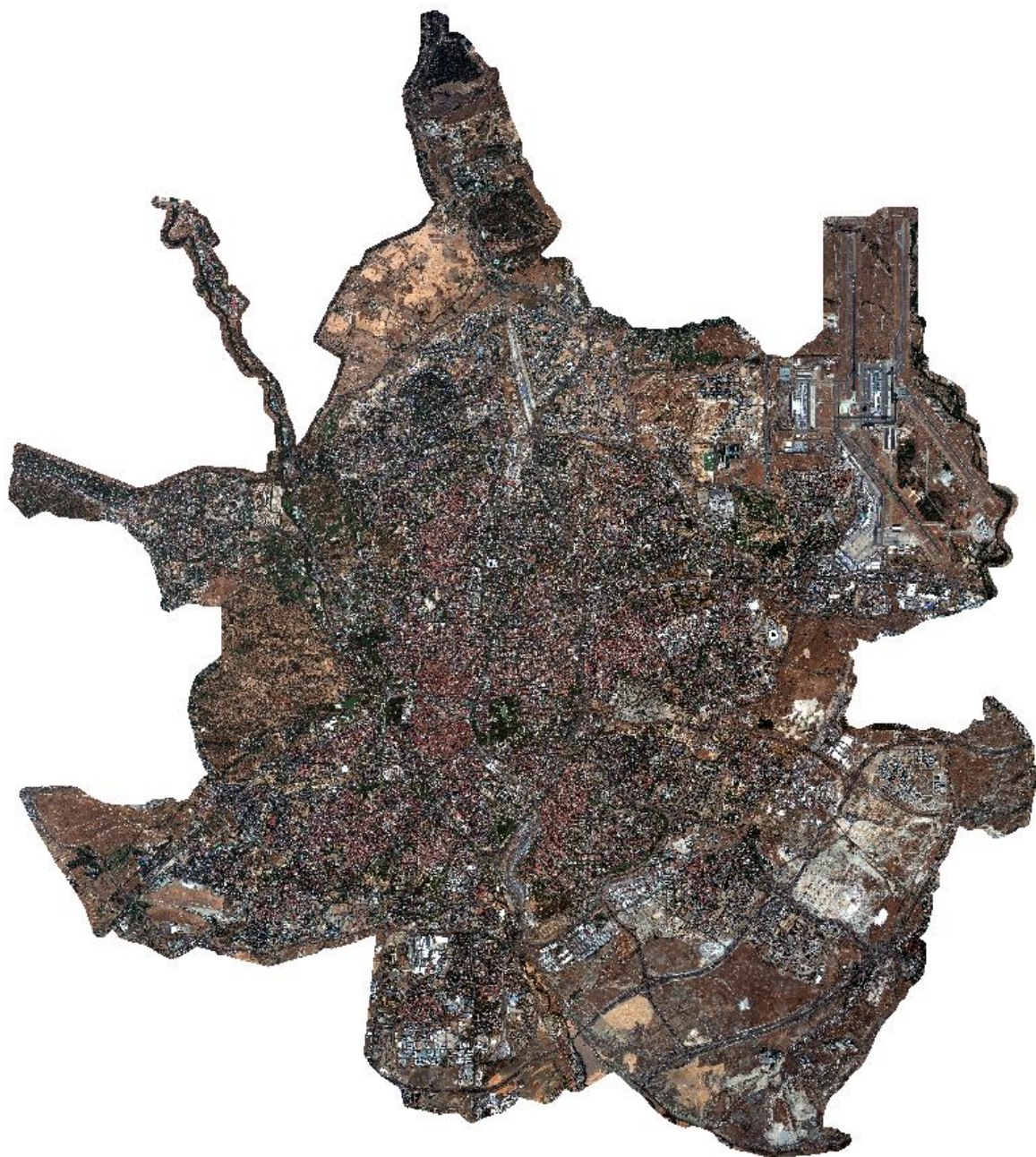


2025

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

(COTESA – A47461066)



SERVICIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE RESOLUCIÓN SUBMÉTRICA DE 2025

[Metodología para la creación de la ortoimagen de verano de 2025 sobre el término municipal de Madrid más las pistas del aeropuerto Adolfo Suárez – Madrid Barajas, a excepción del Monte del Pardo.]

Contenido

1.	Introducción.....	2
2.	Objetivo.....	2
3.	Metodología.....	2
3.1.	Selección de imágenes satelitales.....	2
3.2.	Pansharpen.....	4
3.3.	Creación del proyecto.....	5
3.4.	Tratamiento digital de las imágenes satelitales.....	6
3.5.	Creación de puntos de apoyo.....	7
3.6.	Mosaicado.....	8
3.7.	Control de calidad.....	10
3.8.	Entregables.....	12

1. Introducción.

En este informe se muestra la metodología utilizada para la obtención de la ortoimagen de Madrid para el verano del año 2025. Para ello mediante la utilización de imágenes WorldView3 en softwares tales como CATALYST o ArcMap, se consigue un resultado muy eficiente con una ortoimagen con un tamaño de píxel de 0,5 metros.

La obtención de una imagen de calidad es primordial, ya que en ella se sustentan el resto servicios o entregables, es por ello que se han utilizado las técnicas que permitían un mayor rendimiento y fiabilidad del producto. Es por ello que se han priorizado las imágenes que tienen:

- Cobertura de nubes inexistente.
- Tamaño de píxel cercano a 50 centímetros.
- Ángulo Off-Nadir menores a 30 grados.
- Imágenes cercanas en el tiempo con buen solape.

2. Objetivo.

Creación de una ortoimagen georreferenciada el segundo semestre de 2025 para el término municipal de Madrid (más pistas del Aeropuerto Adolfo Suárez - Madrid Barajas, excluyendo el Monte del Pardo) a partir de imágenes WorldView 2.

3. Metodología.

A continuación se describe cada una de las fases llevadas a cabo para la obtención de la ortoimagen.

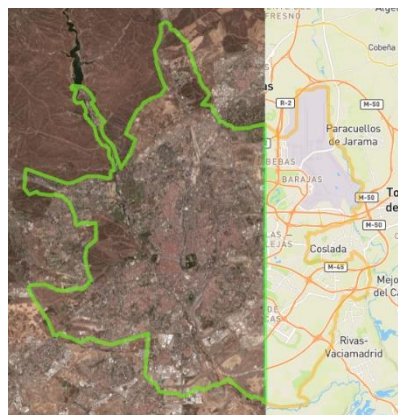
3.1. Selección de imágenes satelitales.

Para la obtención de la ortoimagen de verano de 2025, se seleccionaron dos escenas diferentes de WorldView2. 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, siendo capturadas el mismo día, con las que ha sido posible cubrir todo el área de estudio con escenas que poseen características muy similares.

CARACTERÍSTICAS

IMAGEN

- **Fecha:** 2025/07/02
- **Satélite:** WorldView2
- **ID:** 1030050101F8A600
- **Nubes en imagen:** 0%
 - **Bandas:** 8 bandas
- **Imagen Off Nadir:** 2º
- **Elevación del sol:** 67º
- **Objetivo máximo de azimuth:** 67º
 - **Máximo GSD:** 0.465m



- **Fecha:** 2025/07/02
- **Satélite:** WorldView2
- **ID:** 1030050101F8A500
- **Nubes en imagen:** 0%
 - **Bandas:** 8 bandas
- **Imagen Off Nadir:** 6º
- **Elevación del sol:** 67º
- **Objetivo máximo de azimuth:** 161º
 - **Máximo GSD:** 0.468m



3.2. Pansharpen.

A través del pansharpening, o refinado pancromático, podemos 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 bandas de menor resolución generando una nueva imagen multibanda a color y preservando la máxima resolución.

El proceso de ortorrectificación, comienza con la fusión de las imágenes WorldView multiespectral y pancromática. Al realizar este proceso, la información espectral de la imagen no varía pero si su resolución, siendo esta mucho mayor. Para este proyecto, se trabaja con una resolución original de 0.5 metros siempre y cuando el ángulo Off-Nadir lo permita (cuanto mayor es el ángulo, de peor calidad es el GSD de partida). El mosaico final ortorrectificado será de 0.5 metros.

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

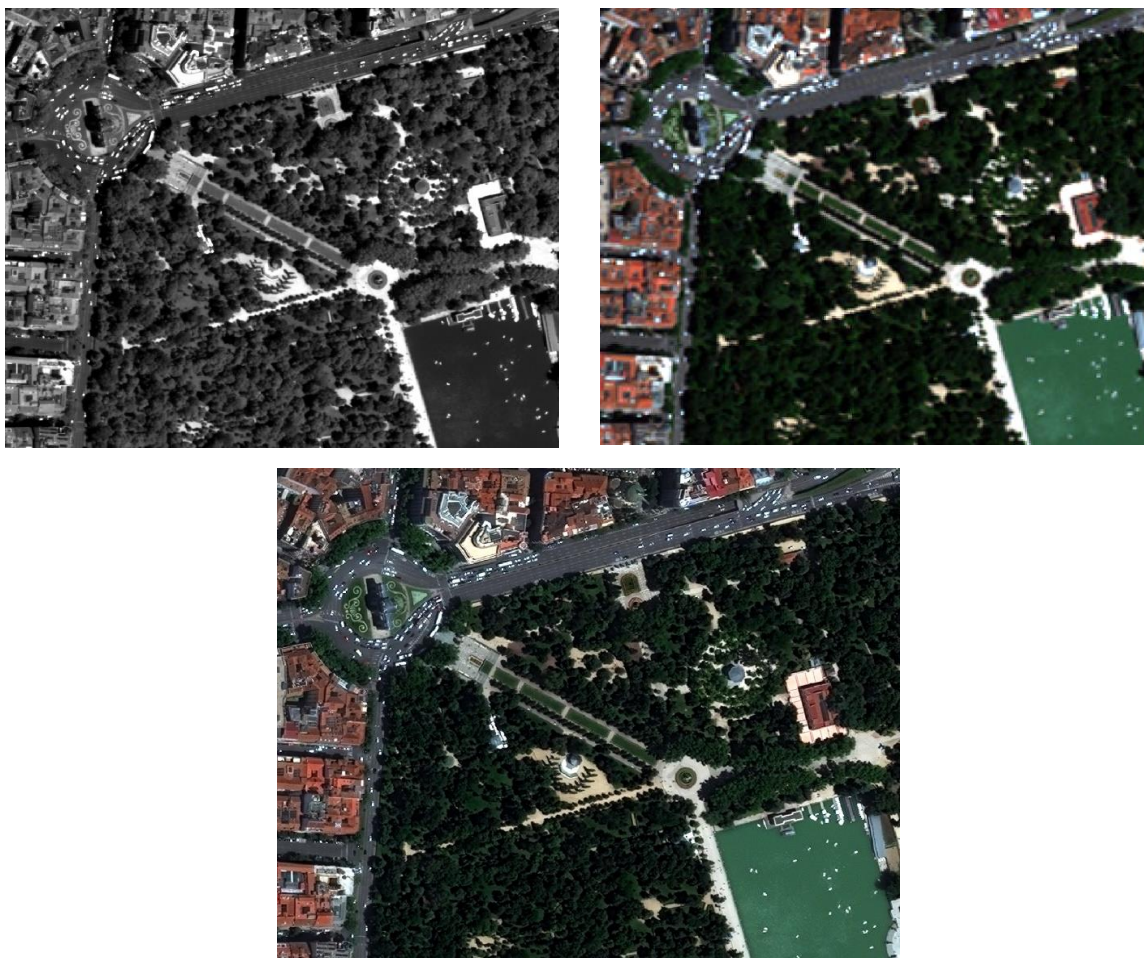


Imagen 1. Izq. imagen pancromática, dcha. imagen multiespectral, abajo imagen pansharpeada.

3.3. Creación del proyecto.

Una vez que las imágenes se encuentran pansharpeadas, se crea un proyecto mediante Rational Function en PCI que permitirá obtener la ortoimagen. Para ello, se cargarán las diferentes escenas y se extraerán los GCPs (Ground Control Points -puntos de control de suelo-) que se ubicarán por todas las escenas, con un total de 61 puntos.

En la Imagen 2, se aprecia como el total de los 24 puntos, obtienen un fallo en X de 0.24 y en Y de 0.24, ambas por debajo de los 0,5 metros de resolución de la imagen. Este dato se extrae como valor medio de todos los obtenido, pudiéndose observar como el GCP utilizado con mayor distancia es de 0.47. Estos valores, ya son inferiores a lo establecido por la resolución de la imagen, pero hay que tener en cuenta de que es un paso previo automático que será revisado con posterioridad manualmente.

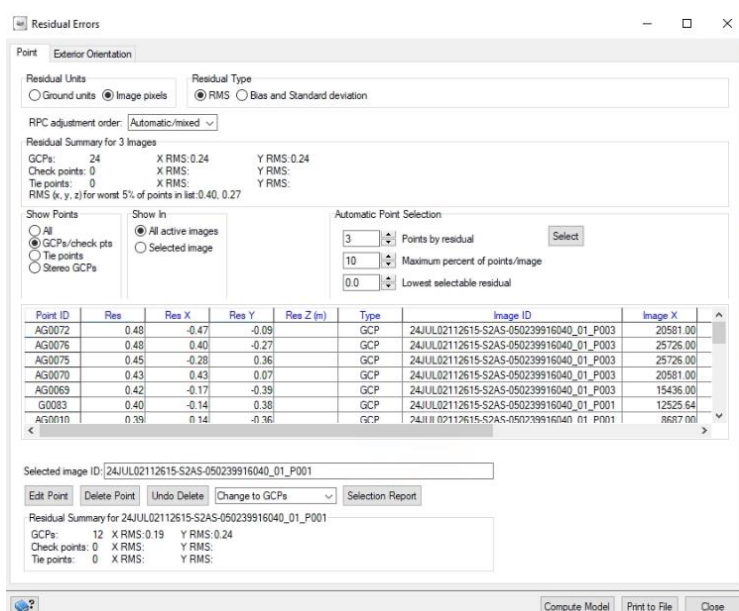
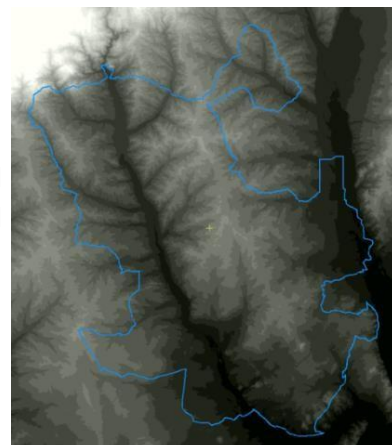


Imagen 2. GCPs obtenidos tras realizar el cribado de calidad de los mismos.

Una vez realizado este proceso, se procede a crear la ortoimagen, para ello se precisa de modelo digital que posibilite corregir las distorsiones topográficas que se puedan dar en las diferentes escenas.

Para ello se suministró un DTM que no llegaba a cubrir por completo el área de estudio, es por ello que se decidió realizar un DTM a partir del LiDAR PNOA que posibilita cubrir por completo las escenas aparte de que posee gran calidad debido a la fuente de datos facilitada, ya que posee 0.5 puntos por metro cuadrado, siendo el de mayor actualidad.

Imagen 3. DTM obtenido del LiDAR PNOA.



Hay que tener en cuenta, que errores sobre superficies elevadas no pueden ser subsanados con esta metodología, ya que se pueden encontrar desviaciones en viaductos debido a que la referencia tomada es un modelo digital de terreno (DTM). Las pruebas realizadas con un modelo digital de superficies de 10 centímetros del año 2016 proporcionado por el Ayuntamiento de Madrid no fueron satisfactorias debido a que los edificios no están completamente nadirales sobre la superficie (se aprecian fachadas) como consecuencia del ángulo de la imagen de satélite.

3.4. Tratamiento digital de las imágenes satelitales.

Posterior al proceso de ortomosaicado RGB-NIR de la imagen se realiza 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 realiza 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–2, 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.

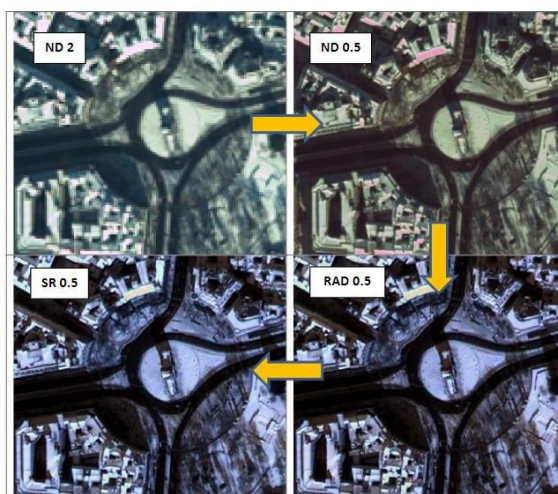


Imagen 4. De izqda. a dcha., arriba abajo, correcciones realizadas sobre las imágenes originales (I) Niveles digitales, (II) Niveles digitales pansharpeados, (III) Radiancias, (IV) Reflectividades a nivel de superficie.

3.5. Creación de puntos de apoyo.

Una vez obtenidas las diferentes escenas, se crearán 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 *Georeferencing* con la que se establecen puntos a lo largo de las escenas y donde se establecerá el punto sobre la escena y sobre la imagen PNOA, desplazando ésta primera en función de la calidad y cantidad de los puntos establecidos.



Imagen 5. Puntos de Apoyo sobre las escenas que conformarán el mosaico de verano.

Como se aprecia en la Imagen 5, se establecen puntos a lo largo de todas las escenas, donde se aprecia como la escena central posee la gran mayoría de esos puntos en los extremos, suficiente para la ortorectificación. Así mismo en la escena más oriental se aprecia un punto que cae fuera del conjunto, y es que es un punto establecido en la escena primigenia, siendo esta recortada posteriormente al área de estudio de Madrid.

VERANO	
IMAGEN	Ptos. Apoyo
1030050101F8A600	7
1030050101F8A500	10

Tabla 1. Se representan el número total de Puntos de Apoyo para cada escena dentro de cada fecha.

3.6. Mosaicado.

Una vez que todas las escenas han sido georreferenciadas, se procede a la creación del mosaico de las imágenes. Para ello mediante la herramienta *Mosaic* de CATALYST, se cargan las escenas, se determina el tamaño del pixel que será de 0.5 (aunque éste lleva arrastrándose desde el momento de la creación del proyecto) y se utilizará el método de resamplado de convolución cúbica (cubic convultion en inglés) 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 es 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, la convolución cúbica es más apropiada para datos continuos.

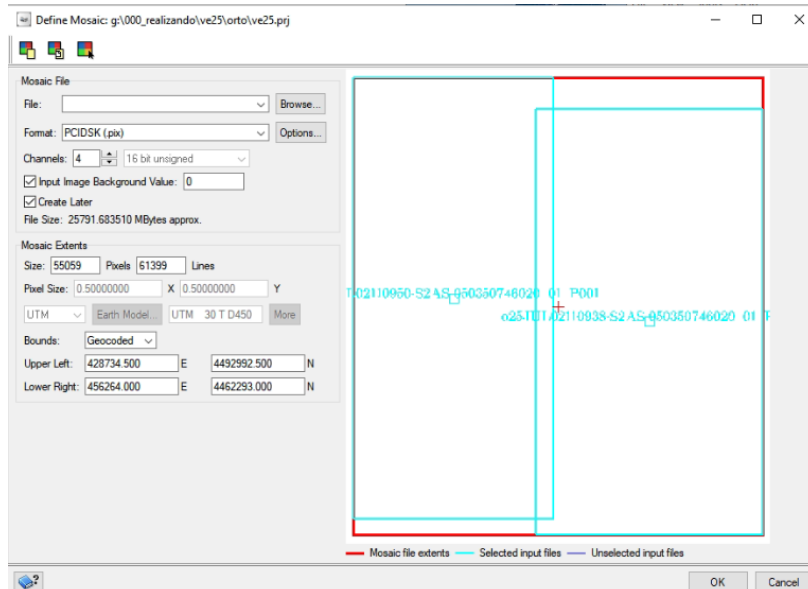


Imagen 5. Mosaic Tool con las escenas que formarán la ortoimagen de verano.

Con esto, conseguiremos que la ortoimagen final sea un continuo sin grandes diferencias entre escenas, y determinará por sí mismo los trazos que marcarán las líneas divisorias entre las escenas. Es en este punto, donde cabe revisar y repasar todo el recorrido de las líneas para poder desplazarlas y así obtener un producto de máxima calidad, ya 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 Imagen 6, donde para solventar el problema la mejor manera es modificar las líneas de corte entre escenas tomando como referencia las carreteras.

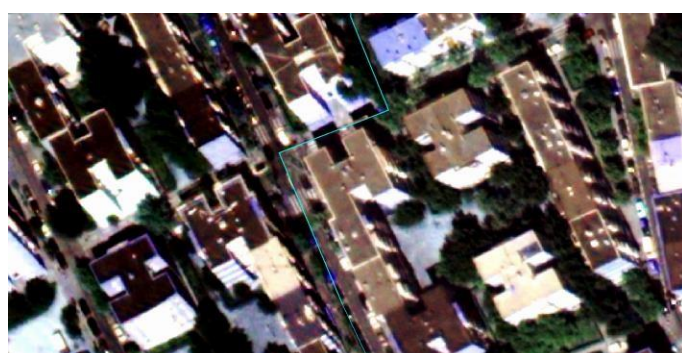
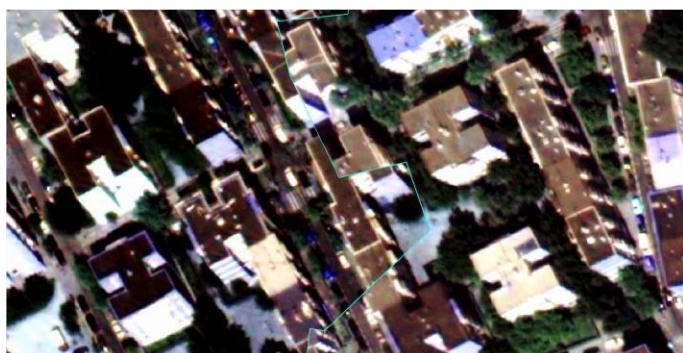


Imagen 6. Izq. Línea de corte obtenida, donde se aprecia que debido a la diferencia de la inclinación en las tomas, los edificios aparecen desplazados. Dcha. Imagen corregida, donde se establece como frontera la carretera para poder corregirla.

3.7. Control de calidad.

Con la imagen ortorrectificada final, se procede a la introducción de puntos de control para validar la calidad de la ortorrectifiación siempre en función a la imagen PNOA.

Para ello se realiza una malla de 3Km por 3Km sobre todo el área de estudio y luego se hace una selección aleatoria de 25 recuadros en los que se crearán puntos de control sobre la imagen ortorrectificada y la imagen PNOA.

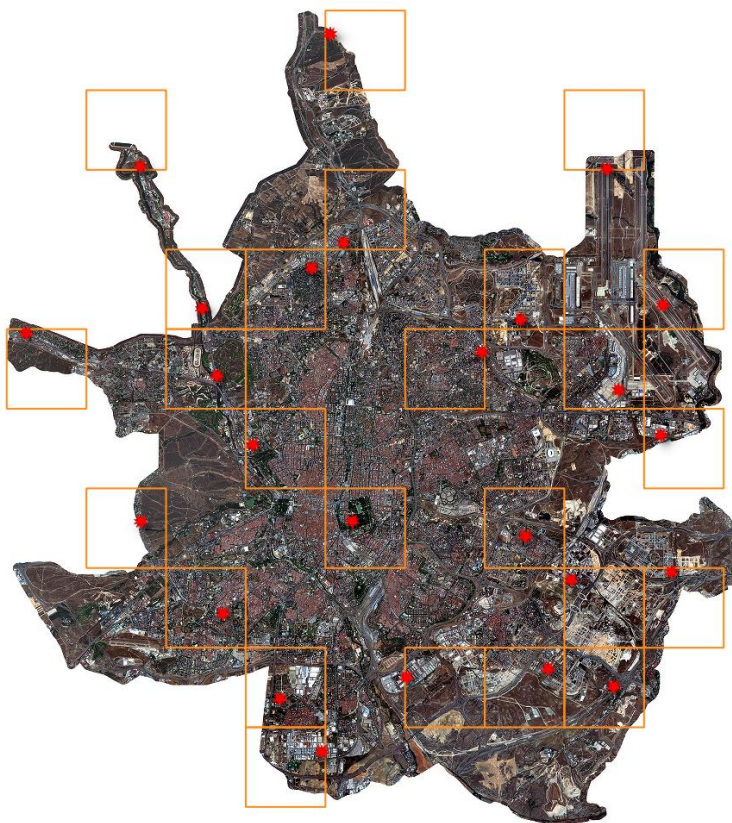


Imagen 8. Celdas aleatorias sobre otroimagen donde se crearán los puntos de validación sobre PNOA.

Una vez obtenidos los 25 puntos, se extraen sus coordenadas y se exportan a una tabla Excel donde se compara 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 obtenido son muy buenos, ya que para la X sólo existe un desplazamiento de 0.20731616 (inferior al tamaño de un píxel) y para la Y 0.24869401. Para ello, se ha utilizado el error cuadrático tanto de X como de Y, y se ha dividido entre 25 que es el número total de muestras.

En global teniendo en cuenta más los resultados tanto para X como para Y, obtenemos un RSME global de toda la imagen de 0.323772603, que se extrae de la raíz cuadrada de la resta de X al cuadrado e Y al cuadrado.

RMSEX	0,20731616	RMSEY	0,24869401	RMSEH	0,323772603
--------------	-------------------	--------------	-------------------	--------------	--------------------

Tabla 2. RMSE de X Y y general.

Cabe destacar que la ortoimagen final es tileada en función a la capa requerida (municipio de Madrid más pistas del aeropuerto Adolfo Suárez - Madrid Barajas, a excepción del Monte del Pardo) mediante un algoritmo propio, con un total de 533 tiles (con la nomenclatura de PNOA).

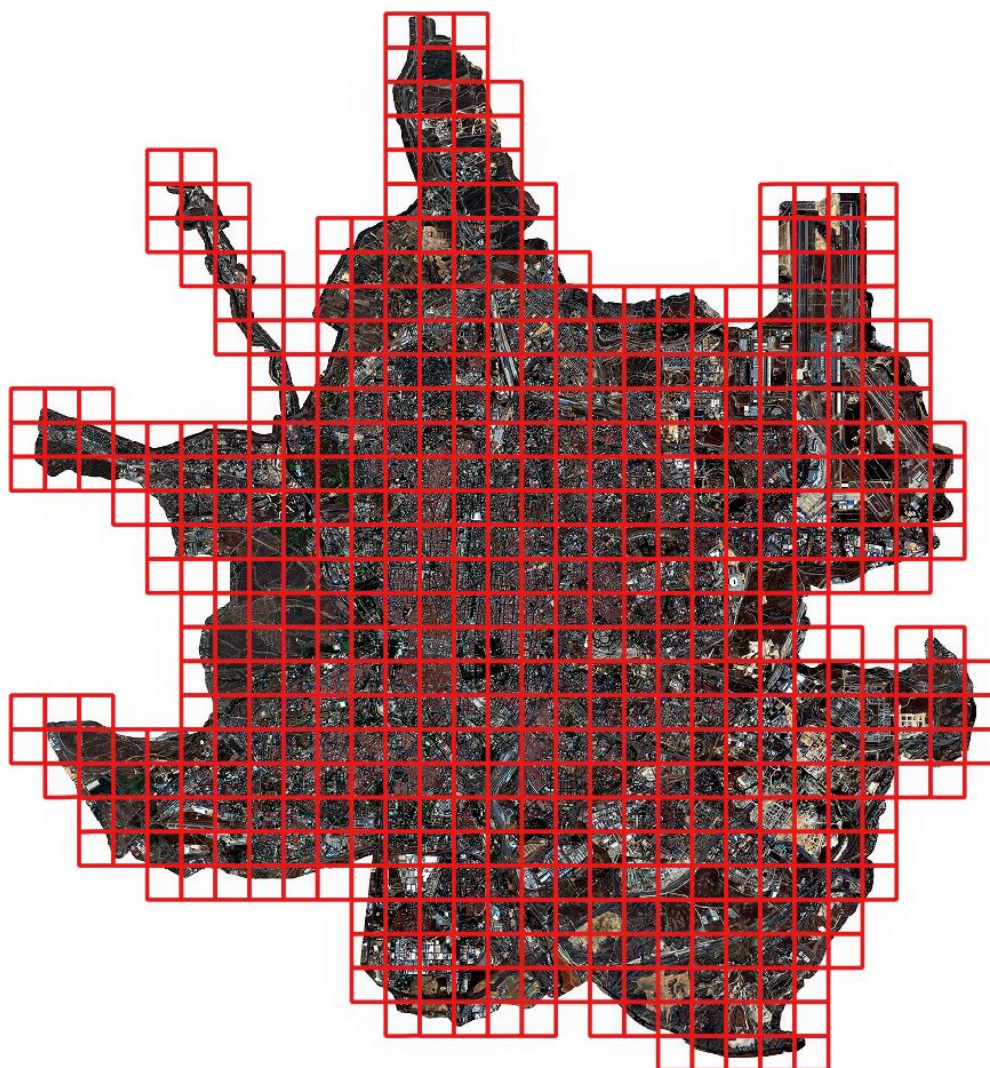


Imagen 9. Celdas de tileo sobre ortoimagen.

3.8. Entregables

El servicio básico de ortorrectificación de imágenes contiene los siguientes entregables:

- Ortomosaico RGB-NIR en formato GeoTiff Float32 + Metadatos
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto.tif*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto.tif.xml*
- Ortomosaico RGB-NIR en formato GeoTiff Int16 tileado y escalado.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_tiles.7z*
- Ortomosaico RGB-NIR en formato ECW Byte + Metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_ecw.ecw*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_ecw.xml*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_NIR_ecw.ecw*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_NIR_ecw.xml*
- Líneas de Corte en formato shapefile + Metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_LiCor.shp*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_LiCor.xml*
- Puntos de Apoyo en formato shapefile + Metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PApoyo.shp*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PApoyo.xml*
- Puntos de Validación Orto RGB shapefile + Metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PVal_Ortho.shp*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PVal_Ortho.xml*
- Puntos de Validación PNOA en formato shapefile + metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PVal_PNOA.shp*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_PVal_PNOA.xml*
- Zonas de validación en formato shapefile + Metadatos.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Zonas_Validacion.shp*
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Zonas_Validacion.xml*
- Cálculo de RMSEH.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Agosto_RSME.xlsx*
- Informe final en formato pdf.
 - *EsAytMadridVe2025RGBOrtImgMos_Infrm.pdf*