



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Análisis de la sostenibilidad urbana en ocho Áreas Urbanas
Funcionales intermedias en Europa mediante índices
espaciales

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Arnal Gosp, Alexandre

Tutor/a: Gielen, Eric Madeleine Pierre

Cotutor/a: Palencia Jiménez, José Sergio

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Análisis de la sostenibilidad urbana en ocho Áreas Urbanas
Funcionales intermedias en Europa mediante índices
espaciales.

Presentado por

Arnal Gosp, Alexandre

Para la obtención del

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

Curso: 2024/2025

Fecha: 14/10/2024

Tutor: Gielen, Eric

Cotutor: Palencia Jiménez, José Sergio

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar esta oportunidad para expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de mi trabajo final de máster.

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores, Eric y Sergio, por su orientación experta, su apoyo continuo y su disponibilidad durante todo este tiempo. Sus conocimientos y comentarios han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También me gustaría agradecer a todas las personas que previamente han contribuido al campo de estudio con sus investigaciones, así como a todas las fuentes de información y bibliografía utilizadas en este trabajo.

A mi padre, Pep, y a mi madre, Lola, por el esfuerzo constante que han hecho para que pueda llegar hasta aquí. Sin ellos no sería quien soy.

Finalmente, y de forma especial, quiero agradecer a Clara y a Cristina por su apoyo incondicional y por formar parte del proyecto más importante de mi vida.

RESUMEN

En Europa, más del 70% de la población vive en áreas urbanas. Esta proporción se estima que aumentará significativamente en las próximas décadas, por lo que una planificación urbana sostenible es fundamental para el funcionamiento eficiente de las ciudades y el bienestar de sus ciudadanos. Para ello, es necesario el uso de herramientas de planificación urbana para facilitar los procesos de toma de decisión. El programa Copernicus ofrece la posibilidad de acceder a mapas de cobertura de suelo de alta resolución estandarizados de forma gratuita y abierta. La disponibilidad de información, junto al uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis y explotación de datos, permite el cálculo y monitoreo de índices espaciales e indicadores de sostenibilidad urbana. En este trabajo se realiza un análisis comparativo de ocho áreas urbanas funcionales intermedias en Europa, con la finalidad de estudiar desde una perspectiva espacial aspectos morfológicos urbanos y territoriales, como son la fragmentación urbana y la equidad espacial, y su influencia sobre la sostenibilidad urbana. Se pretende así comparar los modelos urbanos desarrollados en cada ciudad y su influencia en la sostenibilidad, y obtener así claves para la toma de decisión territorial y urbana.

PALABRAS CLAVE

Áreas Urbanas Funcionales, Atlas Urbano; Copernicus; fragmentación urbana; indicadores; SIG; sostenibilidad urbana; modelo de ciudad; usos del suelo

RESUM

A Europa, més del 70% de la població viu en àrees urbanes. Aquesta proporció s'estima que augmentarà significativament en les pròximes dècades, per la qual cosa una planificació urbana sostenible és fonamental per al funcionament eficient de les ciutats i el benestar dels seus ciutadans. Per això, és necessari l'ús d'eines de planificació urbana per facilitar els processos de presa de decisió. El programa Copernicus ofereix la possibilitat d'accedir a mapes de cobertura del sòl d'alta resolució estandarditzats de forma gratuïta i oberta. La disponibilitat d'informació, juntament amb l'ús dels Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) per a l'anàlisi i l'explotació de dades, permet el càlcul i el seguiment d'índexs espacials i indicadors de sostenibilitat urbana. En aquest treball es realitza una anàlisi comparativa de huit àrees urbanes funcionals intermèdies a Europa, amb la finalitat d'estudiar des d'una perspectiva espacial aspectes morfològics urbans i territorials, com són la fragmentació urbana i l'equitat espacial, i la seva influència sobre la sostenibilitat urbana. Es pretén així comparar els models urbans desenvolupats a cada ciutat i la seva influència en la sostenibilitat, i obtenir així claus per a la presa de decisió territorial i urbana.

PARAULES CLAU

Àrees Urbanes Funcionals, Atlas Urbà; Copernicus; fragmentació urbana; indicadors; SIG; sostenibilitat urbana; model de ciutat; usos del sòl

ABSTRACT

In Europe, over 70% of the population live in urban areas. This proportion is estimated to increase significantly in the coming decades, which is why sustainable urban planning is crucial for the efficient functioning of cities and the well-being of their citizens. To achieve this, the use of urban planning tools is necessary to facilitate decision-making processes. The Copernicus Programme offers the possibility to access free and open high-resolution standardized land cover maps. The availability of this information, together with the use of Geographic Information Systems (GIS) for data analysis and exploitation, allows for the calculation and monitoring of spatial-based urban sustainability indicators and indexes. In this study, a comparative analysis of eight intermediate functional urban areas in Europe is conducted, with the aim of studying urban and territorial morphological aspects from a spatial perspective, such as urban fragmentation and spatial equity, and their influence on urban sustainability. The objective is to compare the urban models developed in each city and their impact on sustainability, and to obtain insights for territorial and urban decision-making.

KEYWORDS

Functional Urban Areas; Urban Atlas; Copernicus; urban sprawl; indicators; GIS; urban sustainability; urban city model; land use

ÍNDICE

ÍNDICE DE ABREVIATURAS	10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3. ALCANCE	18
1.4. ESTRUCTURA	18
1.5. METODOLOGÍA.....	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. URBANISMO Y SOSTENIBILIDAD URBANA	21
2.2. SOSTENIBILIDAD ESPACIAL	22
2.3. FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE	22
2.4. HERRAMIENTA SIG: INDIFRAG	25
2.4.1. NIVELES DE MEDIDAS.....	25
2.4.1.1. NIVEL DE OBJETO.....	25
2.4.1.2. NIVEL DE CLASE	26
2.4.1.3. NIVEL DE SÚPER-OBJETO	26
2.4.2. GRUPOS.....	27
2.4.2.1. ÁREA Y PERÍMETRO	27
2.4.2.2. FORMA	27
2.4.2.3. AGREGACIÓN.....	28
2.4.2.4. DIVERSIDAD	28
2.5. EQUIDAD ESPACIAL: ESPACIOS VERDES	29
2.6. DEFINICIÓN DE ÁREA URBANA FUNCIONAL.....	30
CAPÍTULO 3. DATOS DE PARTIDA.....	33
3.1. EL PROGRAMA ESPACIAL DE LA UNIÓN EUROPEA	33
3.2. EL PROGRAMA COPERNICUS	34
3.3. SERVICIO DE VIGILANCIA TERRESTRE DE COPERNICUS	38
3.4. MAPA DE LOS USOS DEL SUELO: ATLAS URBANO	40
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	43
4.1. INTRODUCCIÓN	43
4.2. ÁREA DE ESTUDIO	46
4.3. DESCARGA DE DATOS	47
4.4. RECLASIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO.....	48
4.5. AGREGACIÓN DE POLÍGONOS (GENERALIZACIÓN)	52
4.6. SELECCIÓN DE LOS ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN URBANA.....	54
4.6.1. ÁREA (AREA).....	54
4.6.2. PERÍMETRO (PERIM)	55
4.6.3. DENSIDAD DE CLASE (DC).....	55
4.6.4. TAMAÑO MEDIO DEL OBJETO (TM).....	55
4.6.5. DENSIDAD DE BORDE (DB).....	56
4.6.6. RATIO MEDIO PERÍMETRO-ÁREA (RMPA).....	56

4.6.7. ÍNDICE DE FORMA (IF).....	57
4.6.8. DIMENSIÓN FRACTAL (DF)	57
4.6.9. NÚMERO DE OBJETOS (NOB)	57
4.6.10. DENSIDAD DE OBJETO (DO)	58
4.6.11. DISTANCIA EUCLÍDEA MEDIA DEL VECINO MÁS PRÓXIMO (DEM).....	58
4.6.12. COHESIÓN (COHE).....	59
4.6.13. COMPACIDAD DE LA CLASE (C)	59
4.6.14. DIVERSIDAD DE SHANNON (DSHAN).....	59
4.6.15. DIVERSIDAD DE SIMPSON (USHAN)	60
4.6.16. ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN FUNCIONAL RELATIVA (IFFR)	61
4.6.17. ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN FUNCIONAL ABSOLUTA (IFFA).....	61
4.7. CONFIGURACIÓN Y USO DE LA HERRAMIENTA INDIFRAG PARA EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN URBANA.....	62
4.8. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE EQUIDAD ESPACIAL	67
4.8.1. ESPACIOS VERDES POR CÁPITA	67
4.8.2. PROXIMIDAD DE LA POBLACIÓN A ESPACIOS VERDES.....	70
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
5.1. ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN	73
5.1.1. ÍNDICES NIVEL CLASE.....	74
5.1.1.1. NÚMERO DE OBJETOS (NOB), TAMAÑO MEDIO DEL OBJETO (TM) Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LOS OBJETOS (CV)	74
5.1.1.2. DENSIDAD DE OBJETO (DO).....	81
5.1.1.3. DENSIDAD DE BORDE (DB)	82
5.1.1.4. DISTANCIA EUCLÍDEA MEDIA DEL VECINO MÁS PRÓXIMO (DEMVP)	84
5.1.1.5. ÍNDICE DE FORMA (IF)	86
5.1.1.6. RATIO MEDIO PERÍMETRO-ÁREA (RMPA)	88
5.1.1.7. DENSIDAD DE CLASE (DC), COHESIÓN (COHE) Y COMPACIDAD DE LA CLASE (C)	93
5.1.2. ÍNDICES NIVEL SÚPER-OBJETO (AUF)	96
5.1.2.1. DIMENSIÓN FRACTAL (DF).....	97
5.1.2.2. DIVERSIDAD DE SHANNON (DSHAN) Y UNIFORMIDAD DE SHANNON O ENTROPÍA (USHAN)	97
5.1.2.3. ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN FUNCIONAL RELATIVA (IFFR)	98
5.1.2.4. ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN FUNCIONAL ABSOLUTA (IFFA) Y COHESIÓN (COHE)	98
5.2. ÍNDICES DE EQUIDAD ESPACIAL	99
5.2.1. ESPACIOS VERDES POR CÁPITA	99
5.2.2. PROXIMIDAD DE LA POBLACIÓN A ESPACIOS VERDES.....	100
5.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ÁREAS URBANAS FUNCIONALES.....	105
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	110
ANEXO I. RESUMEN DE LOS ÍNDICES ESPACIALES UTILIZADOS.	112
ANEXO II. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030	118
REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proporción de población urbana y rural en las regiones geográficas.....	15
Figura 2. Ejemplo de objetos con su identificador. En este caso se trata de parcelas catastrales, agrupadas en manzanas	26
Figura 3. Ejemplo de objetos clasificados	26
Figura 4. Ejemplo de súper-objetos que contienen a los objetos clasificados	27
Figura 5. Croquis del grupo Área y Perímetro.....	27
Figura 6. Croquis del grupo Forma.....	28
Figura 7. Croquis del grupo Agregación.....	28
Figura 8. Croquis del grupo Diversidad.....	28
Figura 9. Grado de urbanización para las LAU2.....	31
Figura 10. Centro urbano, municipio urbano (city), área de desplazamiento (commuting) y AUF de Graz, Austria.....	32
Figura 11. Actores del Programa Copernicus.....	34
Figura 12. Servicios Copernicus	35
Figura 13. Estructura del programa Copernicus.....	38
Figura 14. Ejemplo de producto del servicio de vigilancia terrestre.....	38
Figura 15. Ejemplo del “look & feel” del producto final Urban Atlas en la ciudad de Bruselas.....	40
Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología general utilizada.....	45
Figura 17. Área de Estudio	47
Figura 18. Descarga de datos del Urban Atlas.....	47
Figura 19. Mapa de usos del suelo para las ocho AUF.....	51
Figura 20. Distribución "Urban Fabric" para las ocho AUF	52
Figura 21. Mapas del centro de Valencia antes y después del proceso de agregación de polígonos.....	53
Figura 22. Esquema de la herramienta IndiFrag v2.1.....	62
Figura 23. Comandos para comprobar que la instalación es correcta.....	63
Figura 24. Ejemplo de capa con los objetos y su tabla asociada.....	64

Figura 25. Ejemplo de polígono residual y de solape entre polígonos.	64
Figura 26. Ejecutar IndiFrag desde Catalog.....	65
Figura 27. Aspecto de la ventana “Calculate FI” del módulo del análisis de fragmentación.....	66
Figura 28. Herramienta ‘Select by Attributes’ de ArcMap.....	68
Figura 29. Herramienta ‘Eliminate’ de ArcMap.	69
Figura 30. Cálculo de 'Statistics' de ArcMap.	69
Figura 31. Aplicación de la herramienta ‘Zona de influencia’ de 300 m en los espacios verdes mayores de 5,000 m en el AUF de Valencia.	71
Figura 32. Extracto de las zonas urbanas (C1, C2, C3) dentro de la zona de influencia de 300 m de los espacios verdes (verde) y de las zonas urbanas (C1, C2, C3) fuera de la zona de influencia de 300 m de los espacios verdes (negro) para el AUF de Valencia.....	72
Figura 33. Resultados en la tabla de atributos (arriba) y en el fichero de texto (abajo).	74
Figura 34. Índice nivel clase Nob (nº).	75
Figura 35. Índice nivel clase TM (m ²).	76
Figura 36. Arriba Thessaloniki con un valor TM (m ²) C1 mayor, abajo Praha con un valor TM (m ²) C1 menor.....	78
Figura 37. Clasificación Valencia (arriba) y resultado TM (m ²) (abajo).....	80
Figura 38. Clasificación Dublin (arriba) y resultado DB (m/m ²) (abajo).....	84
Figura 39. Índice nivel clase DEMvp (m).	86
Figura 40. Clasificación Krakow (arriba) y resultado IF (abajo).....	88
Figura 41. Clasificación de Praha y Helsinki, y su resultado RMPA.....	93
Figura 42. Índice nivel clase DC (%).....	94
Figura 43. Métrica de clase COHE.	95
Figura 44. Métrica de súper-objeto DHAN y USHAN.	98
Figura 45. Suelo urbano con acceso a zona verde (verde) con respecto al total de suelo urbano (C1 rojo, C2 naranja y C3 amarillo).....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del Urban Atlas	41
Tabla 2. Clases del Urban Atlas	42
Tabla 3. Área de Estudio	46
Tabla 4. Clasificación de usos de suelo para la estimación de métricas espaciales	49
Tabla 5. Población, área, superficie artificial, densidad de población y distribución "Urban Fabric" para las ocho AUF.....	52
Tabla 6. Índices de Fragmentación utilizados.	54
Tabla 7. Resultados índice espacios verdes por cápita.	69
Tabla 8. Usos del suelo definitivos en la clasificación de AUF.	73
Tabla 9. Métricas Nob (n°) para las clases seleccionadas.....	75
Tabla 10. Métricas TM (m^2) para las clases seleccionadas.	75
Tabla 11. Métricas CV (%) para las clases seleccionadas.....	76
Tabla 12. Métricas DO (n°/km^2) para las clases seleccionadas.	81
Tabla 13. Métricas DB (m/m^2) para las clases seleccionadas.	82
Tabla 14. Métricas DEMvp (m) para las clases seleccionadas.	85
Tabla 15. Métricas IF (adimensional) para las clases seleccionadas.....	86
Tabla 16. Métricas RMPA (adimensional) para las clases seleccionadas.....	89
Tabla 17. Métrica DC (%) para las clases seleccionadas.	94
Tabla 18. Métrica COHE (adimensional) para las clases seleccionadas.....	95
Tabla 19. Métrica C (adimensional) para las clases seleccionadas.....	96
Tabla 20. Índices Nivel Súper-Objeto para las 8 AUF. Valores adimensionales.....	96
Tabla 21. Resultados indicador espacios verdes por habitante.....	99
Tabla 22. Resultados índices de proximidad de población a espacios verdes.....	100
Tabla 23. Resultados finales del Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE).	106
Tabla 24. Resumen de los índices espaciales utilizados.	112
Tabla 25. Resumen de los índices espaciales utilizados normalizados.....	115

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
API	Interfaces de programación de aplicaciones
AUF	Área Urbana Funcional
C	Compacidad de la clase
C1	<i>Continuous Urban Fabric (> 80%)</i>
C2	<i>Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)</i>
C3	<i>Discontinuous Urban Fabric (< 50%)</i>
C4	<i>Industrial, commercial, public, military and private units</i>
C5	<i>Transport infrastructure</i>
C6	<i>Mine/Dump sites, Construction/Land without use</i>
C7	<i>Green areas, sports and leisure facilities</i>
C8	<i>Agriculture, Forest, Water</i>
CODA	Acceso a los datos de Copernicus online
COHE	Cohesión
CSCDA	Acceso a los datos del componente espacial de Copernicus
DB	Densidad de Borde
DC	Densidad de Clase
DEM	Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo
DF	Dimensión Fractal
DG DEFIS	Dirección General de Industria de Defensa y Espacio
DG GROW	Dirección General de Mercado Interior, Industria, Emprendimiento y Pymes de la Comisión Europea
DG REGIO	Dirección General de Política Urbana y Regional de la Comisión Europea
DIAS	Servicio de acceso a los datos y la información

DO	Densidad de Objeto
DSHAN	Diversidad de Shannon
EC	<i>European Commission</i> Comisión Europea
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo
EEA	<i>European Environment Agency</i> Agencia Medioambiental Europea
EFTA	<i>European Free Trade Association</i>
EMSA	<i>European Maritime Safety Agency</i> Agencia Europea de Seguridad Marítima
ESA	<i>European Space Agency</i> Agencia Espacial Europea
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
EUROSTAT	Oficina Europea de Estadística de la Comisión Europea
FAO	<i>Food and Agriculture Organisation of the United Nations</i>
FRONTEX	<i>European Agency for the Management of Operational Cooperation at the External Borders of the Member States of the European Union</i> Agencia Europea para la Gestión de la Cooperación Operativa en las Fronteras Exteriores de los Estados miembros de la Unión Europea
IF	Índice de Forma
IFFA	Índice de Fragmentación Funcional Absoluta
IFFR	Índice de Fragmentación Funcional Relativa
JRC	<i>Joint Research Centre</i> Centro Común de Investigación
LAU	<i>Local Administrative Units</i>
LUZ	<i>Large Urban Zone</i>
NAU	Nueva Agenda Urbana
NO	Número de Objetos
Perim	Perímetro
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

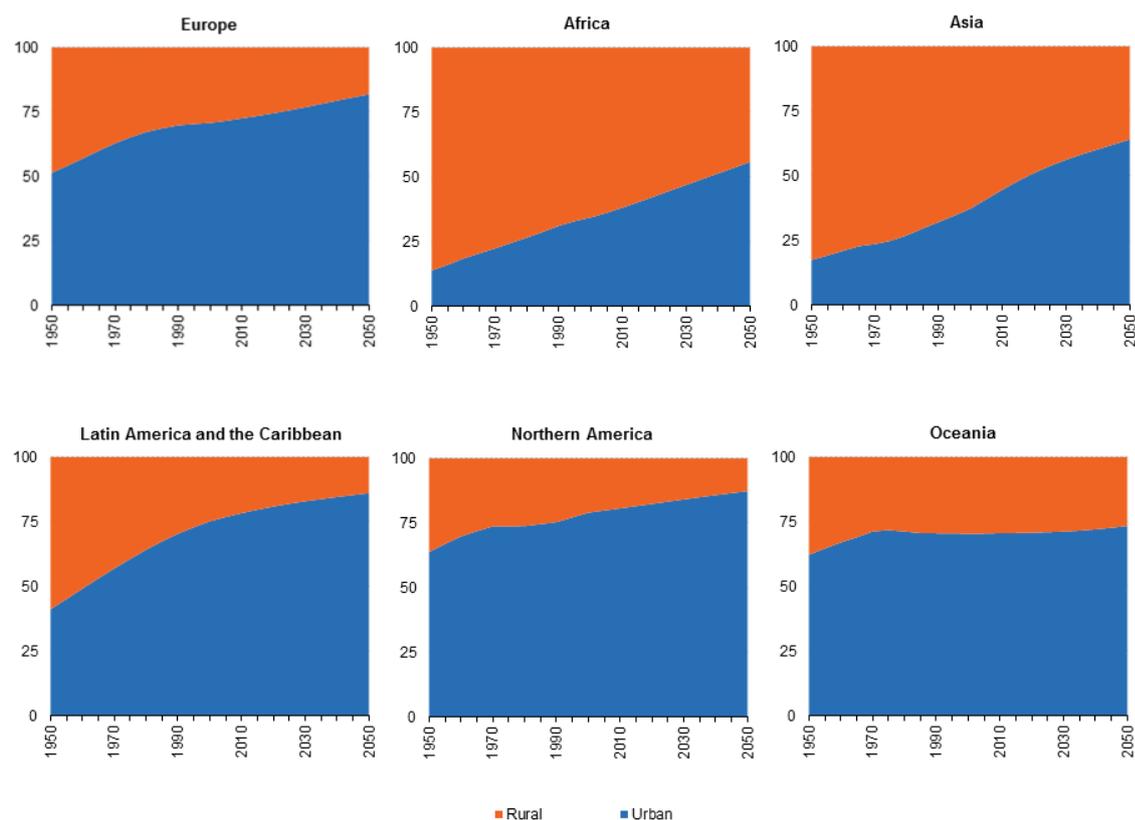
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de Naciones Unidas
RFSC	<i>European Reference Framework for Sustainable Cities</i> Marco Europeo de Referencia para la Ciudad Sostenible
RMPA	Ratio Medio Perímetro-Área
SatCen	<i>European Union Satellite Centre</i> Centro de Satélites de la Unión Europea
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TFM	Trabajo Final de Master
TM	Tamaño Medio del Objeto
USHAN	Diversidad de Simpson

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el 55 % de las personas en el mundo vive en ciudades. Según un nuevo informe de la ONU *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, se estima que esta proporción aumentará hasta un 73 % de cara a 2050 –desde 55 millones en 1950 a 4200 millones en 2018–, por lo que el desarrollo sostenible dependerá cada vez más de que se gestione de forma apropiada el crecimiento urbano.

En Europa es uno de los continentes más urbanizados del mundo. La población urbana representa el 74% de la población total. Actualmente junto a Europa, las áreas más urbanizadas son: América del Norte con un 82 % de población urbana; América Latina y el Caribe con un 81 % y Oceanía con un 68 %. Pero Asia, a pesar de su bajo nivel de urbanización (cerca del 50 %), acoge al 54 % de la población urbana mundial, seguida de Europa y África con un 13 % cada una. África, en contraste, predomina la población rural, con un 43 % de sus habitantes viviendo en las ciudades (Figura 1).



(*) United Nations data are based on national definitions; as such there may be a discrepancy with respect to the Eurostat data used elsewhere in this publication.

Figura 1. Proporción de población urbana y rural en las regiones geográficas.

Fuente: Naciones Unidas.

La urbanización es un proceso que tiene que ver con los tres pilares del desarrollo sostenible: el económico, el social y el ambiental. Sin embargo, clasificar municipios, regiones o áreas en general

como urbanas es una tarea complicada, ya que no existe una definición universalmente aceptada entre los especialistas sobre lo que debe entenderse por ciudad y hasta dónde se extienden los límites de lo urbano (Goerlich, Reig, Albert, & Robledo, 2020).

Estas dificultades se agudizan todavía más cuando las áreas urbanas desbordan los límites administrativos más próximos que sirven habitualmente de unidad estadística de referencia, los municipios, y forman grandes áreas urbanizadas. En este caso, la realidad administrativa deja de ser operativa para el estudio de las aglomeraciones de población (Goerlich & Cantarino, Zonas de morfología urbana: coberturas del suelo y demografía, 2013).

Las ciudades son, normalmente, espacios demasiado reducidos para integrar las funciones que ejercen en el ámbito económico. Por esta razón, la metodología de la DG REGIO y la OCDE (Cities in europe, the new oecd ec definition by The Atlantic Greenway Project - Issuu, 2015) distingue de forma nítida lo que podemos considerar como ciudad de su área urbana de influencia —*hinterland*—, de forma que obtengamos un área integrada en términos de los mercados de trabajo y consumo. La concepción de área urbana que se ha abierto paso en el contexto europeo es pues funcional. Por esta razón se las conoce con el nombre de áreas urbanas funcionales (AUF). Un AUF debe ser un espacio que englobe las principales funciones económicas que ejerce la ciudad, frente a las concepciones morfológicas ligadas a la huella del hombre sobre el territorio, y que también han sido exploradas por las instituciones europeas en el contexto de las bases de datos de usos del suelo (Goerlich, Reig, Albert, & Robledo, 2020).

El presente estudio pretende contribuir al análisis de los procesos de urbanización en Europa adoptando un enfoque basado en las características morfológicas de las AUFs y no partiendo de los datos demográficos. Los procesos de urbanización conllevan transformaciones radicales del entorno natural, y estas pueden ser examinadas a partir de las recientes bases de datos de coberturas del suelo (Goerlich & Cantarino, Zonas de morfología urbana: coberturas del suelo y demografía, 2013).

En el presente estudio, se propone utilizar las características morfológicas de las AUFs, tomando en cuenta las coberturas de suelo que están vinculadas a la intervención del ser humano en el territorio. Más concretamente, el estudio se adentra en dos aspectos morfológicos urbanos y territoriales: la fragmentación y la equidad espacial, y su influencia en la sostenibilidad urbana. Estos dos aspectos son cruciales para que la planificación urbana contribuya a la creación de áreas urbanas más compactas, conectadas y equitativas que mejoren la calidad de vida de las personas y reduzcan el impacto ambiental.

La cuantificación de las características espaciales de los patrones de distribución de parches en un espacio analizado puede lograrse mediante el uso de métricas descriptivas morfológicas, ya sea en suelos naturales o urbanos. Estas métricas proporcionan una herramienta valiosa para medir las características espaciales de los patrones de distribución de parches. Es fundamental la capacidad de cuantificar la estructura morfológica en diferentes categorías de suelo para el estudio de un entorno y sus cambios. La comprensión de la estructura espacial de un suelo o un ambiente urbano es clave para el análisis de la dinámica de los procesos y para la toma de decisiones en el manejo de recursos naturales y en la planificación urbana.

Como punto de partida del estudio, cabe destacar el uso de la información proveniente del programa europeo de observación de la Tierra: Copernicus. Copernicus desempeña un papel fundamental para garantizar un acceso independiente de Europa a una información estratégica geoespacial en la que se

apoyan muchas políticas de la Unión Europea, nacionales y regionales. Además, el volumen, coherencia, continuidad, fiabilidad, gestión y calidad de los datos y de la información facilitados a través de una política de acceso gratuito, pleno y abierto constituyen elementos muy exitosos de la implantación de Copernicus, que a su vez permiten tanto a los organismos públicos y a las empresas privadas integrar la información de Copernicus en sus servicios y procesos de toma de decisión.

Para la gestión de toda la información geoespacial, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) resultan especialmente adecuados para la realización de estudios aplicados en el campo de la Planificación Territorial y el Urbanismo. En efecto, los SIG pueden aportar, por su capacidad de análisis y manejo de datos, un conocimiento exhaustivo de la ciudad y su funcionamiento. Una información valiosa en la planificación y gestión de los procesos de transformación urbana (García, Valls, & Moix, 2011).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este TFM consiste en realizar un análisis comparativo de ocho AUFs en Europa, mediante la identificación y caracterización de **indicadores de sostenibilidad urbana a través de índices espaciales**, centrándose en aspectos como la fragmentación urbana y la equidad espacial, y su influencia sobre la sostenibilidad urbana. Se pretende así comparar los modelos urbanos desarrollados en cada ciudad y su influencia en la sostenibilidad, y obtener así claves para la toma de decisión territorial y urbana. Es importante destacar que tanto la fragmentación urbana como la equidad espacial son aspectos importantes dentro del Marco Europeo de Referencia para la Ciudad Sostenible, así como en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (Naciones Unidas, n.d.). En esta línea, se ha tomado en consideración la dimensión espacial para desarrollar un Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE) como herramienta para una planificación territorial y urbana más sostenible (p.ej. idea de "ciudad compacta") y que asegure la equidad urbana espacial (p.ej. acceso a espacios verdes). Para la generación de las métricas espaciales de sostenibilidad urbana, se ha empleado la información proporcionada por el Atlas Urbano del programa Copernicus.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Comprender desde una perspectiva espacial aspectos relacionados con la sostenibilidad urbana, como son la fragmentación de los usos del suelo y la equidad espacial.
- Revisar los índices espaciales de sostenibilidad urbana (fragmentación urbana y equidad espacial) más utilizados en el estudio del análisis espacial de los usos del suelo.
- Seleccionar los índices espaciales que se aplicarán en el área de estudio.
- Analizar el uso de la herramienta IndiFrag para el cálculo automático de los índices de fragmentación del paisaje.
- Evaluar el valor añadido del programa Copernicus en distintos ámbitos de aplicación, en especial a los relacionados con la planificación territorial y el urbanismo.

- Analizar la información generada por el servicio de vigilancia terrestre de Copernicus como punto de partida para la generación de índices espaciales de sostenibilidad urbana.
- Construir una metodología para la utilización del atlas urbano del programa Copernicus en la estimación de índices espaciales de sostenibilidad urbana.
- Elaborar una descripción de las distintas áreas funcionales urbanas, que permitan conocer sus características generales en base a los índices espaciales calculadas.
- Realizar una comparativa de los índices espaciales seleccionados en las AUFs seleccionadas.
- Creación de un índice compuesto de sostenibilidad espacial que permita realizar un análisis comparativo de las diferentes AUF de manera más accesible.

1.3. ALCANCE

El presente TFM se centra en el cálculo de índices desde una perspectiva espacial, centrándose en aspectos como son la fragmentación de los usos del suelo y la equidad espacial, que se utilizarán para cuantificar y caracterizar indicadores de sostenibilidad urbana. Se plantea un análisis comparativo de ocho AUFs de Europa con datos del programa Copernicus. Las ocho AUFs seleccionadas están distribuidas homogéneamente en el territorio, dos por cada una de las regiones geográficas (norte, sur, este y oeste) del estándar M49¹ de Naciones Unidas, que se utiliza para propósitos estadísticos. Además, estas AUFs tienen unas características poblacionales similares, mayores de 900,000 habitantes y menores de 2,200,000 habitantes. Esto representa aproximadamente un 20% de las AUFs con estas mismas características poblacionales.

El análisis se ha centrado únicamente en la dimensión espacial del problema, quedando fuera otros aspectos fundamentales para el desarrollo de ciudades sostenibles como pueden ser los aspectos relacionados con la gobernanza, lo social, económico y medioambiental, que supondrían abordar la problemática desde una visión holística fuera del alcance de este TFM. Por otro lado, el análisis se ha centrado en un número limitado de AUFs con unas características poblaciones concretas, lo que puede resultar una limitación en términos comparativos y de extrapolación a otras áreas con características distintas.

1.4. ESTRUCTURA

El TFM se estructura en seis capítulos. El primer capítulo contiene la introducción, los objetivos, tanto generales como específicos, el alcance del proyecto, y la metodología llevada a cabo para la realización del estudio.

El segundo de los capítulos aborda el marco teórico, donde queda de manifiesto los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y la definición de términos básicos del presente TFM.

El tercer de los capítulos aborda las facetas principales del programa Copernicus, el marco general en el que se engloba el programa y la descripción de este. Todo ello a través de las componentes

¹ Los códigos estándar de país o área para uso estadístico (M49) es un estándar para códigos de país o área utilizados por las Naciones Unidas con fines estadísticos, desarrollado y mantenido por la División de Estadística de las Naciones Unidas.

fundamentales del servicio: la infraestructura, los servicios y el acceso a los datos. A continuación, se describe el proceso de adquisición de los datos de partida, el mapa de usos del suelo (Atlas Urbano).

El cuarto capítulo detalla la metodología utilizada para la estimación de métricas espaciales utilizando el atlas urbano del programa Copernicus. Además, su aplicación en ocho áreas funcionales urbanas europeas con la finalidad de estudiar desde una perspectiva espacial aspectos morfológicos urbanos y territoriales, como son la fragmentación urbana y la equidad espacial, y su influencia sobre la sostenibilidad urbana. En primer lugar, se describe el área de interés en la que se engloba el estudio. A continuación, se describe el procesado de la información para la obtención los índices espaciales de sostenibilidad urbana relevantes.

En el quinto capítulo se analizan detalladamente los resultados obtenidos. Finalmente, el sexto capítulo contiene las conclusiones del estudio.

1.5. METODOLOGÍA

La insuficiencia de datos relativos al uso del suelo en aglomeraciones urbanas ha presentado un importante obstáculo en el ámbito de la investigación comparativa entre distintas ciudades, así como en el monitoreo de aspectos cruciales como la sostenibilidad urbana. Históricamente, la metodología convencional ha consistido en generar conjuntos de datos a partir de imágenes aéreas y/o sensores satelitales. No obstante, esta información solo se encontraba disponible para un conjunto limitado de ciudades y, con frecuencia, se generaba empleando metodologías dispares.

En respuesta a esta problemática, ha sido imperativo explorar las capacidades que brinda el programa Copernicus en términos de acceso a datos e información, los cuales son de carácter gratuito y de acceso público. Específicamente, se ha hecho uso de la base de datos geoespacial del Atlas Urbano, un recurso que compila polígonos que representan el uso del suelo en todas las ciudades europeas que participan en la Auditoría Urbana, abarcando aquellas con una población mayoritaria de más de 100,000 habitantes. Los datos correspondientes, en este caso al año 2012, se encuentran delimitados por el Área Urbana Funcional (AUF) de cada ciudad, definida como la extensión total que engloba tanto a la ciudad como a los municipios colindantes en los que existen fuertes vínculos laborales entre los núcleos que constituyen la misma.

La utilización del Atlas Urbano ofrece múltiples enfoques para cuantificar y caracterizar diversos elementos de la sostenibilidad urbana, tales como la fragmentación urbana y la equidad espacial, a través de la generación de índices espaciales.

La relevancia de estos índices radica en su potencial aplicación. Idealmente, estos índices deberían formar parte del proceso de toma de decisiones, facilitando la elucidación de problemáticas como la fragmentación urbana y la equidad espacial. Esta herramienta permite desentrañar las intrincadas relaciones que se dan entre los elementos del sistema urbano y territorial, lo cual conduce a decisiones más sólidamente fundamentadas. Adicionalmente, los índices espaciales pueden actuar como instrumentos de comunicación con el público. Acompañados de una estrategia de comunicación efectiva, pueden ilustrar conceptos y datos científicos, contribuyendo así a la comprensión de temas urbanos y fomentando una participación más activa de la sociedad en la resolución de problemáticas relacionadas con el territorio y el urbanismo.

Cabe destacar que, en el desarrollo de este TFM, se han empleado diversas herramientas y técnicas de análisis respaldadas por Sistemas de Información Geográfica, con el propósito de lograr la consecución exitosa de los objetivos previamente establecidos. Entre las herramientas y técnicas utilizadas, destacamos el uso de la herramienta Indifrag, desarrollada por el Grupo de Cartografía, GeoAmbiental y Teledetección de la Universitat Politècnica de València , que permite automatizar el cálculo de índices de fragmentación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. URBANISMO Y SOSTENIBILIDAD URBANA

Uno de los retos más importantes que tiene planteado en la actualidad el urbanismo, es el desarrollo territorial y urbano sostenible. Es decir, el de seguir contribuyendo al progreso sin olvidar los requerimientos y la triple dimensión (económica, social y ambiental) de la sostenibilidad, y en particular, entendiendo el suelo, además de como un recurso económico, como uno de los más valiosos elementos naturales de los que disponemos, y en cuya regulación se hace preciso conjugar toda una serie de factores diversos: el medio ambiente, la calidad de vida, la eficiencia energética, la prestación de servicios, la cohesión social, etc.

En el contexto europeo, en relación con la sostenibilidad urbana se destaca el **Marco europeo de referencia para la ciudad sostenible** (Winter, 2018).

Desde hace casi una década, la cooperación intergubernamental en temas urbanos entre países miembros de la UE se viene centrando especialmente sobre la sostenibilidad urbana. **La Carta de Leipzig Sobre Ciudades Europeas Sostenibles** (Unión Europea, 2007), aprobada con motivo del Encuentro Informal de Ministros sobre Desarrollo Urbano y Cohesión Territorial celebrado en Leipzig en el año 2007, es el documento que recoge el consenso alcanzado a nivel europeo en este tema.

El desarrollo del **Marco Europeo de Referencia para la Ciudad Sostenible** (Winter, 2018) fue un mandato de los Ministros de Desarrollo Urbano de la UE, acordado en su Reunión Informal de Marsella durante la Presidencia Francesa en 2008 y revalidado durante la Reunión Informal de Ministros celebrada durante la Presidencia Española de Toledo en 2010, en la que se diseñó y acordó la segunda fase del proceso. En la Reunión Informal de Ministros celebrada en Poznan durante la Presidencia Polaca de 2011 se revalidó nuevamente el apoyo de los 27 Estados Miembros y de la EC.

En el contexto internacional, la **Nueva Agenda Urbana (NAU)** (ONU-Habitat, 2020) fue adoptada en Hábitat III en Quito, Ecuador, el 20 de octubre de 2016. Es la continuación de la Agenda de Hábitat, que fue adoptada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat II) en 1996 y definió “líneas de acción a varios niveles en relación con cuestiones relativas a la vivienda y los asentamientos humanos”. La NAU fue respaldada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en su sexagésima octava sesión plenaria del septuagésimo primer período de sesiones el 23 de diciembre de 2016 y, por lo tanto, representa una visión compartida para un futuro mejor y más sostenible.

La NAU está pensada como un recurso para diferentes actores en diferentes niveles de Gobierno, desde el central hasta el local, y para las organizaciones de la sociedad civil, el sector privado y todos los que residen en los espacios urbanos del mundo. La NAU destaca los vínculos entre la urbanización sostenible y la creación de empleo, las oportunidades de subsistencia y la mejora de la calidad de vida, e insiste en la incorporación de todos estos sectores en todas las políticas y estrategias de desarrollo o renovación urbana.

La NAU funciona como un acelerador de los **ODS**, en particular el ODS 11 -Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles a fin de proporcionar un marco integral para guiar y dar seguimiento a la urbanización en todo el mundo.

2.2. SOSTENIBILIDAD ESPACIAL

Un concepto importante que se introduce en la Nueva Agenda Urbana (NAU) es la de la **sostenibilidad espacial**. Como concepto, sugiere que las condiciones espaciales de una ciudad pueden mejorar su capacidad para generar valor y bienestar social, económico y ambiental. Los gobiernos pueden lograr la sostenibilidad espacial guiando la forma física de entornos urbanos para crear un acceso equitativo al empleo, a la vivienda e interacción social; permitir economías de aglomeración y fomentar relaciones sostenibles con los ecosistemas y hábitats naturales. La forma física de una ciudad, que es el resultado de la planificación intencional y el desarrollo, es fundamental para el bienestar social, económico y ambiental.

La NAU (ONU-Habitat, 2020) fomenta “estrategias de desarrollo espacial que tengan en cuenta, según corresponda, la necesidad de orientar la ampliación urbana, dando prioridad a la renovación urbana mediante la planificación de la provisión de infraestructuras y servicios accesibles y bien conectados, el logro de densidades demográficas sostenibles y el **diseño compacto y la integración de nuevos barrios en el entramado urbano**, impidiendo el crecimiento urbano incontrolado y la marginación”. Menciona la importancia de una adecuada planificación espacial y territorial que integre “la planificación y gestión de los recursos hídricos, teniendo en cuenta la continuidad entre las zonas urbanas y las rurales a escala local y territorial y con la participación de las comunidades y los interesados pertinentes”.

Además, el ODS 11 incluye una serie de objetivos de sostenibilidad espacial, incluida la **equidad espacial en el tránsito, el acceso a espacios verdes y públicos**, y vínculos bien planificados entre zonas urbanas y periurbanas y zonas rurales. En lo que respecta al tránsito, fomenta la provisión de acceso a “sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos, y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación vulnerable, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y adultos mayores” - Meta 11.2 del ODS 11. El ODS 11 articula una intención “Proporcionar acceso universal a espacios verdes y públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para mujeres y niños, adultos mayores y personas con discapacidad” - Meta 11.7 del ODS 11. Menciona la importancia de los “vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales mediante el fortalecimiento de la planificación del desarrollo nacional y regional” - Meta 11.A. del ODS 11.

2.3. FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE

En líneas generales, la fragmentación representa el proceso por el cual los usos del terreno están demasiado segregados espacialmente como para poder lograr ciertas funciones óptimas (Wei y Zhang, 2012). Este fenómeno de la fragmentación puede afectar tanto al medio ambiente, al paisaje, así como a la calidad de vida urbana.

La expansión urbana, la rápida industrialización y el aumento de la actividad humana están documentados como principales factores desencadenantes de la fragmentación, tanto de las tierras de cultivo como de los bosques, del hábitat y más generalmente, del paisaje (Wei & Zhang, 2012), lo que demuestra que las actividades socioeconómicas subyacen al fenómeno de la fragmentación y, como consecuencia, pueden incidir en el deterioro de ciertos ecosistemas.

Los grandes rodales o parcelas de hábitat son importantes para mantener viable la población de especies, como consecuencia del crecimiento de la fragmentación del paisaje, estos rodales se están dividiendo, reduciéndose de tamaño y cada vez más aislados unos de otros. Esto genera que la fragmentación del paisaje sea una de las mayores causas del rápido descenso en la población de la fauna y también de la flora, como explican (Moser, Jaeger, Tappener, Tasser, & Eiselt, 2007). La fragmentación resulta de la conversión de estos rodales en áreas urbanas, de su desarrollo y de las infraestructuras como carreteras y vías. Como consecuencia, se reduce la conectividad obstruyendo el movimiento a través del paisaje, además de aumentar la contaminación y las emisiones acústicas, afectar al clima, al paisaje y al valor recreacional del territorio.

Por otro lado, (Gielen, Riutort-Mayol, & Palencia, 2021) definen la expansión urbana como "el proceso mediante el cual las áreas urbanas se extienden más allá de sus límites históricos, con la consecuente ocupación de nuevas áreas rurales y cambios en el uso del suelo, lo que implica la necesidad de nuevos servicios y la expansión de los existentes". Esta definición destaca la relación entre la expansión urbana y la provisión de servicios municipales, como agua potable, saneamiento, transporte, entre otros, lo que puede tener implicaciones en los costos y la eficiencia de la gestión urbana. En este sentido, la expansión urbana se considera una dimensión crítica de la planificación urbana y el desarrollo sostenible.

En un estudio realizado por (Wei & Zhang, 2012) se abordó la relación entre la forma urbana y la sostenibilidad, concluyendo que existe una correlación positiva entre una forma urbana más compacta y la reducción del consumo energético, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la calidad del aire, entre otros indicadores de sostenibilidad. Este estudio sugiere que una planificación urbana más integrada y sostenible, que fomente la conectividad y el acceso a pie o en bicicleta, puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y el medio ambiente.

Por tanto, el análisis de la fragmentación urbana puede proporcionar indicadores de los factores económicos, sociales, de expansión urbana y agrarios, entre otros, que pueden estar influyendo en la forma urbana de una ciudad. El estudio de estos factores y su relación con la sostenibilidad puede ser de gran importancia para la toma de decisiones en materia de planificación y diseño urbano, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas y el medio ambiente

Hay que tener en cuenta cómo gracias a la tecnología satelital, mediante teledetección puede ser revelada una información muy detallada sobre la morfología urbana. Considerando que las ciudades son sistemas socioeconómicos, el análisis urbano trata tanto sobre los patrones de actividad humana (sean estos el trayecto al trabajo, ocio, comportamiento de compras, etc.), como sobre el medio construido, siendo el medio construido el resultado de la concatenación del proceso urbano pasado y actual, el cual revela una de las facetas del funcionamiento del sistema urbano (Longley & Mesev, 2000).

Centrando el estudio en las áreas urbanas, como por ejemplo el realizado por (Salinas, 2009), la fragmentación está siendo utilizada para caracterizar las transformaciones más evidentes de las áreas urbanas contemporáneas y su evolución en el tiempo. Para definir la fragmentación urbana, hay que precisar que se refiere a un concepto utilizado en varias disciplinas, no sólo en geografía y urbanismo, sino también en otras ciencias económicas, sociales y ambientales, existiendo así una interpretación más amplia de su significado. La necesidad del estudio nace de la posibilidad de conocer e identificar patrones de las nuevas formas de crecimiento urbano y los impactos que tienen sobre el territorio, lo

que va a resultar de gran utilidad para la planificación futura del hábitat, ya que pueden proporcionar las claves para un desarrollo territorial más equilibrado.

La importancia del análisis de fragmentación urbana es debida a su capacidad de describir una de las formas de crecimiento características de las áreas urbanas contemporáneas, caracterizadas por aquella que se extienden más allá de los núcleos tradicionales y por sobrepasar los límites administrativos, tratando así de concebir nuevas visiones y herramientas para su administración.

Particularmente en el estudio de los elementos urbanos, se puede dividir en dos escalas el término de fragmentación, como explica (Salinas, 2009). En primer lugar, existe una escala urbana, donde se plantean los problemas de discontinuidad de estructura interna del tejido urbano, también llamado fractura urbana, que explica mejor la pérdida de funcionalidad en aquellos sectores que debido a elementos urbanos o naturales (como son líneas ferroviarias, carreteras, relieve, etc.) muestran una ausencia de interrelación y continuidad con el todo urbano, aun siendo contiguos. En segundo lugar, una escala mayor, donde se caracteriza la discontinuidad de la forma urbana, es decir, la dispersión de los fragmentos sobre el terreno. En este caso, el término fragmentación describe las características de discontinuidad morfológica y deslocalización de los crecimientos recientes, no sólo indicando la ausencia de continuidad, sino también su contigüidad, refiriéndose a la cercanía al origen.

La progresiva transformación de las formas y patrones de los asentamientos muestran la necesidad de renovar los mecanismos de gestión y administración del territorio. Según (Font, 2007) surge la necesidad de crear un “proyecto territorial” como forma de ordenación renovada, el cual examine los problemas y la dinámica de los actuales procesos de transformación, generando perfiles más complejos y diversos.

Según una compilación realizado por (Salinas, 2009), algunos de los efectos de la fragmentación en diferentes áreas son los siguientes:

En relación con la **movilidad**, la fragmentación y la dispersión de las zonas urbanas implica un aumento de las áreas de desplazamiento. Teniendo en cuenta el mercado mono funcional característico de algunas zonas, se hace necesario el desplazamiento a áreas con equipamiento básico, además, las características de localización dificultan un sistema de transporte eficiente que potencia el uso del automóvil en un área fragmentada.

En cuanto a los diferentes **usos**, los fragmentos urbanos presentan una marcada tendencia mono funcional, lo que implica consecuencias negativas, como la pérdida de calidad de vida urbana, se puede evitar introduciendo una mayor diversidad de suelos compatibles, generando así sinergias más funcionales.

Respecto a la **centralidad**, actualmente se aprecia que los principales servicios se encuentran concentrado en los núcleos, lo que indica una tendencia de concentración de la centralidad. Una ciudad fragmentada necesita tanto un equipamiento concentrado como difuso, de jerarquía variable, que pueda extender la condición de ciudad a todo el territorio.

Por último, uno de los efectos considerado más grave es el relacionado con el **medio ambiente**, debido al crecimiento de la fragmentación, han surgido procesos de degradación en el medio ambiente, el consumo de suelo indiscriminadamente genera una pérdida de los espacios naturales y de cultivo. Además, aumenta la contaminación de las aguas, la polución atmosférica, lumínica y sonora, con el crecimiento disperso.

Tras este análisis, cabe decir que el estudio de fragmentación abre una puerta a la oportunidad de planificar los territorios con mayor compromiso ambiental, evitando las barreras que puede crear una urbanización continua, y aprovechando la dimensión eco-paisajística de estos territorios.

2.4. HERRAMIENTA SIG: INDIFRAG

En este apartado se describen en detalle las características principales de los índices de fragmentación utilizados en este estudio para facilitar su comprensión. Se trata de una compilación exhaustiva de índices que permiten cuantificar la fragmentación del paisaje a partir de sus elementos. Para realizar el cálculo, se ha utilizado la aplicación IndiFrag (v2.1) (Sapena & Ruiz, 2016), que es una aplicación ArcToolBox para ArcGIS creada por el Grupo de Cartografía, GeoAmbiental y Teledetección de la Universitat Politècnica de València. Esta herramienta se ha desarrollado con la finalidad de automatizar el cálculo de índices de fragmentación y el análisis multitemporal, evitando la intervención del usuario más allá de introducir los datos de entrada en la aplicación. Se trata de una herramienta genérica, es decir, se puede utilizar con todo tipo de datos de clasificación, con objeto de conocer la fragmentación o distribución espacial de los objetos a estudiar en una o varias fechas. Es decir, su uso no es exclusivo para el análisis de la fragmentación del paisaje ni de los entornos urbanos. Más detalladamente, IndiFrag es una herramienta Toolbox formada por varios ficheros de código en lenguaje Python asociados, de forma que, al introducir los datos con la información de entrada, automáticamente, se calculan los índices que el usuario seleccione.

La herramienta de índices de fragmentación se ha organizado en diferentes niveles y grupos en función de los datos de entrada y las propiedades que miden. En cuanto a los datos de entrada, se han establecido tres niveles de cálculo: objeto, clase y súper-objeto, que corresponden a diferentes escalas y niveles jerárquicos. Por otro lado, se han clasificado los índices en diferentes grupos según el patrón que miden y sus propiedades: área y borde, forma, agregación, diversidad y contraste. Cada índice pertenece a un único grupo según las propiedades que mide, pero puede ser calculado en diferentes niveles. A continuación, se detallan las características de cada nivel y grupo de índices

2.4.1. Niveles de medidas

En la herramienta *IndiFrag* se ha separado el cálculo en los distintos niveles que a continuación se explican. Algunos de los índices se pueden calcular en varios niveles, indicando en cada caso información más o menos generalizada de los datos de entrada.

2.4.1.1. Nivel de Objeto

En este grupo los índices describen características propias de cada objeto sin tener en cuenta su clase o pertenencia a un súper-objeto de nivel superior. Por tanto, los índices de este nivel se calculan de forma independiente para cada objeto o elemento del área de estudio. Cada objeto dispone de un identificador único que permite procesarlo para el cálculo (Figura 2), además, se debe conocer su clase o tipología que lo relaciona con los objetos de similares características, lo cual permitirá un cálculo posterior a nivel superior, como es el caso del nivel de clase. Por ejemplo, un objeto podría ser una parcela catastral o un límite de manzana urbana.

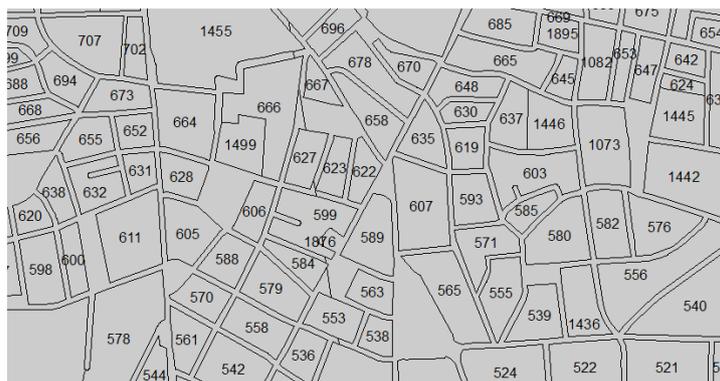


Figura 2. Ejemplo de objetos con su identificador. En este caso se trata de parcelas catastrales, agrupadas en manzanas

Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

2.4.1.2. Nivel de Clase

Este nivel está formado por un conjunto de objetos con la misma tipología asignada. En función de la distribución y la forma de los objetos dentro de una clase se pueden extraer variables significativas de cada una de las clases estudiadas. Cada objeto tiene asignada la clase a la que corresponde para poder diferenciarlos en el cálculo (Figura 3). Por ejemplo, la clase puede ser el uso del suelo, la tipología de los objetos o simplemente una característica común de los objetos.



Figura 3. Ejemplo de objetos clasificados

Fuente: Guía de Usuario de IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

2.4.1.3. Nivel de Súper-Objeto

Se trata del nivel que engloba a los dos anteriores, cada súper-objeto puede estar formado por una o más clases, que a su vez están formadas por objetos. El súper-objeto puede considerarse como un todo (Figura 4). Por ejemplo, un súper-objeto podría ser una unidad administrativa, como una ciudad, un municipio o distrito. En IndiFrag se tienen en cuenta los límites del súper-objeto para llevar a cabo los cálculos de los diversos índices, de este modo, puede haber distintos súper-objetos que serán procesados por separado en el cálculo, lo cual permite hacer posteriores comparaciones entre los súper-objetos. Si se trabaja con varios súper-objetos, el nivel de clase se procesará para cada una de estas unidades por separado, con el fin de comparar resultados.

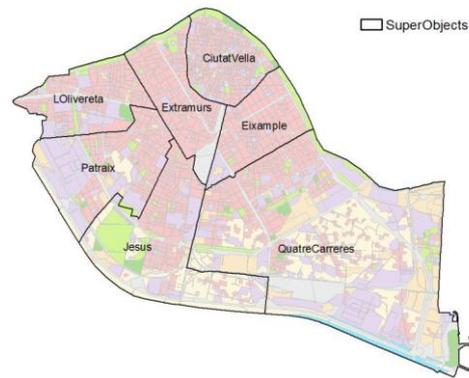


Figura 4. Ejemplo de súper-objetos que contienen a los objetos clasificados
Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

2.4.2. Grupos

2.4.2.1. Área y Perímetro

Este grupo representa una colección de medidas que tienen relación con el tamaño de los objetos y la cantidad de borde o perímetro que generan. El área y el perímetro se encuentran entre las medidas más sencillas, pero a su vez son muy útiles a la hora de valorar el súper-objeto, ya que en numerosas ocasiones son necesarias para calcular otros índices (Figura 5).

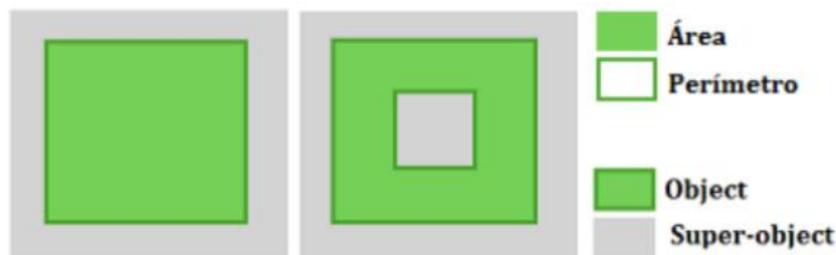


Figura 5. Croquis del grupo Área y Perímetro.
Fuente: Guía de Usuario Indifrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

Los índices que pertenecen a este grupo se describen en los apartados siguientes, el nombre que aparece entre paréntesis es el alias asignado a cada índice en la herramienta *IndiFrag*.

2.4.2.2. Forma

Este grupo representa una colección de medidas que tienen relación con la forma de los objetos. La interacción entre la forma de un objeto y su tamaño tiene gran influencia en los procesos internos de la clase y del súper-objeto. La forma es un parámetro difícil de cuantificar de manera precisa, pero generalmente se trata de una medida que aporta información sobre su morfología (Figura 6).



Figura 6. Croquis del grupo Forma.

Fuente: Guía de Usuario Indifrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

Este grupo tiene índices a los tres niveles: objeto, clase y súper-objeto, la mayoría son función de la relación entre el perímetro y el área.

2.4.2.3. Agregación

Este grupo representa una colección de medidas que muestran la tendencia de los objetos a agregarse espacialmente, también se le conoce como la estructura del súper-objeto. El término agregación engloba otros conceptos como la dispersión, la intercalación, subdivisión y la separación (Figura 7).



Figura 7. Croquis del grupo Agregación.

Fuente: Guía de Usuario Indifrag v2.1. (Sapena & Ruiz, 2016)

2.4.2.4. Diversidad

Este grupo de medidas, como su nombre indica, cuantifica la diversidad de clases dentro de un súper-objeto. Describe la composición interna del súper-objeto y a su vez no se ve afectado por la configuración espacial de los objetos que lo forman. La diversidad tiene dos componentes, en primer lugar, la riqueza, que se refiere al número de clases que hay presente en el súper-objeto y, por otro lado, la uniformidad, se refiere a la distribución más o menos homogénea de las clases en un súper-objeto (Figura 8).



Figura 8. Croquis del grupo Diversidad.

Fuente: Guía de Usuario Indifrag v2.1. (Sapena & Ruiz, 2016)

2.5. EQUIDAD ESPACIAL: ESPACIOS VERDES

Harvey (1973) definió la equidad espacial como la justa distribución de recursos y servicios entre diferentes áreas geográficas de una ciudad, con el objetivo de reducir las disparidades entre las mismas. Harvey plantea que la equidad espacial implica que todos los habitantes de una ciudad deben tener acceso a las mismas oportunidades, beneficios y servicios, independientemente de su ubicación geográfica. Desde entonces, la definición de equidad espacial se ha expandido para incluir no solo la distribución de recursos y servicios en la ciudad, sino también la accesibilidad a ellos y la reducción de barreras de movilidad para los residentes de áreas periféricas. La equidad espacial se ha convertido en un objetivo importante en la planificación y el diseño de ciudades sostenibles y saludables, promoviendo un acceso justo a los recursos y servicios urbanos para todos los ciudadanos.

La equidad espacial en el contexto de los ODS, específicamente el “ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles”, busca garantizar ciudades y comunidades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. La equidad espacial implica garantizar el acceso equitativo a los recursos y servicios urbanos, como transporte, vivienda asequible, espacios verdes, entre otros, para todas las personas, sin importar su ubicación geográfica, ingresos, estatus social u otras características.

En referencia a los espacios verdes, el ODS 11 articula una intención “Proporcionar acceso universal a espacios verdes y públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para mujeres y niños, adultos mayores y personas con discapacidad” - Meta 11.7. Cabe destacar las grandes oportunidades que ofrecen para el cambio positivo y el desarrollo sostenible de nuestras ciudades. Ofrecen soluciones a la repercusión de la urbanización rápida y poco sostenible en la salud y el bienestar. Los beneficios sociales y económicos de los espacios verdes urbanos son igualmente importantes, y deben estudiarse en el contexto de cuestiones de interés mundial como el cambio climático y de otras prioridades establecidas en los ODS, incluidas las ciudades sostenibles, la salud pública y la conservación de la naturaleza.

A continuación, se explican detalladamente las características principales de los dos índices de equidad espacial implementados en este estudio para facilitar su comprensión, el espacio verde por cápita y la proximidad de la población a los espacios verdes.

Por un lado, **el espacio verde por cápita** se define como la superficie de parques y jardines y otros espacios públicos dotados de cobertura vegetal del ámbito urbano en relación con el número de habitantes. No se consideran las superficies verdes ligadas al tráfico (isletas de tráfico). La Organización Mundial de la Salud (OMS) aboga por los 10 o 15 m² de espacios verdes per cápita y establece los 50 m² per cápita como valor óptimo y objetivo final. Por tanto, el valor mínimo será mayor a 10 m² de espacios verdes por cápita para una determinada AUF. Por otro lado, en referencia al **porcentaje de población con acceso a espacios verdes**, la OMS recomienda que los residentes urbanos tengan acceso a al menos 0,5-1 ha de espacios verdes público a menos de 300 metros de su hogar (World Health Organization, 2016). En contraste, las recomendaciones nacionales y locales varían en toda Europa.

2.6. DEFINICIÓN DE ÁREA URBANA FUNCIONAL

Comparar ciudades entre distintos países es siempre una tarea complicada ya que no existe una definición universalmente aceptada entre los especialistas sobre lo que debe entenderse por ciudad y hasta dónde se extienden los límites de lo urbano. Esto ha hecho que, en la práctica, diferentes instituciones hayan adoptado distintos criterios, lo que acarrea problemas de comparabilidad (Bandrés & Sanz, 2017). El principal problema con esta aproximación a la definición del grado de urbanidad es que el punto de partida lo constituye la población recogida de acuerdo con la división administrativa del estado, en concreto la población municipal en nuestros ejemplos. Pero los lindes administrativos tienen poco que ver, en muchas ocasiones, con las aglomeraciones de población.

Identificar asentamientos urbanos sin referencia a los lindes de los municipios no es tarea fácil. En primer lugar, porque se necesita una distribución de la población sobre el territorio que no dependa de dichos lindes, y esa información no está disponible con generalidad, puesto que las estadísticas se recogen a partir de la división administrativa territorial del estado. En segundo lugar, porque es necesario ponerse de acuerdo sobre unos umbrales de tamaño y densidad que identifiquen las aglomeraciones urbanas. Ambas cuestiones tienen solución actualmente, al menos en el ámbito europeo, gracias al esfuerzo de la EC.

La DG REGIO de la EC (Dijkstra & Poelman, A harmonised definition of cities and rural areas: the new degree of urbanisation., 2014) ha desarrollado una metodología que permite clasificar los municipios, denominados Local Administrative Units de nivel 2 en la nomenclatura europea (LAU2), en tres tipos: rurales, intermedios y urbanos, a partir de los cuales se construye el concepto de ciudad y AUF (Cities in Europe, the new OECD EC definition by The Atlantic Greenway Project - Issue, 2015), todo ello de forma consistente y completa.

La metodología se compone de dos etapas. La primera de ellas clasifica las celdas de la grid regular de 1km x 1km de distribución de la población, en rurales o urbanas de acuerdo con los criterios que se expondrán a continuación. La segunda etapa vincula las celdas rurales o urbanas a los municipios, que constituyen el área administrativa de interés a clasificar. A continuación, se analizan con detalle ambas etapas.

Como ya se ha indicado con anterioridad, la primera etapa clasifica las celdas de la grid en rurales o urbanas de acuerdo con el siguiente criterio:

- **Aglomeraciones urbanas (urban clusters):** Aglomeraciones de celdas contiguas, incluyendo las diagonales, con una densidad mínima de 300 habitantes por km², y un umbral mínimo de población de 5.000 habitantes. Las aglomeraciones urbanas definen las celdas urbanas, y también su complementario, las celdas rurales.
- **Celdas de población rural o áreas rurales:** Celdas fuera de las aglomeraciones urbanas. Obsérvese que estas celdas pueden estar habitadas o no, pero solo las que contienen población tienen sentido en el contexto del estudio.

Cualquier celda habitada de la grid pertenece a uno de estos tipos, lo que permite una estimación del grado de urbanización como el porcentaje de población que habita en celdas urbanas, en el sentido de formar parte de las aglomeraciones urbanas.

Además de estos dos tipos de celdas la metodología incluye un tercer concepto que resulta clave en la definición de la ciudad:

- **Centros urbanos o aglomeraciones urbanas de alta densidad (urban centers o high density clusters):** Aglomeraciones de celdas contiguas, excluyendo las diagonales, pero rellenando los huecos y suavizando los contornos, con una densidad mínima de 1.500 habitantes por km², y un umbral mínimo de población de 50.000 habitantes.

Finalmente, la segunda etapa consiste en vincular los conceptos anteriores, referidos a celdas de una grid, a las áreas administrativas de interés. La razón es sencilla, se debe de asociar la tipología rural/urbana a las estructuras de poder político y administrativo de carácter local. Por esta razón se necesitan una serie de criterios que transformen la información de la grid en una tipología a nivel municipal. Los criterios establecidos por Eurostat (European Commission. Statistical Office of the European Union., 2019) y la DG REGIO (Dijkstra & Poelman, A harmonised definition of cities and rural areas: the new degree of urbanisation., 2014) son los siguientes (Figura 9):

- **Municipio rural o con baja densidad de población,** si al menos el 50% de la población municipal vive en celdas rurales.
- **Municipio urbano pequeño (town and suburbs) o con densidad intermedia de población,** si menos del 50% de la población vive en celdas rurales y menos del 50% de la población vive en centros urbanos o aglomeraciones urbanas de alta densidad.
- **Municipio urbano (city) o densamente poblado,** si al menos el 50% de la población vive en centros urbanos o aglomeraciones urbanas de alta densidad.

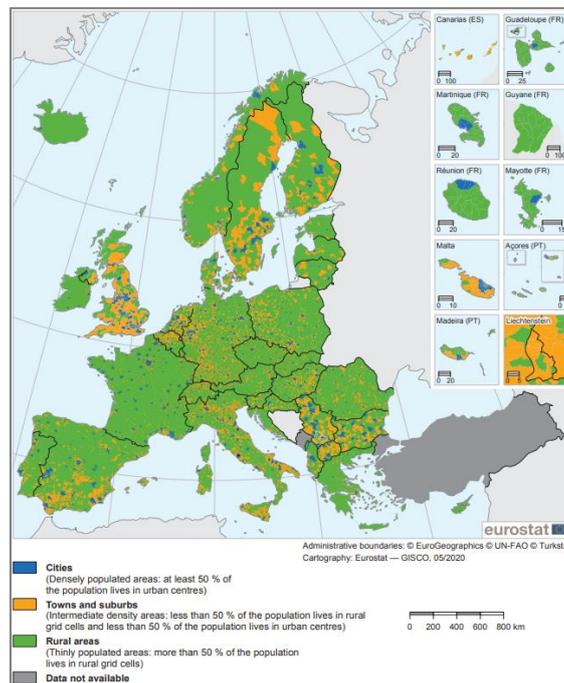


Figura 9. Grado de urbanización para las LAU2.

Fuente: Statistical Atlas (European Commission. Statistical Office of the European Union, 2020)

Las ciudades son, normalmente, espacios demasiado reducidos para integrar las funciones que ejercen en el ámbito económico. Por esta razón, la metodología de la DG REGIO y la OCDE (Cities in europe, the new oecd ec definition by The Atlantic Greenway Project - Issuu, 2015) distingue de forma nítida lo que podemos considerar como ciudad de su área urbana de influencia —hinterland—, de forma que obtengamos un área integrada en términos de los mercados de trabajo y consumo. La

concepción de área urbana que se ha abierto paso en el contexto europeo es pues funcional. Por esta razón se las conoce con el nombre de áreas urbanas funcionales (AUF). Un AUF debe ser un espacio que englobe las principales funciones económicas que ejerce la ciudad, frente a las concepciones morfológicas ligadas a la huella del hombre sobre el territorio, y que también han sido exploradas por las instituciones europeas en el contexto de las bases de datos de usos del suelo —Agencia Europea del Medio Ambiente a partir de Corine Land Cover (Simon, Fons, & Milego, 2010)—.

Para acotar el área de influencia de una ciudad es necesario determinar los desplazamientos diarios —commuting— entre la ciudad y sus municipios limítrofes por razones de trabajo o estudio. El criterio general utilizado consiste en identificar todos aquellos municipios en los que al menos el 15% de sus residentes trabajan o estudian en la ciudad (Dijkstra, Poelman, & Veneri, The EU-OECD definition of a functional urban area, 2019). Todos estos municipios, más la ciudad a la que se desplazan, constituye la primera aproximación al AUF.

La Figura 10 muestra de forma visual los distintos conceptos que componen el AUF.

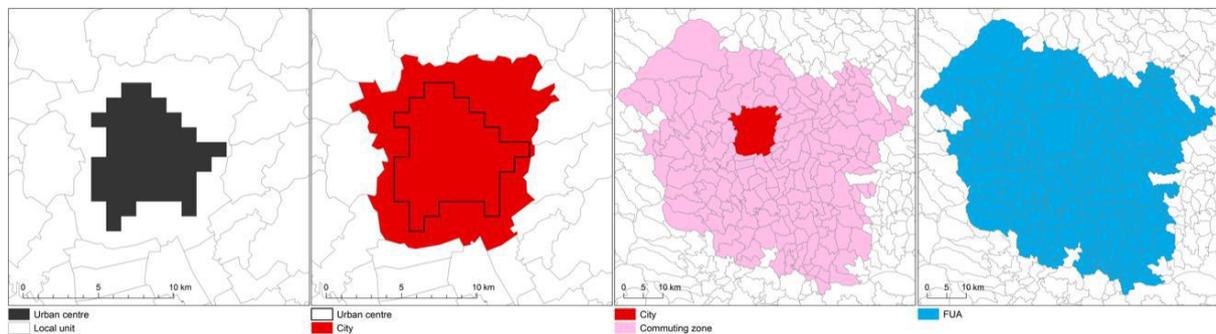


Figura 10. Centro urbano, municipio urbano (city), área de desplazamiento (commuting) y AUF de Graz, Austria

Fuente: (Dijkstra, Poelman, & Veneri, The EU-OECD definition of a functional urban area, 2019)

Así pues, las **AUFs** son las aglomeraciones de celdas contiguas con una densidad mínima de 1.500 habitantes por km² y un umbral mínimo de 50.000 habitantes, que forma la ciudad principal, y los municipios limítrofes, con al menos un 15% de desplazamientos diarios por razones de trabajo o estudios (commuting).

CAPÍTULO 3. DATOS DE PARTIDA

3.1. EL PROGRAMA ESPACIAL DE LA UNIÓN EUROPEA

En abril de 2021, el Consejo y el Parlamento Europeo adoptaron un Reglamento por el que se crea el nuevo programa espacial de la UE para los años 2021 a 2027, que entró en vigor el 1 de enero de 2021 con carácter retroactivo.

Este Reglamento velará por: datos y servicios relativos al espacio de gran calidad, actualizados y seguros; mayores beneficios socioeconómicos derivados del uso de dichos datos y servicios, destinados a incrementar el crecimiento y la creación de empleo en la UE; mayor seguridad y autonomía de la UE; un papel motor más importante para la UE en el sector espacial.

El Reglamento simplifica el marco jurídico y el sistema de gobernanza de la UE vigentes y normaliza el marco de seguridad. Mejora y reúne en un solo marco programas de la UE ya existentes, como:

- **Copernicus:** el programa de observación de la Tierra más avanzado del mundo.
- **Galileo:** el sistema mundial de navegación por satélite propio de la UE, que proporciona datos muy precisos de posicionamiento global.
- **EGNOS:** sistema que presta servicios de navegación vitales a los usuarios del transporte aéreo, marítimo y terrestre por toda la UE.

Asimismo, introduce nuevos componentes de seguridad, como:

- **SSA:** el programa de conocimiento del medio espacial
- **Govsatcom:** la nueva iniciativa de comunicación gubernamental por satélite para supervisar los peligros del espacio y proporcionar a las autoridades nacionales acceso a comunicaciones seguras por satélite.

El programa espacial de la Unión Europea contribuye a que los ciudadanos de la Unión Europea puedan llevar a cabo sus actividades cotidianas en la Tierra. Los satélites que la UE pone en órbita posibilitan que millones de personas se comuniquen mediante el uso de las nuevas tecnologías, viajen por tierra, mar y aire, y encuentren formas de mejorar la salud de nuestro planeta.

La política espacial de la UE contribuye a crear empleo e impulsar el crecimiento y la inversión en Europa, expande las fronteras de la ciencia y la investigación, promueve y facilita otras políticas en ámbitos como la seguridad y la defensa, la industria y el sector digital, resulta fundamental para la recuperación económica tras la crisis de la COVID-19 y para la respuesta a desafíos mundiales como el cambio climático.

Según una investigación de la EC, la economía espacial europea, en la que se incluyen la industria manufacturera y los servicios, emplea a más de 231 000 profesionales. En 2017 se calculaba que su valor rondaba en torno a los 53 000-62 000 millones de euros.

3.2. EL PROGRAMA COPERNICUS

Copernicus (Commission, n.d.) es el **Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea**, que mira a nuestro planeta y su medio ambiente para el máximo beneficio de toda la ciudadanía europea. Ofrece servicios de información basados en datos de observación de la Tierra por satélite y en datos in situ (no espaciales).

La Comisión Europea coordina y gestiona el programa, en cuya ejecución colaboran los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, las agencias de la UE y la empresa Mercator Océan (Figura 11).

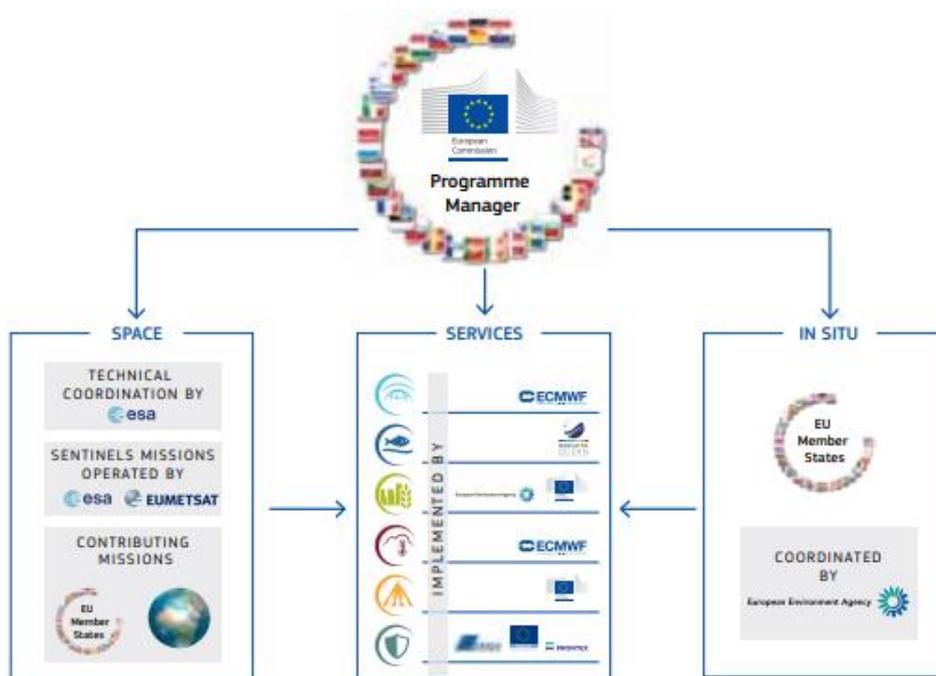


Figura 11. Actores del Programa Copernicus
Fuente: Copernicus

Se utilizan enormes cantidades de datos globales procedentes de satélites y sistemas de medición terrestres, aéreos y marítimos para proporcionar información que ayude a los proveedores de servicios, las administraciones públicas y otras organizaciones internacionales a mejorar la calidad de vida de la ciudadanía europea. Los servicios de información proporcionados son de acceso **gratuito** y **abierto** para sus usuarios.

Copernicus se ha concebido específicamente para responder a los requisitos de los usuarios. Mediante observaciones in situ y por satélite, los servicios de Copernicus proporcionan datos globales en tiempo cuasirreal, también aplicables a necesidades locales y regionales, que nos permiten entender mejor nuestro planeta y gestionar de forma sostenible el medio ambiente en que vivimos.

Copernicus cuenta con un conjunto de **satélites propios** (las familias Sentinel), complementados con misiones participantes (otros satélites comerciales o públicos en órbita). Los satélites Sentinel están diseñados específicamente para responder a las necesidades de los servicios de Copernicus y sus usuarios. Con el lanzamiento del Sentinel-1A en 2014, la Unión Europea puso en marcha un proceso para poner en órbita una constelación de casi 20 satélites más antes de 2030.

Copernicus también recoge información procedente de **sistemas in situ**, como las estaciones en tierra, que suministran datos obtenidos mediante una multitud de sensores terrestres, marítimos y aéreos.

Los **servicios de Copernicus** tratan y analizan esta multitud de datos procedentes de los satélites y los sistemas in situ para transformarlos en información con valor añadido. Para facilitar el seguimiento de los cambios, los conjuntos de datos, que se remontan años y décadas en el pasado, se organizan de manera que permitan la comparación y la búsqueda. Se examinan los patrones y se utilizan para realizar previsiones más precisas, por ejemplo, del comportamiento de la atmósfera y de los océanos. Se elaboran mapas a partir de datos de representación de imágenes, se identifican características y anomalías y se extrae información estadística.

Estas actividades de valor añadido se articulan alrededor de las seis líneas temáticas de los servicios de Copernicus (Figura 12):

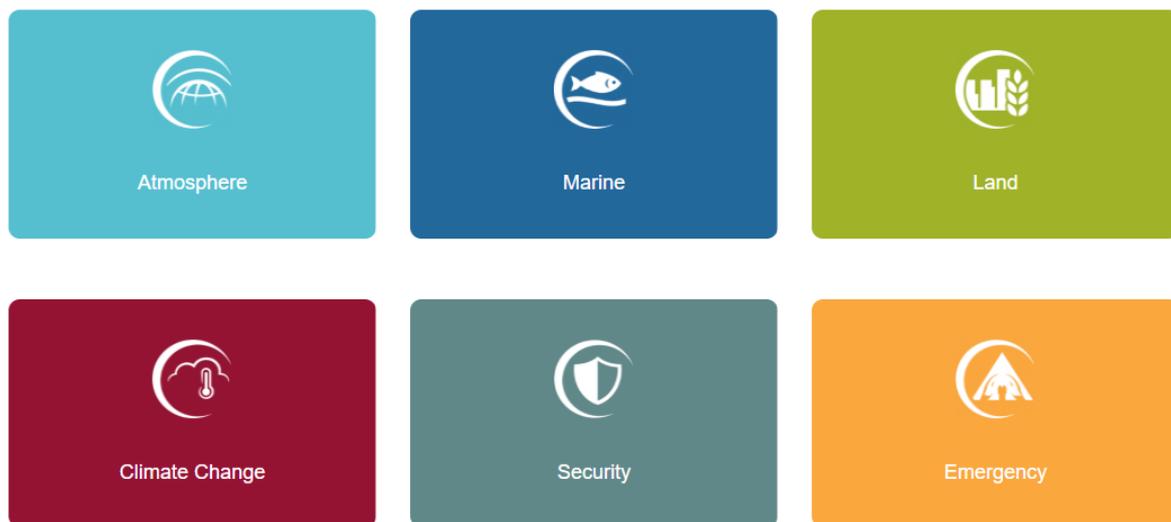


Figura 12. Servicios Copernicus
Fuente: Copernicus

Copernicus permite una mejor comprensión de la Tierra como sistema integrado. Los ciudadanos europeos, incluyendo los responsables políticos, los investigadores y los usuarios comerciales y privados, así como la comunidad científica mundial, pueden beneficiarse en muchos aspectos de la información proporcionada por los diferentes servicios Copernicus. A continuación, se dan algunos ejemplos del valor añadido de Copernicus:

- **Agricultura.** Evaluación periódica de las áreas de cultivo, monitorización del desarrollo del cultivo a escala regional y mundial, evaluación de la seguridad alimentaria, estimación de las cosechas, apoyo a las prácticas agrícolas sostenibles (por ejemplo, las estimaciones de necesidades de riego).
- **Protección civil y asistencia humanitaria.** A través del Centro de Coordinación de la Respuesta a Emergencias se coordina la respuesta a los grandes desastres y las crisis humanitarias. En las zonas afectadas por desastres naturales o de origen humano se facilita la información geográfica precisa para el rescate de la población, la demografía, la logística, las infraestructuras sanitarias y las de abastecimiento de agua, así como información medioambiental.

- **Cambio climático.** Pruebas científicas sólidas de variables geofísicas relativas al cambio climático, indicadores climáticos (por ejemplo, aumento de la temperatura, aumento del nivel del mar, deshielo, calentamiento de los océanos), índices climáticos (por ejemplo, basado en registros de temperatura, de precipitaciones y de sequías)
- **Desarrollo y cooperación.** Aplicaciones para monitorizar la agricultura y la seguridad alimentaria, la deforestación y la desertificación, así como la biodiversidad en los países en desarrollo en colaboración con países socios y organizaciones internacionales (como la Unión Africana y las instituciones de las Naciones Unidas).
- **Energía.** Apoyo en la selección y gestión de los centros de producción de energía renovable a través de la provisión de información sobre determinadas variables, que incluyen las reservas de agua, las precipitaciones y la nieve acumulada, el seguimiento de infraestructuras críticas como las plantas nucleares o la protección de infraestructuras vitales como las centrales eléctricas y los gasoductos y oleoductos, y la evaluación del uso eficiente de la energía para plantas industriales y edificios.
- **Medio ambiente.** Monitorización de la composición atmosférica, de la nieve y del hielo, y de la biodiversidad, evaluación de los parámetros del ciclo del agua como la humedad del suelo o las masas de agua. Seguimiento de los bosques y las zonas costeras; monitorización regular de suelos y evaluación de las superficies selladas, evaluación de los daños forestales y monitorización de la desertificación; vigilancia de los océanos y mares europeos, del medio ambiente marino y costero, y de la calidad de las aguas; observaciones como el color del océano y el nivel del mar.
- **Salud.** Monitorización de la calidad del aire a escala europea y de la composición atmosférica global, cartografía de posibles brotes de epidemias o enfermedades, preparación para emergencias de salud pública.
- **Seguros.** Aplicaciones de apoyo a la modelización de riesgos, a la evaluación de daños, así como a la gestión de reclamaciones.
- **Economía Azul.** Vigilancia del medio marino para mejorar el conocimiento del mar y así apoyar el desarrollo sostenible de la economía en diversos sectores como el petróleo y el gas offshore, así como el turismo costero y marítimo.
- **Turismo.** Seguimiento de las zonas costeras, provisión de indicadores e índices críticos (como la cubierta de nieve y la calidad de las aguas de baño en Europa) para la evaluación y planificación de las actividades turísticas estacionales, contribución a la protección del patrimonio natural y cultural.
- **Transporte (aéreo, terrestre y marítimo).** Monitorización de las rutas de navegación o vigilancia de los vertidos de petróleo, control del tráfico marítimo para seguridad y vigilancia; seguridad y apoyo al tráfico aéreo en caso de situaciones extremas; evaluación de riesgos geológicos y ambientales en áreas críticas para el transporte terrestre.
- **Seguridad.** Apoyo a las acciones exteriores de la Unión Europea incluyendo las operaciones de mantenimiento de la paz, la monitorización de las fronteras marítimas y terrestres de Europa, y la vigilancia marítima en general, para asistir a un amplio espectro de comunidades.

- **Planificación urbana y regional.** Seguimiento del cambio y uso del suelo a escala regional y urbana, provisión de mapas detallados de alta resolución de las principales ciudades de la Unión Europea en apoyo a la planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible y equilibrado.

Los principales usuarios de los servicios de Copernicus son los responsables políticos y las autoridades públicas que necesitan información para elaborar legislación y políticas medioambientales o para tomar decisiones clave en situaciones de emergencia, como catástrofes naturales o crisis humanitarias.

Gracias a los servicios de Copernicus y a los datos recogidos por los satélites Sentinel y las misiones participantes, muchos servicios de valor añadido pueden adaptarse a necesidades públicas o comerciales específicas, lo que da lugar a nuevas oportunidades de negocio.

En diciembre de 2017, la Comisión Europea completó un estudio a gran escala en el que se analizaban los beneficios económicos, sociales y medioambientales del programa Copernicus en función de diversas hipótesis de evolución.

El estudio, centrado exclusivamente en Europa, cubría el periodo 2017-2035. Su objetivo era asignar un valor monetario a todos los beneficios generados por el programa Copernicus para los usuarios intermedios y finales, con el fin último de proporcionar a los responsables políticos nacionales y europeos una estimación del rendimiento potencial de las inversiones. La Comisión Europea publicó un folleto, un informe y un resumen para dar a conocer las conclusiones de este reciente estudio. El informe sobre el mercado de Copernicus y diversos estudios económicos anteriores ya habían dejado patente el enorme potencial del programa para generar empleo, innovación y crecimiento.

La Comisión Europea coordina y gestiona el programa Copernicus. El desarrollo de la infraestructura de observación se realiza bajo el doble auspicio de la Agencia Espacial Europea (en lo relativo al componente espacial) y de la Agencia Europea de Medio Ambiente y los Estados miembros (para el componente in situ).

En la Figura 13 se ofrece una visión general del programa Copernicus.

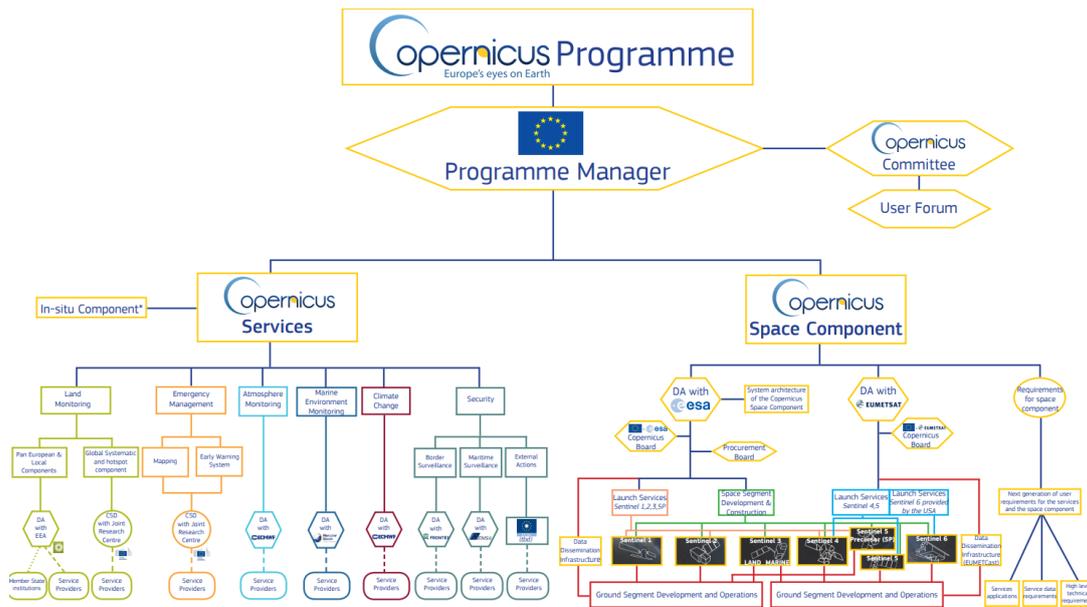


Figura 13. Estructura del programa Copernicus.
Fuente: Copernicus

3.3. SERVICIO DE VIGILANCIA TERRESTRE DE COPERNICUS

El Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus proporciona información geográfica diversa (ocupación del suelo y sus cambios, uso del suelo, estado de la vegetación, ciclo del agua y variables de la energía superficial de la tierra) a una amplia gama de usuarios europeos y de todo el mundo en el campo de las aplicaciones medioambientales terrestres (Figura 14).

Da soporte a aplicaciones en múltiples ámbitos: ordenación territorial y urbana, gestión forestal y del agua, agricultura y seguridad alimentaria, conservación y restauración de la naturaleza, desarrollo rural, contabilidad ecosistémica, mitigación/adaptación al cambio climático, etc.

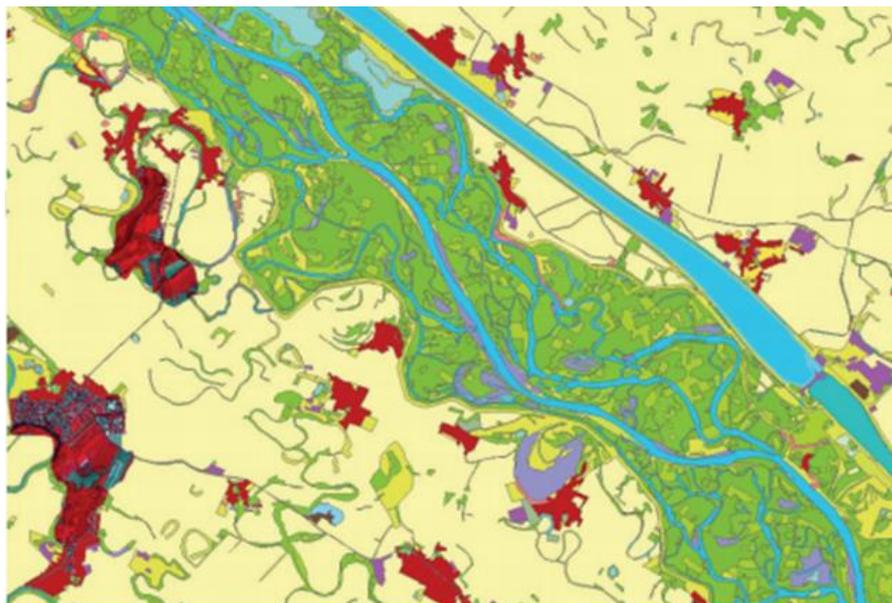


Figura 14. Ejemplo de producto del servicio de vigilancia terrestre.
Fuente: Copernicus

La implementación conjunta del servicio, en funcionamiento desde 2012, corre por cuenta de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y del Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea.

El Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus consta de cinco componentes principales:

- El **seguimiento sistemático de los parámetros biofísicos** genera principalmente una serie de productos biogeofísicos cualificados sobre el estado y la evolución de la superficie terrestre. Estos datos a escala mundial se facilitan cada diez días con una resolución espacial intermedia y se complementan con una serie temporal a largo plazo. Los productos se utilizan para monitorizar la vegetación, los cultivos, el ciclo del agua, el presupuesto energético y las variables de la criosfera terrestre.
- La **cartografía de la ocupación y el uso del suelo** produce clasificaciones de ocupación del suelo con distintos niveles de detalle, en un contexto paneuropeo o mundial. A nivel paneuropeo, esta información se complementa con capas detalladas sobre las características de la cobertura del suelo (como impermeabilidad, bosques, prados, agua y humedad o pequeños elementos leñosos). A nivel mundial, la cartografía de la ocupación del suelo se ajusta al sistema modular y jerárquico de clasificación de la cubierta terrestre de la FAO.
- La **cartografía temática de "puntos calientes"** tiene por objeto proporcionar información específica más detallada sobre áreas de interés concretas, conocidas como puntos calientes. En el contexto del Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus, los puntos calientes suelen corresponder a desafíos medioambientales específicos.
- Las **imágenes y datos de referencia** proporcionan mosaicos de imágenes satelitales de alta y muy alta resolución, así como conjuntos de datos de referencia. Incluyen, por una parte, los mosaicos de imágenes satelitales procedentes de las misiones participantes que cubren el territorio de Europa, así como la producción de mosaicos de imágenes Sentinel-2 a nivel mundial. A esto se añaden conjuntos de datos de referencia que proporcionan una cobertura paneuropea homogénea de algunos aspectos geospaciales clave, como la hidrografía y la elevación.

Además de los componentes ya mencionados, se está poniendo en marcha una nueva actividad europea de movimientos del suelo, que medirá los desplazamientos del terreno (corrimientos y hundimientos de tierras) y la deformación de las infraestructuras.

En diciembre de 2014, la Comisión Europea firmó un acuerdo de delegación con la Agencia Europea de Medio Ambiente para la puesta en marcha del componente local y paneuropeo. El anexo técnico del acuerdo se puede consultar en el archivo de este sitio (apartado de documentos técnicos). El servicio entró en funcionamiento en 2012.

3.4. MAPA DE LOS USOS DEL SUELO: ATLAS URBANO

El Urban Atlas es una iniciativa de la Dirección General de Política Urbana y Regional (REGIO) de la Comisión Europea junto a la Dirección General de Industria de Defensa y Espacio (DEFIS) con el apoyo de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA).

El servicio Urban Atlas fue el primero de una serie de servicios de monitorización de la tierra para los denominados “puntos calientes”. Es el primer servicio que ha creado mapas de cobertura y de usos del suelo estandarizados para centenares de ciudades y sus alrededores en la Unión Europea y en los países del grupo EFTA. El Urban Atlas va en línea con el Urban Audit, para el que la Oficina Europea de Estadística de la EC, más conocida como Eurostat, recopila una gran cantidad de indicadores sociales y económicos. El Urban Atlas añade la componente espacial a los datos estadísticos, lo que permite realizar comparaciones de patrones espaciales urbanos a lo largo de Europa. En su primer ejercicio, basado en imágenes de muy alta resolución para el año 2006, cubrió un total de 305 AUFs, incluyendo ciudades europeas de más de 100.000 habitantes. Para el año 2012, la DG REGIO decidió extender el ejercicio a casi 700 ciudades grandes en la EU28 y en los países del grupo EFTA, aplicando la nomenclatura consensuada entre la EC y la OECD en lo que respecta a las definiciones de áreas urbanas para la delimitación de áreas de interés (Tabla 1). El Urban Atlas ha extendido su cobertura a los países de Oeste de los Balcanes y a Turquía para el año 2018. El Urban Atlas está basado principalmente en la combinación de clasificación de imágenes (estadística) y la interpretación visual de imágenes de satélite de muy alta resolución. Se han utilizado como datos de entrada, imágenes multispectrales SPOT 5 y 6, e imágenes Formosat-2 pan-sharpened con una resolución espacial de 2 a 2.5m. Las clases generadas se combinan con información de densidad sobre el nivel del suelo sellado derivada de capas de alta resolución de impermeabilidad para proporcionar un mayor detalle en la densidad de las estructuras urbanas. Finalmente, el producto Urban Atlas se complementa y enriquece con información funcional (red de carreteras, servicios, etc.) utilizando fuentes de datos tales como mapas locales o servicios de mapas online. En la Figura 15 se puede ver un Ejemplo del “look & feel” del producto final Urban Atlas para la ciudad de Bruselas.

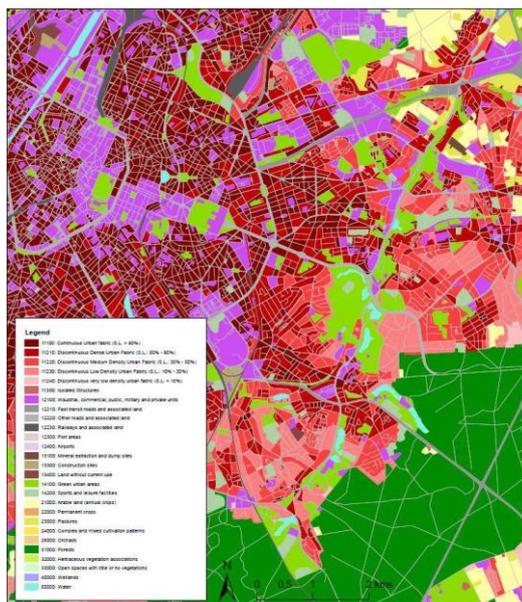


Figura 15. Ejemplo del “look & feel” del producto final Urban Atlas en la ciudad de Bruselas.
Fuente: Mapping Guide 4.7 for a European Urban Atlas (European Union, 2016)

Con 17 clases, el Urban Atlas 2006 se centró solamente en áreas urbanas. Ya que los límites rurales se consideraron menos importante, únicamente se representaron con cuatro clases. El feedback de la comunidad de usuarios y un mejor conocimiento del rol de los límites rurales en los procesos de crecimiento urbano, tuvo influencia en la extensión de la nomenclatura para el Urban Atlas 2012 en la que se representaron un total de 10 clases agrícolas o seminaturales (Tabla 2). A partir del año 2012, fue posible incluir una capa de cambios, al menos para las AUFs incluidas en 2006. Además, el Urban Atlas 2012 se ha mejorado incluyendo una capa de información denominada Street Tree Layer, por ejemplo: una clasificación automática de los árboles situados en las carreteras, en parques y en jardines.

Casi todas las ciudades tienen cada vez más información detallada a nivel local.

De todos modos, el valor añadido del Urban Atlas es que proporciona información estandarizada para todas las AUFs mapeadas. Las autoridades locales y los legisladores pueden comparar sus propias ciudades con otras ciudades de la UE. Tener una fuente de información estandarizada para patrones espaciales en áreas urbanas permite monitorizar las políticas urbanas en el conjunto de Europa. Puede servir como herramienta para realizar comparativas de mercado entre las distintas ciudades europeas. Para las políticas europeas, el Urban Atlas proporciona un mejor conocimiento de las ciudades y su estructura, y por tanto facilitando la tarea a los legisladores. Todo esto es crítico para identificar y apuntalar las iniciativas políticas europeas más apropiadas en el dominio urbano, en áreas que van desde el desarrollo de infraestructuras para el transporte público, las evaluaciones de riesgos de inundación, el conocimiento del ecosistema urbano y muchas más aplicaciones.

Tabla 1. Características del Urban Atlas
Fuente: Urban Atlas Factsheet (EEA, 2016)

Characteristic	Ua2006	Ua2012
Nr. of FUAs	305	695
Total area	640.500 km ²	1.015.600 km ²
Minimum Mapping Unit (MMU)	0.25ha in urban areas, 1 ha in rural areas	0.25ha in urban areas, 1 ha in rural areas
Min. Mapping Width	10m	10m
MMU change layer		Class 1 to class 1 = 0.1 ha Class 2 - 5 to class 1 = 0.1 ha Class 2 - 5 to Class 2 - 5 = 0.25 ha Class 1 to Class 2 - 5 = 0.25 ha
Positional accuracy	+/- 5m	+/- 5m
Nr. of classes	21	27
Min. overall accuracy for "artificial surfaces" classes	85%	85%
Min. overall accuracy (all classes)	80%	80%

Tabla 2. Clases del Urban Atlas
Fuente: Urban Atlas Factsheet (EEA, 2016)

Urban Atlas		2006	2012
Legende Code	Nomenclature		
11100	Continuous Urban Fabric (S.L.>80%)		
11210	Discontinuous Dense Urban Fabric (S.L.: 50% - 80%)		
11220	Discontinuous Medium Density Urban Fabric (S.L.: 30%-50%)		
11230	Discontinuous Low Density Urban Fabric (S.L.:10%-30%)		
11240	Discontinuous Very Low Density Urban Fabric (S.L.<10%)		
11300	Isolated Structures		
12100	Industrial, commercial, public, military and private units		
12210	Fast transit roads and associated land		
12220	Other roads and associated land		
12230	Railways and associated land		
12300	Port areas		
12400	Airports		
13100	Mineral extraction and dump sites		
13300	Construction sites		
13400	Land without current use		
14100	Green urban areas		
14200	Sports and leisure facilities		
20000	Agricultural + Semi-natural areas + Wetlands		
21000	Arable land (annual crops)		
22000	Permanent crops		
23000	Pastures		
24000	Complex and mixed cultivation patterns		
25000	Orchards		
31000	Forests		
32000	Herbaceous vegetation associations		
33000	Open spaces with little of no vegetations		
40000	Wetlands		
50000	Water bodies		

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

El análisis comparativo de la morfología de las áreas metropolitanas europeas es un tema de estudio que ha interesado a los investigadores y a los expertos de planificación territorial y urbana a lo largo de los años. Sin embargo, la falta de datos homogéneos y detallados referentes a usos y coberturas del suelo ha impedido que se progrese en este campo de estudio. La forma en la que se ha abordado la problemática ha sido mediante la obtención de mapas de usos de suelo para áreas urbanas con una resolución de 30 metros utilizando imágenes Landsat. Cabe destacar que dicha información se obtenía para ciudades de forma independiente, siguiendo una clasificación de usos de suelo ad hoc para cada caso y haciendo la comparativa entre ciudades muy complicada. Hasta no hace demasiado tiempo, la única fuente consistente de mapas de usos del suelo era la base de datos del proyecto CORINE Land Cover (Büttner, Feranec, & Jaffrain, 2002). La base de datos se editó por primera vez en 1990 y se ha actualizado en el año 2000, 2006, 2012 y 2018. El CORINE Land Cover tiene una resolución de 100 metros y los usos del suelo se clasifican en 44 clases distintas, aunque únicamente 2 de las clases hacen referencia a la densidad de áreas edificadas, lo cual es un aspecto crucial en los estudios de áreas urbanas.

Con el objetivo de proporcionar información más detallada de las ciudades europeas, la EEA a través del programa Copernicus distribuye el Atlas Urbano (UA), que proporciona mapas de cobertura y ocupación del suelo de muy alta resolución, fiables y comparables, para las principales ciudades europeas y sus áreas metropolitanas para los años 2006 (305) y 2012 (695), generando un total de 27 clases de usos de suelo.

El Atlas Urbano (UA) permite analizar las ciudades de diversas maneras, como estimar el porcentaje de cobertura de las distintas clases de usos de suelo. Sin embargo, esta metodología no tiene en cuenta aspectos importantes como la agregación, dispersión y patrones de proximidad de los usos del suelo. Para obtener esta información, se pueden utilizar índices espaciales cuantitativos, originalmente introducidas en paisajismo ecológico (Turner, 1989). Estos índices permiten medir diferentes aspectos espaciales de mapas categóricos, como el número total de teselas urbanas y su tamaño promedio (Botequilha & Ahern, 2002).

En las últimas décadas, los índices espaciales se han utilizado de forma frecuente como indicadores que describen la morfología urbana. La aplicación más común estima las métricas para detección de cambios en distintos períodos de tiempo (Ramachandra, Bharath, & Sreekantha, 2012). Los índices se utilizan también para ilustrar cambios en la morfología urbana (Aguilera, Botequilha, & Díaz, Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal), 2014), para evaluar la capacidad de adaptación de los modelos de crecimiento urbano (Aguilera, Valenzuela, & Botequilha, Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area, 2011) y para comparar la morfología de distintas ciudades o regiones (Triantakoustantis & Stathakis, 2015).

Los índices espaciales no son la única manera de analizar la morfología urbana. (Guérois & Pumain, 2008) comparan 40 ciudades europeas utilizando funciones lineales que describen el gradiente de las

superficies edificadas. Basados en conceptos metodológicos desarrollados por (Frankhauser, 2004), el análisis fractal también se ha utilizado para determinar la morfología urbana.

La estimación de métricas utilizando el Atlas Urbano presenta algunos problemas metodológicos que se deben solucionar con el fin de disponer de una comparativa fiable y homogénea. Los mapas del Atlas Urbano son de alta resolución y cada manzana se le asocia un uso del suelo. Las métricas estimadas con estos mapas (Prastacos, Lagarias, & Chrysoulakis, 2017) se ven afectadas por los patrones de distribución de los usos del suelo y de la disposición de las manzanas. La continuidad de los usos del suelo no es evidente debido a que las zonas vecinas del mismo tipo están separadas por calles, a pesar de que sean del mismo tipo. Además, el Atlas Urbano contiene información para un número elevado de clases, aunque algunas de ellas representen una proporción muy pequeña del área urbana.

En este estudio se propone una metodología para calcular índices espaciales utilizando el Atlas Urbano del programa Copernicus. Esta metodología se aplica para estimar los índices espaciales de ocho AUFs intermedias en Europa, con una población de entre 1 y 2 millones de habitantes. El objetivo final es llevar a cabo un análisis comparativo de la morfología urbana y territorial de estas áreas, centrándose en aspectos como la fragmentación urbana y la equidad espacial, y su influencia sobre la sostenibilidad urbana. Se pretende así comparar los modelos urbanos desarrollados en cada ciudad y su influencia en la sostenibilidad, y obtener así claves para la toma de decisión territorial y urbana.

La Figura 16 presenta un resumen del itinerario de cálculo seguido durante el análisis comparativo de la sostenibilidad urbana de las ocho Áreas Urbanas Funcionales intermedias seleccionadas.

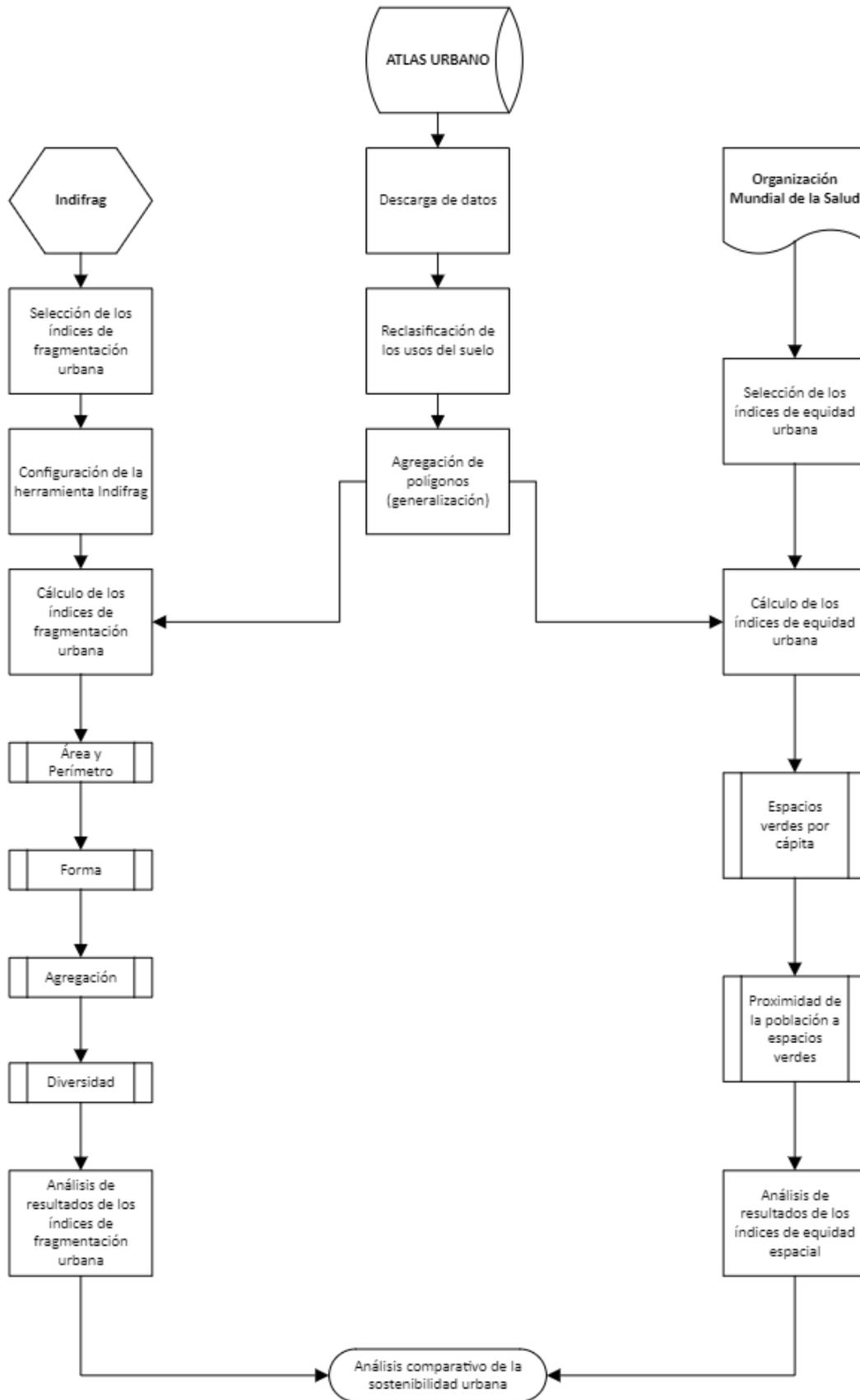


Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología general utilizada.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. ÁREA DE ESTUDIO

El presente TFM se centra en el cálculo de índices desde una perspectiva espacial, centrándose en aspectos como son la fragmentación de los usos del suelo y la equidad espacial, que se utilizarán para cuantificar y caracterizar indicadores de sostenibilidad urbana. Se plantea un análisis comparativo de ocho AUFs intermedias en Europa con datos del programa Copernicus. Las ocho AUFs seleccionadas están distribuidas homogéneamente en el territorio (Figura 17), dos por cada una de las regiones geográficas (norte, sur, este y oeste) del estándar M49 de Naciones Unidas, que se utiliza para propósitos estadísticos. Además, estas AUFs tienen unas características poblacionales similares, mayores de 900.000 habitantes y menores de 2.200.000 habitantes, utilizando datos de número de población estimada para 2012 incluida en Urban Atlas 2012. Esto representa aproximadamente un 20% de las AUFs con estas mismas características poblacionales. En un estudio más detallado, cabría la posibilidad de ampliar la lista de ciudades y sus correspondientes AUFs para disponer de más información.

A continuación, se muestra la lista de estas ocho AUFs (Tabla 3).

Tabla 3. Área de Estudio

Código AUF	Nombre AUF	País	Regiones geográficas (M49)	Población estimada 2012 (Habitantes)	Área (Km ²)
IE001	Dublin	Ireland	Northern Europe	1.781.007	7.016,44
FI001	Helsinki	Finland	Northern Europe	1.370.911	4.945,9
PL003	Kracow	Poland	Eastern Europe	1.373.909	3.757,74
FR003	Lyon	France	Western Europe	1.897.722	3.669,73
DE014	Nuremberg	Germany	Western Europe	1.273.542	2.934,32
CZ001	Prague	Czech Republic	Eastern Europe	2.121.603	5.706,17
EL002	Thessaloniki	Greece	Southern Europe	927.217	1.413,59
ES003	Valencia	Spain	Southern Europe	1.714.585	1.749,45



Figura 17. Área de Estudio

Fuente: Elaboración propia.

4.3. DESCARGA DE DATOS

La descarga de datos se hará a través de la página <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas> perteneciente al Servicio de Monitorización de la Tierra del programa Copernicus (Figura 18).



Figura 18. Descarga de datos del Urban Atlas.

Fuente: Copernicus Land Monitoring Service

Es posible realizar la descarga de los productos utilizando los servicios web disponibles siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

1. Navegar para encontrar los productos que se deseen descargar. Cada uno de los productos contiene una vista de mapa, metadatos y un botón de descarga.
2. Para realizar la descarga, es necesario pulsar el botón de descarga para comenzar con el proceso. Para ello es necesario registrarse en la plataforma.
3. De forma adicional, es posible acceder a un visor on-line y a los servicios web del producto. Para ello, utilizando el map view, haciendo zoom en el área de interés y seleccionando dicha área, se puede realizar la descarga de los datos. Finalmente, para acceder utilizando los servicios web, es necesario acceder a la vista de map, hacer click en el servicio web y seguir los pasos que se detallan a continuación.

La sección de metadatos en la página del producto proporciona la metainformación clave acerca del producto. Es importante enfatizar que los metadatos están alineados con la Directiva INSPIRE.

Los metadatos de los productos principales del Servicio de Monitorización de la Tierra se almacenan en el catálogo de metadatos de la EEA. Este catálogo que cumple con la Directiva INSPIRE es compatible con el Catálogo de Servicios Web (CSW) 2.0.2 del Open Geospatial Consortium (OGC). Este proporciona sus servicios a través de GeoNetwork, un catálogo de servicios de metadatos de código libre.

4.4. RECLASIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO

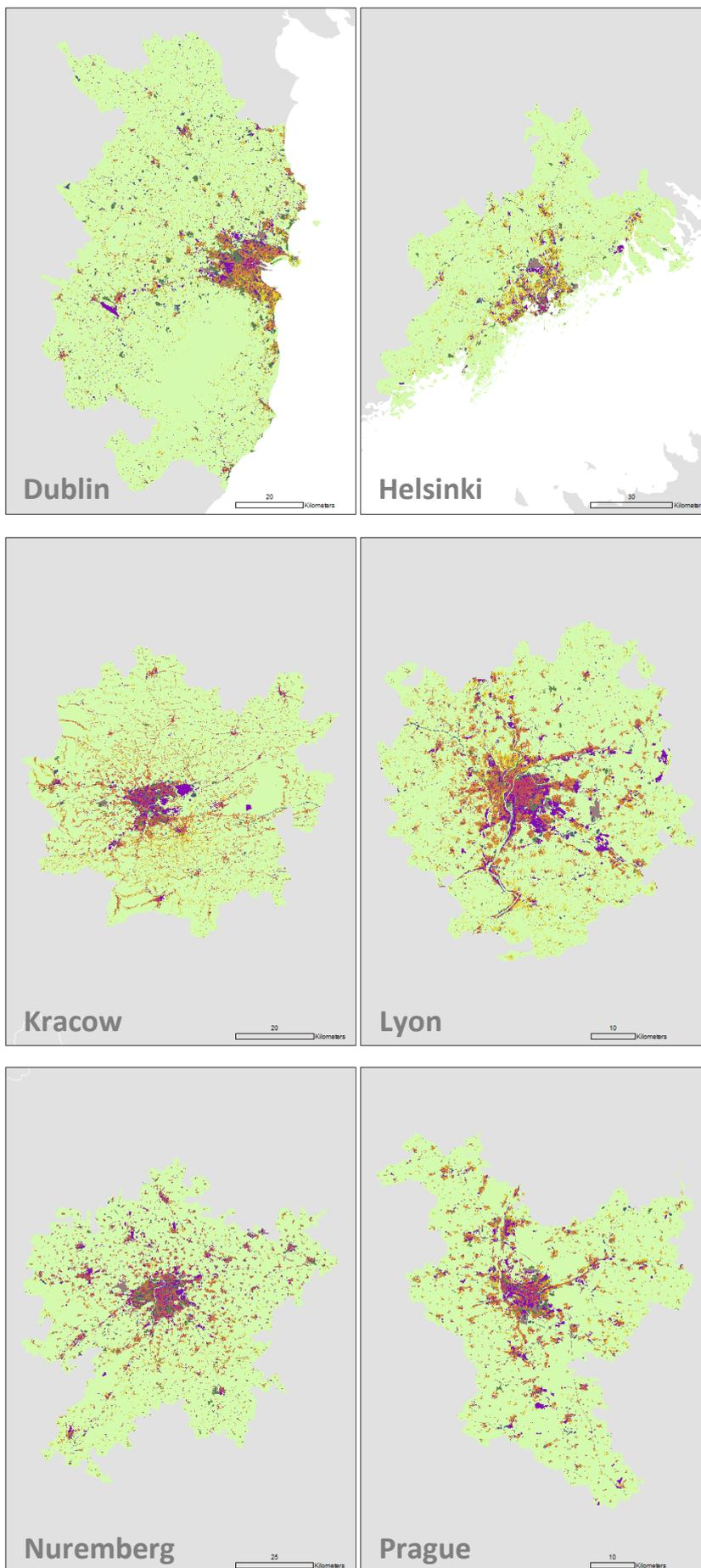
Varias de las clases de usos del suelo identificadas en Urban Atlas representan un porcentaje muy pequeño del área urbana, lo que dificulta obtener una visión significativa de la forma de la ciudad mediante un análisis detallado. Para abordar este problema, se ha reclasificado el total de 27 clases del Urban Atlas a solo 8 clases (Tabla 4). Esto implica agrupar las clases de usos de suelo originales en un número menor de categorías y considerar zonas vecinas con características similares para generar áreas continuas más grandes. Las ocho clases resultantes incluyen tres que representan zonas de tejido urbano.

Además, las infraestructuras de transporte (*Fast transit roads and associated land, Other roads and associated land, Railways and associated land, Port areas y Airports*) se han agrupado en una sola clase. De manera similar, se han unificado las clases para espacios verdes, instalaciones deportivas y de ocio. Lo mismo se ha hecho para las zonas agrícolas, bosques y masas de agua.

Con esta metodología se enfatiza la continuidad de los usos del suelo en lugar de la distribución en categorías más pequeñas (Figura 19).

Tabla 4. Clasificación de usos de suelo para la estimación de métricas espaciales

Clase	Nombre	Código Urban Atlas	Grado de sellado
C1	Continuous Urban Fabric	11100: Continuous Urban fabric (S.L. > 80%)	> 80%
C2	Discontinuous Dense Urban Fabric	11210: Discontinuous Dense Urban Fabric (S.L.: 50% - 80%)	50% - 80%
C3	Discontinuous Urban Fabric	11220: Discontinuous Medium Density Urban Fabric (S.L.: 30% - 50%) 11230: Discontinuous Low Density Urban Fabric (S.L.: 10% - 30%) 11240: Discontinuous very low density urban fabric (S.L. < 10%) 11300: Isolated Structures	< 50%
C4	Industrial, commercial, public, military and private units	12100: Industrial, commercial, public, military and private units	
C5	Transport infrastructure	12210: Fast transit roads and associated land 12220: Other roads and associated land 12230: Railways and associated land 12300: Port areas 12400: Airports	
C6	Mine/Dump sites, Construction/Land without use	13100: Mineral extraction and dump sites 13300: Construction sites 13400: Land without current use	
C7	Green areas, sports and leisure facilities	14100: Green urban areas 14200: Sports and leisure facilities	
C8	Agriculture, Forest, Water	21000: Arable land (annual crops) 22000: Permanent crops 23000: Pastures 24000: Complex and mixed cultivation patterns 25000: Orchards 31000: Forests 32000: Herbaceous vegetation associations 33000: Open spaces with little or no vegetations 40000: Wetlands 50000: Water	



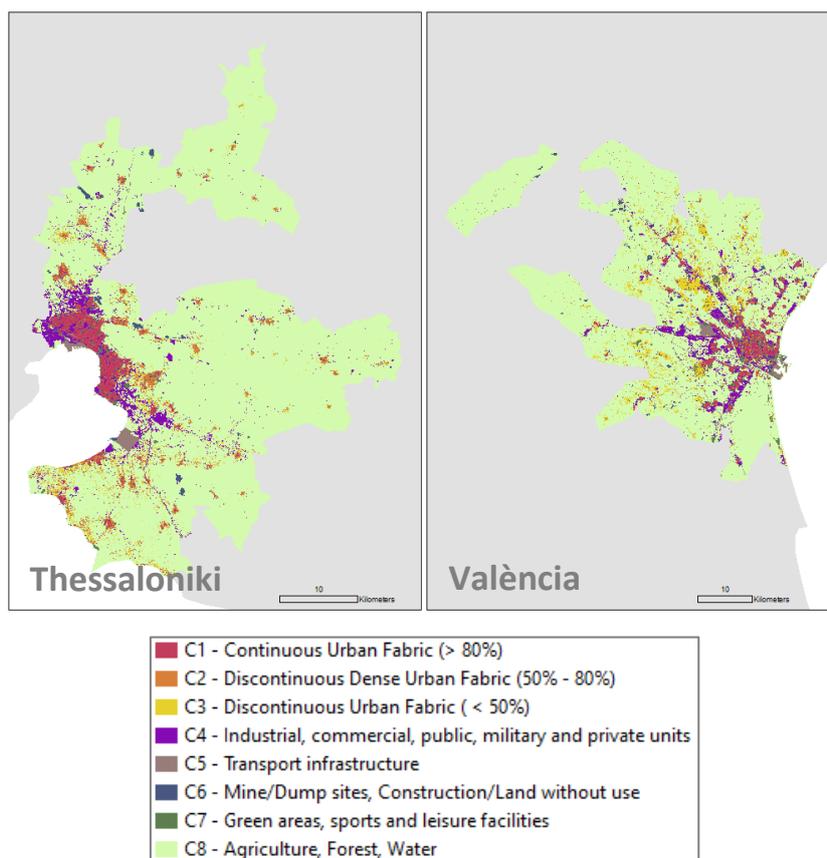


Figura 19. Mapa de usos del suelo para las ocho AUF.
Fuente: Elaboración propia.

Los índices espaciales se han calculado para un total de ocho AUFs, utilizando la información proporcionada por el Urban Atlas 2012. Los datos de población varían desde los 927.217 habitantes de Thessaloniki a los 2.121.603 habitantes de Praha, y las superficies totales desde los 1.413,59 km² de Thessaloniki a los 7.016,44 km² de Dublin.

Las superficies artificiales representan más del 23% del área total en Lyon, mientras que en otras ciudades no llega al 15% del área total. La densidad de población (población dividida por las superficies artificiales) supera los 4.000 habitantes/km² en Thessaloniki y en Valencia (Tabla 5). La distribución de las tres clases de "Urban Fabric" (C1, C2 y C3) varía significativamente entre las distintas AUF. (Figura 20). Por ejemplo, en algunas AUF como Dublin, la clase C1 - *Continuous Urban Fabric (> 80%)* es relativamente pequeña en comparación con la clase C3 - *Discontinuous Urban Fabric (< 50%)*. En otros casos, como en Thessaloniki, la clase C1 - *Continuous Urban Fabric (> 80%)* ocupa una parte significativa del área total. Estas diferencias en la distribución de categorías reflejan las características urbanas y de desarrollo en cada una de las AUF y pueden tener implicaciones en términos de planificación urbana y políticas de desarrollo.

Tabla 5. Población, área, superficie artificial, densidad de población y distribución "Urban Fabric" para las ocho AUF.

Nombre AUF	Población Estimada 2012 (Habitantes)	Área (Km ²)	% Artificial	Densidad de población (Habitantes/km ²)	Distribución "Urban Fabric" (%) ²		
					C1 ³	C2 ⁴	C3 ⁵
Dublin	1.781.007	7.016,44	14,7	254	2	33	65
Helsinki	1.370.911	4.945,90	14,9	277	3	13	84
Krakov	1.373.909	3.757,74	17,5	366	12	56	32
Lyon	1.897.722	3.669,73	23,2	517	11	49	40
Nuremberg	1.273.542	2.934,32	17,0	434	11	53	36
Prague	2.121.603	5.706,17	16,7	372	23	53	23
Thessaloniki	927.217	1.413,59	15,1	656	32	41	27
Valencia	1.714.585	1.749,45	22,7	980	24	11	66

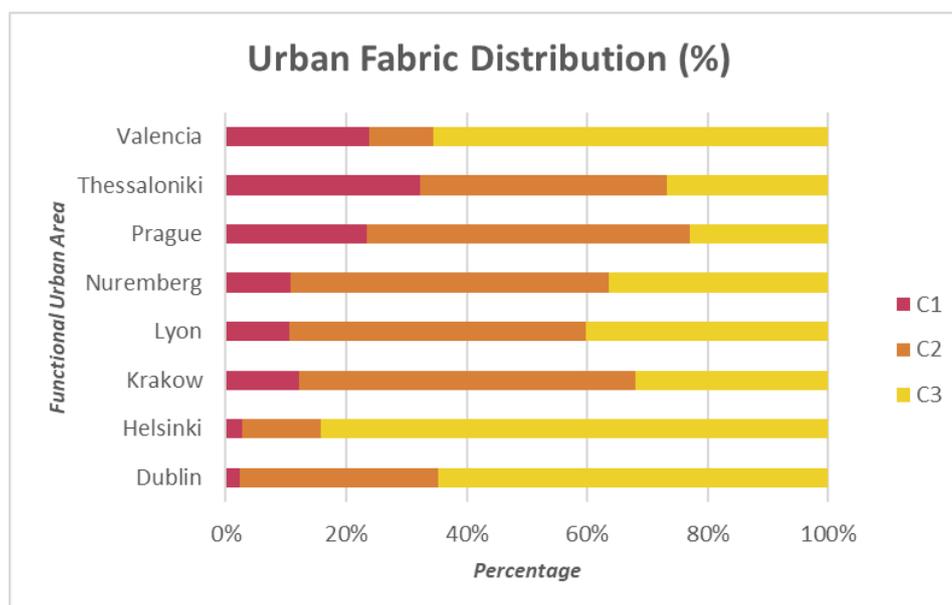


Figura 20. Distribución "Urban Fabric" para las ocho AUF

Fuente: Elaboración propia.

4.5. AGREGACIÓN DE POLÍGONOS (GENERALIZACIÓN)

La base de datos del Urban Atlas está compuesta por polígonos que corresponden a manzanas. Aplicando la herramienta "Agregar polígonos" del software ArcGIS de ESRI (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/cartography-toolbox/aggregate-polygons.htm>), el mapa de usos del suelo urbano original se ha transformado en un mapa en el que los polígonos de

² Porcentaje de suelo artificial en relación con las clases de "Urban Fabric" (C1, C2 y C3).

³ C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)

⁴ C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)

⁵ C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%)

una misma clase dentro de una determinada distancia se han agregado para formar nuevos polígonos. La distancia de agregación utilizada ha sido de 20 metros, es decir, que los polígonos de una misma clase separados por una calle de menos de 20 metros de ancho se agregan y el segmento de calle que los separa se reclasifica a esa misma clase, formando un polígono de mayor tamaño. Otros parámetros que se han definido en el proceso hacen referencia a mantener todos los agujeros en polígonos (*minimum_hole_size*) y a mantener todos los polígonos independientemente de su área (*minimum_area*). Con el proceso de agregación, el número de polígonos se ha reducido de forma, drástica teniendo en cuenta que los polígonos adyacentes de una misma clase se agregan en un mismo polígono.

En Valencia, en número de polígonos de la clase *C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)* ha disminuido de 7,834 a 558 mientras que el área asociada ha incrementado de 38.68 km² a 44.11 km². El área promedio del polígono para esta misma clase ha incrementado de 4937 m² a 79045 m². A continuación, se pueden observar los mapas del centro de Valencia antes y después del proceso de agregación de polígonos (Figura 21).

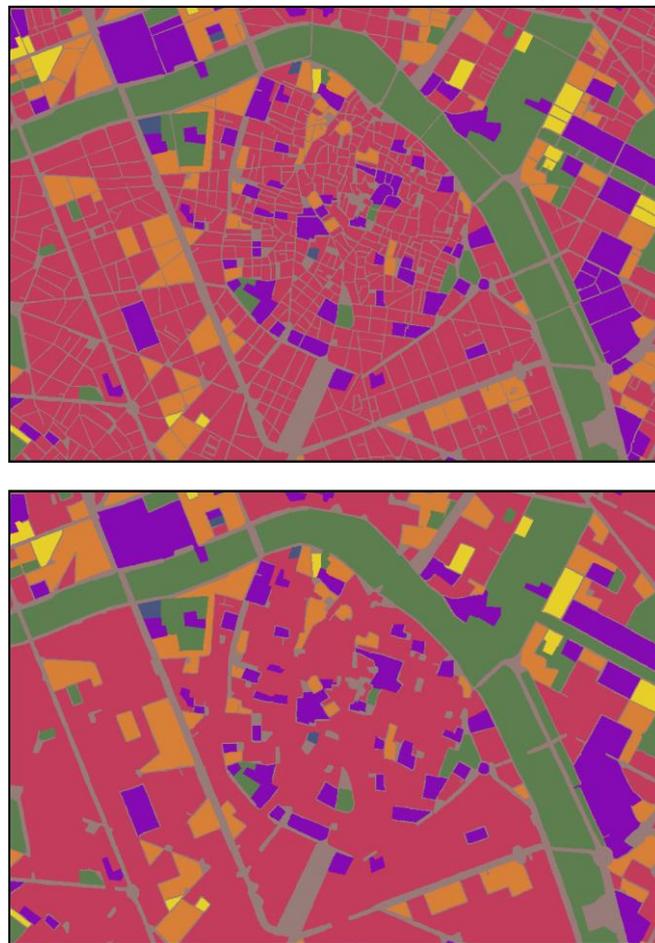


Figura 21. Mapas del centro de Valencia antes y después del proceso de agregación de polígonos.
Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento de generalización afecta tanto al Número de Objetos (NO) como al área de las tres clases de tejido urbano. Después del proceso de agregación, el NO de las clases C1, C2 y C3 representan respectivamente solo el 3.29%, 7.86% y 31.94% del número de polígonos total, mientras que el área de la clase aumenta el 14.02%, 3.44% y 5.48% respectivamente. Es decir, a medida que la

densidad de construcción (medida por el grado de sellado) disminuye, la tasa de fusión de polígonos también disminuye. La alta tasa de compactación de los polígonos *C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)* implica que estos polígonos están agrupados juntos, generalmente en las partes más antiguas del área urbana donde las calles son más estrechas. La tasa de fusión de los polígonos *C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)* es la más baja, aunque no es muy diferente de la de *C3 - Discontinuous Dense Urban Fabric (< 50%)*. Normalmente la clase *C3*, que incluye los "edificios aislados", es la que generalmente no se ve tan afectada por el procedimiento de agregación (en la capa original, el 4.75% de los polígonos de *C3* en Valencia se clasifican como "edificios aislados").

4.6. SELECCIÓN DE LOS ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN URBANA

Tras la introducción de los índices de fragmentación del paisaje en el apartado marco teórico de este estudio, a continuación, se describen con detalle los índices seleccionados, según criterios de idoneidad para el análisis urbano y reducción de redundancias. Los índices se han clasificado en función al grupo al que pertenecen y se explican mediante su fórmula, la explicación de las variables, su rango y una breve descripción de su función (Tabla 6).

Tabla 6. Índices de Fragmentación utilizados.

Grupo	Índices
Área y Perímetro	Área (Area) Perímetro (Perim) Densidad de Clase (DC) Tamaño Medio del Objeto (TM) Densidad de Borde (DB)
Forma	Ratio Medio Perímetro-Área (RMPA) Índice de Forma (IF) Dimensión Fractal (DF)
Agregación	Número de Objetos (Nob) Densidad de Objeto (DO) Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo (DEM) Cohesión (COHE) Compacidad de la clase (C)
Diversidad	Diversidad de Shannon (DSHAN) Diversidad de Simpson (USHAN) Índice de Fragmentación Funcional Relativa (IFFR) Índice de Fragmentación Funcional Absoluta (IFFA)

4.6.1. Área (Area)

El área se calcula en los tres niveles (AreaO, AreaCl y AreaSO). Para cada objeto es la superficie que genera el objeto en sí, para cada clase la suma de las áreas de sus objetos y para cada súper-objeto el

área total que éste genera, sin tener en cuenta a los objetos, ya que están siempre dentro de los límites del súper-objeto. La unidad de medida para el área de los objetos son los metros cuadrados (m^2) y para el área de la clase y súper-objeto kilómetros cuadrados (km^2).

4.6.2. Perímetro (Perim)

Igual que en el caso anterior, esta medida se determina para los tres niveles (PerimO, PerimCl y PerimSO), teniendo en cuenta que en el nivel del súper-objeto el perímetro será la longitud del contorno del súper-objeto. Por otro lado, también se calcula el perímetro total (PerimT) del conjunto de todos los objetos, descartando aquellos de la clase de carreteras, junto con el límite del súper-objeto. En el perímetro de cada clase y el total los polígonos contiguos que tienen segmentos duplicados se contabilizan como únicos evitando duplicidades. Para el perímetro de la clase carreteras se contabilizan los contornos exteriores de la unión de todos sus objetos. La unidad de medida del perímetro es el metro (m) para los objetos y el kilómetro (km) para la clase, súper-objeto y total.

4.6.3. Densidad de Clase (DC)

Es la ratio entre la superficie de una clase y la superficie del súper-objeto. Al tratarse de dos superficies con unidades en m^2 el resultado obtenido es un porcentaje (%). Su fórmula a nivel de súper-objeto es la siguiente:

$$DC = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i)}{A_T}$$

Donde:

A_i = área del objeto i en la clase estudiada (m^2).

n = número de objetos en la clase.

A_T = área del súper-objeto (m^2).

Al tratarse de un porcentaje, su valor varía entre cero y uno. Será mayor cuanto mayor sea la densidad de una clase en el súper-objeto.

4.6.4. Tamaño Medio del Objeto (TM)

Este índice se computa tanto a nivel de clase (TMCl) como de súper-objeto (TMSO). En el nivel de clase se trata de la función entre el área total de una clase y el número de objetos de la misma clase. Este índice no aporta información del número de objetos de una clase, se trata de superficies. Por otro lado, a nivel de súper-objeto, se trata de la función entre el área total de los objetos indistintamente de su clase y el número de objetos.

Una variación en el tiempo de este índice indica un cambio en el tamaño de los nuevos objetos, lo cual puede evidenciar cambios en la configuración de la clase.

La fórmula expresada a nivel de clase y súper-objeto en metros cuadrados (m^2) es (Frenkel & Ashkenazi, 2008); (Irwin & Bockstael, 2007); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$TM = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i)}{n}$$

A_i = área del objeto i en la clase o en el súper-objeto (m^2).

n = número de objetos en la clase o en el súper-objeto.

Su rango es todo número positivo, sin contar el cero, y sin límite.

4.6.5. Densidad de Borde (DB)

La Densidad de Borde estandariza el borde en una medida basada por unidad de área, de modo que se hace más sencilla la comparación entre distintas clases (DBCI) y súper objetos (DBSO). Se trata de la suma de los bordes de los objetos de una misma clase o súper-objeto (evitando duplicidades), dividida entre el área total. Su unidad de medida son los metros por metro cuadrado (m/m^2).

Su fórmula es la siguiente (Herold, Scepan, & Clarke, 2002); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$DB = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i)}{A_T}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i en la clase o en el súper-objeto (m).

A_T = área del súper-objeto (m^2).

n = número de objetos en la clase o en el súper-objeto.

Su rango es todo número positivo, cuando es igual a cero significa que no hay objetos dentro del súper-objeto.

4.6.6. Ratio Medio Perímetro-Área (RMPA)

Es la medida más directa de la forma de un objeto, pero tiene la desventaja de que el tamaño del objeto influye en el resultado, cuando se calcula a nivel de objeto (RPA) no se divide entre el número de objetos. Sin embargo, tanto para el nivel de clase (RMPACI) como de súper-objeto (RMPASO) se trata de una media del perímetro-área de todos los objetos que lo forman.

Su fórmula es la siguiente, siendo el resultado adimensional (Irwin & Bockstael, 2007); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$RPA = \frac{P_i}{A_i} , RMPA = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{A_i} \right)}{n}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i de la clase o súper-objeto (m).

A_i = área del objeto i de la clase o súper-objeto (m^2). n = número total de objetos en la clase o súper-objeto.

Su rango es todo número positivo, a excepción del cero, y sin límite.

4.6.7. Índice de Forma (IF)

Este índice es calculable a los tres niveles, calcula la complejidad de la forma de un objeto (IFO) comparándolo con la forma estándar de un cuadrado del mismo tamaño, tiene la ventaja respecto al RMPA de que su valor no varía en función del tamaño del objeto. El índice de forma a nivel de clase (IFCI) es la media de los índices de forma de cada objeto que forma esa clase, del mismo modo, el índice de forma del súper-objeto (IFSO) es la media del índice de forma de todos los objetos sin tener en cuenta su clase.

Su fórmula es la siguiente, siendo el resultado adimensional (Frenkel & Ashkenazi, 2008); (Jiang, Zhang, Liu, & Yau, 2007); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$IF = \frac{0,25 \cdot P_i}{\sqrt{A_i}}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i (m).

A_i = área del objeto i (m^2).

El rango de este es un valor mayor que uno sin límite, cuando el valor es uno se trata de un objeto cuadrado, y aumenta conforme la forma se hace más irregular y compleja.

4.6.8. Dimensión Fractal (DF)

Es otra de las medidas básicas de la forma de los objetos, basada en la relación área-perímetro. La dimensión fractal se calcula para cada objeto separadamente y, además, se puede calcular para los tres niveles: objeto (DFO), clase (DFCI) y súper-objeto (DFSO). En los dos últimos es la media de la dimensión fractal de los objetos que forman parte de la clase o súper-objeto. Esta medida aporta información de la complejidad de los objetos sin ser afectada por la escala de los datos, es decir, por su tamaño.

Su fórmula es la siguiente, siendo adimensional el resultado (Frenkel & Ashkenazi, 2008); (Gong, Yu, Joesting, & Chen, 2013); (Herold, Scepan, & Clarke, 2002); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$DF = \frac{2 \cdot \ln(0,25 \cdot P_i)}{\ln(A_i)}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i (m).

A_i = área del objeto i (m^2).

4.6.9. Número de Objetos (Nob)

Número de objetos en cada clase (NobCI) y súper-objeto (NobSO). En el caso del súper-objeto se tienen en cuenta todos los objetos excepto los de la clase asociada a las carreteras si se ha asignado

previamente este uso. Es una medida sencilla, necesaria para calcular otros índices. Su rango es todo número positivo.

4.6.10. Densidad de Objeto (DO)

Este índice se calcula a nivel de clase (DOCI) y de súper-objeto (DOSO), expresa el número de objetos por una unidad de área, lo cual facilita la comparación entre súper-objetos, independientemente de su tamaño.

Su fórmula es la siguiente, siendo las unidades el número de objetos por kilómetro cuadrado (n^o/km^2) (Gong, Yu, Joesting, & Chen, 2013); (Herold, Scepan, & Clarke, 2002); (Irwin & Bockstael, 2007); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$DO = \frac{n}{A_T}$$

Donde:

A_T = área total del súper-objeto (km^2)

n = número total de objetos en la clase o súper-objeto.

Su rango es todo valor positivo, sin límite, cuanto mayor sea la densidad en una clase mayor será su subdivisión en distintos objetos.

4.6.11. Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo (DEM)

Este índice se utiliza para calcular la separación de los objetos entre los de su misma clase, para dar una idea de la distribución de estos. La media se realiza con el fin de poder comparar entre las clases de un mismo súper-objeto o las mismas clases entre varios súper-objetos.

Su fórmula es la siguiente, siendo el metro la unidad (Gong, Yu, Joesting, & Chen, 2013); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$DEM = \frac{\sum_{i=1}^n (D_{ij})}{n}$$

Donde:

D_{ij} = distancia del objeto i al objeto más próximo j (de contorno a contorno) de la misma clase, será cero cuando sean contiguos (m).

n = número total de objetos en la clase.

Su rango es todo valor positivo, sin límite, cuanto mayor sea esta distancia, mayor desagregación habrá entre los objetos de una clase.

4.6.12. Cohesión (COHE)

El índice de Cohesión mide la conectividad de la clase (COHECI) o súper-objeto (COHESO), dependiendo del nivel al que se evalúe. La Cohesión aumenta cuanto más agregados en su distribución estén los objetos de una misma clase o súper-objeto, es decir, más conectados estén entre sí.

Su fórmula es la siguiente, siendo su resultado adimensional (MacLean & Congalton, 2013); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$\text{COHE} = \frac{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot \sqrt{A_i})} \right)}{1 - \left(\frac{1}{\sqrt{A_T}} \right)}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i (m).

A_i = área del objeto i (m^2).

A_T = área total de la clase o súper-objeto (m^2).

n = número de objetos en la clase o súper-objeto.

Su rango es de 0 a 100. Es próximo a 0 cuando los objetos no están conectados entre sí y el súper-objeto se encuentra más subdividido. Aumenta con la conectividad de la clase.

4.6.13. Compacidad de la clase (C)

Este índice muestra la compacidad de los objetos de una clase. La compacidad expresa la idea de proximidad de los objetos de una clase que configuran un súper-objeto, su fórmula es la siguiente (Zhang et al., 2016):

$$C = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \sum_{i=1}^n (A_i)}}{\sum_{i=1}^n (P_i)}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i de la clase estudiada (m).

A_i = área del objeto i de la clase estudiada (m^2).

Cuanto mayor es la compacidad mayor agregación espacial de la clase, y por lo tanto menor dispersión de los objetos.

4.6.14. Diversidad de Shannon (DSHAN)

Este índice es el más comúnmente utilizado en este grupo, sin embargo, el valor absoluto de este índice no es particularmente significativo. Por ello, se utiliza como medida relativa para comparar diferentes súper-objetos, o el mismo en diferentes periodos de tiempo. Se calcula a nivel de Súper-Objeto.

DSHAN cuantifica la diversidad en función del número de clases presentes en el súper-objeto (riqueza) y la proporción de superficie de cada clase (uniformidad). Por ejemplo, en dos súper-objetos con el mismo número de clases, tendrá mayor DSHAN aquel en que las superficies de cada clase sean más parecidas. No está afectado por el tamaño del súper-objeto y, además, premia un mayor número de clases a la uniformidad de estas.

Su fórmula es la siguiente, siendo adimensional su resultado (Colaninno, Alhaddad, & Roca, 2011); (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$DSHAN = - \sum_{i=1}^m [P \cdot (\ln(P))]$$

Donde:

P = porción del súper-objeto ocupado por la clase i , ratio entre A_i/A_T .

A_i = área de la clase i (m^2).

A_T = área total del súper-objeto (m^2).

m = número de clases en el súper-objeto.

Su rango, es todo número positivo sin límites, es cero cuando el súper-objeto sólo contiene un objeto en su interior, aumenta conforme se incrementa su riqueza en su interior.

4.6.15. Diversidad de Simpson (USHAN)

Este índice de diversidad es menos sensible a clases que tienen una presencia escasa en el súper-objeto, pero su interpretación es más intuitiva que DSHAN. Representa la probabilidad de que dos objetos del súper-objeto sean de distinta clase. Se calcula a nivel de Súper-Objeto.

Su fórmula es la siguiente, siendo adimensional (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012):

$$SIMP = 1 - \sum_{i=1}^m (P^2)$$

Donde:

P = porción del súper-objeto ocupado por la clase i , ratio entre A_i/A_T .

A_i = área de la clase i (m^2).

A_T = área total del súper-objeto (m^2).

m = número de clases en el súper-objeto Su rango varía de cero a uno.

Es igual a cero cuando sólo hay una clase, por lo que no hay diversidad, se acerca a uno cuando la distribución entre los tipos de clases es más uniforme.

4.6.16. Índice de Fragmentación Funcional Relativa (IFFR)

Este índice señala el nivel de fragmentación funcional dentro del perímetro analizado en relación con las áreas funcionales disponibles en el súper-objeto y las áreas funcionales totales entre todos los súper-objetos. Se entiende por área funcional a las clases disponibles en el área de estudio.

Su fórmula es la siguiente, siendo su resultado adimensional (Marinescu & Avram, 2012):

$$IFFR = \frac{(R_v - m)}{(R_v - 1)}$$

Donde:

R_v = valor de referencia, dado por el número total de áreas funcionales o clases en todo el conjunto de súper-objetos analizados.

m = número de áreas funcionales (clases) en el súper-objeto.

Su rango varía entre cero y uno. Cuando IFFR es menor resulta en un alto número de áreas funcionales. Por otro lado, cuando IFFR aumenta deriva la homogeneidad urbana.

4.6.17. Índice de Fragmentación Funcional Absoluta (IFFA)

Este índice mide el nivel de integración funcional y estructural dentro del perímetro analizado, tiene en cuenta el tamaño del perímetro medio de las áreas funcionales de la zona de estudio.

Su fórmula es la siguiente, siendo adimensional (Marinescu & Avram, 2012):

$$IFFA = \frac{P_T}{\sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n (P_{ij}))}$$

Donde:

P_i = perímetro del objeto i (m).

P_T = valor referencial del área funcional (m) (perímetro total del súper-objeto).

n = número de objetos en la clase.

m = número de clases en el súper-objeto.

Su rango es todo número positivo. Cuando IFFA es menor resulta en alta fragmentación funcional. Por otro lado, cuando IFFA aumenta su integración urbana también, derivando la homogeneidad urbana.

4.7. CONFIGURACIÓN Y USO DE LA HERRAMIENTA INDIFRAG PARA EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN URBANA

Para realizar el cálculo de los índices de fragmentación urbana, se ha utilizado la aplicación IndiFrag (v2.1), que es una aplicación ArcToolBox para ArcGIS creada por el Grupo de Cartografía, GeoAmbiental y Teledetección de la Universitat Politècnica de València.

La herramienta IndiFrag v2.1 no requiere instalación, sin embargo, se necesita tener instalado el programa ArcGIS 10.1 en el PC (si bien se prevé su uso en diferentes entornos, la herramienta ha sido validada hasta el momento para el SO Windows 7 y 10 de 32 y 64 bits). Ésta se compone de un fichero comprimido que contiene:

- IndiFrag v2.1: La Toolbox.
- Other_Libraries: Las librerías de Python necesarias para su ejecución, éstas añadirán funciones adicionales a este lenguaje.
- IndiFrag v2.1/IF_library: La librería propia creada para la herramienta.
- GuiaUsuario: La guía de usuario.
- Help_Documents: Los documentos html de ayuda de las distintas ventanas.
- Tutorial_Shapes: Las capas utilizadas en el tutorial, que sirven de ejemplo.
- Licensing: Licencia y disclaimer de la herramienta.
- README: Un fichero de texto con instrucciones de instalación.

Las librerías son necesarias para ciertas funciones del código, por lo que sin su instalación no podría ejecutarse la herramienta. En cuanto a la estructura de IndiFrag, se divide en dos cajas de herramientas (Toolsets); La primera, "Fragmentation Analysis", donde se calculan todos los índices de fragmentación seleccionados en la herramienta para una fecha. La segunda, "Multi-temporal Analysis" que cuantifica y describe los cambios ocurridos en dos niveles jerárquicos distintos en un periodo de tiempo. En cada una de estas herramientas se encuentran los Scripts, que contienen las instrucciones de geoprocésamiento que cada ventana lleva a cabo. Su esquema se muestra en la Figura 22.

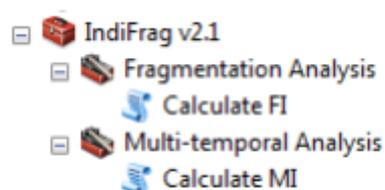


Figura 22. Esquema de la herramienta IndiFrag v2.1.
Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

La herramienta IndiFrag se puede descargar desde la página web <http://cgat.webs.upv.es/software/>.

Como se menciona anteriormente las librerías de Python son necesarias para ejecutar ciertas funciones del código.

La mayoría de las librerías utilizadas se instalan automáticamente al instalar ArcGis, ya que con el programa también se instala por defecto Python (Python 2.7 para ArcGis 10.1) y un conjunto de

librerías básicas, las cuales no es necesario instalar puesto que ya lo están y la herramienta las carga al inicio del proceso de ejecución para así poder utilizar sus métodos y funciones. Si el ordenador donde se va a ejecutar la herramienta tiene instalado otra versión de Python o en otro directorio, es posible que surja un error en la lectura de las librerías, en ese caso habría que revisar los PATHS del sistema y asegurarse de que "C:\Python27\ArcGIS10.1\python.exe" está en las rutas.

Por ello, sólo es necesario instalar las siguientes librerías localizadas en la carpeta "Other_Libraries" (este procedimiento se realiza una sola vez): 'Numpy' es un paquete fundamental para el cálculo científico con Python, 'Matplotlib' es un paquete que permite generar gráficos con los datos que se le proporcionan y 'Pyparsing' es una librería utilizada para extraer información de un texto, en este caso es necesaria para ciertas funciones de Matplotlib (Figura 23).

Finalmente, 'IF_Library' forma parte del conjunto de librerías necesarias. Ha sido creada específicamente para llevar a cabo los cálculos de IndiFrag. A pesar de que no necesita instalación, es necesario que se encuentre en la misma ruta que la herramienta, y mantenerla en esta ruta siempre que se quiera ejecutar la herramienta.

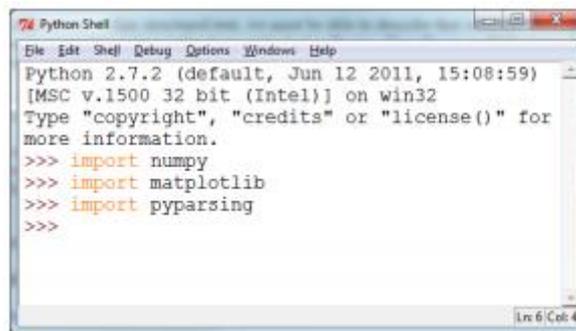


Figura 23. Comandos para comprobar que la instalación es correcta.

Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

Para poder ejecutar IndiFrag, es fundamental contar con una capa vectorial que incluya entidades poligonales. En este caso, se utilizará la capa generada en el apartado 4.5, la cual fue obtenida a partir de la información del Urban Atlas y procesada de acuerdo con lo descrito anteriormente. Esta capa contiene los objetos cartográficos clasificados, los cuales constituyen la unidad mínima de procesamiento y a través de los cuales se realizará el cálculo (Figura 24).

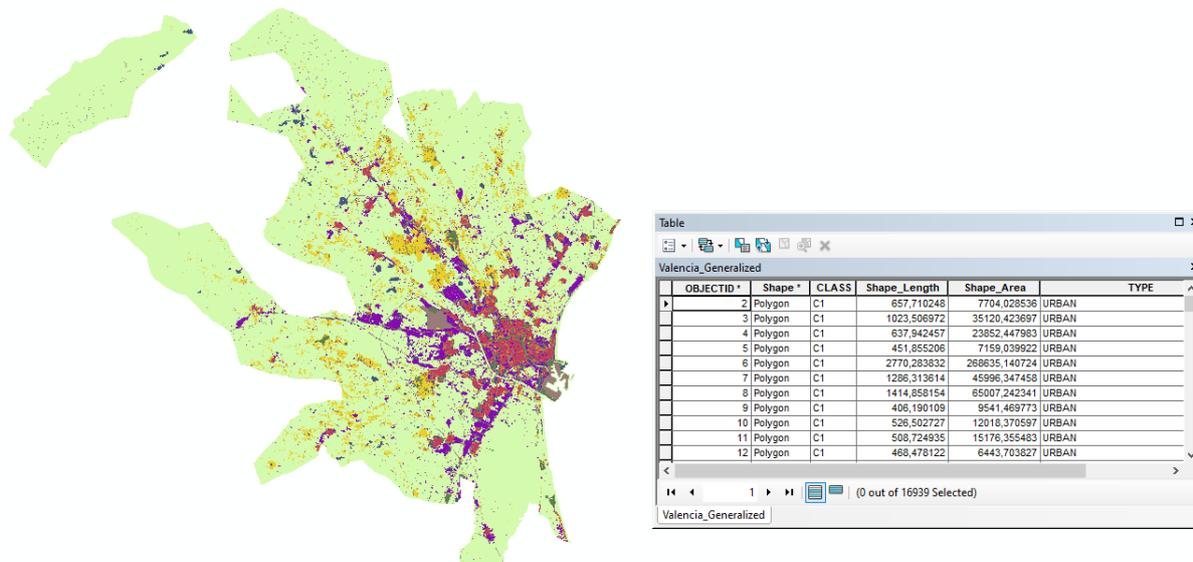


Figura 24. Ejemplo de capa con los objetos y su tabla asociada.
Fuente: Elaboración propia.

Para el buen funcionamiento de la herramienta es necesario asegurarse de que las capas de entrada cumplen ciertos requisitos. Este proceso no será necesario en todos los casos, pero es preferible comprobar la calidad de los datos de entrada y así asegurar un buen resultado. La mayoría de las reglas se pueden solventar mediante reglas de topología de ArcGIS. Una vez se dispone de los datos de entrada en un Feature Dataset de una Geodatabase, se pueden añadir las reglas de topología y corregir los errores automáticamente. Los errores que se recomienda revisar son los siguientes (Figura 25):

- Eliminar polígonos residuales.
- Eliminar polígonos duplicados.
- Eliminar solape de polígonos.

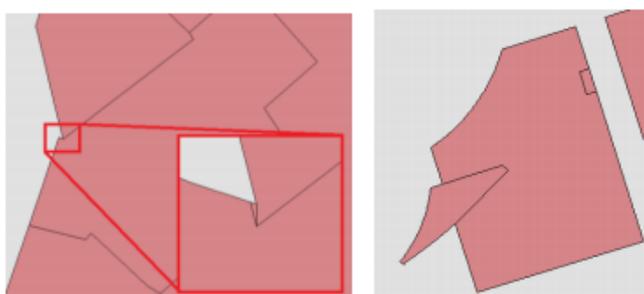


Figura 25. Ejemplo de polígono residual y de solape entre polígonos.
Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

El uso de esta herramienta es muy sencillo para cualquier usuario con un nivel básico en el manejo de SIG de escritorio. Se trata de una caja de herramientas donde sólo es necesario seleccionar las capas de entrada. Como se ha mencionado, no requiere instalación, ya que para utilizarla se puede acceder desde ArcCatalog o ArcToolbox.

En este caso se ha optado por desde ArcCatalog. Una vez abierto ArcMap, desplegar la ventana de Catalog y buscar la ruta de la carpeta donde se encuentra la caja de herramientas. Haciendo doble click sobre la opción que se desea ejecutar se abrirá la ventana pidiendo los datos de entrada (Figura 26).

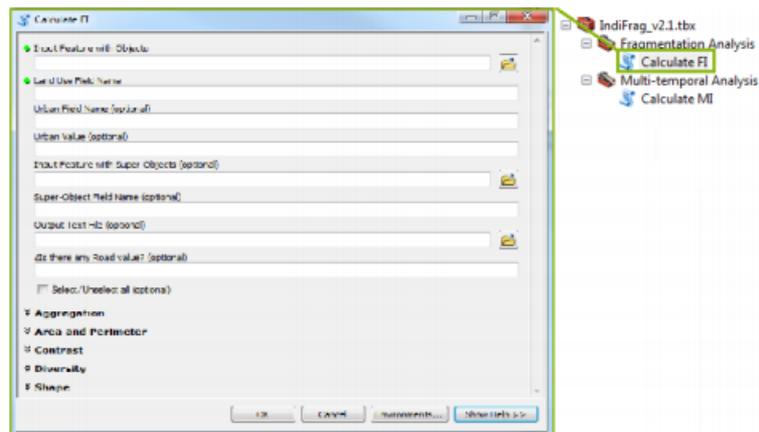


Figura 26. Ejecutar IndiFrag desde Catalog.

Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

Al desplegar la opción “Fragmentation Analysis” aparece una opción para calcular los índices llamada “Calculate FI”, al abrirla aparece una ventana donde se deben introducir los datos de entrada que a continuación se explican (Figura 27).

- **Input Feature with Objects:** shapefile con los objetos clasificados.
- **Land Use Field Name:** nombre del campo que contiene la clasificación con los usos de suelo, debe ser tipo texto o entero. Al cargar la capa con los objetos, automáticamente, se crea un listado de todos los campos de la capa que cumplen las condiciones para que se seleccione uno.
- **Urban Field Name:** opcionalmente, nombre del campo con el uso urbano y no urbano, se trata de una segunda clasificación o agrupación de las clases anteriores en función de si se trata de un uso antrópico, debe ser tipo texto o entero, de nuevo se crea un listado de todos los campos de la capa que cumplen las condiciones. Si no se introduce no se calcularán los índices de densidad y compacidad urbana.
- **Urban Value:** opcionalmente, valor del uso urbano. En función de la capa con los objetos y el campo con el uso urbano se desplegará un listado con los usos disponibles. Si no se introduce no se calcularán los índices de densidad y compacidad urbana.
- **Input Feature with Super-Objects:** opcionalmente, shapefile con los súper-objetos.
- **Super-Objects Field Name:** opcionalmente, nombre del campo que contiene el nombre o identificador de cada súper-objeto, debe ser tipo texto o entero. Al cargar la capa con los súper-objetos se crea un listado de todos los campos de la capa.
- **Output Text File:** opcionalmente, ruta de salida y nombre del fichero de texto con los resultados, no hay que escribir la extensión del archivo, por defecto será .txt.

- **¿Is there any Road class?:** Si los datos de entrada tienen un uso asignado a las carreteras o red de transporte es necesario indicar cuál es, para poder descartarlo de algunos índices y realizar correctamente el análisis de contraste. Al cargar la capa con los objetos y el campo con la clase, se generará un listado con todas las clases disponibles para que el usuario seleccione una o ninguna.
- **Select/Unselect all:** Si se quieren calcular todos los índices o bien deseleccionarlos se puede hacer utilizando este checkbox. En ese caso, es conveniente revisar los distintos grupos ya que algunas métricas requieren datos adicionales.

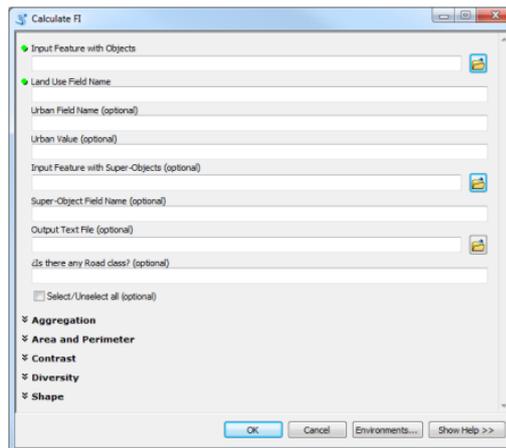


Figura 27. Aspecto de la ventana “Calculate FI” del módulo del análisis de fragmentación.
Fuente: Guía de Usuario IndiFrag v2.1 (Sapena & Ruiz, 2016)

- **Aggregation:** compila todos los índices que forman parte de este grupo.
- **Area and Perimeter:** en este grupo se encuentran todos los índices que reflejan información relativa al área y perímetro.
- **Contrast:** El grupo de contraste está formado por un único índice que se calcula analizando la contigüidad entre objetos de la misma o distinta clase. Este índice no se ha utilizado en este estudio.
- **Diversity:** en este grupo se encuentran todos los índices que reflejan la diversidad.
- **Shape:** índices relacionados con la forma de los objetos.

4.8. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE EQUIDAD ESPACIAL

Para calcular los dos índices de equidad espacial seleccionados, espacios verdes por cápita y accesibilidad a espacios verdes, se ha utilizado la herramienta de análisis espacial ArcGIS⁶. Esta herramienta permite estimar ambos valores después del preprocesado de los datos del Atlas Urbano, es decir, después de la reclasificación de usos del suelo y de la agregación de polígonos.

Los mismos principios metodológicos y herramientas que se describen en esta sección se podrían aplicar utilizando software SIG de código abierto, como QGIS⁷ o gvSIG⁸.

4.8.1. Espacios verdes por cápita

La cobertura de zonas verdes en la ciudad es de gran importancia para mantener una buena calidad de vida. Las plazas, jardines, parques o bosques urbanos tienen un papel fundamental en el medio ambiente y la biodiversidad de la ciudad, además de ser espacios para el paseo, el recreo o el ocio. En la ordenación del territorio forman parte de su estructura y simbolizan un ambiente de ciudad equilibrada, donde la edificación se amortigua con los espacios naturales. Los espacios verdes son considerados por la OMS como espacios "imprescindibles" por los beneficios que reportan en el bienestar físico y emocional de las personas y por contribuir a mitigar el deterioro urbanístico de la ciudad, haciéndola más habitable y saludable.

El primer de los índices de equidad espacial seleccionados es los espacios verdes por cápita, que se define como la superficie de parques y jardines y otros espacios públicos dotados de cobertura vegetal del ámbito urbano en relación con el número de habitantes, acorde a la siguiente fórmula:

Espacios verdes por cápita ($\text{m}^2/\text{habitante}$) = $[\text{superficie espacios verdes}/\text{número habitantes}]$

Tal y como se ha descrito anteriormente, la OMS aboga por los 10 o 15 m^2 de espacios verdes per cápita y establece los 50 m^2 per cápita como valor óptimo y objetivo final. Por tanto, el valor mínimo será mayor a 10 m^2 de espacios verdes por cápita para una determinada AUF.

En el documento (Lavalle, 2002), las áreas públicas abiertas se definen como:

- parques públicos, jardines o espacios abiertos, de uso exclusivo para peatones y ciclistas, excepto las islas o separadores de tráfico verdes, cementerios (a menos que la autoridad local reconozca su función recreativa o su importancia natural, histórica o cultural);
- instalaciones deportivas al aire libre, accesibles al público de forma gratuita;
- áreas privadas (áreas agrícolas, parques privados), accesibles al público de forma gratuita.

Para permitir un análisis de datos más completo, el índice se calcula dos veces: primero, en relación con áreas mayores de 5,000 m^2 , y segundo para todas las áreas utilizadas por el público para actividades al aire libre y de ocio, independientemente de su dimensión (Ambiente Italia Research Institute, 2003).

Estos tipos de índices se pueden utilizar para establecer estándares de espacios verdes por cápita a nivel nacional o subnacional. Por ejemplo, en el *Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas publicado por el Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana* se

⁶ <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>

⁷ <https://www.qgis.org/en/site/>

⁸ <http://www.gvsig.com/>

consideran espacios verdes todos aquellos espacios de estancia con una superficie mínima de 1,000 m² y con más del 50% del área permeable (parques públicos, jardines, espacios abiertos para uso exclusivo de peatones, plazas).

A continuación, se describen los pasos seguidos para el cálculo de espacios verdes por cápita.

Paso 1. Selección de espacios verdes menores de 5,000 m².

Teniendo en cuenta que, para la primera opción, desde el punto de vista de la superficie, se consideran espacios verdes todos aquellos espacios de estancia con una superficie mínima de 5,000 m², se han seleccionado todos los polígonos menores de 5,000 m² mediante una consulta a la tabla de atributos dentro de la clase C7 - *Green areas, sports and leisure facilities* (Figura 28).

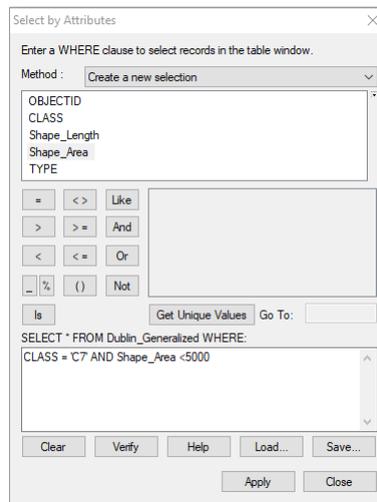


Figura 28. Herramienta 'Select by Attributes' de ArcMap.

Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda opción, se utilizarán todos los polígonos de la clase C7 - *Green areas, sports and leisure facilities*, independientemente de su superficie.

Paso 2. Fusión de espacios verdes menores de 5,000 m² con los polígonos adyacentes.

A continuación, se ha utilizado la herramienta la herramienta 'Eliminate' la cual suprime los polígonos al fusionarlos con los polígonos adyacentes que tienen el área más grande o el borde compartido más largo. Además, se ha dejado deseleccionada la opción 'Eliminating polygon by border' que fusionará los polígonos seleccionados con un polígono vecino no seleccionado dejando caer el borde compartido. El polígono vecino será el que tiene el área más grande (Figura 29).

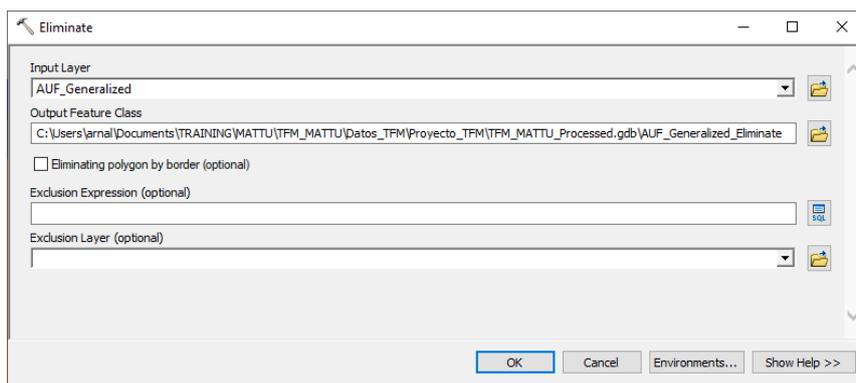


Figura 29. Herramienta 'Eliminate' de ArcMap.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 3. Cálculo de la superficie de espacios verdes.

A continuación, desde la tabla de atributos se ha hecho un resumen estadístico para obtener la suma total de espacios verdes por AUF. Por un lado, para los espacios verdes mayores de 5.000 m² y, por el otro lado, para todos los espacios verdes independientemente de su dimensión a partir de la capa generada en el apartado (Figura 30).

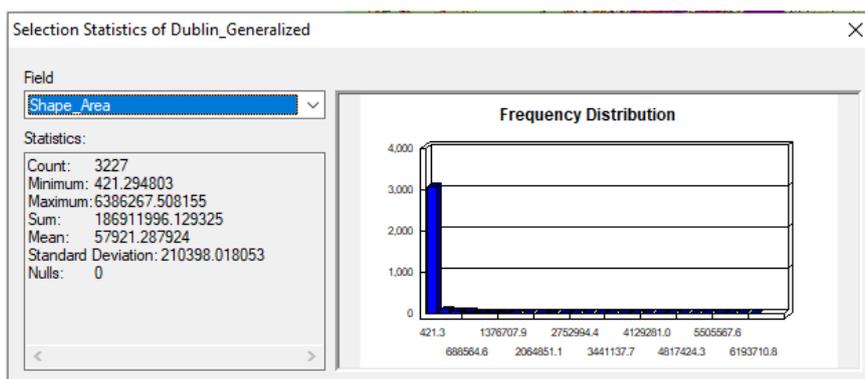


Figura 30. Cálculo de 'Statistics' de ArcMap.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 4. Cálculo de los espacios verdes por cápita.

Finalmente, utilizando la población estimada para el año 2012, y la suma de los espacios verdes correspondientes a la clase C7 de cada AUF, se ha calculado este primer índice de equidad espacial (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados índice espacios verdes por cápita.

Nombre AUF	Población estimada 2012 (Habitantes)	Superficie de espacios verdes (m ²) >5000 m ²	Espacios verdes (m ²) >5000 m ² por cápita	Superficie de espacios verdes (m ²)	Espacios verdes (m ²) por cápita
Dublin	1.781.007	184.181.177	103,41	186.911.996	104,95
Helsinki	1.370.911	80.721.756	58,88	81.601.322	59,52
Kracow	1.373.909	43.161.633	31,42	43.533.155	31,69
Lyon	1.897.722	60.865.625	32,07	62.273.336	32,81

Nuremberg	1.273.542	46.485.708	36,50	47.461.954	37,27
Prague	2.121.603	121.264.279	57,16	123.121.660	58,03
Thessaloniki	927.217	8.271.293	8,92	8.587.346	9,26
Valencia	1.714.585	21.929.160	12,79	22.630.997	13,20

Para consultar el análisis de los resultados del índice espacios verdes por cápita, ver sección 5.2.

4.8.2. Proximidad de la población a espacios verdes

El indicador calculado con anterioridad es de gran importancia para mantener una buena calidad de vida. Sin embargo, además de tener en cuenta la superficie de espacios verdes por cápita es necesario tomar en consideración su proximidad a las zonas habitadas. Por tanto, un indicador clave de accesibilidad es la proximidad de la población a espacios verdes. con el objetivo de que todo ciudadano tenga acceso simultáneo a diferentes tipologías de zona verde de dimensiones y funcionalidades diferentes.

Este índice se basa en estimaciones de distancia lineal de los espacios verdes accesibles, los cuales se asumen como una medida aproximada de la distancia a pie hasta el borde de un área verde. Si bien es posible realizar una estimación más precisa de las distancias mediante el análisis de redes, incluyendo calles y barreras, en este caso se ha descartado esta opción debido a la mayor complejidad que implica el manejo de los datos de entrada para el cálculo de las distancias a los espacios verdes. El Indicador Común Europeo de áreas públicas abiertas se basa en el porcentaje de ciudadanos que viven a menos de 300 metros de un área pública abierta de un tamaño mínimo de 0.5 hectáreas (Ambiente Italia Research Institute, 2003). La fórmula para calcular este indicador, Proximidad de la población a espacios verdes (%) = [número de habitantes que viven a menos de 300 metros de un espacio verde / población total], utiliza datos de población por zonas que no se encuentran disponibles para cada uno de los polígonos reclasificados en la sección 4.4. Para simplificar el cálculo y considerando como espacios verdes únicamente la clase C7 – *Green areas, sports and leisure facilities*, el resultado hará referencia al porcentaje de suelo urbano (C1, C2 y C3) que cuenta con acceso a espacios verdes situados a una distancia de 300 metros. Sin embargo, este indicador tiene la limitación de que no tiene en cuenta la cantidad de personas que tienen acceso a las zonas verdes. Es posible que una zona verde esté ubicada en un área con baja densidad de población, lo que limitaría su uso y, por lo tanto, su impacto en la equidad espacial.

Estos tipos de índices se pueden utilizar para establecer estándares de accesibilidad a espacios verdes a nivel nacional o subnacional. Por ejemplo, en el Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas publicado por el Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana establece las siguientes categorías:

- **Espacios verdes más grandes de 1.000 m² a una distancia menor de 200 metros** (desplazamiento a pie de carácter cotidiano).
- **Espacios verdes más grandes de 5.000 m² a una distancia menor de 750 metros** (desplazamiento a pie de carácter cotidiano).
- **Espacios verdes más grandes de 1 ha a una distancia menor de 2 km** (desplazamiento en bicicleta).
- **Espacios verdes mayores de 10 ha a una distancia menor de 4 km** (desplazamiento en transporte público).

A continuación, se describen los pasos seguidos para el cálculo del porcentaje de suelo urbano (C1, C2 y C3) que cuenta con acceso a espacios verdes situados a una distancia de 300 metros.

Paso 1. Creación de zonas de influencia alrededor de los espacios verdes.

Para el análisis de este indicador se utiliza la herramienta 'Zona de influencia' del software ArcMap, con la que se crean polígonos de zona de influencia alrededor de entidades de entrada a una distancia de 300 metros de un área pública abierta de un tamaño mínimo de 0.5 ha, siguiendo la recomendación establecida por la OMS en 2010. Sin embargo, existen alternativas como realizar los mismos cálculos con áreas mínimas distintas a 0.5 ha, por ejemplo, 1 ha. Asimismo, también se podría considerar el cálculo con otras distancias, como 200 o 500 metros, entre otras recomendaciones posibles.

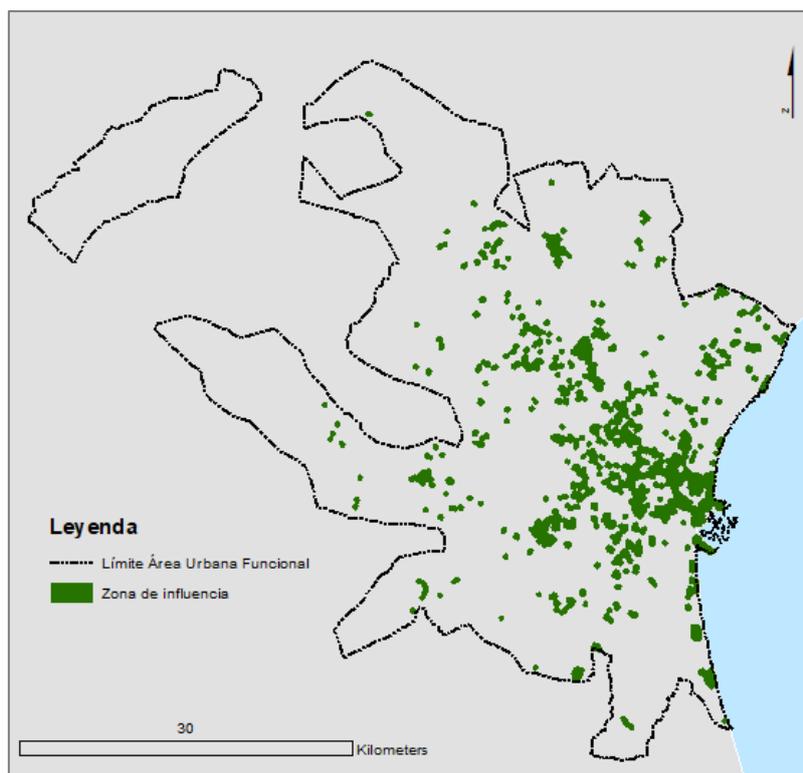


Figura 31. Aplicación de la herramienta 'Zona de influencia' de 300 m en los espacios verdes mayores de 5,000 m en el AUF de Valencia.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2. Estimación de las zonas urbanas dentro de la zona de influencia.

Finalmente, para el cálculo de las zonas urbanas (C1, C2 y C3) con cobertura a los espacios verdes se utiliza la herramienta 'Intersecar' entre el resultado de la Figura 31 y la selección de las zonas urbanas C1, C2 y C3.

Paso 3. Estimación de las zonas urbanas sin cobertura.

Además, mediante el uso de la herramienta 'Borrar' es posible calcular las zonas urbanas sin cobertura. El resultado de la herramienta crea una clase de entidad mediante la superposición de las entidades de entrada (zonas urbanas) con los polígonos de las entidades de borrado (Figura 32). Solo

las partes de las entidades de entrada que no queden comprendidas en los límites externos de las entidades de borrado se copiarán en la clase de entidad de salida.

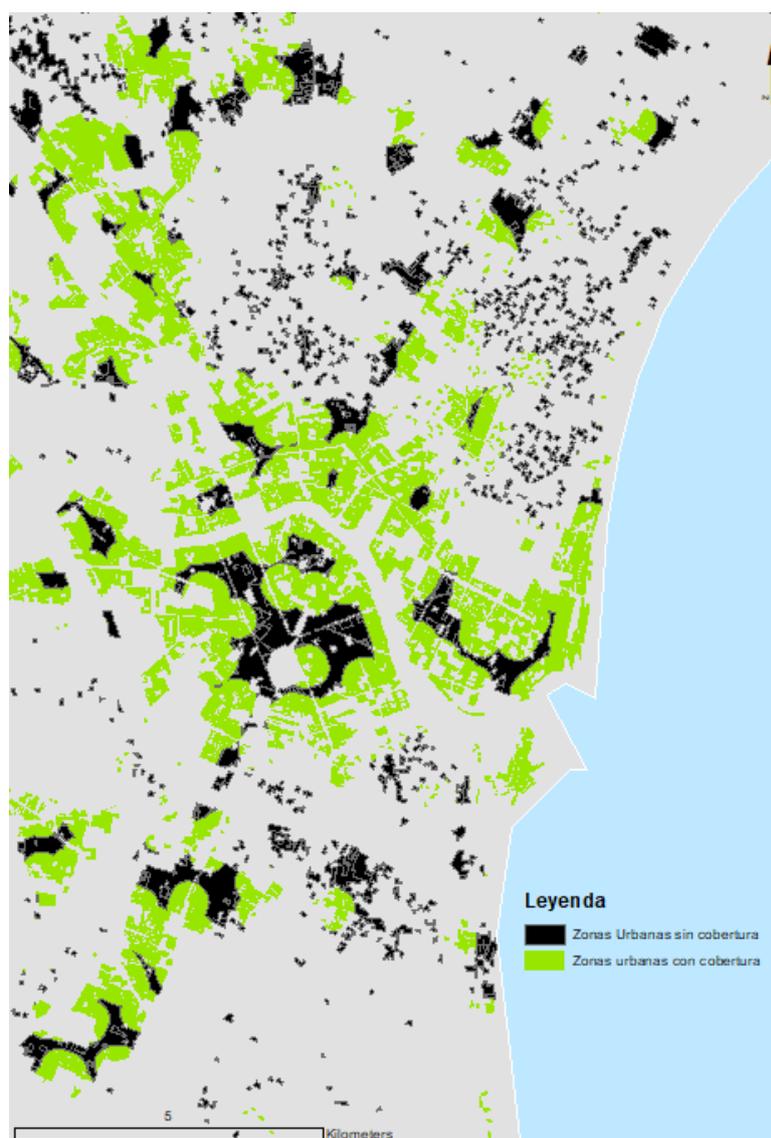


Figura 32. Extracto de las zonas urbanas (C1, C2, C3) dentro de la zona de influencia de 300 m de los espacios verdes (verde) y de las zonas urbanas (C1, C2, C3) fuera de la zona de influencia de 300 m de los espacios verdes (negro) para el AUF de Valencia.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Índices de fragmentación

En este apartado, se pretenden explicar los resultados obtenidos tras aplicar la herramienta a los datos de entrada y su posterior análisis.

En primer lugar, cabe recordar que los datos de partida ha sido una capa vectorial de usos del suelo. Debido a que la clasificación de partida es de 27 clases, se ha simplificado a ocho clases para llevar a cabo el estudio de la fragmentación del paisaje, agrupando los usos en función de sus similitudes, y teniendo en cuenta que un número menos de clases dará resultados más significativos.

Las clases de las que se dispone finalmente en la clasificación son (Tabla 8):

Tabla 8. Usos del suelo definitivos en la clasificación de AUF.

Clase	Nombre
C1	Continuous Urban Fabric (> 80%)
C2	Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)
C3	Discontinuous Urban Fabric (< 50%)
C4	Industrial, commercial, public, military and private units
C5	Transport infrastructure
C6	Mine/Dump sites, Construction/Land without use
C7	Green areas, sports and leisure facilities
C8	Agriculture, Forest, Water

En lo que respecta a la interpretación de los resultados obtenidos, para indicar el nivel de cada medida en los que se puede encontrar un mismo índice calculado a distinto nivel, y de eso modo diferenciarlos, se les ha asignado al final de cada alias las letras “O”, “Cl” o “SO”, en función de su nivel. Siendo “O” el nivel de Objeto, “Cl” nivel de Clase, y por último “SO” nivel de Súper-Objeto.

Tras el cálculo, los resultados aparecen plasmados en la tabla de atributos de la capa con objetos. Cada objeto tendrá asociado su valor de cada índice, ya sea éste a nivel de objeto, de clase o de súper-objeto. Adicionalmente, se pueden guardar los valores en un fichero de texto, en este caso, en primer lugar, aparecen los índices de objeto, luego de clase, u por último de súper-objeto (Figura 33).

OBJECTID	CLASS	Shape_Leng	Shape_Area	TYPE	FID_SuperObj	Shape_Lc_1	Shape_Ar_1	NAME	ORIG_FID	Area0	Perim0	SO	AreaCl	PerimCl	ObjCl	DC	TMC1	SBC1	RPA	IMPACT	IFO	IFCl	DFO	DFCl	DOCl	DEM	CONTRC1	CC1
1	C1	455.65576	9726.629118	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	1	1728.82	485.036	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.849594	0.05182	1.22116	1.3629	1.04229	1.02695	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
2	C1	1724.29158	70550.864812	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	1	70855.9	1724.29	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.824337	0.05182	1.61949	1.3629	1.08634	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
3	C1	340.159827	5306.152972	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	2	5306.15	340.16	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.864197	0.05182	1.16744	1.3629	1.0381	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
4	C1	261.442404	3279.121028	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	3	3279.12	261.44	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.879757	0.05182	1.14162	1.3629	1.03372	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
5	C1	414.110732	6857.277753	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	4	6857.28	414.11	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.86039	0.05182	1.2502	1.3629	1.05056	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
6	C1	1737.447342	46215.959859	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	5	46216	1737.45	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.837594	0.05182	2.02049	1.3629	1.13096	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
7	C1	542.807799	13465.091152	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	6	13465	542.81	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.820899	0.05182	1.14801	1.3629	1.02093	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
8	C1	407.181744	9879.061521	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	7	9879.06	407.18	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.841217	0.05182	1.02417	1.3629	1.00519	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
9	C1	281.73422	3149.207789	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	8	3149.29	281.73	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.883125	0.05182	1.16624	1.3629	1.03819	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
10	C1	215.914038	2926.602799	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	9	2926	215.91	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.872434	0.05182	0.992369	1.3629	0.98434	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523
11	C1	337.655243	5350.768468	URBANI	1	744276.548766	7016440315.10	SuperObject1	10	5350.77	337.66	SuperObject1	11.8813	364.963	395	0.001693	30079.2	0.000052	0.863104	0.05182	1.154	1.3629	1.03337	1.05995	0.056296	797.952	99.6844	0.033523

```

Dublin_Results - Notepad
File Edit Format View Help
*****
Indifrag
*****

Indifrag is a processing tool used for the extraction of a set of indices and variables
Created in:      September 25th, 2014
Developed by:   Marta Sapena Moll
                Luis Ángel Ruiz Fernández
                Grupo de Cartografía, GeoAmbiental y Teledetección
                Universitat Politècnica de València
                http://cgat.webs.upv.es/software/

Run date:      February 08, 2021 - 13:46:03

-----
INDIFRAG METRICS
-----

Input path of the Object's shapefile: C:\Users\arnal\Documents\TRAINING\MATTU\TFM_MATTU
Input path of the Super-Object's shapefile: C:\IndifragTemp_FI\gdb_temp_gdb\SupObject
Number of Super-Objects in the study area: 1
Number of Classes in the study area: 8

-----
OBJECT LEVEL INDICES
-----

FID    SO      CLASS  TYPE  Area0  Perim0  RPA    IFO    DFO
-----
0      SuperObject1  C1    URBAN  9726.62 485.69  0.0499  1.2312  1.0453
1      SuperObject1  C1    URBAN  70850.90 1724.29 0.0243  1.6195  1.0863
2      SuperObject1  C1    URBAN  5306.13 340.16  0.0641  1.1674  1.0361
3      SuperObject1  C1    URBAN  3278.12 261.45  0.0798  1.1416  1.0327
4      SuperObject1  C1    URBAN  6857.28 414.11  0.0604  1.2502  1.0506
5      SuperObject1  C1    URBAN  46216.00 1737.45 0.0376  2.0205  1.1310
6      SuperObject1  C1    URBAN  13945.00 542.27  0.0389  1.1480  1.0289
7      SuperObject1  C1    URBAN  9879.06 407.18  0.0412  1.0242  1.0852
8      SuperObject1  C1    URBAN  3149.39 261.79  0.0831  1.1662  1.0382
    
```

Figura 33. Resultados en la tabla de atributos (arriba) y en el fichero de texto (abajo).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al análisis de los resultados, se ha realizado un estudio detallado de todos los índices y resultados obtenido a través de la herramienta *Indifrag*. Para ello, se muestran ejemplos gráficos con la intención de comprender mejor su análisis, mediante algunos casos opuestos.

El análisis presentado se centra en las métricas de las clases “urban fabric” (C1, C2, C3), “commercial/industrial” (C4) y “green areas/sports facilities” (C7). Es importante destacar que la clase “transport infrastructure” (C5) representa una parte significativa del área urbana (en Valencia, las carreteras representan el 17% de la superficie artificial). Sin embargo, durante el preprocesado, algunas secciones de la red de calles se reclasificaron a otros usos del suelo, lo que significa que la red de calles restantes proporciona una visión parcial de toda la red de transporte. Además, las grandes áreas ocupadas por aeropuertos y puertos no se consideran representativas para el análisis. Por otro lado, los índices de la categoría “mine/dump sites, construction/land without use” (C6) no se incluyen en el informe porque representan una proporción muy baja de la superficie artificial (menos del 2% en Valencia) y no son significativas para describir la forma urbana.

5.1.1. Índices Nivel Clase

5.1.1.1. Número de Objetos (Nob), Tamaño Medio del Objeto (TM) y Coeficiente de Variación del tamaño de los objetos (CV)

Las métricas de clase Nob (n^o) - número de objetos (Tabla 9), el TM(m^2) - tamaño medio del objeto (Tabla 10) y el CV (%) - coeficiente de variación del tamaño de los objetos (Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11) proporcionan información inicial de la forma urbana.

Tabla 9. Métricas Nob (nº) para las clases seleccionadas.

AUF	Nob (nº) C1	Nob (nº) C2	Nob (nº) C3	Nob (nº) C4	Nob (nº) C7
Dublin	395	2436	24868	7775	3277
Helsinki	342	1587	20166	3446	1770
Kracow	2257	7800	16266	3545	1051
Lyon	1393	3592	11950	3855	2004
Nuremberg	918	1920	3779	3533	1418
Praha	6296	17274	10300	8503	4093
Thessaloniki	380	1673	2972	2558	385
Valencia	558	1332	5410	2581	846

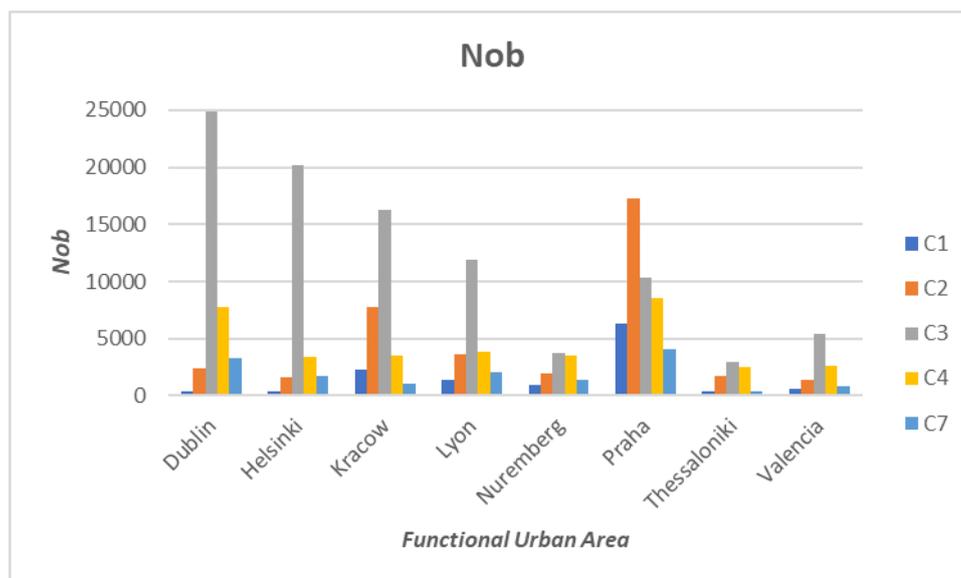


Figura 34. Índice nivel clase Nob (nº).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Métricas TM (m²) para las clases seleccionadas.

AUF	TM (m ²) C1	TM (m ²) C2	TM (m ²) C3	TM (m ²) C4	TM (m ²) C7
Dublin	30079,20	68732,30	12804,84	21465,28	57037,53
Helsinki	32163,26	32566,63	16616,12	31160,87	46102,44
Kracow	24167,61	31906,84	8554,05	24256,24	41420,70
Lyon	37729,57	65485,65	15738,16	38772,55	31074,52

Nuremberg	30965,87	71824,49	24758,00	27693,99	33471,05
Praha	18033,90	14695,03	10309,74	21452,76	30081,03
Thessaloniki	98053,41	25386,97	9010,42	21746,65	22304,80
Valencia	79045,92	13483,38	20858,29	32220,28	26750,59

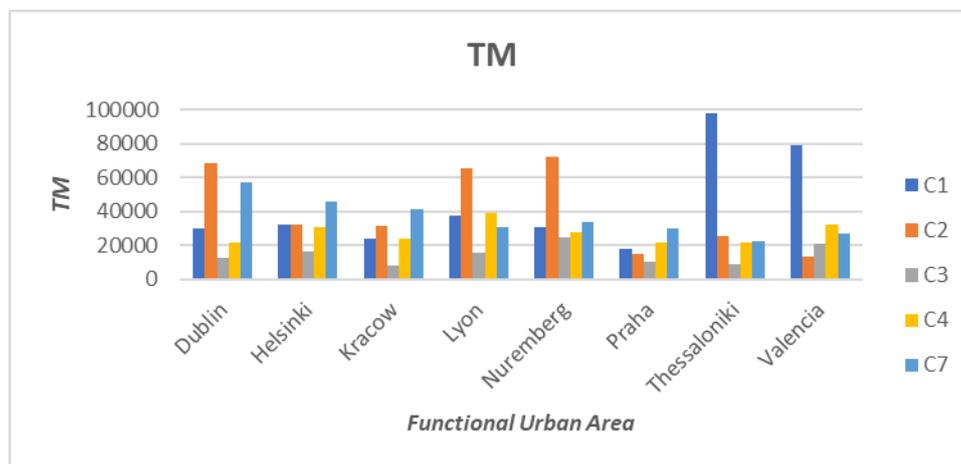


Figura 35. Índice nivel clase TM (m²).

Fuente: Elaboración propia.

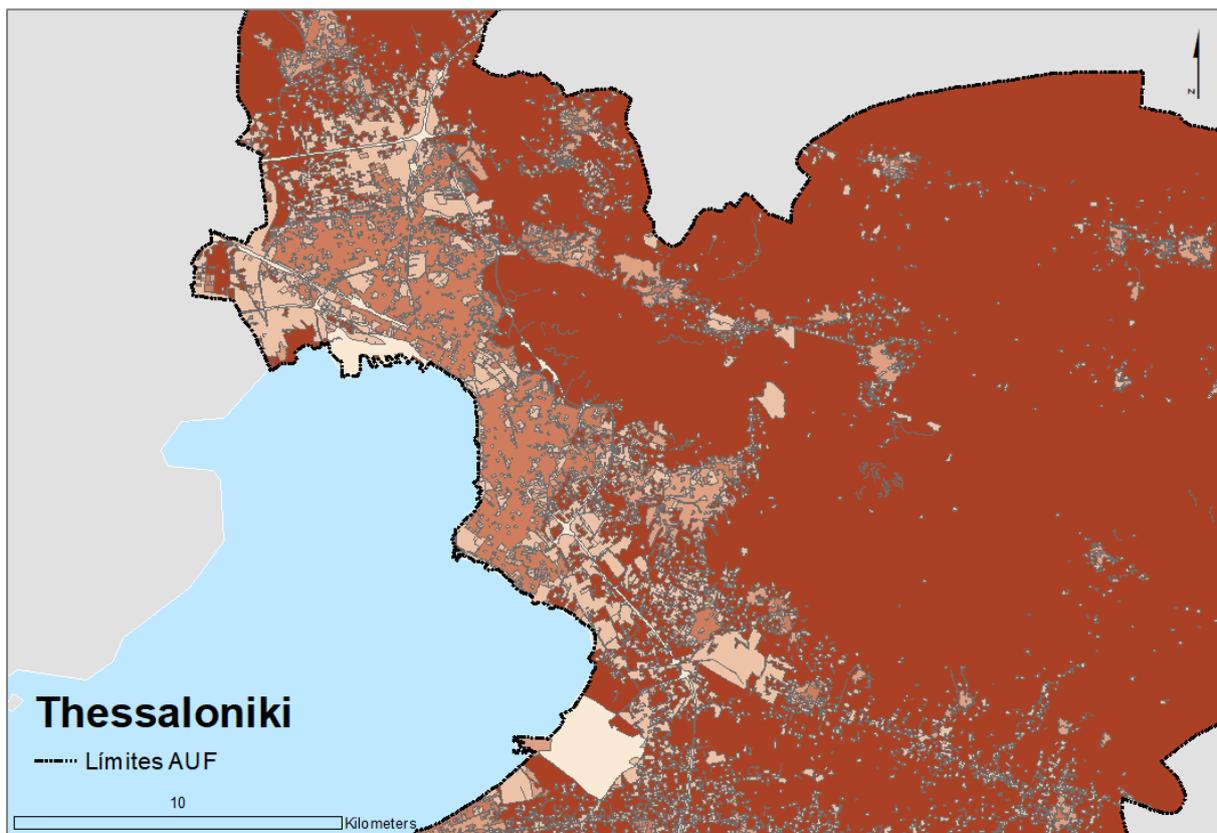
Tabla 11. Métricas CV (%) para las clases seleccionadas.

AUF	CV (%) C1	CV (%) C2	CV (%) C3	CV (%) C4	CV (%) C7
Dublin	2,6	5,7	4,4	5,7	3,7
Helsinki	3,1	1,7	4,9	3,3	2,9
Kracow	3,2	3,2	2,0	7,1	2,6
Lyon	7,3	3,7	3,9	5,1	2,8
Nuremberg	3,6	2,1	2,1	3,5	2,6
Praha	6,1	2,2	1,7	3,1	4,7
Thessaloniki	9,5	3,1	1,7	4,9	1,7
Valencia	2,8	1,3	5,4	3,2	2,7

En cada AUF, a medida que la densidad constructiva se reduce (grado de sellado 80-100%, 50-80%, > 50%), el Nob (nº) aumenta (exceptuando Praga, en dónde Nob (nº) C2 > Nob (nº) C3) mientras que el TM (m²) disminuye (mayoritariamente TM (m²) C2 > TM (m²) C1 > TM (m²) C3, a excepción de Praha y Thessaloniki dónde TM (m²) C1 > TM (m²) C2 > TM (m²) C3, y Valencia dónde TM (m²) C1 > TM (m²) C3 > TM (m²) C2). En un primer grupo de áreas urbanas compuesto por Praha, Thessaloniki y Valencia, los

objetos de la clase C1 tienen un mayor tamaño en comparación con los objetos de las clases C2 y C3, mostrando una variación alta en cuanto al tamaño (medido por el coeficiente de variación). Esto sugiere que estas ciudades reflejan atributos característicos de un modelo urbano predominantemente compacto y densamente poblado. Mientras que en el segundo grupo compuesto por Dublin, Helsinki, Krakow, Lyon y Nuremberg, los objetos de la clase C2 tienen un mayor tamaño en comparación con los objetos de las clases C1 y C3. En este caso, el coeficiente de variación no muestra un patrón homogéneo para estas áreas urbanas. De esto se deduce que estas ciudades presentan características de un modelo de ciudad con un tejido urbano más disperso y menos compacto en comparación con el primer grupo.

Como norma general, en todas las áreas urbanas se aprecian pocos objetos de la clase C1 de gran tamaño. El valor más alto de TM (m²) C1 se observa en Thessaloniki (9.8 ha) mientras que el valor más bajo se observa en Praha (1.8 ha). La Figura 36 muestra el ejemplo de las áreas urbanas mencionadas.



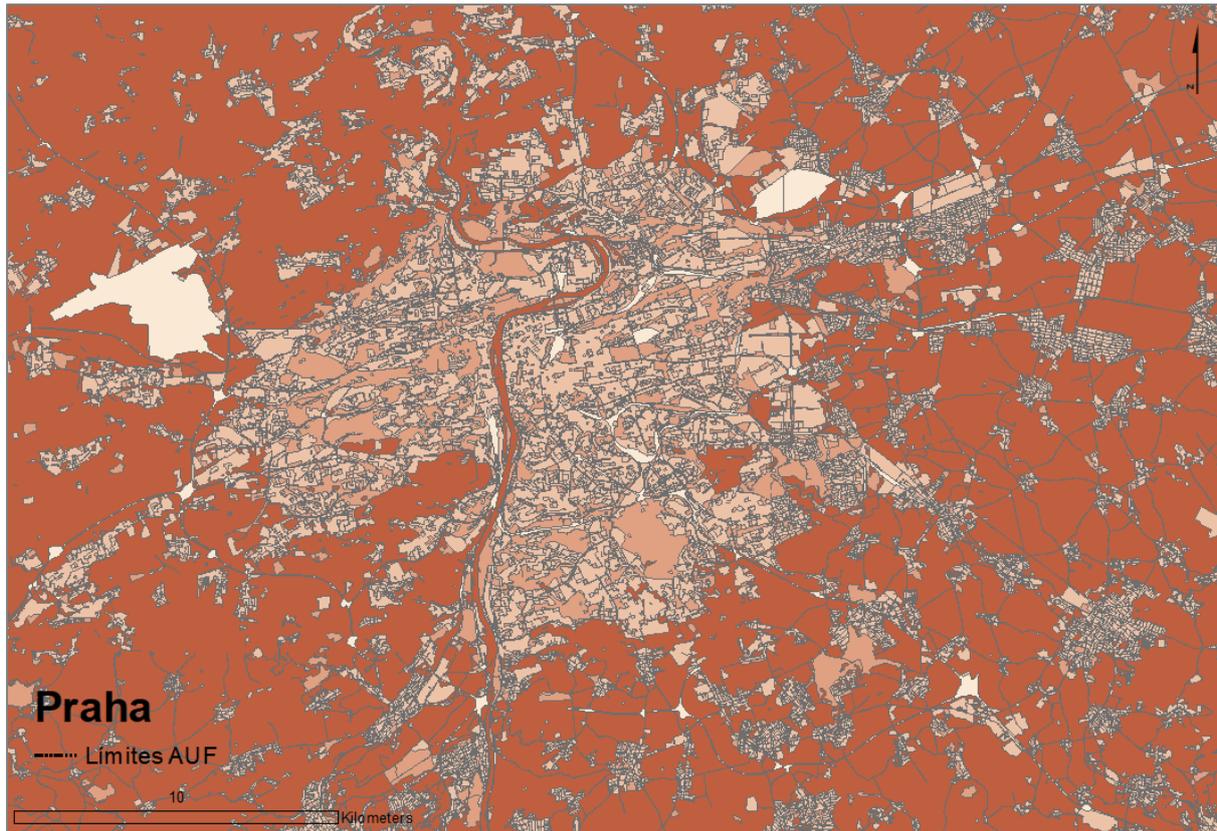


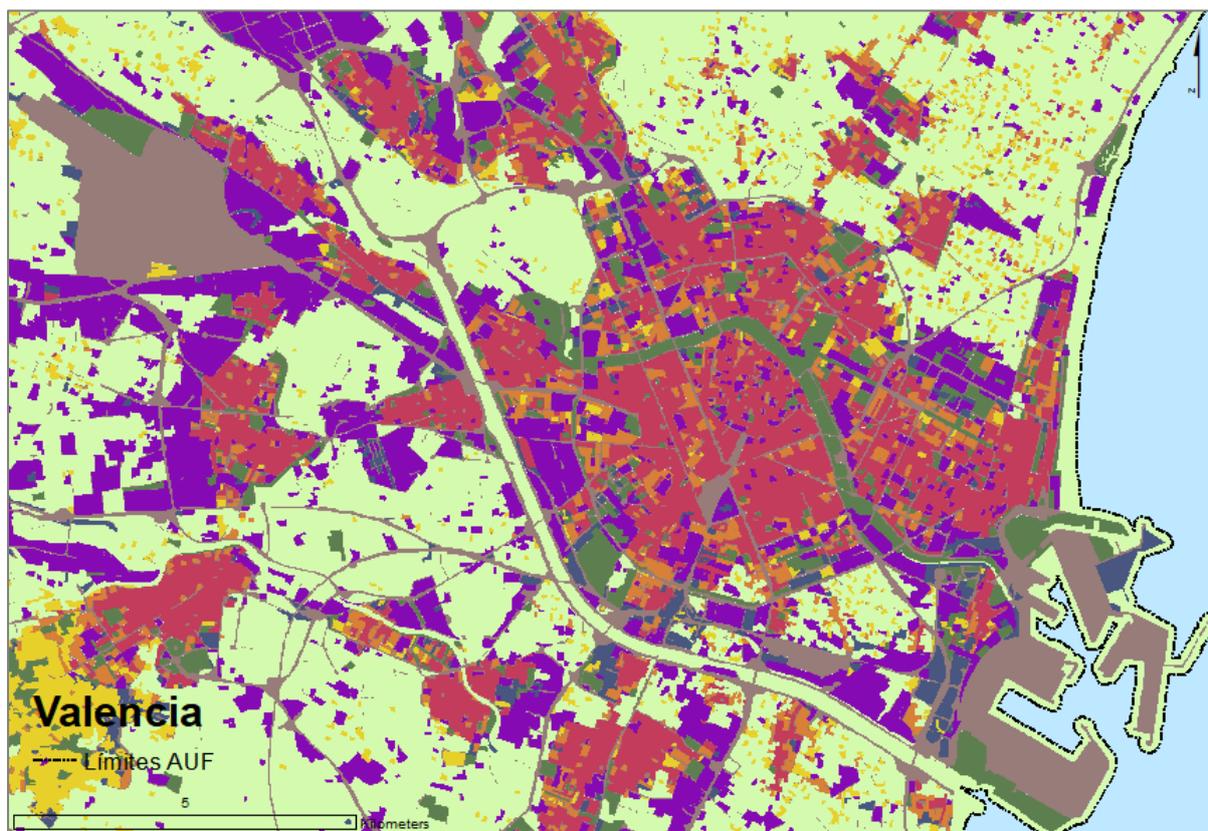
Figura 36. Arriba Thessaloniki con un valor TM (m²) C1 mayor, abajo Praha con un valor TM (m²) C1 menor.

Fuente: Elaboración propia.

En lo respecta a CV (%) C1, la mayor variación se observa en Thessaloniki. Esta caracterización de la forma urbana viene dada por el proceso de agregación de polígonos que fusiona los datos originales del UA en áreas contiguas más grandes. Si este proceso no se hubiese implementado, las diferencias del TM (m²) entre las distintas clases “urban fabric” hubiesen sido mucho menores. En Valencia, el TM (m²) para las tres clases hubiese sido de 0.4 ha, 0.7 ha y 1.0 ha respectivamente, mientras que con el proceso de agregación los valores son de 7.9 ha, 1.3 ha y 2.1 ha. La estructura de datos original se enfoca a la distribución y organización de las manzanas, mientras que la estructura agregada describe la organización espacial de los usos del suelo. En líneas generales, para la mayoría de las áreas urbanas el valor de TM (m²) C2 es mayor que el TM (m²) C3. El TM (m²) C4, que hace referencia a la actividad industrial y comercial, varía entre 2.1 ha y 3.9 ha (Praha - Lyon).

En la Figura 37 se muestra un ejemplo a nivel de clase, donde a simple vista se observan que los objetos que se sitúan a las afueras del casco urbano de Valencia, que corresponden con la huerta, hace que

sea la clase con mayor tamaño de objeto, mientras que las dotaciones públicas del centro de la ciudad son lo de menor tamaño.



CLASS

- C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)
- C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)
- C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%)
- C4 - Industrial, commercial, public, military and private units
- C5 - Transport infrastructure
- C6 - Mine/Dump sites, Construction/Land without use
- C7 - Green areas, sports and leisure facilities
- C8 - Agriculture, Forest, Water

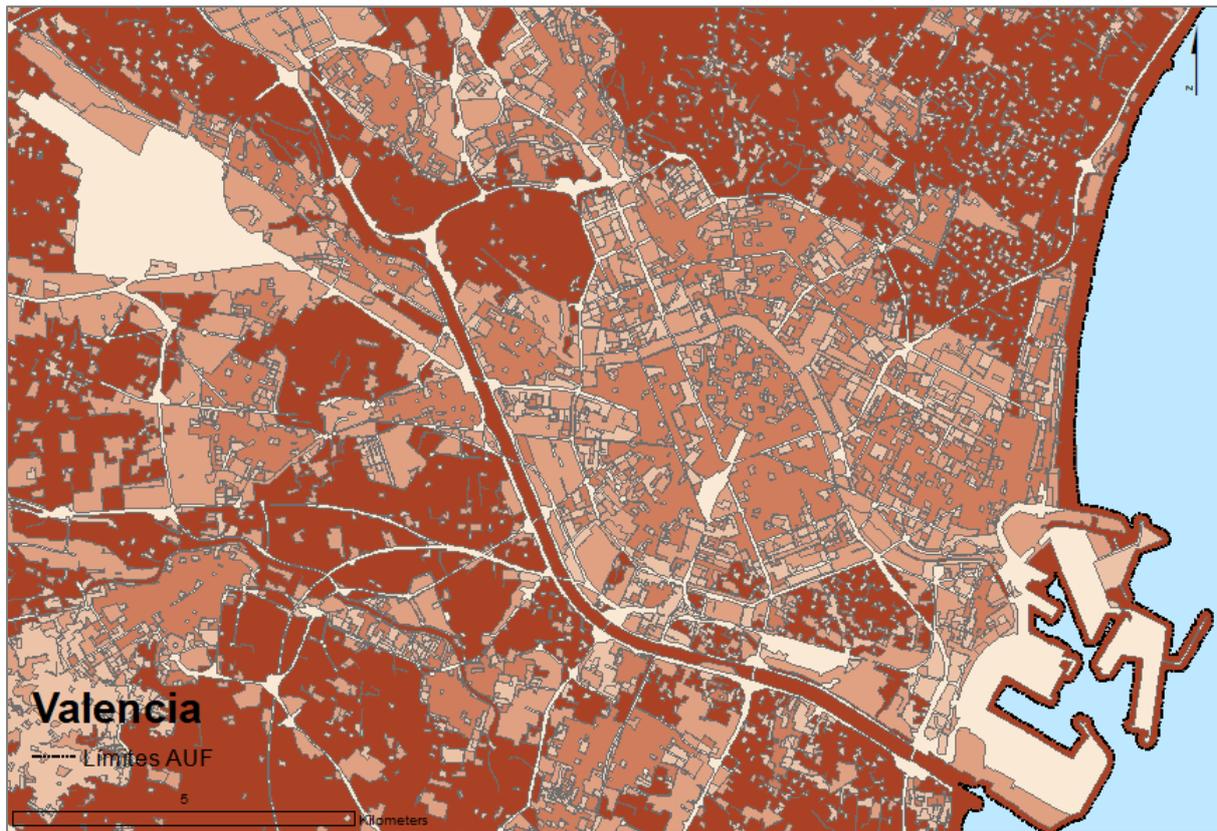


Figura 37. Clasificación Valencia (arriba) y resultado TM (m²) (abajo).
Fuente: Elaboración propia.

Este índice tiene la aplicabilidad de estudiar cómo se comporta una misma clase en las distintas AUF. Una disminución de este parámetro en el tiempo indica un incremento en la fragmentación cuando el área total del AUF no ha decrecido.

El análisis de estos índices revela una serie de patrones distintivos en la configuración de diversas áreas urbanas. En líneas generales, se observa que a medida que la densidad de construcción disminuye, tiende a aumentar el número de objetos (Nob), mientras que el tamaño medio de los objetos (TM) tiende a disminuir. Asimismo, es crucial tener en cuenta el proceso de agregación de polígonos al evaluar el tamaño de los objetos, dado que este procedimiento puede influir en la interpretación de las disparidades en el uso del suelo.

5.1.1.2. Densidad de Objeto (DO)

DO (n°/km^2) es una medida de fragmentación/distribución espacial de los objetos a nivel de clase. Valores de DO (n°/km^2) bajos implican un número menor de objetos e indica una mayor continuidad del uso del suelo, mientras que valores altos denota un mayor número de objetos, mayor dispersión espacial y discontinuidad.

En la Tabla 12, se observa que para las tres clases “urban fabric”, el DO (n°/km^2) se incrementa a medida que la densidad de construcción (grado de sellado) disminuye (a excepción de Praha, donde $DO (n^{\circ}/km^2) C2 > DO (n^{\circ}/km^2) C3$). Los valores más elevados se alcanzan para C3, indicando fragmentación. Las diferencias entre las métricas DO (n°/km^2) en áreas urbanas son relativamente marginales. Los valores de la métrica DO (n°/km^2) C1 varían entre 1.1 y 0.1 objetos por cada cien hectáreas, mientras que para la métrica DO (n°/km^2) C2 son valores más amplios (3 y 0.3). Los valores más bajos para la clase C1 son Dublín y Helsinki, y para la clase C2 son Helsinki y Dublín. El rango para DO (n°/km^2) C3 es mayor si cabe (los valores oscilan entre 4.3 y 1.3). Los valores más bajos para C3 se pueden encontrar en Nuremberg y Praha, indicador de que la distribución de objetos para esta clase está menos fragmentada. Para la clase C4 (industrial/ comercial), los valores más bajos se observan en Helsinki y Kracow. Para la clase C7 (Green/sport facilities areas) el DO (n°/km^2) para la todas las AUF se encuentra entre 0.7 y 0.3. Las métricas DO (n°/km^2) se han visto afectadas por el procedimiento de agregación de polígonos.

Tabla 12. Métricas DO (n°/km^2) para las clases seleccionadas.

AUF	DO (n°/km^2) C1	DO (n°/km^2) C2	DO (n°/km^2) C3	DO (n°/km^2) C4	DO (n°/km^2) C7
Dublín	0.0563	0.3472	3.5442	1.1081	0.4670
Helsinki	0.0691	0.3209	4.0773	0.6967	0.3579
Kracow	0.6006	2.0757	4.3287	0.9434	0.2797
Lyon	0.3796	0.9788	3.2564	1.0505	0.5461
Nuremberg	0.3128	0.6543	1.2879	1.2040	0.4832
Praha	1.1034	3.0272	1.8051	1.4901	0.7173
Thessaloniki	0.2688	1.1835	2.1025	1.8096	0.2724
Valencia	0.3190	0.7614	3.0924	1.4753	0.4836

En resumen, el valor de DO (n°/km^2) aumenta con la disminución de la densidad de construcción, siendo más alto para la clase C3, lo que indica una mayor fragmentación. Se observan diferencias marginales entre las métricas en diferentes áreas urbanas y se destaca la influencia del proceso de agregación de polígonos en las métricas DO (n°/km^2), subrayando la importancia de considerar este factor al interpretar los resultados.

5.1.1.3. Densidad de Borde (DB)

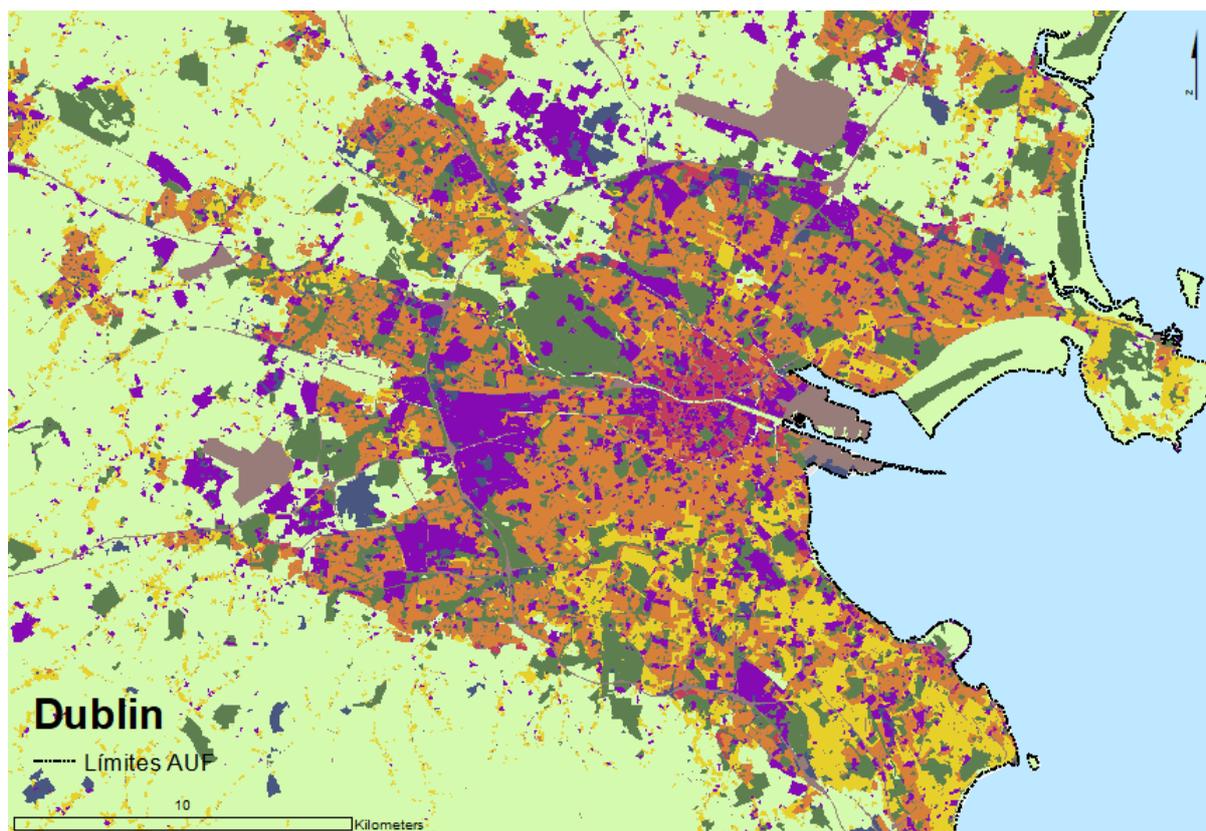
La métrica DB (m/m^2) aborda la distribución espacial de un uso del suelo considerado el tamaño y la complejidad de la forma/geometría de los objetos. Es la relación directa del borde de los objetos dentro de una clase en relación con el área de este. Será mayor cuando más denso sean los objetos dentro de una clase, siendo muy dependiente de su tamaño, además también influye la forma de los objetos, puesto que cuanto más irregulares sean, mayor será su perímetro. Generalmente, los valores bajos de DB (m/m^2) indican una menor fragmentación y una distribución más continua y conectada de áreas urbanas, mientras que los valores altos de DB (m/m^2) sugieren una mayor fragmentación y una distribución más dispersa y fragmentada de áreas urbanas en el paisaje.

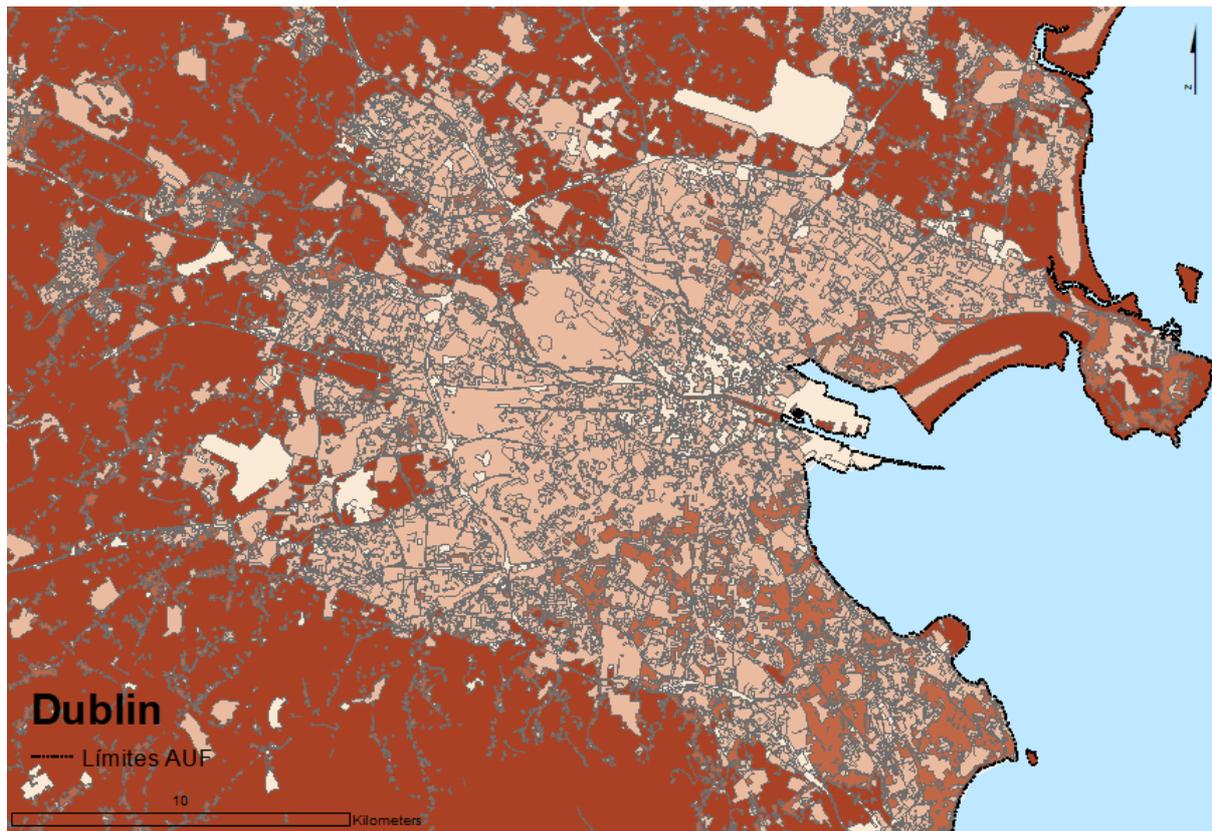
En la Tabla 13, se observa que en todas las AUF, las métricas DB (m/m^2) son más bajas para la clase C1 (a excepción de Valencia, que son más bajas para la clase C2, aunque con un valor muy similar a C1). Con la fusión de los polígonos vecinos, hay un menor número de objetos para la clase C1 aunque con una mayor compacidad. Esto significa que la relación borde/perímetro es más reducida. Los valores de DB (m/m^2) para la clase C1 varían entre 0.0006 y 0.0001 (el valor más alto en Praha, y el valor más bajo en Dublin/Helsinki). Los valores C2 y C3 son ligeramente superiores (los valores DB (m/m^2) C2 varían entre 0.002 y 0.0003, siendo el valor más alto Kracow y el más bajo Helsinki. En el caso de DB (m/m^2) C3 varían entre 0.0022 y 0.0008, siendo el valor más alto en Helsinki y el más bajo en Praha). La correlación entre la DO (n^2/m^2) y la DB (m/m^2) es significativa y depende de la clase (valores de 0.81, 0.76, 0.86, 0.86 y 0.82 respectivamente para las clases C1, C2, C3, C4 y C7).

Tabla 13. Métricas DB (m/m^2) para las clases seleccionadas.

AUF	DB (m/m^2) C1	DB (m/m^2) C2	DB (m/m^2) C3	DB (m/m^2) C4	DB (m/m^2) C7
Dublin	0.0001	0.0006	0.0018	0.0007	0.0005
Helsinki	0.0001	0.0003	0.0022	0.0005	0.0004
Kracow	0.0004	0.0020	0.0018	0.0006	0.0003
Lyon	0.0004	0.0016	0.0020	0.0009	0.0005
Nuremberg	0.0003	0.0010	0.0011	0.0008	0.0004
Praha	0.0006	0.0016	0.0008	0.0008	0.0005
Thessaloniki	0.0004	0.0010	0.0009	0.0011	0.0002
Valencia	0.0005	0.0004	0.0019	0.0011	0.0004

En la Figura 38 se muestra un ejemplo a nivel de clase, donde a simple vista se observa que a medida que la densidad constructiva se reduce (grado de sellado 80-100%, 50-80%, > 50%), la DB aumenta.





DB (m/m²)

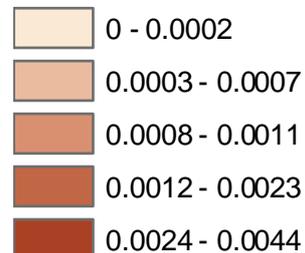


Figura 38. Clasificación Dublin (arriba) y resultado DB (m/m²) (abajo).

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, valores bajos de DB (m/m²) sugieren una distribución más continua y conectada de áreas urbanas, mientras que valores altos señalan una mayor fragmentación y dispersión. El índice suele mostrar valores más bajos para la clase C1 en comparación con las clases C2 y C3, y claramente ilustra cómo aumenta DB con la disminución de la densidad constructiva. Además, destaca una correlación significativa entre DO (nº/m²) y DB (m/m²), la cual varía según la clase.

5.1.1.4. Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo (DEMvp)

DEMvp (m) es una medida de segregación/separación espacial entre objetos de una clase. Este índice se utiliza para calcular la separación de objetos entre los de su misma clase, de manera que muestra la distribución de estos. La media se realiza para poder comparar entre las distintas clases. Valores bajos indican que los objetos están relativamente cercanos unos de otros, mientras que valores altos implican una separación espacial entre objetos. Generalmente, los valores bajos de DEMvp (m) están relacionados con una menor fragmentación y una distribución más compacta de áreas urbanas,

mientras que los valores altos de DEMvp (m) indican una mayor fragmentación y una distribución más dispersa de áreas urbanas en el paisaje.

En la Tabla 14, se observa que en las ocho AUF, a excepción de Praha, DEMvp (m) C1 es mayor que DEMvp (m) para las otras dos clases restantes “urban fabric” debido a la concentración de objetos de gran tamaño para la clase C1 en los centros de las ciudades, y la mayor dispersión de las clases C2 y C3. Para cinco de las ocho AUF, se puede decir que C2 es ligeramente superior a C3. En cambio, para las tres AUF restantes, las métricas para C2 son significativamente menores que para C1, y se incrementan otra vez para C3, probablemente porque esta clase incluye las áreas constructivas de baja densidad y las estructuras aisladas. Esto último, confirma la teoría de economía urbana en la que las ciudades evolucionan de forma temporal, con áreas con una alta densidad que actúan como centros de actividad y densidades urbanas decrecientes alrededor de las mismas. Los objetos de la clase C1 en Praha son lo que más cercanos están (valor DEMvp (m) más bajo) en comparación con las otras AUF. Como norma general, en ciudades menos pobladas hay relativamente pocos objetos de la clase C1 y normalmente existe una mayor distancia entre ellos. Existe un objeto grande en el centro de la ciudad y los restantes objetos C1 se localizan en áreas periurbanas concentradas en pocas zonas y a una distancia mayor. Los valores más altos tanto para C1 y C2 se dan en Dublin. Las métricas para la clase C4 varían entre 285 y 123. En la Tabla 14 y en la Figura 39 se muestra una vista comparativa de las ocho AUF.

Tabla 14. Métricas DEMvp (m) para las clases seleccionadas.

AUF	DEMvp (m) C1	DEMvp (m) C2	DEMvp (m) C3	DEMvp (m) C4	DEMvp (m) C7
Dublin	797,9516	345,4494	91,6656	271,6760	262,2510
Helsinki	703,1569	282,6237	86,3206	285,0064	283,3062
Kracow	292,0839	67,0762	90,4693	254,1864	444,3398
Lyon	304,3673	127,5730	108,8372	225,3144	291,3062
Nuremberg	386,0320	183,6947	148,4824	190,0780	309,8349
Praha	79,9912	24,1950	110,1111	123,6097	196,8458
Thessaloniki	275,8944	69,0369	118,1831	150,7834	368,9771
Valencia	155,4161	141,5007	102,7288	176,3696	259,2001

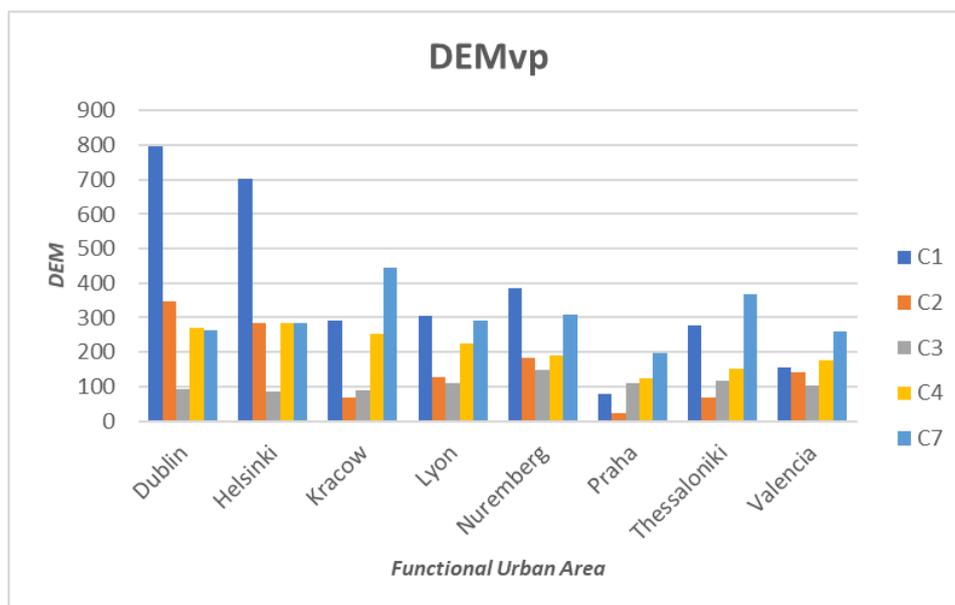


Figura 39. Índice nivel clase DEMvp (m).
Fuente: Elaboración propia.

En resumen, DEMvp (m) sirve como indicador de segregación espacial entre objetos de la misma clase, reflejando la distribución de estos objetos. Valores bajos indican una proximidad relativa entre objetos, mientras que valores altos señalan una mayor separación espacial. Se confirma la teoría de economía urbana, que sugiere una evolución temporal de las ciudades con una alta densidad en los centros y una disminución en las áreas circundantes.

5.1.1.5. Índice de Forma (IF)

La métrica IF se estima a través de una expresión matemática que considera el perímetro del objeto dividido por el área del objeto y es un indicador de la complejidad de la forma/geometría de los objetos. Consiste en calcular la complejidad de la forma de un objeto comparándola con la forma estándar de un cuadrado del mismo tamaño, no depende del tamaño del objeto sino de su forma. Su valor es adimensional, cuando es igual a 1 se trata de un objeto cuadrado y aumenta conforme aumenta su complejidad. Generalmente, los valores bajos del IF indican una menor fragmentación y una distribución más compacta y regular de áreas urbanas, mientras que los valores altos del IF sugieren una mayor fragmentación y una distribución más dispersa y compleja de áreas urbanas en el paisaje.

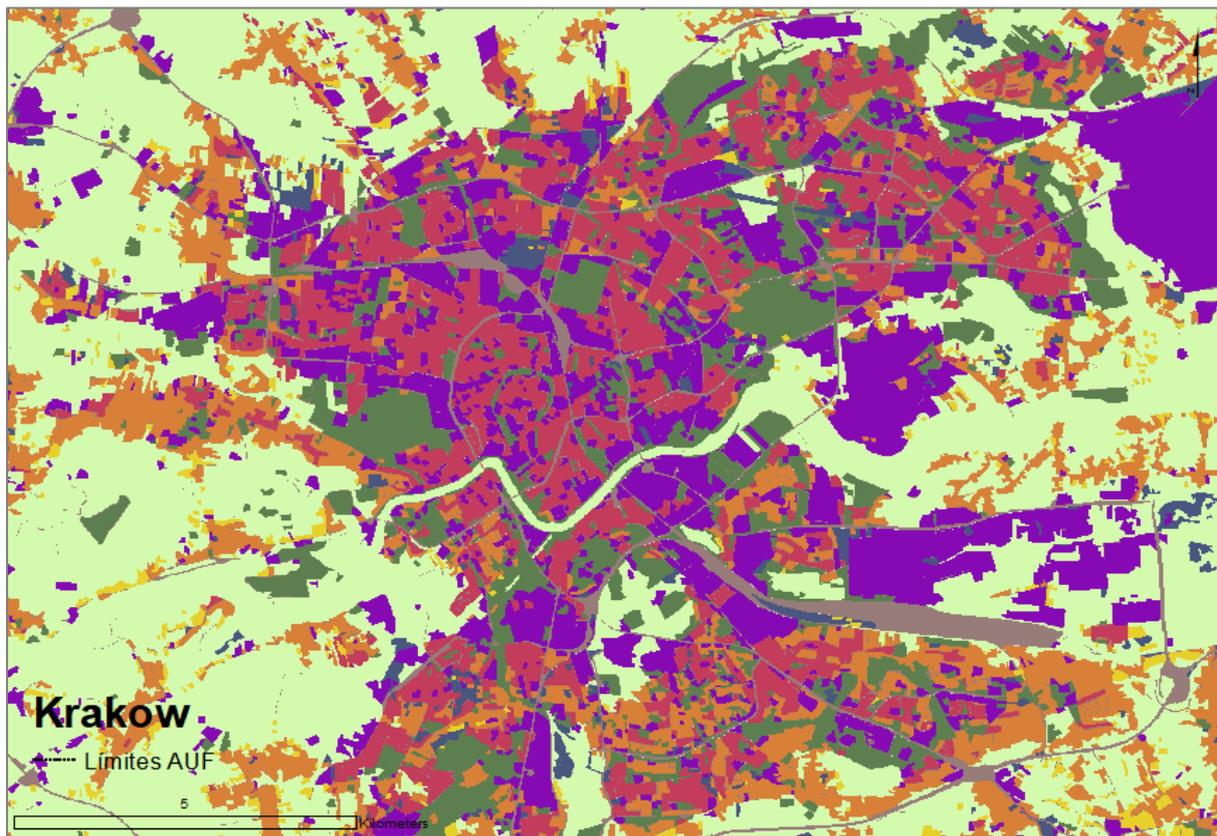
En la Tabla 15, se observa que las diferencias entre las clases C1 y C2 son pequeñas mientras que la métrica de C3 es ligeramente más pequeña (a excepción de Nuremberg, donde $IF\ C1 > IF\ C3 > IF\ C2$, lo que implica una geometría más simple. Los valores más altos para las clases C1, C2 y C3 son para Praha, mientras que los valores más pequeños para las clases C1 y C3 son para Kracow mientras que para la clase C2 es para Valencia.

Tabla 15. Métricas IF (adimensional) para las clases seleccionadas.

AUF	IF C1	IF C2	IF C3	IF C4	IF C7
Dublin	1,3929	1,5606	1,1863	1,1677	1,3144

Helsinki	1,3085	1,3470	1,1854	1,1956	1,3514
Kracow	1,2759	1,3895	1,1519	1,1777	1,3586
Lyon	1,4241	1,5635	1,2645	1,2499	1,3056
Nuremberg	1,3114	1,5267	1,3657	1,2040	1,2919
Praha	1,6062	1,7305	1,4590	1,3827	1,4684
Thessaloniki	1,3242	1,3449	1,1561	1,1815	1,2856
Valencia	1,4418	1,2835	1,2468	1,1993	1,2752

Como ejemplo se puede observar en la Figura 40 que las clases C2 y C7 son las más irregulares, mientras que las clases C3 y C4 tienen un IF en esta AUF de 1,15 y 1,18 respectivamente, lo cual indica su mayor proximidad a la forma del cuadrado.



- CLASS
- C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)
 - C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)
 - C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%)
 - C4 - Industrial, commercial, public, military and private units
 - C5 - Transport infrastructure
 - C6 - Mine/Dump sites, Construction/Land without use
 - C7 - Green areas, sports and leisure facilities
 - C8 - Agriculture, Forest, Water

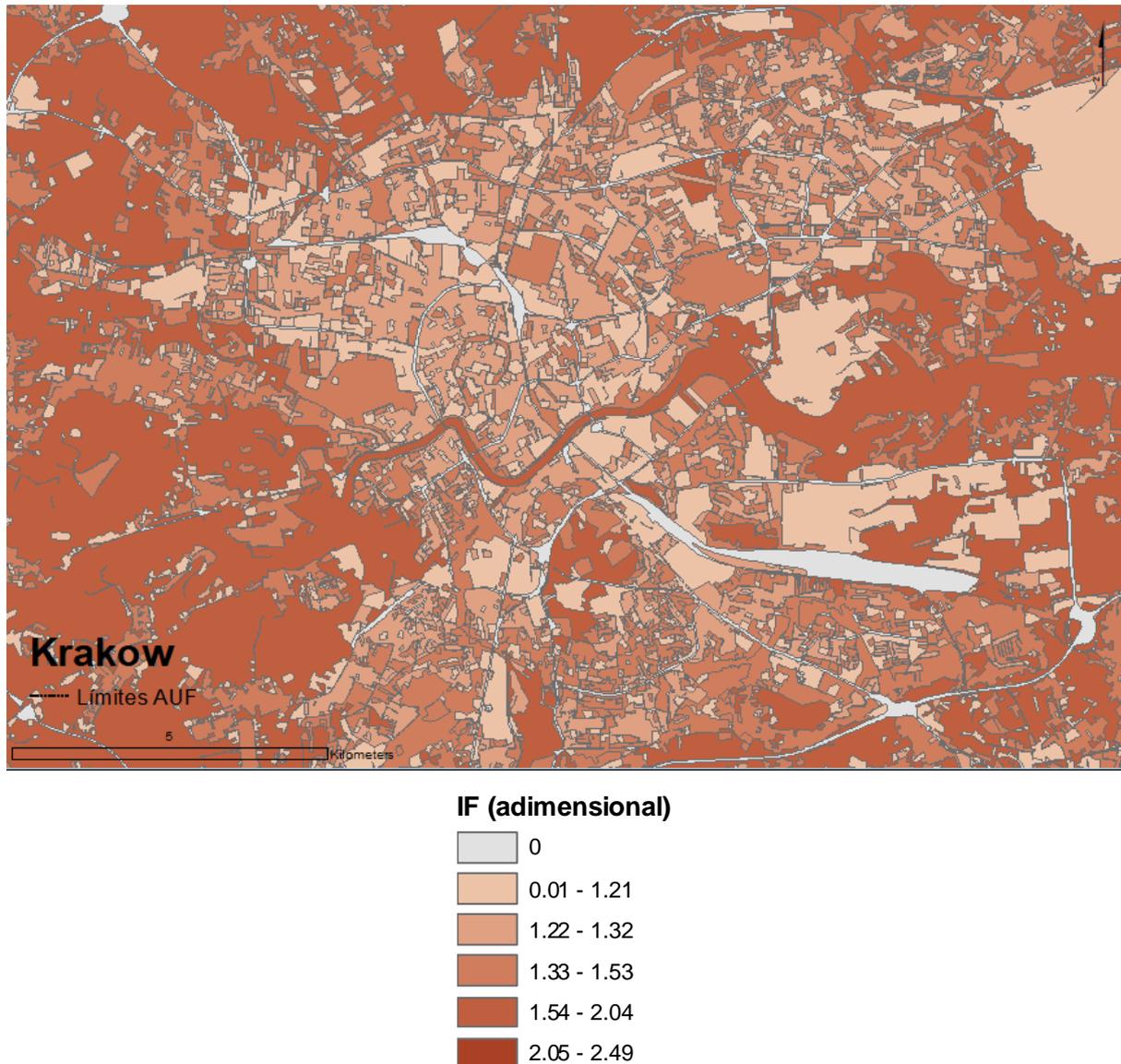


Figura 40. Clasificación Krakow (arriba) y resultado IF (abajo).

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la métrica IF evalúa la complejidad de la forma de un objeto en comparación con un cuadrado estándar del mismo tamaño. Los valores bajos indican una distribución más compacta y regular de áreas urbanas, mientras que los valores altos sugieren una mayor fragmentación y una distribución más dispersa y compleja. En análisis revela diferencias mínimas entre las clases C1 y C2, con la métrica de C3 ligeramente más pequeña en la mayoría de los casos.

5.1.1.6. Ratio Medio Perímetro-Área (RMPA)

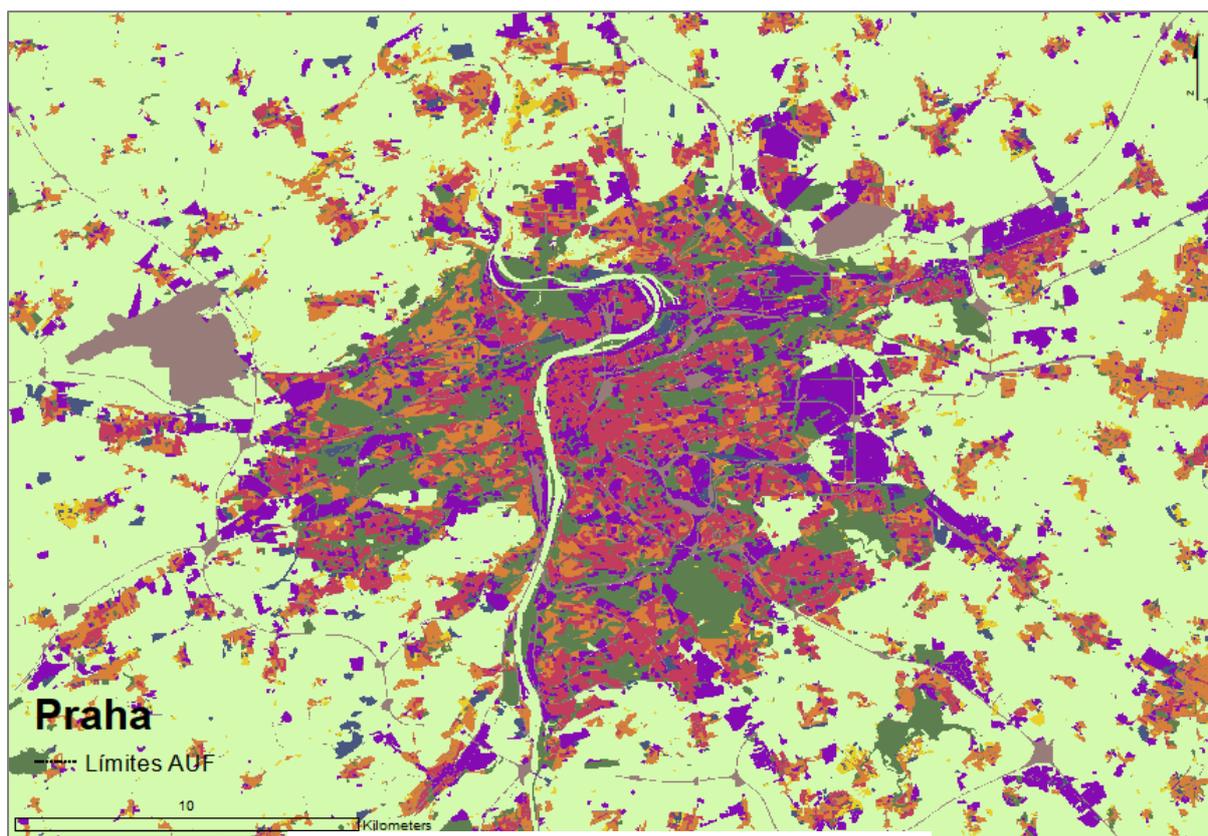
Se trata de una media del perímetro-área de todos los objetos que lo forman a nivel clase, y es de las medidas más directas de la forma de un objeto. El tamaño del objeto influye en el resultado puesto que es una relación del área-perímetro, su resultado aporta más información sobre la morfología de los objetos de una clase, el cual se puede comparar entre las distintas AUF. Generalmente, los valores

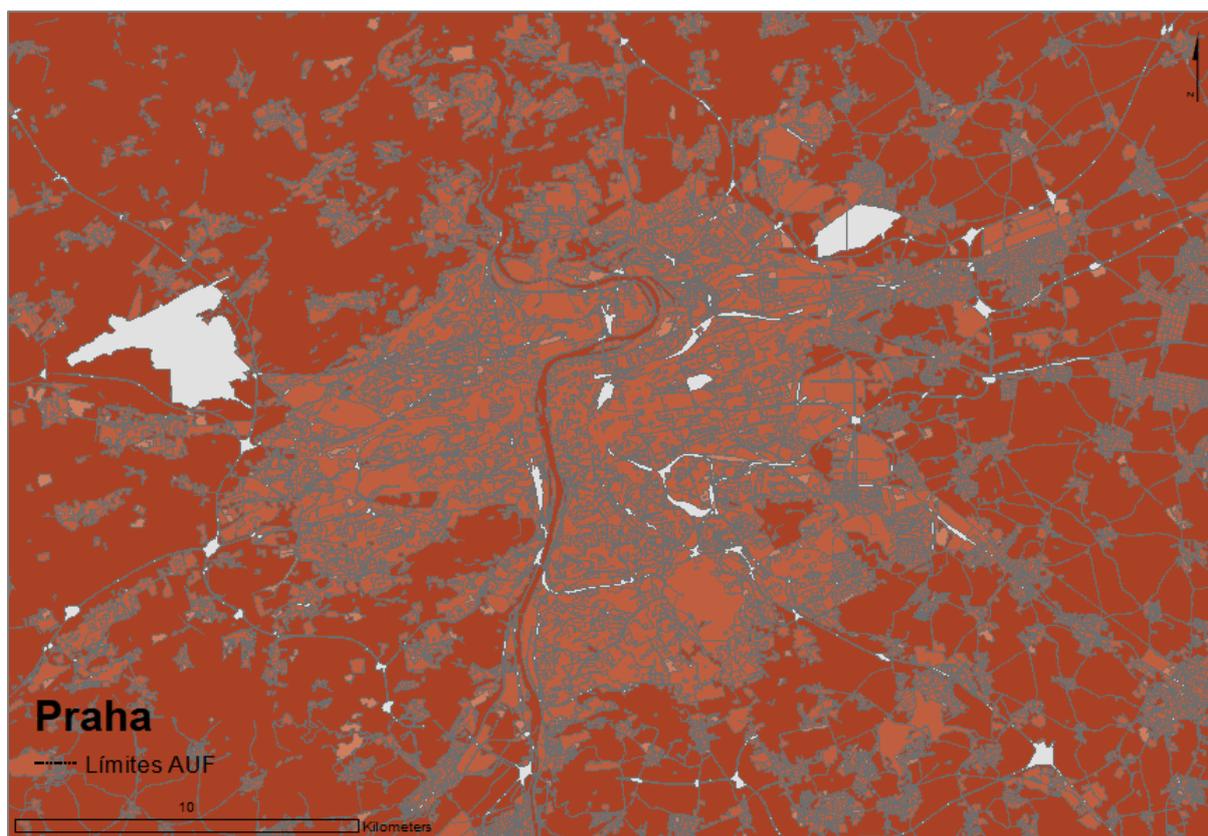
bajos del RMPA indican una menor fragmentación y una distribución más compacta y regular de áreas urbanas, mientras que los valores altos del RMPA sugieren una mayor fragmentación y una distribución más dispersa y compleja de áreas urbanas en el paisaje.

En la Figura 41 se muestra el ejemplo del AUF de Praha y de Helsinki. Praha tiene un RMPA en la clase C1 de 0,7089 y en la clase C4 de 0,6788, mientras que Helsinki el RMPA de la clase C1 es de 0,0466 y el de la clase C4 de 0,0463. Estos resultados que se observan en la Tabla 16 indican que los objetos de las clases C1 y C4 en Praha son más pequeños y sus formas más irregulares, por el contrario, en Helsinki los objetos son de mayor tamaño y más simples.

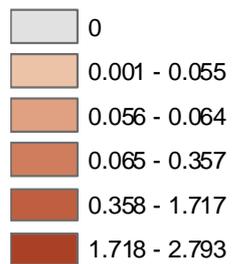
Tabla 16. Métricas RMPA (adimensional) para las clases seleccionadas.

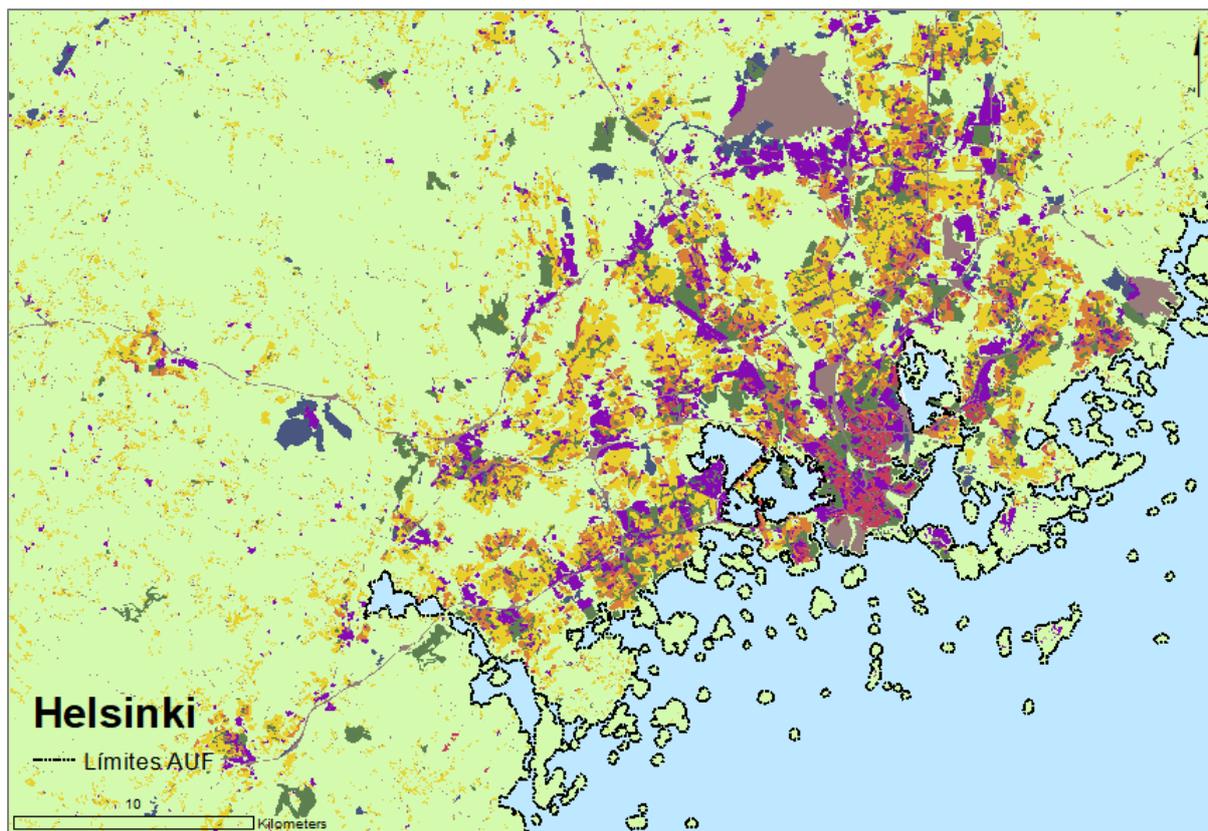
AUF	RMPA C1	RMPA C2	RMPA C3	RMPA C4	RMPA C7
Dublin	0,0518	0,0576	0,0642	0,0499	0,0586
Helsinki	0,0466	0,0440	0,0583	0,0463	0,0443
Kracow	0,0554	0,0504	0,0622	0,0498	0,0431
Lyon	0,0586	0,0513	0,0598	0,0498	0,0471
Nuremberg	0,0496	0,0418	0,0537	0,0526	0,0463
Praha	0,7089	0,7081	0,8446	0,6788	0,7082
Thessaloniki	0,0541	0,0532	0,0594	0,0547	0,0497
Valencia	0,0497	0,0575	0,0601	0,0499	0,0497





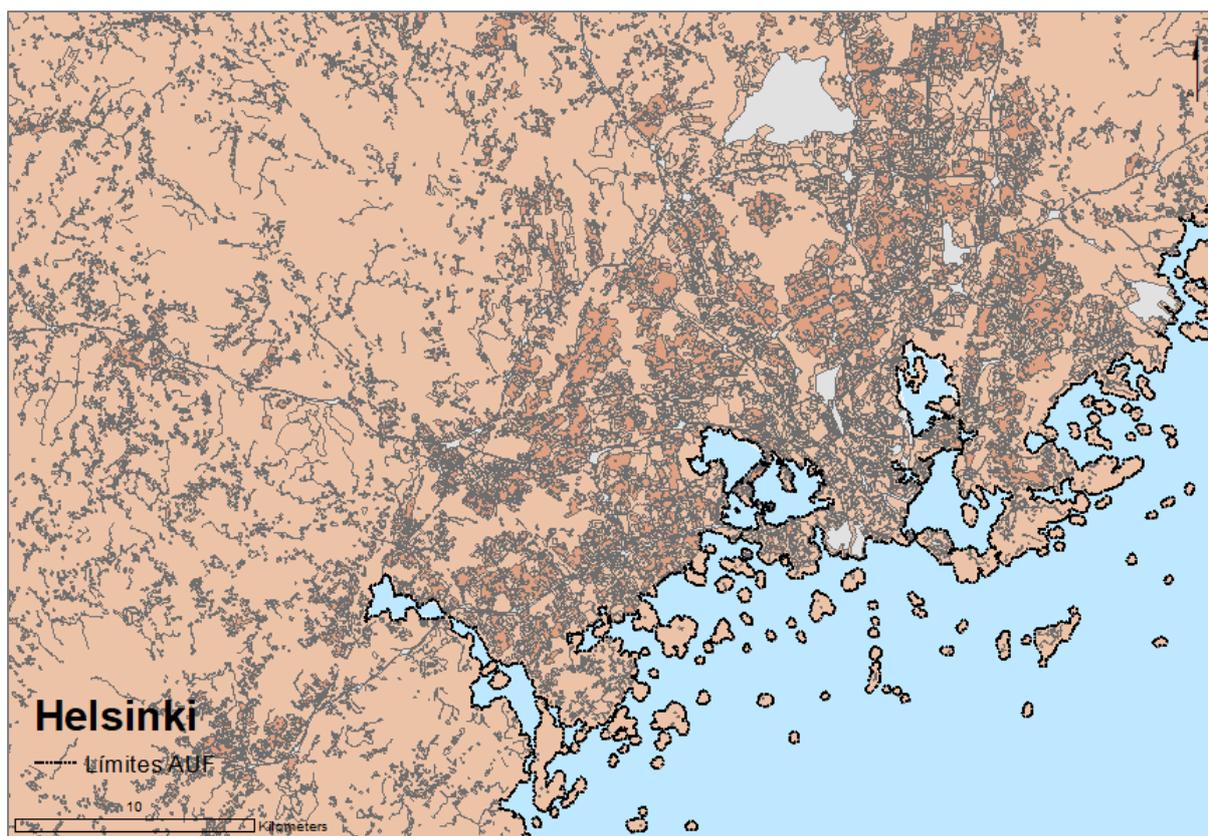
RMPA (adimensional)





CLASS

- C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)
- C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)
- C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%)
- C4 - Industrial, commercial, public, military and private units
- C5 - Transport infrastructure
- C6 - Mine/Dump sites, Construction/Land without use
- C7 - Green areas, sports and leisure facilities
- C8 - Agriculture, Forest, Water



RMPA (adimensional)

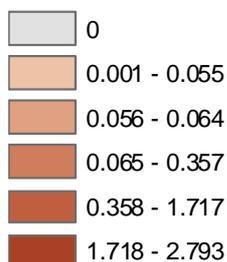


Figura 41. Clasificación de Praha y Helsinki, y su resultado RMPA.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.7. Densidad de Clase (DC), Cohesión (COHE) y Compacidad de la clase (C)

Las métricas DC (%), C y la COHE están interrelacionadas, pero no siempre se comportan de manera lineal o predecible en todos los contextos urbanos. Si bien estas métricas pueden estar correlacionadas en algunos paisajes urbanos, la relación entre ellas puede variar según varios factores, como la forma del paisaje, la distribución de las áreas urbanas y la presencia de áreas no urbanizadas.

Por un lado, una mayor DC (%) puede contribuir a una mayor COHE si las áreas urbanas están más concentradas y cercanas entre sí. Sin embargo, esto no es una regla rígida, ya que la DC (%) también podría ser alta en paisajes fragmentados donde las áreas urbanas están dispersas, pero con mayor densidad local en ciertas zonas. Por otro lado, una mayor C puede favorecer una mayor COHE, ya que las formas más compactas tienden a estar más conectadas entre sí. Sin embargo, en algunos casos, áreas urbanas compactas podrían estar dispersas en el paisaje y no necesariamente estar más contiguas.

Es importante tener en cuenta que estas métricas son herramientas analíticas que ofrecen diferentes perspectivas sobre la fragmentación urbana. Pueden proporcionar perspectivas, pero es crucial considerar el contexto y utilizar múltiples métricas en conjunto para obtener una comprensión más completa de la configuración espacial de las áreas urbanas y su nivel de fragmentación.

En la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 se observan los valores para las distintas métricas de clase. En primer lugar, la Figura 42 muestra cómo se distribuyen las DC (%) para cada una de las clases analizadas. Se puede observar que los porcentajes absolutos de las clases analizadas varían desde menos de un 12% para Helsinki a más de un 18% para Lyon.

Tabla 17. Métrica DC (%) para las clases seleccionadas.

AUF	DC (%) C1	DC (%) C2	DC (%) C3	DC (%) C4	DC (%) C7
Dublin	0,0017	0,0239	0,0454	0,0238	0,0266
Helsinki	0,0022	0,0104	0,0677	0,0217	0,0165
Kracow	0,0145	0,0662	0,0370	0,0229	0,0116
Lyon	0,0143	0,0641	0,0512	0,0407	0,0170
Nuremberg	0,0097	0,0470	0,0319	0,0333	0,0162
Praha	0,0199	0,0445	0,0186	0,0320	0,0216
Thessaloniki	0,0264	0,0300	0,0189	0,0394	0,0061
Valencia	0,0252	0,0103	0,0645	0,0475	0,0129

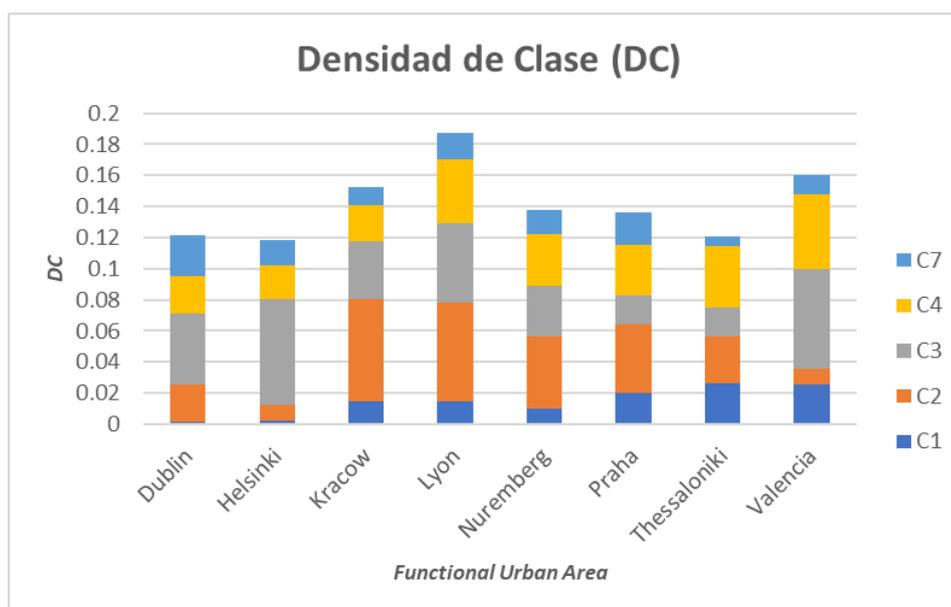


Figura 42. Índice nivel clase DC (%).
Fuente: Elaboración propia.

Se pueden destacar varias observaciones a partir de los valores de COHE en las diferentes AUF. Por un lado, se nota una variación en los valores de cohesión entre distintas categorías en cada AUF. Por ejemplo, en el caso de Dublin, se destaca una mayor cohesión en la categoría C1 en comparación con las demás. Por otro lado, ciertas AUF exhiben valores superiores de COHE en categorías específicas; por ejemplo, Helsinki presenta valores relativamente altos en C1 y C2. Además, se observa que algunas AUF tienen una distribución de COHE más uniforme a lo largo de todas las categorías, tal es el caso de Lyon y Praha. En términos generales, Thessaloniki destaca al presentar valores relativamente elevados de COHE en todas las categorías, en comparación con otras AUF.

Tabla 18. Métrica COHE (adimensional) para las clases seleccionadas.

AUF	COHE C1	COHE C2	COHE C3	COHE C4	COHE C7
Dublin	0,0335	0,0109	0,0051	0,0100	0,0151
Helsinki	0,0385	0,0171	0,0059	0,0146	0,0177
Kracow	0,0160	0,0074	0,0063	0,0153	0,0220
Lyon	0,0184	0,0095	0,0068	0,0138	0,0168
Nuremberg	0,0239	0,0139	0,0109	0,0148	0,0207
Praha	0,0133	0,0085	0,0095	0,0109	0,0133
Thessaloniki	0,0373	0,0169	0,0145	0,0174	0,0382
Valencia	0,0282	0,0197	0,0111	0,0174	0,0271

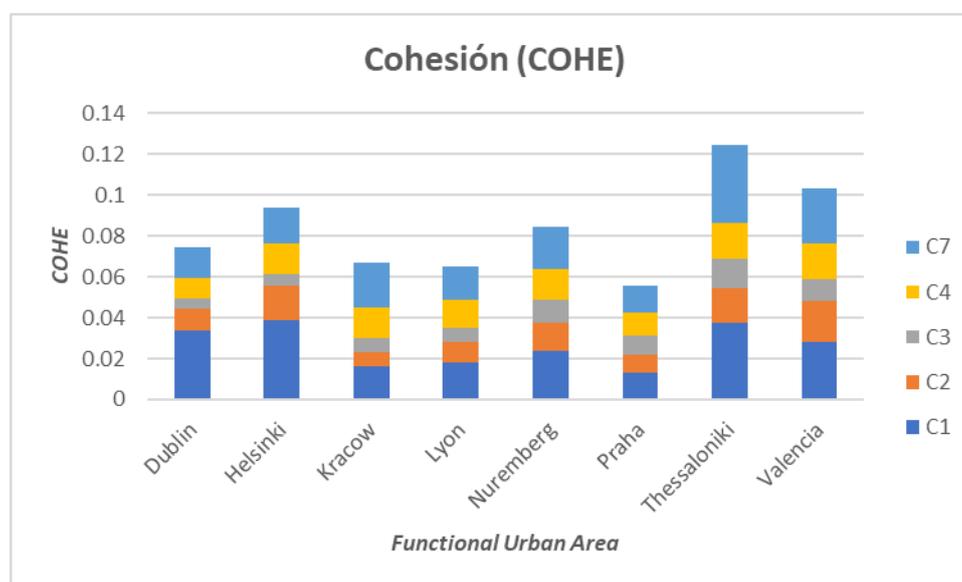


Figura 43. Métrica de clase COHE.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de C son notoriamente elevados en todas las AUF, lo que refleja una disposición urbana más compacta en relación con la distribución de dichos elementos. Aunque la compactidad en general es notablemente alta, las disparidades específicas en las categorías podrían señalar variaciones en la disposición espacial de distintos tipos de elementos dentro de cada AUF. En AUF como Lyon, se mantiene una alta compactidad en casi todas las clases, lo que sugiere uniformidad en la disposición de distintos tipos de elementos. Por contraste, en Kracow, Thessaloniki y Valencia, donde se advierte

una mayor variabilidad en los valores de compacidad en diferentes clases, podría existir una distribución más heterogénea de los elementos de las clases en términos de su proximidad espacial.

Tabla 19. Métrica C (adimensional) para las clases seleccionadas.

AUF	C C1	C C2	C C3	C C4	C C7
Dublin	99,6644	99,8813	99,4960	99,5906	99,7676
Helsinki	99,7000	99,6118	99,6308	99,6565	99,7194
Kracow	99,6629	99,7090	99,2006	99,6229	99,6931
Lyon	99,8357	99,8422	99,5737	99,7705	99,6254
Nuremberg	99,7170	99,7745	99,5846	99,6506	99,6357
Praha	99,7093	99,5458	99,3356	99,5847	99,7377
Thessaloniki	99,9484	99,6586	99,1985	99,6716	99,4901
Valencia	99,8314	99,3223	99,6768	99,6799	99,5921

En resumen, los valores elevados de DC (%) podrían sugerir mayor COHE si las áreas urbanas están concentradas y cercanas, pero también pueden darse en paisajes fragmentados con áreas dispersas pero densas localmente en ciertas zonas. La métrica C generalmente refleja una distribución más compacta, aunque las diferencias en los valores podrían indicar variaciones en la disposición espacial de distintos elementos dentro de cada AUF. Además, la métrica de clase COHE muestra valores notoriamente altos en todas las AUF, lo que sugiere una disposición urbana más compacta en comparación con la distribución de los elementos. No obstante, las disparidades específicas entre las clases podrían señalar variaciones en la disposición espacial de los elementos dentro de cada AUF.

5.1.2. Índices Nivel Súper-Objeto (AUF)

Las métricas a nivel súper-objeto para las ocho AUF que se han considerado se muestran en la Tabla 20 y se analizan en esta sección.

Tabla 20. Índices Nivel Súper-Objeto para las 8 AUF. Valores adimensionales.

AUF	DF	COHE	DSHAN	USHAN	IFFR	IFFA
Dublin	1,0407	99,9975	0,5898	0,3031	0	0,0160
Helsinki	1,0342	99,9967	0,5547	0,2851	0	0,0506
Kracow	1,0373	99,9975	0,6787	0,3488	0	0,0139
Lyon	1,0481	99,9942	0,8225	0,4227	0	0,0150
Nuremberg	1,0481	99,9918	0,6524	0,3353	0	0,0369
Prague	1,1190	99,9784	0,6575	0,3379	0	0,0236
Thessaloniki	1,0362	99,9935	0,5987	0,3076	0	0,0416

Valencia	1,0408	99,9922	0,7562	0,3886	0	0,0264
----------	--------	---------	--------	--------	---	--------

5.1.2.1. Dimensión Fractal (DF)

La dimensión fractal es otra de las medidas básicas de la forma de los objetos, aporta información de la complejidad de los objetos sin ser afectado por el tamaño de los datos. Es una medida adimensional y su rango puede variar entre uno y dos. Cuando es próximo a uno se trata de un objeto con una forma de perímetro muy simple, cercano a la forma cuadrada, cuando se aproxima a dos su forma es más compleja.

En el cálculo a nivel súper-objeto que se muestra en la Tabla 20 las AUF con menor y mayor tamaño de DF. Los resultados, que varían entre 1,0342 y 1,119, no muestran un patrón claro de las AUF.

Los datos presentados en la Tabla 20 revelan una variedad de valores para la DF en diferentes AUF. La dimensión fractal es una medida que evalúa la complejidad y la forma de un área urbana, y en este caso, sus valores oscilan entre 1,0342 y 1,1190 en las AUF estudiadas.

Al analizar los resultados, se observa que algunas AUF, como Prague y Nuremberg, presentan valores más altos de DF, aproximándose a 1,1190. Estos valores sugieren una forma más fragmentada y compleja en términos de la distribución de los elementos urbanos. Por otro lado, AUF como Helsinki y Thessaloniki presentan valores más bajos de DF (1,0342 y 1,0362, respectivamente), indicando formas más simples y menos fragmentadas en su configuración urbana.

Sin embargo, al observar los valores de DF en relación con otras métricas como COHE, DSHAN o USHAN, no se evidencia un patrón claro que indique una relación específica entre estas medidas en todas las AUF estudiadas. Cada AUF parece poseer su propio perfil en términos de forma y complejidad, lo que resalta la diversidad en la estructura urbana entre estas áreas.

5.1.2.2. Diversidad de Shannon (DSHAN) y Uniformidad de Shannon o Entropía (USHAN)

En la Figura 44 se muestra un gráfico que compara la Diversidad de Shannon (DSHAN) y la Entropía Uniforme (USHAN) para las distintas AUF, donde se puede apreciar que las AUF con mayor riqueza son aquellas que cuentan con todos los usos del suelo entremezclados entre sí. La DSHAN cuantifica la diversidad en función del número de clases presentes en el súper-objeto (riqueza) y la proporción de superficie de cada clase (uniformidad). En este conjunto de datos, los valores de DSHAN varían entre 0,5547 y 0,8225. Las AUF con valores más altos de DSHAN, como Lyon, Valencia, Nuremberg y Prague, muestran una mayor diversidad y distribución heterogénea de categorías en sus áreas urbanas. Esto puede sugerir una mezcla de usos del suelo y características en estas ciudades, lo que contribuye a una mayor complejidad y diversidad en la forma urbana.

Por otro lado, las AUF con valores más bajos de DSHAN, como Helsinki, Thessaloniki y Dublin, exhiben una distribución de categorías más uniforme y menos diversa en su estructura urbana. Esto podría indicar una mayor consistencia en ciertos tipos de usos del suelo o características en estas áreas.

En cuanto USHAN, representa la probabilidad de que dos objetos del súper-objeto sean de distinta clase. Los valores de USHAN oscilan entre 0,2851 y 0,4227 en este conjunto de datos. Las AUF con valores más bajos de USHAN, como Helsinki, Dublin y Thessaloniki, muestran una distribución más uniforme de las categorías, lo que sugiere una mayor equidad en la presencia de diferentes tipos de elementos en sus áreas urbanas.

Por otro lado, las AUF con valores más altos de USHAN, como Lyon y Kracow, presentan una distribución menos uniforme, lo que podría indicar la coexistencia de áreas con diferentes usos del suelo o características en estas AUF.

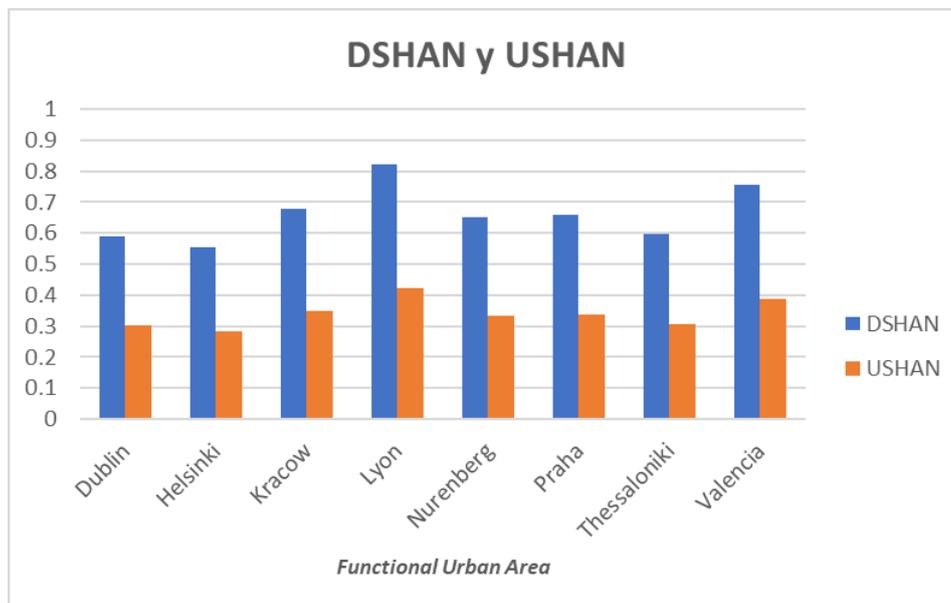


Figura 44. Métrica de súper-objeto DHAN y USHAN.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3. Índice de Fragmentación Funcional Relativa (IFFR)

Indica el nivel de fragmentación funcional de las clases totales de las AUF. Cuanto menor es IFFR mayor número de clases tiene el AUF generando una dispersión urbana policéntrica. Cuando IFFR aumenta, su integración se hace óptima derivando la homogeneidad urbana.

Las AUF con IFFR nulo son aquellas que tienen la máxima diversidad posible, sin tener en cuenta el número de objetos de cada clase, se trata de AUF que disponen de una gran selección de recursos de diferentes tipos.

5.1.2.4. Índice de Fragmentación Funcional Absoluta (IFFA) y Cohesión (COHE)

El IFFA evalúa el grado de integración estructural entre las clases dentro del AUF analizado. Cuando el IFFA es menor, se refleja una mayor fragmentación. Como se puede observar en la Tabla 20, el valor más alto del IFFA corresponde a Helsinki, mientras que el valor más bajo se presenta en Kracow.

De acuerdo con el análisis efectuado, esto implica que Helsinki, seguida por Thessaloniki y Nuremberg, exhiben una mayor cohesión en la distribución de clases, lo que significa que estas ciudades presentan una distribución más homogénea en comparación con las demás. En contraste, las ciudades con menor valor de IFFA, como Kracow, Lyon y Dublin, revelan un nivel significativo de fragmentación entre las diversas clases. Este fenómeno se correlaciona con el índice de Cohesión (COHE), que mide la conectividad entre clases. En estas ciudades, el COHE indica un nivel moderado a alto, lo que sugiere que las clases están subdivididas en mayor medida.

Los resultados resaltan a Helsinki como la ciudad con el mejor nivel de fragmentación, ya que posee valores elevados tanto en IFFA como en COHE, indicando que las clases están menos subdivididas y la fragmentación es reducida. Es importante considerar que estos resultados se derivan de polígonos

que podrían no reflejar fielmente la realidad, debido al proceso de agregación que se ha llevado a cabo.

5.2. Índices de equidad espacial

5.2.1. Espacios verdes por cápita

Para una mejor comprensión de los resultados, la Tabla 7 se ha reordenado en base a la superficie de espacios verdes (m²) por habitante, para así obtener un ranking de las AUF con una mayor proporción de espacios verdes por habitante (Tabla 21).

Tabla 21. Resultados indicador espacios verdes por habitante.

Nombre AUF	Población estimada 2012 (Habitantes)	Superficie de espacios verdes (m ²) >5000 m ²	Espacios verdes (m ²) >5000 m ² por cápita
Thessaloniki	927.217	8.271.293	8,92
Valencia	1.714.585	21.929.160	12,79
Kracow	1.373.909	43.161.633	31,42
Lyon	1.897.722	60.865.625	32,07
Nuremberg	1.273.542	46.485.708	36,50
Prague	2.121.603	121.264.279	57,16
Helsinki	1.370.911	80.721.756	58,88
Dublin	1.781.007	184.181.177	103,41

Con el uso de la escala de color se pueden identificar tres rangos en cuanto a la superficie de espacios verdes (m²) por cápita. En el primer grupo (rojo), se encuentra el AUF de Thessaloniki, que tiene una cantidad menor al valor mínimo establecido de 10 m² de espacios verdes por cápita. En el segundo grupo (verde claro), se encuentran las AUF de Valencia, Krakow, Lyon y Nuremberg, con una cantidad entre 10 y 50 m² de espacios verdes por cápita. Por último, en el tercer grupo (verde oscuro), se encuentran el AUF de Prague, Helsinki y Dublin, que tienen una cantidad mayor al valor óptimo establecido de 50 m² de espacios verdes por cápita. Es importante destacar que las dos AUF con la mayor cantidad de espacios verdes por cápita son las seleccionadas para el norte de Europa, Dublin y Helsinki, mientras que las dos con menor cantidad son las seleccionadas para el sur de Europa, Thessaloniki y Valencia.

Existen varios factores que contribuyen a que las áreas urbanas del sur de Europa tengan menos espacios verdes por habitante que las del norte de Europa. Uno de los motivos posibles es el clima, ya que las áreas urbanas del sur suelen tener un clima más cálido y seco. Además, estas áreas suelen ser más densamente pobladas, lo que limita la cantidad de espacio disponible para crear parques y jardines. Otro factor puede ser el desarrollo urbano, ya que las áreas urbanas del sur de Europa han experimentado un crecimiento más acelerado. Asimismo, es posible que existan diferencias culturales y de prioridades en la planificación urbana.

A partir de índice calculado, se puede concluir que el AUF del primer grupo (rojo) no cumple con la recomendación de la OMS de tener al menos 10 m² de espacios verdes por cápita, lo que sugiere una escasez de espacios verdes urbanos. En contraste, el resto de los grupos superan el umbral establecido por la OMS.

5.2.2. Proximidad de la población a espacios verdes

Como se mencionó anteriormente, la calidad ambiental de cada AUF no solo se mide por el indicador de espacios verdes por habitante. Es importante también considerar la cercanía a estos espacios verdes, ya que su distribución en el espacio tiene un impacto significativo en la accesibilidad para la población. Por lo tanto, es recomendable analizar la proximidad de los espacios verdes a la población para evaluar adecuadamente la calidad ambiental de cada AUF.

Para calcular el porcentaje de suelo urbano con acceso a zona verde, se tiene que dividir la superficie de suelo urbano con acceso a zona verde por la superficie total de suelo urbano. Por un lado, la superficie de suelo urbano con acceso a zona verde se extrae directamente de las zonas urbanas (C1, C2 y C3) que cuenta con acceso a espacios verdes situados a una distancia de 300 metros que se puede ver en la Figura 32.

Por otro lado, la superficie total de suelo total urbano se obtiene agregando las áreas para cada AUF de las clases *C1 - Continuous Urban Fabric*, *C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric* y *C3 - Discontinuous Urban Fabric*. A continuación, se muestran los resultados en la Tabla 22, que se ha organizado de menor a mayor porcentaje suelo urbano con acceso a zona verde para una mejor comprensión. Se puede apreciar que hay una alta variabilidad entre el valor de Krakow (25.45%), con el valor más bajo de porcentaje suelo urbano con acceso a zona verde, y Praga (58.06%) con el valor más alto.

Se puede observar que ciudades como Thessaloniki, Valencia, Lyon, Helsinki y Nuremberg se sitúan en un rango similar, con valores de entre el 40% y el 50%. Por otro lado, las ciudades de Dublin y Praga destacan como las que tienen un mayor porcentaje de suelo urbano con acceso a zona verde, ambas superando el 50%.

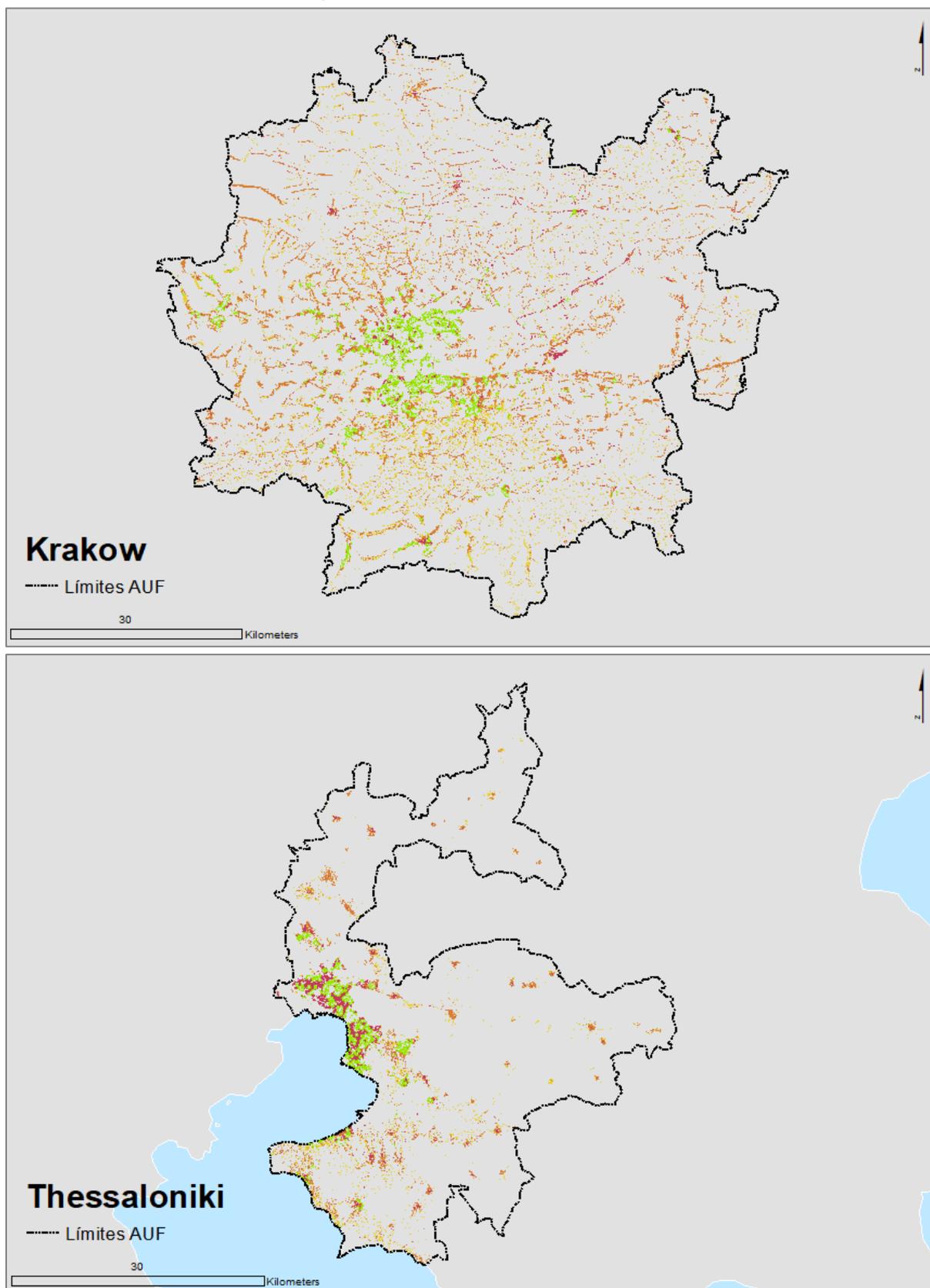
Cómo se mencionó anteriormente, este indicador no tiene en cuenta la calidad de las zonas verdes, ni la cantidad de población que tiene acceso a ellas. Por lo tanto, sería importante complementar este análisis con otras medidas que consideren estos aspectos para obtener una evaluación más completa de la calidad ambiental en una ciudad.

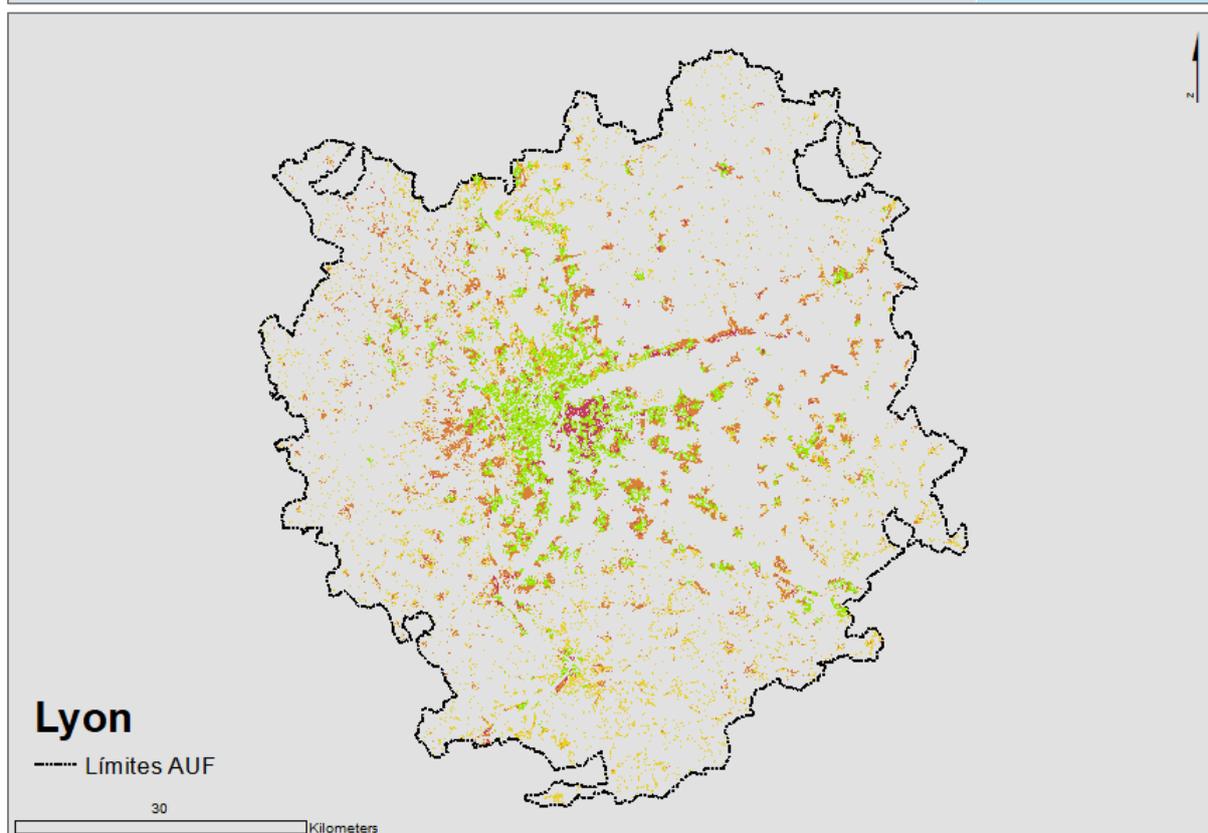
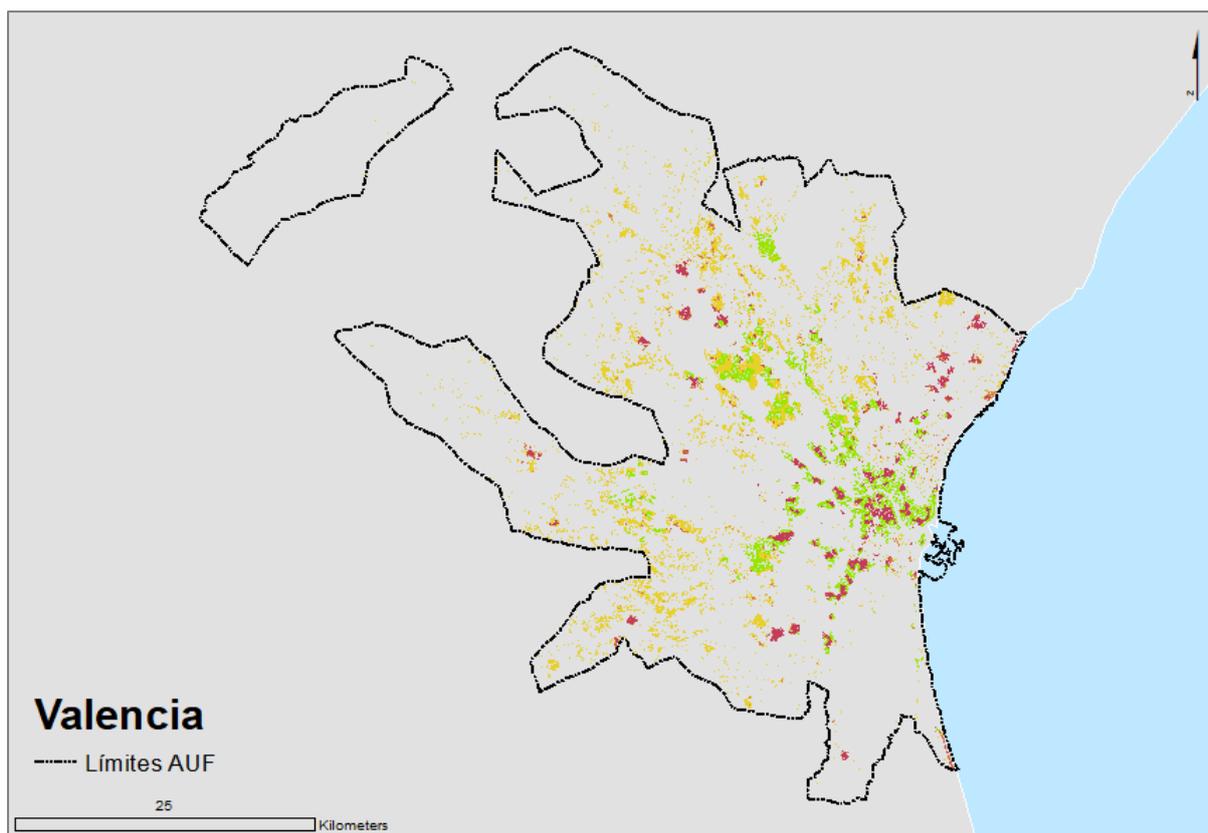
Tabla 22. Resultados índices de proximidad de población a espacios verdes.

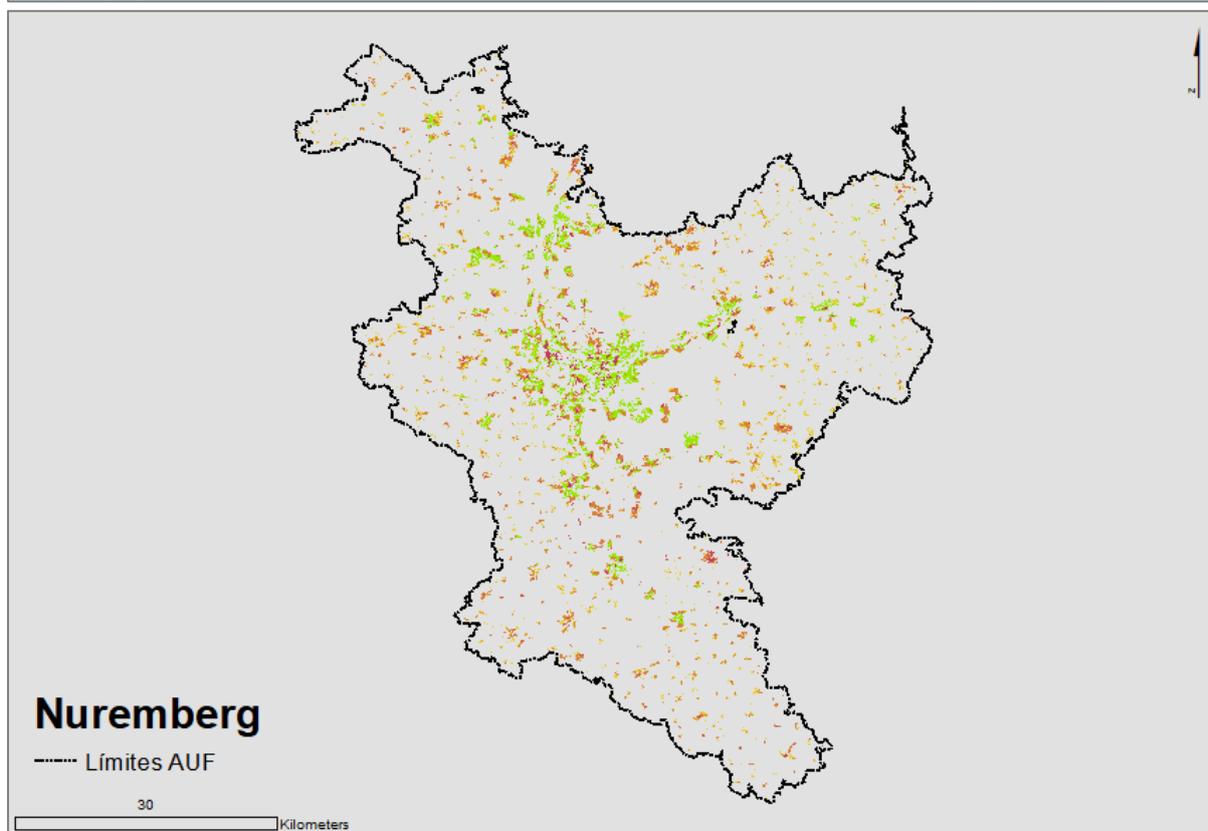
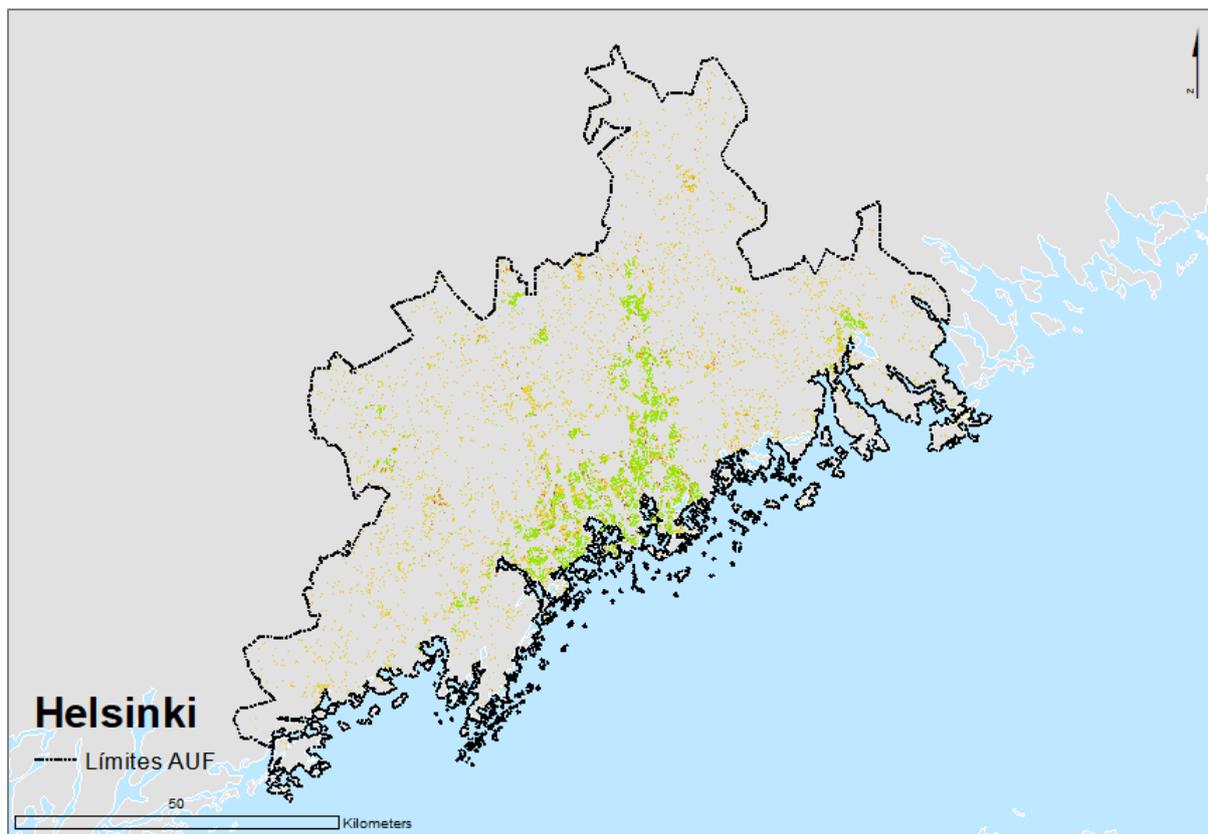
Nombre AUF	Superficie de suelo urbano con acceso a zona-verde - m ²	Superficie total de suelo urbano - m ²	% suelo urbano con acceso a zona verde
Kracow	112.632.569	442.559.754	25,45%
Thessaloniki	42.937.835	106.511.662	40,31%
Valencia	75.821.385	174.910.834	43,35%
Lyon	217.213.510	475.852.734	45,65%
Helsinki	181.682.998	397.763.738	45,68%
Nuremberg	129.752.823	259.890.189	49,93%
Dublin	254.212.622	497.743.948	51,07%
Praha	274.943.093	473.573.632	58,06%

Adicionalmente, se presenta un análisis espacial para cada AUF, en el que se compara la superficie de suelo urbano con acceso a zonas verdes con la superficie total de suelo urbano. Este análisis

permite obtener información más detallada acerca de la distribución de zonas verdes en cada AUF y su relación con el suelo urbano (Figura 45).







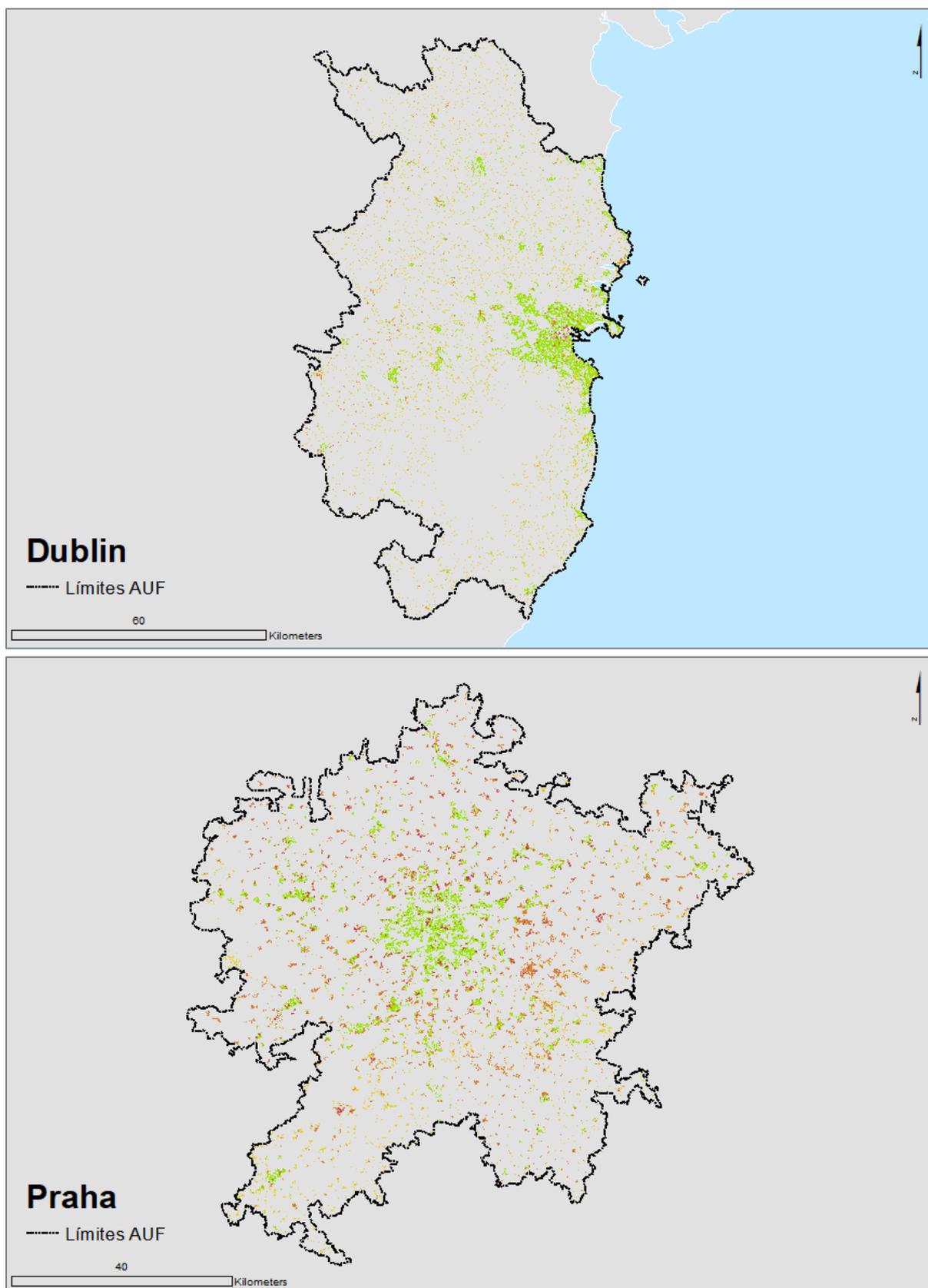


Figura 45. Suelo urbano con acceso a zona verde (verde) con respecto al total de suelo urbano (C1 rojo, C2 naranja y C3 amarillo).
Fuente: Elaboración propia.

5.3. Análisis comparativo de las Áreas Urbanas Funcionales

En las secciones previas, se ha llevado a cabo una exhaustiva discusión sobre los diversos índices espaciales y cómo sus valores varían entre las clases y las Áreas Urbanas Funcionales (AUF). En esta sección, se crea un **Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE)** a partir de los índices de fragmentación urbana y de equidad espacial, para cada una de las clases seleccionadas (C1, C2, C3, C4 y C7) en las diferentes AUF, siguiendo un enfoque similar al que plantea (Soriano, 2017). Esto nos permitirá realizar un análisis comparativo de la sostenibilidad urbana de las diferentes AUF de manera más accesible.

La **lista de índices utilizados** para el cálculo del ICSE abarca un total de 14, de los cuales 12 se refieren a índices de fragmentación urbana (DC, TM, DB, RMPA, IF, DO, DEMvp, COHE, C, DSHAN, USHAN, IFFA) y 2 a índices de equidad espacial (Espacios verdes (m²) >5000 m² por cápita, % suelo urbano con acceso a zona verde). En el ANEXO I. RESUMEN DE LOS ÍNDICES ESPACIALES UTILIZADOS. se proporciona un resumen de los índices de fragmentación y equidad espacial que se emplearán en el cálculo del índice compuesto de sostenibilidad espacial.

Debido a la amplia variedad de índices espaciales que deben combinarse para calcular el índice compuesto de sostenibilidad espacial, es necesario **normalizar los índices utilizados** para el cálculo del ICSE. La normalización se lleva a cabo mediante la transformación de los valores de las variables en un rango de 0 a 1 utilizando la transformación mínimo-máximo:

$$MinMax_v = \frac{(valor\ actual\ v - valor\ mínimo\ de\ v)}{(valor\ máximo\ de\ v - valor\ mínimo\ de\ v)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

v es la variable que se normaliza.

Algunos de los índices espaciales utilizados están inversamente relacionados con el concepto de fragmentación urbana, como la Densidad de Objetos, lo que significa que cuanto menor es el valor de la variable, mayor es la fragmentación urbana. Se consideró que se obtendrían resultados más intuitivos si el valor máximo de las variables normalizadas representara una mayor sostenibilidad y, por lo tanto, estas variables inversamente proporcionales se invirtieron durante el cálculo de la transformación mínimo-máximo. De esta manera, la incorporación de cada índice espacial en el cálculo del índice compuesto de sostenibilidad espacial sería lineal, lo que facilitaría su ejecución.

Para **asignar los pesos**, se ha otorgado un valor de 0.05 a cada uno de los 12 índices espaciales de fragmentación, mientras que a los 2 índices espaciales de equidad urbana se les ha otorgado un peso de 0.2 cada uno. En estudios futuros se podría utilizar el proceso analítico jerárquico, con la finalidad de establecer prioridades de los elementos de la jerarquía haciendo una serie de juicios basados en comparaciones por pares de elementos.

El **Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE)** se calcula a nivel de clase, integrando cada variable, ya sea a nivel clase como a nivel súper-objeto, con sus respectivos pesos. Finalmente, el índice compuesto de sostenibilidad mediante la siguiente ecuación en la cual los índices espaciales normalizados y los pesos asignados se combinan.

$$ICSE = (p_1 * I1 + p_2 * I2 + p_3 * I3 + p_n * In) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$I1, I2, I3, \dots, I14$ son los valores de cada una de las catorce variables.

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_{14}$ es el peso correspondiente.

Este cálculo se realiza para cada una de las clases (C1, C2, C3, C4, C7).

Para calcular el **ICSE Total**, se promedia el ICSE de cada una de las clases analizadas y se normaliza de nuevo mediante la transformación de los valores de las variables en un rango de 0 a 1 utilizando la transformación mínimo-máximo, tal como se explicó anteriormente.

La presenta los resultados del ICSE para cada clase seleccionada dentro de las AUF (C1, C2, C3, C4, C7), junto con el ICSE total.

Tabla 23 presenta los resultados del ICSE para cada clase seleccionada dentro de las AUF (C1, C2, C3, C4, C7), junto con el ICSE total.

Tabla 23. Resultados finales del Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE).

AUF	ICSE C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%)	ICSE C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%)	ICSE C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%)	ICSE C4 - Industrial, commercial, public, military and private units	ICSE C7 - Green areas, sports and leisure facilities	ICSE Total
Dublin	1,000	0,656	0,122	0,572	0,918	1,000
Helsinki	0,864	0,555	0,160	0,640	0,812	0,865
Nuremberg	0,828	0,562	0,285	0,536	0,784	0,844
Lyon	0,808	0,495	0,095	0,469	0,726	0,616
Valencia	0,753	0,514	0,143	0,446	0,735	0,614
Thessaloniki	0,697	0,397	0,260	0,469	0,710	0,580
Praha	0,795	0,399	0,135	0,385	0,664	0,492
Kracow	0,430	0,128	0,000	0,411	0,547	0,000

Finalmente, para lograr un análisis comparativo más coherente, se ha llevado a cabo una **reclasificación** del ICSE en 5 categorías: muy baja, baja, media, alta o muy alta utilizando la clasificación de rupturas naturales (jenks). Con una clasificación de cortes naturales (Jenks), las clases se basan en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Las rupturas de clase se crean de manera que los valores similares se agrupan mejor y se maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos.

A continuación, se proporciona una descripción contextual junto con un análisis de las fortalezas y debilidades de cada AUF, basado en los resultados finales del ICSE.

Dublin es la capital de la República de Irlanda y la ciudad más poblada de la isla. Está ubicada cerca del centro de la costa este sobre el mar de Irlanda, en la desembocadura del río Liffey y en el centro del condado de Dublín. La población estimada para 2012 del AUF era de 1.781.007 habitantes. Destaca

por ser el AUF de mayor extensión, con un total de 7016.44 km², y la de menor densidad de población, registrando 254 habitantes por km². Únicamente el 2% del tejido urbano se clasifica como C1 - Continuous Urban fabric (> 80%), la proporción más baja de todas las AUF, mientras que el 65% se clasifica como C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%).

En base a los resultados finales del ICSE, Dublin destaca por su alta o muy alta sostenibilidad urbana en prácticamente todas las clases analizadas en comparación con el resto de AUF. Sin embargo, se observa una baja sostenibilidad urbanas en la clase C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%). En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana muy alta en comparación con las AUF analizadas.

Helsinki es la capital y la ciudad más grande de la República de Finlandia. Está situada en la costa sur del país, a la orilla del golfo de Finlandia. Situada junto al mar Báltico, la línea de costa de Helsinki se extiende unos 100 kilómetros, y acoge 300 islas frente al continente. El AUF tiene una población estimada para 2012 de 1.370.911 habitantes. Únicamente el 3% y el 13% del tejido urbano se clasifica como C1 - Continuous Urban fabric (> 80%) y C2 – Discontinuous Dense Urban Fabric (50-80%) respectivamente, unas de las proporciones más bajas de todas las AUF, mientras que el 84% se clasifica como C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%), la proporción más alta de todas las AUF.

En base a los resultados finales del ICSE, Helsinki destaca por su alta sostenibilidad urbana en las clases C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%), C4 - Industrial, commercial, public, military and private units y C7 - Green areas, sports and leisure facilities. Sin embargo, evidencia una sostenibilidad media en las clases C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%) y C3 - Discontinuous Urban Fabric (< 50%). En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana alta en comparación con las AUF analizadas.

Nuremberg es una ciudad alemana a orillas del río Pegnitz, perteneciente al estado de Baviera. Su AUF tiene una población estimada para 2012 de 1.273.542 habitantes, por lo que es la segunda ciudad en importancia del estado tras Munich. La distribución del tejido urbano se sitúa aproximadamente en la media de las AUF analizadas, siendo similar a otras AUF, como Krakow y Lyon.

En base a los resultados finales del ICSE, Nuremberg destaca por una sostenibilidad alta o muy alta en prácticamente todas las clases, mientras que en la clase C4 - Industrial, commercial, public, military and private units se observa una sostenibilidad urbana media. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana alta en comparación con las AUF analizadas.

Lyon es una ciudad ubicada en el sureste de Francia. Situada al norte del corredor natural del valle del Ródano y entre el Macizo Central al oeste y los Alpes al este, la ciudad de Lyon ocupa una posición estratégica en la circulación norte-sur en Europa. Su AUF, con 1.897.722 habitantes, es la segunda mayor del país, tras París, y la segunda mayor de las AUF analizadas en población estimada para 2012. La distribución del tejido urbano se sitúa aproximadamente en la media de las AUF analizadas, siendo similar a otras AUF, como Krakow y Nuremberg.

En base a los resultados finales del ICSE, Lyon presenta una sostenibilidad urbana alta en la clase C1 - Continuous Urban Fabric (> 80%) y media en C2 - Discontinuous Dense Urban Fabric (50% - 80%). Sin embargo, se observa una baja sostenibilidad urbana en las restantes clases analizadas. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana media en comparación con las AUF analizadas.

Valencia es, por tamaño demográfico, la tercera ciudad de España después de Madrid y Barcelona. Su AUF tiene una población estimada para 2012 de 1.714.585 habitantes. La ciudad está situada a orillas del río Turia, en la costa levantina de la península ibérica, justo en el centro del golfo de Valencia.

Destaca por ser la segunda AUF con menor extensión, por detrás de Thessaloniki. Sin embargo, su densidad poblacional es la más alta de la AUF analizadas, registrando 980 habitantes por km². Únicamente el 11% del tejido urbano se clasifica como C2 – Discontinuous Dense Urban Fabric (50-80%), el valor más bajo de todas las AUF, mientras que el 24% y el 66% corresponden a C1 - Continuous Urban fabric (> 80%) y C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%) respectivamente, siendo los segundos valores más altos de todas las AUF analizadas.

En base a los resultados finales del ICSE, Valencia destaca por una sostenibilidad urbana media en prácticamente todas las clases analizadas en comparación con el resto de AUF. Sin embargo, se observa una baja sostenibilidad urbanas en la clase C4 - Industrial, commercial, public, military and private units. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana media en comparación con las AUF analizadas.

Thessaloniki alberga una población cercana al millón de habitantes, convirtiéndola en la urbe más grande del norte de Grecia. Se asienta a lo largo del Golfo de Thermaïkos y Strymonikos, en tierras fértiles bañadas por los ríos Axios, Gallikos y Loudias, así como los lagos Koroneia y Volvi. Destaca por ser el AUF con la menor población estimada para 2012, presentando una diferencia de aproximadamente 2:1 en comparación con Prague, la de mayor tamaño. Por otro lado, se distingue también por ser el AUF de menor extensión, con una relación de 4:1 en comparación con Dublin, la de mayor superficie. Sin embargo, su densidad poblacional se ubica en el segundo puesto, registrando 656 habitantes por km², siendo superada únicamente por Valencia. El 32% del tejido urbano se clasifica como C1 - Continuous Urban fabric (> 80%), la proporción más alta de todas las AUF, mientras que solo el 27% se clasifica como C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%), el segundo valor más bajo por detrás de Prague.

En base a los resultados finales del ICSE, Thessaloniki destaca por una alta sostenibilidad urbana en la clase C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%). Sin embargo, el resto de las clases destacan por una sostenibilidad urbana baja o muy baja. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana baja en comparación con las AUF analizadas.

Prague es la capital de la República Checa. Situada a orillas del río Moldava, su AUF tiene aproximadamente 2.121.603 de habitantes, lo que la convierte en la ciudad más poblada del país. Destaca por ser el AUF con la mayor población estimada para 2012 de las AUF analizadas. Destaca por ser la segunda AUF con mayor extensión, solo por detrás de Dublin. Únicamente el 23% del tejido urbano se clasifica como C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%), la proporción más baja de todas las AUF, mientras que el 53% se clasifica como C2 – Discontinuous Dense Urban Fabric (50-80%), el segundo valor más alto por detrás de Prague.

En base a los resultados finales del ICSE, Prague destaca por una sostenibilidad urbana media en la clase C3 – Discontinuous Urban Fabric (<50%). Sin embargo, el resto de las clases destacan por una sostenibilidad urbana baja o muy baja. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana muy baja en comparación con las AUF analizadas.

Krakow es una de las ciudades más grandes, antiguas e importantes de Polonia. Tradicionalmente ha sido uno de los centros económicos, científicos, culturales y artísticos del país. Situada en las márgenes del río Vístula, su AUF tiene una población de 1.373.909 habitantes. El 56% del tejido urbano se clasifica como C2 – Discontinuous Dense Urban Fabric (50-80%), la proporción más alta de todas las AUF.

A partir de los resultados finales del ICSE, no se identifican áreas de fortaleza en su modelo urbano en base a los parámetros analizados en este estudio. Se evidencia una muy baja sostenibilidad urbana en todas las clases analizadas. En base al ICSE Total, destaca por una sostenibilidad urbana muy baja en comparación con las AUF analizadas.

Es importante destacar que estos resultados son aproximados, y para desarrollar un modelo teórico más sólido para la generación de un índice de sostenibilidad espacial se requeriría un análisis más exhaustivo y detallado.

Basándonos en los resultados analizados y considerando el marco teórico de este Trabajo Final de Máster, como ejemplo, se podrían destacar algunas estrategias y acciones generales para desarrollar una mayor sostenibilidad urbana, teniendo en cuenta que el objetivo de este estudio no radica en el diseño de soluciones específicas para lograr dicha sostenibilidad urbana. Algunas de estas estrategias podrían ser:

- Fomentar el desarrollo de áreas urbanas continuas con un enfoque en la conservación y mejora de los espacios verdes, promoviendo parques y áreas recreativas para aumentar la calidad de vida de los ciudadanos.
- Implementar planes urbanos que fomenten la densificación de áreas urbanas discontinuas de baja densidad, con un énfasis en el uso eficiente del suelo y una distribución equitativa de los recursos y servicios públicos.
- Promover el equilibrio entre el desarrollo industrial, comercial y residencial para evitar la sobre concentración de actividades económicas en un área determinada, lo que puede contribuir a la reducción de la fragmentación espacial y a una distribución más equitativa de las oportunidades laborales.
- Fomentar la conectividad y accesibilidad en las zonas urbanas, promoviendo el desarrollo de infraestructuras sostenibles que permitan una movilidad eficiente y respetuosa con el medio ambiente, como sistemas de transporte público e infraestructuras para peatones y ciclistas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En un contexto donde más del 70% de la población europea reside en áreas urbanas y se prevé un aumento significativo en esta cifra en las décadas venideras, se destaca la importancia crucial de la planificación urbana sostenible. Para abordar este desafío, se requieren herramientas de planificación urbana efectivas que permitan tomar decisiones informadas y estratégicas.

El objetivo general de este TFM ha consistido en realizar un análisis comparativo de ocho AUFs en Europa, mediante la identificación y caracterización de indicadores de sostenibilidad urbana a través de índices espaciales. Para ello, se ha tomado en consideración la dimensión espacial para desarrollar un Índice Compuesto de Sostenibilidad Espacial (ICSE) como herramienta para una planificación territorial y urbana más sostenible y que asegure la equidad urbana espacial. El empleo de la información proporcionada por el Atlas Urbano del programa Copernicus ha sido fundamental para generar los índices espaciales de sostenibilidad urbana. Esta base de datos espacial cuenta con datos disponibles para más de 300 áreas urbanas en toda Europa, lo que permite realizar análisis comparativos y obtener una visión general de las tendencias comunes. Otra de las grandes ventajas del Atlas Urbano es que los datos que proporciona son gratuitos y de fácil acceso. En la metodología propuesta cabe destacar el preprocesado de datos del Atlas Urbano original con el fin de simplificar la información y hacerla más representativa para el objetivo propuesto. Con la actualización sistemática de la información cada 6 años (2006, 2012, 2018), en futuros trabajos se podría monitorear el desarrollo de las áreas urbanas y entender la evolución de estas a lo largo del tiempo. Además, los datos se podrían integrar fácilmente con otras fuentes de información, permitiendo un análisis más completo y detallado sobre distintos aspectos de sostenibilidad urbana.

Es importante destacar que el Atlas Urbano se centra en el concepto de Área Urbana Funcional (AUF), anteriormente conocida como Large Urban Zone (LUZ). Un AUF consiste en una ciudad y los municipios que forman su entorno funcional, concretamente de influencia laboral. Es, por tanto, una agregación de unidades territoriales Local Administrative Units (LAU). El objetivo es disponer de un área con una parte significativa de población ocupada residente que se desplaza a trabajar a la ciudad objeto de estudio. Un municipio pertenece al AUF de una ciudad si el 15% o más de su población ocupada se desplaza a la ciudad por motivos de trabajo. Ese es el criterio principal, pero hay otros como la contigüidad. Para municipios muy pequeños hay excepciones a la regla general.

El estudio de la sostenibilidad espacial llevada a cabo en este trabajo con herramientas SIG, ha permitido analizar la fragmentación urbana y la equidad espacial en término de espacios verdes, de las distintas AUF seleccionadas. Es crucial resaltar la importancia de los índices espaciales para un análisis objetivo y cuantitativo de la sostenibilidad urbana, que es clave para el desarrollo sostenible de las áreas urbanas. Asimismo, es fundamental destacar que la fragmentación urbana y la equidad espacial son dos elementos fundamentales para lograr ciudades más sostenibles, y medir estos aspectos a través de índices espaciales puede contribuir a alcanzar algunos de los objetivos dentro del Marco Europeo de Referencia para la Ciudad Sostenible y de los ODS de la ONU.

El estudio de sostenibilidad espacial realizado en este TFM ofrece la oportunidad de analizar diversos aspectos, entre ellos la fragmentación urbana y la equidad espacial en diferentes AUF. Los resultados pueden ser examinados por índices específicos si se desea entender cómo se manifiesta una clase en diferentes AUF, o bien, se pueden consolidar a nivel de AUF. El análisis comparativo realizado

desempeña un papel fundamental al identificar las Áreas Urbanas Funcionales (AUF) que enfrentan los mayores desafíos en términos de sostenibilidad urbana, especialmente aquellas ubicadas en las regiones este y sur de Europa. Estos resultados ofrecen una base sólida para la implementación de políticas y medidas específicas destinadas a mejorar la sostenibilidad en estas áreas. Entre las soluciones que podrían destacarse se encuentra la transición gradual de un modelo urbano monocéntrico hacia uno policéntrico. Además, se podría considerar la implementación de políticas que fomenten la ocupación y la regeneración urbana en áreas con baja densidad urbana, como es el caso de Krakow o Praha. Futuros estudios podrían centrarse en la generación de índices combinados con un modelo teórico más sólido que permitan medir la sostenibilidad urbana, aunque es una tarea compleja y multidimensional que requiere considerar diversos aspectos relacionados con la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio, como el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), en un entorno SIG. Esta metodología permitiría simplificar aún más si cabe el proceso de toma de decisiones en el marco de la sostenibilidad urbana.

Este proyecto resalta el enorme potencial de las herramientas SIG para el análisis espacial y geoestadístico aplicado al territorio y al urbanismo. Además, a través del uso de una base de datos estandarizada y actualizada regularmente, como el Atlas Urbano, se pueden obtener nuevas perspectivas sobre el desarrollo de las áreas urbanas en términos de sostenibilidad. Esto resulta de gran importancia para la toma de decisiones en la planificación y el diseño urbano, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas y el medio ambiente.

ANEXO I. RESUMEN DE LOS ÍNDICES ESPACIALES UTILIZADOS.

Tabla 24. Resumen de los índices espaciales utilizados.

Tipología	Índices Espaciales	Clase/Súper Objeto	Dublin	Helsinki	Kracow	Lyon	Nuremberg	Praha	Thessaloniki	Valencia
Índices de Fragmentación Urbana: Área y Perímetro	DC: Densidad de Clase (%)	C1	0,0017	0,0022	0,0145	0,0143	0,0097	0,0199	0,0264	0,0252
		C2	0,0239	0,0104	0,0662	0,0641	0,0470	0,0445	0,0300	0,0103
		C3	0,0454	0,0677	0,0370	0,0512	0,0319	0,0186	0,0189	0,0645
		C4	0,0238	0,0217	0,0229	0,0407	0,0333	0,0320	0,0394	0,0475
		C7	0,0266	0,0165	0,0116	0,0170	0,0162	0,0216	0,0061	0,0129
	TM: Tamaño Medio del Objeto (m ²)	C1	30.079,20	32.163,26	24.167,61	37.729,57	30.965,87	18.033,90	98.053,41	79.045,92
		C2	68.732,30	32.566,63	31.906,84	65.485,65	71.824,49	14.695,03	25.386,97	13.483,38
		C3	12.804,84	16.616,12	8.554,05	15.738,16	24.758,00	10.309,74	9.010,42	20.858,29
		C4	21.465,28	31.160,87	24.256,24	38.772,55	27.693,99	21.452,76	21.746,65	32.220,28
		C7	57.037,53	46.102,44	41.420,70	31.074,52	33.471,05	30.081,03	22.304,80	26.750,59
	DB: Densidad de Borde (m/m ²)	C1	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004	0,0003	0,0006	0,0004	0,0005
		C2	0,0006	0,0003	0,0020	0,0016	0,0010	0,0016	0,0010	0,0004
		C3	0,0018	0,0022	0,0018	0,0020	0,0011	0,0008	0,0009	0,0019
		C4	0,0007	0,0005	0,0006	0,0009	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011
		C7	0,0005	0,0004	0,0003	0,0005	0,0004	0,0005	0,0002	0,0004
Índices de Fragmentación Urbana: Forma	RMPA: Ratio Medio Perímetro-Área (adimensional)	C1	0,0518	0,0466	0,0554	0,0586	0,0496	0,7089	0,0541	0,0497
		C2	0,0576	0,0440	0,0504	0,0513	0,0418	0,7081	0,0532	0,0575
		C3	0,0642	0,0583	0,0622	0,0598	0,0537	0,8446	0,0594	0,0601
		C4	0,0499	0,0463	0,0498	0,0498	0,0526	0,6788	0,0547	0,0499
		C7	0,0586	0,0443	0,0431	0,0471	0,0463	0,7082	0,0497	0,0497
		C1	1,3929	1,3085	1,2759	1,4241	1,3114	1,6062	1,3242	1,4418
		C2	1,5606	1,3470	1,3895	1,5635	1,5267	1,7305	1,3449	1,2835

	IF: Índice de Forma (adimensional)	C3	1,1863	1,1854	1,1519	1,2645	1,3657	1,4590	1,1561	1,2468
		C4	1,1677	1,1956	1,1777	1,2499	1,2040	1,3827	1,1815	1,1993
		C7	1,3144	1,3514	1,3586	1,3056	1,2919	1,4684	1,2856	1,2752
	DF: Dimensión Fractal (adimensional) ⁹	Súper-objeto	1,0407	1,0342	1,0373	1,0481	1,0481	1,1190	1,0362	1,0408
Índices de Fragmentación Urbana: Agregación	Nob: Número de Objetos (nº) ¹⁰	C1	395	342	2.257	1.393	918	6.296	380	558
		C2	2.436	1.587	7.800	3.592	1.920	17.274	1.673	1.332
		C3	24.868	20.166	16.266	11.950	3.779	10.300	2.972	5.410
		C4	7.775	3.446	3.545	3.855	3.533	8.503	2.558	2.581
		C7	3.277	1.770	1.051	2.004	1.418	4.093	385	846
	DO: Densidad de Objetos (nº/km2)	C1	0,0563	0,0691	0,6006	0,3796	0,3128	1,1034	0,2688	0,3190
		C2	0,3472	0,3209	2,0757	0,9788	0,6543	3,0272	1,1835	0,7614
		C3	3,5442	4,0773	4,3287	3,2564	1,2879	1,8051	2,1025	3,0924
		C4	1,1081	0,6967	0,9434	1,0505	1,2040	1,4901	1,8096	1,4753
		C7	0,4670	0,3579	0,2797	0,5461	0,4832	0,7173	0,2724	0,4836
	DEMvp: Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo (m)	C1	797,9516	703,1569	292,0839	304,3673	386,0320	79,9912	275,8944	155,4161
		C2	345,4494	282,6237	67,0762	127,5730	183,6947	24,1950	69,0369	141,5007
		C3	91,6656	86,3206	90,4693	108,8372	148,4824	110,1111	118,1831	102,7288
		C4	271,6760	285,0064	254,1864	225,3144	190,0780	123,6097	150,7834	176,3696
		C7	262,2510	283,3062	444,3398	291,3062	309,8349	196,8458	368,9771	259,2001
	COHE: Cohesión (adimensional)	C1	0,0335	0,0385	0,0160	0,0184	0,0239	0,0133	0,0373	0,0282
		C2	0,0109	0,0171	0,0074	0,0095	0,0139	0,0085	0,0169	0,0197
		C3	0,0051	0,0059	0,0063	0,0068	0,0109	0,0095	0,0145	0,0111
		C4	0,0100	0,0146	0,0153	0,0138	0,0148	0,0109	0,0174	0,0174
		C7	0,0151	0,0177	0,0220	0,0168	0,0207	0,0133	0,0382	0,0271

⁹ La Dimensión Fractal (DF) no se utiliza en el cálculo del ICSE, ya que en relación con otras métricas como COHE, DSHAN o USHAN, no se observa un patrón claro que sugiera una relación específica entre estas medidas en todas las AUF estudiadas.

¹⁰ El Número de Objetos (Nob) no se utiliza en el cálculo del ICSE, ya que es una medida simple que resulta necesaria para el cálculo de otros índices utilizados.

	C: Compacidad de la clase (adimensional)	C1	99,6644	99,7000	99,6629	99,8357	99,7170	99,7093	99,9484	99,8314
		C2	99,8813	99,6118	99,7090	99,8422	99,7745	99,5458	99,6586	99,3223
		C3	99,4960	99,6308	99,2006	99,5737	99,5846	99,3356	99,1985	99,6768
		C4	99,5906	99,6565	99,6229	99,7705	99,6506	99,5847	99,6716	99,6799
		C7	99,7676	99,7194	99,6931	99,6254	99,6357	99,7377	99,4901	99,5921
Índices de Fragmentación Urbana: Diversidad	DSHAN (adimensional)	Súper-objeto	0,5898	0,5547	0,6787	0,8225	0,6524	0,6575	0,5987	0,7562
	USHAN (adimensional)	Súper-objeto	0,3031	0,2851	0,3488	0,4227	0,3353	0,3379	0,3076	0,3886
	IFFR (adimensional) ¹¹	Súper-objeto	0	0	0	0	0	0	0	0
	IFFA (adimensional)	Súper-objeto	0,0160	0,0506	0,0139	0,0150	0,0369	0,0236	0,0416	0,0264
Índices de equidad espacial	Espacios verdes (m2) >5000 m2 por cápita	Súper-objeto	103,41	58,88	31,42	32,07	36,50	57,16	8,92	12,79
	% suelo urbano con acceso a zona verde	Súper-objeto	51,07%	45,68%	25,45%	45,65%	49,93%	58,06%	40,31%	43,35%

¹¹ El Índice de Fragmentación Funcional Relativa (IFFR) no se utiliza en el cálculo del ICSE, ya que los valores para todas AUF son nulos, dado que todas las clases (C1, C2, C3, C4 y C7) están representadas en cada una de las AUF.

Tabla 25. Resumen de los índices espaciales utilizados normalizados.

Tipología	Índices Espaciales	Clase/Súper Objeto	Dublin	Helsinki	Kracow	Lyon	Nuremberg	Praha	Thessaloniki	Valencia
Índices de Fragmentación Urbana: Área y Perímetro	DC: Densidad de Clase (%)	C1	1,000	0,992	0,806	0,809	0,879	0,724	0,626	0,644
		C2	0,664	0,868	0,023	0,055	0,314	0,352	0,571	0,870
		C3	0,338	0,000	0,465	0,250	0,542	0,744	0,739	0,048
		C4	0,665	0,697	0,679	0,409	0,521	0,541	0,429	0,306
		C7	0,623	0,776	0,850	0,768	0,780	0,698	0,933	0,830
	TM: Tamaño Medio del Objeto (m ²)	C1	0,241	0,264	0,174	0,326	0,250	0,106	1,000	0,788
		C2	0,672	0,268	0,261	0,636	0,707	0,069	0,188	0,055
		C3	0,047	0,090	0,000	0,080	0,181	0,020	0,005	0,137
		C4	0,144	0,253	0,175	0,338	0,214	0,144	0,147	0,264
		C7	0,542	0,420	0,367	0,252	0,278	0,241	0,154	0,203
	DB: Densidad de Borde (m/m ²)	C1	1,000	1,000	0,857	0,857	0,905	0,762	0,857	0,810
		C2	0,762	0,905	0,095	0,286	0,571	0,286	0,571	0,857
		C3	0,190	0,000	0,190	0,095	0,524	0,667	0,619	0,143
		C4	0,714	0,810	0,762	0,619	0,667	0,667	0,524	0,524
		C7	0,810	0,857	0,905	0,810	0,857	0,810	0,952	0,857
Índices de Fragmentación Urbana: Forma	RMPA: Ratio Medio Perímetro-Área (adimensional)	C1	0,988	0,994	0,983	0,979	0,990	0,169	0,985	0,990
		C2	0,980	0,997	0,989	0,988	1,000	0,170	0,986	0,980
		C3	0,972	0,979	0,975	0,978	0,985	0,000	0,978	0,977
		C4	0,990	0,994	0,990	0,990	0,987	0,207	0,984	0,990
		C7	0,979	0,997	0,998	0,993	0,994	0,170	0,990	0,990
	IF: Índice de Forma (adimensional)	C1	0,583	0,729	0,786	0,530	0,724	0,215	0,702	0,499
		C2	0,294	0,663	0,589	0,289	0,352	0,000	0,666	0,773
		C3	0,941	0,942	1,000	0,805	0,630	0,469	0,993	0,836
		C4	0,973	0,924	0,955	0,831	0,910	0,601	0,949	0,918
		C7	0,719	0,655	0,643	0,734	0,758	0,453	0,769	0,787
		C1	1,000	0,997	0,873	0,924	0,940	0,755	0,950	0,939
		C2	0,932	0,938	0,527	0,784	0,860	0,305	0,736	0,835

	DO: Densidad de Objetos (nº/km2)	C3	0,184	0,059	0,000	0,251	0,712	0,591	0,521	0,289
		C4	0,754	0,850	0,792	0,767	0,731	0,664	0,590	0,668
		C7	0,904	0,929	0,948	0,885	0,900	0,845	0,949	0,900
	DEMvp: Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo (m)	C1	0,000	0,123	0,654	0,638	0,532	0,928	0,675	0,830
		C2	0,585	0,666	0,945	0,866	0,794	1,000	0,942	0,848
		C3	0,913	0,920	0,914	0,891	0,839	0,889	0,879	0,899
		C4	0,680	0,663	0,703	0,740	0,786	0,872	0,836	0,803
	COHE: Cohesión (adimensional)	C7	0,692	0,665	0,457	0,655	0,631	0,777	0,554	0,696
		C1	0,850	1,000	0,326	0,398	0,563	0,246	0,964	0,692
		C2	0,174	0,359	0,069	0,132	0,263	0,102	0,353	0,437
		C3	0,000	0,024	0,036	0,051	0,174	0,132	0,281	0,180
		C4	0,147	0,284	0,305	0,260	0,290	0,174	0,368	0,368
	C: Compacidad de la clase (adimensional)	C7	0,299	0,377	0,506	0,350	0,467	0,246	0,991	0,659
		C1	0,621	0,669	0,619	0,850	0,691	0,681	1,000	0,844
		C2	0,911	0,551	0,681	0,858	0,768	0,463	0,614	0,165
		C3	0,397	0,576	0,003	0,500	0,515	0,183	0,000	0,638
		C4	0,523	0,611	0,566	0,763	0,603	0,515	0,631	0,642
Índices de Fragmentación Urbana: Diversidad	C7	0,759	0,695	0,660	0,569	0,583	0,719	0,389	0,525	
	DSHAN (adimensional)	Súper-objeto	0,131	0,000	0,463	1,000	0,365	0,384	0,164	0,752
	USHAN (adimensional)	Súper-objeto	0,131	0,000	0,463	1,000	0,365	0,384	0,164	0,752
Índices de equidad espacial	IFFA (adimensional)	Súper-objeto	0,057	1,000	0,000	0,030	0,627	0,264	0,755	0,341
	Espacios verdes (m2) >5000 m2 por cápita	Súper-objeto	1,000	0,529	0,238	0,245	0,292	0,511	0,000	0,041

Análisis de la sostenibilidad urbana en ocho Áreas Urbanas Funcionales intermedias en Europa mediante índices espaciales.

	% suelo urbano con acceso a zona verde	Súper-objeto	0,786	0,620	0,000	0,619	0,751	1,000	0,456	0,549
--	--	--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ANEXO II. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.

Tabla 26. Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.		X		
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables.			X	
ODS 13. Acción por el clima.		X		
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Dada la relación del trabajo fin de máster los ODS de la Agenda 2030, destaca principalmente la estrecha relación con el **Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles**. Este objetivo se enfoca en lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Esto se alinea perfectamente con el objetivo general de este TFM, que consiste en realizar un análisis comparativo de ocho AUFs intermedias en Europa, mediante la identificación y caracterización de indicadores de sostenibilidad urbana a través de índices espaciales que puedan favorecer en el proceso de toma de decisiones en la planificación y el diseño urbano, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de las personas y el medio ambiente.

Dentro de las metas del objetivo 11, las que tienen una relación más directa son:

- “**11.2** De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”, “**11.7** De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad” y “**11.a** Apoyar los vínculos económicos,

sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional”, en lo que se refiere al concepto de equidad espacial en el tránsito, el acceso a espacios verdes y públicos, y vínculos bien planificados entre zonas urbanas y periurbanas y zonas rurales.

- “**11.3** De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países”, ya el TFM se centra en la aplicación de índices espaciales que pueden ayudar en la toma de decisión para una planificación urbana sostenible, que es fundamental para el funcionamiento eficiente de las ciudades y el bienestar de sus ciudadanos.

Con una relación “media”, destaca el **Objetivo 3: Salud y bienestar**. Este objetivo se enfoca en garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. En concreto la meta del objetivo 3, “**3.4** Para 2030, reducir en un tercio la mortalidad prematura por enfermedades no transmisibles mediante la prevención y el tratamiento y promover la salud mental y el bienestar”, ya que se relaciona con el concepto de equidad espacial, que promueve la calidad de vida y el bienestar de las personas en entornos urbanos, y es uno de los aspectos más importantes del proyecto.

En la misma línea que el objetivo anterior, el **Objetivo 9: Industria, innovación en infraestructuras**, busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. En concreto la meta del objetivo 9, “**9.1** Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos”.

También con una relación “media”, el **Objetivo 13: Acción por el clima**, que se centra en adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Las metas del objetivo 13, “**13.1** Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países” y “**13.2** Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales” tienen relación directa con el cálculo y monitoreo de índices espaciales presentados en este TFM, que pueden ayudar a entender mejor los modelos urbanos y obtener las claves para la toma de decisión territorial y urbana y su influencia sobre la sostenibilidad urbana, teniendo en cuenta la adaptación al cambio climático y la reducción de su impacto sobre los ciudadanos.

Con una relación “baja” el **Objetivo 12: Producción y consumo responsable**, que busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En concreto “**12.2** De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales”, “**12.7** Promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas y prioridades nacionales” y “**12.8** De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza”.

Para concluir, el último objetivo con una relación “baja” es el **Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres**, que busca gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad. En concreto, las metas del objetivo 15, “**15.3** Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo” y “**15.9** Para 2020, integrar los

valores de los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación nacional y local, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad” están vinculados con la inclusión de criterios de sostenibilidad en la planificación territorial y urbana, tales como la fragmentación del paisaje y la equidad espacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, F., Botequilha, A., & Díaz, E. (2014). Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Applied Geography*, 234-245. doi:10.1016/j.apgeog.2014.06.019
- Aguilera, F., Valenzuela, L., & Botequilha, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 226-238. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.10.004
- Ambiente Italia Research Institute. (2003). *European Common Indicators. Towards a Local Sustainability Profile*. Milano, Italy: Ambiente Italia Research Institute.
- Bandrés, E., & Sanz, J. (2017). *Economía de las ciudades*. Funcas. Obtenido de <https://www.funcas.es/wp-content/uploads/Migracion/Publicaciones/PDF/2090.pdf>
- Botequilha, A., & Ahern, J. (2002). Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 65-93. doi:10.1016/S0169-2046(02)00005-1
- Büttner, G., Feranec, J., & Jaffrain, G. (2002). *Corine land cover update 2000*. EEA.
- Cities in Europe, the new OECD EC definition by The Atlantic Greenway Project - Issue*. (2015). Obtenido de https://issuu.com/agpireland/docs/cities_in_europe___the_new_oecd-ec_
- Colaninno, N., Alhaddad, B., & Roca, J. (2011). Urban models definition through image processing and morphological features, the case study of Catalonia, Spain. *7th Virtual Cities and Territories, Lisbon*.
- Commission, E. (s.f.). *Copernicus*. Obtenido de <https://www.copernicus.eu/>
- Dijkstra, L., & Poelman, H. (2014). A harmonised definition of cities and rural areas: the new degree of urbanisation.
- Dijkstra, L., Poelman, H., & Veneri, P. (2019). The EU-OECD definition of a functional urban area. doi:10.1787/d58cb34d-en
- EEA. (2016). *Urban Atlas Land Cover/Land Use 2012*.
- European Commission. Statistical Office of the European Union. (2020). *Eurostat regional yearbook: 2020 edition*. Publications Office. Obtenido de <https://data.europa.eu/doi/10.2785/98733>
- European Commission. Statistical Office of the European Union. (2019). *Methodological manual on territorial typologies: 2018 edition*. Publications Office. Obtenido de <https://data.europa.eu/doi/10.2785/930137>
- European Union. (2016). *Mapping Guide v4.7 for a European Urban Atlas*.
- Font, A. (2007). *L'explosión de la ciudad: transformaciones territoriales en las regiones urbanas de la Europa meridional*. Ministerio de Vivienda.
- Frankhauser, P. (2004). Comparing the morphology of urban patterns in Europe.

- Frenkel, A., & Ashkenazi, M. (2008). Measuring urban sprawl: how can we deal with it? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 56-79.
- Garcia, P., Valls, F., & Moix, M. (2011). *SIG en la gestión de la información urbanística en el ámbito local*. Barcelona: CPSV.
- Gielen, E., Riutort-Mayol, G., & Palencia, J. (2021). Cost assessment of urban sprawl on municipal services using hierarchical regression. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(2), 280-297. doi:10.1177/2399808319869345
- Goerlich, F., & Cantarino, I. (2013). *Zonas de morfología urbana: coberturas del suelo y demografía*. Fundación BBVA.
- Goerlich, F., Reig, E., Albert, C., & Robledo, J. (2020). *Las áreas urbanas funcionales en España*. Fundación BBVA.
- Gong, C., Yu, S., Joesting, H., & Chen, J. (2013). Determining socioeconomic drivers of urban forest fragmentation with historical remote sensing images. *Landscape and Urban Planning*, 57-65.
- Guérois, M., & Pumain, D. (2008). Built-up encroachment and the urban field: a comparison of forty european cities. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2186-2203.
- Harvey, D. (1973). *Social justice and the city*. University of Georgia Press.
- Herold, M., Scepan, J., & Clarke, K. (2002). The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1443-1458.
- Irwin, E., & Bockstael, N. (2007). The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20672-20677.
- Jiang, X., Zhang, P., Liu, X., & Yau, S. (2007). Survey on index based homology search algorithms. *The Journal of Supercomputing*, 185-212.
- Lavalle, C. (2002). *Towards an urban atlas: assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas*. European Environment Agency ; Office for Official Publications of the European Communities.
- Longley, P., & Mesev, V. (2000). On the Measurement and Generalisation of Urban Form. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 32(3), 473-488. doi:10.1068/a3224
- MacLean, M., & Congalton, R. (2013). PolyFrag: a vector-based program for computing lanscape metrics. *GIScience & Remote Sensing*, 591-603.
- Marinescu, I., & Avram, S. (2012). Evaluation of urban fragmentation in craiova city, romania. *Procedia Environmental Sciences*, 207-215.
- McGarigal, K., Cushman, S., & Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. *Computer Software Program Produced by the Authors at the University of Massachusetts, Amherst*.
- Moser, B., Jaeger, J., Tappener, U., Tasser, E., & Eiselt, B. (2007). Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. *Modification of*

the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem., 22(3), 447–459. doi:10.1007/s10980-006-9023-0

Naciones Unidas. (s.f.). Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

ONU-Habitat. (2020). *La Nueva Agenda Urbana Ilustrada*. Obtenido de <https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/Nueva-Agenda-Urbana-Ilustrada.pdf>

Prastacos, P., Lagarias, A., & Chrysoulakis, N. (2017). Using the Urban Atlas dataset for estimating spatial metrics. Methodology and application in urban areas of Greece. *Cybergeo*. Obtenido de <http://journals.openedition.org/cybergeo/28051>

Ramachandra, T., Bharath, H., & Sreekantha, S. (2012). Spatial metrics based landscape structure and dynamics assessment for an emerging indian megalopolis. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*. doi:10.14569/IJARAI.2012.010109

Salinas, L. (2009). El Estado en el proceso de acumulación por desposesión en el municipio de Chalco, estado de México. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 18, 25-34. doi:10.15446/rcdg.n18.12996

Sapena, M., & Ruiz, L. (2016). Guía de Usuario Indifrag v2.1. Obtenido de https://cgat.webs.upv.es/BigFiles/indifrag/GuiaUsuario_IndiFrag_v2.1.pdf

Simon, A., Fons, J., & Milego, R. (2010). *Urban Morphological Zones version F2v0. Definition and procedural steps*.

Soriano, I. (2017). Análisis comparativo de la fragmentación de zonas verdes intraurbanas a partir de cartografía de usos del suelo derivadas de imágenes Sentinel-2. Relación con indicadores de calidad ambiental. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/88425/SORIANO%20-%20An%C3%A1lisis%20comparativo%20de%20la%20fragmentaci%C3%B3n%20de%20zonas%20verdes%20intraurbanas%20a%20partir%20de%20carto....pdf?sequence=1>

Triantakonstantis, D., & Stathakis, D. (2015). Examining urban sprawl in Europe using spatial metrics. *Geocarto International*, 30(10), 1092-1112. doi:10.1080/10106049.2015.1027289

Turner, M. (1989). Meisel, J. E. and Turner, M. G. 1998. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis. *Landscape Ecology* 113: 347–362. *Annual Review of Ecology and Systems*, Annual Review of Ecology and Systems.

Unión Europea. (2007). Carta de Leipzig sobre ciudades europeas sostenibles.

Wei, Y., & Zhang, Z. (2012). Assessing the fragmentation of construction land in urban areas: An index method and case study in Shunde, China. *Assessing the fragmentation of construction land in urban areas: An index method and case study in Shunde, China*, 29(2), 417–428. doi:10.1016/j.landusepol.2011.08.006

Winter, A. (2018). Review of the European reference framework for sustainable cities. *International Journal of Community Well-Being*, 1(1), 83-86. doi:10.1007/s42413-018-0007-z

World Health Organization. (2016). *Urban green spaces and health*. WHO Regional Office for Europe. Obtenido de <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and->

health/pages/news/news/2016/11/who-report-shows-urban-green-spaces-deliver-multiple-health-benefits