

2025

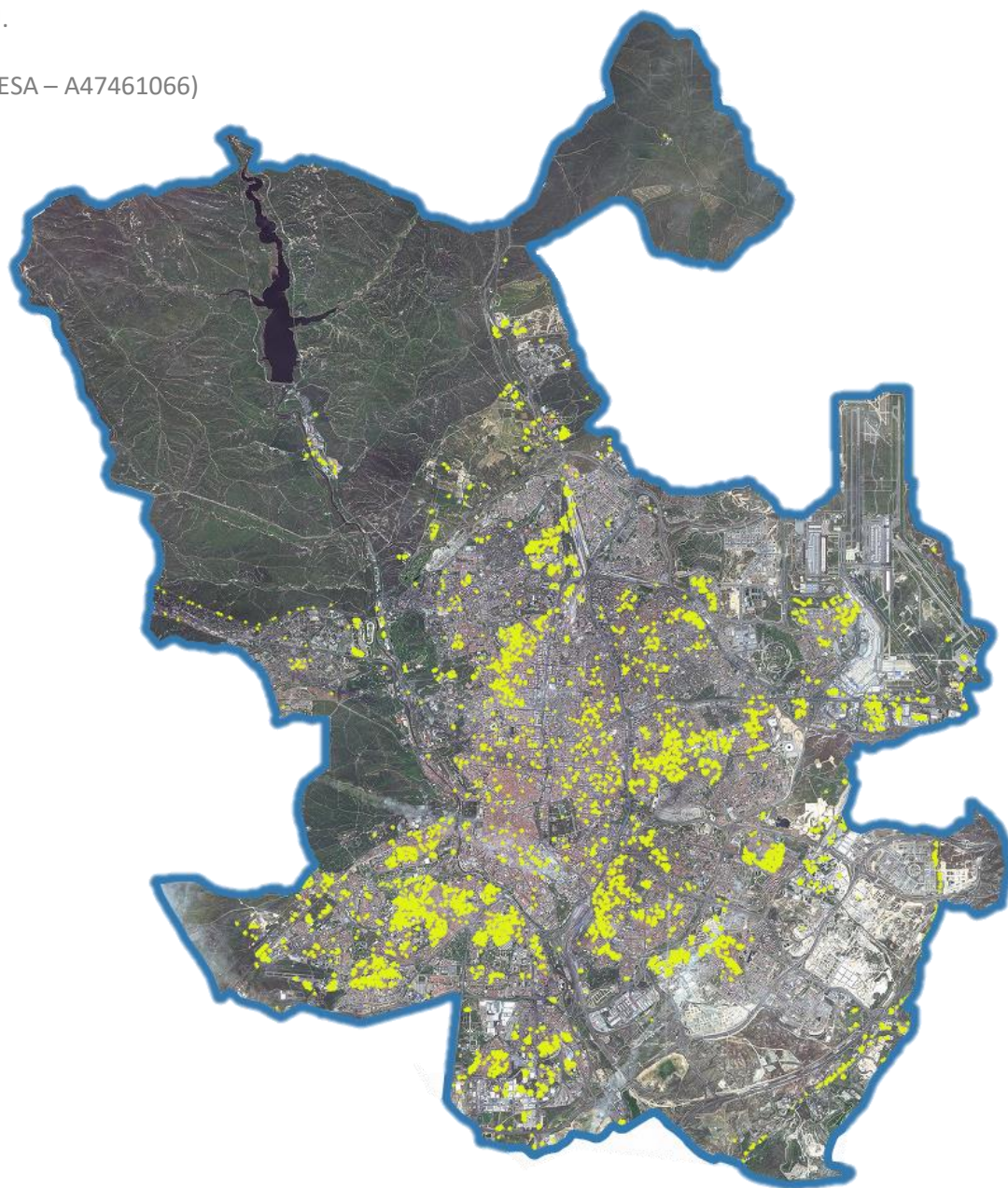


urbanismo, medio ambiente
y movilidad

MADRID

Centro de Observación y
Teledetección Espacial,
S.A.U.

(COTESA – A47461066)



SERVICIOS DE ELABORACIÓN DE UN CENSO DE CUBIERTAS CON AMIANTO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

[DOCUMENTACIÓN TÉCNICA REALIZADA POR COTESA]

CONTENIDO

1.	Introducción.....	2
2.	Ámbito de estudio.	2
3.	Materiales y métodos.....	3
3.1.	Selección de las imágenes satelitales	4
3.2.	Preprocesamiento de las imágenes satelitales.....	5
3.2.1.	Pansharpening.....	5
3.2.2.	Ortorectificación.....	6
3.2.3.	Conversión a reflectividad de superficie.....	6
3.2.4.	Creación de puntos de apoyo.....	8
3.2.5.	Mosaicado.....	9
3.2.6.	Control de calidad de las imágenes.....	10
4.	Detección de cubiertas con amianto.....	11
4.1.	Generación de building footprints.....	11
4.2.	Generación de áreas de entrenamiento.....	12
4.2.1.	Generación de áreas de entrenamiento en Madrid.....	12
4.2.3.	Generación de áreas de entrenamiento en Oviedo.....	16
4.2.4.	Generación de áreas de entrenamiento en Valladolid.....	17
4.2.5.	Generación de áreas de entrenamiento en Salamanca.....	20
4.5.	Algoritmo de clasificación Spectral Angle Mapper (SAM).....	21
4.6.	Validación.....	23
4.4.	Refinamiento de resultados.....	24
3.	Conclusiones.....	25
4.	Entregables.....	26
5.	ANEXOS.....	27
5.4.	Anexo I.....	27

1. Introducción.

El presente documento técnico expone la metodología utilizada para la detección de cubiertas de amianto en la ciudad de Madrid, así como los resultados obtenidos y los entregables asociados al proyecto denominado **“Servicios para la elaboración de mapas de edificios con cubiertas de amianto para el Área de Gobierno de Desarrollo Urbano”**.

El **amianto o asbesto es un mineral fibroso** que suele estar incluido en la composición del fibrocemento, un material de construcción utilizado especialmente durante los años 60 y 70, los asbestos se clasifican en serpentina y en anfíboles de acuerdo a la configuración curvada o recta de sus fibras. Es un material que se destaca por su resistencia al calor, su flexibilidad y la alta resistencia a agentes externos como ácidos, se ha utilizado especialmente en el sector de la construcción, seguido de la industria automovilística, petroquímica, naval, entre otras. **Desde el año 2002 España ha prohibido su uso al clasificarse como material carcinógeno.**

La OMS (organización Mundial de la Salud) señala que cada año se registran entre 20.000 y 30.000 casos de enfermedades relacionadas con el amianto y cobran más de 107.000 vidas cada año producto de la exposición, principalmente por cáncer de pulmón, mesotelioma y asbestosis; debido a esto el Comité Social y Económico de la Unión Europea publicó en 2015 su Informe “Erradicar el amianto en la UE”, que establece como objetivo la completa erradicación del amianto para el año 2028, en consonancia con este informe, el Gobierno de España en la Ley 7/2022 establece que **los ayuntamientos deben elaborar un censo de amianto, y donde las instalaciones o emplazamiento públicos con mayor riesgo deberán estar gestionados antes de 2028.**

El **principal objetivo de esta metodología consistió en** generar una **cartografía de cubiertas de amianto** a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución (imágenes VHR por sus siglas en inglés) utilizando, para ello, técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial y de teledetección. Finalmente se propone la **elaboración periódica de una cartografía de cubiertas de amianto (anual)** para poder **monitorizar el proceso de desamiantado** que se produzca en la zona de estudio.

2. Ámbito de estudio.

El ámbito de trabajo de este proyecto incluye las **cubiertas de los tejados**, que son los elementos detectables con placas de amianto de las construcciones del término municipal de Madrid, tratándose de una **superficie total de 455,31 km²**, incluido un buffer externo de 100 metros al AOI original con el fin de que durante el proceso de ortorectificación de la imagen no se den desplazamientos mayores que pueda dejar la superficie real del término municipal sin cubrir.

En la siguiente figura se puede visualizar la cobertura del área de interés en el término municipal de Madrid al que se le incluyen las pistas del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas:

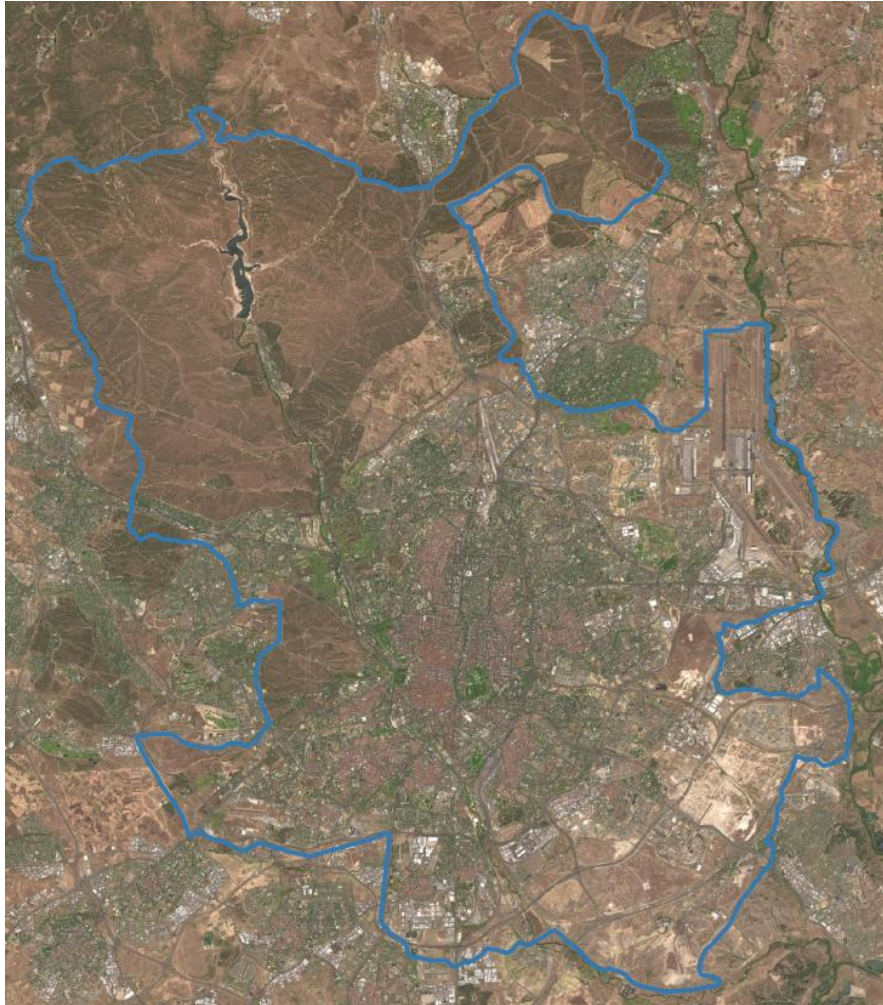


Figura 1. Área de estudio

3. Materiales y métodos.

Para el correcto desarrollo de este proyecto fue necesario seguir un flujo de trabajo preciso que consistió en varias fases: (I) Selección de las imágenes VHR, (II) **Tratamiento de las imágenes satelitales**, (III) **Generación de Dataset**, (IV) **Implementación del algoritmo**, (V) **Control de calidad**, (VI) **Generación de cartografía e informes**.

Para la implementación de estas actividades fue necesario un equipo experto en teledetección y modelos de inteligencia artificial, un experto foto interprete, y un equipo de producción (técnico GIS), adicionalmente se hizo uso de una amplia infraestructura informática adaptada a las necesidades específicas del proyecto.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo enumerado anteriormente el cual describe los datos de entrada, las tareas y los resultados:

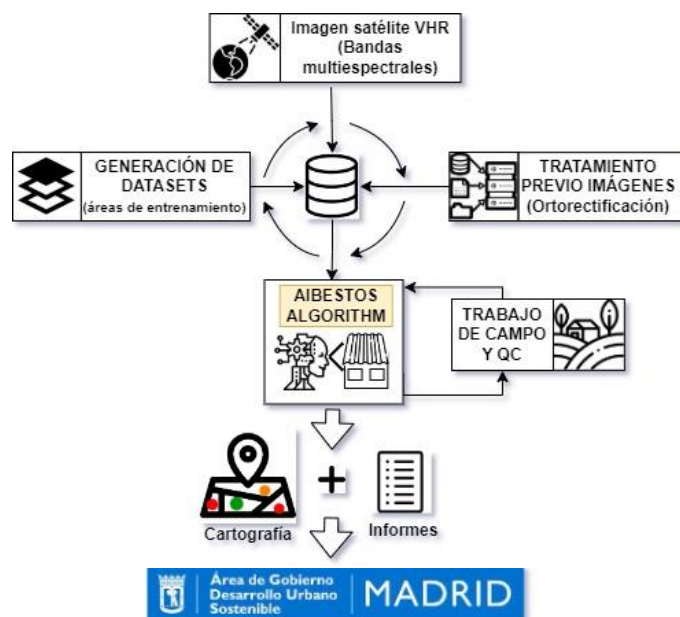


Figura 2. Flujo de trabajo

3.1. Selección de las imágenes satelitales

Para la ejecución de este proyecto fue necesaria la obtención de una imagen de alta resolución (VHR por sus siglas en inglés) que fue **dada por el Ayuntamiento de Madrid** y que dotó de la información suficiente para poder obtener una correcta detección de las cubiertas de amianto.

Para la obtención de la **ortoimagen de primavera de 2025**, se seleccionaron **tres escenas diferentes de WorldView3**. Las imágenes de catálogo disponibles seleccionadas cumplen una serie de parámetros entre ellas (área off nadir, área cubierta de nubes, proximidad por fechas, etc.), habiendo una disponibilidad que cumple con los requisitos anteriormente mencionados, y no habiendo una diferencia temporal, con las que ha sido posible cubrir toda el área de estudio con escenas que poseen características muy similares.

A continuación, se enlistas las especificaciones técnicas de las imágenes utilizadas:

Especificaciones técnicas		Imagen
Fecha	2025/04/01	
Satélite	WorldView3	
Id de la imagen	104005006BDC7A00	
Porcentaje de nubes	0%	
Bandas	8 bandas	
Imagen off Nadir	27.2°	
Elevación del sol	50.2°	
Objetivo máximo de azimut	330.2°	
Máximo GSD	0.38m	

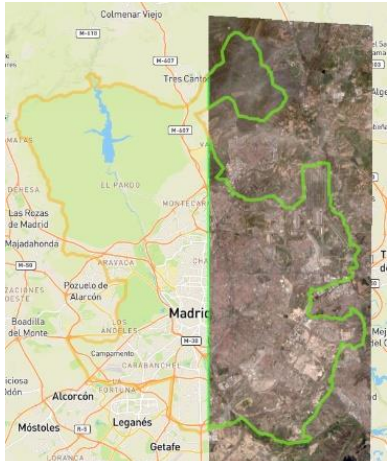
Especificaciones técnicas		Imagen
Especificaciones técnicas		Imagen
Fecha	2025/04/01	
Satélite	WorldView3	
Id de la imagen	104005006BDC7900	
Porcentaje de nubes	1.0%	
Bandas	8 bandas	
Imagen off Nadir	25.4º	
Elevación del sol	50.2º	
Objetivo máximo de azimut	326.8º	
Máximo GSD	0.37M	
Especificaciones técnicas		Imagen
Fecha	2025/04/01	
Satélite	WorldView3	
Id de la imagen	104005006BDC7800	
Porcentaje de nubes	0.1%	
Bandas	8 bandas	
Imagen off Nadir	19.3º	
Elevación del sol	49.9º	
Objetivo máximo de azimut	50.3º	
Máximo GSD	0.34m	

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las imágenes VHR utilizadas.

3.2. Preprocesamiento de las imágenes satelitales.

El algoritmo tiene como base la utilización de una imagen ortorrectificada WorldView que se extrae de MAXAR por parte del Ayuntamiento y que posee una serie de características que se detallaron en el apartado anterior. Adicionalmente es necesario aplicar una serie de procesos sobre las imágenes para obtener un resultado preciso y confiable.

3.2.1. Pansharpening.

A través del **pansharpening** o **refinado pancromático** se puede mejorar la resolución de las imágenes satélite utilizando como referencia una banda pancromática de alta resolución. La técnica permite utilizar como referencia la imagen pancromática de mayor resolución y combinarla con el resto de las bandas de menor resolución generando una nueva imagen multibanda a color y preservando la máxima resolución.

Mediante el pansharpening, conseguimos que la banda pancromáticas se adhiera a las bandas multiespectrales garantizando así que los cambios radiométricos sean los mínimos.

3.2.2. Ortorectificación.

Una vez que las imágenes se encuentran pansharpeadas, se crea un proyecto en CATALYST mediante **Rational Function en PCI que permitirá obtener la ortoimagen**. Para ello, se cargará la escena y se procederá a **extraer los GCPs** (Ground Control Points por sus siglas en inglés), y esto se realizará utilizando una imagen base, en este caso la Ortoimagen PNOA de máxima actualidad.

Una vez obtenidos los GCPs se realiza un control de calidad de los mismos, eliminando aquellos que puedan introducir ruido en la ortorectificación. Como se aprecia en la figura 3 se pueden observar el número total de puntos obtenidos y la calidad de los mismos, tiene que ser suficiente para que no supere un **desplazamiento máximo de x y de 0.24 y 0.24 metros**, inferior a las dos unidades de píxel requeridas (0,3).

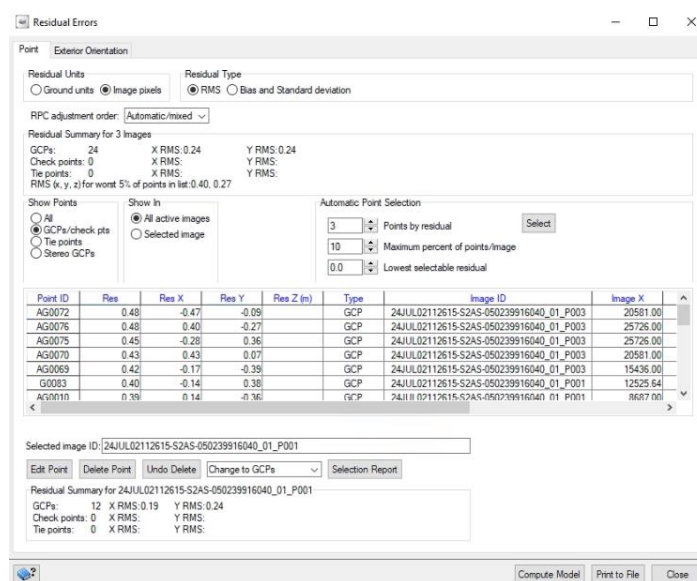


Figura 3: TPs obtenidos tras realizar el cribado de calidad de los mismos.

Una vez realizado este proceso, se procedió a crear la ortoimagen, para ello se precisó del modelo digital del terreno obtenido a partir de la nube de puntos LiDAR PNOA que cubría la escena en la zona de estudio con un metro de resolución, esto posibilitó corregir las distorsiones topográficas que se pudieron dar en la escena, adicionalmente se necesitó una imagen de referencia, para efectos prácticos se hizo uso de la imagen PNOA.

Cabe destacar que se **normalmente se dan errores sobre superficies elevadas**, y esto debe las **desviaciones que se pueden dar sobre edificios y viales** ya que éstos no están **completamente nadirales** (de ahí que se aprecien fachadas) como consecuencia del ángulo de la imagen de satélite.

3.2.3. Conversión a reflectividad de superficie.

Posterior al proceso de ortomosaicado RGB-NIR de la imagen se realizó la **conversión a radiancias desde niveles digitales (ND)**. Una imagen de satélite en bruto contiene valores numéricos denominados Niveles Digitales, y se obtienen a partir de la energía recibida por el

sensor del satélite. **El propósito de esta conversión es recuperar los valores de energía recibida de manera que las unidades en energía por unidad de superficie ($W / m^2 / -sr^{-1} / -\mu m^{-1}$) sean comparables en la imagen y entre ellas.** Esta unidad es la radiancia espectral a nivel de techo de atmósfera y se define como la radiancia espectral que entra en la apertura del sensor de Worldview a una altura de 770 kilómetros. Para ello, usualmente se utiliza una ecuación recomendada por el proveedor de imágenes que, en el caso del sensor WorldView – 3, es la siguiente:

$$L_{\lambda Pixel, Banda} = \frac{K_{Banda} \times q_{Pixel, Banda}}{\Delta \lambda_{Banda}}$$

Donde K_{Banda} es el **factor absoluto de calibración radiométrica** para una banda determinada, $q_{Pixel, Banda}$ es el **número de píxeles radiométricamente corregidos** en la imagen y $\Delta \lambda_{Banda}$ es el **ancho de banda efectivo** para cada una de ellas.

Con las imágenes en radiancias se realizó la **conversión a reflectividad de superficie mediante el modelo de corrección atmosférica 6S** (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum), el cual es un modelo avanzado de transferencia radiativa diseñado para simular la reflexión de la radiación solar en condiciones de una atmósfera libre de nubes en un sistema acoplado superficie-atmósfera, según condiciones específicas geométricas y espectrales. Teniendo en cuenta que la reflectividad es la parte de la irradiancia solar que alcanza la superficie de la tierra y luego se refleja de nuevo a la atmosfera, este **modelo tiene en cuenta los principales parámetros atmosféricos para modelar la dispersión y la absorción** que produce la atmósfera en la longitud de onda del canal del satélite. Dado que el modelo funciona píxel por píxel, se ha generado previamente una LookUpTable que permite consultar directamente el dato para simulaciones del código en base a unos parámetros de entrada. Para el caso del sensor WorldView–3, los parámetros y la ecuación son los siguientes:

- **Perfil atmosférico:** datos de ozono y vapor de agua en la columna de aire.
- **Perfil de aerosoles:** datos de aerosol optical thickness a 550 nm desde la red de Aeronet.
- **Tipo de sensor y el Spectral Function Response** (detalle de la sensibilidad del sensor en el espectro electromagnético).
- **Datos horarios:** hora, día y año.
- **Datos geográficos:** latitud y longitud del centro de la escena.
- **Datos de geometría del sensor:** ángulos azimuth y zenith del sensor y altitud sobre la superficie de la Tierra.

$$\rho_{\lambda} = \frac{y}{1 + (X_c \times y)} ; y = (X_a \times L_{\lambda}) - X_b$$

Donde ρ_{λ} es la **reflectividad a nivel de superficie corregida**, X_a (inversa de la transmitancia), X_b (scattering tipo de la atmósfera) y X_c (reflectividad de la atmósfera por luz isotrópica) **son los coeficientes obtenidos del modelo y el L_{λ} es la radiancia observada**, que es el dato principal de entrada del modelo.

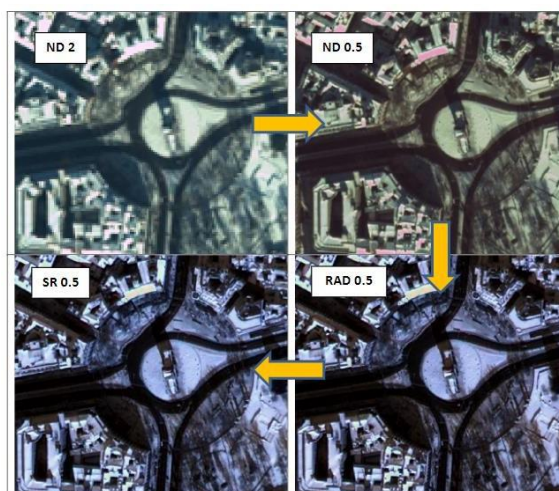


Figura 4. De izqda. a dcha., arriba abajo, correcciones realizadas sobre las imágenes originales (I) Niveles digitales, (II) Niveles digitales pansharpeados, (III) Radiancias, (IV) Reflectividades a nivel de superficie.

3.2.4. Creación de puntos de apoyo.

Una vez obtenidas las diferentes escenas, se crearon una serie **puntos de apoyo y georreferenciación en función a la imagen PNOA**, para así ortorrectificar la imagen sobre ésta. Para ello se ha utilizado la herramienta de ArcMap Georreferencing con la que se establecieron puntos a lo largo de las escenas y sobre la imagen PNOA, desplazando esta primera en función de la calidad y cantidad de los puntos establecidos.



Figura 5. Puntos de Apoyo sobre las escenas que conformarán el mosaico de marzo.

Como se aprecia en la **figura 5**, se establecieron puntos a lo largo de todas las escenas, donde se puede ver como la escena central posee la gran mayoría de esos puntos en los extremos, suficiente para la ortorectificación.

MARZO	
IMAGEN	Ptos. Apoyo
25APR01105929-P2AS_R1C1-050350838020_01_P001	8
25APR01105905-P2AS_R1C1-050350838020_01_P002	8
25APR01105918-P2AS_R1C1-050350838020_01_P003	7
25APR01105922-P2AS_R1C1-050350838020_01_P004	7
TOTAL	30

Tabla 2. Se representan el número total de Puntos de Apoyo para cada escena dentro de cada fecha.

3.2.5. Mosaicado.

Una vez que todas las escenas han sido georreferenciadas, se procedió a la creación del mosaico de las imágenes. Para ello mediante la herramienta Mosaic de CATALYST, se cargaron las escenas y se determinó el **tamaño del pixel que fue de 0.3** (aunque éste lleva arrastrándose desde el momento de la creación del proyecto) y se utilizó el **método de resamplado de convolución cúbica** (cubic convultion en inglés). Este método determina el nivel de gris a partir del promedio ponderado de los 16 píxeles más cercanos a las coordenadas de entrada especificadas y asigna ese valor a las coordenadas de salida.

La imagen resultante fue ligeramente más nítida que una producida con **interpolación bilineal** y **no tiene la apariencia desarticulada producida por el vecino más cercano**. Similar a la interpolación bilineal, se concluye que la convolución cúbica es más apropiada para datos continuos.

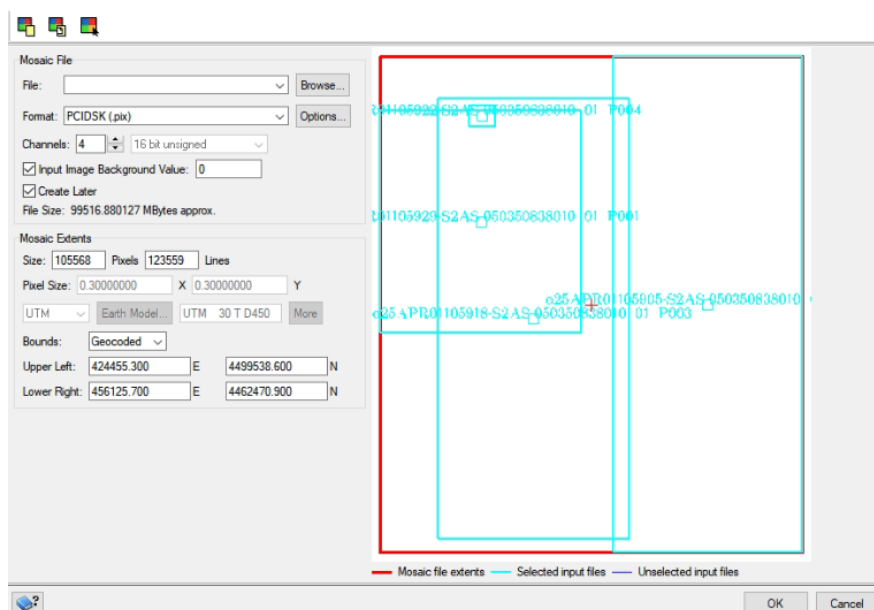


Figura 6. Mosaic Tool con las escenas que formarán la ortoimagen de marzo.

Con esto, **conseguimos que la ortoimagen final sea un continuo sin grandes diferencias entre escenas**, y determinó por sí mismo los trazos que marcaban las líneas divisorias entre las escenas. Es en este punto, se revisó y repaso todo el recorrido de las líneas para poder desplazarlas y así obtener un producto de máxima calidad, esto dado a que puede haber zonas con sombras en una escena y no en otra, la inclinación de los edificios varía, etc., como se aprecia en la Figura 7, donde para solventar el problema la mejor manera fue modificar las líneas de corte entre escenas tomando como referencia las carreteras.



Figura 7. Izq. Línea de corte obtenida, donde se aprecia que, debido a la inclinación en las tomas, los edificios aparecen desplazados. Dcha. Imagen corregida, donde se establece como frontera la carretera para poder corregirla.

3.2.6. Control de calidad de las imágenes.

Con la imagen ortorrectificada final, se procedió a la **introducción de puntos de control para validar la calidad de la ortorrectificación siempre en función a la imagen PNOA**. Para ello se realizó una malla de 3Km por 3Km sobre todo el área de estudio y luego se hizo una selección aleatoria de 30 recuadros en los que se crearon puntos de control sobre la imagen ortorrectificada y la imagen PNOA.

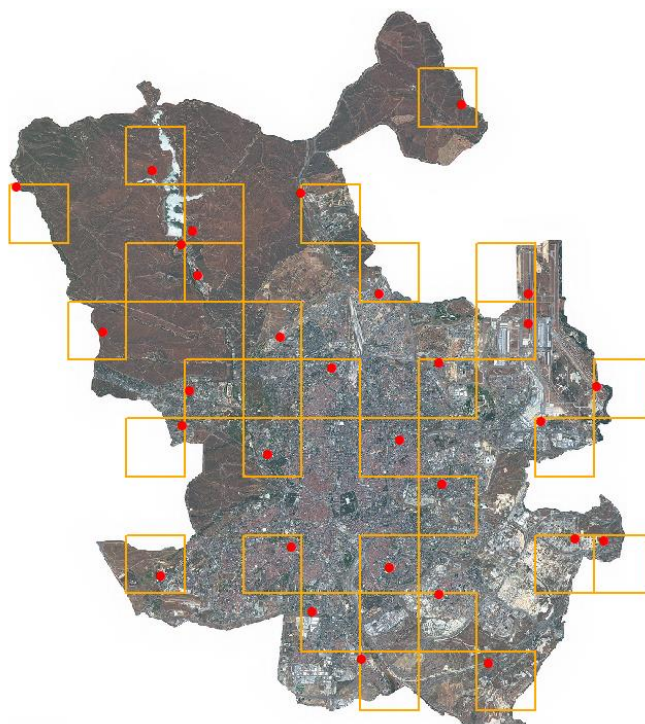


Figura 8. Celdas aleatorias sobre la ortoimagen donde se crearán los puntos de validación sobre PNOA.

Una vez obtenidos los 30 puntos, se extrajeron sus coordenadas y se exportaron a una tabla Excel (**ANEXO I**) donde se comparó la diferencia existente entre ambas imágenes (ortofoto y PNOA), obteniendo como resultado el **valor del error cuadrático medio** (RMSE) que mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos. En otras palabras, compara un valor predicho y un valor observado o conocido, y posee la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

En ambos casos, los RSME obtenidos fueron muy buenos, ya que para la **X** sólo existe un desplazamiento de **0.1661** (inferior al tamaño de un píxel) y para la **Y** **0.1705**. Para ello, se ha utilizado el error cuadrático tanto de X como de Y, y se ha dividido entre 30 que es el número total de muestras.

En global teniendo en cuenta los resultados tanto para X como para Y, obtenemos un **RSME global de toda la imagen de 0.238**, que se extrae de la raíz cuadrada de la resta de X al cuadrado e Y al cuadrado.

RMSEX	0,12062755	RMSEY	0,12993347	RMSEH	0,177295551
--------------	-------------------	--------------	-------------------	--------------	--------------------

Tabla 3. Valores RMSE obtenidos.

4. Detección de cubiertas con amianto.

4.1. Generación de building footprints.

A partir de la imagen VHR del municipio de Madrid se genera una **capa de edificios** (*building footprint*), y estos edificios determinarán las cubiertas sobre las que actuará el algoritmo, obviando el resto de las zonas para así **evitar que se introduzca ruido de otros elementos** que puedan poseer una respuesta espectral similar al que tiene el amianto, aumentando así la eficacia y bondad de la detección.

En la siguiente figura se puede ver la huella de los edificios extraídos para detectar amianto:



Figura 9. Building footprints.

Así mismo, una vez realizada esta detección de los edificios, se realiza a los mismos un **buffer de 5 metros**, con el fin de poder abarcar estructuras colindantes que hayan podido ser obviadas, como por ejemplo garajes, cubiertas menores como cobertizos, o extensiones en los bajos de los propios edificios.

4.2. Generación de áreas de entrenamiento.

Para un correcto funcionamiento del algoritmo, es **imprescindible que exista un conjunto de áreas de entrenamiento** que sean lo más certeras posibles y que posean una gran representatividad del objeto de estudio en cuestión, en este caso, de cubiertas de amianto.

Para ello, se utilizaron muestras que podrían tener diferentes características debido a su ubicación. Tales como:

- Una megaciudad con **gran variabilidad** (y número) de cubiertas (término municipal de Madrid).
- **Zonas industriales** cercanas a grandes núcleos turísticos (municipio de Mahón en Menorca).
- **Zona urbana** de una ciudad media del norte peninsular con fábricas y **cubiertas de diferentes características** (municipio de Oviedo).
- **Zona industrial** en las afueras de una ciudad media (en el término municipal de Valladolid).
- **Zona urbana e industrial** de Salamanca, en el término municipal de Salamanca.

Por tanto, se extraerán áreas de entrenamiento de cinco zonas diferentes de la geografía española que caracterizarán la base de datos que será utilizada para la clasificación de las superficies con amianto.

Se reúnen un total de 1245 áreas de entrenamiento (291 áreas más de las inicialmente planteadas en la oferta) con las que se crea una sólida base de datos basado en las áreas extraídas de Madrid, Mahón, Oviedo, Valladolid y Salamanca. Se considera que es un número suficiente para de ahí extraer la información necesaria a la hora de ser utilizadas en el algoritmo.

La detección de este tipo de cubiertas depende mucho de una correcta selección de áreas de entrenamiento que puedan ayudar a nutrir bien de información al algoritmo, este proceso aumenta la información **suministrada al algoritmo** de manera que quedan representados los diferentes estadios en los que se puede encontrar el amianto a lo largo y ancho de la zona de estudio.

4.2.1. Generación de áreas de entrenamiento en Madrid.

COTESA cuenta con una **detección previa** hecha en el término municipal de Madrid y tras la revisión de los resultados se seleccionan una serie de áreas de entrenamiento que valdrán para nutrir el algoritmo. Dada la extensión del término municipal de Madrid, las **áreas de entrenamiento serán repartidas** por el mismo, así se podrán extraer muestras de diferentes ubicaciones, como son polígonos, centros urbanos, extrarradio, etc.

Para ello, inicialmente se establecieron un total de 350 muestras de todo el término municipal de Madrid, pero tras realizar diferentes pruebas se decidió aumentar éstas hasta las **641** (se añadieron cubiertas extra y las que no fueron omisionadas), teniendo así las mismas muestras que en la entrega anterior.



Figura 10. Muestras escogidas en la Calle Sabadel.



Figura 11. Muestras escogidas en la Calle Rancho.



Figura 12. Muestras escogidas en la Av. Santa Catalina.

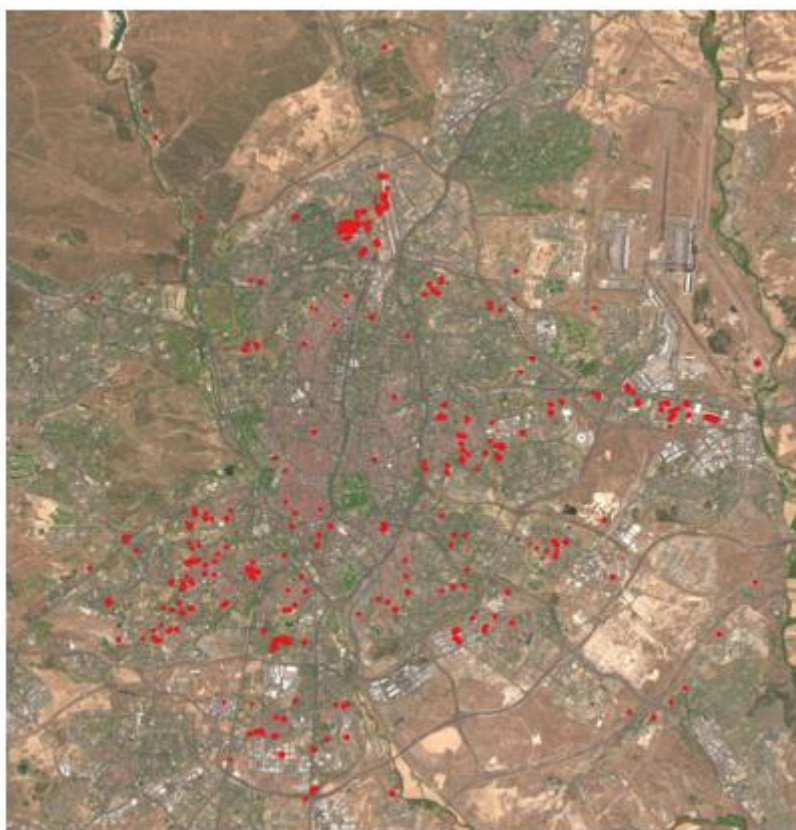


Figura 13. Muestras escogidas sobre el término municipal de Madrid.

2.4.2. Generación de áreas de entrenamiento en Mahón.

Para la extracción de áreas de entrenamiento sobre Mahón, se ha escogido una zona de estudio concreta que es el **polígono industrial** de Mahón.

Estas áreas de entrenamiento tienen unas estadísticas en cuanto a respuesta espectral muy parecida a la que podemos encontrar en las zonas industriales de Salamanca. De esta manera, es más fácil ajustar los parámetros para toda la variedad de tipologías de amianto. En este caso se seleccionarán de esta zona **65 áreas** de entrenamiento diferentes.



Figura 14. Muestras escogidas en la Av. Santa Catalina.



Figura 15. Muestras escogidas en Carrer des Cap Negre.



Figura 16. Muestras escogidas en Av. del Cabo de Caballería.

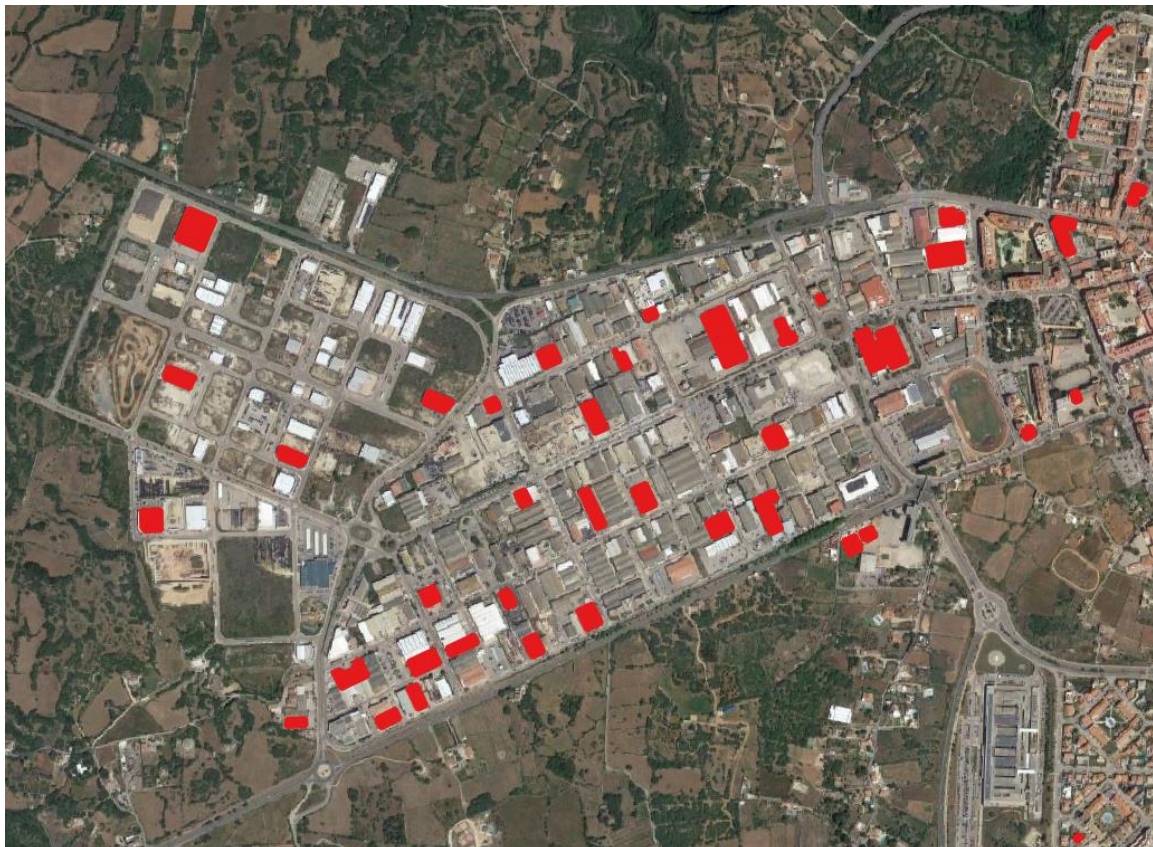


Figura 17. Muestras escogidas sobre el término municipal de Mahón.

2.4.3. Generación de áreas de entrenamiento en Oviedo.

En cuanto a la creación de áreas de entrenamiento sobre el término municipal de Oviedo, se elige un **área industrial, urbano y extrarradio** de la propia ciudad de Oviedo. Estas áreas de entrenamiento describen:

- Una representación de grandes superficies de zonas industriales,
- Edificios de altura variable en el centro del casco
- En las afueras, dentro de la interfaz urbano-rural se mostrarán cubiertas con amianto en pequeñas construcciones (por ejemplo, cobertizos).

Se establecen, por tanto, un total de **125 áreas de entrenamiento** que nutrirán la base de datos.



Figura 18. Muestras escogidas en Calle Calderon de la Barca.



Figura 19. Muestras escogidas en Calle de Almacenes Industriales.



Figura 20. Muestras escogidas en Calle Monseñor Óscar Arnulfo Romero.



Figura 21. Muestras escogidas sobre el término municipal de Oviedo.

2.4.4. Generación de áreas de entrenamiento en Valladolid

Dentro de Valladolid se diferencian dos ámbitos muy diferentes: **el industrial y el urbano**. En este caso la toma de muestras es bastante importante, ya que estas áreas de entrenamiento serán las que más se asemejen a la realidad del terreno sobre la zona de testeo de Salamanca.

Es por ello por lo que las áreas localizadas sobre la zona industrial se pueden asemejar a las cubiertas sobre las naves que podemos encontrar en la zona de estudio así pues como en la zona urbana. Con todo esto, se han seleccionado un total de **294 cubiertas** en la zona seleccionada de Valladolid.



Figura 22. Muestras escogidas en Calle Kriptón.



Figura 23. Muestras escogidas en Calle de Caamaño.



Figura 24. Muestras escogidas en Calle de Argales.

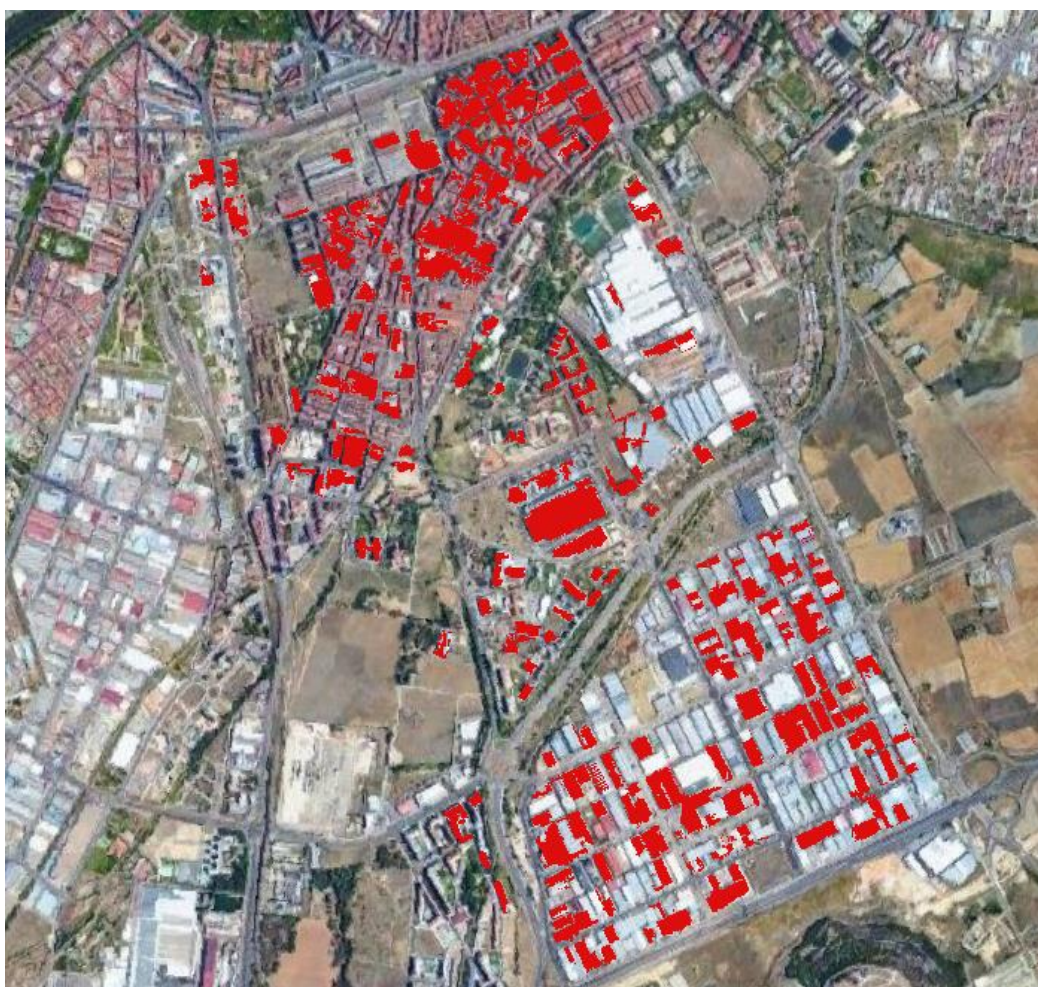


Figura 25. Muestras escogidas sobre zona en el término municipal de Valladolid.

2.4.5. Generación de áreas de entrenamiento en Salamanca.

La extracción de áreas de entrenamiento sobre el término municipal de Salamanca se basa en diferentes tipologías, ya que encontramos cubiertas tanto en **polígonos industriales como en zona urbana**, por ello se extraen un total de **120 muestras** previamente detectadas que aportarán más información al algoritmo.



Figura 26. Muestras escogidas en Av. de la Aldehuela.



Figura 27. Calle Cristo de Cabrera.



Figura 28. Calle Cristo de Cabrera.



Figura 29. Muestras recogidas del término municipal de Salamanca.

Una vez establecidas las áreas de entrenamiento, se realizó una **comparación de la curva espectral de los tejados identificados como amianto y no amiantos**, se pudo observar en este en las bandas espectrales de la imagen World View, que las bandas, 5(**RED**) y 7 (**NIR 1**) son las que mejor posibilitan la detección de los tejados de amianto debido a que el comportamiento espectral de las cubiertas de amianto en estas bandas difiere en gran medida al del resto de cubiertas, este comportamiento se observa en principalmente en **la banda del infrarrojo cercano (NIR)**.

2.5. Algoritmo de clasificación Spectral Angle Mapper (SAM).

Una vez obtenidos los edificios con su respectivo buffer y las áreas de entrenamiento de las cubiertas con amianto (así como una clase genérica donde se introducen el resto de las cubiertas y elementos que no sean amianto), mediante técnicas de inteligencia artificial se obtiene de las imágenes VHR la **respuesta espectral tipo en cubiertas de amianto**.

De acuerdo con la revisión bibliográfica de los estudios más relevantes relacionados con la identificación de amianto con imágenes satelitales se realizó un considerable número de pruebas con diferentes métodos de clasificación como: **Neural Net** (NN por sus siglas en inglés), **Super Vector Machine** (SVM), Random Forest (RF) y Spectral Angle Mapper (SAM). Con los resultados obtenidos, se encontró que el método SAM obtiene la mayor precisión en la clasificación de cubiertas de amianto.

El clasificador Spectral Angle Mapper (SAM) es un tipo de clasificación supervisada que identifica las diferentes clases a clasificar en una imagen mediante el cálculo del ángulo espectral entre las firmas espectrales de los píxeles de la imagen y las firmas espectrales de los píxeles de las áreas

de entrenamiento designadas por el usuario. Se estableció un umbral del ángulo espectral para cada clase dentro de la clasificación, de manera que se clasificaron los píxeles que tenían un valor del ángulo espectral encuadrado dentro del umbral de una determinada clase.

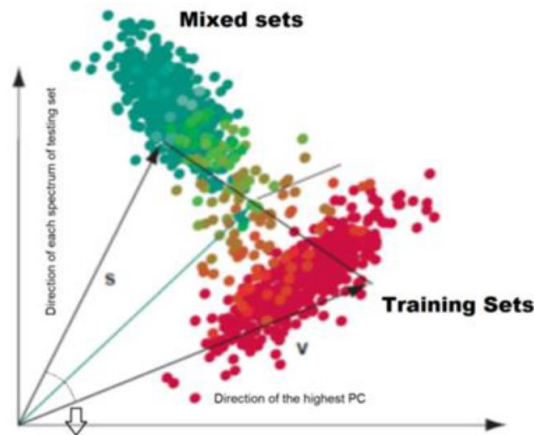


Figura 8. Ilustración del funcionamiento del algoritmo SAM.

El algoritmo **SAM para la detección de amianto ha sido desarrollado dentro de un entorno R**, este algoritmo tiene como **inputs áreas de entrenamiento para cada clase a clasificar** (1 cubiertas con amianto, 0 otras cubiertas) e imágenes satelitales de alta resolución espacial.

Sin embargo, la experiencia en numerosos ayuntamientos de España (el máximo exponente es el Ayuntamiento de Madrid), indica que las bandas situadas en el RGB-NIR del espectro electromagnético son suficiente para detectar amianto con un éxito superior al 80%. Sin embargo, la heterogeneidad de tejados (en cuanto a forma y textura) supone un reto ya que **el objetivo principal es no albergar omisión** (que se detecten todos los tejados con amianto independientemente de su tipología) minimizando en la medida de lo posible la comisión. Se trata de clasificaciones a nivel de píxel, por lo que se emplearán **algoritmos de filtrados** para minimizar el ruido derivado de la reflexión de la luz. A la vez, se maximizarán los resultados por cubierta, detectando un mínimo de ventana de 4x4 píxeles (2 metros) de amianto, siempre y cuando el píxel sea de 30 cm (esto se ajustaría a la resolución de las imágenes cedidas por el ayuntamiento).

Con todo esto, se obtuvo **una detección bruta de 5807 cubiertas** (tras la validación), lo cual no es representativo de las cubiertas reales que pueden poseer amianto, ya que **diferentes edificios contiguos pueden estar representados en una detección única**.



Figura 8. Detección bruta (verde) sobre la imagen WorldView.

2.6. Validación.

En esta fase consistió en **obtener los porcentajes** que demuestren el buen funcionamiento de la detección, para ello, se realizó **una malla de 500 metros por 500 metros** a lo largo de la zona de estudio, y del total **se eligió el 10%**, siendo éste el que se utilizó por el equipo de expertos fotointérpretes para detectar si el algoritmo se dejó alguna cubierta sin clasificar como amianto, en un **total de 273 teselas, 68.30 kilómetros cuadrados**.

Dentro de estas teselas se detectaron un total de **731 cubiertas** (en bruto) con amianto, de las cuales tras ser fotointerpretadas se estableció que **20 de esas cubiertas eran errores de comisión**, con lo que se pudo establecer que poseía un **error de comisión del 2.73%**. Así mismo, se detectó una **omisión de un total de 62 cubiertas** a lo largo de las 273 teselas elegidas, lo que representa un **error omisión del 8.48 %**.

Cabe destacar, que una vez detectados estos edificios, **se introdujeron de nuevo como áreas de entrenamiento** para así nutrir al algoritmo con estas cubiertas que no habían sido detectadas (como bien se menciona con anterioridad en la selección de áreas de entrenamiento), y tras ello no sólo se detectaron por supuesto las 62 cubiertas, sino que **3 más fueron correctamente detectadas** como amianto que previamente no lo fueron en zonas externas a las de validación, lo que demuestra que es un algoritmo dinámico que cuanta más información de calidad se le de mayor es su precisión, igualmente, 3 cubiertas más detectadas en toda la superficie de Madrid no es un gran número pero si demuestra que es un producto en constante evolución.

Con todo esto, se obtuvieron un **total de 775 cubiertas en la zona de validación**, respecto a las 710 detectadas inicialmente. Siendo un total de **5807 cubiertas** para el área de estudio.

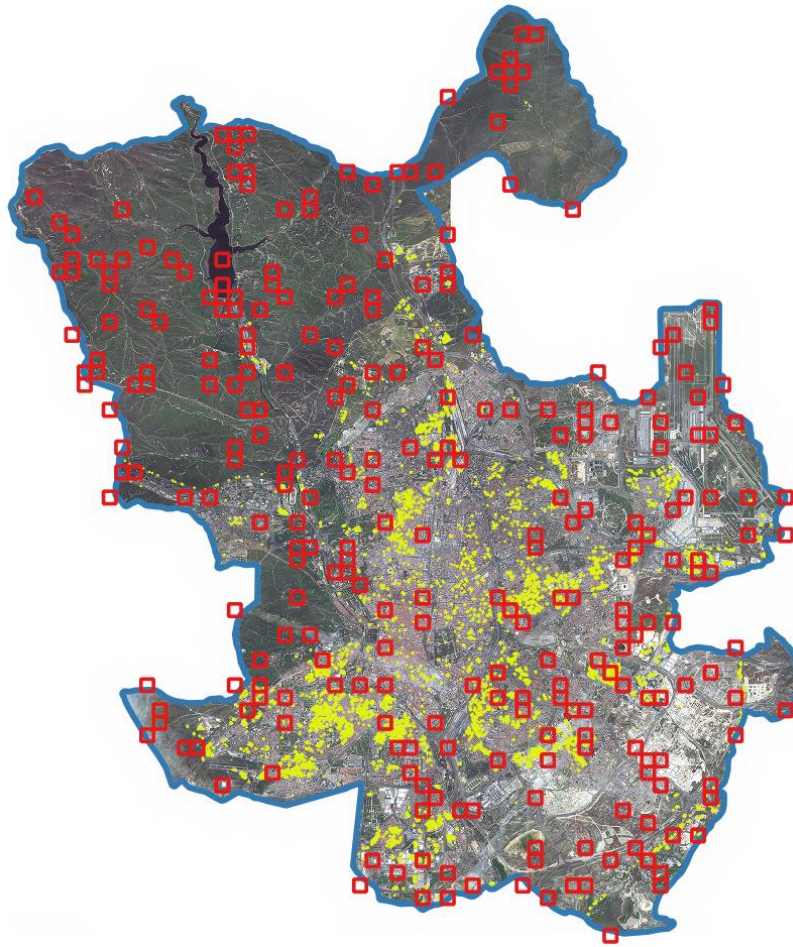


Figura 9. Áreas utilizadas sobre las que se realiza el QC.

2.4. Refinamiento de resultados.

Por último, se realizó un refinamiento de los resultados mediante la fotointerpretación de los tejados detectados por el algoritmo SAM, utilizando las **diferentes fuentes cartográficas que posee el Ayuntamiento de Madrid**.

Tras la detección, mediante fotointerpretación se desplazaron los resultados brutos obtenidos a las diferentes capas de edificios que se encuentran en el geoportal. Este trabajo se realizó de manera manual y fue imposible su automatización, ya que la detección se realizó sobre la imagen WorldView que debido a la inclinación de la toma (ángulo off-Nadir) los edificios no correspondían con la detección realizada.

Las capas del geoportal que se emplearon se pueden encontrar en el siguiente enlace ([Cartografía actualizada 1:1.000. Edificaciones, construcciones y cerramientos. - Geoportal del Ayuntamiento de Madrid](#)) con las que se cubrió la casi totalidad de las cubiertas brutas detectadas, ya que **algunas de ellas se quedaron sin cubierta correspondiente** (la gran mayoría situadas fuera del término municipal de Madrid ya que la imagen posee 100 metros de más para evitar que debido al ángulo de captura se puedan quedar zonas sin representación).



Figura 9. En verde, cubiertas en bruto detectadas sobre imagen WV, en rojo edificios respectivos a la detección de la capa provista por el Ayuntamiento.

Con todo esto, se detectaron un **total de 6192 cubiertas** provenientes de las diferentes capas de edificios que **posee el Ayto. de Madrid**.

Dentro de esta capa encontramos diferentes tipologías, clasificados en:

- DEPOSITO_NIVEL.
- EDIFICIO_INDEFINIDO.
- EDIFICIO.
- MARQUESINA.
- PATIO.
- PORCHE_CASETA_COBERTIZO.
- ZONA_OBRAS.

3. Conclusiones.

Una vez se realizó el procedimiento de validación, se obtuvo un **porcentaje de acierto en comisión de 97.27% y del 91.52% de omisión**. Haciendo una media entre ambos se **obtiene un 94.4% de acierto del algoritmo de clasificación**, se puede concluir que los **resultados son fiables y que el algoritmo funciona de manera eficaz**. Dentro del término municipal de Madrid al que se le añaden las pistas del aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas, se detectaron un total de **6192 cubiertas de amianto respecto a las capas provenientes del Ayuntamiento**. Dentro de las limitaciones encontradas resaltan la compacidad de la ciudad que dificulta el proceso de detección, ya que puede que haya elementos que no hayan sido detectados en esta anualidad por la inclinación de los edificios y que en la próxima debido al ángulo de toma de la imagen si puedan ser detectados, sacando como valor positivo que permitirá esto ya no solo elaborar un censo completo de amianto, si no poder monitorizar el proceso de retirada de este material de las cubiertas de los edificios de Madrid.

Adicionalmente es importante mencionar que **todos los artefactos con amianto presentes en este documento hacen referencia a las cubiertas de edificaciones**, pudiendo estar presentes en otros ámbitos como canalizaciones aéreas o subterráneas de distribución de agua potable, evacuación de aguas pluviales y residuales, electricidad, telefonía, etc.

4. Entregables.

- *202512_EDIFICIO_P_ID3D_Amianto.shp*, capa que contiene todos los edificios de la cartografía de Madrid para la zona de estudio, independientemente de su tipología.
- *202512_EDIFICIO_P_ID3D_Amianto.xml*, metadato correspondiente a la capa de edificios con cubiertas con amianto.
- *01_DEPOSITO_ELEVADO_P.shp*; *01_EDIFICIO_CAMBIO_ALTURA_P.shp*; *01_EDIFICIO_HUELLA_P.shp*; *01_EDIFICIO_INDEFINIDO_P.shp*, *01_EDIFICIO_P.shp*; *01_MARQUESINA_BUS_P.shp*; *01_MARQUESINA_P.shp*; *01_PATIO_P.shp*; *01_PORCHE_CASETA_COBERTIZO_P.shp*; *01_ZONA_OBRAS_P.shp*; capas que contienen los edificios de la cartografía de Madrid para la zona de estudio, diferenciados por su tipología.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_AmiantoBruto.shp*, detección bruta obtenida por el algoritmo en formato vectorial.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_AmiantoBruto_shp.xml*, metadato correspondiente a la detección bruta en formato vectorial.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_AmiantoBruto.tif*, detección bruta obtenida por el algoritmo en formato ráster.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_AmiantoBruto_tif.xml*, metadato correspondiente a la detección bruta en formato ráster.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_Marzo.tif*, ortomosaico RVG-NIR en UInt16.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_Marzo.xml*, metadato del ortomosaico en formato *tif*.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_Marzo.ecw*, ortomosaico RGB-NIR en formato ECW Byte.
- *EsAytMadridPr2025RGBOrtImgMos_Marzo_ecw.xml*, metadato del ortomosaico en formato *xml*.
- *EsAytMadrid2025_Informe_DeteccionAmianto*; informe metodológico de la detección de amianto en el término municipal de Madrid.



5. ANEXOS

5.4. Anexo I

n	30				Circular Values	
RMSEX	0,17850707		RMSEY	0,11289293	RMSEH	0,211209823
arithmetic mean	0,14410893		arithmetic n	0,09394	arithmetic mean	0,238048933
varian error	0,01270409		varian error	0,00442687		
standard deviation err	0,11271243	Sy	standard de	0,0665347	standard deviation err	0,089623565
standard deviation RMSEx	0,02057838		standard de	0,01214752	standard deviation RMSE	0,016362949
Reen-Schu interval 90% probabi	0,18541195		Reen-Schu i	0,10944957	Reen-Schu interval 90% prob	0,19233217
Reen-Schu interval 95% probabi	0,22091637		Reen-Schu i	0,130408	Reen-Schu interval 95% prob	0,2193716
NSSDA statistic	0,34987387		NSSDA stati	0,22127014	Test circularity	0,590304838
					NSSA circular statistic	0,365561961
					NSSA eliptical statistic	0,356629895
					Confidence interval RMSEh 95% probability	0,03207138
					rango	
						0,179138442
						0,243281203