Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Grado

Titulación: Grado en Ciencias Ambientales.

Aplicación de técnicas de teledetección para el conteo de cipreses *Cupressus sempervirens* en arbolado urbano.

Application of remote sensing techniques for counting cypresses *Cupressus sempervirens* in urban trees.

Autora:

Laura Royo Aisa

Directores:

Jesús Guerrero Iturbe

Juan J. Barriuso Vargas

Escuela Politécnica Superior - Huesca
Universidad Zaragoza

Año 2022

Resumen

Cupressus sempervirens, el ciprés común o ciprés mediterráneo, es una especie con un gran valor ornamental, encontrándose tanto en jardines particulares como formando parte del paisaje urbano en las ciudades. En concreto, el ciprés común es una de las especies arbóreas más comunes en la ciudad de Zaragoza.

Por su característica morfología, se trata de una especie idónea para la aplicación de técnicas de teledetección, ya que es posible llevar a cabo la identificación de ejemplares y su geolocalización con herramientas de teledetección como ortofotografías aéreas digitales, imágenes satelitales Worldview y ground-level images.

Debido a los efectos que provoca esta especie ornamental en las ciudades como productora de polen alérgeno, surge la necesidad de proponer un método mediante el cual se pueda realizar un conteo y geolocalización de los ejemplares de *Cupressus sempervirens* en la ciudad de Zaragoza.

Los resultados mostraron un total de 364 ejemplares de *Cupressus sempervirens* geolocalizados mediante la combinación de técnicas de teledetección en la zona del Parque del Agua de 81,5 hectáreas; y un total de 796 ejemplares geolocalizados en la zona de Montecanal-Valdespartera de 270,5 hectáreas.

La validación del método utilizado demostró una tasa de acierto en la identificación de cipreses del 88% y 93% en cada una de las zonas respectivamente.

Palabras clave

Geolocalización, remote sensing, ortofotografía, imagen satelital, paisaje urbano, cupresáceas.

Abstract

Cupressus sempervirens, the common cypress or Mediterranean cypress, is a species with great ornamental value, found both in private gardens and as part of the urban landscape in cities. Specifically, the common cypress is one of the most common tree species in the city of Zaragoza.

Due to its characteristic morphology, it is an ideal species for the application of remote sensing techniques, as it is possible to carry out the identification of specimens and their geolocation with remote sensing tools such as digital aerial orthophotographs, Worldview satellite images and ground-level images.

Due to the effects caused by this ornamental species in cities as a producer of allergenic pollen, the need arises to propose a method by which a count and geolocation of *Cupressus sempervirens* specimens in the city of Zaragoza can be carried out.

The results showed a total of 364 specimens of *Cupressus sempervirens* geolocated using a combination of remote sensing techniques in the Parque del Agua area covering 81.5 hectares; and a total of 796 specimens geolocated in the Montecanal-Valdespartera area covering 270.5 hectares.

The validation of the method used showed a success rate in the identification of cypress tree of 88% and 93% in each of the areas respectively.

Keywords

Geolocation, remote sensing, orthophotography, satellite imaging, urban landscape, *cupressaceae*.

Índice

1. Introducción 7

1.1. Justificación y antecedentes 7

1.2. Sistemas de Información Geográfica y Teledetección 8

♦ Software de gestión Arbomap 10

1.3. Efectos de las especies ornamentales en la ciudad 11

1.4. Las Cupresáceas o *Cupressaceae* 12

♦ *Cupressus sempervirens* 14

2. Objetivos 15

3. Material y métodos 16

3.1. Descripción del área de estudio 16

3.2. Geolocalización de *Cupressus sempervirens* 18

3.3. Validación del método 27

3.4. Mapa de densidad del género *Cupressus* 27

4. Resultados y discusión 29

4.1. Geolocalización de *Cupressus sempervirens* en el Parque del Agua y Montecanal-Valdespartera 29

4.2. Eficacia del método 33

♦ Ventajas y limitaciones del método 34

4.3. Mapa de densidad del género *Cupressus* 36

5. Conclusiones 38

6. Bibliografía 39

7. Anexos 41

Índice de anexos

Anexo 1. Mapa Parque del Agua. Identificación de *Cupressus sempervirens* mediante diferentes técnicas de teledetección. 41

Anexo 2. Mapa Parque del Agua. Identificación de *Cupressus sempervirens* mediante combinación de técnicas de teledetección y Arbomap. 42

Anexo 3. Mapa Montecanal-Valdespartera. Identificación de *Cupressus sempervirens* mediante diferentes técnicas de teledetección. 43

Anexo 4. Mapa Montecanal-Valdespartera. Identificación de *Cupressus sempervirens* mediante combinación de técnicas de teledetección y Arbomap. 44

1. Introducción

1.1. Justificación y antecedentes

Las técnicas de teledetección son herramientas imprescindibles para abordar las tareas de obtención, tratamiento, análisis y representación de la información espacial relacionada con el medio ambiente. Se trata de un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos de forma remota.

Esta ventaja en el modo de obtener información se suma al hecho de que en la actualidad existen distintas herramientas de teledetección de acceso libre y gratuito, lo que nos permite un mayor conocimiento de sus posibilidades y usos.

En este caso, la aplicación de diferentes técnicas de teledetección se enfoca hacia uno de los recursos medioambientales más importantes de las ciudades: el arbolado urbano.

Los árboles urbanos constituyen el patrimonio verde y natural de las ciudades. Sin embargo, el polen liberado por la flora urbana es un importante contribuyente al contenido de alérgenos en el aire durante la temporada de floración de las especies, y tiene un efecto adverso en la salud humana (Cariñanos et al., 2016). Por ello, la información referente al censo, conteo y localización de las diferentes especies de arbolado urbano es de suma importancia para la gestión de zonas verdes y el desarrollo de medidas preventivas en materia de salud.

La identificación de especies arbóreas en ciudades por métodos remotos ha sido exclusivamente abordada por unas decenas de trabajos científicos con pobres resultados y tasas de éxito inferiores al 75% (Velasquez-Camacho et al., 2021). Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) busca el uso combinado de diferentes técnicas de teledetección de acceso libre en el reconocimiento por primera vez de cipreses en España con una mayor tasa de éxito a las obtenidas por otros autores.

Las cupresáceas son una familia de coníferas del orden Cupressales. En concreto el ciprés común (*Cupressus sempervirens* L.) es una de las especies arbóreas más comunes en la ciudad de Zaragoza (Elduque Palomo et al., 2012) y corresponde al grupo de árboles de los denominados de “alergias de invierno”, ya que polinizan desde el mes de febrero (Ayuntamiento de Zaragoza, 2022). Es un árbol frugal, de conocida resistencia, que soporta la contaminación urbana y los suelos pobres.

Al elaborar este TFG se pretende ofrecer, tanto a la población como a las entidades municipales, información útil en relación con el paisaje urbano de nuestra ciudad de manera

que mejore el bienestar de los ciudadanos. Se busca, por tanto, avanzar en la obtención de información manteniendo el paisaje urbano de forma sostenible. Por ello, se cumple con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que propone Naciones Unidas, expuestos a continuación:

ODS nº 3: Salud y bienestar.

ODS nº 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

ODS nº 15: Vida de ecosistemas terrestres.

1.2. Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Aunque la identificación, delimitación y cartografía de los árboles urbanos es fundamental para una evaluación adecuada de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en los entornos urbanos, la realidad es que la mayoría de zonas urbanas carecen de información sistematizada y/o actualizada sobre éstos (Velasquez-Camacho et al., 2021).

La necesidad, mencionada anteriormente, de disponer de información acerca de la caracterización y el censo del arbolado urbano, ha impulsado el interés por desarrollar nuevas técnicas que nos permitan obtener esta información de manera eficaz y fiable. La forma tradicional de recopilar información sobre los árboles a través de inventarios forestales sobre el terreno es costosa y requiere una gran cantidad de recursos humanos, lo que limita su aplicación a áreas muy reducidas. Esto ha llevado al desarrollo y la aplicación de varios enfoques orientados a la teledetección y las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera. El conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección con aviones o satélites comprenden siempre tres tipos de información (Sacristán Romero, 2006):

- Información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
- Información espectral que caracteriza la naturaleza de la superficie terrestre.
- Información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

Velasquez-Camacho, et al. (2021), realizaron un estudio acerca de los artículos publicados en materia de caracterización de árboles por teledetección en zonas urbanas, en el intervalo de tiempo de 2016 a 2020. Este estudió reflejó que el 72% de los trabajos

revisados, habían sido desarrollados a escala local de barrios o calles. El 28% restante se centró en una escala de ciudad. Esto es debido, según algunos autores, a la dificultad de escalar los modelos a las ciudades, donde la heterogeneidad del paisaje dificulta dicha extrapolación (Pan et al., 2019).

Este estudio también reflejó que la mayoría de los trabajos se habían desarrollado en el hemisferio norte, especialmente en Estados Unidos (29%) y China (14%), y que los estudios de caracterización de arbolado urbano en Europa se realizaron predominantemente en Francia (8%), Reino Unido (6%) y Alemania (6%).

En relación con los datos utilizados en los estudios publicados para realizar la caracterización de arbolado urbano, cabe destacar que en la mayoría de los estudios se emplean más de dos fuentes de información. Las más destacadas son los datos LiDAR (detección y alcance de escaneo láser) utilizados en el 40% de los estudios, las imágenes aéreas utilizadas en un 37%, las imágenes a nivel del suelo en otro 37% y las imágenes por satélite en un 31% (Velasquez-Camacho et al., 2021).

La precisión de los resultados obtenidos en estudios elaborados con datos LiDAR es tremendamente variable. Por ejemplo, Alonzo et al. (2016), realizaron un estudio en Santa Barbara, California, el cual reveló que la utilización de datos LiDAR en el modelo, aumentó significativamente la precisión global hasta el 75% en el reconocimiento de especies individuales, aunque con una precisión que oscilada entre el 37% para *Metrosideros excelsa* y el 96% para *Eucalyptus globulus* y *Ficus microcarpa*.

Otro ejemplo, son los resultados del estudio realizado en Detroit por Katz et al. (2020), que reflejaban que el uso de datos LiDAR, por sí solos, daba lugar a una precisión del 43% en la identificación de 16 especies de árboles, pero cuando se utilizaban en combinación con otras fuentes de datos como imágenes aéreas, la precisión alcanzaba el 74%.

Respecto a la utilización de imágenes aéreas para la identificación de especies arbóreas, en ninguno de los estudios consultados las imágenes son utilizadas para una detección de manera visual. Se basan en un espectrómetro de imágenes visibles/infrarrojas utilizando longitudes de onda NIR y el SWIR, creando una firma espectral para cada especie arbórea analizada. Esta metodología también consigue unos resultados de baja precisión. En el estudio mencionado anteriormente de Katz et al. (2020), para la identificación de 19 especies de árboles usando únicamente imágenes aéreas, se obtuvo una precisión del 60%.

Los resultados más prometedores son los obtenidos en los estudios realizados mediante datos de imágenes a nivel de suelo (ground-level images o GLI). Estudios

recientes han demostrado su potencial para caracterizar objetos, incluidos árboles, en terrenos urbanos (Velasquez-Camacho et al., 2021).

Por ejemplo, el estudio realizado por Wegner, et al. (2016), se centró en la identificación de especies de árboles, además de la detección de árboles individuales a partir de GLI y lograron una precisión del 80% en la identificación de especies de árboles urbanos en Pasadena, California.

La revisión de los estudios realizados en los últimos años, en materia de caracterización de árboles por teledetección, sugiere que existen lagunas de conocimiento sobre la detección de la vegetación urbana y las características de los bosques urbanos en todo el mundo.

De cara a nuevas investigaciones, una fuente de datos que ha aumentado su popularidad en todo el mundo son los vehículos aéreos no tripulados, comúnmente conocidos como drones. Estos dispositivos pueden proporcionar importantes datos de entrada para actualizar la información de los bosques urbanos, reduciendo significativamente los costes de adquisición de datos de calidad, con altas resoluciones espaciales adecuadas para la caracterización de árboles (Velasquez-Camacho et al., 2021).

- **Software de gestión Arbomap**

Arbomap es un software que trabaja en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfico) y que pertenece a la empresa privada TECNIGRAL (Figura 1). Actualmente, es utilizado por el Servicio de Parques, Jardines e Infraestructuras Verdes del Ayuntamiento de Zaragoza para la gestión de zonas verdes, arbolado, juegos infantiles y mobiliario urbano. Arbomap está implantado entre más de 20 ciudades del territorio español como una aplicación web con un avanzado entorno y al que se accede a través de unas claves de acceso.

Figura 1. Logotipo del software “Arbomap” de la empresa TECNIGRAL.

Posee un inventario, *a priori* completo y actualizado de todos los árboles de titularidad pública existentes en el término municipal de Zaragoza. Además, todos los árboles están georreferenciados, lo que permite conocer el número total de individuos de una especie determinada y la posición geográfica de cada individuo. Según la publicidad de la web de la empresa, la implantación de Arbomap permite un ahorro del 4% de mantenimiento y 35% en horas de trabajo en actividades de inventario y labores administrativas que compensaría con creces el precio de su licencia (Tecnigral, 2022).

Desafortunadamente, como se ha citado anteriormente, esta herramienta solo incluye en su registro los árboles de titularidad pública. Esto supone que a la hora de realizar cualquier tipo de gestión respecto a las distintas especies de árboles que podemos encontrar en la ciudad, como a la cantidad de éstos, hay una pérdida de información considerable al no tener en cuenta todos los árboles de titularidad privada plantados en fincas y jardines de zonas residenciales.

1.3. Efectos de las especies ornamentales en la ciudad

Los espacios verdes urbanos son de gran importancia a la hora de favorecer el bienestar de los ciudadanos y constituyen un elemento fundamental en el contexto actual de ciudad sostenible. Son numerosos los beneficios que aportan los parques y jardines a las ciudades, como la reducción de la contaminación atmosférica, de la contaminación sonora y la reducción del efecto isla de calor.

La planificación y el diseño de los espacios verdes en las ciudades, frecuentemente se ha basado en criterios estéticos y económicos, empleando especies de flora ornamental que reúnen ciertas características basadas en el periodo de crecimiento, características morfométricas, para producir sombreado, costes económicos, etc. Sin embargo, algunas de las especies empleadas como ornamentales en parques y jardines presentan un elevado riesgo para la población alérgica al polen, por tratarse de árboles con una elevada producción polínica y un alto contenido de alérgenos en sus granos de polen (Lara et al., 2017).

En los últimos 25 años se ha evidenciado un enorme progreso en los estudios sobre aerología y alergia. Actualmente, de las 250.000 plantas productoras de polen, se sabe que menos de 100 son significativas en términos de alergia a pólenes (D'Amato y Liccardi, 2002).

Los pólenes más importantes productores de polinosis en España son los procedentes de los árboles cipreses en enero-marzo, abedules en abril, plátanos de sombra en marzo-abril, y los olivos en abril-julio; las hierbas gramíneas y las malezas

Parietaria de abril a junio, y *Chenopodium*, de julio a septiembre (Subiza Garrido-Lestache, 2004). Más concretamente, un estudio realizado con el objetivo de conocer la salud ambiental de los parques españoles y el potencial alergénico de los espacios verdes urbanos, muestra que los taxones que mayor contribución realizan al valor de Índice de Alergenicidad Potencial por la frecuente presencia en los parques, son todos los de las familias Cupresáceas (*Cupressus* spp., *Chamaecyparis* sp., *Thuja* spp., *Juniperus* spp., género *Platycladus*, género *Cryptomeria*, *Tetraclinis articulata*, *Sequoia sempervirens*, *Sequoiadendron giganteum*, *Metasequoia glyptostroboides*), plátano de sombra (*Platanus x hispanica*, *P. orientalis*) y Oleáceas (*Olea europaea*, *Fraxinus* spp., *Ligustrum* spp.) (Cariñanos et al., 2016).

1.4. Las Cupresáceas o *Cupressaceae*

La familia *Cupressaceae* pertenece al dominio Eukaryota, reino Plantae, división Pinohyta (antes Coniferophyta), clase Pinopsida y orden Pinales. El orden Pinales (antes Coniferales) abarca 6 familias: *Pinaceae, Cupressaceae, Cephalotaxaceae, Taxodiaceae, Araucariaceae* y *Podocarpaceae* (Castillo Marchuet, 2016).

La familia *Cupressaceae* comprende 29 géneros y 130 especies (Castroviejo y Talavera, 1999). De ellos, el género *Cupressus* (cipreses) es uno de los más importantes desde el punto de vista alergológico. Dentro de este género, existen varias especies que son comúnmente plantadas por toda España con fines forestales u ornamentales (Castillo Marchuet, 2016), que son: *Cupressus sempervirens* (Figura 2), *Cupressus arizonica* (Figura 3), *Cupressus macrocarpa* (Figura 4) y *Cupressus lusitánica* (Figura 5).

Figura 2. Ejemplares de *Cupressus sempervirens*.

Figura 3. Ejemplar de *Cupressus arizonica.*

Figura 4. Ejemplar de *Cupressus macrocarpa.*

Figura 5. Ejemplar de *Cupressus lusitánica.*

Las cupresáceas son plantas que aparecieron en la Tierra en el período del Paleozoico, sin embargo, hasta hace relativamente pocos años no se ha reconocido la importancia de sus pólenes en la patología alérgica (Gandolfo Cano, 2013).

La polinización de las cupresáceas se produce potencialmente desde enero hasta marzo, aunque este período puede verse afectado por las lluvias de invierno.

Los ejemplares pertenecientes a esta familia son árboles o arbustos resinosos, habitualmente de hojas perennes y cuyos órganos reproductores pueden ser monoicos o dioicos. La polinización en la totalidad de las especies es anemófila, es decir, aseguran su polinización por medio del viento.

Por su implicación polínica, las especies que más destacan son (Gandolfo Cano, 2013):

- *Cupressus sempervirens*. Poliniza potencialmente durante febrero y marzo.
- *Cupressus arizonica*. Poliniza potencialmente durante enero y febrero.

En este proyecto vamos a centrarnos en la especie *Cupressus sempervirens* por varios motivos. El primero es por la morfología claramente cónica de su copa que proyecta una sombra triangular alargada y que diferencia a esta especie de ciprés del resto de árboles y los hace fácilmente identificables a simple vista mediante las herramientas de SIG y teledetección. En segundo lugar, es la especie de ciprés más presente en la ciudad de Zaragoza, siendo abundante en parques, jardines, avenidas, urbanizaciones y cementerios (Ayuntamiento de Zaragoza, 2022).

- ***Cupressus sempervirens***

Se trata de una especie originaria de las montañas semiáridas del este y sur de la región mediterránea (norte de Irán, Líbano, Siria, Chipre, Creta, Islas del Egeo, sur de Grecia, Túnez y Marruecos). Su área actual es extensa pero disyunta, siendo muy reducida y presentando ejemplares o masas muy reducidas y en regresión (Menéndez Valderrey, 2009).

Son árboles de hasta 30 m, con ramas fastigiadas; hojas 0,5-1 mm, obtusas; estróbilos 2,5-4 cm, de color pardo-grisáceo al madurar, con 8-14 escamas obtusamente mucronadas. Se caracteriza por lucir una copa de aspecto cónico (Castillo Marchuet, 2016).

Se presenta en dos formas, la variedad *fastigiata* (o *pyramidalis*), con las ramas erectas, cerca del tronco y copa densa; y la variedad *horizotalis*, con las ramas principales y secundarias extendidas formando una copa más ancha. Poseen raíces bien desarrolladas, tronco recto y grueso, y una copa con densidad variable, verde oscura, con ramillos jóvenes de alargamiento rojizo. Las hojas jóvenes son opuestas decusadas, largamente decurrentes, con el ápice triangular, agudo y libre. Las flores son monoicas y se disponen en ramillos cortos (Aizpuru, 2000).

El *Cupressus sempervirens* se asienta en zonas de precipitaciones irregulares, por lo que cuenta con una gran capacidad de controlar la transpiración, al igual que otras cupresáceas como los enebros y las sabinas. Fuera de su área de distribución natural, *Cupressus sempervirens* aparece cultivado en parques, jardines y calles, siendo muy cultivado y difundido, llegando a ser uno de los elementos característicos del paisaje mediterráneo (Menéndez Valderrey, 2009).

La polinización de los diferentes géneros y especies varía ligeramente, así, *Cupressus sempervirens* poliniza desde el mes de febrero hasta marzo (Ayuntamiento de Zaragoza, 2022).

Por su polinización anemófila, requiere que el tamaño de polen sea pequeño o con una relación superficie/volumen muy grande, lo que reduce su velocidad de sedimentación y facilita que llegue más lejos cuando es arrastrado por el viento. En el caso de *Cupressus sempervirens*, posee un polen esferoidal de entre 19 y 38 micras, con una exina delgada con gránulos y una intina que puede llegar hasta 6 micras de grosor (Gandolfo Cano, 2013).

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la geolocalización de ejemplares *Cupressus sempervirens* en la ciudad de Zaragoza mediante diferentes técnicas de teledetección y la posterior validación del método.

Para ello, también se cuenta con unos objetivos secundarios:

- Conocer la eficacia en la identificación y conteo de ejemplares, en referencia tanto al tiempo utilizado como a la tasa de acierto y error, con las herramientas disponibles.
- Comprobar la eficacia de la herramienta de gestión de arbolado urbano “Arbomap” de la empresa TECNIGRAL, utilizada por el Servicio de Parques, Jardines e Infraestructuras Verdes del Ayuntamiento de Zaragoza.
- Comparar la eficacia de las distintas herramientas de teledetección teniendo en cuenta la titularidad pública/privada de ejemplares *Cupressus sempervirens* en la zona del Parque del Agua de Zaragoza y en los barrios de Montecanal y Valdespartera.

3. Material y métodos

3.1. Descripción del área de estudio

Este proyecto ha sido realizado en la ciudad de Zaragoza, en la parte central de la Depresión del Ebro, zona caracterizada por un clima mediterráneo con influencia continental (Figura 6). Las características que definen la zona de estudio son las escasas precipitaciones (320 mm anuales) y unas temperaturas medias suaves (15,3 ºC) aunque con grandes diferencias entre invierno y verano, registrándose valores próximos a 0 ºC incluso bajo 0 en los meses de invierno, y alcanzando temperaturas que rondan los 40 ºC en verano (Cuadrat et al., 2014).

Un factor importante para tener en cuenta en esta zona es el viento. Existen dos componentes, el cierzo, que sopla del noroeste, y el bochorno, que sopla del sureste. Estos vientos son frecuentes y suelen ser intensos, pudiendo superar los 100 Km/h debido a la orografía de la zona, donde los flujos de aire se canalizan por el valle del Ebro entre el Pirineo en su extremo norte, y el Sistema Ibérico en el sur (Cuadrat et al., 2014).

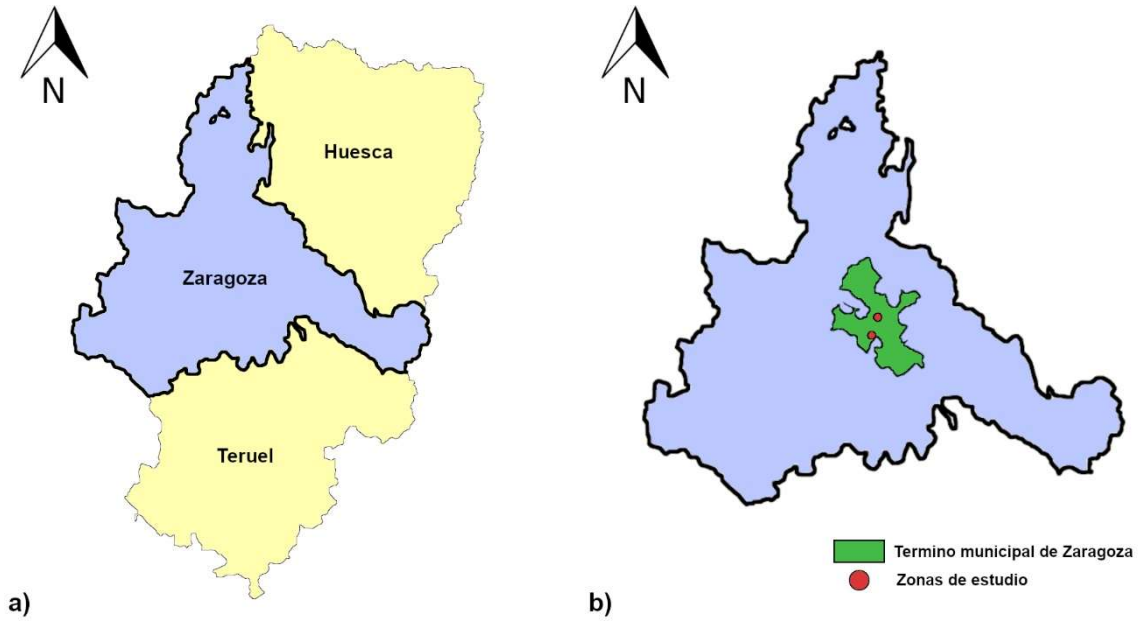


Figura 6. Localización del área de estudio. a) Mapa político Comunidad Autónoma de Aragón. b) Mapa provincia de Zaragoza con término municipal de Zaragoza (verde) y las zonas de estudio del proyecto (rojo).

El estudio se ha centrado en dos zonas delimitadas dentro del término municipal de Zaragoza. Estas dos zonas son el Parque del Agua, al norte de la ciudad en la margen izquierda del río Ebro, y los barrios de Montecanal y Valdespartera, al suroeste de la ciudad en la margen derecha del río.

Figura 7. Delimitación del área de estudio en el Parque del Agua.

Figura 8. Delimitación del área de estudio en Montecanal-Valdespartera.

La zona de estudio del Parque del Agua comprende 81,5 hectáreas y está delimitada por la Avenida de José Atarés y la Avenida de Ranillas (Figura 7). Se trata de un área que comprende casi en su totalidad zonas verdes, parques públicos y aparcamientos, y que fue acondicionada para la Expo del Agua en el año 2008.

La otra zona de estudio, situada en los barrios de Montecanal y Valdespartera, comprende 270,2 hectáreas y está delimitada al norte por la acequia de la Almotilla y la Avenida Alcalde Gómez Laguna, al sur por la Avenida Casablanca y la Calle El Tambor de Hojalata, y por último al este por la N-330 (Figura 8). Se trata de una zona residencial conformada en su mayoría por urbanizaciones con bloques, adosados, pareados y chalés que poseen zonas verdes y jardines privados.

El motivo de elección de estas dos zonas de estudio es para poder observar las diferencias en los datos que obtengamos del proceso de geolocalización entre: (1) una zona no residencial de titularidad enteramente pública caracterizada por la escasez de edificaciones, y amplios espacios verdes; y (2) una zona residencial, casi en su totalidad edificada y con zonas verdes de pequeñas dimensiones generalmente de titularidad privada.

3.2. Geolocalización de *Cupressus sempervirens*

Para llevar a cabo el objetivo principal de este proyecto ha sido imprescindible trabajar con el programa ArcGIS. Se trata de un programa de procesamiento geoespacial que nos permite ver, editar, crear y analizar datos geoespaciales. A través de ArcGIS se ha llevado a cabo la georreferenciación de ejemplares *Cupressus sempervirens*, la creación de mapas y el procesamiento de la información obtenida.

El primer paso fue decidir con qué técnicas de teledetección de acceso libre, gratuito y de elevada resolución espacial, se iba a realizar el proyecto. La comunidad científica ha progresado en el uso de múltiples técnicas de teledetección, incluyendo imágenes de satélite, detección y alcance de luz o detección y alcance de escaneo láser (LiDAR), imágenes aéreas e imágenes digitales a nivel del suelo (ground-level images o GLI) (Velasquez-Camacho et al., 2021).

Cabe mencionar que en este primer proceso se descartó el uso de imágenes satelitales de Sentinel, ya que cuentan con una resolución espacial máxima de 5*20 metros (Szantoi y Strobl, 2019), resolución insuficiente para la caracterización de los árboles, que debe ser por debajo de 4 metros por píxel según algunos autores (Wang et al, 2018). En base a estos criterios, se decidió trabajar con:

(1) Ortofotografías aéreas digitales de máxima actualidad del PNOA del año 2021, con una resolución espacial de 0,25 metros por píxel (Instituto Geográfico Nacional, 2021) y disponibles para el público desde el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en formato ecw. Las imágenes se trabajaron con el Software ArcGIS.

(2) Imágenes satelitales Worldview de alta resolución (0,5 m/píxel) de la compañía Digital Globe (Maxar Technologies, 2022) que son visibles en Google Earth y que se cargaron a través de la plataforma de ArcGIS Online. Las imágenes satelitales utilizadas son del 11 de abril de 2017, 14 de junio de 2018, 28 de abril de 2019, 31 de octubre de 2020 y febrero de 2022. El paso de una imagen a otra es inmediato mediante el uso del icono de imágenes históricas.

(3) Imágenes GLI (Ground-Level Images) que ofrece el servicio gratuito de Google Street View como complemento integrado de las plataformas Google Maps y Google Earth. Este servicio proporciona millones de imágenes panorámicas con una cobertura de 360º horizontales y 180º verticales tomadas a nivel de calle por vehículos motorizados con una cámara de alta definición para representar virtualmente nuestro entorno (Google, 2022). Desafortunadamente, dichos vehículos tienen limitado el acceso a algunas zonas públicas como el interior de parques y todas las zonas de titularidad privada. Consecuentemente, Google Street View únicamente cubre parte de la zona de estudio, no la totalidad de ésta. Las imágenes de Street View utilizadas para este proyecto están fechadas en marzo de 2022.

Para comenzar a trabajar, las áreas de estudio fueron divididas en celdas numeradas de 200 m^2 mediante la herramienta “Create Fishnet” de ArcGIS, para poder llevar a cabo la georreferenciación de forma ordenada y dividir el terreno de una forma regular.

Figura 9. Celdas del área Parque del Agua.

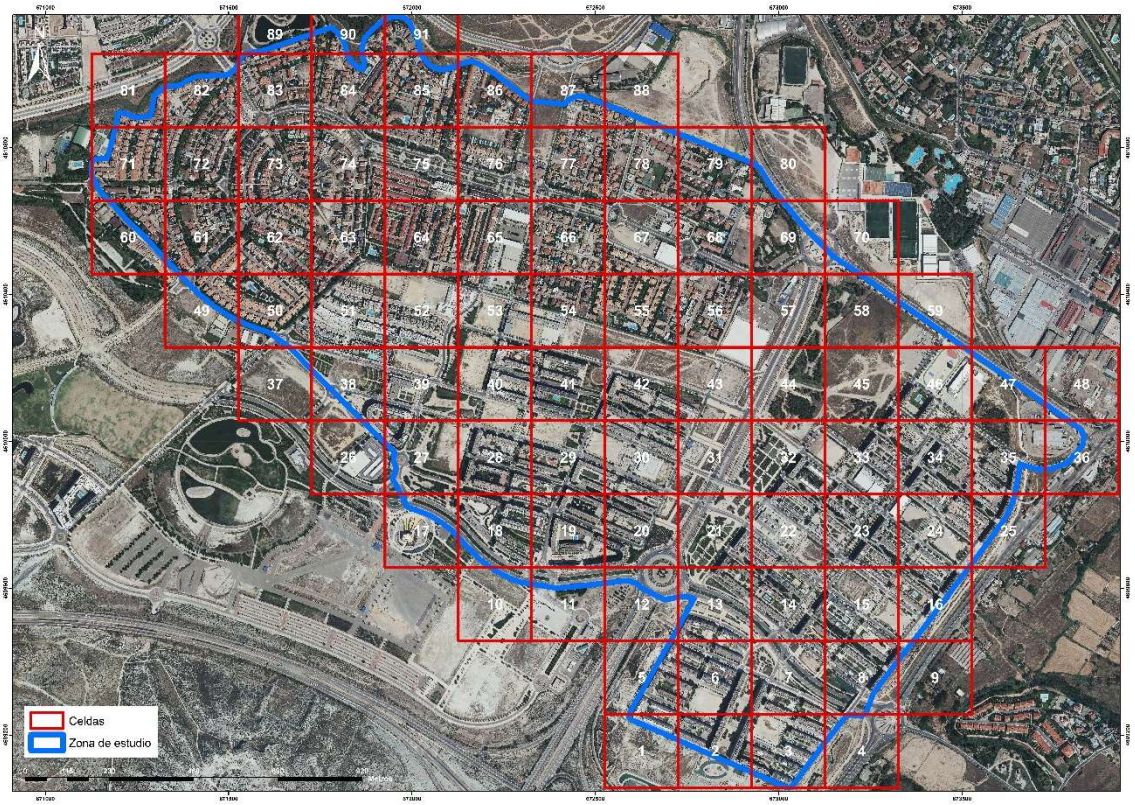


Figura 10. Celdas del área Montecanal-Valdespartera.

En el área del Parque de Agua se obtuvieron 35 celdas (Figura 9); en el área de Montecanal-Valdespartera se obtuvieron 91 celdas (Figura 10).

Durante la geolocalización de ejemplares *Cupressus sempervirens*, se contabilizó el tiempo empleado en cada una de las áreas de estudio.

Para cada una de las zonas se crearon tres capas de puntos, una capa por cada técnica (Ortofotografía, Google Earth y Google Street View). En cada capa, se situaba un punto en la posición geográfica en la que se encontraba cada ejemplar de *Cupressus sempervirens* identificado.

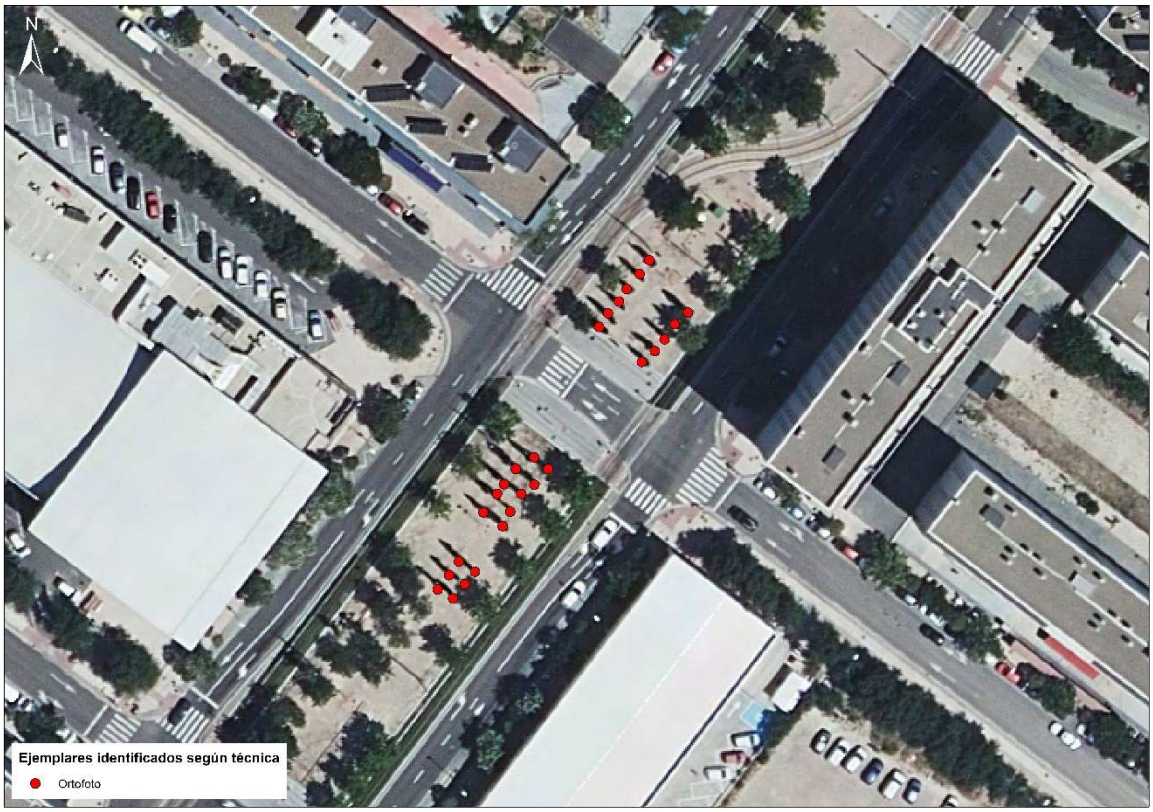


Figura 11. Geolocalización de ejemplares *Cupressus* mediante ortofotografía aérea en Montecanal-Valdespartera.

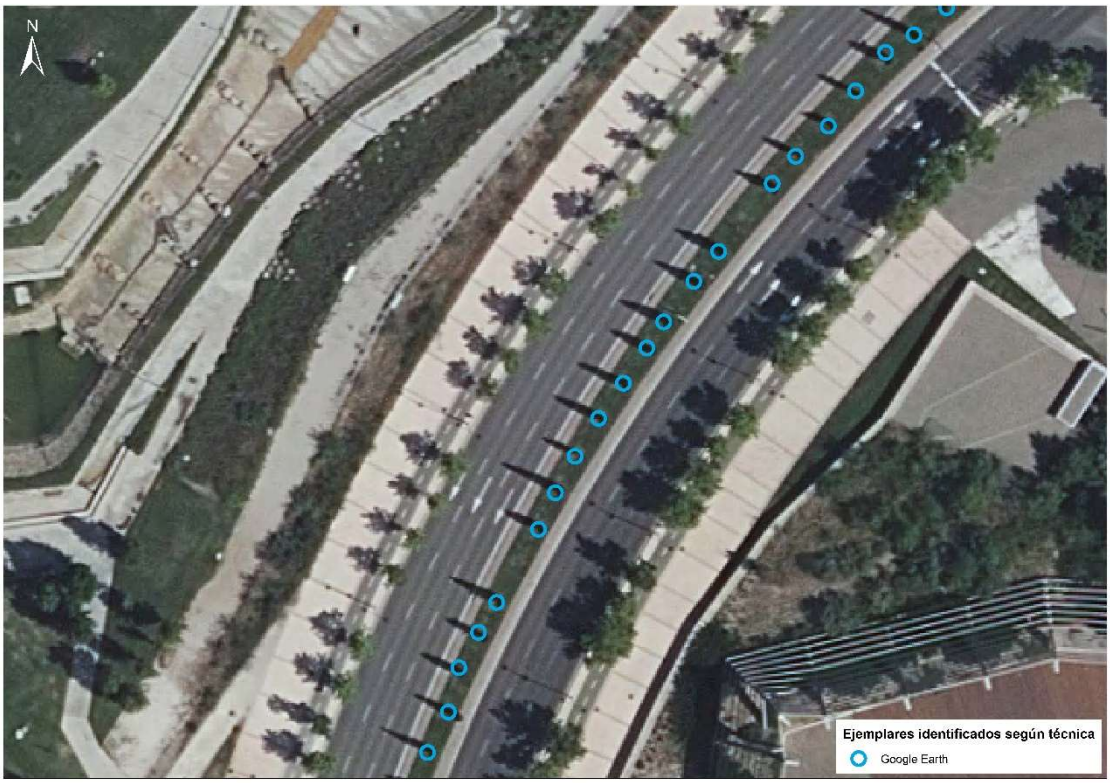


Figura 12. Geolocalización de ejemplares *Cupressus* mediante imágenes satelitales de Google Earth en el Parque del Agua.

La identificación se inició con las ortofotografías de máxima actualidad del PNOA en el software ArcGIS (Figura 11) y se continuó con la imágenes de Google Earth (Figura 12) cargadas a través de la plataforma ArcGIS Online para, posteriormente, ser exportada a ArcGIS y crear allí la correspondiente capa de puntos.

Una vez creadas las dos capas de puntos, lo siguiente que se hizo fue realizar una corrección espacial de la geolocalización, debido a que al realizarse la georreferenciación a mano, las coordenadas de las distintas capas de puntos no son idénticas. Es decir, se hizo una corrección manual de toda la capa de puntos de Google Earth para que coincidiese exactamente con las coordenadas de los puntos de la capa de ortofotografía aérea (Figura 13).

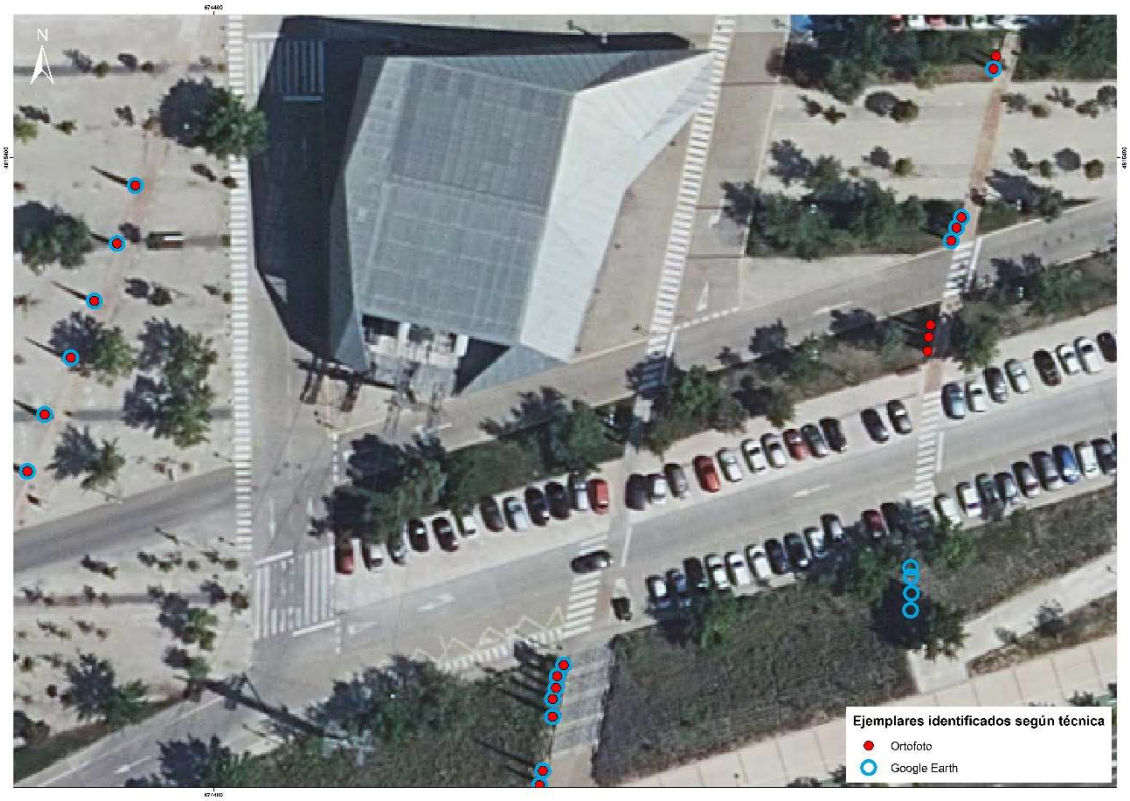


Figura 13. Detalle del mapa obtenido tras la corrección de los puntos georreferenciados.

Finalmente, se analizaron las imágenes de Google Street View. La manera fue trabajando a doble pantalla (Figura 14): en una pantalla se visualizaba en el programa ArcGIS los ejemplares geolocalizados mediante la ortofotografía aérea e imagen satelital de Google Earth, y en la otra pantalla se avanzaba calle a calle dentro de la plataforma Google Street View, comprobando uno a uno todos los puntos previamente identificados así como la presencia de nuevos ejemplares.

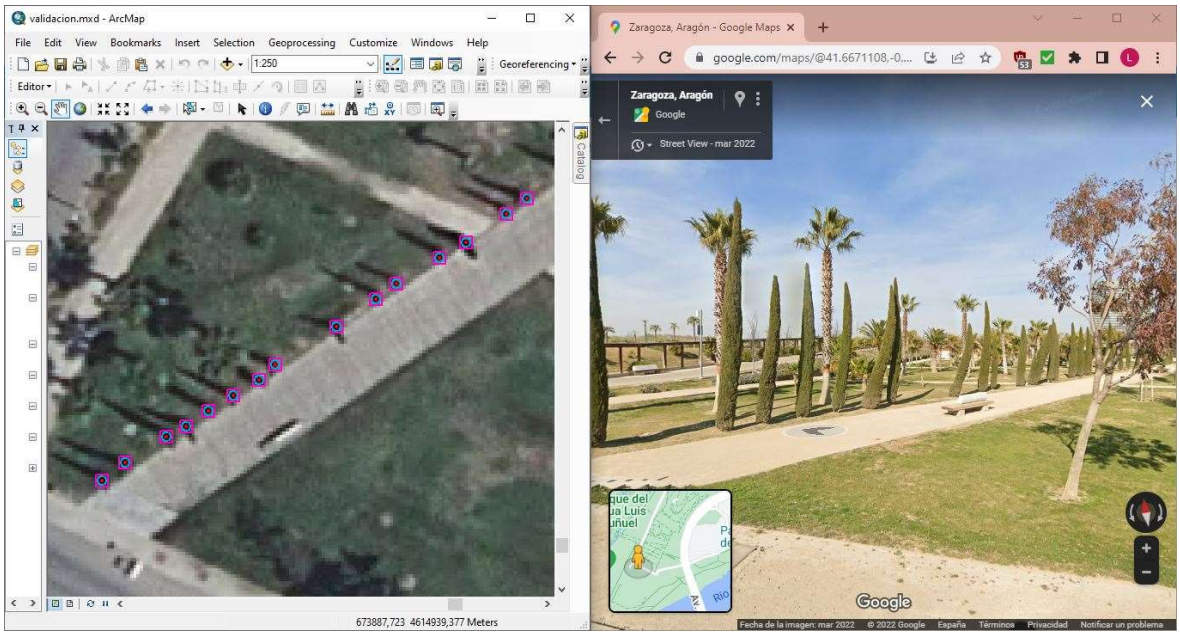


Figura 14. Geologalización a doble pantalla con ArcGIS (imagen izquierda) y Google Street View (imagen derecha).

Una vez realizada la geolocalización de ejemplares *Cupressus sempervirens* con las tres herramientas de teledetección elegidas, se buscó obtener una capa adicional con la posición geográfica de todos los cipreses inventariados por el Ayuntamiento de Zaragoza e incorporados en la base de datos del software Arbomap. El aprendizaje de este software, que funciona dentro de una interfaz semejante a un sistema de información geográfica, requirió de la realización de varias jornadas de trabajo bajo la supervisión de los técnicos del Ayuntamiento de Zaragoza.

Alcanzado el conocimiento requerido y con el fin de extraer la información necesaria para el proyecto, se siguió el siguiente procedimiento.

En primer lugar, se realizó una selección de todos los árboles presentes en nuestras áreas de estudio, ya que el programa por defecto carga la totalidad de los árboles existentes en todo el término municipal de Zaragoza. Esta selección no permite hacerla mediante un “trazo libre” si no que hay que hacerla de manera manual mediante selección con polígonos de forma rectangular, lo que supone un procedimiento algo lento.

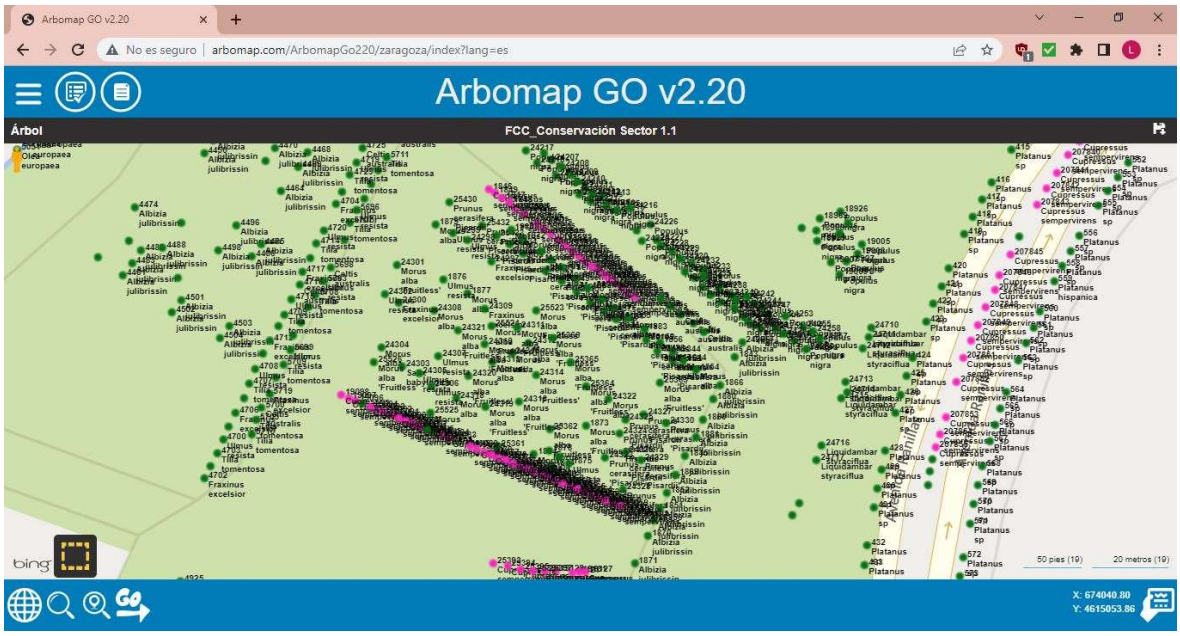
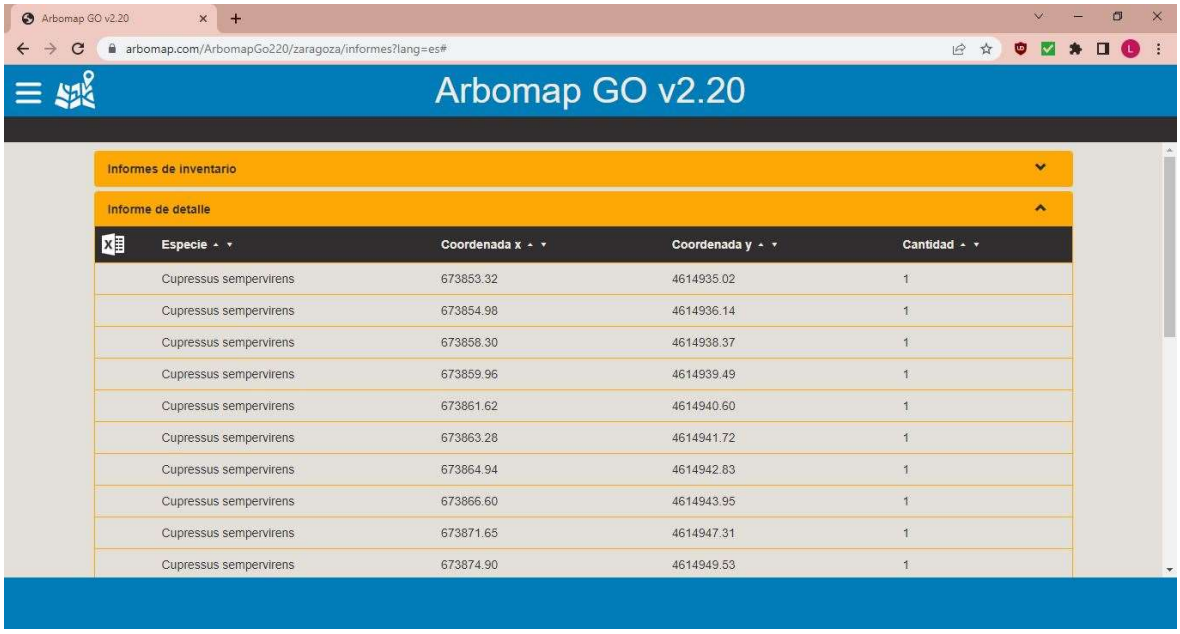


Figura 15. Capa temática de *Cupressus* en color rosa (Arbomap).

Posteriormente, se creó una “capa temática” para diferenciar los ejemplares de *Cupressus* del resto de árboles presentes (Figura 15).

El siguiente paso consistió en crear un “informe de inventario” que indicase de cada ejemplar la especie, la coordenada X y la coordenada Y (Figura 16).



Especie	Coordenada x	Coordenada y	Cantidad
Cupressus sempervirens	673853.32	4614935.02	1
Cupressus sempervirens	673854.98	4614936.14	1
Cupressus sempervirens	673858.30	4614938.37	1
Cupressus sempervirens	673859.96	4614939.49	1
Cupressus sempervirens	673861.62	4614940.60	1
Cupressus sempervirens	673863.28	4614941.72	1
Cupressus sempervirens	673864.94	4614942.83	1
Cupressus sempervirens	673866.60	4614943.95	1
Cupressus sempervirens	673871.65	4614947.31	1
Cupressus sempervirens	673874.90	4614949.53	1

Figura 16. Informe de inventario de los ejemplares *Cupressus* (Arbomap).

Los datos de las coordenadas de cada ejemplar fueron exportados en una tabla de formato Excel y cargados en el programa ArcGIS. Al igual que sucedió con la capa de

puntos de Google Earth, la exportación de los datos necesitó de la corrección manual de su geolocalización.

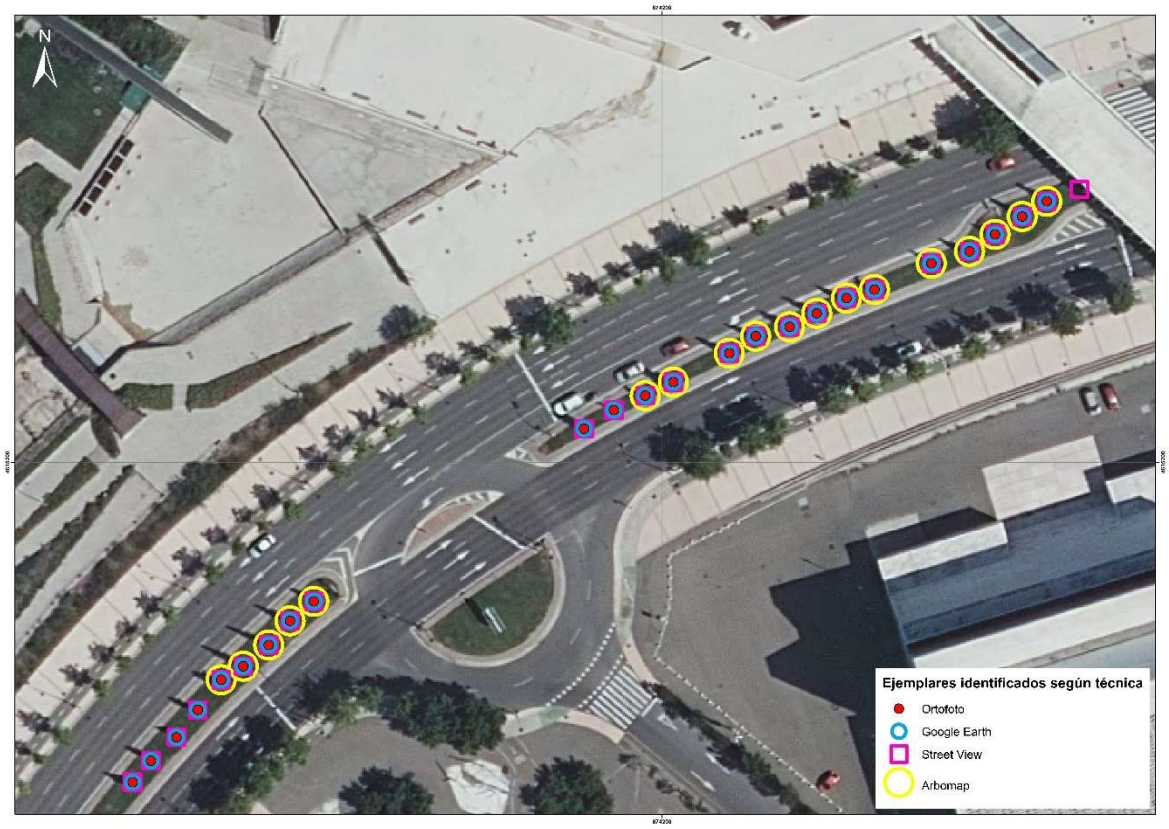


Figura 17. Detalle del mapa con las capas de puntos de todas las herramientas de teledetección utilizadas y los datos de Arbomap.

El resultado final fue un mapa de puntos organizados en 4 capas (Ortofoto, Google Earth, Street View y Arbomap) que muestran la geolocalización de los ejemplares identificados por cada una de las técnicas remotas y Arbomap (Figura 17). El mapa creado permitía saber de cada ejemplar de *Cupressus sempervirens*:

- Si había sido identificado por ortofotografía aérea, por imagen satelital de Google Earth y/o por las imágenes panorámicas de Google Street View. Además, nos daba información sobre si había sido detectado solo por una de las técnicas, por varias o por todas ellas.
- El número de ejemplares que habían sido identificados con técnicas remotas pero no estaban registrados en la base de datos de Arbomap o lo contrario, cuántos árboles registrados en Arbomap no había sido identificados con teledetección.

3.3. Validación del método

Con el propósito de determinar la eficacia de las distintas técnicas y herramientas de teledetección utilizadas para la geolocalización de ejemplares *Cupressus sempervirens*, se realizó una validación del método *in situ*. La validación consistió en recorrer la superficie de nuestras áreas de estudio, calle a calle, confirmando la presencia o no de cada uno de los ejemplares de *Cupressus sempervirens* geolocalizados previamente.

Para poder llevar a cabo la validación de manera ordenada y evitar así los posibles errores, se prepararon dos cuadernos de campo (uno de cada una de las zonas de trabajo), en los cuales se imprimió cada una de las celdas numeradas en tamaño din A3, para poder así realizar la comprobación celda por celda (Figura 18).

Figura 18. Cuadernos de campo utilizados para la validación a pie.

Una vez realizada la validación *in situ*, se procedió a registrar los datos obtenidos en ArcGIS, creando una nueva capa de puntos con los ejemplares *Cupressus sempervirens* observados y confirmados de forma presencial.

3.4. Mapa de densidad del género *Cupressus*

Para la creación de un mapa de densidad de los ejemplares del género *Cupressus* en la ciudad de Zaragoza, fueron imprescindibles los datos disponibles en la base de datos del software Arbomap. Gracias a la base de datos de Arbomap, se pudieron conseguir las

coordenadas de todos los ejemplares del género *Cupressus* de titularidad pública registrados en el municipio de Zaragoza.

El procedimiento para obtener estos datos consistió, en primer lugar, en realizar una selección de todos los ejemplares del género *Cupressus*. Como ya se explicó en el apartado anterior, el programa Arbomap carga por defecto la totalidad de los árboles existentes en todo el término municipal de Zaragoza, por lo que se procedió a hacer una "selección por datos".

Este tipo de selección consiste en realizar un filtrado de entre todos los árboles presentes en el inventario de la base de datos, a partir de características elegibles. En este caso se filtró a partir de la opción "especie", en la cual se seleccionaron todas las especies del género *Cupressus* disponibles en la configuración: *Cupressus sp.*, *Cupressus sempervirens Stricta*, *Cupressus sempervirens Pyramidalis*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressus macrocarpa "Goldcrest"*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus lusitanica*, *Cupressus glabra* y *Cupressus arizonica*.

El siguiente paso consistió en crear un "informe de inventario", de igual forma que en el apartado anterior (Figura 16), que indicase de cada ejemplar la especie, la coordenada X y la coordenada Y. Posteriormente, estos datos fueron exportados en una tabla de formato Excel y cargados en el programa ArcGIS, en el cual se creó una capa de puntos con los datos de las coordenadas que se denominó "coordenadas_total".

A partir de los datos de las coordenadas, se pudo crear el mapa de densidad mediante una de las herramientas de interpolación del programa ArcGIS llamada "IDW". Esta herramienta interpola una superficie de ráster a partir de puntos (en este caso las coordenadas los cipreses) utilizando una técnica de distancia inversa ponderada.

El procedimiento para poder realizar el análisis espacial de interpolación con IDW consistió, en primer lugar, en crear una capa de mallado que cubriese toda la ciudad de Zaragoza. Hubo que hacer varias pruebas para determinar qué tamaño de celdas del mallado proporcionaba un mapa más representativo de la densidad. Se probó con tamaños de celda de 700, 1.000, 1.100, 1.200 y 1.500 m^2, siendo el más representativo el obtenido a 1.100 m^2 con la herramienta IDW.

Una vez realizada la capa de mallado con el tamaño de celda adecuado, se realizó una determinación de cuántos cipreses había en cada una de las celdas mediante la herramienta "Spatial Join".

Con esta información, ya se pudo, finalmente, aplicar la interpolación IDW y obtener el mapa de densidad.

4. Resultados y discusión

4.1. Geolocalización de *Cupressus sempervirens* en el Parque del Agua y Montecanal-Valdespartera

Como se indica en el apartado Objetivos, el objetivo principal que se ha buscado en este TFG fue la geolocalización de ejemplares de *Cupressus sempervirens* en la ciudad de Zaragoza mediante diferentes técnicas de teledetección y la herramienta de gestión Arbomap en dos zonas de estudio con características completamente diferentes. El Parque del Agua se trata de una zona verde de titularidad enteramente pública y con espacios abiertos, sin concentración de edificaciones ni de gran masa vegetal, por lo que hay pocas interferencias en la identificación de ejemplares. Por el contrario, los barrios periféricos de Montecanal y Valdespartera conforman una zona residencial en la que la mayor parte de zonas verdes son de titularidad privada (jardines privados, zonas verdes comunitarias, etc.) y espacios cerrados que dificultan la identificación de ejemplares. Teniendo en cuenta que el software de gestión Arbomap únicamente contabiliza los ejemplares de titularidad pública, es esperable una mayor diferencia con las herramientas de teledetección de acceso libre en esta última zona de estudio.

Tabla 1. Número de ejemplares y tiempo requerido en la identificación de *Cupressus sempervirens* en el Parque del Agua.

Técnica	Ortofotos PNOA	Google Earth	Google Street View	Ortofoto + Google Earth + Google Street View	Arbomap
Nº de ejemplares	306	333	340	383	356
Tiempo (minutos)	33	56	130	219	5

En el Parque del Agua se contabilizaron 306 ejemplares de *Cupressus sempervirens* mediante ortofotografía aérea digital, 333 con imágenes satelitales Worldview de alta resolución de Google Earth y 340 con imágenes GLI de Google Street View. El tiempo requerido para la identificación fue de 33, 56 y 130 minutos para cada una de las técnicas nombradas anteriormente, respectivamente (Tabla 1). En consecuencia, la

combinación de las tres técnicas con herramientas de teledetección de acceso libre permitió la identificación de 383 cipreses en 219 minutos (mapa Anexo 1).

Por otro lado, la herramienta de gestión Arbomap cuenta con un total de 356 ejemplares en su base de datos, 27 menos que la combinación de todas las técnicas (Figura 19) (mapa Anexo 2). Sin embargo, el tiempo necesario para extraer los datos de la aplicación y exportarlos a Arbomap conllevó tan solo 5 minutos.

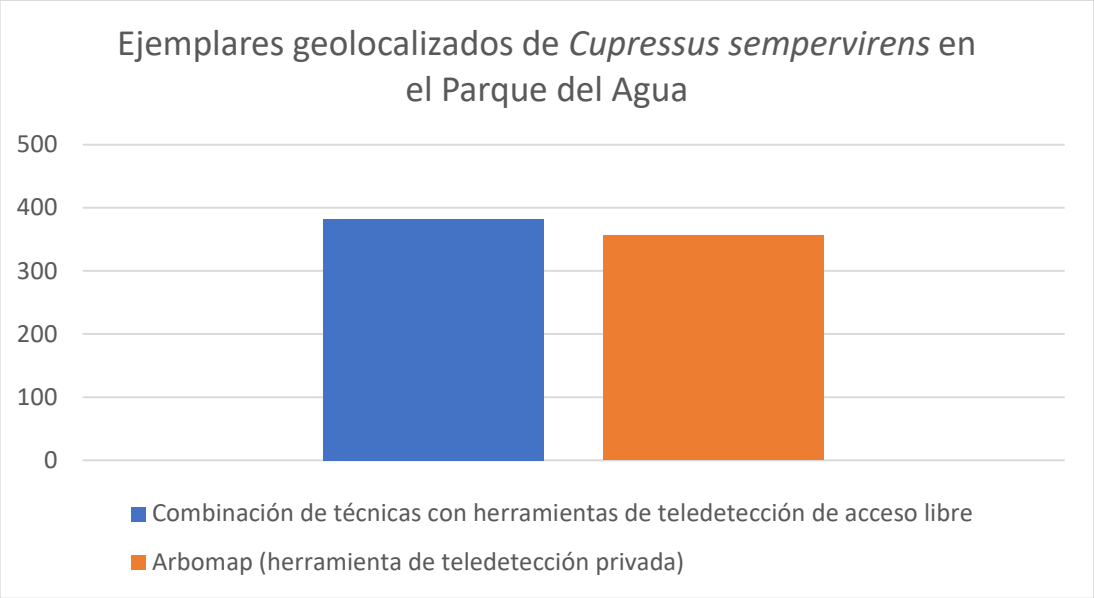


Figura 19. Gráfico de la diferencia de ejemplares geolocalizados entre teledectección de acceso libre y Arbomap en el Parque del Agua.

En Montecanal-Valdespartera el número de ejemplares geolocalizados de *Cupressus* sempervirens y el tiempo requerido para realizar este proceso fue de 569, 554 y 594 ejemplares y 78, 70 y 157 minutos mediante ortofotografía aérea digital del PNOA, Google Earth y Google Street View, respectivamente. La combinación de las tres técnicas con herramientas de teledetección de acceso libre contabilizó un total de 809 cipreses (mapa Anexo 3).

Tabla 2. Número de ejemplares y tiempo requerido en la identificación de *Cupressus sepervirens* en los barrios de Montecanal-Valdespartera.

Técnica	Ortofotos PNOA	Google Earth	Google Street View	Ortofoto + Google Earth + Google Street View	Arbomap
Nº de ejemplares	569	554	594	809	471
Tiempo (minutos)	78	70	157	305	5

En Montecanal-Valdespartera el número de ejemplares geolocalizados de *Cupressus sempervirens* y el tiempo requerido para realizar este proceso fue de 569, 554 y 594 ejemplares y 78, 70 y 157 minutos mediante ortofotografía aérea digital del PNOA (Tabla 2). El procedimiento fue el mismo que en la zona del Parque del Agua, por lo que se comenzó con la geolocalización mediante ortofotografía aérea digital del PNOA, Google Earth y Google Street View respectivamente. La combinación de las tres técnicas con herramientas de teledetección de acceso libre contabilizó un total de 809 cipreses.

Por último, la base de datos de Arbomap cuenta con un total de 471 ejemplares de cipreses en esta zona. Esto se traduce en que las herramientas de teledetección de acceso libre geolocalizaron 338 cipreses más que el software Arbomap (Figura 20) (mapa Anexo 4).

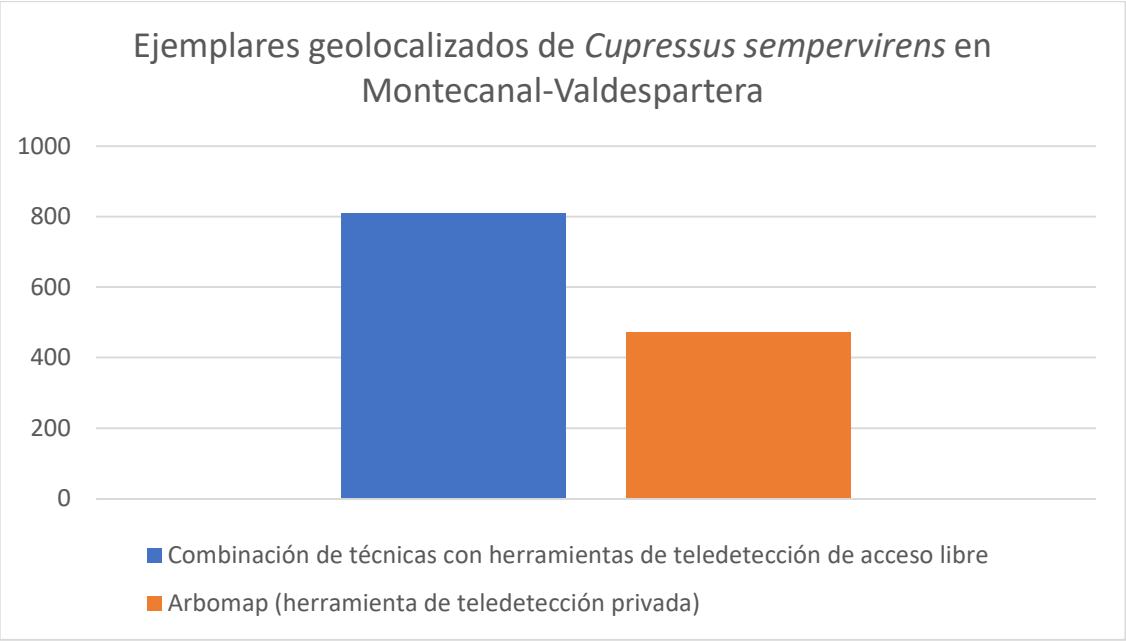


Figura 20. Gráfico de la diferencia de ejemplares geolocalizados entre teledectección de acceso libre y teledetección privada en Montecanal-Valdespartera.

De los resultados obtenidos durante el proceso de geolocalización se pueden sacar algunas conclusiones importantes. En primer lugar, se observó que la resolución era mejor en la ortofotografía aérea digital que en la imagen satelital, por el contrario, el contraste y los colores eran mejores en la imagen satelital. En el caso del Parque del Agua, el número de ejemplares detectados utilizando imágenes satelitales de Google Earth fue superior a los identificados con ortofotos. Por el contrario, en la zona de Montecanal-Valdespartera sucede lo contrario. Es por ello, que es difícil determinar cuál de las dos técnicas ofrece mejores resultados. Podríamos decir que en sitios abiertos como en el Parque del Agua, donde la geolocalización de los ejemplares de ciprés se fundamentó en la identificación de su sombra triangular, el contraste y el color de la imagen son aspectos fundamentales. No sucede lo mismo en zonas cerradas con múltiples obstáculos donde la resolución de la imagen juega un papel más importante en la identificación de los ejemplares.

Por otro lado, el proceso de geolocalización mediante GLI de Google Street View fue el más costoso y lento debido a la metodología que se emplea de comprobación a doble pantalla, ejemplar a ejemplar. Sin embargo, se trata de la técnica empleada más fiable, ya que es lo más parecido a una detección *in situ* de los cipreses, por lo que permite la identificación del mayor número de ejemplares.

4.2. Eficacia del método

Antes de hacer una evaluación final de los resultados obtenidos, para poder conocer la tasa de acierto/error del método, se realizó una validación a pie de los ejemplares geolocalizados mediante las diferentes técnicas de teledetección y el software Arbomap en ambas zonas de estudio. Los datos aparecen resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos numéricos de la validación y tasas de éxito de las técnicas de teledetección en comparación con Arbomap.

Zona	Técnica	*In situ*	Identificados	Verdaderos	Falsos	No identificados	% de acierto
Parque del Agua	Teledetección	393	383	364	19	29	88%
	Arbomap		356	354	2	39	90%
Montecanal-Valdespartera	Teledetección	844	809	796	13	48	93%
	Arbomap		471	469	2	375	44%

Los datos de la tabla anterior nos muestran que, en la zona del Parque del Agua, existen un total de 393 ejemplares. De los 383 ejemplares geolocalizados mediante la combinación de todas las técnicas de teledetección de acceso libre, 19 no pertenecían a la especie *Cupressus sempervirens* o no eran datos reales, y no se reconocieron 29 ejemplares. Estos datos permiten obtener una tasa de acierto del 88%. En el caso de Arbomap, de los 356 ejemplares geolocalizados, únicamente 2 no pertenecían a la especie *Cupressus sempervirens* o no eran datos reales, y 39 ejemplares no se encontraban en su base de datos, por lo que se demuestra una tasa de acierto del 90%, 2 puntos por encima de la técnicas de teledetección.

En la zona de Montecanal-Valdespartera, la validación *in* situ permitió identificar un total de 844. De los 809 ejemplares geolocalizados mediante métodos remotos, 13 no pertenecían a la especie *Cupressus sempervirens* o no eran datos reales, y no fueron identificados 48 individuos, por lo que la tasa de éxito se sitúa en el 93%. En el caso de Arbomap, de los 471 ejemplares geolocalizados, 2 no pertenecían a la especie *Cupressus sempervirens* o no eran datos reales, y faltaban 375 en su base de datos al encontrarse en zonas de ámbito privado. Estos datos permiten establecer una tasa de éxito al software Arbomap muy baja, de en torno al 44% para esta zona de estudio.

Estos valores demuestran que en zonas de titularidad pública las tasas de acierto tanto de Arbomap como de la combinación de técnicas remotas, son muy altas, si bien son

ligeramente superiores las de Arbomap debido a que la sombra triangular proyectada por los cipreses de la especie *Cupressus* sempervirens puede confundirse con otros árboles de pequeño porte.

Por el contrario, la combinación de técnicas de teledetección libre en una zona público-privada representa la metodología de geolocalización más fiable con un porcentaje de éxito del 93% y más del doble de eficaz que Arbomap, que sólo muestra una tasa de éxito del 44%.

Como ya se ha explicado anteriormente, esta gran diferencia se debe a la mayor limitación del programa, que consiste en no registrar los ejemplares de titularidad privada.

Dado que las ciudades están formadas por la agrupación de zonas de titularidad pública y privada, la combinación de las técnicas de teledetección de acceso libre son la herramienta más recomendable en la cartografía de los ejemplares de *Cupressus sempervirens*.

♦ Ventajas y limitaciones del método

La cartografía realizada y los resultados de la validación del método demuestran que:

1) Dentro de las tres técnicas de teledetección empleadas, Google Street View permite la identificación del mayor número de ejemplares si bien requiere un mayor tiempo de ejecución.

2) Una cartografía de alta precisión requiere de la combinación de las tres herramientas de teledetección de acceso libre (Ortofotografía, Google Earth y Google Street View). Su combinación permite la identificación y geolocalización de la mayoría de los ejemplares de *Cupressus sempervirens* con altas tasas de acierto de entre el 88 y el 93% en un breve espacio de tiempo. Estas tasas de acierto superan entre 14 y 19 puntos a los resultados obtenidos en los estudios de la bibliografía consultada que también utilizan combinación de técnicas (Katz, Batterman y Brines, 2020). Si consideramos las áreas de las dos zonas de estudio (81,5 ha del Parque del Agua y 270,2 ha de Montecanal-Valdespartera) y el tiempo necesario para llevar a cabo la geolocalización (219 y 305 minutos, respectivamente) obtenemos un rendimiento muy alto de 0,67 ha/minuto o el equivalente a recorrer en detalle un área de un cuadrado de 81 m de lado por minuto. Además, el método propuesto permite geolocalizar ejemplares de titularidad privada, lo que representa una ventaja frente al software de gestión Arbomap, al cual dobla en eficacia en zonas residenciales. En consecuencia,

este método podría suponer un gran ahorro en tiempo de trabajo para los técnicos encargados de realizar conteos o inventarios a pie, que se traduciría en un ahorro económico considerable para los organismos públicos. Por otro lado, si bien no es objeto de este TFG, la gratuita disposición tanto de ortofotografías aéreas como de imágenes satelitales de diferentes años, permitirían realizar estudios temporales que aportarían información muy relevante sobre la evolución de los bosques urbanos tales como sus tasas de crecimiento en función del clima y tasas de supervivencia y mortalidad.

3) Todo software de gestión del arbolado debe contar con una base de datos lo más precisa y actualizada posible. En este sentido, Arbomap muestra elevadas tasas de éxito en zonas de titularidad pública, pero muy bajas en zonas público-privadas, que impiden una adecuada planificación del arbolado de la ciudad al carecer de un inventario completo de todos los individuos. En consecuencia, sería recomendable llevar a cabo estudios de teledetección que permitieran añadir a dicha base de datos todos aquellos ejemplares de titularidad privada.

En cuanto a las limitaciones, existen varias condiciones en las cuales la identificación y geolocalización de árboles resulta realmente complicada en zonas muy edificadas, ya que los edificios al proyectar su sombra dificultan la visualización de los árboles. De igual forma, en las zonas con mucha densidad de vegetación y de arbolado, los árboles más grandes tapan a los pequeños y esto impide distinguir unos árboles de otros.

También existen condiciones que pueden derivar en errores humanos a la hora de realizar la identificación y geolocalización de árboles. Por ejemplo, en el caso de *Cupressus sempervirens*, la característica sombra alargada que proyectan, que permite su identificación, se puede confundir con otros elementos del paisaje que proyectan una sombra similar, como farolas, vallas publicitarias, etc. También es importante el hecho de que la mayoría de árboles plantados en las ciudades con motivo ornamental, suelen seguir un patrón y esto puede suponer una ventaja a la hora de identificarlos o una desventaja, ya que puede confundir a la persona que está realizando la identificación. Todos estos factores explican que el porcentaje de error de las técnicas de teledetección se sitúe en torno al 10%.

A pesar de estas limitaciones, la alta tasa de éxito alcanzada con *Cupressus sempervirens* gracias a su morfología triangular y la geometría de su sombra, abre la posibilidad del uso de esta metodología en el conteo de otras especies con capacidad

alergénica cuya morfología permita su identificación desde una vista aérea cenital, tales como olivos (*Olea europaea*) y los plátanos de sombra (*Platanus hispánica*).

4.3. Mapa de densidad del género *Cupressus*

A continuación, se muestra un modelo de densidad arbóreo del género *Cupressus* basado exclusivamente en los 12.302 ejemplares de titularidad pública integrados en la base de datos de Arbomap y considerando un tamaño de celda de 1.100 m^2.

Las especies reconocidas en el programa incluyen individuos de *Cupressus sempervirens, macrocarpa, lusitánica, glabra y arizonica* (Figura 21). El mapa de densidad resultante muestra las zonas de menor a mayor concentración de cipreses, en una graduación de colores desde el verde hasta el granate conforme aumenta la densidad de individuos. De este modo, se evidencia que los barrios de Torrero y San José y la zona de la Universidad, presentan un número muy elevado de cipreses en sus calles.

No obstante, en base a las bajas tasas de éxito de Arbomap en el proceso de geolocalización de *Cupressus sempervirens* en zonas privadas, este mapa debería ser reelaborado incluyendo todos los ejemplares de titularidad privada de la ciudad mediante técnicas de teledetección y posteriormente debería ser validado *in situ*. Dicho mapa sería el punto de partida para la elaboración de futuros mapas de concentración de polen de alta resolución en el que se incluyeran variables climáticas relevantes como la temperatura, la precipitación y la fuerza y dirección del viento responsables de la diseminación del polen.

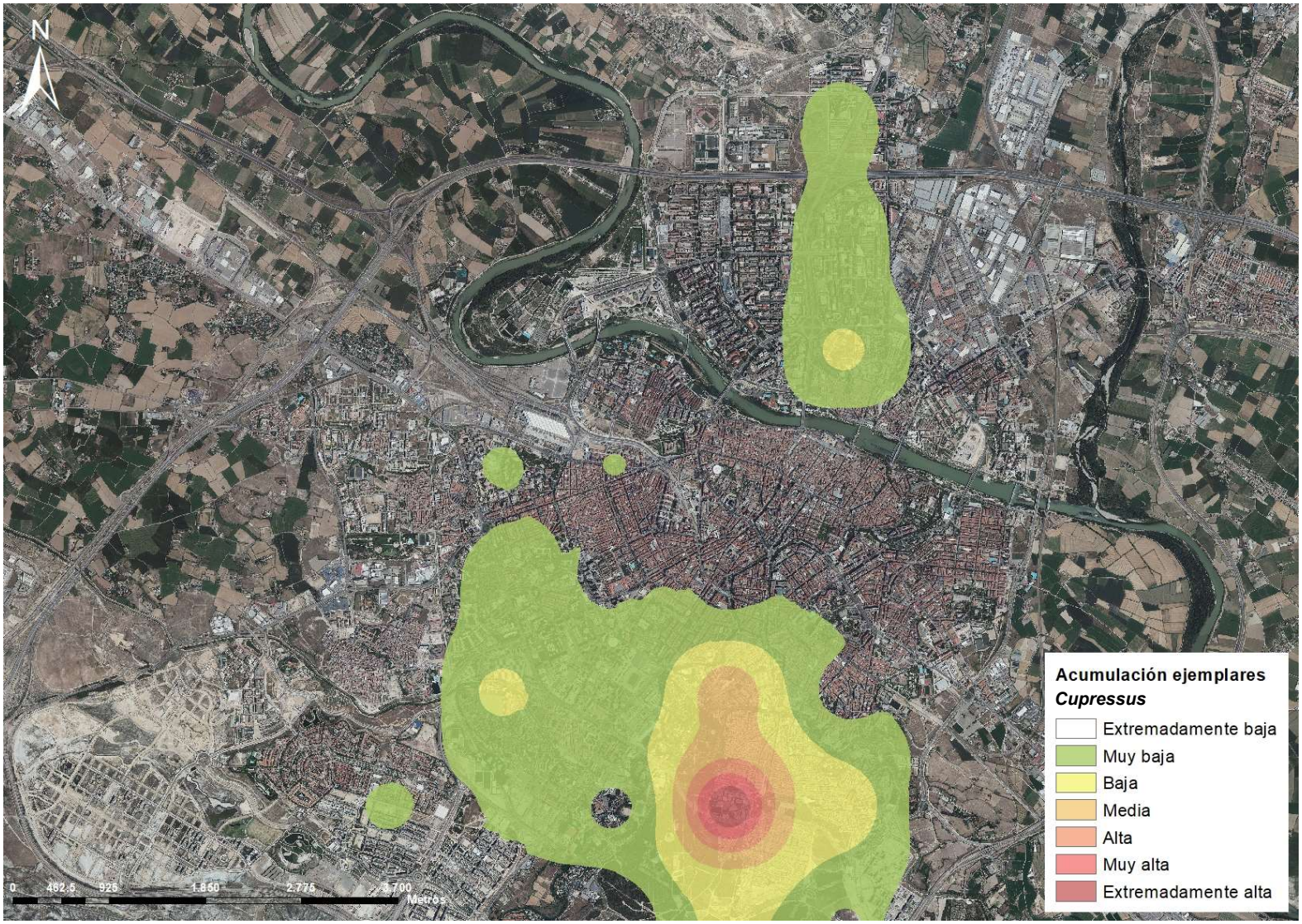


Figura 21. Mapa de densidad polínica del género *Cupressus* en la ciudad de Zaragoza para un tamaño de celda de 1100 m^2.

5. Conclusiones

1. Se ha obtenido una visión global del número y localización de los ejemplares *Cupressus sempervirens* en dos amplias zonas de la ciudad de Zaragoza: el Parque del Agua y los barrios de Montecanal-Valdespartera.
2. La eficacia del método propuesto para identificar ejemplares de cipreses *Cupressus sempervirens* se sitúa en torno al 90%, superando el 74% efectivo de la bibliografía consultada.
3. El uso de técnicas remotas de acceso libre (Ortofotografías del PNOA, Google Earth y Google Street View) en base a la geometría triangular de su sombra han resultado ser de gran utilidad.
4. El inventario obtenido ha sido comparado con la herramienta Arbomap y ha sido validado mediante un reconocimiento visual *in situ* con un rendimiento superficie/tiempo de 0,67 ha/minuto.
5. La herramienta de gestión Arbomap, si bien presenta elevadas tasas de éxito en zonas de titularidad pública, no es una herramienta fiable en zonas en las que existe un gran número de zonas verdes privadas.
6. Debido al gran número de cupresáceas de titularidad privada en las zonas residenciales, sería conveniente llevar a cabo el inventario completo de árboles de la ciudad de Zaragoza mediante el uso de herramientas de teledetección para integrarlo en Arbomap.

6. Bibliografía

Aizpuru, I. (2000). *Claves ilustradas de la flora del País Vasco y territorios limítrofes.* (1. Reimpr. Ed.) Vitoria-Gasteiz: Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia.

Alonzo,M. McFadden, J.P., Nowak, D.J. y Roberts, D.A. (2016). "Mapping urban forest structure and function using hyperspectral imagery and lidar data". *Urban forestry & urban greening,* 17, pp. 135-147 DOI. 10.1016/j.ufug.2016.04.003.

Ayuntamiento de Zaragoza (2021). Cupresaceas. Información polínica. Ayuntamiento de Zaragoza. Disponible en: https://www.zaragoza.es/sede/servicio/informacion-polen/Cupressaceae [Consultado: Mar, 2022].

Cariñanos, P., Adinolfi, C., Díaz de la Guardia, C., De Linares, C. y Casares-Porcel, M. (2016). "Characterization of Allergen Emission Sources in Urban Areas". *Journal of environmental quality,* 45(1),pp. 244-252 DOI: 10.134/jeq2015.02.0075.

Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M.J., Boi, M., Cardador, C., Elvira-Rendueles, B., Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J.M., Pérez-Badía, R., Rodríguez de la Cruz, D., Rodríguez-Rajo, F.J., Rojo-Úbeda, J., Sánchez-Reyes, E., Sánchez-Sánchez, J., Tormo-Molina, R. y Vega-Maray, A.M. (2016). "Salud ambiental de los parques españoles: Aproximación al potencial alergénico de espacios verdes urbanos". *Rev. Salud Ambiental,* 16(1), pp. 33-42.

Castillo Marchuet, M.J. (2016) *Alergia a cupresáceas en la población del Vallés Occidental.* Universitat Autònoma de Barcelona.

Castroviejo, S. y Talavera, S. (1999) *Flora Ibérica: Plantas Vasculares de La Península Ibérica E Islas Baleares*. Volumen I. Madrid. Real Jardín Botánico: C.S.I.C.

Cuadrat, J.M., Sanz, M.A., Serrano, R., Tejedor, E. (2014). "El clima del Término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global". Universidad de Zaragoza: Departamento de Geografía.

D'Amato, G. y Liccardi, G. (2002). "The increasing tren of seasonal respiratory allergy in urban áreas". *Allergy (Copenhagen),* 57(s71), pp. 35-36 DOI: 10.1034/j. 1398-9995.2002.057s71035.

Elduque Palomo, A.I., Martínez Rica, J.P. y Aldea Chagoyen, C. (2012). *Los árboles del campus*. (1ª ed.) Universidad de Zaragoza: Facultad de Ciencias.

Gandolfo Cano, M.M. (2013) *Los aeroalérgenos como factor condicionante de la alergia respiratoria*. *Polen de cupresáceas*. Unidad de Alergología. Hospital Universitario de Fuenlabrada.

Google (2022). *Fuentes de las fotografías. Street View*. Disponible en: https://www.google.com/intl/es/streetview/explore/ [Consultado: Abr, 2022].

Instituto Geográfico Nacional (2021). *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*. Disponible en: https://pnoa.ign.es/ [Consultado: Abr, 2022].

Katz,D.S.W., Batterman, S.A. y Brines, S.J. (2020). "Improved Classification of Urban Trees Using a Widespread Multi-Temporal Aerial Image Dataset". *Remote sensing (Basel, Switzerland*), 12(15), pp. 2475 DOI: 10.3390/rs12152475.

Lara, B., Rojo, J., Blanco, J.J., Cardador, C., Serrano, J.I., Soriano, D. y Pérez-Badia, R. (2017) *Flora ornamental y potencial alergénico de los espacios verdes urbanos. Comparativa en parques de la ciudad de Toledo.* Congreso SESA.

Maxar Technologies (2022). *Earth Intelligence & Space Infrastructure*. Disponible en: https://www.digitalglobe.com [Consultado: Abr, 2022].

Masek, J.G. (2021). *Landsat Science NASA*. Disponible en: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/ [Consultado: Abr, 2022].

Menéndez Valderrey, J.L. (2009) *Cupressus sempervirens*. Asturnatura. Num. 240. ISSN 1887-5068. Disponible en: https://www.asturnatura.com [Consultado: Mar, 2022].

Montealegre de Contreras. L. (2006). "Una propuesta de Geoimágenes: Google Earth". *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 14(2), pp. 108-117.

Pan, T., Kuang, W., Hamdi, R., Zhang, C. Zhang, S., Li, Z. y Chen, X. (2019). "City-Level Compaarision of Urban Land-Cover Configurations from 2000-2015 across 65 Countries within the Global Belt and Road". *Remote Sensing*, 11(13), pp. 1515 DOI: 10.3390/rs11131515.

Sacristán Romero, F. (2006), "Teledetección satelital en la visión territorial y sistemas de protección ambiental urbano-rural (1ª parte)." Urbano, Vol. 9, núm.14, pp.77-84. ISSN: 0717-3997.

Subiza Garrido-Lestache, J. (2004). "Pólenes alergénicos en España". *Allergologia et immunopathologia*. 32(3), pp. 121-124 DOI 10.1016/S0301-0546(04)79297-6.

Szantoi, Z. y Strobl, P. (2019). "Copernicus Sentinel-2 Calibration and Validation". *European Journal of Remote Sensing,* 52(1), pp. 253-255 DOI: 10.1080/22797254.2019.1582840.

Tecnigral (2022). *Arbomap. Tecnigral consultora de servicios urbanos y medio ambiente*. Disponible en: https://www.tecnigral.es/arbomap [Consultado: Arb, 2022].

Valero Santiago, A.L. y Cadahía García, Á (2002). *Polinosis. Polen y alergia.* Barcelona: MRA Ediciones S.L.

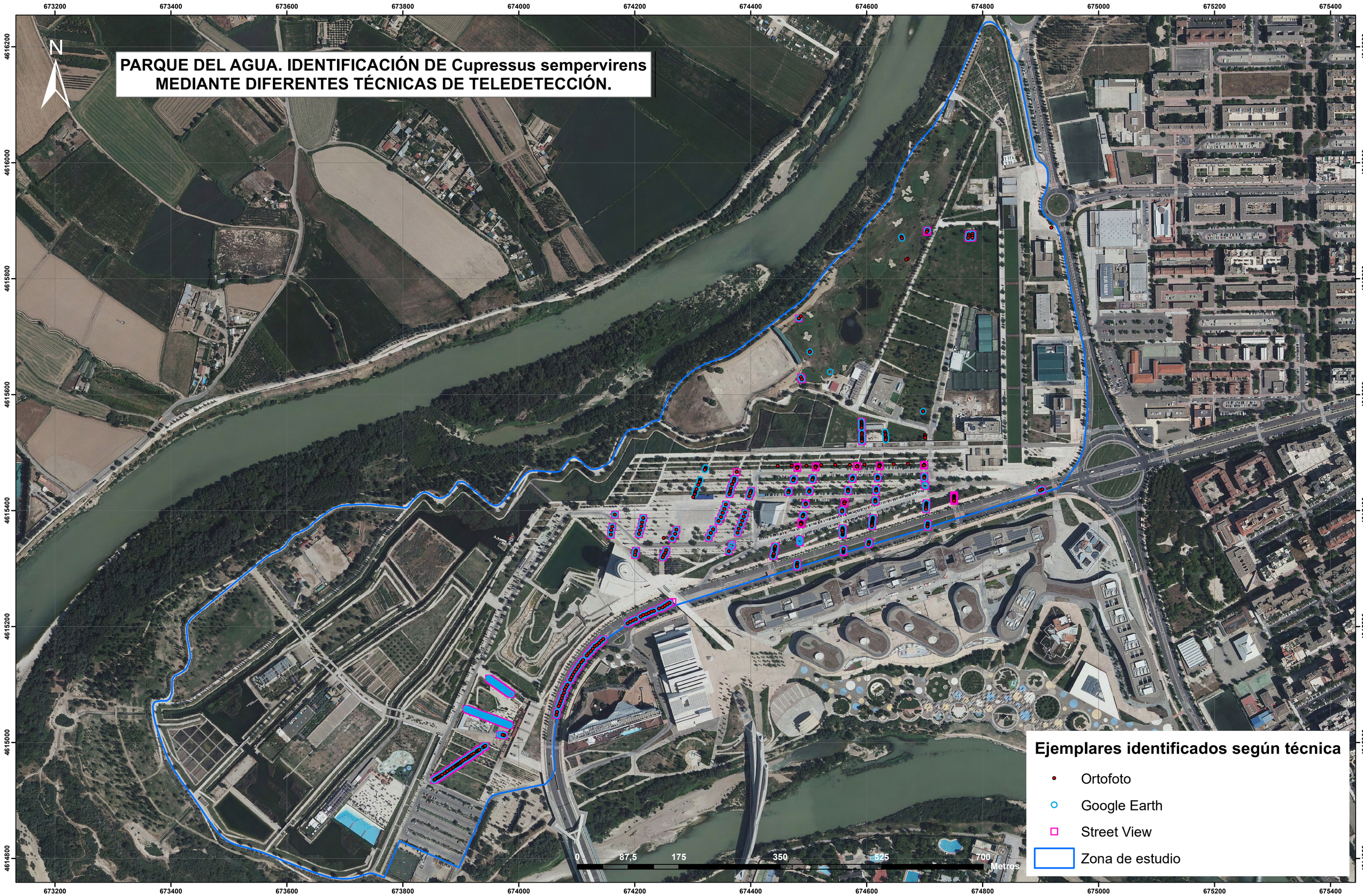
Velasquez-Camacho, L., Cardil, A., Mohan, M., Etxegarai, M., Anzaldi, V., y Miguel, S. (2021). "Remotely Sensed Tree Characterization in Urban Areas: A Review". Remote Sensing, 13, 4889 DOI: 10.3390/rs13234889.

Wang, K. Wang, T. y Liu, X. (2018). "A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airbone LiDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment". *Forests,* 10(1), pp. 1-18 DOI: 10.3390/f10010001.

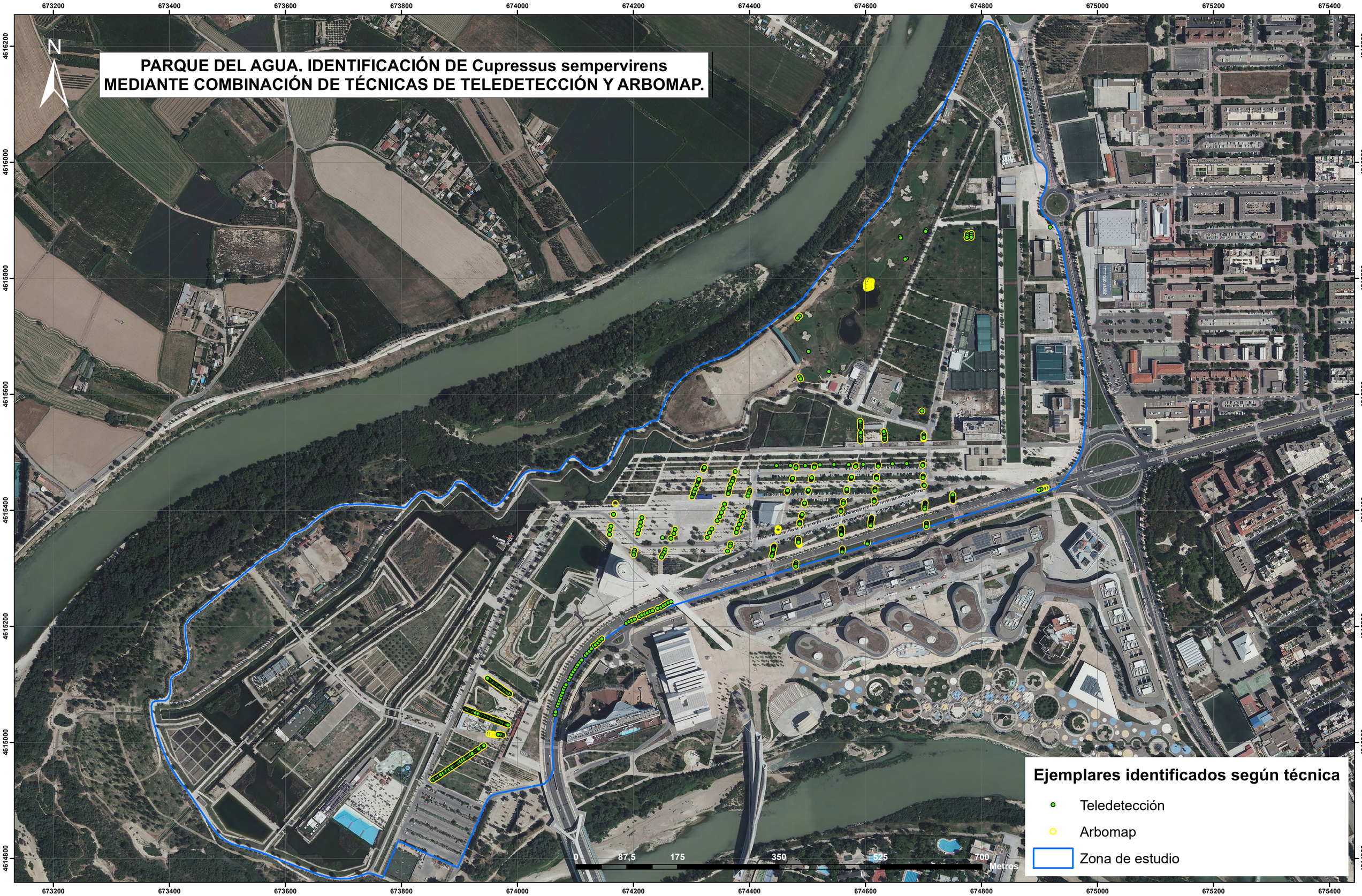
Wegner, J.D., Branson, S., Hall, D., Schindler, K. y Perona, P. (2016). "Cataloging Public Objects Using Aerial and Street Level Images – Urban Trees". IEEE, pp. 6014-6023.

7. Anexos

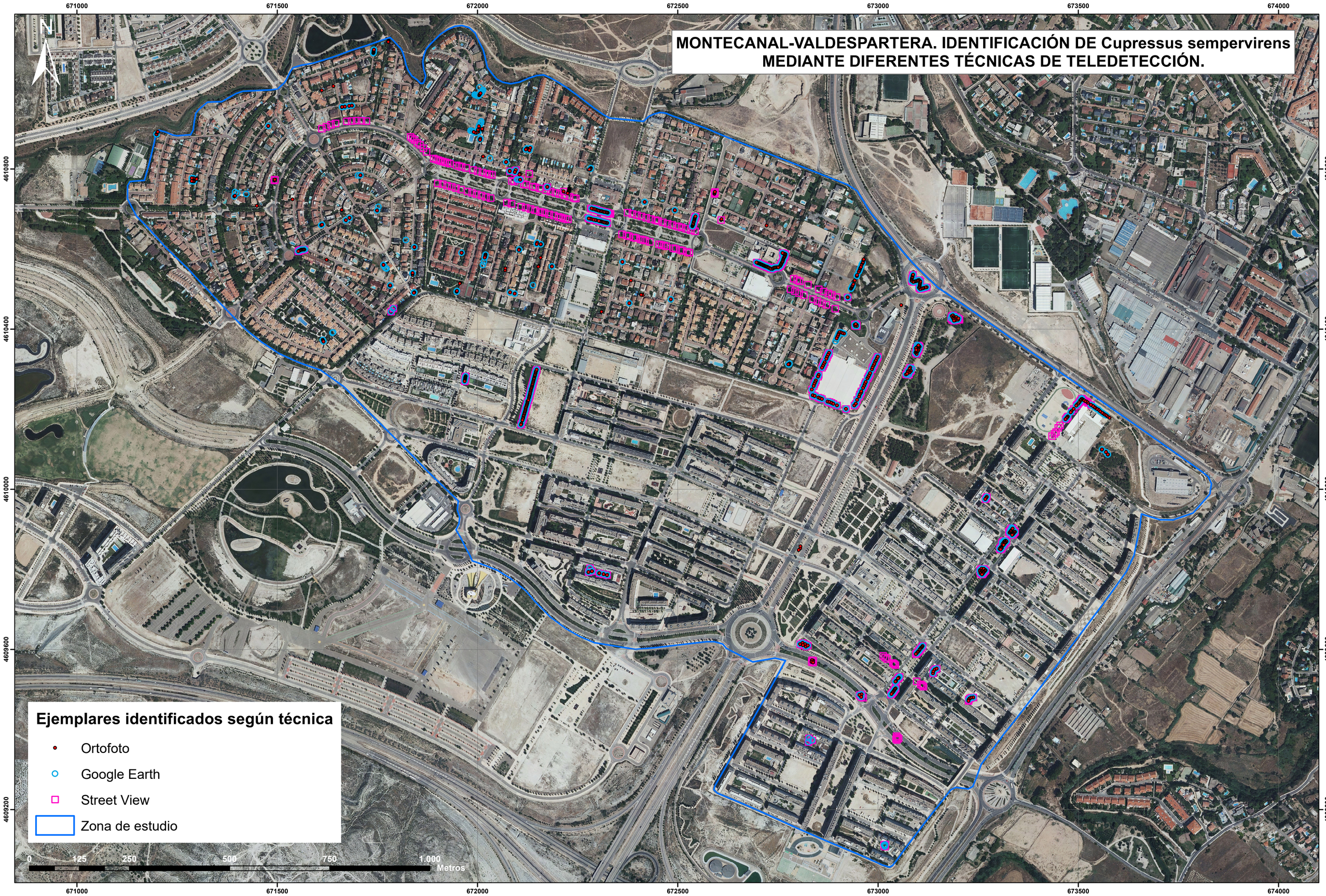
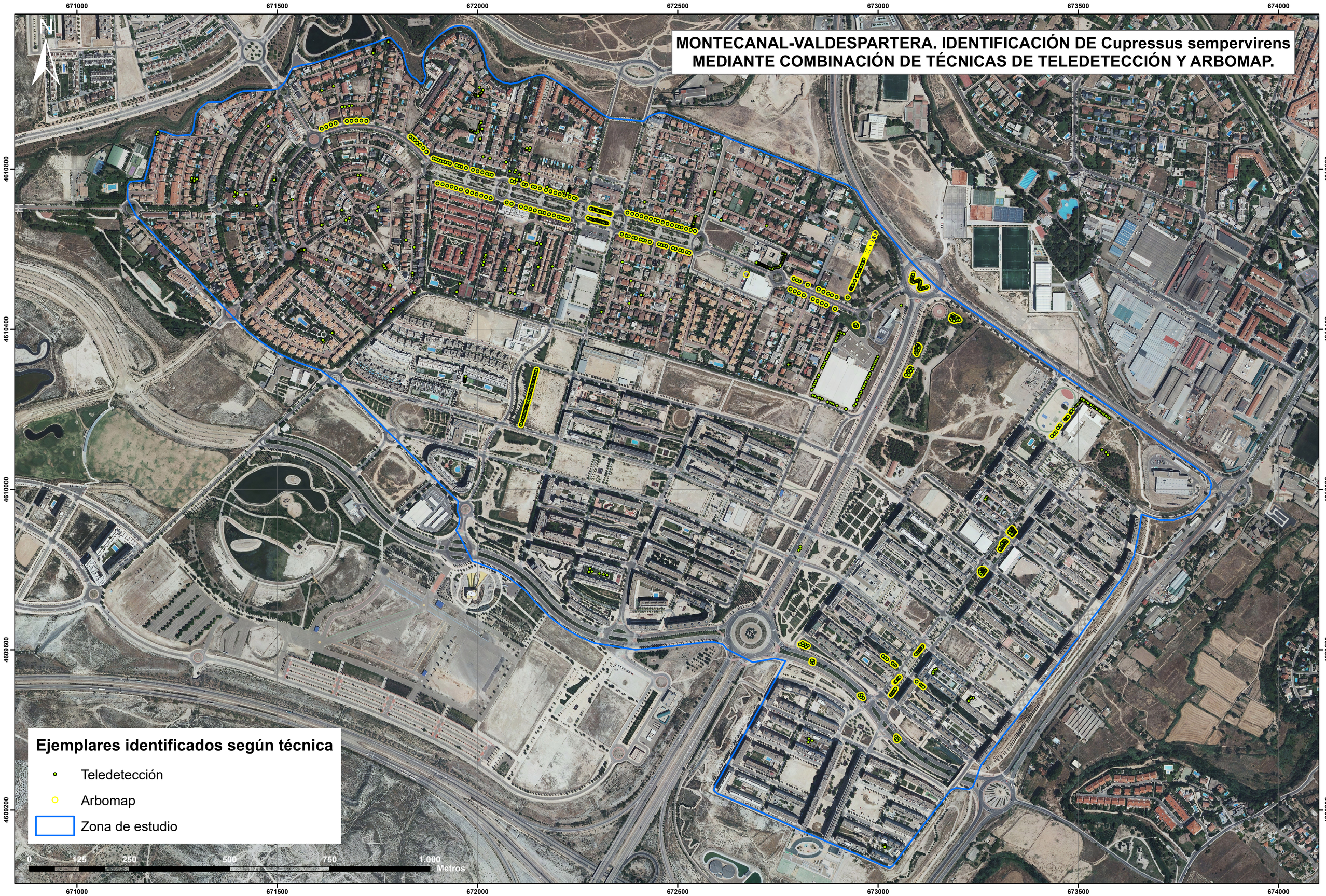
Anexo 1. Mapa Parque del Agua. Identificaciónn de Cupressus sempervirens mediante diferentes técnicas de teledetección.



Anexo 2. Mapa Parque del Agua. Identificaciónn de Cupressus sempervirens mediante combinación de técnicas de teledetección y Arbomap.



Anexo 3. Mapa Montecanal-Valdespartera. Identificación de Cupressus sempervirens mediante diferentes técnicas de teledetección.



Anexo 4. Mapa Montecanal-Valdespartera. Identificación de Cupressus sempervirens mediante combinación de técnicas de teledetección y Arbomap.