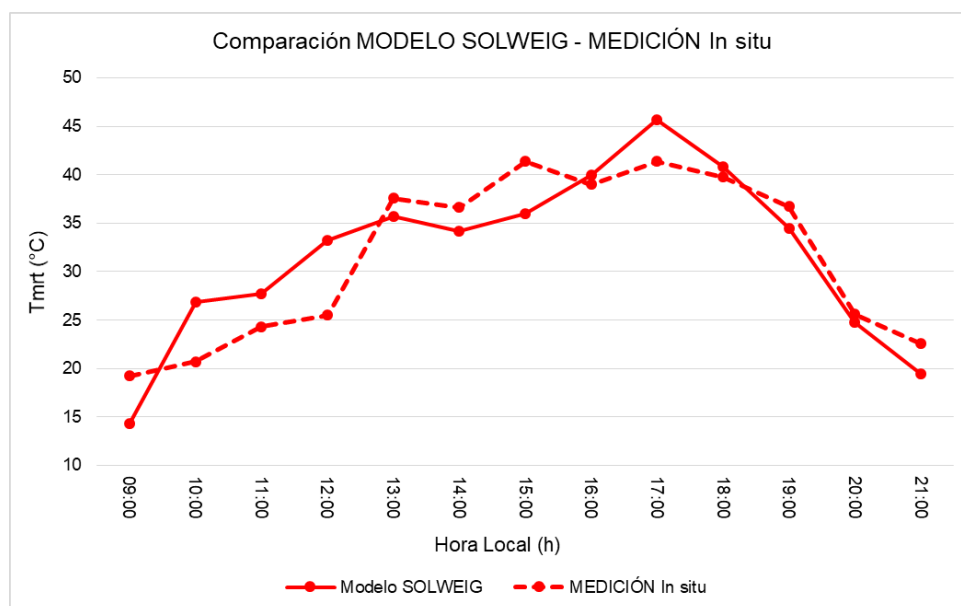


Figura A.I.2 Comparación entre los resultados del modelo SOLWEIG y los de la campaña de medición in situ realizada en el patio del colegio Jesuitak Indautxu el día 30 de agosto de 2019.

La comparación gráfica (Figura A.I.2) muestra los resultados de la campaña de medición y los obtenidos del modelo SOLWEIG. Existen algunas horas concretas (10:00, 12:00 y 15:00) en los que las diferencias de T_{mrt} pueden alcanzar valores de 5°C o superiores, mientras que en el resto de horas las diferencias son inferiores a los 5°C . Los valores de ECM y RECM calculados han sido de $3,42^{\circ}\text{C}$ y $3,99^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

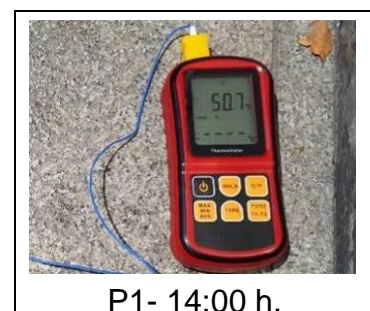
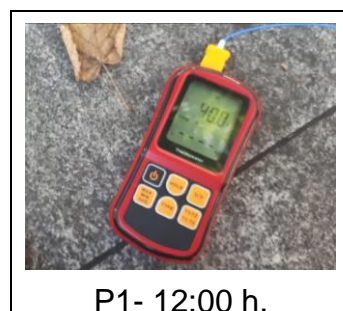
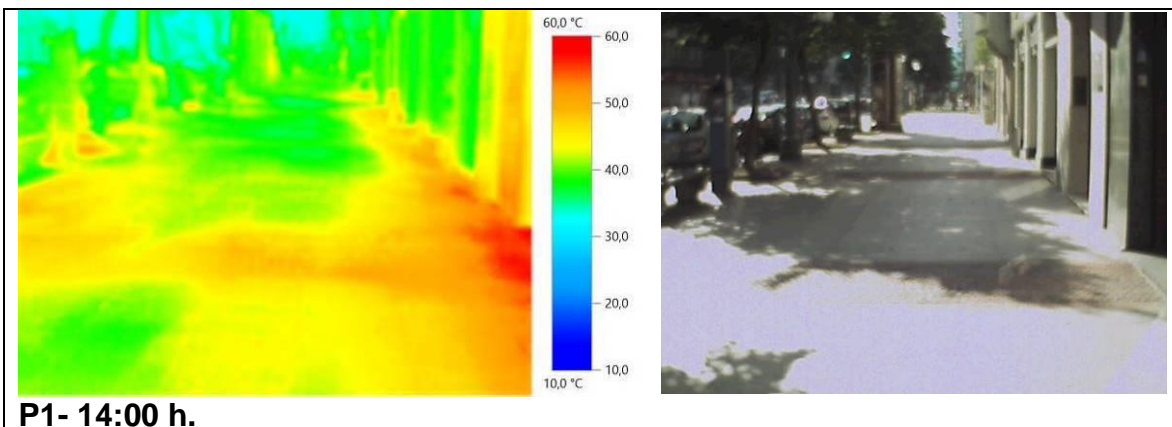
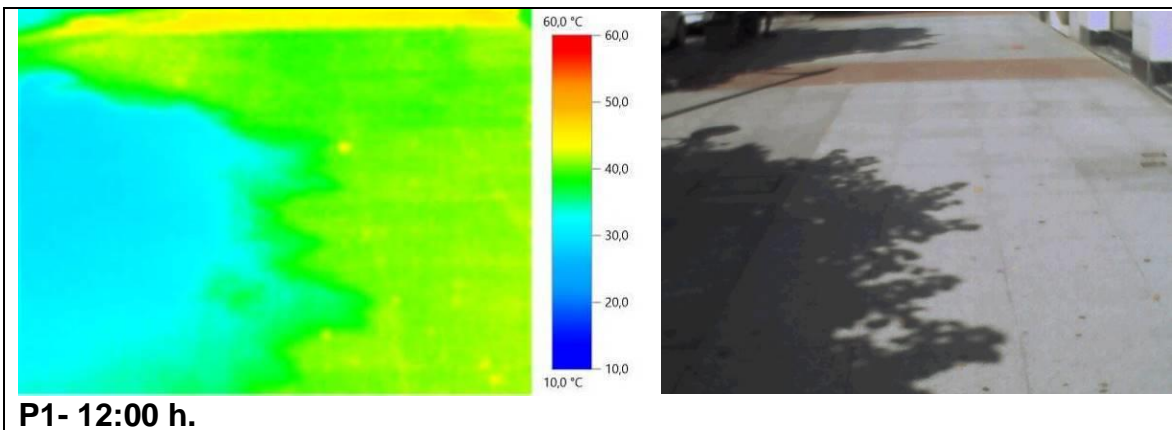
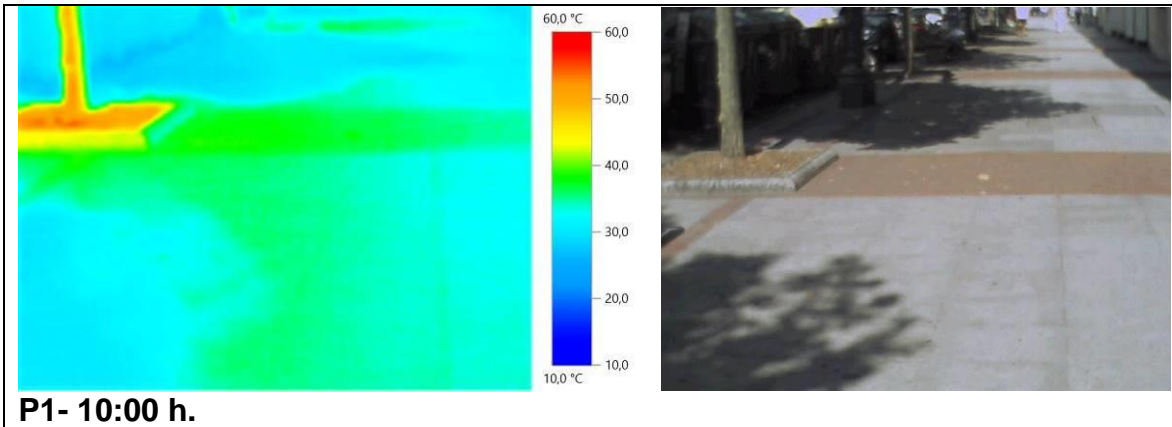
Cabe indicar que en este caso la razón principal de los distintos valores podría deberse a las diferencias entre la estimación de los flujos de onda corta del modelo teniendo en cuenta que en algunas horas del día el cielo no estaba completamente claro. Cabe señalar que la distancia hasta la estación meteorológica es también de aproximadamente 2 km. hacia el Oeste, al igual que en el caso de la c/Gran Vía.

No obstante, también en este caso las mediciones y los valores obtenidos del modelo SOLWEIG muestran perfiles diurnos de T_{mrt} similares, acreditando la fiabilidad e idoneidad del modelo SOLWEIG para la evaluación de T_{mrt} en el contexto de un entorno urbano.

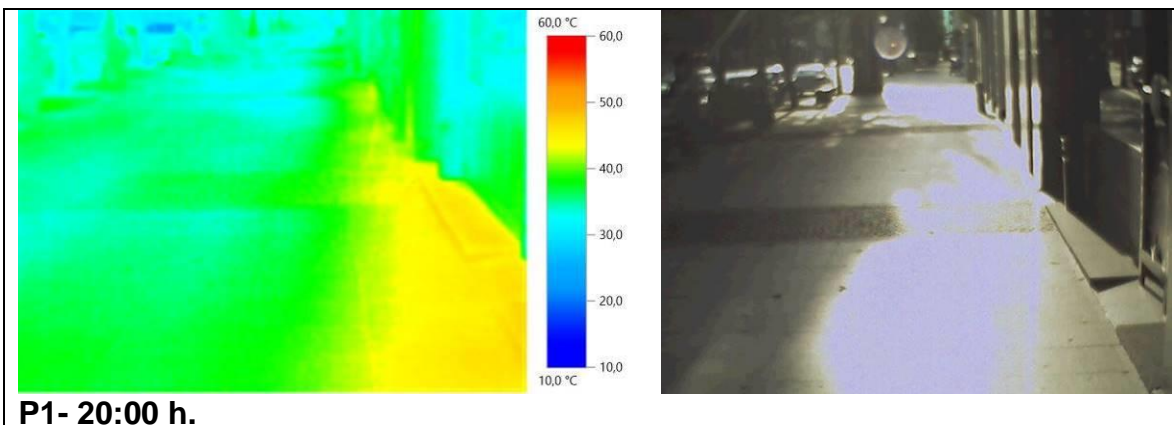
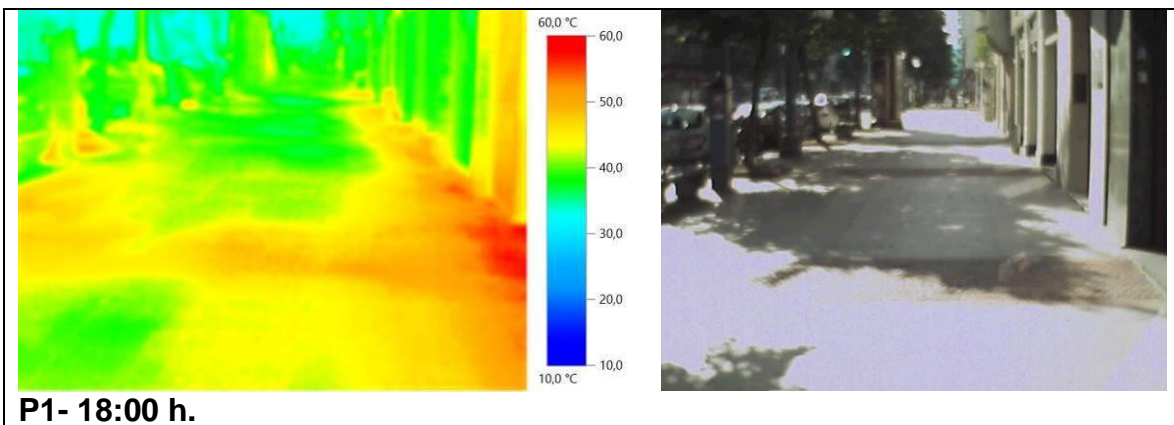
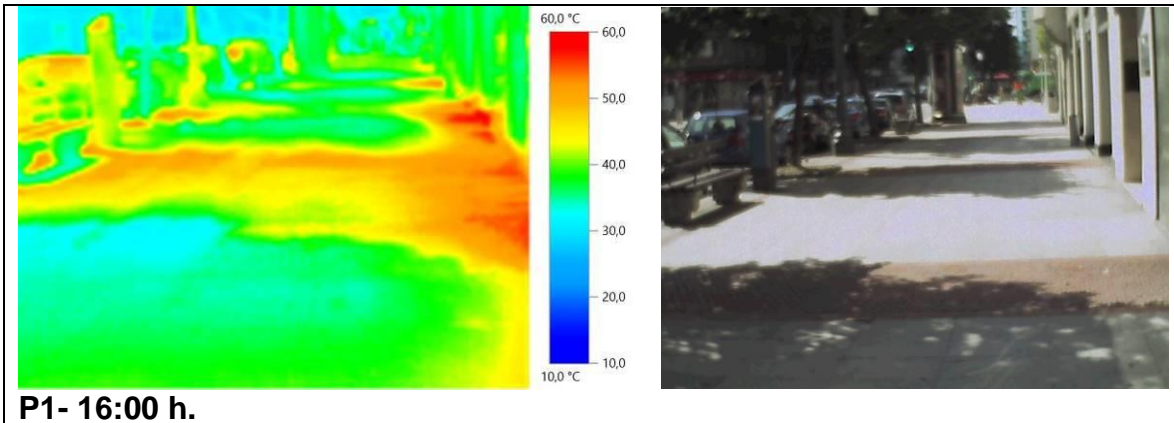
ANEXO II

IMÁGENES DE MEDICIONES DE TEMPERATURA DE PAVIMENTOS MEDIANTE CÁMARA TERMOGRÁFICA EN LAS CALLES GRAN VÍA Y DR. AREILZA DE BILBAO

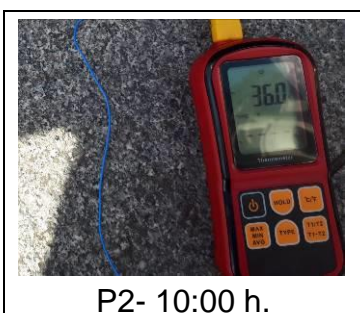
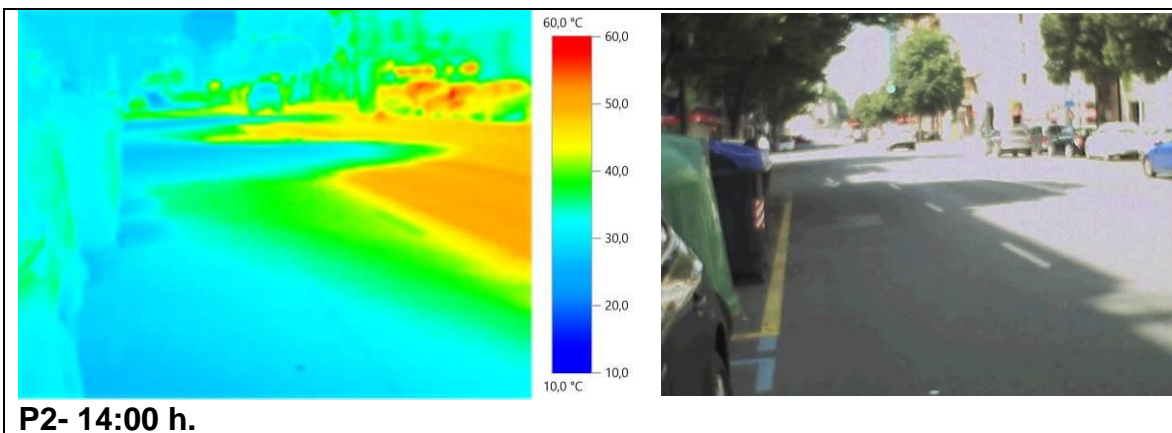
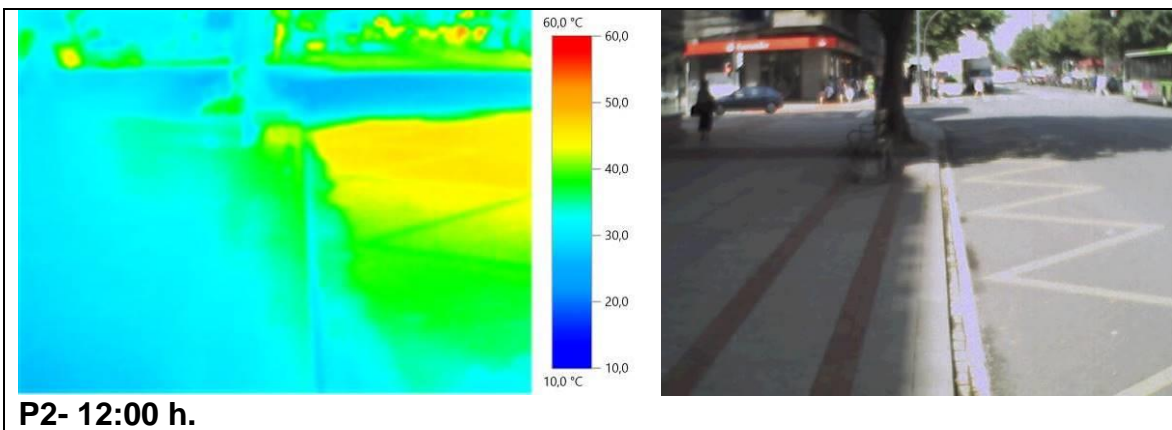
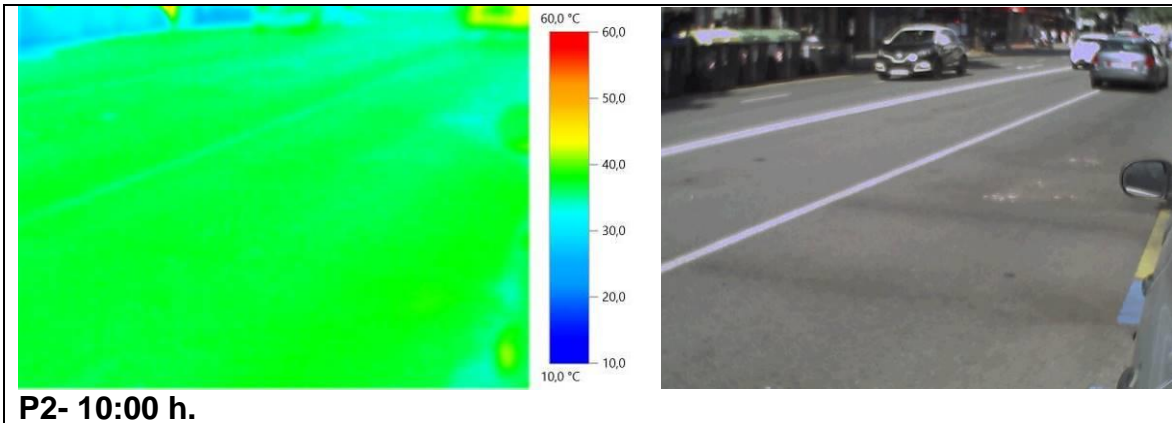
P1- c/ Gran Vía- Acera Norte | Pavimento: **Granito pulido** | Emisividad: 0,85



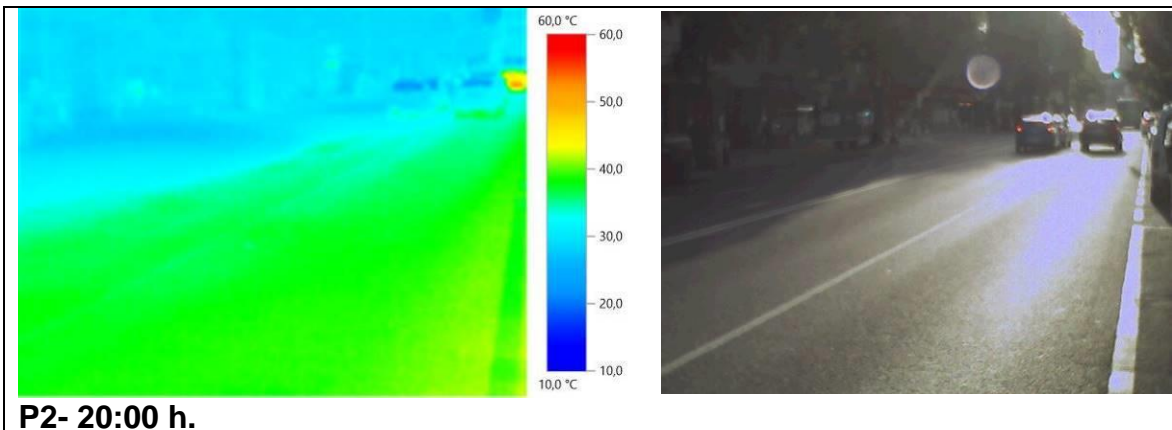
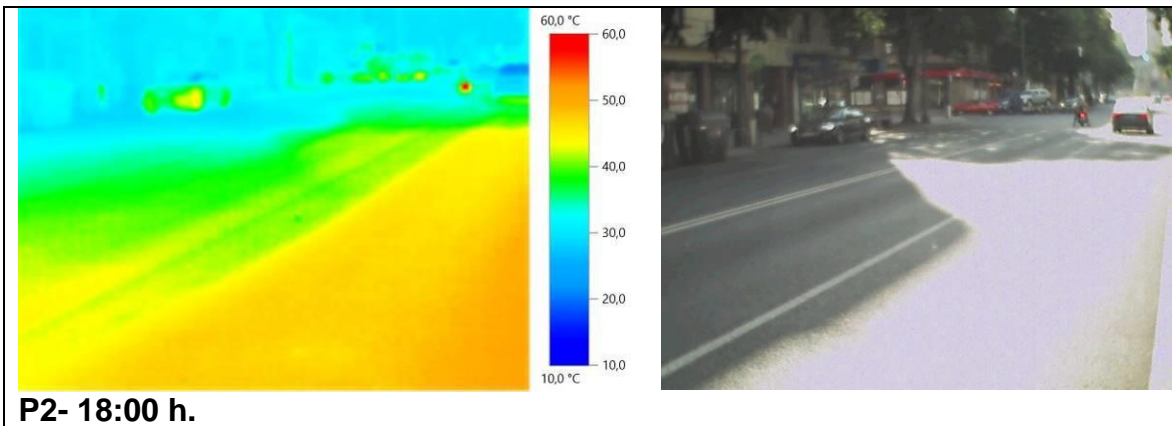
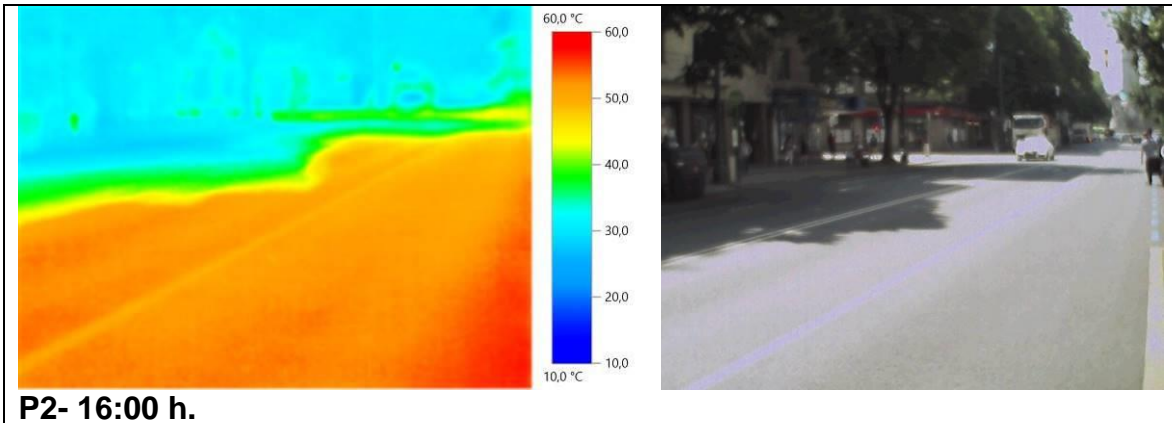
P1- c/ Gran Vía- Acera Norte Pavimento: **Granito pulido** Emisividad: 0,85



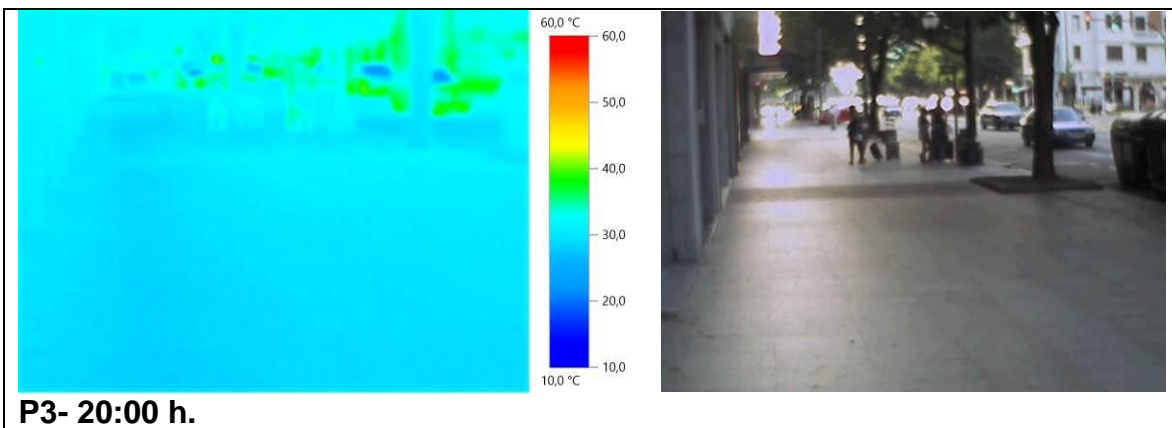
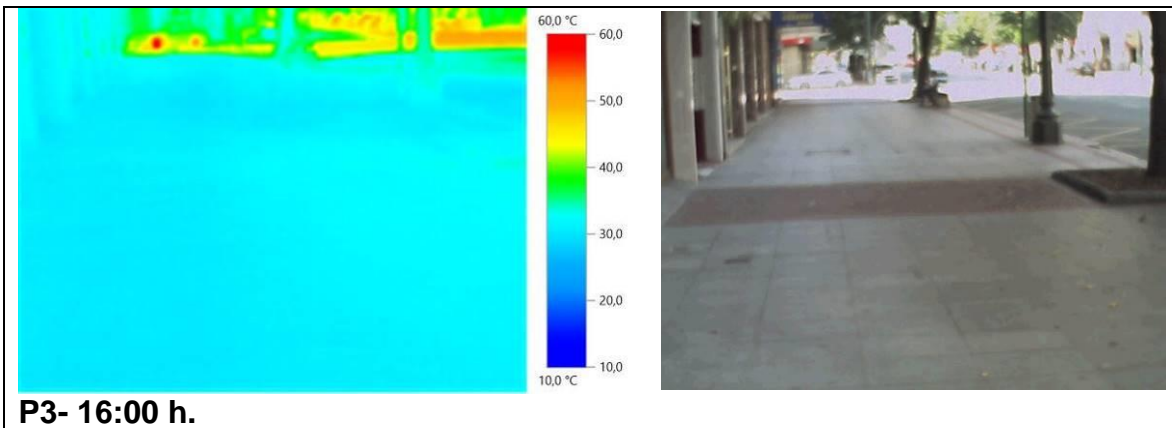
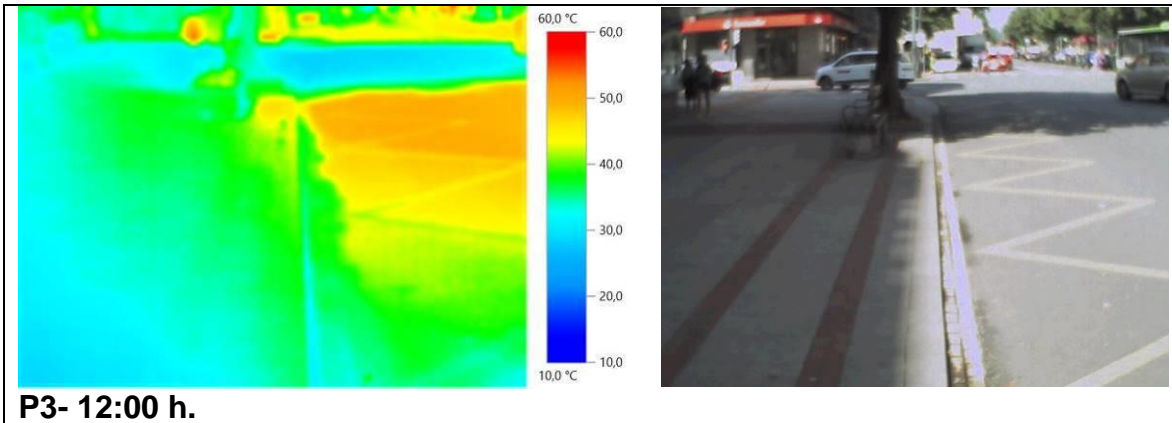
P2- c/ Gran Vía- Vial central **Pavimento: Asfalto negro** **Emisividad: 0,95**



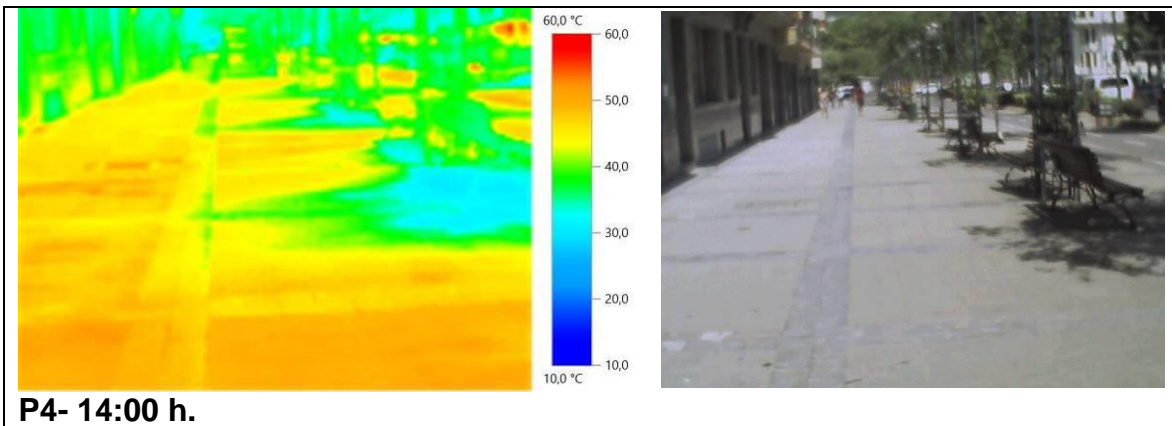
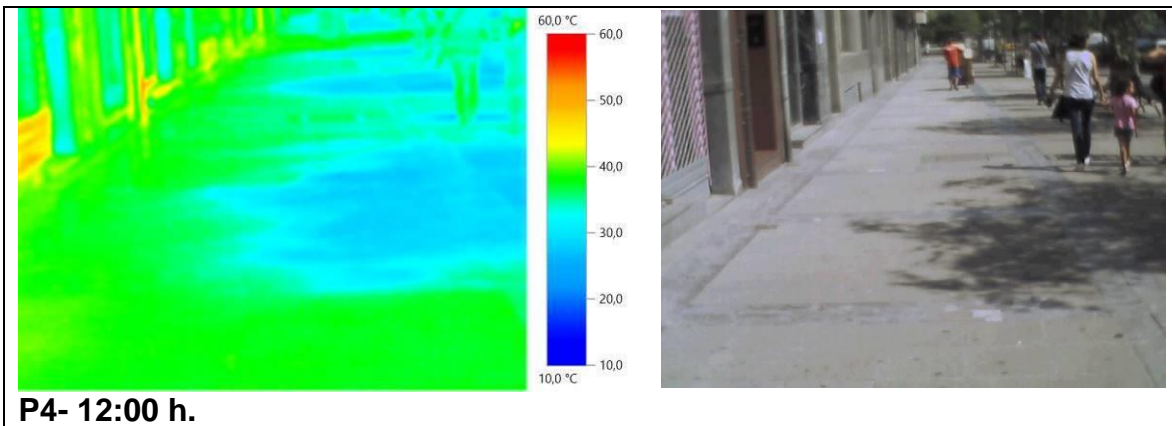
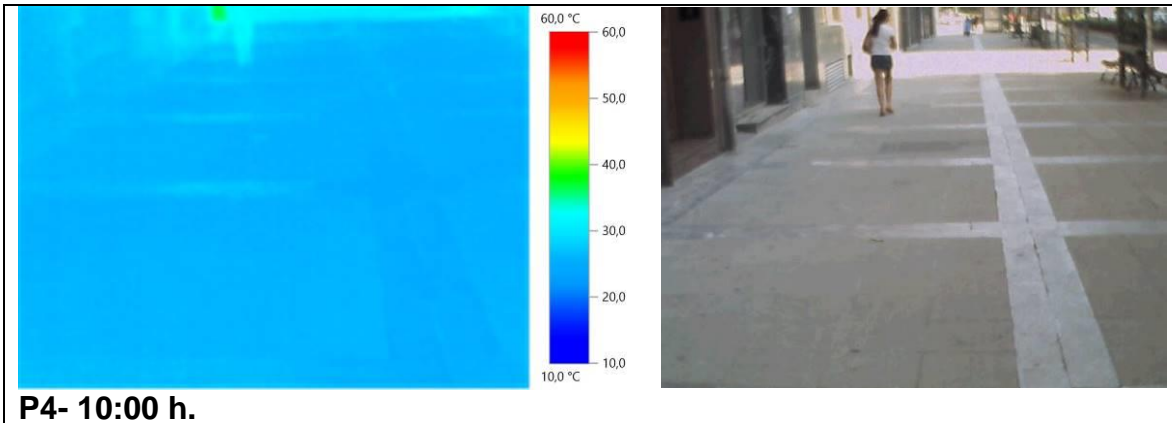
P2- c/ Gran Vía- Vial central **Pavimento: Asfalto negro** **Emisividad: 0,95**



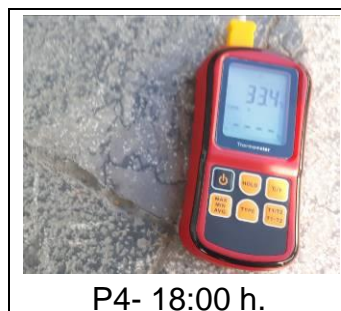
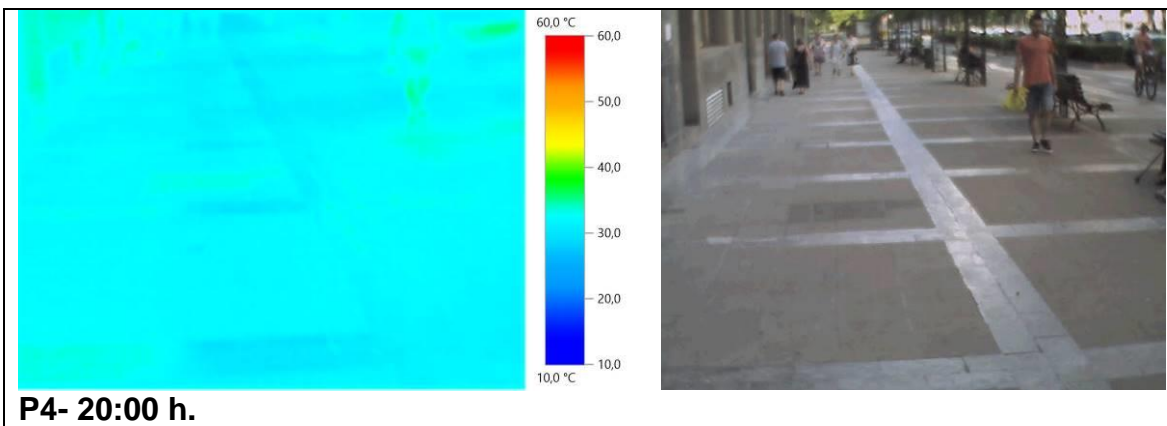
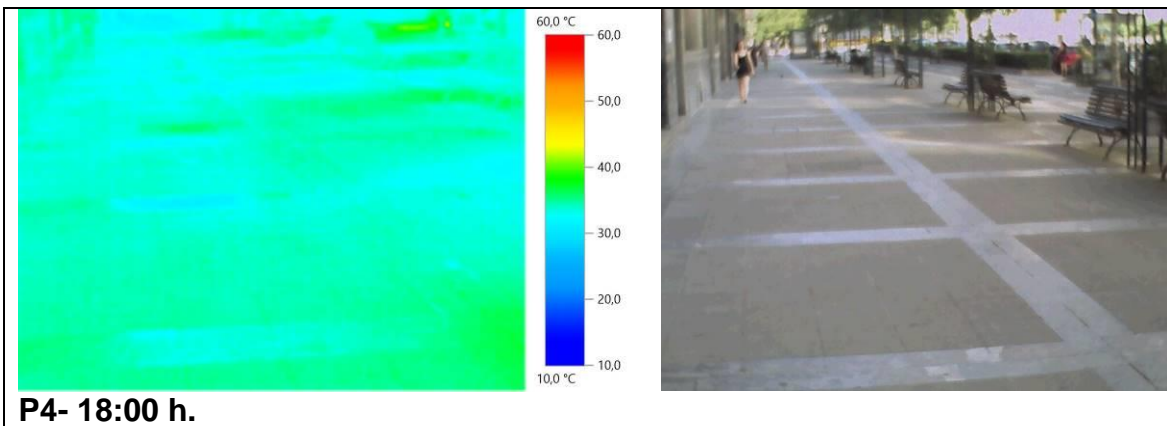
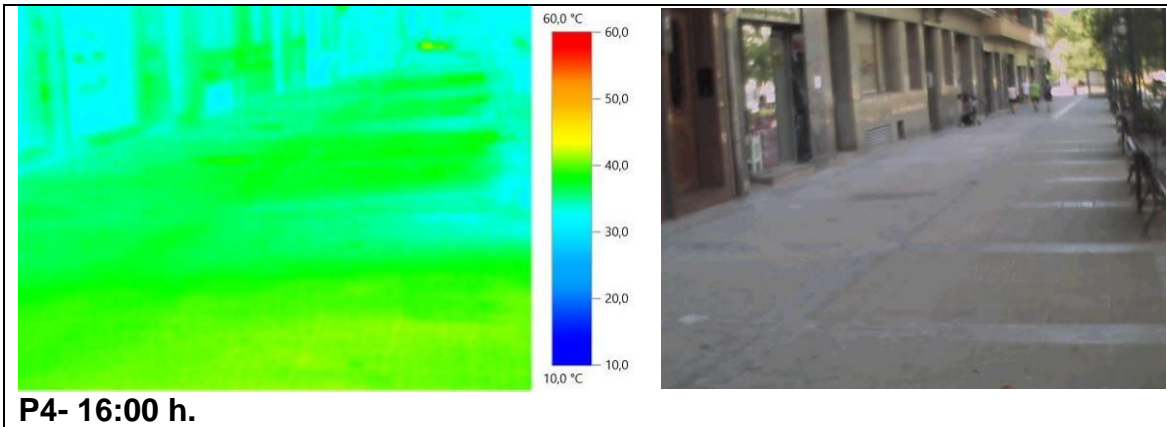
P3- c/ Gran Vía- Acera Sur | Pavimento: **Granito pulido** | Emisividad: 0,85



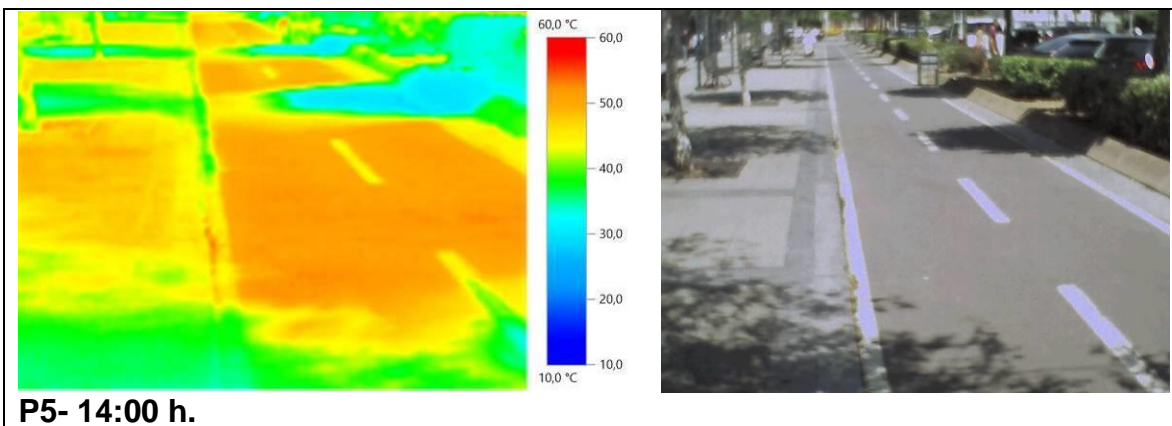
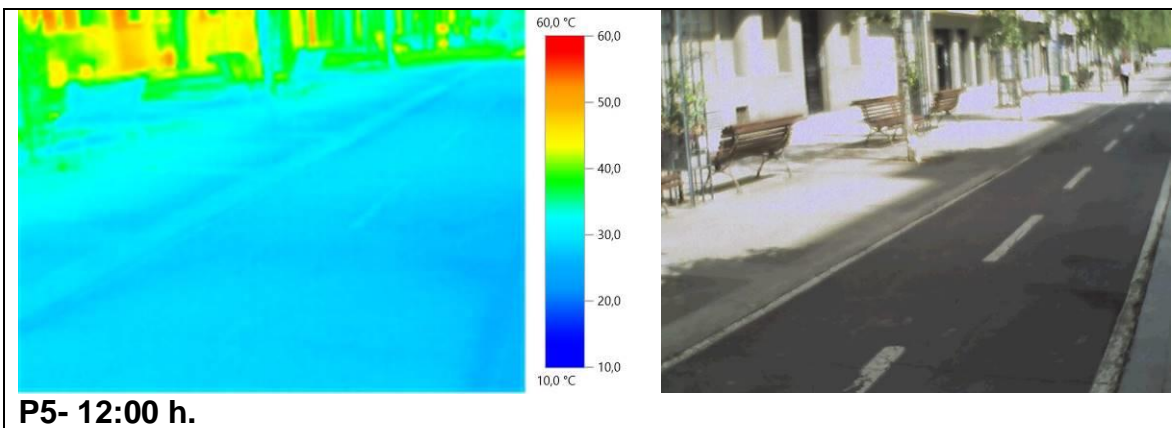
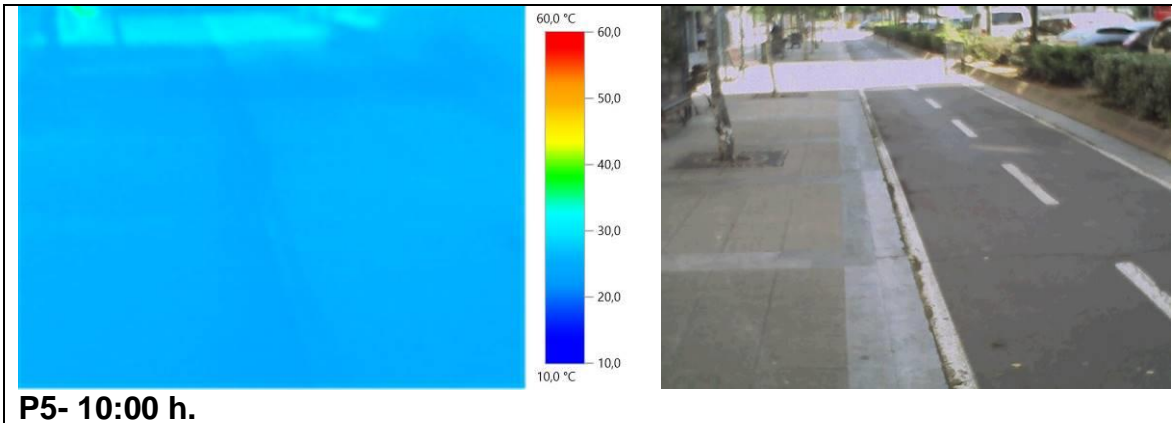
P4- Dr. Areilza- Acera Oeste Pavimento: Hormigón (Granicem) Emisiv.: 0,90



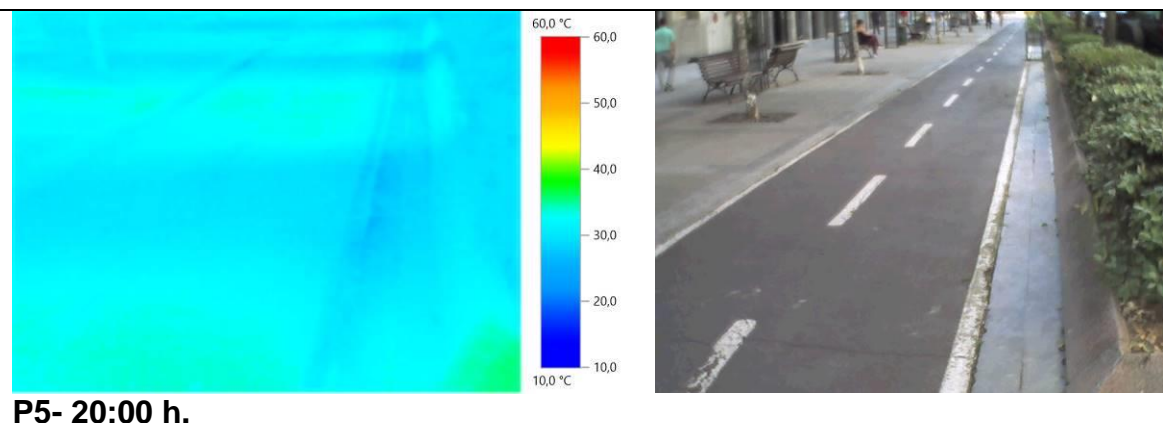
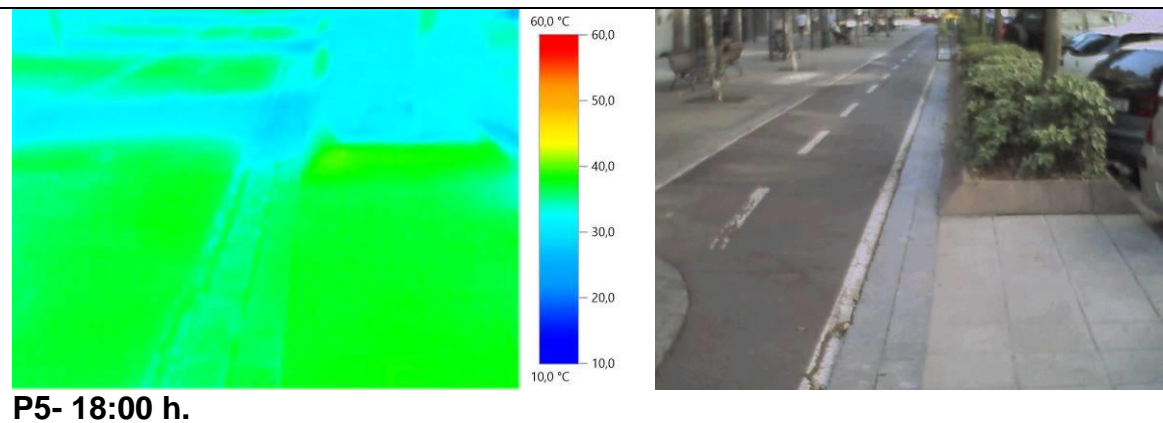
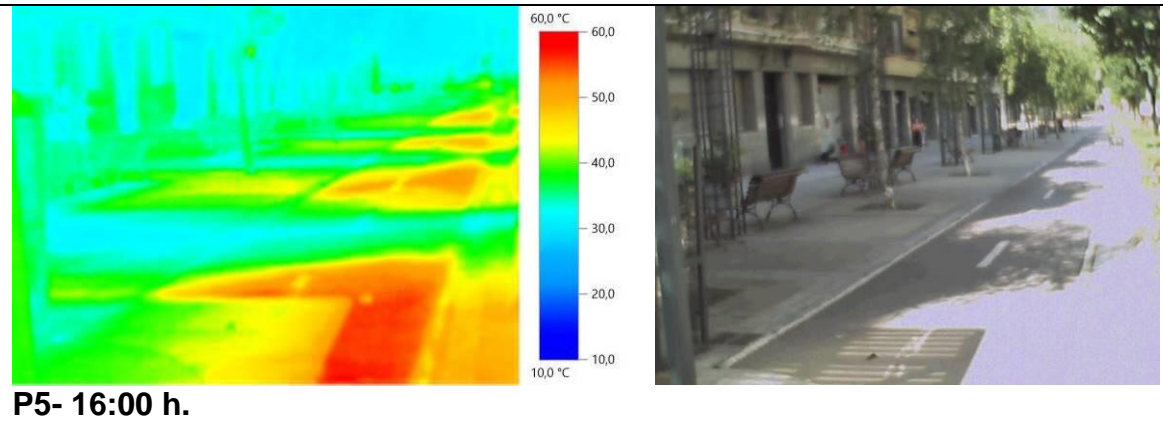
P4- Dr. Areilza- Acera Oeste Pavimento: Hormigón (Granicem) Emisiv.: 0,90



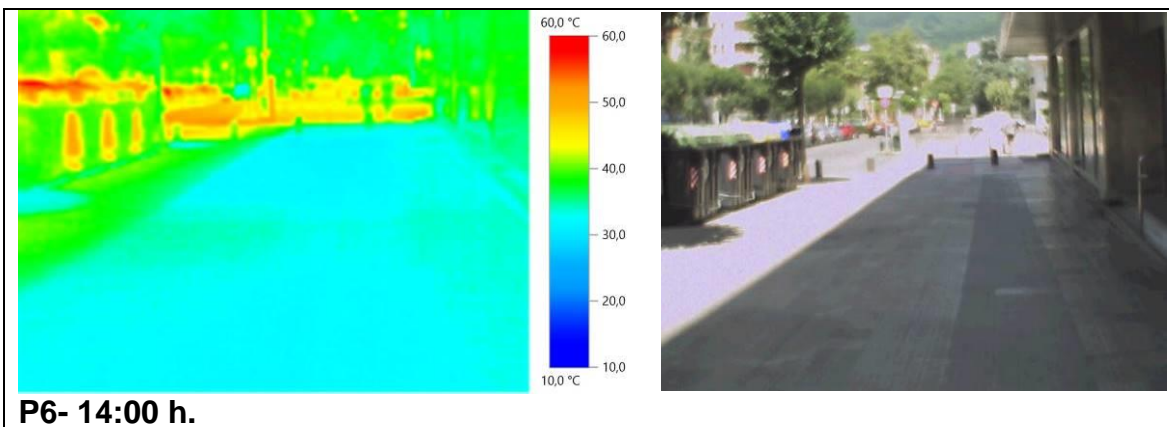
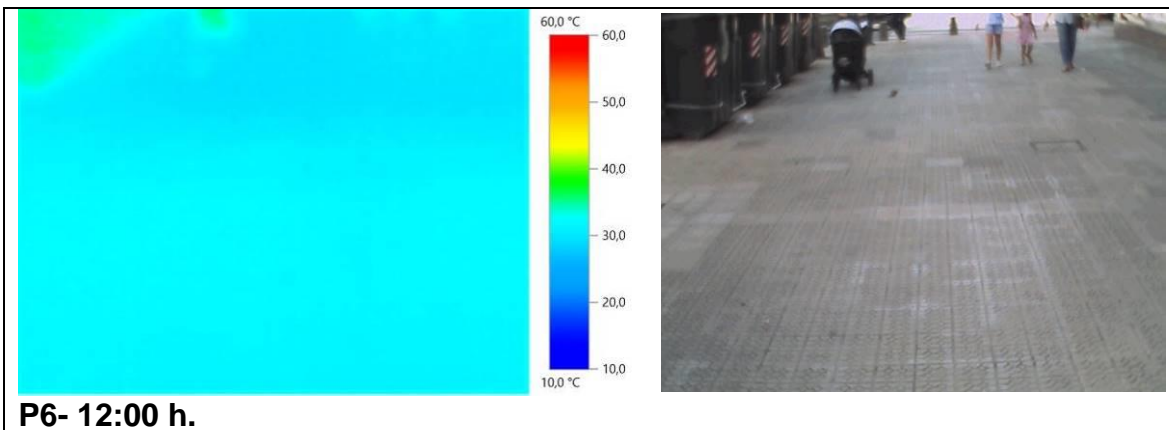
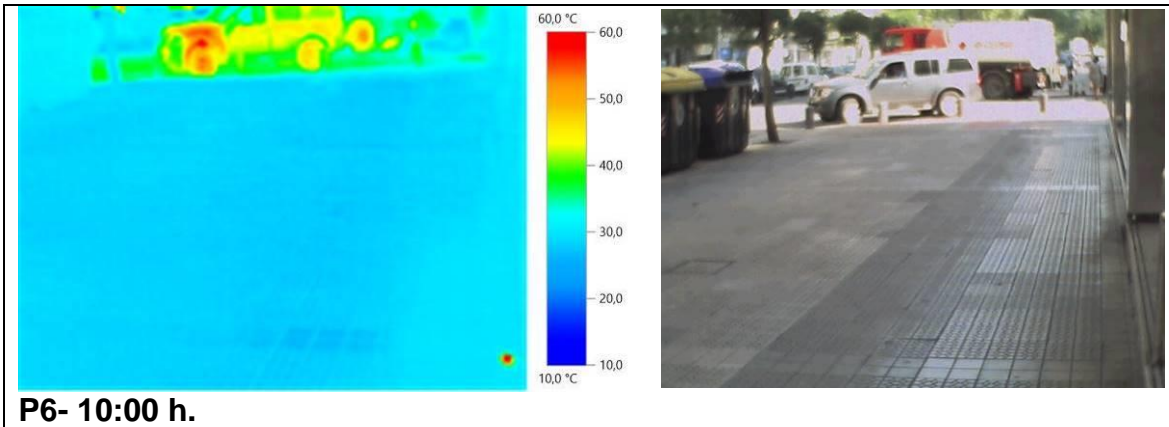
P5- Dr. Areilza- Carril bici central Pavimento: Asfalto rojo Emisividad: 0,95



P5- Dr. Areilza- Carril bici central Pavimento: Asfalto rojo Emisividad: 0,95



P6- Dr. Areilza- Acera Este | Pavimento: **Hormigón (Hidráulica)** | Emisiv.: 0,80



P6- Dr. Areilza- Acera Este Pavimento: Hormigón (Hidráulica) Emisiv.: 0,80

