

Trabajo Fin de Máster

Implantación de Energías Renovables en la ciudad. Estimación de recursos mediante una herramienta SIG.

Autora

María Cuartielles Monfil

Director

José Francisco Sanz Osorio

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013

Implantación de Energías Renovables en la ciudad. Estimación de recursos mediante una herramienta SIG.

Resumen

En los últimos años en España, el consumo eléctrico para usos domésticos representó más de un 30% del consumo eléctrico total. La importante contribución al consumo eléctrico total del sector residencial hace que este sector, y concretamente la edificación en el sector residencial, sea un buen objetivo para la búsqueda e introducción de soluciones enfocadas al ahorro energético.

El marco normativo y regulatorio del sector de las renovables en Europa y en el mundo está cambiando. Las políticas de fomento basadas en el pago de una prima por la generación eléctrica (Feed-in Tariff) disminuyen para sustituirse por políticas que fomentan el autoconsumo y la generación distribuida.

Las dos tecnologías más importantes aplicables a este nuevo modelo energético en la edificación del sector residencial, son la tecnología fotovoltaica de pequeña potencia y la tecnología minieólica.

El objetivo de este trabajo es iniciar el estudio de la implantación de la energía minieólica y la energía fotovoltaica de pequeña potencia en la ciudad de Zaragoza.

En la primera parte de este trabajo se realiza una revisión del marco normativo y regulatorio de estas tecnologías para su desarrollo en España.

En los dos puntos siguientes se hace una revisión bibliográfica de los métodos de estimación de cada uno de los recursos: fotovoltaico y eólico, en entornos urbanos. Se desarrolla el procedimiento a realizar para determinar el potencial disponible de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas en la ciudad de Zaragoza, basado en el cálculo de la superficie disponible de tejado para su implantación. Para ello se recurre a la herramienta informática gvSIG, que es un proyecto de desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en software libre, y a la cartografía en formato Shapefile que proporciona el Catastro.

Se detalla el procedimiento para la estimación del recurso eólico urbano y su aplicación al caso de Zaragoza. Se describen los parámetros geométricos necesarios y su obtención mediante la herramienta informática gvSIG, que servirán en desarrollos futuros para la estimación del recurso eólico urbano, la elaboración del atlas eólico urbano de Zaragoza y la búsqueda del emplazamiento óptimo de aerogeneradores de pequeña potencia en la ciudad.

Los resultados obtenidos del potencial disponible de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas en la ciudad de Zaragoza, indican que se podría cubrir casi la totalidad del consumo eléctrico para usos domésticos, o el 58,53% del consumo eléctrico en el sector residencial, que además de los usos domésticos incluye el consumo eléctrico en Hostelería, Comercio y Servicios, Administración y otros servicios públicos.

En el proceso de cálculo se ha establecido una clasificación de los barrios en función de los parámetros “densidad de construcción” y “densidad de población” que implican una tipología de edificios distinta. Esta clasificación da lugar a la utilización de diferentes factores reductores en función de la tipología de barrio para el cálculo de la superficie de cubiertas, y por lo tanto a diferentes coberturas en cada barrio del consumo eléctrico por parte de las instalaciones de energía fotovoltaica en los tejados.

Este trabajo proporciona un método para estimar con precisión la superficie de cubierta disponible para la implantación de instalaciones fotovoltaicas, así como el potencial de energía solar fotovoltaica. Los resultados de este trabajo muestran la importante contribución que, la implantación de instalaciones fotovoltaicas en las cubiertas de las edificaciones, podría tener para reducir el consumo eléctrico en los entornos urbanos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO ACTUAL EN ESPAÑA.	5
3. TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA EN ENTORNOS URBANOS.	
3.1 ESTUDIO DEL RECURSO FOTOVOLTAICO EN ENTORNOS URBANOS.....	8
3.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL RECURSO FOTOVOLTAICO EN ZARAGOZA.	9
3.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS	20
4. TECNOLOGÍA EÓLICA EN ENTORNOS URBANOS.	
4.1 ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO EN ENTORNOS URBANOS	21
4.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN ZARAGOZA.	22
4.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS AERODINÁMICOS URBANOS	25
4.4 METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS EN gvSIG.....	27
4.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS.	28
5. CONCLUSIONES.	29
6. BIBLIOGRAFÍA.	30
ANEXO I. OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE CONSTRUIDA SOBRE RASANTE EN LOS DISTRITOS MUNICIPALES Y BARRIOS RURALES DE ZARAGOZA.....	32
ANEXO II. MAPAS DE LA SUPERFICIE CONSTRUIDA SOBRE RASANTE EN LOS DISTRITOS MUNICIPALES Y BARRIOS RURALES DE ZARAGOZA.....	69

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población y su continuo movimiento desde las zonas rurales hacia zonas urbanizadas está provocando un aumento progresivo de la demanda de energía en las áreas urbanas.

En 2011 en España, el consumo eléctrico para usos domésticos fue más de 76 millones de MWh para cerca de 23,8 millones de consumidores, lo que representa un 30,58% del consumo eléctrico total y un 83% del total de los contratos de suministro eléctrico [1].

Si se añade el consumo eléctrico en Hostelería, Comercio y Servicios, Administración y otros servicios públicos, el consumo eléctrico en el Sector Residencial supone casi un 62% del consumo eléctrico total [1].

La importante contribución al consumo eléctrico total hace que este sector, y concretamente la edificación en el sector residencial, sea un buen objetivo para la búsqueda e introducción de soluciones enfocadas al ahorro energético, y éste se puede obtener mediante el aumento de la eficiencia en el consumo de energía y mediante el aprovechamiento de todos los recursos que estén a nuestro alcance a través de sistemas adaptables a la demanda de energía existente.

El uso de sistemas de generación basados en energías sostenibles como son las energías renovables contribuye además a mitigar el impacto de otros dos problemas que son consecuencia del aumento de la demanda energética, el aumento de los precios de los combustibles fósiles y el calentamiento global.

El autoconsumo de energía supone una evolución del modelo energético actual de generación centralizada hacia un nuevo modelo de generación distribuida, reduciendo de este modo las pérdidas de transporte y distribución, reduciendo la necesidad de inversiones en nuevas redes y, en definitiva, minimizando el impacto de las instalaciones eléctricas en su entorno.

Es por esta razón que todas las estrategias enfocadas a la autogeneración con energías renovables, al menos de pequeña potencia, deberían ser potenciadas ya que cada iniciativa tendrá un impacto importante en el consumo eléctrico total.

Las dos tecnologías más importantes aplicables a este nuevo modelo energético en la edificación del sector residencial, son la tecnología fotovoltaica de pequeña potencia y la tecnología minieólica. La energía fotovoltaica y la eólica se complementan bien estacionalmente, mientras que la fotovoltaica es capaz de satisfacer el pico de la demanda en verano, la eólica es más productiva en invierno, y también durante el día, ya que la fotovoltaica produce durante el día con un pico alrededor del mediodía, mientras que la eólica produce más durante las horas de menos insolación.

Históricamente en España los pequeños aerogeneradores se han utilizado mayoritariamente para el autoconsumo de instalaciones aisladas de la red y conectadas a baterías (para el almacenamiento) como son los sistemas repetidores para radio, telefonía móvil, sistemas de vigilancia de carreteras o contra incendios, y para el suministro de energía en algunas viviendas situadas en lugares remotos alejados de la red eléctrica.

El segmento de la eólica de pequeña potencia no se ha desarrollado en España de una forma similar a la de la eólica convencional o gran eólica. La razón fundamental para ello se debe a la inexistencia de un marco regulatorio específico y una retribución económica adecuada para la energía generada, que en la actualidad es independiente de la potencia de la instalación eólica [2].

La energía minieólica ha estado históricamente incluida dentro de la eólica convencional, por lo que sus requerimientos técnicos para la conexión y autorización administrativa han sido similares a los de los parques eólicos de mayor potencia, lo cual ha dificultado enormemente su desarrollo.

Tal y como indica el informe publicado por la World Wind Energy Association [3], se aprecia un crecimiento dinámico en el mercado mundial de aerogeneradores de pequeña potencia, habiéndose alcanzado a finales de 2011 la capacidad total de 576 MW instalados.

China sigue eclipsando a todos los demás mercados importantes, incluidos los EE.UU. y el Reino Unido, con sus más de 500.000 unidades instaladas, lo que representa el 68 % del mercado mundial en términos totales, así como en nuevas unidades instaladas.

A pesar de este importante desarrollo del sector en muchos países, tan solo unos pocos gobiernos están ofreciendo políticas específicas de apoyo a la tecnología minieólica, principalmente "Feed in tariffs", "net metering", créditos y subvenciones. La herramienta que más ha beneficiado a la minieólica conectada a la red ha sido el "Feed in tariff", el pago de una prima por la generación eléctrica, aunque solo unos pocos países la han puesto en práctica con diferencias notables entre ellos.

La reciente evolución de la industria minieólica en el mundo ha demostrado un importante incremento anual del 35% en la capacidad instalada en los últimos años. Se prevé que la tasa de crecimiento continúe hasta el año 2015, alcanzando una instalación anual de 400 MW [3].

Sobre la base de una hipótesis conservadora, el mercado podría ver posteriormente una tasa de crecimiento constante del 20% desde 2015 hasta 2020. La industria prevé alcanzar aproximadamente 1000 MW de capacidad instalada anualmente hasta alcanzar los 5 GW para el año 2020 [3].

En España por primera vez la energía eólica de pequeña potencia está incluida en las medidas que se plantean en el Plan de Energías Renovables 2011-2020. Se espera que la potencia en servicio aumente progresivamente desde los 5 MW en 2011 hasta unos 50 MW/año durante 2015 y los siguientes años hasta 2020. Ello totalizaría unos 300 MW en el período 2011-2020. La industria prevé que la ejecución de estas medidas provocará una reducción de costes de la tecnología, y ésta, junto con el inevitable aumento en el precio de los combustibles fósiles, se traducirá en la penetración de sistemas minieólicos a nivel nacional.

El desarrollo del mercado español de las instalaciones fotovoltaicas de pequeña potencia ha estado ligado al de los grandes sistemas en suelo. La industria fotovoltaica, que venía acumulando crecimientos constantes desde 2002, experimentó un "boom" en 2008 seguido de una caída considerable en 2009 que ha continuado acentuándose con el agravamiento de la recesión económica del país y con las medidas adoptadas por los diferentes Gobiernos para tratar de solventar los problemas del sector eléctrico nacional, con sucesivos recortes a la retribución de la producción de electricidad y la moratoria indefinida al régimen de primas que se estableció a inicios de 2012.

La capacidad fotovoltaica instalada en el mundo en 2012 ascendió a más de 100 GW, con Europa líder del mundo en términos de capacidad instalada acumulada con más de 70 GW a partir de 2012. Destaca claramente Alemania con 32 GW conectados y le sigue Italia con aproximadamente 16 GW. A continuación en el ranking están China (8,3 GW) y EEUU (7,8 GW) seguidos por Japón (6,9 GW) [4].

La segmentación del mercado fotovoltaico europeo se mantuvo más o menos estable en 2012 con respecto a 2011 y las instalaciones aplicadas al sector residencial supusieron el 21% del total, las instalaciones en tejados en el sector comercial un 32%, las instalaciones en tejados en el sector industrial un 19% y las instalaciones de suelo un 28% [4].

Sin embargo, el sector de las grandes instalaciones en suelo probablemente disminuirá considerablemente en Europa en 2013, debido a los cambios recientes en los marcos regulatorios. Las políticas de fomento basadas en el pago de una prima por la generación eléctrica fotovoltaica (Feed-in Tariff) disminuyen para sustituirse por políticas que fomentan el autoconsumo y la generación distribuida.

En 2012 el segmento de instalaciones en tejado representó alrededor de 22 GW del total de las instalaciones, mientras que las aplicaciones a escala comercial llegaron a más de 9 GW [4].

Para la Asociación de la Industria Fotovoltaica Europea (EPIA) el mercado de las instalaciones de tejado podría doblarse desde 2012 a 2017 en un escenario de políticas de apoyo, mientras que el mercado a escala comercial en el mismo escenario se multiplicaría por cuatro, de 9 GW a 37 GW.

En un escenario en el que todo sigue igual, similar al actual, el mercado de las instalaciones de tejado podría disminuir en 2013 y 2014 y se estancaría entorno a los niveles de 2012 hasta 2017. El mercado global de las instalaciones a nivel comercial sería más del doble en los próximos cinco años.

La llegada de la paridad de red, momento en el que la fotovoltaica puede producir electricidad a un coste inferior o igual al precio generalista de compra de la electricidad directamente de la red, (prevista en el sur de España en 2013-2014) podría llevar también a un desarrollo importante del segmento de instalaciones en tejado. Sin embargo, para que la llegada de la paridad de red tenga un impacto en el mercado es necesario que se desarrolle el marco jurídico adecuado que regule el autoconsumo de la energía de forma atractiva para el usuario final.

Vista la importancia que va a tener en los próximos años la implantación de estas tecnologías de pequeña potencia en el sector de la edificación, en la primera parte de este trabajo se realiza una revisión del marco normativo y regulatorio para su desarrollo en España.

En los dos puntos siguientes se hace una revisión bibliográfica de los métodos de estimación de cada uno de los recursos: fotovoltaico y eólico, en entornos urbanos. Se desarrolla el procedimiento a realizar para determinar el potencial disponible de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas en la ciudad de Zaragoza, así como el procedimiento para la estimación del recurso eólico urbano. Se detallan los parámetros geométricos necesarios y su obtención mediante la herramienta informática gvSIG.

El objetivo de este trabajo es iniciar el estudio de la implantación de la energía minieólica y la energía fotovoltaica de pequeña potencia en la ciudad de Zaragoza. Los parámetros geométricos urbanos, obtenidos a partir de datos procedentes de la Dirección General del Catastro con una herramienta SIG, son la base para realizar una estimación del potencial disponible de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas en la ciudad de Zaragoza, así como para desarrollos futuros de estimación de recurso eólico urbano, elaboración del atlas eólico urbano de Zaragoza y la búsqueda del emplazamiento óptimo de aerogeneradores de pequeña potencia en la ciudad.

2. MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO ACTUAL EN ESPAÑA.

En los últimos años en España se han ido sucediendo una serie de cambios legales en el sector de las energías renovables, que han jugado un papel fundamental en su desarrollo.

Los sucesivos RD 2818/1998, RD 436/2004 y el RD 661/2007, establecieron tarifas y primas a las instalaciones fotovoltaicas, de forma preferente para unos límites de potencia nominal que fueron aumentando desde los 5 kW en el RD 2818/1998 hasta los 10 MW del RD 661/2007, y sin favorecer ningún límite de potencia en las instalaciones eólicas. Esta evolución se resume en la Tabla 2.1.

TMR año 2007: 7,6588 c€/kWh					
Instalación	RD 2818/1998		RD 436/2004		RD 661/2007
	Tarifa 1998 (ptas/kWh)	Tarifa 2004 (c€/kWh)	% sobre TRM ²	C€/kWh	C€/kWh
P ≤ 5 kW					
-Primeros 25 años desde su puesta en servicio	66	40			
-A partir de los 25 años	66	40			
5 kW < P < 50 kW					
-Primeros 25 años desde su puesta en servicio	36	22			
-A partir de los 25 años	36	22			
P ≤ 100 kW					
-Primeros 25 años desde su puesta en servicio	36	22	575%	44,03810	44,0381
-A partir de los 25 años	36	22	460%	35,23048	35,2305

100kW < P ≤ 10 MW					
-Primeros 25 años desde su puesta en servicio	36	22	300%	22,97640	41,7500
-A partir de los 25 años	36	22	240%	18,38112	33,4000
10MW < P ≤ 50 MW					
-Primeros 25 años desde su puesta en servicio	36	22			22,9764
-A partir de los 25 años	36	22			18,3811
					Necesidad Centro Control (> 10 MW)

Tabla 2.1. Evolución de las tarifas reguladas en los RD de 1998, 2004 y 2007.[5]

De esta forma se ratificó la apuesta estratégica a favor del desarrollo de las energías renovables y en particular de la energía solar fotovoltaica incentivando vía precio la producción de las energías renovables, favoreciendo con la entrada en vigor del RD 661/2007 la instalación de plantas de grandes dimensiones, y dando una economía de escala que hasta ese momento era difícil de obtener.

Con la entrada en vigor del RD 661/2007, el mercado fotovoltaico experimentó un fuerte crecimiento del 385%, respecto al año anterior, instalándose 2700 MW entre finales de 2007 y sobre todo durante el 2008, en el que el sector fotovoltaico experimentó un “boom”.

Con la intención de regular el crecimiento del sector fotovoltaico, se publicó el Real Decreto 1578/2008 que estableció cupos anuales de potencia por tipología, planificando temporalmente tanto la capacidad instalada como la evolución de las tarifas de retribución del kWh, que fueron disminuyendo progresivamente [6]. La publicación de este Real Decreto provocó una nueva orientación del sector, centrándose mayoritariamente en las instalaciones incorporadas a la edificación (con mejores retribuciones) en detrimento de las plantas en suelo.

A partir de 2010, motivados por la crisis económica y la necesidad de adoptar medidas económicas drásticas para reducir el déficit de tarifa, los diferentes gobiernos han ido aplicando sucesivos recortes a la retribución de la producción de electricidad en régimen especial, especialmente a la fotovoltaica.

En noviembre de 2010, se publicó el RD 1565/2010 donde se aplicó una reducción a la remuneración para los tres tipos de instalaciones fotovoltaicas [7]:

- Instalaciones de tipo I.1: 5% de reducción.
- Instalaciones de tipo I.2: 25% de reducción.
- Instalaciones de tipo II: 45% de reducción.

En diciembre de ese mismo año se publicó el RD Ley 14/2010, que aplicó una limitación de horas equivalentes de funcionamiento de las instalaciones en función de la zona climática hasta final de 2013, con carácter retroactivo a las instalaciones acogidas al RD 661/2007 y RD1578/2008, compensando esta limitación con un aumento de retribución de 25 a 28 años [8].

En enero de 2012 se publicó el RD Ley 1/2012, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos [9]. Este Real Decreto supone una moratoria indefinida al régimen de primas, suspendido al menos hasta la eliminación del déficit de tarifa.

El primer paso que se dio para fomentar el desarrollo de estas tecnologías de pequeña potencia a nivel europeo fue la Directiva Europea 2009/28/CE.

La Directiva Europea 2009/28/CE relativa al fomento de Energías Renovables, de obligada transposición a los Estados Miembros para finales de año 2010, hacía hincapié en la

Generación Distribuida, establecía objetivos vinculantes e insistía reiteradamente en la integración de las renovables en los sectores del urbanismo y la edificación.

A España se le asignó un objetivo del 20% para 2020, lo que exige hacer en los próximos años un esfuerzo en renovables considerables [10].

Según el artículo 4 de la Directiva Europea 2009/28/CE relativa al fomento de energías renovables, los estados miembros debían preparar un denominado Plan de Acción Nacional en materia de energías renovables (PANER) antes del 30 de junio de 2010 en el que debían especificar sobre todo los objetivos sectoriales y las medidas necesarias para alcanzar estos objetivos. En el documento enviado desde España a la Comisión Europea, se estableció por primera vez un marco para la energía eólica de pequeña potencia, abriendo definitivamente la puerta al desarrollo de la energía minieólica en España y estableciendo un objetivo de implantación de 370 MW para 2020. También hacía referencia a la necesidad de fomentar la penetración de las instalaciones fotovoltaicas en el sector de la edificación. La contribución previsible de energía solar fotovoltaica al cumplimiento de los objetivos vinculantes para 2020 se estima en 14.316 GWh, generados por una potencia instalada acumulada en 2020 de 8.367 MW. El incremento de potencia en el periodo 2011-2020 se estimó en 4.346 MW. La estimación de energía generada en este periodo se basa en la suposición de un parque con un 67% de instalaciones fijas en edificaciones y un 33% en suelo con seguimiento. A partir de 2015 se prevé una penetración creciente de la energía solar fotovoltaica en sistemas para autoconsumo de energía interconectados con la red de distribución y asociados a suministros existentes, según se vaya alcanzando la “paridad” del coste de generación con el coste de la energía para el consumidor, mediante el desarrollo de sistemas basados en los conceptos de balance neto, compensación de saldos de energía etc. [11].

El pasado 11 de noviembre de 2011, se publicó el Plan de Energías Renovables para esta década (PER 2011-2020), que tiene por misión desarrollar las líneas de actuación que marca el PANER para llegar a los objetivos establecidos. Para la energía minieólica el objetivo de implantación para 2020 se redujo de 370 MW a 300 MW. Y para la energía fotovoltaica se redujeron las estimaciones de energía generada en 2020 a 12.350 GWh por toda la potencia acumulada instalada en España de energía solar fotovoltaica que también se reduce a 7.250 MW. También prevé que la introducción en el sistema eléctrico, de conceptos como la compensación de saldos de energía o balance neto, que favorezcan el despegue del autoconsumo que no están ligados al sistema de tarifas y cupos puede generar un incremento de potencia instalada sin asociar al régimen especial. [12].

El 8 de diciembre de 2011 se publicó el Real Decreto 1699/2011 que regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia, lo que hasta el momento era una de las grandes barreras para la penetración de estas instalaciones.

Se simplifican los requisitos para las instalaciones de pequeña potencia que pretendan conectarse en puntos donde exista ya un suministro. Del mismo modo, se excluyen del régimen de autorización administrativa las instalaciones de producción con potencia nominal no superior a 100 kW y se anuncia la futura y próxima regulación del suministro de la energía eléctrica producida en el interior de la red de un consumidor para su propio consumo que incentivará el autoconsumo [13].

La entrada en vigor del RD Ley 1/2012 ha supuesto la paralización del sistema de fomento de las energías renovables existente en España basado en las primas a la generación para la inyección a la red eléctrica (Feed in Tariff), por tiempo indefinido. Para poder cumplir los objetivos marcados en el PANER y el PER hay que contar con la llegada de la Paridad de Red en el sector (fundamentalmente fotovoltaico) y el autoconsumo, para generar un incremento de potencia instalada sin asociar al régimen especial.

En 2012 se han instalado en España los primeros sistemas fotovoltaicos conectados a red que son rentables por sí mismos, sin ningún tipo de ayuda y se han instalado los primeros sistemas fotovoltaicos de autoconsumo instantáneo [14].

Una vez alcanzada la paridad de red (en España se logró en 2012 para la fotovoltaica para casi todo el territorio), el siguiente paso sería la promoción del autoconsumo. En España está pendiente que el Ministerio de Industria apruebe la normativa que regule el autoconsumo. Las asociaciones del sector apuestan por el modelo de autoconsumo con balance neto o Net metering. Esta fórmula permite que el productor de energía vierta a la red la energía que no

esté consumiendo, a cambio de recibir la misma cantidad cuando la necesite. El autoconsumo con balance neto ha comenzado a ser regulado en diversos países del mundo, siendo una realidad en países como Alemania, Italia, Dinamarca, Japón, Australia, Estados Unidos, Canadá y México, entre otros.

En España existe un “Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de la modalidad de suministro de energía eléctrica con balance neto”, que ha pasado por la fase de alegaciones y está a la espera de ser publicado aunque con más de un año de retraso. Sin embargo sí que se ha aprobado recientemente el RD Ley 9/2013, por el que se adoptan medidas urgentes para garantizar la estabilidad financiera del sistema eléctrico, y que establece un “peaje de respaldo” que tendrá que pagar el autoconsumo, se trata de la compensación que exigen las compañías eléctricas por usar sus redes para distribuir los excedentes del autoconsumo, que no hace sino poner más dificultades a la penetración de estas instalaciones de pequeña potencia.

Para fomentar su penetración falta establecer el marco normativo que regule el autoconsumo de la energía de forma atractiva para el usuario final, bien mediante la modalidad de Balance Neto con un horizonte de compensación adecuado y un peaje de acceso nulo o muy bajo, o bien mediante un autoconsumo instantáneo con la posibilidad de la instalación de baterías para el almacenamiento de la energía excedente, como se está fomentando en Alemania, que actualmente está prohibido en España.

El último paso que se ha dado para fomentar el desarrollo de estas tecnologías de pequeña potencia a nivel europeo ha sido la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, que actualiza el contenido de la anterior norma comunitaria sobre la materia, la Directiva 2002/91/CE, e introduce varias obligaciones de gran calado para el desarrollo de las energías renovables.

El mandato más importante para el fomento solar es la obligación de que todos los edificios nuevos, o que experimenten reformas importantes (equivalentes al 25% de la superficie envolvente o al 25% de su valor), sean “de consumo de energía casi nulo” a partir de 31 de diciembre de 2020; en el caso de los inmuebles pertenecientes a las administraciones públicas, este límite se anticipa dos años, al 31 de diciembre de 2018 [15].

Esa cantidad casi nula de energía deberá ser cubierta por energías renovables, incluida la producida in situ o en el entorno del edificio, ámbito en el que la fotovoltaica, por su gran versatilidad, será una de las fuentes más utilizadas.

Esta clara apuesta por la generación distribuida se refuerza, además, con la obligación de que los estados miembro elaboren planes nacionales para aumentar el número de edificios de consumo de energía casi nulo.

Esta Directiva Europea exige una revisión de la normativa española en lo que concierne al consumo y ahorro de energía y a una mayor penetración de las fuentes de energía renovables en el sector de la edificación.

3. TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA EN ENTORNOS URBANOS.

3.1. ESTUDIO DEL RECURSO FOTOVOLTAICO EN ENTORNOS URBANOS.

La evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos por lo general está basada en la determinación de la superficie total de cubiertas y fachadas disponible en las edificaciones. Son muchos los autores que, en los últimos años, han desarrollado diferentes metodologías para determinar este potencial fotovoltaico. Uno de los puntos clave para determinar qué metodología debería utilizarse es la escala del estudio, desde las más pequeñas en zonas urbanas o ciudades, hasta las más grandes en países o continentes. También condicionará la elección de la metodología a seguir, los datos o software disponibles para desarrollarla en cada caso.

Las principales diferencias de metodología en la literatura tienen que ver con el método usado para determinar la superficie de cubierta (la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos de fachada

es muy baja y por lo tanto la superficie de fachadas no se suele considerar). Fundamentalmente se pueden identificar tres métodos diferentes [16]:

- Método basado en la determinación del ratio de superficie de cubierta por habitante, que se calcula estudiando una muestra de la región de estudio. El área total de cubiertas se calcula multiplicando este ratio por la población total del área de estudio. Estos métodos normalmente se diferencian en cómo determinar y/o analizar la muestra.
- Método basado en establecer una correlación entre la densidad de población y la superficie de cubierta.
- Método basado en calcular el total del área de cubiertas de la región de estudio. El uso de este método está aumentando en los últimos años, desde que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta de uso frecuente.

El último método estudia con precisión toda el área objetivo en lugar de analizar una muestra para extrapolar los resultados a toda la zona de estudio como ocurre en los dos primeros métodos. Los métodos basados en SIG se consideran más precisos pero también requieren mayor esfuerzo computacional y mayor tiempo invertido [16].

Una vez que se calcula el área total de cubiertas para la región de estudio, es necesario reducir esta área a la disponible para la implementación de instalaciones fotovoltaicas, para determinar el potencial fotovoltaico. Hay muchos factores que influyen en esta reducción del área total de cubiertas: el sombreado de otras partes de la cubierta, de los edificios y árboles cercanos, el uso de la cubierta para otras aplicaciones como instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado, chimeneas, etc. Esta reducción es llamada por algunos autores “coeficientes de reducción” o bien “factor de utilización”.

Los diferentes estudios existentes han utilizado distintos coeficientes de reducción, bien un único coeficiente para todo el estudio [17], diferentes coeficientes de reducción dependiendo del uso del edificio, residencial o industrial [18], de la tipología del municipio [19], de la tipología del edificio y de la cubierta [20] o incluso en función del tipo de edificio y de municipio [16].

Con este dato de superficie de cubiertas disponible para la implantación de instalaciones fotovoltaicas, y los valores de la irradiación solar global media se obtendrá el potencial de producción anual de energía fotovoltaica.

3.2. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL RECURSO FOTOVOLTAICO EN ZARAGOZA.

La metodología utilizada para la estimación del recurso fotovoltaico en la ciudad de Zaragoza se basa en el cálculo de la superficie de tejados disponible para dicha tecnología, en los distintos distritos municipales y barrios rurales. Se sigue un método basado en el cálculo del total del área de cubiertas de la región de estudio, ya que la escala del estudio es pequeña, es una ciudad, y se puede asumir el coste computacional y la inversión de tiempo para obtener unos datos más precisos y fiables.

La superficie de tejados disponible se obtiene calculando primero la superficie construida sobre rasante para cada uno de los distritos municipales y barrios rurales, a partir de la cartografía en formato Shapefile que proporciona el Catastro [21] y el mapa de juntas de 2012 proporcionado por la sede electrónica del Ayuntamiento de Zaragoza, a través del Observatorio Municipal de Estadística [22]. Para ello se recurre a la herramienta informática gvSIG, que es un proyecto de desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en software libre que fue desarrollado por el gobierno local de la Comunidad Valenciana de España, para el manejo de información geográfica con precisión cartográfica. El procedimiento de obtención de esta superficie se detalla en el Anexo 1 de este trabajo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.1.

	Nombre	Superficie construida sobre rasante (m ²)
DISTRITOS MUNICIPALES	Casco Histórico	793.874,03
	Centro	857.105,51
	Delicias	1.214.154,44
	Casablanca	905.735,59
	San José	761.086,22
	Torrero	1.070.746,98
	Universidad	831.769,56
	Las Fuentes	590.448,93
	La Almozara	410.595,80
	Oliver-Valdefierro	816.624,27
	Miralbueno	246.184,33
	Actur - Rey Fernando	920.855,43
	El Rabal	1.705.124,25
	Santa Isabel	1.604.011,29
BARRIOS RURALES	Alfocea	10.467,20
	Casetas	283.548,17
	Garrapinillos	1.502.632,44
	Juslibol	133.239,46
	La Cartuja Baja	817.084,43
	Montañana	203.982,09
	Monzalbarba	119.018,89
	Movera	115.505,23
	Peñaflor	118.612,75
	San Gregorio	42.687,83
	San Juan Mozarrifar	342.028,80
	Torrecilla de Valmadrid	7.491,96
	Venta del Olivar	533.474,47
	Villarrapa	17.456,72

Tabla 3.2.1. Superficie construida sobre rasante para cada uno de los distritos municipales y barrios rurales de Zaragoza.

Los mapas de superficie construida sobre rasante obtenidos para cada uno de los distritos municipales y barrios rurales a partir de la herramienta informática gvSIG se muestran en el Anexo 2 de este trabajo.

Se puede establecer una clasificación de los distritos municipales y barrios rurales de Zaragoza, en función de la densidad de construcción, Dc, definida como la relación entre la superficie construida sobre rasante y la superficie total del distrito o barrio correspondiente, y la densidad de población, Dp, definida como la relación entre la población y la superficie total del

distrito o barrio. Los valores de estos parámetros para cada distrito o barrio rural se muestran en la Tabla 3.2.2. Los datos de superficie y población para cada uno, se obtienen del Observatorio Municipal de Estadística del Ayuntamiento de Zaragoza [22].

	Nombre	Superficie(m ²)	Población(hab)	Densidad Población(hab/km ²)	Superficie construida sobre rasante (m ²)	Densidad de construcción (m ² cons/m ²)	Clasificación Dc-Dp
DISTritos MUNICIPALES	Casco Histórico	1.984.383,00	47.046	23.708,12	793.874,03	0,4001	A-A
	Centro	1.808.623,00	54.222	29.979,71	857.105,51	0,4739	A-A
	Delicias	3.284.606,00	108.514	33.037,14	1.214.154,44	0,3696	A-A
	Casablanca	66.192.700,00	36.162	546,31	905.735,59	0,0137	B-B
	San José	3.680.812,00	68.791	18.689,08	761.086,22	0,2068	M-A
	Torrero	111.876.200,00	38.218	341,61	1.070.746,98	0,0096	B-B
	Universidad	3.020.154,00	51.255	16.970,99	831.769,56	0,2754	M-A
	Las Fuentes	6.314.793,00	43.747	6.927,70	590.448,93	0,0935	B-M
	La Almozara	3.767.367,00	29.701	7.883,76	410.595,80	0,1090	B-M
	Oliver-Valdefierro	4.339.479,00	28.682	6.609,55	816.624,27	0,1882	M-M
	Miralbueno	8.224.553,00	13.996	1.701,73	246.184,33	0,0299	B-M
	Actur - Rey Fernando	9.671.295,00	59.652	6.167,94	920.855,43	0,0952	B-M
	El Rabal	8.375.902,00	79.238	9.460,23	1.705.124,25	0,2036	M-M
	Santa Isabel	7.970.473,00	13.198	1.655,86	1.604.011,29	0,2012	M-M
BARRIOS RURALES	Alfocea	11.312.410,00	186	16,44	10.467,20	0,0009	B-B
	Casetas	6.345.331,00	7.507	1.183,07	283.548,17	0,0447	B-M
	Garrapinillos	141.236.300,00	5.428	38,43	1.502.632,44	0,0106	B-B
	Juslibol	299.560.300,00	2.579	8,61	133.239,46	0,0004	B-B
	La Cartuja Baja	123.980.600,00	2.171	17,51	817.084,43	0,0066	B-B
	Montañana	13.608.360,00	3.376	248,08	203.982,09	0,0150	B-B
	Monzalbarba	13.464.060,00	1.971	146,39	119.018,89	0,0088	B-B
	Movera	22.755.570,00	2.982	131,04	115.505,23	0,0051	B-B
	Peñaflor	50.927.580,00	1.205	23,66	118.612,75	0,0023	B-B
	San Gregorio	1.934.793,00	613	316,83	42.687,83	0,0221	B-B
	San Juan Mozarrifar	10.885.790,00	2.518	231,31	342.028,80	0,0314	B-B
	Torrecilla de Valmadrid	20.155.670,00	23	1,14	7.491,96	0,0004	B-B
	Venta del Olivar	9.235.637,00	1.015	109,90	533.474,47	0,0578	B-B
	Villarrapa	1.151.708,00	243	210,99	17.456,72	0,0152	B-B

Tabla 3.2.2. Valores de la Densidad de población y Densidad de construcción para cada uno de los distritos municipales y barrios rurales de Zaragoza.

En la Tabla 3.2.2 se observa que el rango obtenido para la densidad de población se ha dividido en tres partes estableciendo así tres categorías:

	Dp: 0-1000	Barrios con densidad de población baja (B).
	Dp: 1000-10000	Barrios con densidad de población media (M).
	Dp>10000	Barrios con densidad de población alta (A).

El rango obtenido para la densidad de construcción también se ha dividido en tres partes estableciendo así tres categorías:

	Dc: 0-0,15	Barrios con densidad de construcción baja (B).
	Dc: 0,15-0,30	Barrios con densidad de construcción media (M).
	Dc>0,30	Barrios con densidad de construcción alta (A).

Cada uno de los distritos municipales y barrios rurales se define con una pareja Dc-Dp, que representa su modelo urbano. Así por ejemplo, los barrios con una clasificación A-A corresponden a los barrios con alta densidad de construcción y de población y por lo tanto pueden ser considerados como representativos del centro de la ciudad, con edificios altos y muy juntos unos de otros, como el barrio Delicias que se muestra en la Figura 3.2.1, y los barrios con una clasificación B-B corresponden a los barrios poco edificados y escasamente

pobladas y representan a los barrios rurales con casas unifamiliares diseminadas, como el barrio de Movera que se muestra en la Figura 3.2.2.



Figura 3.2.1. Superficie construida sobre rasante en el distrito municipal de Delicias.

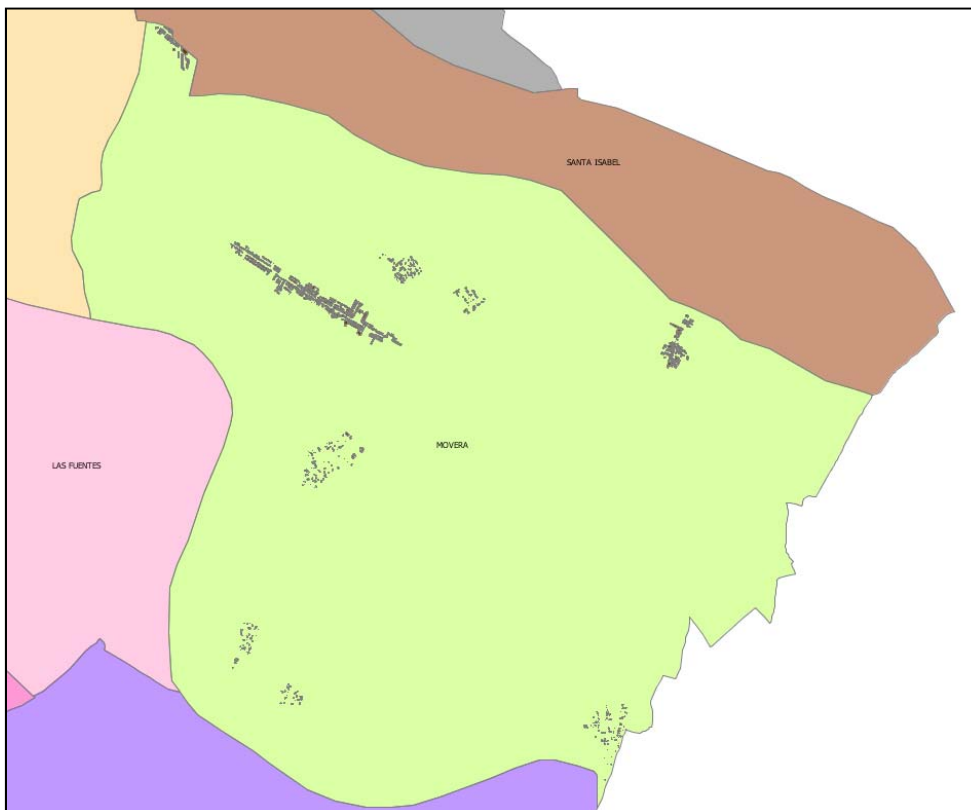


Figura 3.2.1. Superficie construida sobre rasante en el barrio rural de Movera.

Sin embargo, no toda la superficie construida sobre rasante es superficie de tejado y no toda la superficie de tejado de los edificios es superficie disponible para la instalación de paneles fotovoltaicos. Habrá que aplicar a la superficie construida sobre rasante los correspondientes coeficientes de reducción para obtener la superficie disponible para la implantación de instalaciones fotovoltaicas.

Teniendo en cuenta los estudios realizados por diferentes autores dentro de nuestro ámbito territorial (en España) [16,19,20] que utilizan tipologías de tejados, edificios y municipios comparables a las de este trabajo, y teniendo en cuenta también los datos disponibles para Zaragoza, se aplican distintos coeficientes de reducción dependiendo de la tipología del barrio en función de los dos parámetros calculados anteriormente: la densidad de construcción y la densidad de población.

Según **Salvador Izquierdo et al.,2008** [19] la superficie disponible de tejado (A_a) puede estimarse partiendo de la superficie construida sobre rasante (A_b), o de la superficie construida de tejado (A_r) mediante la aplicación progresiva de una serie de restricciones definidas por los siguientes coeficientes:

- C_v : coeficiente de fracción de huecos, para considerar los vacíos y huecos de los edificios
- C_s : coeficiente de sombreado, para tener en cuenta el efecto de las sombras generado por otros edificios, objetos o por la configuración del tejado en sí misma
- C_f : coeficiente de instalación, para excluir las superficies que tienen otras aplicaciones específicas de otras instalaciones de la edificación tales como calefacción y aire acondicionado, antenas, chimeneas, etc.

Por lo tanto:

$$A_a = A_r \cdot C_s \cdot C_f = A_b \cdot C_v \cdot C_s \cdot C_f$$

Los valores que se adoptan para estos coeficientes reductores en función de la tipología de barrio, se asemejan a los valores obtenidos por **Salvador Izquierdo et al.,2008** [19] en función de la tipología de municipio.

Para los barrios con clasificación A-A se asume un valor de 0,36 para el coeficiente de sombreado C_s y un valor de 0,65 para el coeficiente de instalación C_f , que corresponden a los coeficientes para los municipios con clasificación VH-VH.

Para los barrios con clasificación B-B se asume un valor de 0,46 para el coeficiente de sombreado C_s y un valor de 0,92 para el coeficiente de instalación C_f , que corresponden a los coeficientes para los municipios con clasificación L-L.

Para el resto de los barrios, los coeficientes de reducción C_s y C_f que se adoptan son los valores medios obtenidos por **Salvador Izquierdo et al.,2008** [19] para el caso de España. Para el coeficiente de sombreado C_s se asume un valor de 0,43 y para el coeficiente de instalación C_f un valor de 0,78.

Para todos los casos el valor del coeficiente de fracción de huecos C_v adopta un valor de 0,9 ya que al trabajar con mapas catastrales vectoriales la geometría de las edificaciones y los datos que se obtienen de ella son totalmente precisos, dejando un margen de error por posibles errores en los datos del catastro o en el método de obtención de las superficies con gvSIG.

En la Tabla 3.2.3 se muestran los resultados de superficies disponibles para la implantación de instalaciones fotovoltaicas, que resultan de aplicar estos coeficientes.

	Nombre	Superficie(m ²)	Superficie construida sobre rasante (m ²)	Superficie disponible de tejado para PV (m ²)	% de la superf. Cons.
DISTRITOS MUNICIPALES	Casco Histórico	1.984.383,00	793.874,03	167.189,87	21,06
	Centro	1.808.623,00	857.105,51	180.506,42	21,06
	Delicias	3.284.606,00	1.214.154,44	255.700,93	21,06
	Casablanca	66.192.700,00	905.735,59	344.976,57	38,09
	San José	3.680.812,00	761.086,22	229.741,49	30,19
	Torrero	111.876.200,00	1.070.746,98	407.826,11	38,09
	Universidad	3.020.154,00	831.769,56	251.077,96	30,19
	Las Fuentes	6.314.793,00	590.448,93	178.232,91	30,19
	La Almozara	3.767.367,00	410.595,80	123.942,45	30,19
	Oliver-Valdefierro	4.339.479,00	816.624,27	246.506,20	30,19
	Miralbueno	8.224.553,00	246.184,33	74.313,20	30,19
	Actur - Rey Fernando	9.671.295,00	920.855,43	277.969,42	30,19
	El Rabal	8.375.902,00	1.705.124,25	514.708,81	30,19
	Santa Isabel	7.970.473,00	1.604.011,29	484.186,85	30,19
BARRIOS RURALES	Alfocea	11.312.410,00	10.467,20	3.986,75	38,09
	Casetas	6.345.331,00	283.548,17	85.591,85	30,19
	Garrapinillos	141.236.300,00	1.502.632,44	572.322,64	38,09
	Juslibol	299.560.300,00	133.239,46	50.748,25	38,09
	La Cartuja Baja	123.980.600,00	817.084,43	311.211,12	38,09
	Montañana	13.608.360,00	203.982,09	77.692,70	38,09
	Monzalbarba	13.464.060,00	119.018,89	45.331,91	38,09
	Movera	22.755.570,00	115.505,23	43.993,63	38,09
	Peñaflor	50.927.580,00	118.612,75	45.177,22	38,09
	San Gregorio	1.934.793,00	42.687,83	16.258,94	38,09
	San Juan Mozarrifar	10.885.790,00	342.028,80	130.271,93	38,09
	Torreçilla de Valmadrid	20.155.670,00	7.491,96	2.853,54	38,09
	Venta del Olivar	9.235.637,00	533.474,47	203.189,76	38,09
	Villarrapa	1.151.708,00	17.456,72	6.648,92	38,09

Tabla 3.2.3. Superficie disponible de tejado para la implantación de instalaciones fotovoltaicas.

La superficie total disponible de tejados para la implantación de paneles fotovoltaicos supone un **31,41%** de la superficie total construida sobre rasante.

La energía que generarán a lo largo de un año los paneles fotovoltaicos en función de la superficie disponible en los tejados de los edificios será:

$$\text{Energía}_{FV} = \rho_{FV} \cdot PR \cdot S_{FV} \cdot H_{equiv}$$

donde ρ_{FV} es la densidad fotovoltaica que representa la potencia fotovoltaica que puede instalarse por unidad de superficie y que puede calcularse como:

$$\rho_{FV} = \eta_{panel} \cdot 1000 \text{ W/m}^2, \text{ siendo } \eta_{panel} \text{ la eficiencia del módulo fotovoltaico.}$$

PR (Performance Ratio) es el rendimiento general de la instalación e incluye las pérdidas que se producen por temperatura, cableado, paso de corriente continua a corriente alterna, etc., S_{FV} es la superficie disponible de tejado para la implantación de instalaciones fotovoltaicas calculada anteriormente y reflejada en la Tabla 3.2.3, y H_{equiv} es el número de horas

equivalentes, esto es el número de horas en las que un panel funcionando a su potencia nominal generaría tanta energía como genera realmente a lo largo de un año.

Existen varias tecnologías de panel fotovoltaico adecuadas para instalar en edificios: silicio mono o policristalino, lámina delgada de silicio amorfo, Cd-Te, CIGS, etc. por lo que resulta difícil definir un valor de eficiencia de conversión eléctrica que sea representativo de todas ellas simultáneamente. En la actualidad, las tecnologías más empleadas para la construcción de un generador fotovoltaico son las de silicio cristalino y capa fina. Los módulos solares de silicio cristalino son la tecnología más común y más madura y representa alrededor del 80% del mercado actual en Europa. Una célula transforma entre el 14 y el 22% de la luz solar que le llega en electricidad y la eficiencia de un módulo de Silicio cristalino está comprendida entre el 12% y el 19% [23]. En este trabajo se ha considerado una eficiencia de módulo (η_{panel}) del 15% que es representativa del silicio mono o policristalino, material del que están fabricados la gran mayoría de paneles instalados en España en los últimos años [24].

	Silicio cristalino	Capas delgadas	Concentración (CPV)	3ª generación
				
Tipologías	Poli y mono	CdTe, CIGS y a-Si	CPV y HCPV	Dye-sensitized cells y células orgánicas
Eficiencia comercial	14-17%	10-12%	25-30%	5-6%
Madurez	+++	++	+	-
Cuota de mercado	~85%	~15%	~1%	~0,1%

Figura 3.2.3. Eficiencia y cuota de mercado de las distintas tecnologías fotovoltaicas en España [24].

Se considera que el rendimiento general de la instalación, PR, es del 80% siendo éste un valor típicamente adoptado para estos cálculos.

Para la obtención del número de horas equivalente, H_{equiv} , en la ciudad de Zaragoza se ha utilizado la base de datos PVGIS de la pagina web del Instituto para la Energía y el Transporte (ITE), en concreto del Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea o JRC por sus siglas en ingles (Joint Research Centre) [25].

El JRC reúne desde hace años datos climáticos con los que han elaborado una base de datos de radiación solar para el Photovoltaic Geographical Information System o PVGIS, los cuales son accesibles de manera gratuita para cualquier persona interesada en el tema. Esta base de datos, llamada "CM SAF-PVGIS" (Satellite Application Facility on Climate Monitoring), no solo realiza una interpolación de los datos obtenidos previamente de estaciones meteorológicas (como hacia la versión anterior conocida como clásica o PVGIS-3) sino que incorpora datos obtenidos de satélites meteorológicos durante los últimos 12 años.

Al introducir los datos de una instalación fotovoltaica de silicio cristalino en Zaragoza en PVGIS, se obtienen los datos mostrados en la Figura 3.2.4. La suma del promedio de la irradiación global recibida por los módulos es de 2.010 kWh/m² en una instalación con una inclinación de módulos óptima (37°) orientada al Sur, lo que equivale a las horas equivalentes, y es de 1.710 kWh/m² para una instalación cuyos módulos están en horizontal.

Fixed system: inclination=37°, orientation=0° (Optimum at given orientation)				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	2.83	87.8	3.32	103
Feb	4.06	114	4.83	135
Mar	4.75	147	5.85	181
Apr	4.99	150	6.23	187
May	5.02	156	6.41	199
Jun	5.22	157	6.81	204
Jul	5.52	171	7.24	224
Aug	5.29	164	6.92	214
Sep	4.98	149	6.37	191
Oct	4.07	126	5.06	157
Nov	3.28	98.4	3.90	117
Dec	2.76	85.7	3.22	99.7
Yearly average	4.40	134	5.51	168
Total for year		1610		2010

Fixed system: inclination=0°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	1.55	48.1	1.90	58.9
Feb	2.55	71.5	3.06	85.8
Mar	3.68	114	4.47	139
Apr	4.61	138	5.66	170
May	5.24	163	6.61	205
Jun	5.76	173	7.43	223
Jul	5.93	184	7.69	238
Aug	5.10	158	6.58	204
Sep	4.08	122	5.15	154
Oct	2.79	86.4	3.46	107
Nov	1.83	54.9	2.25	67.5
Dec	1.41	43.7	1.74	54.1
Yearly average	3.72	113	4.68	142
Total for year		1360		1710

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)
 E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)
 H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)
 H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Figura 3.2.4. Irradiación solar para instalación horizontal e instalación con inclinación óptima de 37°.

Como no todas las configuraciones de tejado son cubiertas planas donde se pueden implantar las instalaciones fotovoltaicas con la inclinación óptima de los módulos, se considera el dato más desfavorable de 1.710 horas equivalentes.

Con todos los datos anteriores la energía que podría ser generada a lo largo de un año por los paneles fotovoltaicos, que cubrieran toda la superficie disponible para la implantación de fotovoltaica en los tejados de edificios de la ciudad de Zaragoza, sería de 1.094 GWh. El desglose por barrios se muestra en la Tabla 3.2.4.

	Nombre	Superficie(m ²)	Superficie disponible de tejado para PV (m ²)	% de la superf. Cons.	Energía generada FV (GWh/año)
DISTRITOS MUNICIPALES	Casco Histórico	1.984.383,00	167.189,87	21,06	34,31
	Centro	1.808.623,00	180.506,42	21,06	37,04
	Delicias	3.284.606,00	255.700,93	21,06	52,47
	Casablanca	66.192.700,00	344.976,57	38,09	70,79
	San José	3.680.812,00	229.741,49	30,19	47,14
	Torrero	111.876.200,00	407.826,11	38,09	83,69
	Universidad	3.020.154,00	251.077,96	30,19	51,52
	Las Fuentes	6.314.793,00	178.232,91	30,19	36,57
	La Almozara	3.767.367,00	123.942,45	30,19	25,43
	Oliver-Valdefierro	4.339.479,00	246.506,20	30,19	50,58
	Miralbueno	8.224.553,00	74.313,20	30,19	15,25
	Actur - Rey Fernando	9.671.295,00	277.969,42	30,19	57,04
	El Rabal	8.375.902,00	514.708,81	30,19	105,62
	Santa Isabel	7.970.473,00	484.186,85	30,19	99,36
BARRIOS RURALES	Alfocea	11.312.410,00	3.986,75	38,09	0,82
	Casetas	6.345.331,00	85.591,85	30,19	17,56
	Garrapinillos	141.236.300,00	572.322,64	38,09	117,44
	Juslibol	299.560.300,00	50.748,25	38,09	10,41
	La Cartuja Baja	123.980.600,00	311.211,12	38,09	63,86
	Montañana	13.608.360,00	77.692,70	38,09	15,94
	Monzalbarba	13.464.060,00	45.331,91	38,09	9,30
	Movera	22.755.570,00	43.993,63	38,09	9,03
	Peñaflor	50.927.580,00	45.177,22	38,09	9,27
	San Gregorio	1.934.793,00	16.258,94	38,09	3,34
	San Juan Mozarrifar	10.885.790,00	130.271,93	38,09	26,73
	Torreclilla de Valmadrid	20.155.670,00	2.853,54	38,09	0,59
	Venta del Olivar	9.235.637,00	203.189,76	38,09	41,69
	Villarrapa	1.151.708,00	6.648,92	38,09	1,36
	TOTAL				1.094,16

Tabla 3.2.4. Energía generada por el total de fotovoltaica instalada en toda la superficie disponible de tejado para PV.

Los datos de consumo de energía de la ciudad de Zaragoza en el año 2012 obtenidos del Ayuntamiento de Zaragoza [26] son los siguientes:

- Consumo de energía eléctrica no industrial: 185.369 tep/año=2.155,84 GWh/año

De este consumo el 58% (107.514 tep/año) corresponde al sector residencial que incluye la hostelería, el comercio y servicios, la administración y servicios públicos y los usos domésticos, y el resto corresponde al sector de la movilidad (transporte) y la agricultura.

Prácticamente la mitad (47,26%) del consumo eléctrico del sector residencial es para usos domésticos.

Si repartimos este consumo entre los distintos distritos municipales y barrios rurales en función de la población de cada uno de ellos, ajustamos la energía generada por la tecnología fotovoltaica como máximo a la que se va a consumir en cada uno de los barrios, y lo comparamos con los datos anteriores de producción de energía con paneles fotovoltaicos se obtiene el porcentaje del consumo cubierto con la fotovoltaica para el consumo eléctrico no industrial. Los datos desglosados por barrios se muestran en la Tabla 3.2.5.

	Nombre	Población(hab)	Superficie construida sobre rasante (m ²)	Energía generada teórica FV (GWh/año)	Energía generada real FV (GWh/año)	Energía consumida (GWh/año)	% consumo cubierto con FV
DISTritos MUNICIPALES	Casco Histórico	47.046	793.874,03	34,31	34,31	144,02	23,82%
	Centro	54.222	857.105,51	37,04	37,04	165,99	22,32%
	Delicias	108.514	1.214.154,44	52,47	52,47	332,19	15,80%
	Casablanca	36.162	905.735,59	70,79	70,79	110,70	63,95%
	San José	68.791	761.086,22	47,14	47,14	210,59	22,39%
	Torrero	38.218	1.070.746,98	83,69	83,69	116,99	71,53%
	Universidad	51.255	831.769,56	51,52	51,52	156,90	32,84%
	Las Fuentes	43.747	590.448,93	36,57	36,57	133,92	27,31%
	La Almozara	29.701	410.595,80	25,43	25,43	90,92	27,97%
	Oliver-Valdefierro	28.682	816.624,27	50,58	50,58	87,80	57,61%
	Miralbueno	13.996	246.184,33	15,25	15,25	42,85	35,59%
	Actur - Rey Fernando	59.652	920.855,43	57,04	57,04	182,61	31,24%
	El Rabal	79.238	1.705.124,25	105,62	105,62	242,57	43,54%
	Santa Isabel	13.198	1.604.011,29	99,36	40,40	40,40	100,00%
BARRIOS RURALES	Alfocea	186	10.467,20	0,82	0,57	0,57	100,00%
	Casetas	7.507	283.548,17	17,56	17,56	22,98	76,43%
	Garrapinillos	5.428	1.502.632,44	117,44	16,62	16,62	100,00%
	Juslibol	2.579	133.239,46	10,41	7,89	7,89	100,00%
	La Cartuja Baja	2.171	817.084,43	63,86	6,65	6,65	100,00%
	Montañana	3.376	203.982,09	15,94	10,33	10,33	100,00%
	Monzalbarba	1.971	119.018,89	9,30	6,03	6,03	100,00%
	Movera	2.982	115.505,23	9,03	9,03	9,13	98,89%
	Peñaflor	1.205	118.612,75	9,27	3,69	3,69	100,00%
	San Gregorio	613	42.687,83	3,34	1,88	1,88	100,00%
	San Juan Mozarrifar	2.518	342.028,80	26,73	7,71	7,71	100,00%
	Torrecilla de Valmadrid	23	7.491,96	0,59	0,07	0,07	100,00%
	Venta del Olivar	1.015	533.474,47	41,69	3,11	3,11	100,00%
	Villarrapa	243	17.456,72	1,36	0,74	0,74	100,00%
TOTAL		704.239,00		1.094,16	799,74	2.155,84	37,10%

Tabla 3.2.5. Consumo eléctrico no industrial cubierto con la implantación de fotovoltaica en toda la superficie disponible para su instalación.

El consumo eléctrico no industrial de la ciudad de Zaragoza podría cubrirse en un **37,10%** con la producción eléctrica de paneles fotovoltaicos, siendo la demanda cubierta mayor cuanto menos poblado está el barrio y llegando en los barrios rurales poco poblados a una producción del 100% del consumo.

Si se repiten los mismos cálculos anteriores para el consumo eléctrico del sector residencial que supone el 58% del consumo eléctrico no industrial, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.2.6.

	Nombre	Población(hab)	Superficie construida sobre rasante (m ²)	Energía generada teórica FV (GWh/año)	Energía generada real FV (GWh/año)	Energía consumida (GWh/año)	% consumo cubierto con FV
DISTRITOS MUNICIPALES	Casco Histórico	47.046	793.874,03	34,31	34,31	83,53	41,07%
	Centro	54.222	857.105,51	37,04	37,04	96,27	38,47%
	Delicias	108.514	1.214.154,44	52,47	52,47	192,67	27,23%
	Casablanca	36.162	905.735,59	70,79	70,79	64,21	110,25%
	San José	68.791	761.086,22	47,14	47,14	122,14	38,60%
	Torrero	38.218	1.070.746,98	83,69	67,86	67,86	100,00%
	Universidad	51.255	831.769,56	51,52	51,52	91,00	56,61%
	Las Fuentes	43.747	590.448,93	36,57	36,57	77,67	47,09%
	La Almozara	29.701	410.595,80	25,43	25,43	52,73	48,23%
	Oliver-Valdefierro	28.682	816.624,27	50,58	50,93	50,93	100,00%
	Miralbueno	13.996	246.184,33	15,25	15,25	24,85	61,36%
	Actur - Rey Fernando	59.652	920.855,43	57,04	57,04	105,91	53,85%
	El Rabal	79.238	1.705.124,25	105,62	105,62	140,69	75,07%
BARRIOS RURALES	Santa Isabel	13.198	1.604.011,29	99,36	23,43	23,43	100,00%
	Alfocea	186	10.467,20	0,82	0,33	0,33	100,00%
	Casetas	7.507	283.548,17	17,56	13,33	13,33	100,00%
	Garrapinillos	5.428	1.502.632,44	117,44	9,64	9,64	100,00%
	Juslibol	2.579	133.239,46	10,41	4,58	4,58	100,00%
	La Cartuja Baja	2.171	817.084,43	63,86	3,85	3,85	100,00%
	Montañana	3.376	203.982,09	15,94	5,99	5,99	100,00%
	Monzalbarba	1.971	119.018,89	9,30	3,50	3,50	100,00%
	Movera	2.982	115.505,23	9,03	5,29	5,29	100,00%
	Peñaflor	1.205	118.612,75	9,27	2,14	2,14	100,00%
	San Gregorio	613	42.687,83	3,34	1,09	1,09	100,00%
	San Juan Mozarrifar	2.518	342.028,80	26,73	4,47	4,47	100,00%
	Torrecilla de Valmadrid	23	7.491,96	0,59	0,04	0,04	100,00%
	Venta del Olivar	1.015	533.474,47	41,69	1,80	1,80	100,00%
	Villarrapa	243	17.456,72	1,36	0,43	0,43	100,00%
TOTAL		704.239,00		1.094,16	731,89	1.250,39	58,53%

Tabla 3.2.6. Consumo eléctrico del sector residencial cubierto con la implantación de fotovoltaica en toda la superficie disponible para su instalación.

El consumo eléctrico residencial de la ciudad de Zaragoza podría cubrirse en un **58,53%** con la producción eléctrica de paneles fotovoltaicos, llegando en los barrios rurales poco poblados y en los barrios de Torrero, Oliver-Valdefierro y Santa Isabel a una producción del 100% del consumo.

Si se repiten los mismos cálculos anteriores para el consumo eléctrico de los usos domésticos que supone el 47,26% del consumo eléctrico residencial, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.2.7.

	Nombre	Población(hab)	Superficie construida sobre rasante (m ²)	Energía generada teórica FV (GWh/año)	Energía generada real FV (GWh/año)	Energía consumida (GWh/año)	% consumo cubierto con FV
DISTritos MUNICIPALES	Casco Histórico	47.046	793.874,03	34,31	34,31	39,48	86,91%
	Centro	54.222	857.105,51	37,04	37,04	45,50	81,41%
	Delicias	108.514	1.214.154,44	52,47	52,47	91,06	57,62%
	Casablanca	36.162	905.735,59	70,79	30,34	30,34	100,00%
	San José	68.791	761.086,22	47,14	47,14	57,72	81,67%
	Torrero	38.218	1.070.746,98	83,69	32,07	32,07	100,00%
	Universidad	51.255	831.769,56	51,52	43,01	43,01	100,00%
	Las Fuentes	43.747	590.448,93	36,57	36,57	36,71	99,63%
	La Almozara	29.701	410.595,80	25,43	24,92	24,92	100,00%
	Oliver-Valdefierro	28.682	816.624,27	50,58	24,07	24,07	100,00%
	Miralbueno	13.996	246.184,33	15,25	11,74	11,74	100,00%
	Actur - Rey Fernando	59.652	920.855,43	57,04	50,05	50,05	100,00%
	El Rabal	79.238	1.705.124,25	105,62	66,49	66,49	100,00%
	Santa Isabel	13.198	1.604.011,29	99,36	11,07	11,07	100,00%
BARRIOS RURALES	Alfocea	186	10.467,20	0,82	0,16	0,16	100,00%
	Casetas	7.507	283.548,17	17,56	6,30	6,30	100,00%
	Garrapinillos	5.428	1.502.632,44	117,44	4,55	4,55	100,00%
	Juslibol	2.579	133.239,46	10,41	2,16	2,16	100,00%
	La Cartuja Baja	2.171	817.084,43	63,86	1,82	1,82	100,00%
	Montañana	3.376	203.982,09	15,94	2,83	2,83	100,00%
	Monzalbarba	1.971	119.018,89	9,30	1,65	1,65	100,00%
	Movera	2.982	115.505,23	9,03	2,50	2,50	100,00%
	Peñaflor	1.205	118.612,75	9,27	1,01	1,01	100,00%
	San Gregorio	613	42.687,83	3,34	0,51	0,51	100,00%
	San Juan Mozarrifar	2.518	342.028,80	26,73	2,11	2,11	100,00%
	Torrecilla de Valmadrid	23	7.491,96	0,59	0,02	0,02	100,00%
	Venta del Olivar	1.015	533.474,47	41,69	0,85	0,85	100,00%
	Villarrapa	243	17.456,72	1,36	0,20	0,20	100,00%
TOTAL		704.239,00		1.094,16	528,01	590,93	89,35%

Tabla 1.2.7. Consumo eléctrico de los usos domésticos cubierto con la implantación de fotovoltaica en toda la superficie disponible para su instalación.

El consumo eléctrico de los usos domésticos de la ciudad de Zaragoza podría cubrirse en un **89,35%** con la producción eléctrica de paneles fotovoltaicos, llegando en casi todos los barrios a una producción del 100% del consumo. El barrio en el que esta situación es más desfavorable es el barrio Delicias, debido a su alta población.

Hay que tener en cuenta que para acoplar las curvas de demanda y generación en el tiempo será necesario utilizar un sistema de acumulación u otras fuentes de energía que cubran la demanda cuando no sea posible aprovechar el recurso solar.

3.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en este estudio van en la línea de los concluidos por otros autores en diferentes estudios realizados en distintas regiones. *Elisabeth Kjellsson* concluye en un estudio realizado en Suiza [27], que la producción eléctrica estimada de las instalaciones fotovoltaicas integradas en edificios es la misma que la consumida por las viviendas. *J.Ordóñez et al., 2010* [20] estima que la producción eléctrica de paneles fotovoltaicos instalados en el sector residencial cubriría el 78,89% del consumo eléctrico del sector residencial de Andalucía. La diferencia con los datos obtenidos en este trabajo radica en las diferencias de irradiación y superficie de cubiertas disponible entre una región y otra.

Los resultados de este trabajo muestran la importante contribución que, la implantación de instalaciones fotovoltaicas en las cubiertas de las edificaciones, podría tener para reducir el consumo eléctrico en los entornos urbanos.

Para mejorar la precisión de los valores obtenidos habría que tener en cuenta las diferentes tipologías de cubierta, su inclinación y su orientación, para ajustar y optimizar la posición de los módulos fotovoltaicos. También se podría hacer un análisis más completo de los coeficientes reductores para mejorar la fiabilidad de los resultados.

4. TECNOLOGÍA EÓLICA EN ENTORNOS URBANOS.

4.1. ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO EN ENTORNOS URBANOS.

Las turbinas eólicas extraen la energía cinética del aire en movimiento, convirtiéndola en energía mecánica a través del rotor de la turbina y después en energía eléctrica a través del generador.

$$P = \frac{C_p \times \rho \times A \times u^3}{2}$$

donde la potencia mecánica de salida (P) es una función del coeficiente de rendimiento de la turbina (C_p), de la densidad del aire (ρ), del área barrida por la proyección de la turbina en la dirección del viento (A) y de la velocidad del viento (u). Así, los dos factores que regulan la potencia son: la tecnología de la turbina y el recurso eólico. La potencia es proporcional a la velocidad del viento elevado al cubo, por lo que pequeñas variaciones en u pueden tener un impacto significativo en P. Por lo tanto la estimación precisa de la velocidad del viento en el emplazamiento de la turbina eólica es fundamental para estimar de forma precisa la potencia de salida.

Las ciudades son aerodinámicamente rugosas y heterogéneas, por lo que el recurso eólico cerca de la superficie urbana, a la altura de los tejados, es altamente variable en el espacio y en el tiempo.

La superficie urbana afecta al flujo en un rango de escalas espaciales horizontales: a escala de la ciudad (hasta 10 ó 20 km), a escala de barrio (hasta 1 ó 2 km) y a escala de calle (menos de 100 ó 200 m). A escala de calle, los obstáculos superficiales introducen estelas, por lo que en las proximidades de los edificios la naturaleza del flujo depende de un número de parámetros locales de la superficie, tales como el tamaño del edificio, la forma y la orientación. Esta región de la capa límite urbana se conoce como la subcapa de rugosidad y se extiende desde la superficie hasta una altura de aproximadamente de 2 a 5 veces la altura media de los edificios.

El viento disponible en un emplazamiento urbano o semiurbano es un viento complejo normalmente con alto perfil vertical y alta turbulencia. Las turbinas cercanas a esta superficie urbana experimentan un viento muy localizado que es muy difícil de predecir a partir de mediciones realizadas en otro lugar.

Para optimizar el emplazamiento de un aerogenerador de pequeña potencia en un área urbana es necesario un conocimiento detallado de la variabilidad espacial del recurso eólico [28].

La investigación del clima en la capa límite de las áreas urbanas ha sido impulsada predominantemente por un interés en la dispersión de la contaminación y en menor medida por el confort de los peatones. Se han llevado a cabo muy pocos estudios de la velocidad del viento urbano con vistas a aplicaciones de turbinas eólicas [29].

En la actualidad se están utilizando distintos métodos y herramientas para evaluar el recurso eólico en áreas urbanas:

- Túnel de viento:

Esta herramienta es adecuada para ensayar modelos de edificios urbanos y determinar los máximos de viento y las zonas con o sin turbulencia, así como para ensayar modelos detallados de áreas urbanas reales.

La combinación de experimentos en túnel de viento y mediciones en campo permite cuantificar la dispersión y la limitada representatividad inherente a los datos de campo, así como permite ampliar los conjuntos de datos de campo por medio de sistemáticas mediciones con alta resolución espacial y temporal.

· Software CFD (Modelos de dinámica de fluidos):

Estos programas calculan el potencial eólico de todo tipo de edificios con formatos de datos estándar. Modelan la turbulencia, perfil vertical y el ángulo de incidencia del viento. Permiten analizar los efectos aceleradores de los edificios (Venturi, esquina, etc.). Incluso consideran los elementos porosos del dominio evaluado. Finalmente ofrecen el mapa de frecuencias de superación del umbral de operación del aerogenerador (velocidad de viento para arranque) y los coeficientes de Weibull y las tablas de frecuencias lo cual permite disponer del estudio completo.

Los resultados de estos estudios proporcionan orientación útil en cuanto a la mejor ubicación para los aerogeneradores de baja potencia sobre un edificio específico o dentro de una calle determinada. Sin embargo, debido a los costos y las limitaciones de tiempo, no es posible aplicar este método para estudiar la velocidad del viento en una zona urbana amplia [28].

· Análisis analíticos.

Es posible estimar las velocidades medias del viento sobre un área analíticamente, como una función de la altura, mediante la aplicación de una " Metodología del Atlas eólico" [30]. Este método requiere información tanto del viento a nivel regional como de las características de rugosidad de la superficie.

D. R. Drew et al. [28] proponen un método para ajustar las predicciones de velocidad de viento en las zonas urbanas, considerando el impacto de la superficie en una escala de barrio. El modelo se utiliza para estimar la variabilidad de la velocidad anual media del viento a través de Londres, a la altura típica de las instalaciones de pequeñas turbinas eólicas. El mapa eólico derivado proporciona actualmente la mejor forma para identificar los barrios de Londres en los que las pequeñas turbinas eólicas producen más energía.

Keith M. Sunderland et al. [31] evalúan el recurso eólico urbano mediante el empleo de un modelo empírico de base física para relacionar las observaciones de viento de un estación meteorológica convencional con las obtenidas en zona urbana. En este caso, esto se aplica para relacionar las observaciones en el aeropuerto de Dublín, fuera de la zona urbana, con las realizadas en una zona urbana y suburbana en Dublín, donde los instrumentos de medición se colocaron cerca del nivel de las cubiertas y muy por encima de la altura de las cubiertas. Demuestran tener una precisión suficiente para evaluar el potencial para la generación de energía con aerogeneradores de pequeña potencia en las ciudades y ponen de manifiesto que el recurso eólico urbano puede ser evaluado a partir de las mediciones realizadas en un sitio cercano.

J.T. Millward-Hopkins et al. [32] comparan la precisión de tres métodos analíticos de Atlas eólico diferentes, para predecir la velocidad media del viento por encima de las cubiertas en una serie de ciudades Reino Unido. Las predicciones se comparan con las mediciones de las velocidades medias de viento de una amplia variedad de zonas urbanas del Reino Unido. Los resultados muestran que los métodos son generalmente más precisos cuando se utiliza más complejidad en el enfoque, en particular para los sitios que están muy expuestos al viento

4.2. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN ZARAGOZA.

Se describe a continuación el método evaluado recientemente por **J.T. Millward-Hopkins et al.** [33] y que ha demostrado su potencial para estimar de forma precisa la velocidad del viento en áreas urbanas frente a otras metodologías y la que sería su aplicación al caso concreto de la ciudad de Zaragoza.

Dicho método analítico de Atlas Eólico se basa en el desarrollado originalmente por la Oficina Meteorológica de Reino Unido (UK Meteorological Office) para estimar el recurso eólico para pequeños aerogeneradores [34]. **J.T. Millward-Hopkins et al.** realizaron una serie de modificaciones sobre la metodología de la Oficina Meteorológica con el fin de optimizarla para

su uso en el entorno urbano, incluida la integración de los métodos que tienen en cuenta la influencia del cambio de dirección del viento, y el uso de datos detallados que describen los edificios y la vegetación para cuantificar el efecto de fricción de la superficie urbana.

El método consiste en la aplicación de una serie de adaptaciones a una base de datos de velocidad del viento a gran escala para tener en cuenta los efectos de la zona urbana sobre los perfiles de viento. Por lo tanto, se apoya en el conocimiento del clima eólico regional en la ciudad de interés y también en las propiedades aerodinámicas de la superficie urbana, que se cuantifican normalmente utilizando los parámetros de longitud de rugosidad (z_0) y altura de desplazamiento (d). Estos parámetros aerodinámicos controlan la forma del perfil logarítmico estándar del viento que es fundamental para la metodología del Atlas eólico:

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right),$$

donde u^* es la velocidad de fricción, k es la constante de Von Karman (~ 0.4) y z es la altura por encima del suelo.

El clima eólico regional a utilizar como punto de partida del modelo, para el caso concreto de la ciudad de Zaragoza, puede ser el Atlas Eólico de España desarrollado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), de libre disposición, que elabora mapas de la velocidad media del viento y de la densidad de potencia eólica a distintas alturas sobre el nivel del suelo (30, 60, 80 y 100 m), y archivos de datos que contienen los parámetros de las distribuciones de frecuencias de velocidad y dirección del viento

Por lo tanto, aunque estas velocidades de viento representan la influencia de la topografía local, deben ser corregidas para tener en cuenta la rugosidad del área circundante antes de que puedan considerarse como las reales en el sitio de estudio. La metodología del atlas eólico logra esta corrección a través de tres procedimientos en escala.

El método de Atlas eólico utilizado para estimar la velocidad media del viento se ilustra en la Figura 4.2.1.

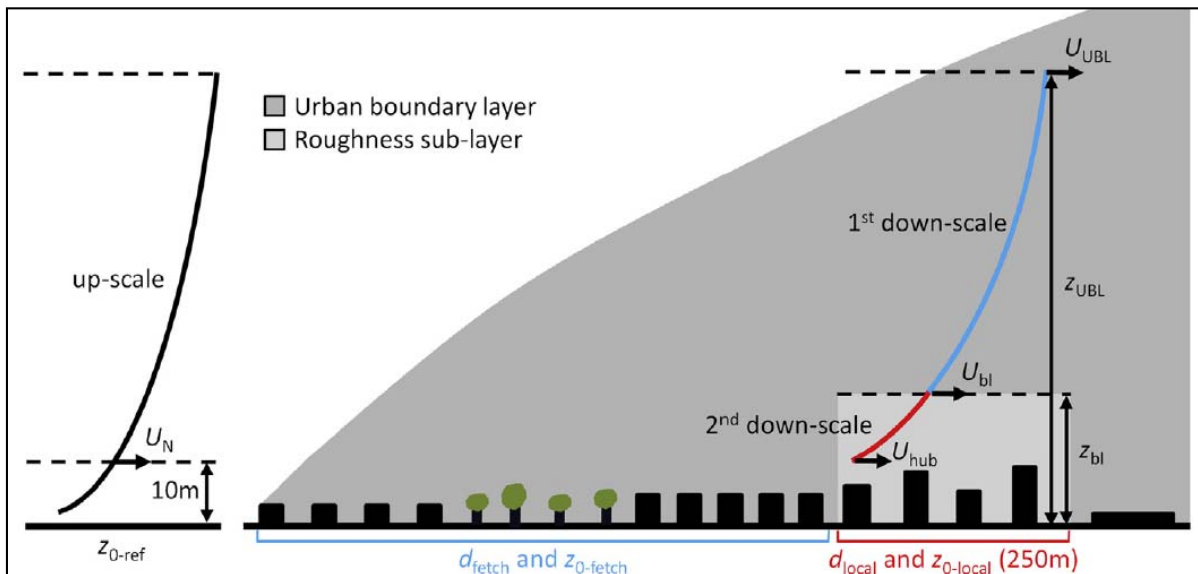


Figura 4.2.1. Diagrama esquemático de la metodología de Atlas Eólico.

En la primera etapa del procedimiento, las velocidades del viento de la base de datos (U_N) se escalan hasta la parte superior de la capa límite urbana (UBL), a la altura z_{UBL} . Aquí la influencia de la superficie urbana se supone que es insignificante. Para esta escala se utiliza el perfil logarítmico con una longitud de rugosidad de referencia a «campo abierto» de 0,14 m (z_{0-ref}) [34], y por tanto la velocidad del viento en z_{UBL} viene dada por:

$$U_{UBL} = U_N \frac{\ln(z_{UBL}/z_{0-ref})}{\ln(10/z_{0-ref})}$$

Debido al hecho de que la altura de la capa límite urbana (UBL) aumenta con el aumento de la distancia en la ciudad, la altura z_{UBL} se estima como una función de la distancia desde el límite de la ciudad a contra viento.

Esto refleja el proceso físico de crecimiento de la capa límite, que se produce debido al hecho de que a medida que el flujo se desplaza más hacia la ciudad, mezclas turbulentas verticales conducidas por la influencia de la fricción de la superficie rugosa se extienden hacia arriba. La estimación de esta altura se realiza mediante la fórmula de Elliot del crecimiento de la capa límite, limitada a una altura máxima realista de 500 m:

$$z_{UBL} = \min \left\{ z_{0-fetch} \left[0.65 - 0.03 \ln(z_{0-fetch}/z_{0-ref}) \right] x \left[\frac{x}{z_{0-fetch}} \right]^{0.8}, 500 \right\},$$

donde, z_{0-ref} y $z_{0-fetch}$ son las longitudes de rugosidad para "contra viento" y "a favor del viento" respectivamente, y la constante de 0,65 ha sido modificada ligeramente respecto de su valor original de 0,75, según lo recomendado por el Met Office [34]. Cabe señalar que la determinación del borde exacto de la ciudad, y por lo tanto de x , puede ser bastante subjetiva. Sin embargo, las predicciones de velocidades de viento tienen muy baja sensibilidad a x , con la excepción de aquellas dentro de unos pocos cientos de metros del borde de la ciudad.

En el resto de la metodología, la velocidad del viento en la parte superior de la UBL se reduce de escala hasta la altura del buje de la turbina en dos etapas, utilizando parámetros aerodinámicos apropiados para el área urbana. Estos parámetros se estiman basándose en datos detallados que describen la geometría de todos los edificios y la principal vegetación de la ciudad.

La primera etapa de la reducción de escala se utiliza para estimar la velocidad del viento (U_{bl}) a la altura de mezcla (z_{bl}), como se ilustra en la Figura 4.2.1. La importancia de z_{bl} es que se considera que es la parte superior de la " subcapa rugosa ", debajo de la cual se considera que el perfil del viento está determinado por la geometría local. La Oficina Meteorológica del Reino Unido estima para z_{bl} el doble de la altura media local de los edificios (h_m). Sin embargo, los resultados experimentales muestran que la subcapa rugosa es más gruesa por encima de formaciones de edificios de alturas heterogéneas, y que por lo general se extiende desde 2 a 5 h_m por encima del suelo dependiendo de la geometría de la superficie. Esto implica que para estimar z_{bl} puede ser más apropiado un múltiplo de la altura efectiva media de los edificios (h_{m-eff}), ya que h_{m-eff} aumenta con el aumento de la variación de la altura de los edificios. Físicamente h_{m-eff} indica la altura efectiva media de una formación de edificios que tiene en cuenta el efecto desproporcionado de los edificios altos y el efecto insignificante de los pequeños, protegidos del flujo del viento. Así, es apropiado establecer $z_{bl}=2h_{m-eff}$ ya que esto hace que la profundidad de la subcapa rugosa sea consistente con el rango aceptado de 2 a 5 h_m señalado anteriormente.

Se supone que el perfil de viento por encima de z_{bl} está influenciado por el área directamente contra el viento del lugar de la predicción, que se extiende hasta una distancia de 5 Km. Por consiguiente, para obtener U_{bl} , se utilizan los parámetros aerodinámicos apropiados ($z_{0-fetch}$ y d_{fetch}) en el perfil logarítmico:

$$U_{bl} = U_{UBL} \frac{\ln[(z_{bl}-d_{fetch})/z_{0-fetch}]}{\ln[(z_{UBL}-d_{fetch})/z_{0-fetch}]}$$

Para calcular $z_{0-fetch}$ y d_{fetch} se consideran 8 direcciones distintas de viento utilizando sectores que se extienden desde el límite de la ciudad de una longitud máxima de 5 km. y una anchura de 45°.

En la segunda etapa de la reducción de escala se estima la velocidad del viento (U_{hub}) a la altura del buje de la turbina (z_{hub}). Se asume ahora que el perfil del viento está adaptado al área local, y por lo tanto se estiman parámetros aerodinámicos en áreas locales de 250 m² ($z_{0-local}$ y d_{local}) para estimar U_{hub} :

$$U_{hub} = U_{bl} \frac{\ln[(z_{hub}-d_{local})/z_{0-local}]}{\ln[(z_{bl}-d_{local})/z_{0-local}]}$$

Para la ciudad de Zaragoza, estos cálculos se realizarían para cada celda de una cuadrícula de 250 m. de resolución, y para ocho direcciones de viento N, NE, E, SE, S, SW, W y NW. Posteriormente, con el fin de obtener velocidades del viento medias a largo plazo, independientes de la dirección del viento, las predicciones para cada dirección se ponderarían adecuadamente teniendo en cuenta la frecuencia de distribución de la dirección del viento registrada en la estación local de referencia a largo plazo. Los resultados finales de este proceso serán amplios mapas de vientos de la ciudad con predicciones de velocidad de viento para cada 250 m de barrio a una altura dada. (por ejemplo dos veces la altura media de los edificios).

La ecuación anterior sólo es válida hasta la altura media local de las edificaciones. Por debajo de esta altura, el flujo es muy complejo y variable espacialmente, y generalmente las velocidades de viento serán demasiado bajas para que operen las turbinas.

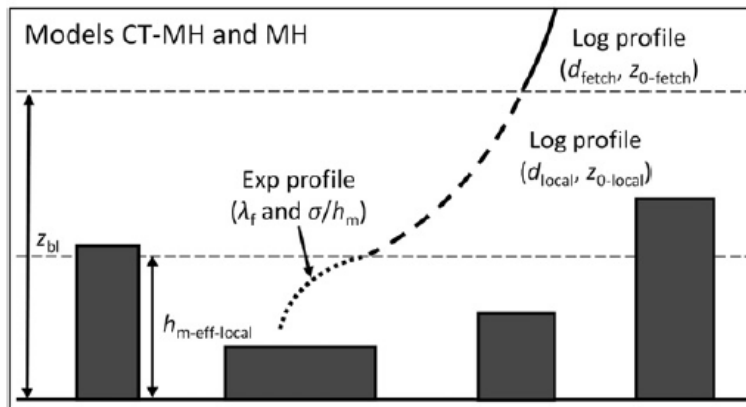


Figura 4.2.3. Ilustración del proceso de reducción de escala. Los parámetros que controlan los perfiles están entre paréntesis.

Sin embargo, como se ilustra en la Figura 4.2.3., se puede modelar una aproximación del perfil de viento en esta zona utilizando un perfil exponencial que tiene en cuenta la influencia de la variación de la altura:

$$U_{hub} = U_{hm-eff-local} \exp \left[9.6 \lambda_f \left(1 - \frac{\sigma_h}{h_{m-local}} \right) x \left(\frac{z_{hub}}{h_{hm-eff-local}} - 1 \right) \right]$$

Donde $U_{hm-eff-local}$ es la velocidad del viento a $h_{m-eff-local}$ obtenida del perfil logarítmico y σ_h es la desviación estándar de la altura de los edificios en el barrio local.

Esta metodología de estimación del recurso eólico se puede implementar utilizando Matlab® para obtener las predicciones de la velocidad de viento en función de la altura, en la malla de 250 m. descrita anteriormente.

4.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS AERODINÁMICOS URBANOS.

Las características aerodinámicas de las superficies urbanas se describen normalmente por los parámetros de longitud de la rugosidad (z_0) y por la altura de desplazamiento (d). Sin embargo, debido a la complejidad de las geometrías urbanas, es muy difícil estimar correctamente estos parámetros [35].

Actualmente, se pueden utilizar tres clases de métodos para estimar la rugosidad de la superficie: la clasificación de la rugosidad de Davenport [36], métodos morfométricos, que utilizan algoritmos que relacionan los parámetros aerodinámicos con propiedades geométricas de la superficie urbana, y métodos micrometeorológicos, que utilizan observaciones de viento o turbulencia en campo para obtener los parámetros aerodinámicos [35].

La Clasificación de Davenport es una clasificación del tipo de superficie basada en una variedad de valores de rugosidad de la superficie que utilizan observaciones de alta calidad [36]. Abarca una amplia gama de tipos de superficie. No es demasiado útil utilizar este método para describir la permeabilidad urbana en ciudades de alta densidad porque la mayoría de las áreas urbanas solo pueden incluirse en la Clase 8 "Chaotic. City centres" donde $z_0 \geq 2$.

En los métodos micrométricos, los parámetros aerodinámicos pueden ser obtenidos a partir de observaciones de viento estándar, colocando los instrumentos sobre una extensa superficie de hierba corta ($z_0 \sim 0,1$ m.) en condiciones neutras. En estas circunstancias, la representación de la velocidad de viento frente al logaritmo de la altura será una línea recta con intersección en z_0 y pendiente u^* [31].

En ausencia de medidas de viento, z_0 y d pueden estimarse utilizando modelos morfométricos. Estos modelos son cada vez más atractivos ya que hay más datos morfológicos y urbanos detallados que están disponibles, de los que se pueden derivar los parámetros geométricos.

Los parámetros geométricos más básicos, que se representan en la Figura 4.3.1. son la densidad de la superficie plana (λ_p), definida como la relación entre la superficie construida plana y la superficie total del terreno, y la densidad de la superficie frontal (λ_f), definida como la relación entre la superficie construida frontal y la superficie total del terreno.

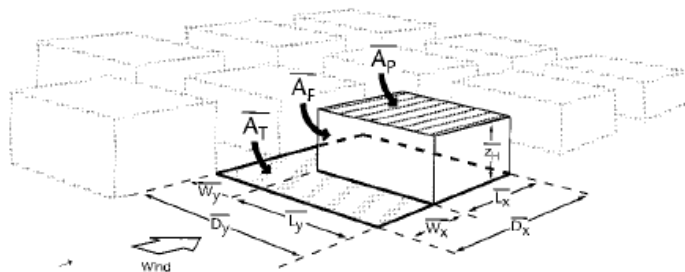


Figura 4.3.1. Definición de dimensiones de superficie utilizadas en análisis morfométricos.

Muchos modelos intentan predecir z_0 y d utilizando únicamente estos parámetros de densidad [35] aunque modelos más complejos también aceptan parámetros de entrada que especifican los anchos y profundidades de los elementos de la superficie. El reciente modelo desarrollado por **Millward-Hopkins et al.** [37] también tienen en cuenta la variabilidad en la altura de los edificios.

Los parámetros aerodinámicos estimados con modelos que no tienen en cuenta las complejidades geométricas más importantes que se encuentran en zonas urbanas reales, tales como diseños de edificios no uniformes y la variabilidad en la altura, pueden contener incertidumbres significativas [35].

Además de esto, los modelos morfométricos sólo deben aplicarse a las áreas que son de una geometría relativamente consistente en global, de lo contrario las suposiciones hechas en sus deducciones dejan de ser válidas.

Así, los parámetros aerodinámicos de los barrios con muy baja o muy alta densidad hay que estimarlos a través de otros medios a fin de dar una parametrización aerodinámica completa de las ciudades. En consecuencia, para los barrios con densidades planas (λ_p ; definida como la relación de la superficie total de cubiertas respecto al área total en una zona de un barrio) dentro del rango 0.03-0.75 utiliza el método morfométrico desarrollado, mientras que para las regiones de baja o alta densidad se asumen los siguientes valores de z_0 y d :

- (i) cuando $0,01 < \lambda_p < 0,03$, el barrio es considerado como un área de "baja densidad urbana", y por lo tanto se asume: $d/h_m = 0,35$ y $z_0/h_m = 0,06$, basado en las recomendaciones de **Grimmond and Oke** [35],
- (ii) cuando $\lambda_p < 0,01$, el número de edificios en el barrio se supone que es insignificante, y por lo tanto se asumen parámetros aerodinámicos adecuados para terreno abierto: $d=0$ y $z_0=0,14$ m [34],

- (iii) cuando $0,75 < \lambda_p < 1$, se asume el barrio consiste sobre todo en arbolado, ya que las áreas construidas muy raramente llegan a ser de tan alta densidad, y por lo tanto se asignan los parámetros aerodinámicos: $d/h=0,67$ y $z_0=1$ m, basado en los valores de [34].

Por lo tanto, generalmente las áreas urbanas se dividen mediante retículas uniformes simples de regiones de barrios, de resoluciones horizontales que van desde 150 metros a 1 km. Los modelos morfométricos se aplican entonces a estas unidades de barrio.

Para el caso concreto de la ciudad de Zaragoza se podría utilizar el modelo de **MacDonald et al.** [38]. Las estadísticas sitúan a este método en el medio de la clasificación. Tiene la ventaja de que es aplicable a toda la gama de densidades y que las estimaciones generadas son en su mayoría razonables [36].

Las expresiones para z_0 y d son las siguientes:

$$\frac{z_0}{h} = \left(1 - \frac{d}{h}\right) \exp \left\{ - \left[0.5\beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{d}{h}\right) \lambda_F \right]^{-0.5} \right\}$$

$$\frac{d}{h} = 1 + A^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)$$

donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica de un obstáculo. Se recomienda un valor de $C_D=1.2$, basado en la media cuadrática del viento sobre la cara de un cubo en el flujo de tensiones, A es un coeficiente derivado a partir de pruebas experimentales y β es un parámetro que modifica el coeficiente de resistencia a un valor más apropiado a la configuración particular de los obstáculos.

Sin embargo, no es posible determinar la magnitud de estos parámetros para cada celda del mallado. Por lo tanto, se asume que para cada celda de la malla existe una matriz cuadrada de obstáculos alineados a lo largo de la dirección del viento. Para tal disposición, **Macdonald et al.** [38] deriva valores de $\beta=0,55$ y $A=3,59$, a diferencia de $\beta=1$ y $A=4,43$ para una matriz de obstáculos escalonados. Las expresiones también dependen de tres parámetros de la morfología de los edificios, h la altura media de la construcción, λ_p la densidad de construcción (la relación entre la superficie construida plana y la superficie total del terreno) y λ_F la relación del área frontal.

4.4 METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS EN gvSIG.

Los parámetros geométricos que se pueden calcular con gvSIG son los siguientes:

λ_p : densidad de construcción = A_p/A_T

A_p : Superficie construida sobre rasante. Se obtendría según el método del Anexo 1, como para los barrios, pero en las divisiones de la retícula.

A_T : Superficie total del terreno. Sería la de la cuadrícula correspondiente.

H : altura. Estimando un valor de 3 m. por planta edificada se puede obtener la altura aproximada de cada edificio a partir de los datos del Catastro. Introduciendo estos datos de altura en las tablas de atributos se puede elaborar un MDE (Modelo Digital de Elevación) aproximado de la ciudad.

Un MDE es una forma compacta de almacenar información urbana en 3D usando una matriz 2D de valores de elevación, cada pixel representa la altura del edificio y se puede visualizar en tonos de gris como una imagen digital donde cada nivel de gris es proporcional a la altura del edificio. Se están convirtiendo en un apoyo cada vez más disponibles para describir las ciudades. Hoy cada vez hay más MDEs, de alta resolución obtenidos por teleobservación, disponibles a bajo costo como resultado de la rápida evolución de las técnicas como el LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging, es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado) o radar de apertura de malla sintética (SAR).

λ_F : densidad de superficie frontal= A_F/A_T

A_F : Superficie frontal en la dirección del viento. Se obtendría a través de un programa implementado en el módulo SEXTANTE de gvSIG para el tratamiento de imágenes ráster.

Por ejemplo: con un algoritmo que obtenga el vector unitario perpendicular a la superficie del MDE en cada pixel, que luego haga el producto escalar entre ese vector y un vector unitario en la dirección del viento lo que dará la proyección de la superficie del edificio en esa dirección. Sumando los resultados negativos de todos los pixeles obtendremos A_F .

A_T : Superficie total del terreno. Sería la de la cuadrícula correspondiente.

4.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Para evaluar la precisión de los modelos de predicción de la velocidad del viento habría que realizar campañas de medidas de velocidad de viento a partir de anemómetros situados en localizaciones de geometría urbana diferentes, cubriendo un rango amplio de tipologías de edificación, desde zonas suburbanas con edificaciones de baja altura, hasta zonas del centro de la ciudad con edificios de gran altura, que se encuentren dentro de áreas que se puedan clasificar como residenciales, comerciales, industriales, campus universitario o centro de la ciudad.

Estas mediciones tendrían que estar disponibles para un periodo de tiempo amplio (p.e. cinco años) y habría que extrapolarlas para que fueran representativas de ese período de tiempo usando un factor corrector que tenga en cuenta la variación estacional y anual de la velocidad del viento de una estación estándar de referencia.

Habría que comparar después las predicciones de velocidad de viento estimadas con el modelo con las obtenidas en campo y calcular el porcentaje de error medio, el error medio absoluto y el error residual:

$$\%Error = 100 \times \frac{1}{n} \sum \frac{|U_{pre} - U_{5yr}|}{U_{5yr}}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |U_{pre} - U_{5yr}|$$

$$Error\ resid. = U_{5yr} - U_{pre}$$

5. CONCLUSIONES.

El marco normativo y regulatorio del sector de las renovables en Europa y en el mundo está cambiando. Las políticas de fomento basadas en el pago de una prima por la generación eléctrica (Feed-in Tariff) disminuyen para sustituirse por políticas que fomentan el autoconsumo y la generación distribuida.

La implementación de instalaciones de tecnología fotovoltaica y eólica de pequeña potencia en los entornos urbanos en la modalidad de autoconsumo, es el camino para lograr aumentar la penetración de las energías renovables con un nuevo modelo energético basado en la descentralización de la producción, reduciendo así el consumo eléctrico de forma significativa.

Este trabajo inicia el estudio de la implantación de la energía minieólica y la energía fotovoltaica de pequeña potencia en la ciudad de Zaragoza. Los resultados obtenidos del potencial disponible de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas en la ciudad de Zaragoza, indican que se podría cubrir casi la totalidad del consumo eléctrico para usos domésticos, o el 58,53% del consumo eléctrico en el sector residencial, que además de los usos domésticos incluye el consumo eléctrico en Hostelería, Comercio y Servicios, Administración y otros servicios públicos.

En el proceso de cálculo se ha establecido una clasificación de los barrios en función de la “densidad de construcción” y de la “densidad de población” que implican una tipología de edificios distinta. Esta clasificación da lugar a la utilización de diferentes factores reductores en función de la tipología de barrio.

La cobertura del consumo eléctrico mediante instalaciones de energía fotovoltaica en las cubiertas depende mucho de los parámetros “densidad de construcción” y “densidad de población” que definen el barrio, es decir, de la tipología del barrio. En los barrios poco edificadas y escasamente poblados, que representan a los barrios rurales con casas unifamiliares diseminadas, la cobertura del consumo eléctrico es total llegando incluso en algunos de los barrios a producirse excedentes si se cubriera toda la superficie de tejado disponible. En los barrios con alta densidad de construcción y de población, que pueden ser considerados como representativos del centro de la ciudad, con edificios altos y muy juntos unos de otros, la cobertura del consumo eléctrico con instalaciones fotovoltaicas es menor, ya que el consumo está muy concentrado en edificios más altos, por lo que la superficie de cubierta por habitante es significativamente menor. Ejemplo de este caso es el barrio de Delicias, el más poblado de Zaragoza, en el que la cobertura del consumo eléctrico para usos domésticos solo llegaría al 57%.

Este trabajo proporciona un método para estimar con precisión la superficie de cubierta disponible para la implantación de instalaciones fotovoltaicas, así como el potencial de energía solar fotovoltaica. Los resultados de este trabajo muestran la importante contribución que, la implantación de instalaciones fotovoltaicas en las cubiertas de las edificaciones, podría tener para reducir el consumo eléctrico en los entornos urbanos.

Para mejorar la precisión de los valores obtenidos habría que tener en cuenta las diferentes tipologías de cubierta, su inclinación y su orientación, para ajustar y optimizar la posición de los módulos fotovoltaicos. También se podría hacer un análisis más completo de los coeficientes reductores para mejorar la fiabilidad de los resultados.

Hay que tener en cuenta que para acoplar las curvas de demanda y generación en el tiempo será necesario utilizar un sistema de acumulación, una modalidad de autoconsumo con balance neto u otras fuentes de energía que cubran la demanda cuando no sea posible aprovechar el recurso solar.

En este trabajo se establece un procedimiento para el cálculo de parámetros geométricos urbanos con la herramienta informática gvSIG, que son también la base para desarrollos futuros de estimación de recurso eólico urbano, la elaboración del atlas eólico urbano de Zaragoza y la búsqueda del emplazamiento óptimo de aerogeneradores de pequeña potencia en la ciudad.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Gobierno de España. Estadística de la Industria de Energía Eléctrica 2011. Estadísticas eléctricas anuales. Publicaciones estadísticas. Estadísticas y balances energéticos. Energía.
<http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Publicaciones/ElectricasAnuales/Paginas/ElectricasAnuales.aspx>
- [2] Guía sobre tecnología minieólica. 2012. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid.
- [3] Small Wind Word Report 2013. Word Wind Energy Association.
- [4] Global Market Outlook. For photovoltaics 2013-2017. European Photovoltaic Industry Association. 2013.
- [5] Evolución de la Industria Fotovoltaica en España, Regulación y Nuevos Negocios Paralelos. Collado E, Castro M, Colmenar A, Carpio J, Peire J. 2007. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control. UNED
- [6] Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [7] Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [8] Real Decreto-ley 14/2010, de 23 de diciembre, por el que se establecen medidas urgentes para la corrección del déficit tarifario del sector eléctrico. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [9] Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos. Jefatura del Estado.
- [10] Directiva 2009/28/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.
- [11] Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011–2020. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [12] Plan de Energías Renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2011.
- [13] Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [14] Hacia nuevos modelos de desarrollo para la Energía Solar Fotovoltaica. Unión Española Fotovoltaica. Informe Anual 2013.
- [15] Directiva 2010/31/UE del Parlamento europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- [16] Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. Julieta Schallenberg-Rodríguez. 2013.
- [17] Potential for building integrated photovoltaics. Gutschner M, Nowak S, Toggweiler P. IEA-PVPS Task 2002;7.
- [18] Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: application to Piedmont Region (Italy). Bergamasco L, Asinari P. 2011.

- [19] A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. Izquierdo S, Rodrigues M, Fueyo N. Solar. 2008.
- [20] Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). J. Ordóñez, E. Jadraque, J. Alegre, G. Martínez. 2010.
- [21] Sede electrónica de la Dirección General del Catastro. Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. Gobierno de España. <http://www.sedecatastro.gob.es/>
- [22] Observatorio Municipal de Estadística. Ayuntamiento de Zaragoza. <http://www.zaragoza.es/ciudad/>
- [23] Solar Generation 6. Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World. 2011. European Photovoltaic Industry Association.
- [24] Evaluación del potencial de energía solar térmica y fotovoltaica derivado del cumplimiento del código técnico de edificación. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. 2011.
- [25] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [26] Consumo de energía y emisión de CO₂ en Zaragoza. Agencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza. http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/energia/consumo_energia.htm
- [27] Potencial for building integrated photovoltaics. A study for Sweden. Elisabeth Kjellsson.
- [28] Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for Greater London, UK. D.R. Drew, J. F. Barlow, T. T. Cockerill. 2013.
- [29] Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale. A review of methods of estimating urban wind resource. Sara Louise Walker. 2011.
- [30] Wind Resource Estimation. An Overview. Lars Landberg, Lisbeth Myllerup, Ole Rathmann, Erik Lundtang Petersen, Bo Hoffmann Jørgensen, Jake Badger and Niels Gylling Mortensen. 2003.
- [31] Estimating the wind resource in an urban area: A case study of micro-wind generation potential in Dublin, Ireland. Keith M. Sunderland, Gerald Mills, Michael F. Conlon. 2013.
- [32] Mapping the wind resource over UK cities. J.T. Millward-Hopkins, A.S. Tomlin, L. Mab, D.B. Ingham, M. Pourkashanian. 2013.
- [33] Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model. J.T. Millward-Hopkins, A.S. Tomlin, L. Ma, D.B. Ingham, M. Pourkashanian. 2013.
- [34] Small-scale wind energy Technical Report. Met Office. 2008.
- [35] Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. C. S. B. Grimmond, T. R. Oke. 1999.
- [36] New revision of Davenport roughness classification. Jon Wieringa, Alan G. Davenport, C. Sue B. Grimmond, Tim R. Oke. 2000.
- [37] Aerodynamic parameters of a UK city derived from morphological data. J.T. Millward-Hopkins, A.S. Tomlin, L. Ma, D.B. Ingham, M. Pourkashanian. 2011.
- [38] An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. R. W. Macdonald, R. F. Griffiths, D. J. Hall. 1998.

ANEXO I. OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE CONSTRUIDA SOBRE RASANTE EN LOS DISTRITOS MUNICIPALES Y BARRIOS RURALES DE ZARAGOZA.

El término municipal de Zaragoza alberga la ciudad de Zaragoza y 14 núcleos de población rural. Se divide administrativamente en 15 distritos; de ellos, 14 son urbanos y un distrito rural que se subdivide, a su vez, en 14 Barrios Rurales.

A continuación se describe el método de obtención de la superficie construida sobre rasante para cada uno de los distritos municipales y barrios rurales, a partir de cartografía en formato Shapefile que proporciona el Catastro y la cartografía base del municipio de Zaragoza en formato WMS que proporciona la Infraestructura de Datos Espaciales de Zaragoza (IDEZAR) del Ayuntamiento de Zaragoza.

Obtención de mapas

La Dirección General del Catastro ofrece el uso público y completamente gratuito del servicio de descarga de cartografía catastral en formato Shapefile para cualquier municipio del territorio español.

La cartografía catastral que se puede descargar de la Sede Electrónica del Catastro -SEC- está constituida por un conjunto de capas y de tablas en formato shapefile @ESRI.

El formato shapefile es un formato vectorial para almacenamiento de datos espaciales donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. Para visualizarlo, editarlo o convertirlo a otros formatos existen programas gratuitos y comerciales.

El formato puede estar compuesto por un número variable de ficheros, pero como mínimo tiene que tener tres con extensiones shp, shx y dbf. El que distribuye la Dirección General del Catastro -DGC- está compuesto además de por los anteriores, por la extensión prj. Los cuatro se describen a continuación:

- El fichero .shp almacena la información geométrica de los objetos. Puede contener puntos, líneas o polígonos y cada vértice lleva implícitas sus coordenadas en un sistema de referencia concreto, que se establece en el fichero .prj. Es un fichero en formato binario y para su visualización se precisa de alguna aplicación que sea capaz de visualizar los puntos o las líneas que los constituyen; o bien conocer la composición interna del fichero para que mediante un programa poder visualizarlo.
- El fichero .shx contiene los índices de los elementos geométricos del fichero
- El fichero .dbf es una tabla de datos estructurados en formato dBase3 en la que se registran los atributos asociados a cada elemento geométrico del archivo .shp.
- El fichero .prj es un archivo de texto (ASCII, se puede consultar con un editor de texto) que almacena información sobre el sistema de referencia en que están las coordenadas del fichero .shp. Mediante este archivo podemos situar cada elemento en su posición sobre el terreno.

La estructura de capas del fichero shapefile descargado es copia de la estructura interna del sistema de información geográfica catastral. La capa CONSTRU contiene las subparcelas urbanas que representan los volúmenes edificados dentro de una parcela y es de la que se obtendrá la superficie construida sobre rasante.

Por otro lado, siguiendo la directiva europea de INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe), el Ayuntamiento de Zaragoza ofrece la información urbana del municipio de Zaragoza siguiendo las especificaciones del estándar WMS (Web Map Service) definido por OGC (Open Geospatial Consortium).

Un WMS es un servicio web que produce mapas de datos referenciados espacialmente en formato ráster (imagen digital), de forma dinámica a partir de información geográfica. Estos mapas se pueden visualizar desde cualquier cliente de visualización o herramienta GIS que sea capaz de acceder a un WMS estándar.

De los servicios de mapas disponibles en la Infraestructura de Datos Espaciales de Zaragoza (IDEZAR) será útil la Cartografía base del municipio de Zaragoza. (Datos cartográficos suministrados por el Servicio de Información Geográfica del Ayuntamiento de Zaragoza)

WMS Estándar: http://idezar.zaragoza.es/wms/IDEZar_base/IDEZar_base

En ella están contenidas tres capas que serán útiles: el “Término municipal de Zaragoza” que sirve de capa base, una capa de “Distritos” que contiene la delimitación de los distintos distritos municipales y Barrios Rurales, y una tercera capa de “Etiquetas de Distritos”.

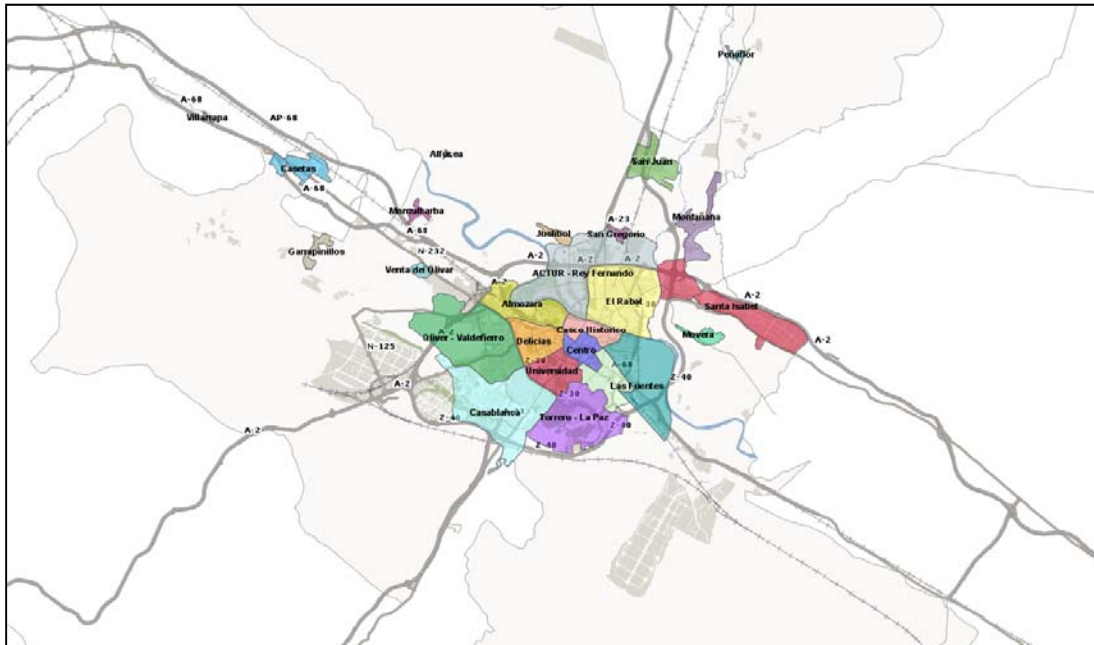


Figura A1.1. Visualización de IDEZAR WMS Estándar.

Edición en gvSIG

Para poder visualizar, editar y obtener información de estos mapas se recurre a la herramienta informática gvSIG.

gvSIG es un proyecto de desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en software libre que fue desarrollado por el gobierno local de la Comunidad Valenciana de España, con el objetivo inicial de realizar la gestión de datos geográficos de esa colectividad; precisamente la sigla gvSIG abrevia la denominación *Generalitat Valenciana Sistema de Información Geográfica*.

gvSIG Desktop es un programa informático para el manejo de información geográfica con precisión cartográfica que se distribuye bajo licencia GNU GPL v2. Permite acceder a información vectorial y rasterizada así como a servidores de mapas que cumplan las especificaciones del OGC. Esta es una de las principales características de gvSIG respecto a otros Sistema de Información Geográfica, la importante implementación de servicios OGC: WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service), Servicio de Catálogo y Servicio de Nomenclátor.

gvSIG es una herramienta SIG potente, muy completa y capaz de manejar información geográfica en sus formatos más habituales e integrar datos de distintas procedencias, tanto locales como remotas.

Se crea un proyecto nuevo con gvSIG, y dentro de éste una vista nueva. En ella se crea una capa para el mapa vectorial procedente del catastro con la capa CONSTRU, y otra capa en remoto a través de WMS con el mapa ráster que contiene las capas “Término Municipal de Zaragoza”, “Distritos” y “Etiquetas de Distritos”. Todas las capas se añaden a la vista con el

Sistema de Coordenadas de Referencia (CRS) **EPSG 25830** que corresponde al Sistema de Referencia ETRS89 y la proyección cartográfica UTM con Huso 30.

El sistema de referencia ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) es un sistema ligado a la parte estable de la placa continental europea y se ha adoptado para evitar variaciones en las coordenadas provocadas por la deriva continental. Su elipsoide asociado es el GRS80. Es el nuevo sistema oficial en nuestro país, según estableció el RD 1071/2007, de 27 de julio, y a él debe referirse la cartografía española.

Los mapas vectoriales son proporcionados por el Catastro en el sistema de referencia EPSG 25830 y el WMS de IDEZAR produce mapas en este sistema de referencia.

De esta forma se pueden visualizar en gvSIG ambos mapas solapados con las capas descritas anteriormente, tal y como se observa en la Figura A1.2.

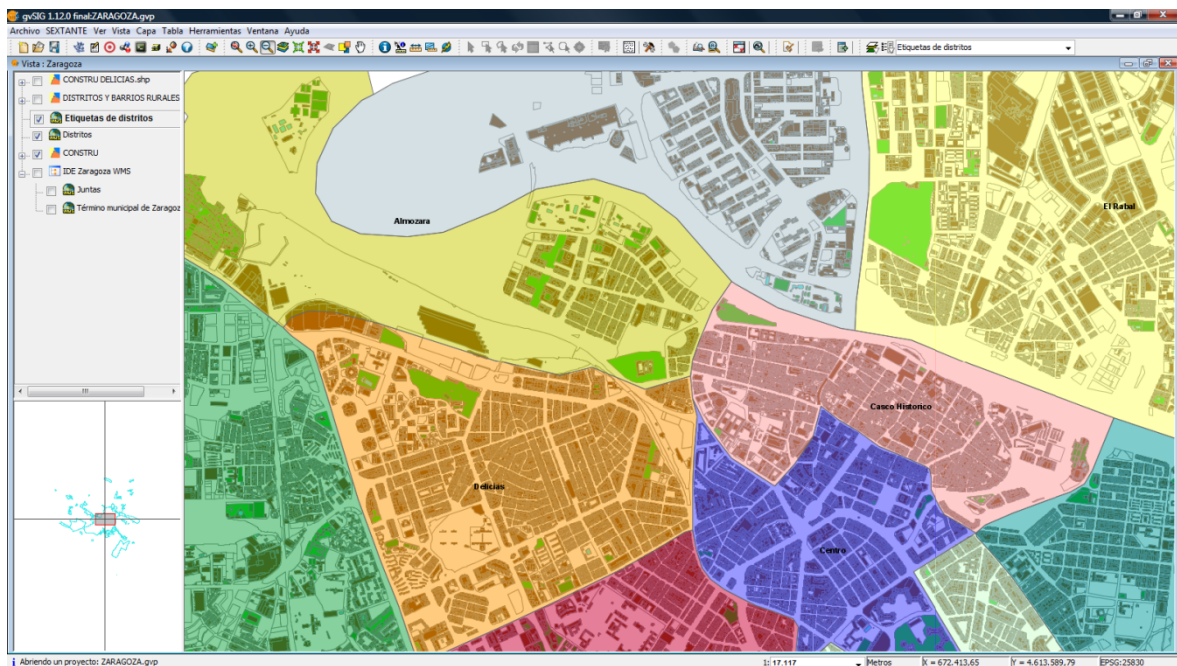


Figura A1.2. Visualización en gvSIG de cartografía catastral y capa de distritos de WMS de IDEZAR.

La capa de “Distritos” que produce el servicio WMS de IDEZAR contiene información incompleta, ya que en ella están unificados los distritos de Oliver-Valdefierro y Miralbueno en uno único, y además los barrios rurales están delimitados únicamente en su zona urbana y no en toda su extensión, por lo que no es una capa válida con la que después se pueda trabajar.

Para solucionar esto se recurre al mapa de juntas de 2012 proporcionado por la sede electrónica del Ayuntamiento de Zaragoza, a través del Observatorio Municipal de Estadística.

Dicho mapa se puede descargar en el formato editable kml (Keyhole Markup Language) y visualizar en gvSIG. Es proporcionado con el Sistema de Coordenadas de Referencia (CRS) **EPSG 4326** que corresponde al Sistema de Referencia WGS84 y la proyección cartográfica en coordenadas geográficas.

El sistema de referencia WGS84 (World Geodetic System 1984) es un sistema utilizado por la tecnología GPS. Su elipsoide asociado es el WGS84, cuyas características son:

- Semieje mayor: $a = 6.378.137\text{m}$
- Aplanamiento: $(a-b)/a = 1/298,257223563$

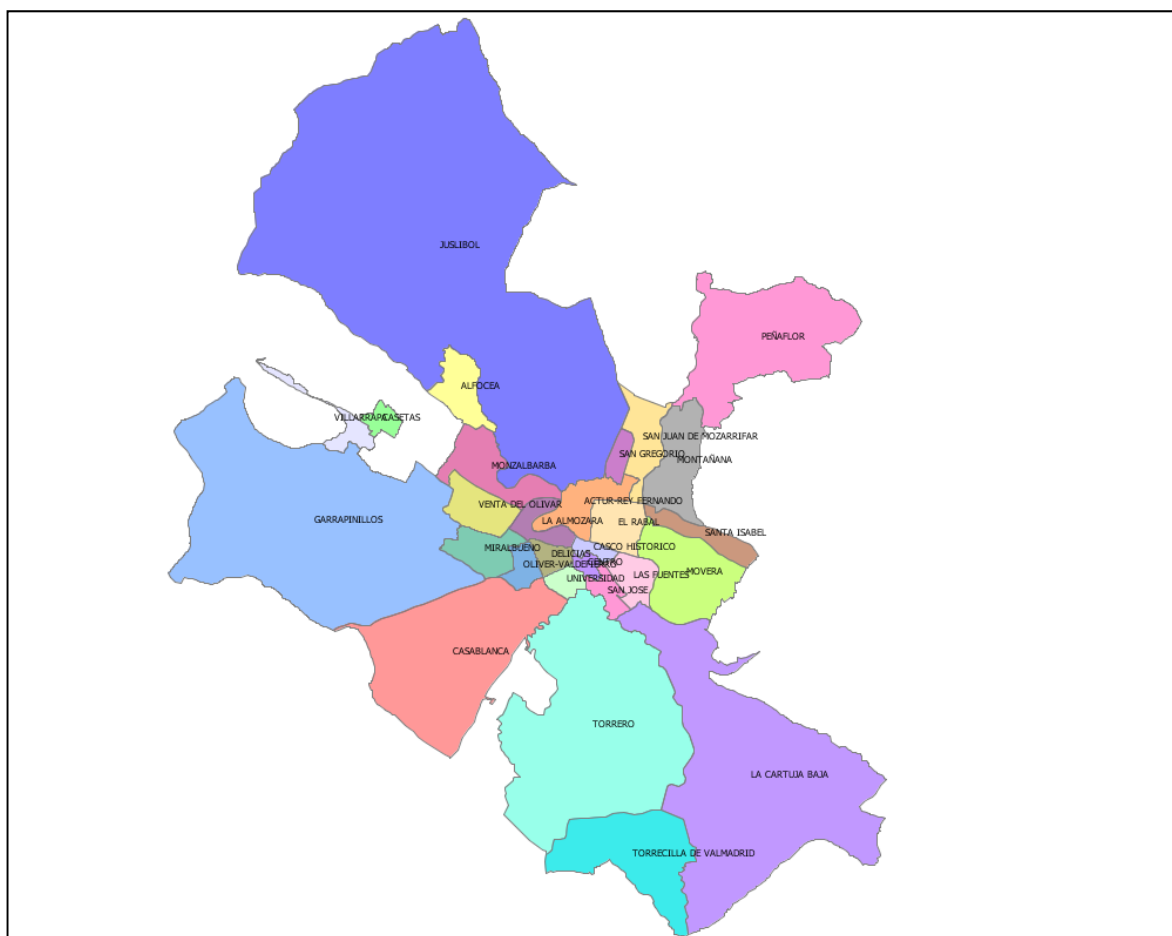


Figura A1.3. Visualización en gvSIG de la nueva capa vectorial “DISTRITOS AYT0 ZGZA”.

Para incorporar este mapa al proyecto de gvSIG es necesario que todas las capas que lo componen estén en el mismo sistema de coordenadas de referencia, por lo que es necesario reproyectarla al CSR ESPG 25830 para poder cargarla correctamente en el proyecto.

Una vez reproyectada ya podemos visualizarla junto con la capa CONSTRU del Catastro y la capa base “Término Municipal de Zaragoza” proporcionada por el WMS del Ayuntamiento de Zaragoza.

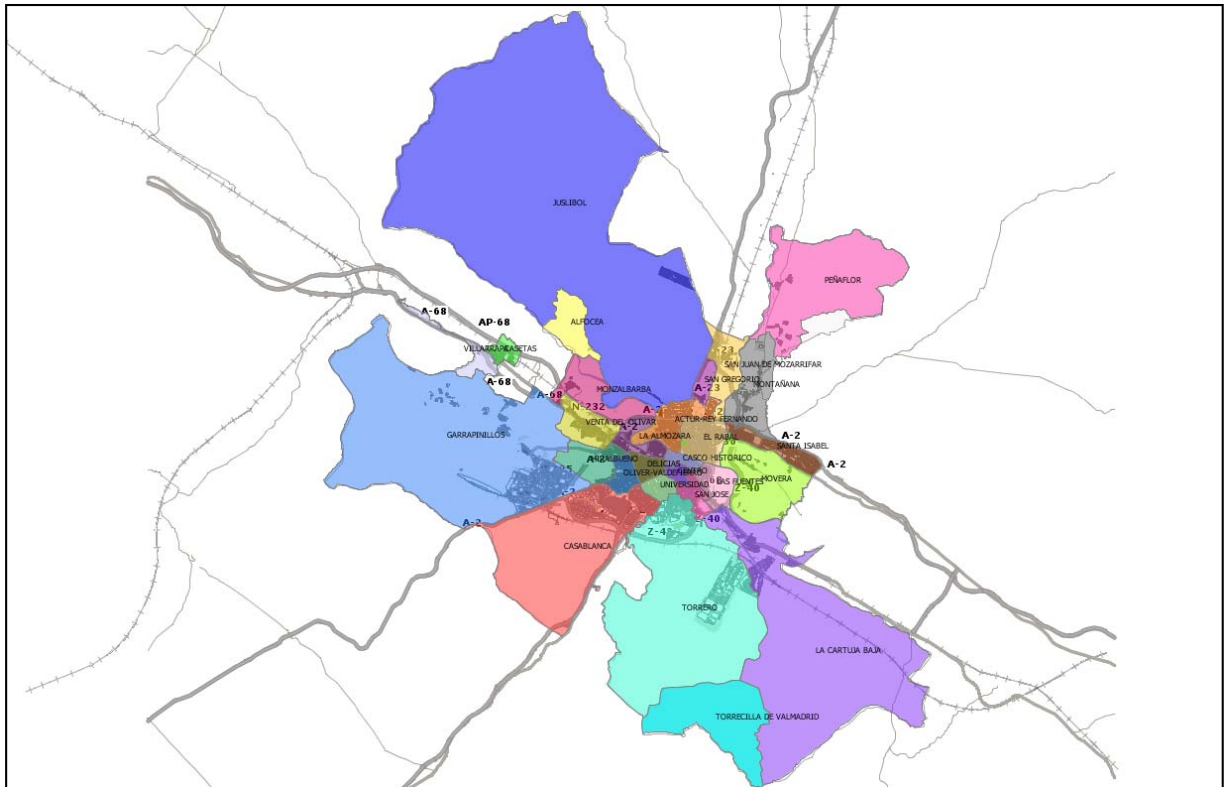


Figura AI.4. Visualización en gvSIG de las tres capas superpuestas: “CONSTRU” (Catastro), “DISTRITOS AYTO ZGZA” y “Término Municipal de Zaragoza” (WMS IDEZAR).

Análisis en gvSIG y resultados

El análisis espacial es una de las funciones esenciales de los Sistemas de Información Geográfica y consiste en generar nueva información, o en extraer la información no evidente que los datos geográficos contienen, mediante procesos realizados entre variables de la misma o distintas capas.

De las herramientas de análisis de información en formato vectorial que incorpora gvSIG en su “Gestor de Geoprocesos” nos será útil, dentro del análisis de solape, la herramienta “Recortar”.

Este geoproceto permite limitar el ámbito de trabajo de una capa vectorial (da igual que sea de puntos, líneas o polígonos), extrayendo de ésta una zona de interés.

Para ello, hay que proporcionar una capa de entrada (la capa de la que se quiere extraer una zona, que en este caso será la capa “CONSTRU”) y una capa de recorte (la capa “DISTRITOS AYO ZGZA” con el elemento que queremos recortar seleccionado), de forma que la unión de las geometrías incluidas en la capa de recorte definirán el ámbito de trabajo.

El geoproceso recorrerá todos los elementos vectoriales de la capa de entrada (features), y para aquellos que estén contenidos en el ámbito de trabajo definido por la capa de recorte, calculará sus intersecciones, de forma que en la capa resultado solo estarán los elementos vectoriales de nuestro ámbito de interés. La porción de geometría que quede fuera del ámbito de trabajo será recortada.

El esquema alfanumérico de la capa de entrada se mantiene intacto.

Este Geoproceso es de gran utilidad para limitar nuestro ámbito de trabajo a las zonas concretas de los distritos y barrios rurales, porque toda la cartografía disponible es de carácter general.

Así se obtendrán, para cada uno de los distritos y barrios rurales, una nueva capa con la superficie construida a través de la capa “CONSTRU” del Catastro.



Figura AI.5. Visualización en gvSIG de la nueva capa "Casco Historico CONSTRU"

La tabla de atributos asociada a la capa CONSTRU del Catastro contiene los siguientes campos:

Tabla: CONSTRU

Descripción: Subparcelas de construcción

<u>NOMBRE CAMPO</u>	<u>TIPO DATO</u>	<u>LONGITUD</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
NINTERNO	NUMBER	10	Numero secuencial asignado por el sistema
MAPA	NUMBER	6	Numero del mapa al que pertenece el elemento
DELEGACIO	NUMBER	2	Código de Delegación de Hacienda
MUNICIPIO	NUMBER	3	Código del Municipio
MASA	VARCHAR2	5	Manzana urbana (o polígono rústico) a la que pertenece el elemento
HOJA	VARCHAR2	7	Posiciones 8 a 14 de la referencia catastral (urbana) o código de sector (rústica)

PARCELA	VARCHAR2	5	Código de parcela, dentro de la Manzana o polígono
REFCAT	VARCHAR2	14	Referencia catastral de la parcela
CONSTRU	VARCHAR2	16	Rótulo con las alturas construidas. Véase anexo con códigos de construcción
TIPO	CHAR	1	Tipo de parcela (U, D, R)
COORX	NUMBER	9	Coordenada X del centroide (un punto interior a la construcción)
COORY	NUMBER	10	Coordenada Y del centroide
NUMSYMBOL	NUMBER	2	Símbolo con el que se dibuja (para sombreados de colores)
AREA	NUMBER	10	Superficie del elemento en metros cuadrados
FECHAALTA	NUMBER	8	Fecha de dibujo del elemento gráfico
FECHABAJA	NUMBER	8	Fecha de borrado del elemento Gráfico

De los cuales, los que proporcionan la información necesaria para calcular la superficie construida sobre rasante son el campo CONSTRU y el campo AREA.

La nomenclatura utilizada en el campo CONSTRU para definir los atributos de las construcciones es la siguiente:

I, II: Volúmenes sobre rasante (1, 2 alturas)

B: Balcón

T: Tribuna (balcón techado)

TZA: Terraza

POR: Porche

SOP: Soportal

PJE: Pasaje

MAR: Marquesina

P: Patio

CO: Cobertizo

EPT: Entreplanta

SS: Semisótano

ALT: Altillo

PI: Piscina

TEN: Pista de Tenis

ETQ: Estanque

SILO: Silo

SUELO: Suelo vacante, sin construir. También se puede utilizar el sinónimo TERRENY.

PRG: Pérgola

DEP: Depósito

ESC: Escalera

TRF: Transformador

JD: Jardín

YJD: Jardín que se valora

FUT: Campo de Fútbol

VOL: Voladizo

ZD: Zona Deportiva

RUINA: Ruinas

CONS: En construcción

PRESA: Cuerpo de presa en embalses

ZBE: Balsas y estanques que se valoran

ZPAV: Obras de urbanización interior

GOLF: Campo de GOLF

CAMPING: Camping

TERRENY: Sinónimo de SUELO

HORREO: Hórreo, panera, cabazo.

PTLAN: Pantalán (embarcadero de pequeño porte, soportado por pilotes y a veces móvil). Se utilizará este código particularmente para los puntos de amarre de puertos deportivos. Un muelle se codificará con el código genérico ZPAV.

DARSENA: Dársena, aguas resguardadas artificialmente por un puerto.

Para codificar un atributo de subparcela que esté compuesto por varios elementos de la nomenclatura anterior, se hará uniendo estos códigos, en sentido ascendente, con el signo (+).

Ejemplo: -II+IV+TZA

La superficie construida sobre rasante de cada distrito y barrio rural se obtiene realizando una selección de datos dentro de la capa CONSTRU para cada uno de ellos (p.e. Casco Histórico CONSTRU).

Las herramientas de selección incluidas en gvSIG permiten realizar consultas sobre la información contenida en las capas activas, imponiendo condiciones a los valores de sus atributos y visualizando solamente los elementos que cumplan esas condiciones. Hay dos modos de efectuar una selección en gvSIG: por consultas gráficas (sobre la vista) y por consultas alfanuméricas (sobre la tabla de atributos).

La superficie construida sobre rasante se obtendrá haciendo una selección de datos, sobre la tabla de atributos, aplicando la herramienta "filtro". De esta manera se seleccionarán todas aquellas parcelas que no sean zonas verdes, ni zonas deportivas, ni suelo, ni láminas de agua, ni superficies construidas bajo rasante, ni áreas en construcción o en obras de urbanización interior, aplicando a la tabla de atributos el siguiente filtro:

```
CONSTRU <> '-1' and CONSTRU <> '-1+P' and CONSTRU <> '-2' and CONSTRU
<> '-2+P' and CONSTRU <> '-3' and CONSTRU <> '-I' and CONSTRU <> '-I+DEP'
and CONSTRU <> '-I+JD' and CONSTRU <> '-I+P' and CONSTRU <> '-I+PI' and
CONSTRU <> '-I+YJD' and CONSTRU <> '-I+ZD' and CONSTRU <> '-I+TEN' and
CONSTRU <> '-I+ZPAV' and CONSTRU <> '-II' and CONSTRU <> '-II+JD' and
CONSTRU <> '-II+P' and CONSTRU <> '-II+ZD' and CONSTRU <> '-II+ZPAV' and
```

CONSTRU <> '-III' and CONSTRU <> '-III + P' and CONSTRU <> '-III+JD' and
 CONSTRU <> '-III+P' and CONSTRU <> '-III+ZD' and CONSTRU <> '-III+ZPAV' and
 CONSTRU <> '-IV' and CONSTRU <> '-IV+P' and CONSTRU <> '-V' and
 CONSTRU <> '-VI' and CONSTRU <> '-VI+P' and CONSTRU <> '-VII' and
 CONSTRU <> 'ACEQUIA' and CONSTRU <> 'DEP' and CONSTRU <> 'FUT' and
 CONSTRU <> 'ETQ' and CONSTRU <> 'JD' and CONSTRU <> 'P' and CONSTRU
 <> 'PI' and CONSTRU <> 'SUELO' and CONSTRU <> 'TEN' and CONSTRU <>
 'YJD' and CONSTRU <> 'ZBE' and CONSTRU <> 'ZD' and CONSTRU <> '?' and
 CONSTRU <> 'ZPAV' and CONSTRU <> 'CONS'

Que seleccionará de la tabla de atributos todas aquellas parcelas con superficie construida sobre rasante. Exportando esta tabla a formato Excel se podrá realizar la suma del campo AREA de todos los elementos seleccionados y así obtener la superficie construida sobre rasante de cada distrito y barrio rural.

Si se exporta la capa con la selección de datos realizada, se obtiene una nueva capa que mantendrá la estructura de la original (los mismos campos) pero en la que solo figuran los elementos que se han seleccionado.

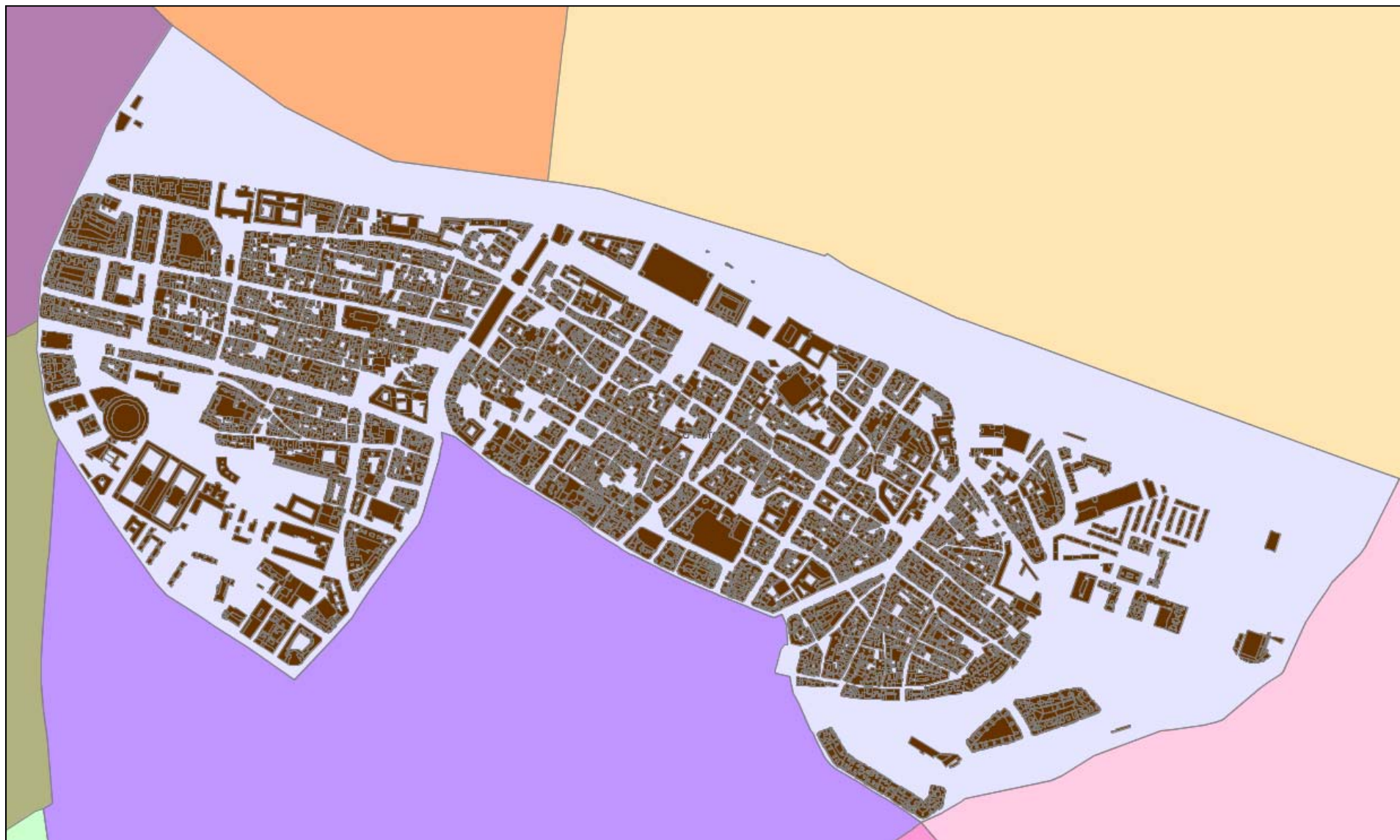


Figura A1.6. Visualización en gvSIG de la superficie construida sobre rasante del Casco Histórico.

La superficie construida sobre rasante obtenida de la tabla de atributos es de: **793.874,03 m²**.

ANEXO II. MAPAS DE LA SUPERFICIE CONSTRUIDA SOBRE RASANTE EN LOS DISTRITOS MUNICIPALES Y BARRIOS RURALES DE ZARAGOZA.

CASCO HISTÓRICO



Superficie construida sobre rasante: 793.874,03 m²

CENTRO



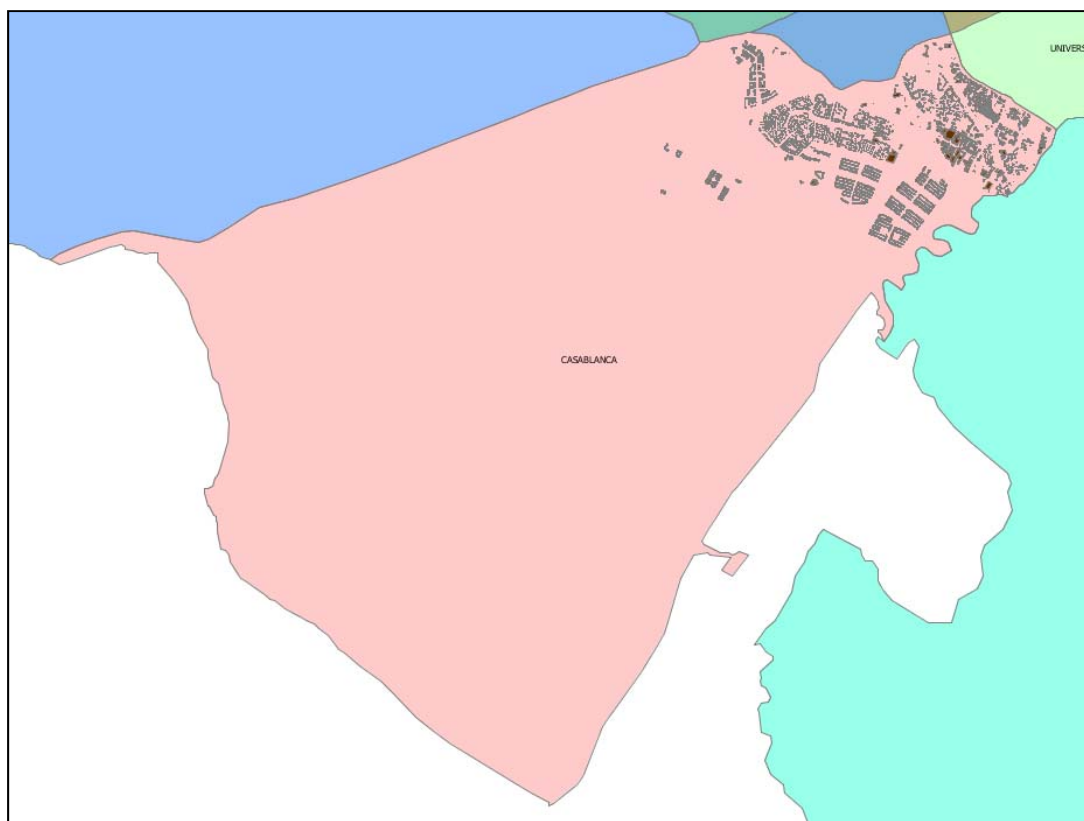
Superficie construida sobre rasante: 857.105,51 m²

DELICIAS



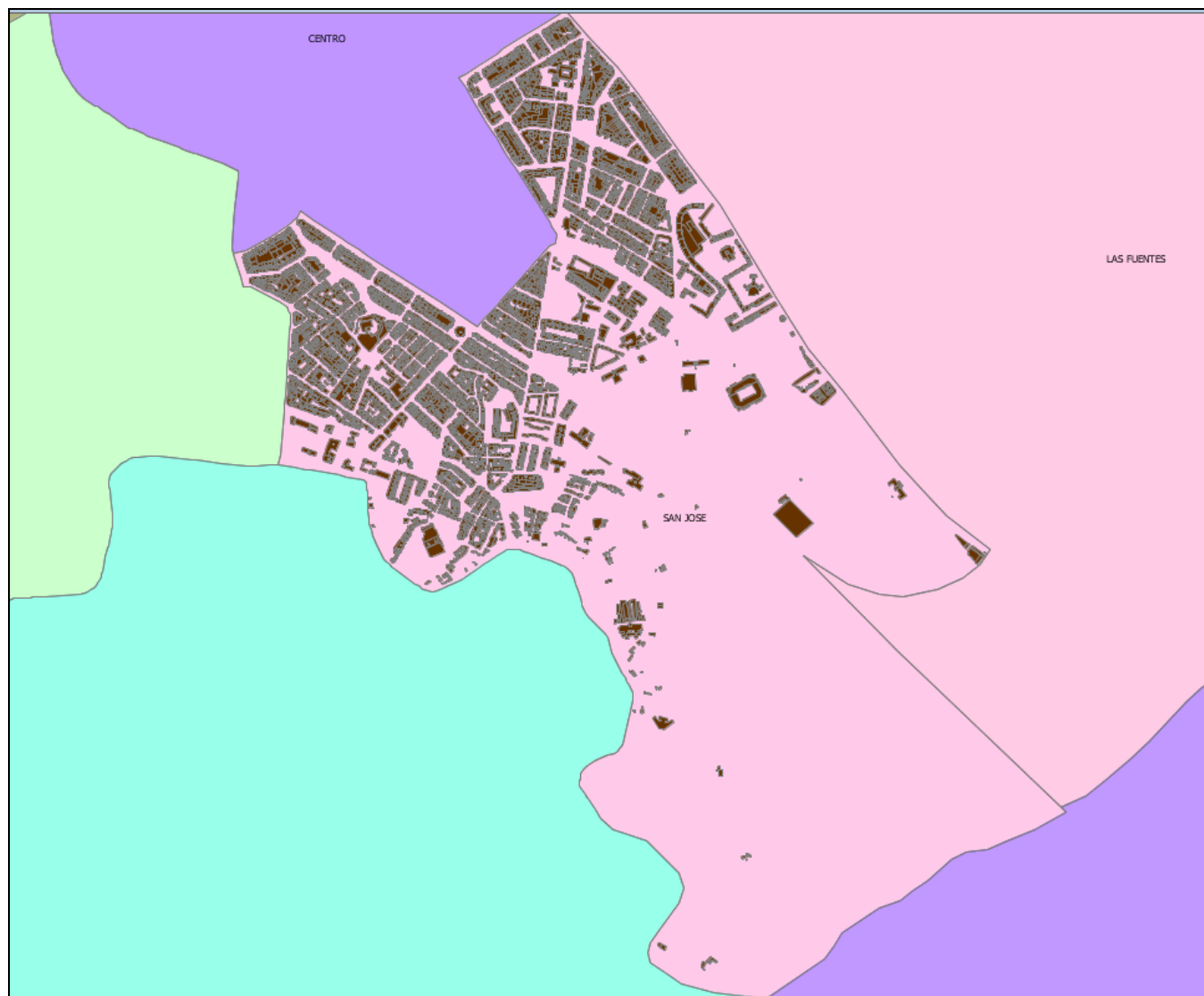
Superficie construida sobre rasante: 1.214.154,44 m²

CASABLANCA



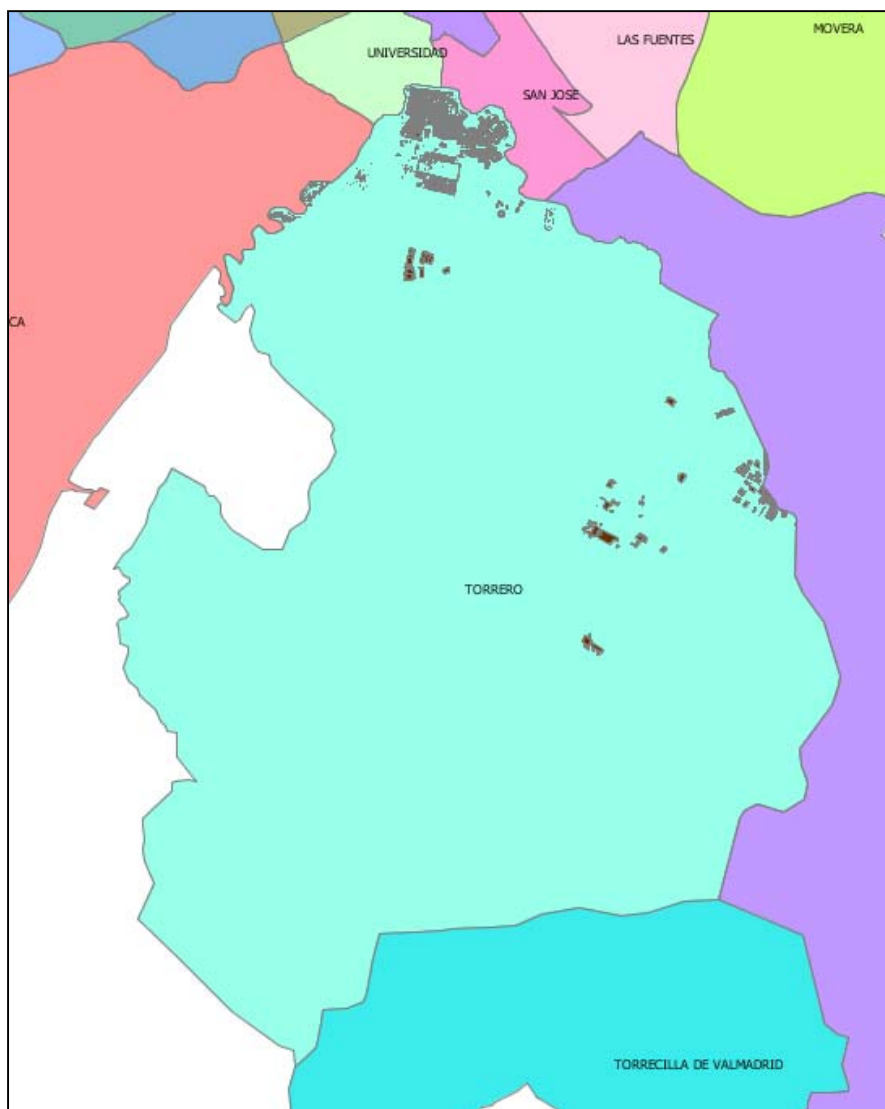
Superficie construida sobre rasante: 905.735,59 m²

SAN JOSÉ



Superficie construida sobre rasante: 761.086,22 m²

TORRERO



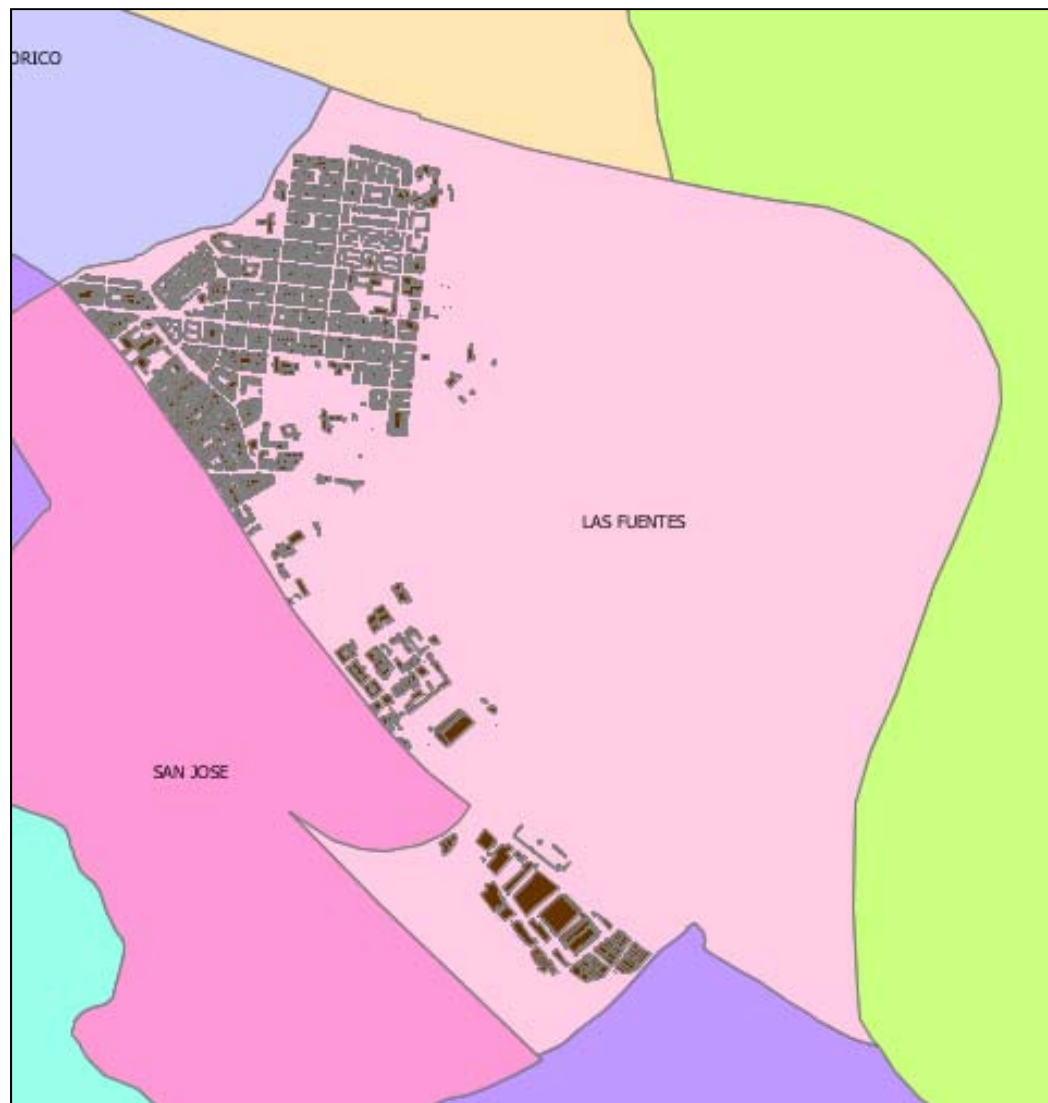
Superficie construida sobre rasante: 1.070.746,98 m²

UNIVERSIDAD



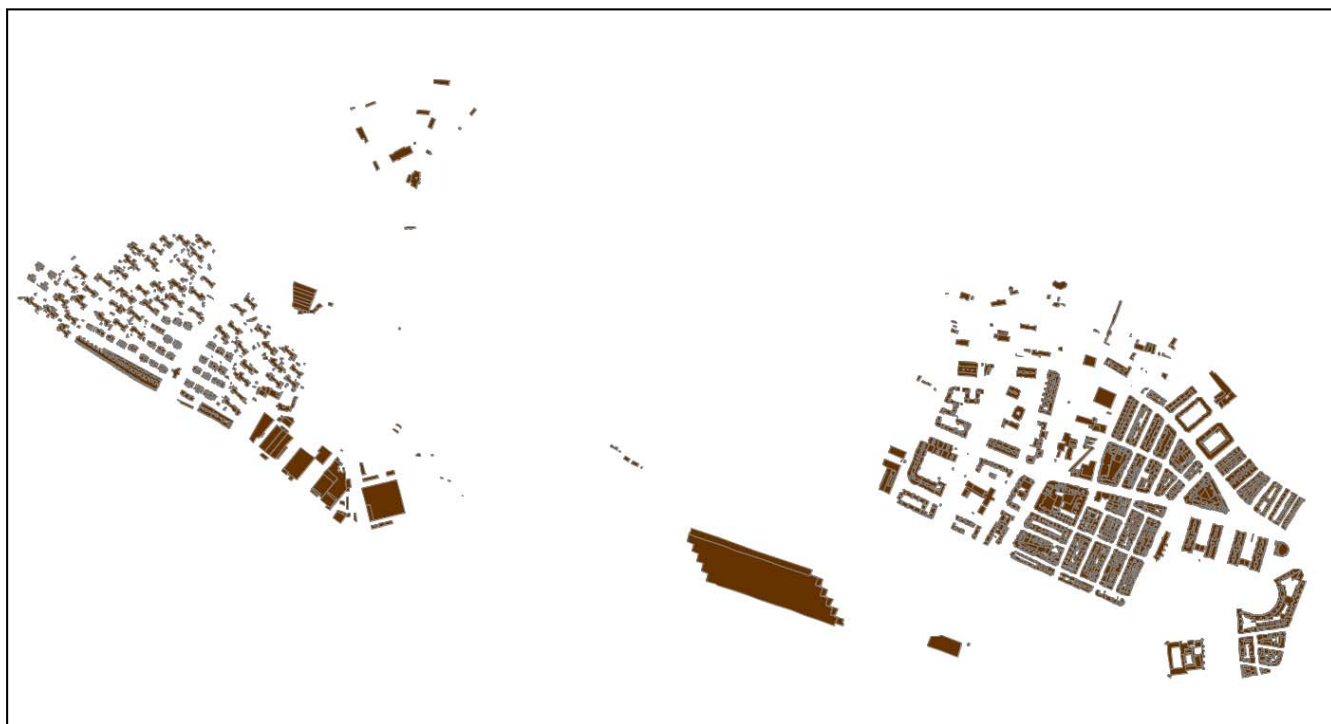
Superficie construida sobre rasante: 831.769,56 m²

LAS FUENTES



Superficie construida sobre rasante: 590.448,93 m²

LA ALMOZARA



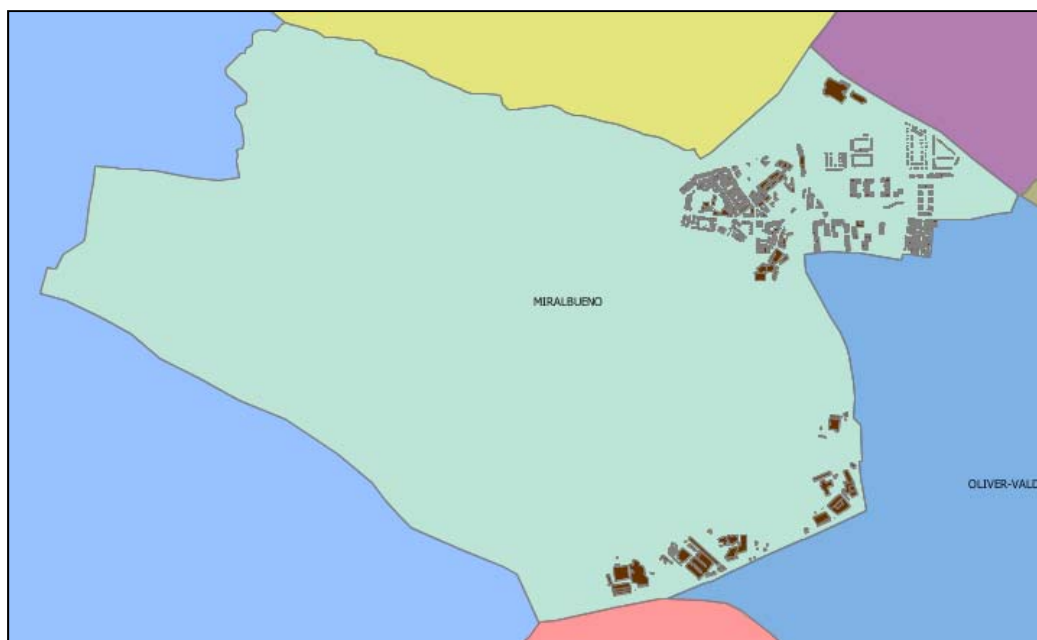
Superficie construida sobre rasante: 410.595,80 m²

OLIVER-VALDEFIERRO



Superficie construida sobre rasante: 816.624,27 m²

MIRALBUENO



Superficie construida sobre rasante: 246.184,33 m²

ACTUR-REY FERNANDO



Superficie construida sobre rasante: 920.855,43 m²

EL RABAL



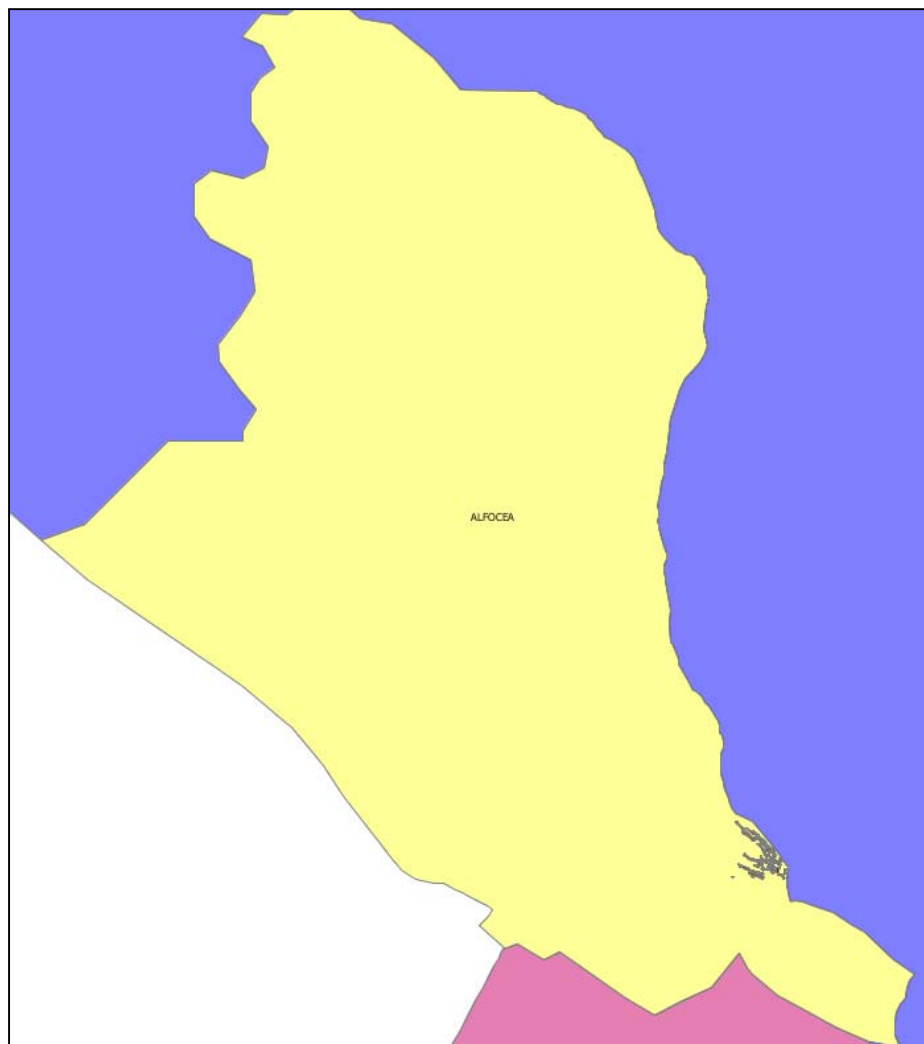
Superficie construida sobre rasante: 1.705.124,25 m²

SANTA ISABEL



Superficie construida sobre rasante: 1.604.011,29 m²

ALFOCEA



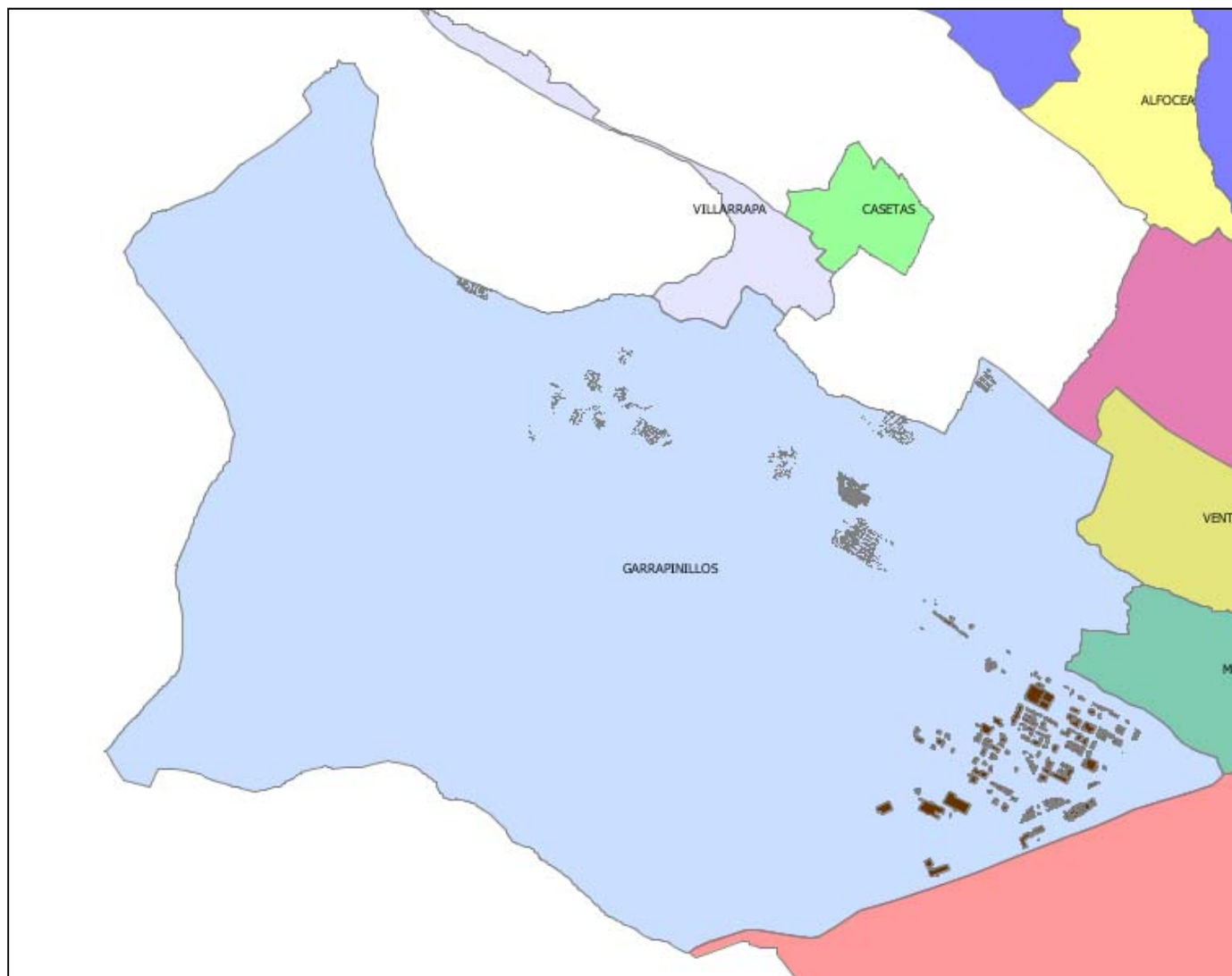
Superficie construida sobre rasante: 10.467,20 m²

CASETAS



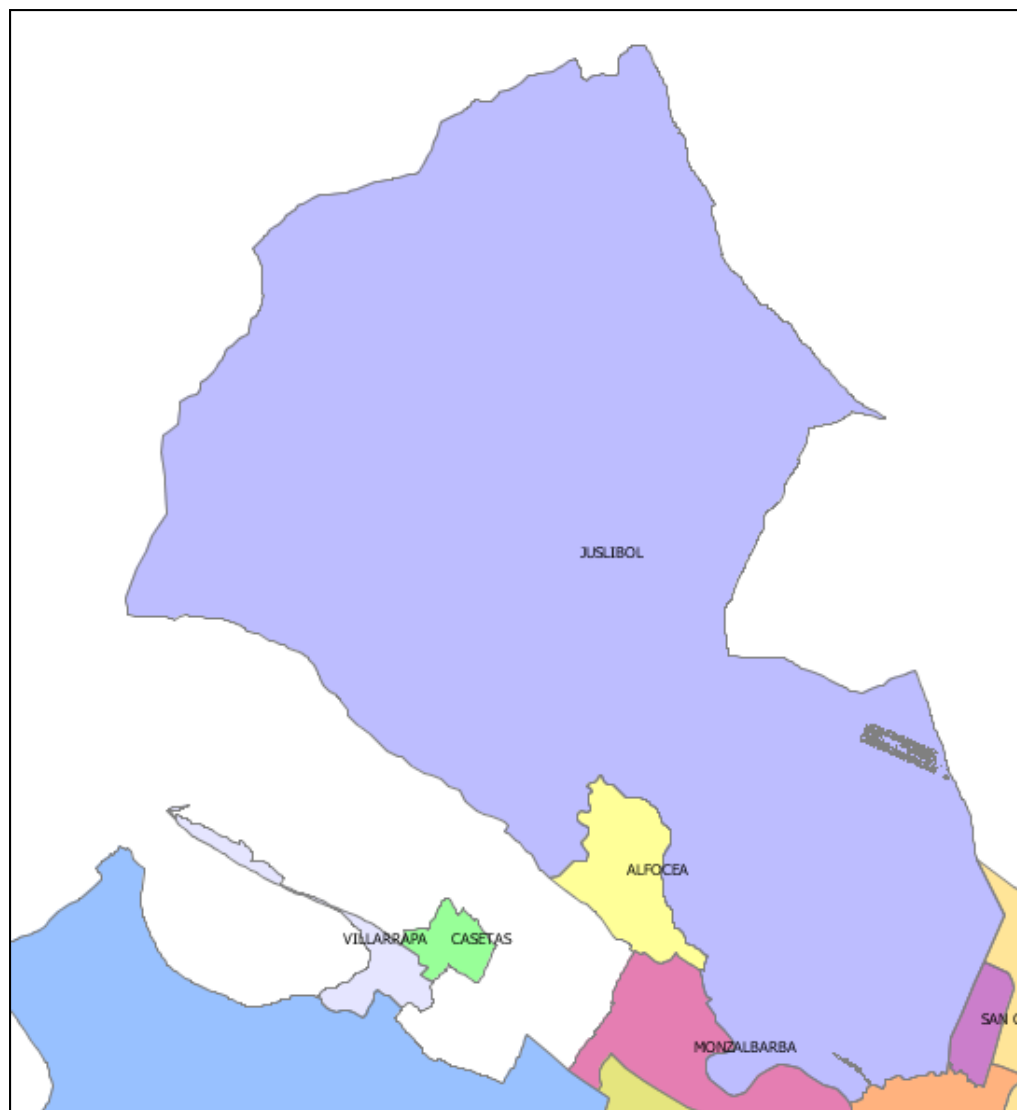
Superficie construida sobre rasante: 283.548,17 m²

GARRAPINILLOS



Superficie construida sobre rasante: 1.502.632,44 m²

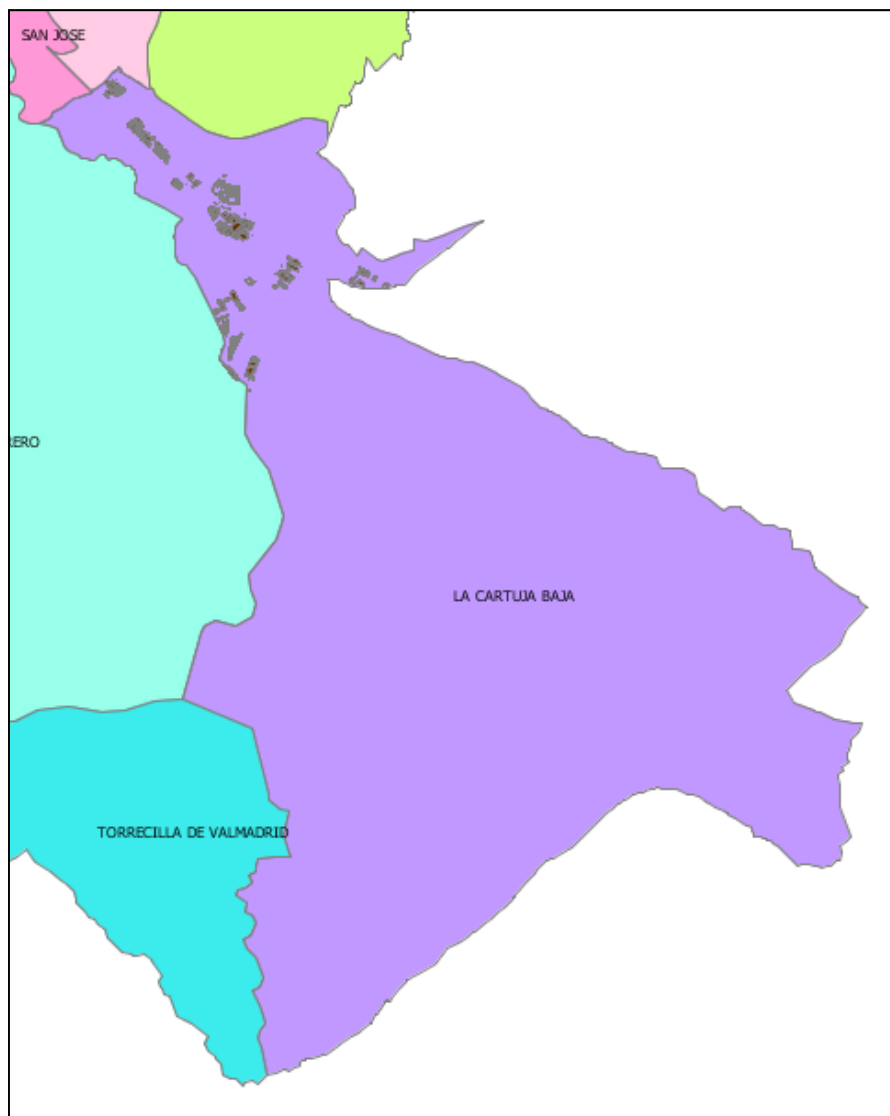
JUSLIBOL



Superficie construida sobre rasante: 133.239,46 m²

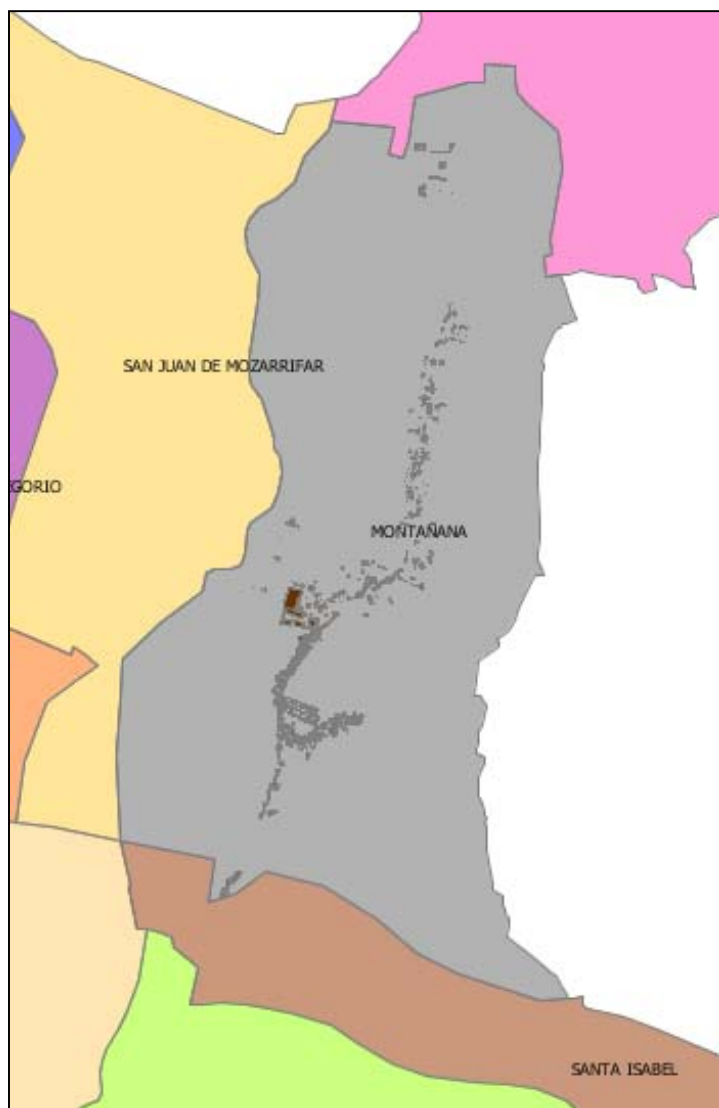


LA CARTUJA BAJA



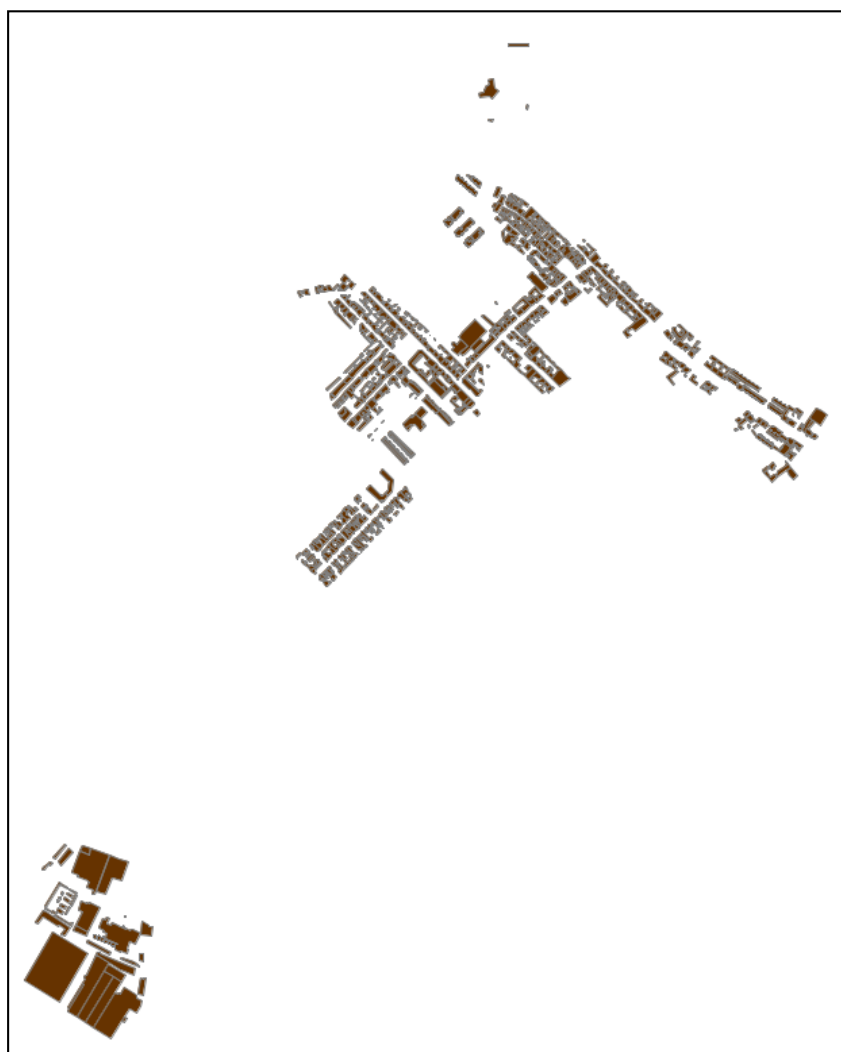
Superficie construida sobre rasante: 817.084,43 m²

MONTAÑANA



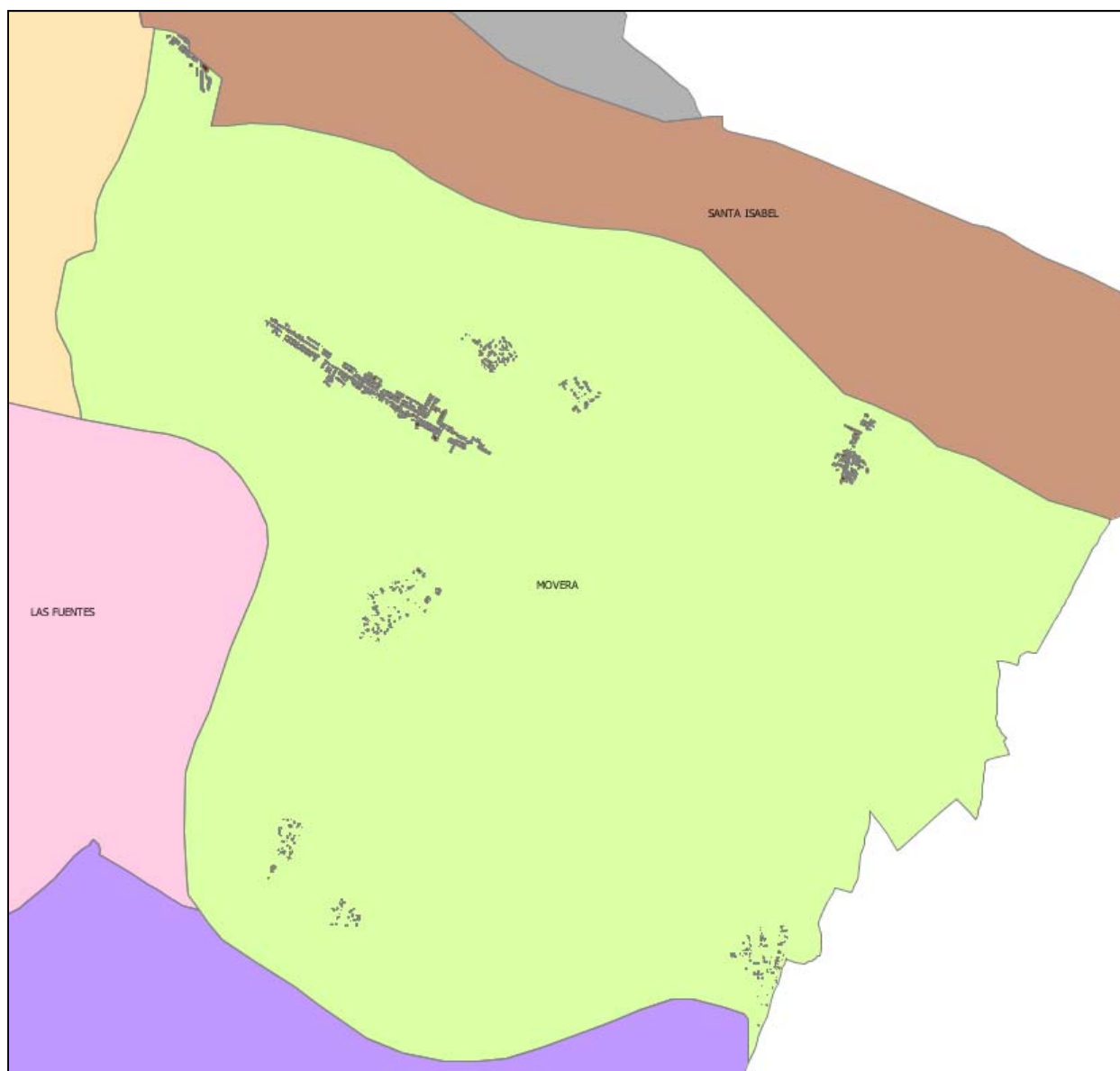
Superficie construida sobre rasante: 203.982,09 m²

MONZALBARBA



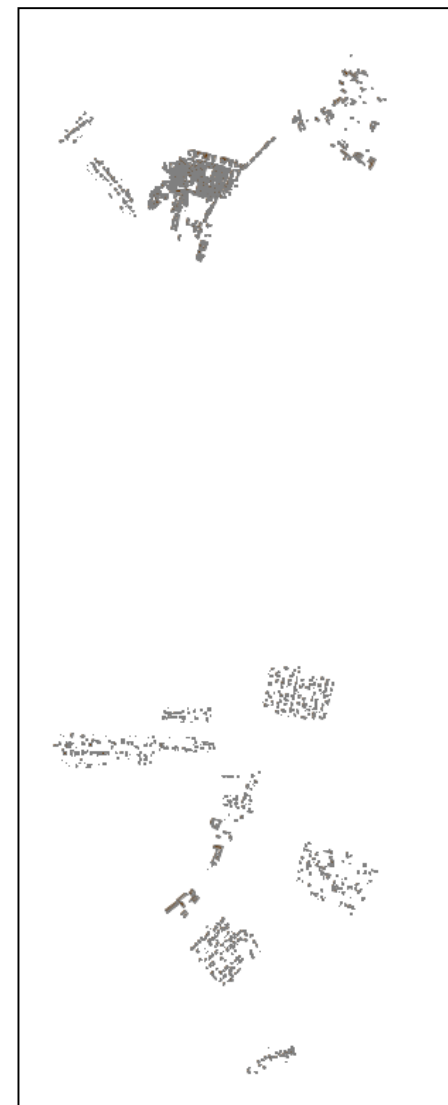
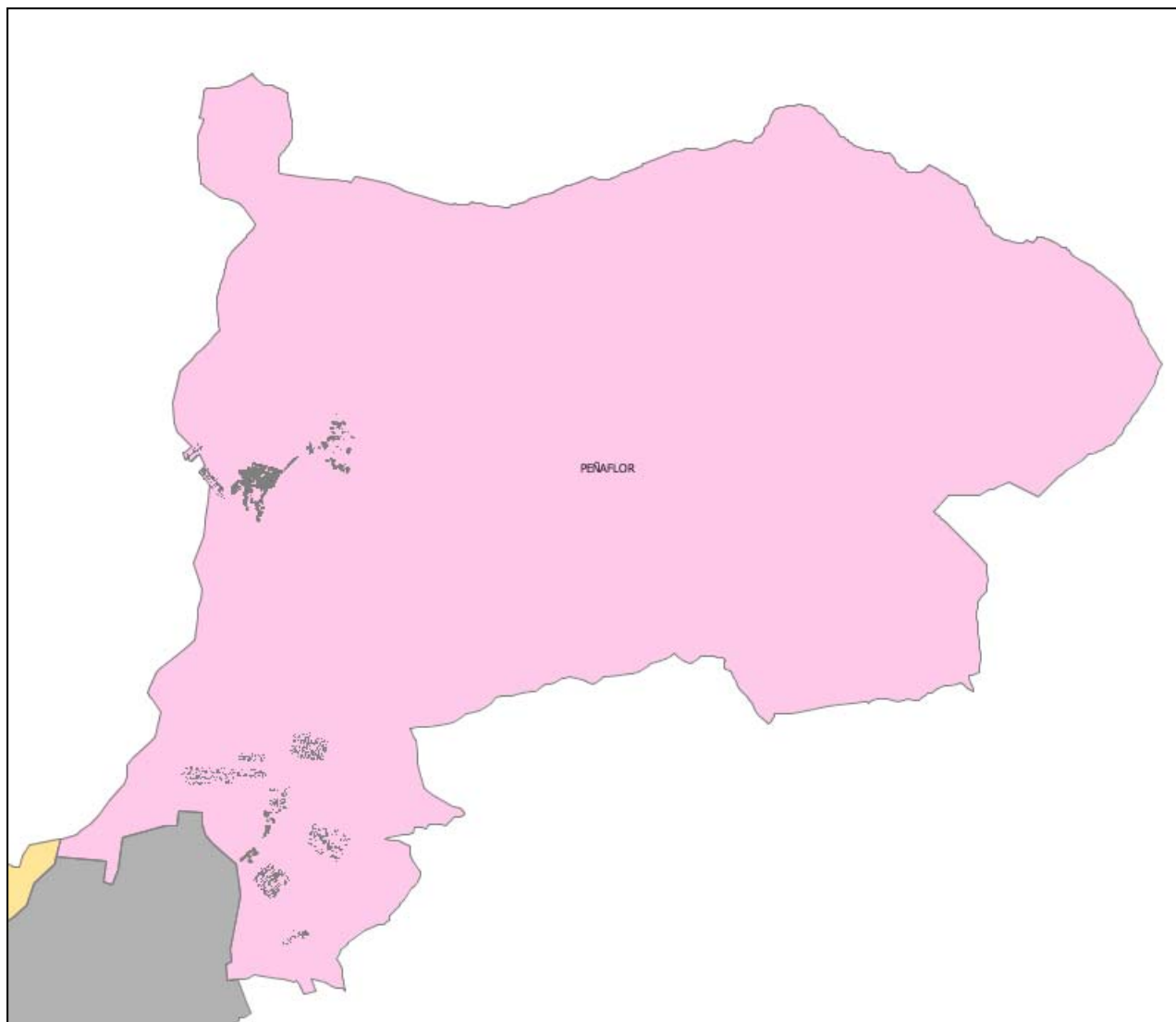
Superficie construida sobre rasante: 119.018,89 m²

MOVERA



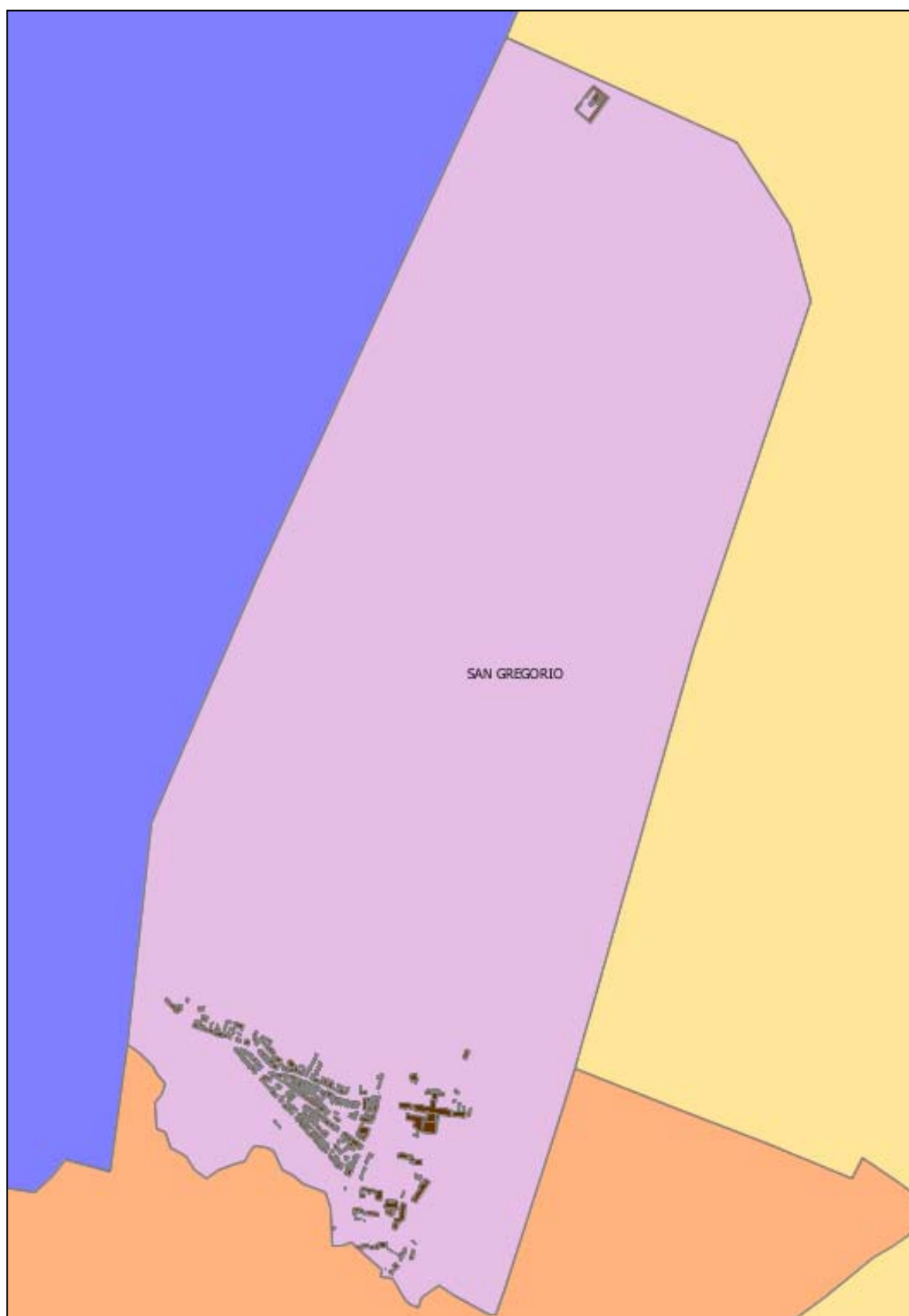
Superficie construida sobre rasante: 115.505,23 m²

PEÑAFLOR



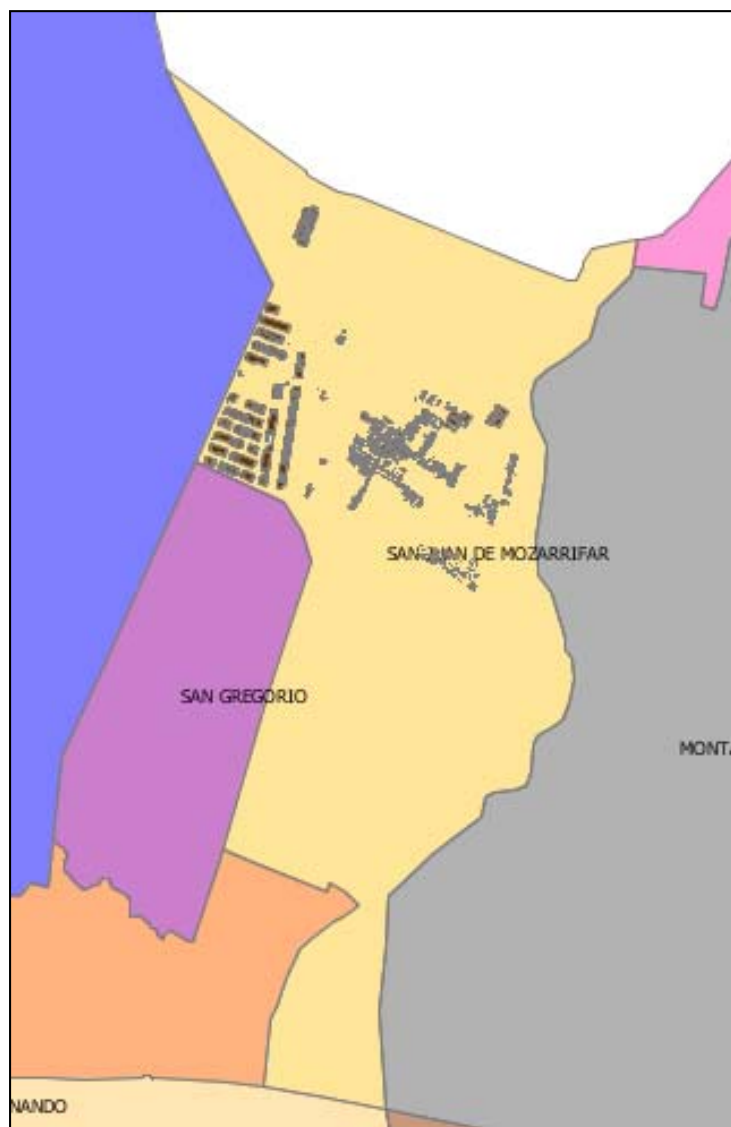
Superficie construida sobre rasante: 118.612,75 m²

SAN GREGORIO

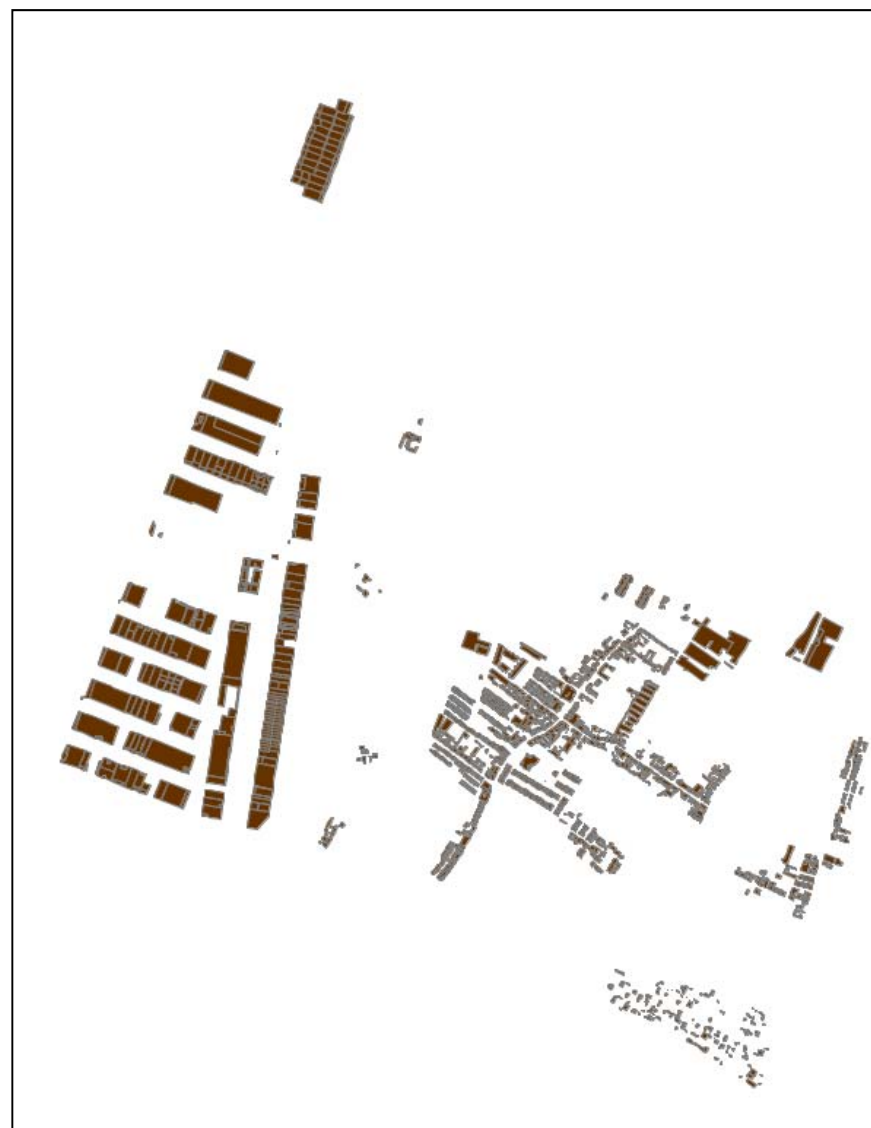


Superficie construida sobre rasante: 42.687,83 m²

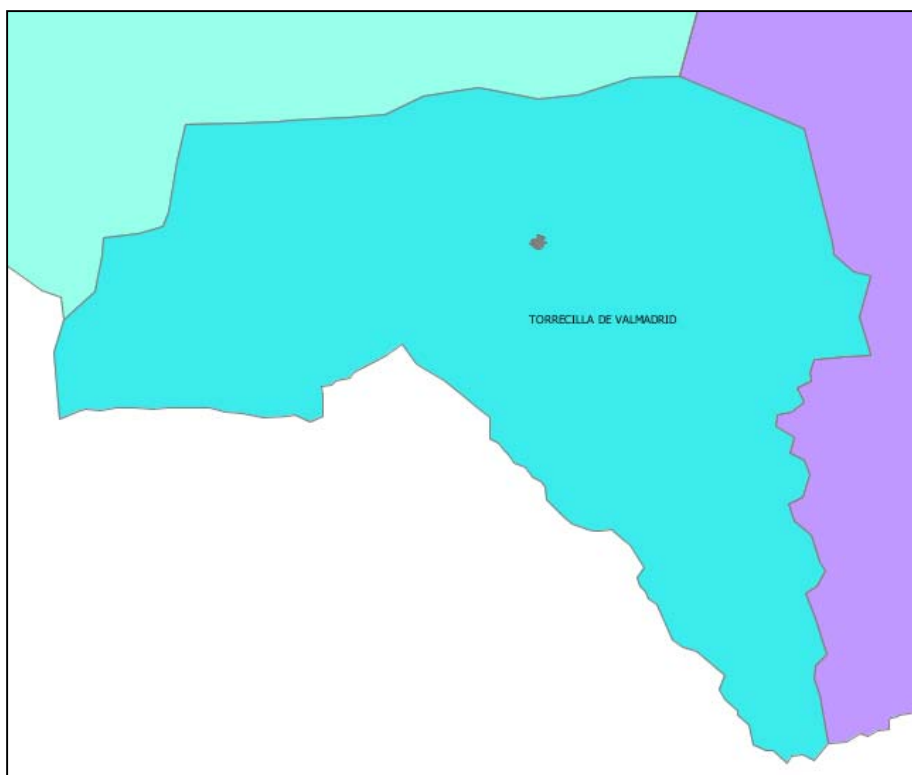
SAN JUAN DE MOZARRIFAR



Superficie construida sobre rasante: 342.028,80 m²

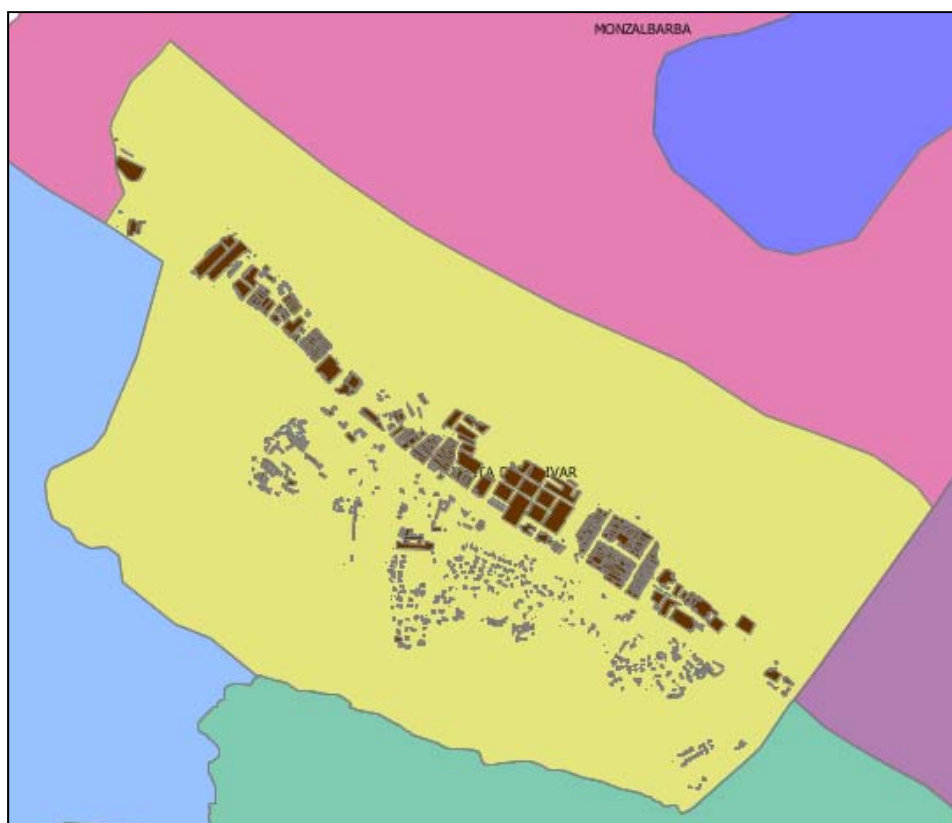


TORRECILLA DE VALMADRID



Superficie construida sobre rasante: 7.491,96 m²

VENTA DEL OLIVAR



Superficie construida sobre rasante: 533.474,47 m²

VILLARRAPA



Superficie construida sobre rasante: 17.456,72 m²