

**MEMORIA DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA
PARA DETECCIÓN DE PUNTOS CALIENTES EN
PANELES FOTOVOLTÁICOS A PARTIR DEL
PROCESAMIENTO DE VUELOS FOTOGRAFICOS
CON CÁMARA TÉRMICA EMBARCADA EN VEHÍCULO
AÉREO NO TRIPULADO**

DESARROLLADO POR UCLM EN EL PROYECTO:

**SISTEMA DE GESTIÓN INTELIGENTE DEL
MANTENIMIENTO DE PLANTAS FOTOVOLTÁICAS Y
LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN Y ANÁLISIS DE MASAS
FORESTALES EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN (SGIM)**



Universidad de
Castilla-La Mancha

Versión: 20210319, Autor: David Hernández López, david.hernandez@uclm.es

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	CONTEXTO, OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.1	CONTEXTO.....	1
1.2	OBJETIVO.....	1
1.3	JUSTIFICACIÓN	4
2.	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.....	7
3.	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DIRIGIDA POR UN CASO DE USO.....	19
3.1	INTRODUCCIÓN.....	19
3.2	DEFINICIÓN DEL PARQUE SOLAR.....	21
3.3	PROYECTO FOTOGRAFÉTRICO DEL VUELO CON CÁMARA TÉRMICA.....	29
3.4	PROYECTO DE GESTIÓN DE MODELOS DEL PARQUE FOTOVOLTAICO.....	42
4.	AVANCES EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO Y EN LA MEJORA DE LOS RESULTADOS.....	87
4.1	AVANCES EN LA DETERMINACIÓN PRECISA DE LA GEOMETRÍA TRIDIMENSIONAL DE LOS ARRAYS DE PANELES Y DE LOS PANELES	87
4.2	AVANCES EN PASOS PREVIOS PARA APLICAR CORRECCIONES EN LAS IMÁGENES TÉRMICAS: DETERMINACIÓN DE ÁREAS NO VÁLIDAS POR REFLEXIONES Y CORRECCIONES POR DISTANCIA Y ÁNGULO.....	101
4.3	AVANCES EN LA DETERMINACIÓN TEMPERATURAS Y SUS ESTADÍSTICAS.....	105
4.4	AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DE HOT SPOTS	113
4.5	AVANCES EN LA AUTOMATIZACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS PROCEDENTE DEL PROYECTO FOTOGRAFÉTRICO DEL VUELO VISIBLE Y EN LA INTEGRACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE EDICIÓN 2D Y 3D EN UN SOFTWARE LIBRE (QGIS)	122
4.5.1	INTRODUCCIÓN	122
4.5.2	OPTIMIZACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS DENSA.....	124
4.5.3	INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS DE EDICIÓN 2D Y 3D EN QGIS	129
5.	CONCLUSIONES, MEJORAS Y DIVULGACIÓN	139
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Objetivo del proyecto.....	2
Figura 2.	Mapa de situación del caso de uso.....	19
Figura 3.	Información de partida para el caso de uso.....	20
Figura 4.	Información de partida a partir del vuelo con cámara visible	21
Figura 5.	Información de partida: Ortoimagen de la cámara visible.....	22
Figura 6.	Información de partida: DSM postprocesado a partir del vuelo visible y LIDAR PNOA	23
Figura 7.	Información de partida: DTM postprocesado a partir del vuelo visible y LIDAR PNOA	24
Figura 8.	Definición incial del parque solar con un fenómeno con geometría de punto por array de paneles.....	25
Figura 9.	Definición inicial del parque solar con un fenómeno con geometría de tipo polígono para cada array de paneles.....	26
Figura 10.	Definición incial opcional del modelo de datos.....	26
Figura 11.	Interfaz Photogrammetry Tools: Project Management, Create Project	29
Figura 12.	Photogrammetry Tools: Definición del proyecto	31
Figura 13.	Base de datos creada para el proyecto fotogramétrico.....	32
Figura 14.	Apertura de proyecto fotogramétrico	32
Figura 15.	Carga automática de información geográfica generada en QGIS tras la creación del proyecto fotogramétrico	33
Figura 16.	Importación de proyecto de Metashape en un proyecto fotogramétrico	33
Figura 17.	Carga automática de información geográfica generada en QGIS tras la importación del proyecto de Metashape	34
Figura 18.	Base de datos del proyecto fotogramétrico tras la importación del proyecto de Metashape	35

Figura 19.	Estructura de los ficheros de las imágenes térmicas	35
Figura 20.	Importación de ficheros de imágenes mediante selección de directorios anidados	36
Figura 21.	Resultado de la selección de ficheros de imágenes mediante directorios anidados	36
Figura 22.	Base de datos del proyecto tras la importación de los ficheros de las imágenes	37
Figura 23.	Interfaz Photogrammetry Tools: Processing Tools.....	37
Figura 24.	Parámetros para el proceso de construcción de las huellas de las imágenes sobre el DSM	38
Figura 25.	Base de datos del proyecto tras la generación de huellas de imágenes sobre el DSM	39
Figura 26.	Carga en QGis de las huellas de las imágenes sobre el DSM.....	39
Figura 27.	Parámetros para el proceso cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes	40
Figura 28.	Base de datos tras el proceso de construcción de cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes.....	41
Figura 29.	Informe del proceso de construcción de cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes	42
Figura 30.	Interfaz Model ManagementTools: Project Management.....	42
Figura 31.	Parámetros de un proyecto del gestor de modelos	43
Figura 32.	Model ManagementTools: Definición del proyecto.....	44
Figura 33.	Base de datos de proyecto de parque fotovoltaico	44
Figura 34.	Apertura de proyecto de parque fotovoltaico.....	45
Figura 35.	Carga de información geográfica generada en QGIS tras la creación del proyecto de parque fotovoltaico	45
Figura 36.	Definición de parque solar	46
Figura 37.	Selección de atributos de shapefile de definición del parque solar.....	47
Figura 38.	Visualización de la definición inicial del parque solar con geometría puntual..	47

Figura 39.	Visualización de la definición inicial del parque solar con geometría superficial.....	48
Figura 40.	Modelo de datos implementado.....	49
Figura 41.	Interfaz Model ManagementTools: Processing Tools	49
Figura 42.	Vinculación del proyecto fotogramétrico térmico.....	50
Figura 43.	Proceso de cálculo de la geometría 3D de los arrays de paneles y de los paneles a partir de modelos digitales	51
Figura 44.	Parámetros de cálculo de la geometría 3D	51
Figura 45.	Resultado calculado para la geometría de los arrays de paneles y paneles	53
Figura 46.	Vista de detalle de la geometría de los paneles	53
Figura 47.	Control de escala para la visualización de geometría de los arrays de paneles	54
Figura 48.	Vista del orden de precisión de la geometría calculada de los arrays de paneles	55
Figura 49.	Geometría de los arrays de paneles generada a partir de geometría puntual...55	
Figura 50.	Tablas de arrays de paneles y paneles de la base de datos	56
Figura 51.	Informe de resultados de cálculo de la geometría de los arrays de paneles....57	
Figura 52.	Detalle de la precisión geometría generada.....	57
Figura 53.	Información adicional asociada a los objetos 3D.....	58
Figura 54.	Proceso de formación de las huellas de los arrays de paneles en las imágenes térmicas	58
Figura 55.	Parámetros del proceso de formación de las huellas de las imágenes	59
Figura 56.	Información asociada en la base de datos de las huellas de las imágenes	60
Figura 57.	Proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas	61
Figura 58.	Parámetros de cálculo del proceso de correcciones en las imágenes térmicas	61
Figura 59.	Imágenes resultado del proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas	62
Figura 60.	Visualización de imágenes resultado del proceso de cálculo de correcciones ..	62
Figura 61.	Imagen de máscara	63

Figura 62. Imagen de ángulos de vista.....	64
Figura 63. Imagen de distancias centro de proyección y píxeles proyectados.....	64
Figura 64. Imagen de píxeles afectados por recepción de radiación de otro array de paneles	65
Figura 65. Ejemplo con mayor grado de afección de área de recepción de radiación procedente de otro array de paneles al sur.....	66
Figura 66. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura	67
Figura 67. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura	67
Figura 68. Parámetros del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura.....	68
Figura 69. Métodos contemplados para estimación representativa de temperaturas	68
Figura 70. Fichero con información temporal de temperatura y humedad relativa	69
Figura 71. Actualización de la tabla de huellas de los arrays sobre las imágenes con estadísticas de temperatura	70
Figura 72. Tabla de estadísticas de temperatura por array de paneles.....	71
Figura 73. Imágenes resultado del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura....	71
Figura 74. Ejemplo de imagen de emisividades	72
Figura 75. Ejemplo de imagen de temperaturas corregidas.....	73
Figura 76. Proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots.....	73
Figura 77. Parámetros del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas	74
Figura 78. Elección del criterio de temperatura para detección de punto caliente.....	74
Figura 79. Imágenes resultado del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas	77
Figura 80. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla classes	77
Figura 81. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla images_pv_anomalies	78
Figura 82. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla objects.....	78
Figura 83. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla pv_anomalies	79
Figura 84. Estructura final de la base de datos	79

Figura 85. Carga automática en QGIS del proyecto tras el cálculo de los puntos calientes..	80
Figura 86. Visualización en QGIS de pv_anomalies.....	80
Figura 87. Proceso de generación automática de informes de hot spots.....	81
Figura 88. Selección de parámetros dinámicos para el proceso de generación automática de informes de hot spots	81
Figura 89. Parámetros de configuración el proceso de generación automática de informes de hot spots	82
Figura 90. Opciones de generación de informes de hot spot	83
Figura 91. Visualización de hot spot en imagen térmica	83
Figura 92. Informes resultado generados	84
Figura 93. Ejemplo de informe resultado	85
Figura 94. Array de paneles montados adaptándose a la orografía del terreno	88
Figura 95. Nube fotogramétrica densa	89
Figura 96. Altimetría procedente de DSM y DTM.....	89
Figura 97. Imperfecciones en la nube de puntos en zonas de borde	90
Figura 98. Proceso de cálculo de la geometría 3D a partir de modelos digitales	91
Figura 99. Parámetros del proceso de cálculo de la geometría 3D a partir de modelos digitales	91
Figura 100. Informe de resultados de array de panel.....	97
Figura 101. Efecto de sobredimensionamiento	98
Figura 102. Informe de resultados de array de panel mejorado	99
Figura 103. Geometría de panel ajustada.....	100
Figura 104. Parámetros del proceso de actualización geométrica de los paneles	100
Figura 105. Proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas	101
Figura 106. Parámetros del proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas ..	102
Figura 107. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura	106
Figura 108. Parámetros del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura.....	106

Figura 109. Estimación de la emisividad en función del ángulo de observación recogida en un artículo científico.....	109
Figura 110. Relación entre el ángulo de observación y la emisividad recogida en la norma	109
Figura 111. Formulación para cálculo de temperatura corregida recogida en un artículo científico	111
Figura 112. Normalización de temperatura a irradiancia de referencia conforme a la norma..	114
Figura 113. Ejemplo de informe de anomalía extraído de la norma.....	115
Figura 114. Proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots.....	116
Figura 115. Parámetros del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots	116
Figura 116. Elección del criterio para detección de hot spot.....	116
Figura 117. Ejemplo de fichero de serie temporal de irradiancia solar.....	119
Figura 118. Problemas de las nubes densas resultantes de la correlación en el proyecto fotogramétrico de la cámara visible.....	123
Figura 119. Interfaz Points Cloud Tools: Project Magnament y Point Cloud Tools	125
Figura 120. Parámetros de configuración del proceso para la optimización de la nube de puntos de un parque solar.....	125
Figura 121. Ejemplo de lista de procesos de Points Cloud Tools	126
Figura 122. Ejecución de lista de procesos de Points Cloud Tools	126
Figura 123. Ejemplo de fichero .bat de ejecución de lista de procesos	127
Figura 124. Información del tiempo invertido en la ejecución de una lista de procesos de Points Cloud Tools	128
Figura 125. Resultados finales del proceso de optimización de la nube de puntos en el parque solar	129
Figura 126. Construcción e inserción de nubes de puntos en un proyecto de Point Cloud Tools	130
Figura 127. Visualización de capa de tileado.....	130
Figura 128. Visualización 2D de la nube de puntos en el MapCanvas de QGIS optimizada con control de escala	

Figura 129. Selección del recinto de la nube de puntos a desplegar en el visor 3D.....	132
Figura 130. Visualización 3D de la nube de puntos clasificada	133
Figura 131. Operaciones 3D de selección y edición de la nube de puntos	134
Figura 132. Vista en 2D de la reclasificación de la nube de puntos realizada en el visor 3D...	
.....	135
Figura 133. Operaciones de selección y edición de la nube de puntos en 2D	137
Figura 134. Almacenamiento y exportación de resultados de edición.....	137
Figura 135. Lista de comandos disponibles para procesamiento de nubes de puntos en Point Cloud Tools	138

1. CONTEXTO, OBJETIVO Y RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD DE PAFYC

1.1 CONTEXTO

La herramienta informática se ha realizado dentro del Grupo de Investigación de Precisión Agroforestal y Cartográfica (PAFyC), <http://pafyc.uclm.es/>, en el contexto del Proyecto de Investigación:

Sistema de gestión inteligente del mantenimiento de plantas fotovoltaicas, líneas de alta tensión y análisis de masas forestales en líneas de alta tensión (SGIM).

- Tipo de proyecto: Artículo 83, contrato de I+D con Eiffage Energía SL, como subcontratación en el proyecto de misma denominación del Programa Feder Interconecta 2018 de las empresas Eiffage Energía SL y NetBerry Solutions SL, con referencia EXP - 00112105 / ITC-20181054 según resolución definitiva de CDTI de diciembre de 2018.
- Referencia UCLM: UCTR190022
- Investigador Principal: David Hernández López, David.hernandez@uclm.es.
- Plazo de ejecución: 01/10/2018 a 20/03/2021

1.2 OBJETIVO

El objetivo principal del proyecto consiste en el diseño y desarrollo de un innovador Sistema de Gestión Inteligente del Mantenimiento de Plantas Fotovoltaicas y Líneas de Alta Tensión (SGIM) basado en la optimización de los sistemas de control y monitorización de sus equipos e instalaciones mediante el desarrollo de técnicas de termografía y fotogrametría, que permita recoger de una manera óptima los datos necesarios para poder llevar a cabo una correcta gestión y análisis de los mismos a través de vuelos inteligentes realizados por aeronaves pilotadas por control remoto (drones).



Figura 1. Objetivo del proyecto

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominado célula solar de película fina.

Este tipo de energía se usa principalmente para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución, aunque también permite alimentar innumerables aplicaciones y aparatos autónomos, abastecer refugios de montaña o viviendas aisladas de la red eléctrica. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas han avanzado considerablemente en los últimos años.

La producción de electricidad a partir del “efecto fotovoltaico” se realiza a través de placas solares fotovoltaicas mediante la transformación de la energía solar recibida en corriente eléctrica, la cual finalmente se adapta para el consumo eléctrico en una vivienda, local, etc. Este tipo de paneles solares son estructuras grandes que constan de piezas delicadas, y que están continuamente expuestas a condiciones climatológicas y fenómenos naturales tales como lluvia, polvo e incluso animales, que pueden provocar que el sistema falle o incluso deje de funcionar.

Uno de los problemas más comunes que se presentan en las instalaciones eléctricas tales como centrales generadoras, subestaciones, líneas de transmisión y subtransmisión, redes de distribución, etc., así como en los diversos puntos de conexión o contacto en las partes que las integran, son los denominados “[Puntos calientes](#)”, los cuales pueden llegar a ocasionar daño parcial o total en equipos e instalaciones, con la consiguiente pérdida de la continuidad del servicio eléctrico. Cuando la condición de un componente, conductor o equipo eléctrico se deteriora, su resistencia puede aumentar y generar más calor. Las causas de la aparición de estos puntos calientes, o variaciones termales, pueden ser reales o aparentes. Las causas reales intervienen de forma directa sobre la temperatura absoluta real emitida por la superficie, en cambio, las aparentes

son causas que pueden producir confusiones y errores de lectura, que se deben evitar. Asimismo, la aparición de estas áreas de temperatura elevada se extiende también a los elementos de plantas fotovoltaicas. Estos puntos calientes afectan a una zona del panel solar y tienen como resultado una disminución localizada de la eficiencia, provocando una menor potencia de salida y una aceleración de la degradación de los materiales en dicha zona.

Con esta situación, se hace necesario establecer un sistema de mantenimiento con el que se garantice que todo el equipo se mantiene y funciona correctamente.

Para poder controlar de forma eficiente una planta de energía solar se necesita un sistema capaz de adquirir y tratar los datos necesarios para detectar una anomalía de manera rápida y sencilla, ya que el mínimo fallo conlleva una menor producción de energía y si perdura en el tiempo puede tener consecuencias económicas mayores.

Actualmente, este tipo de mantenimiento se lleva a cabo de forma manual a través de inspecciones visuales realizadas por operarios donde se detectan posibles daños que afecten a la seguridad, así como posibles deformaciones de los equipos. Este tipo de tareas de mantenimiento y comprobación de averías son complejas y peligrosas, además no se consigue obtener datos que puedan ser gestionados en tiempo real, e implica un elevado costo de tiempo y recursos humanos. Además, posibles errores humanos en la realización de dichas tareas pueden derivar a la obtención de información incorrecta o incompleta de los equipos inspeccionados, obteniéndose una mala gestión del mantenimiento.

Es por todo ello que uno de los **principales objetivos** tecnológicos de este proyecto es el diseño y desarrollo de un novedoso sistema que consiga llevar a cabo una óptima **monitorización** de plantas solares fotovoltaicas a través de **drones** embarcando sensores térmicos. Mediante el desarrollo de técnicas de termografía, se llevará a cabo una correcta inspección de las instalaciones fotovoltaicas, posibilitando la detección de anomalías en instalaciones solares en funcionamiento y pudiendo ser capaz, además, de revisar grandes superficies en poco tiempo. Con termografía será posible detectar áreas que pudieran tener problemas o averías potenciales y repararlas antes de que se produjeran.

Las condiciones ambientales que se han de tener en cuenta en el mantenimiento de los equipos que forman las placas solares fotovoltaicas son variables. Pueden llegar a afectar a la medición, proporcionando resultados erróneos, por lo que es importante realizar dichas tareas en situaciones favorables, teniendo en cuenta los siguientes factores: radiación solar, temperatura ambiental, cobertura del cielo, viento, etc.

Asimismo, puede tener lugar la aparición de errores de medición debido a un mal posicionamiento de la cámara y a condiciones ambientales y de medición con contraste térmico insuficiente. Estos típicos errores de medida pueden estar causados por: un ángulo de observación demasiado tangencial, alejado de la orthogonal al panel, cambios en la irradiancia solar derivados de la dirección solar o cambios de nubosidad del cielo, y por la presencia de radiación reflejada de otras placas diferente a la inspeccionada.

Una vez obtenidas las termografías, como último paso, se llevará a cabo el proceso de análisis mediante el estudio de las zonas calientes de la imagen térmica. Interpretando su forma y ubicación, estos puntos y áreas calientes indicarán distintas averías.

Todo el procedimiento desarrollado debe ser conforme a la norma IEC TS 62446-3, Technical Specification: Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography, según la Edition 1.0 2017-06, url: <https://webstore.iec.ch/publication/28628> donde se contempla la inspección para detectar anomalías a partir de cámaras térmicas embarcadas en drones y se detallan las especificaciones que han de cumplir los vuelos y las correcciones a tener en cuenta.

1.3 RELACIÓN CON LAS ACTIVIDADES DOCENTES Y DE INVESTIGACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN PAFYC

Este trabajo está en relación directa con la titulación en la que imparten docencia los miembros de PAFyC, ya que en el Plan de Estudios del Grado de Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes de Albacete, como en la inmensa mayoría de las Escuelas de Ingeniería Agrícola en España, se contempla la formación en energías renovables, integrando principalmente energía solar fotovoltaica y energía termosolar. En el caso de la ETSIAM de Albacete estos contenidos se incluyen en la asignatura optativa “Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la Agricultura”. Además, se incluyen aspectos básicos de instalaciones fotovoltaicas en la asignatura de “Cálculo de Estructuras y Electrificación”, concretamente en la descripción y cálculo de sistemas eléctricos en corriente continua.

Además, la Universidad de Castilla-La Mancha alberga el Campus Científico y Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente (CYTEMA), siendo es una apuesta de la UCLM por la docencia, la investigación y la transferencia de conocimiento en Energía y Medioambiente, con especial intensidad en energías renovables, como uno de los pilares de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), concretamente el objetivo 7 “Energía Asequible y no Contaminante”.

Por último, dentro de las actividades del grupo de investigación Precisión Agroforestal y Cartográfica (PAFyC) se encuentra la línea de investigación “Mejora de la eficiencia del uso del agua y la energía en el regadío (riego de precisión), integrando criterios propios de la ingeniería y agronomía del riego.”, que a su vez integra el uso de energía solar fotovoltaica en riego solar. Esta línea ha resultado en la lectura de una tesis doctoral, titulada “Modelo integral de gestión de sistemas de riego alimentados con energía solar fotovoltaica” del doctorando Jorge Cervera, actual contratado postdoctoral en el grupo y la publicación de más de 15 comunicaciones a congresos y 3 artículos científicos de alto impacto. Esta línea, está incluida en un proyecto de PAFyC del Plan Nacional de I+D+i, del que soy IP, “Sistema experto para la gestión del agua y la energía en el regadío (AGL2017-82927-C3-2-R)”

Se trata de un trabajo que involucra la mayor parte de las temáticas del área de conocimiento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría:

- **Geolocalización.** En este trabajo se hace imprescindible el uso e integración de diferentes sistemas de referencia de coordenadas (CRSs) utilizados en las diferentes fuentes de información y en los proyectos fotogramétricos: proyectados (UTM), geodésicos 3D, ECEF, geodésicos locales cartesianos, y sistemas de altitudes (elipsoidales y ortométricas). Además de los sistemas de coordenadas espaciales, también se debe integrar la conversión entre diferentes sistemas de tiempo: tiempo oficial, gpstime, UTC y otros posibles. Se deben realizar operaciones para relacionar magnitudes de la proyección UTM al terreno, y viceversa.
- **Fotogrametría.** Se debe integrar la gestión y uso de proyectos fotogramétricos del programa Agisoft Metashape empleado por EIFFFAGE para resolver los proyectos fotogramétricos tanto con cámara visible como con cámara térmica. Es necesario implementar las operaciones de fotogrametría de paso del sistema objeto al imagen, y viceversa, para el modelo matemático empleado por este programa, integrando tanto para la orientación interna como externa, incluyendo la representación del objeto como modelos digitales de elevación (DSM y DTM) además de cómo malla 3D.
- **Teledetección.** El uso de las cámaras térmicas no es sino un caso particular de teledetección de rango cercano, siendo necesario abordar problemas de índole radiométrico y geometría que vincula la integración de técnicas de teledetección y fotogrametría.
- **Sistemas de Información Geográfica.** Se debe diseñar un modelo de datos cartográfico que permita almacenar, gestionar y explotar la información generada en

una serie de pasos, desde la generación de un proyecto con la definición elemental del parque fotovoltaico hasta la determinación de la posición de los puntos calientes, en el espacio objeto y en el espacio imagen, de todas aquellas imágenes térmicas en las que se observa.

2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

Las características principales en lo referente a la arquitectura son:

- **Arquitectura hardware:**

- La infraestructura informática en la que se instalarán y ejecutarán los programas es la puesta a disposición del proyecto por EIFFAGE, permitiendo el acceso al gran volumen de datos desde cualquier ordenador integrado en la red. Está integrada por un conjunto de PCs conectados en una red en la que se integra un NAS, pudiendo accederse de forma remota a cualquier PC utilizando VNC.
- El sistema operativo en el que se ejecutarán las aplicaciones será Windows 10.

- **Arquitectura software:**

- El paradigma de programación elegido para la mayoría de los componentes software ha sido la Programación Orientada a Objetos (POO), para todos los lenguajes empleados: Python y C++. Como IDEs se han utilizado QT Creator para C++ y PyCharm para Python.
- El programa principal que actuará como GUI (interfaz gráfica de usuario) será el programa QGIS, complementándose para alguna operación con otras herramientas de software libre o uso libre como: DB Browser for SQLite, Foxit Reader, Notepad++, GIMP, 7-zip, etc.
- Para la explotación de nubes de puntos 3D se ha diseñado un componente gráfico basado en OpenGL, integrado dentro de QGIS.
- Para la realización de algunas operaciones con grandes ficheros de nubes de puntos, tales como la clasificación de terreno y operaciones de diezmado, se ha diseñado un componente para simplificar el uso de LAS tools, herramienta comercial integrada en el diseño disponible para el proyecto.
- Para la interacción con QGIS se han diseñado un conjunto de complementos o plugins en el lenguaje Python, con la responsabilidad principal de servir de interfaz para lanzar todos los procesos necesarios, lo que exige su parametrización, ejecución y puesta a disposición de los resultados al usuario. Sólo aquellos procesos muy ligeros han sido diseñados como librerías en Python, trasladando el diseño de la mayoría de los procesos a componentes en C++ por la mayor potencia de este lenguaje.

- Para detectar errores en el despliegue de las aplicaciones debidos a incompatibilidad de librerías con dependencias de programas integrados en el diseño, motivadas por ejemplo por las diferentes versiones de QGIS, ha sido necesario diseñar aplicaciones de análisis de conflictos.

A continuación, se procede a enumerar y describir brevemente todos los **componentes diseñados**, haciendo referencia a la relación entre ellos. En un apartado posterior se describe el diseño de las herramientas que darán solución a los módulos correspondientes del proyecto haciendo uso de los componentes aquí descritos.

- **Componente de operaciones entre CRSs, libCRS.**

Es una librería de clases en C++ que aporta toda la funcionalidad relativa a la gestión y operaciones entre Sistemas de Referencia de Coordenadas (CRSs), cumpliendo con la norma ISO 19111, y que incluye tanto los sistemas geodésicos de referencia más extendidos en el mundo (WGS84) y en Europa (ETRS89 y Ed50), así como los sistemas de coordenadas geográficas, geocéntricas y la proyección UTM, además de sistemas geodésicos locales empleados en los proyectos fotogramétricos. Entre los modelos del geoide se incluyen uno mundial, EGM08, y el oficial para España, EGM08-REDNAP. Se incluyen las operaciones de conversión y transformación necesarias, contemplando la transformación oficial en España entre ED50 y ETRS89. Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, PROJ, GDAL y GEOS.

- **Componente para nuevos componentes gráficos, libWidgets.**

Es una librería de clases en C++ diseñada para nuevos componentes gráficos que completan a los incluidos en Qt.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt.

- **Componente de interacción con datos geográficos, libIGDAL.**

Es una librería de clases en C++ diseñada como una interfaz para simplificar el uso de GDAL para manejar información geográfica en formato raster, vectorial y bases de datos.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, PROJ, GDAL y GEOS.

- **Componente de acceso a información de imágenes, libIExif.**

Es una librería de clases en C++ para manejo de ficheros de imágenes en diferentes formatos, especialmente de información almacenada en la cabecera relativa a parámetros de adquisición, incluyendo la posición aproximada de orientación directa.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, Freemail y Exiv2.

- **Componente de operaciones de geometría computacional, libICGAL.**

Es una librería de clases en C++ diseñada como una interfaz a la librería/componente externo CGAL que aporta funcionalidad de geometría computacional necesarias en el proyecto, tales como generación de modelos 3D a partir de nubes de puntos, operaciones de intersección de rectas con modelos 3D, etc.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS y libIGDAL.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, CGAL, Boost, Eigen y LAStools.

- **Componente de operaciones de visión computacional, libIOpenCv.**

Es una librería de clases en C++ diseñada como una interfaz a la librería/componente externo OpenCV que aporta funcionalidad de algoritmos de visión computacional necesarios en el proyecto.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt y OpenCV.

- **Componente de interfaz con la librería Point Cloud Library (PCL), libIPCL.**

Es una librería de clases en C++ diseñada como una interfaz a la librería/componente externo PCL que aporta funcionalidad para operaciones con nubes de puntos 3D.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS y libIGDAL.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, PCL, Boost y Eigen.

- **Componente de operaciones de segmentación en nubes de puntos, libPCSegmentation.**

Es una librería de clases en C++ diseñada para extracción de elementos a partir de nubes de puntos.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, PCL, Boost y Eigen.

- **Componente de interfaz gráfica 3D para nubes de puntos, libPCDViewer.**

Es una librería de clases C++ diseñada como interfaz y adaptación de PCDViewer, componente gráfico 3D de software libre.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libPointCloudDbManager, libModelManagementTools y libWidgets.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, CGAL, Boost, LAStools, PCDViewer.

- **Componente de parametrización de algoritmos y procesos, libParameters.**

Es una librería de clases C++ diseñada para la gestión de parámetros en cualquier proceso dentro del proyecto, incluyendo clases para interfaz de usuario. La persistencia se concreta en ficheros XML. Incluye gestión de tipos de parámetros y unidades.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt.

- **Componente para la gestión de procesos, libProcessTools.**

Es una librería de clases C++ diseñada como una extensión de librerías de Qt para la gestión de procesos concurrentes y secuenciales, incluyendo componentes gráficos para informar al usuario durante la ejecución.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt.

- **Componente para modelizar redes de líneas alta tensión y parques fotovoltaicos, libPhotovoltaicPower.**

Librerías de clases donde se modelan los objetos necesarios para los módulos de líneas de alta tensión y de parques fotovoltaicos. Para el escenario de líneas de alta tensión se contemplan los conceptos de: agrupación de cables, conexión entre postes, postes, catenaria, áreas de riesgo, línea de alta tensión y red de líneas de alta tensión. Para el escenario de parques fotovoltaicos se contemplan los conceptos de: array de paneles, inversor, bloque de arrays, anomalía (hot spot) y parque solar.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt y GDAL.

- **Componente fotogramétrica, libPhotogrammetryManager.**

Es una librería de clases C++ diseñada para la gestión de proyectos fotogramétricos. Incluye entre sus principales funcionalidades la construcción de un proyecto a partir de la importación de ficheros de proyectos de Agisoft Metashape, la persistencia en base de datos y todas las operaciones necesarias propias de algoritmos fotogramétricos, tanto en el proceso directo, es decir, el paso desde la geometría de las imágenes a la geometría del objeto, como en el proceso inverso, es decir, el paso desde la geometría del objeto a la geometría de las imágenes.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS, libIGDAL, libICGAL; libParameters, libProcessTools y libIExif.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, CGAL, Boost, LAStools, Eigen.

- **Componente complemento de QGIS en Python para proyectos de fotogrametría, photogrammetry_tools.**

Componente en Python para la gestión de proyectos fotogramétricos que serán utilizados en proyectos de gestión de modelos en los escenarios de parques solares y líneas de alta tensión. Integra la interfaz gráfica, el sistema de persistencia en bases de datos y el sistema de explotación de los resultados. Todos los procesos se realizan mediante a llamadas al componente libPhotogrammetryTools utilizando como pasarela el componente libPyPhotogrammetryTools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: [libPyPhotogrammetryTools](#).

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: [pyQGIS](#) y [pyQt](#).

- Componente interfaz para acceder desde [photogrammetry_tools](#) al resto de componentes en C++, [libPyPhotogrammetryTools](#)

Librería de clases C++ para resolver la interacción entre el componente Python [photogrammetry_tools](#) y los componentes C++ diseñados.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: [libCRS](#), [libIGDAL](#), [libParameters](#), [liblExif](#), y [libPhotogrammetryTools](#).

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: [Qt](#), [Boost](#) y [Python37](#).

- Componente para gestión y operaciones con nubes de puntos en bases de datos [SQLite](#) e interfaz con herramientas de [LAStools](#), [libPointCloudDbManager](#).

Es una librería de clases C++ diseñada para la gestión de proyectos de nubes de puntos. Incluye entre sus principales funcionalidades la construcción a partir de ficheros de nubes de puntos en formato LAS/LAZ, la persistencia en base de datos y todas las operaciones de gestión de puntos solicitadas por otros componentes del desarrollo, tanto para procesos como para operaciones de visualización 2D, en QGIS, o 3D, con [libPCDViewer](#). También es el componente que actúa como interfaz con [LAStools](#) para optimizar y simplificar los procesos que se precisan en el proyecto para clasificar y preparar los ficheros de nubes de puntos antes de ser importados.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: [libCRS](#), [libIGDAL](#), [libParameters](#), [libProcessTools](#).

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: [Qt](#), [Boost](#) y [LAStools](#).

- Componente complemento de QGIS en Python para proyectos de nubes de puntos, [point_cloud_tools](#).

Componente en Python para la gestión de proyectos de nubes de puntos que serán utilizados en proyectos de gestión de modelos en los escenarios de parques solares y líneas de alta tensión. Integra la interfaz gráfica, el sistema de persistencia en bases de datos y el sistema de explotación de los resultados, incluyendo la visualización 2D, en QGIS, y 3D, con un visor basado en OpenGL integrado en [libPCDViewer](#).

Todos los procesos se realizan mediante a llamadas al componente [libPointCloudDbManager](#) utilizando como pasarela el componente [libPyPointCloudTools](#).

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: [libPyPointCloudTools](#).

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: [pyQGIS](#) y [pyQt](#).

- Componente interfaz para acceder desde point_cloud_tools al resto de componentes en C++, libPyPointCloudTools.

Librería de clases C++ para resolver la interacción entre el componente Python point_cloud_tools y los componentes C++ diseñados.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS, libIGDAL, libParameters, libPCDViewer, y libPointCloudDbManager.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, Boost y Python37.

- Componente para gestión de proyectos con modelos de redes de líneas de alta tensión y de parques fotovoltaicos, libModelManagementTools.

Es una librería de clases C++ diseñada para la gestión de proyectos para las herramientas de cada uno de los dos escenarios contemplados en el proyecto: las redes de líneas de alta tensión y los parques solares. Cada tipo de proyecto se crea a partir del mínimo de información necesaria empleando el modelo de datos del escenario correspondiente, utilizando el componente libPhotovoltaicPower. Cada proyecto persiste en una base de datos. Se incluyen los algoritmos para resolver cada uno de los pasos necesarios en cada escenario, descritos posteriormente en el apartado de herramientas, haciendo uso de la información proveniente de proyectos de nubes de puntos y de proyectos de fotogrametría, a través de la interacción con las componentes libPointCloudDbManager y libPhotogrammetryTools. Todos los resultados de cada paso van generando un cambio de estado en la base de datos que permite la persistencia correcta evitando la necesidad de repetir procesos ya realizados, contemplándose también procesos para procesar, seleccionar y eliminar aquellas partes del proyecto que se consideren convenientes, al objeto de permitir elegir diferentes parametrizaciones en algoritmos en diferentes partes del proyecto. También se incluye la funcionalidad necesaria para aportar la información para la generación automática de informes desde llamadas realizadas por la componente model_management_tools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS, libIGDAL, libICGAL, libParameters, libPCSegmentation, libOpenCV, libPhotovoltaicPower, libPhotogrammetryTools, libPointCloudDbManager y libProcessTools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, Boost, LAStools, muparser, EIGEN y RTL.

- Componente complemento de QGIS en Python para proyectos de gestión de modelos, model_management_tools.

Componente en Python para la gestión de proyectos de modelización, en redes de líneas de alta tensión y en parques solares. Integra la interfaz gráfica, el sistema de persistencia en bases de datos y el sistema de explotación de los resultados, incluyendo la visualización 2D y 3D interactuando con la componente libPointCloudDbManager. Todos los procesos se realizan mediante llamadas al componente libModelManagementTools utilizando como pasarela el componente libPyModelManagementTools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libPyModelManagementTools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: pyQGIS y pyQt.

- Componente interfaz para acceder desde model_management_tools al resto de componentes en C++, libPyModelManagementTools

Librería de clases C++ para resolver la interacción entre el componente Python model_management_tools y los componentes C++ diseñados.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes del proyecto: libCRS, libIGDAL, libParameters, libPCDViewer, libIExif, libWidgets, libPointCloudDbManager, libPhotogrammetryTools, libPhotovoltaicPower y libModelManagementTools.

Se utilizan las siguientes librerías/componentes externas: Qt, Boost y Python37.

A continuación, se describe el diseño de la **herramienta de detección de puntos calientes** en base a la enumeración de la secuencia ordenada de procesos a realizar. Estos pasos serán detallados en un apartado posterior donde se incluye un manual de la herramienta desarrollada dirigiendo la explicación con un caso de uso e incluyendo en otro apartado los principales avances alcanzados en este proyecto en algunos de los algoritmos principales.

El usuario realiza todo el proceso desde QGIS, utilizando tres componentes: point_cloud_tools, photogrammetry_tools y model_management_tools.

La información que compone los **datos de partida** para iniciar el proceso es:

- Definición del parque fotovoltaico, contemplándose un modelo de datos en el que se incluyen las siguientes clases de objetos:
 - Célula fotovoltaica, objeto mínimo con forma de cuadrado con un tamaño de unos 15 cm.
 - Panel o módulo de celdas, agrupación de filas y columnas de celdas, normalmente con doce filas y seis columnas. Además, a efectos de obtener su geometría, también se maneja el concepto de borde del marco de la

estructura donde se monta, con una dimensión habitual del orden de unos 3 cm.

- Array de paneles o mesa, agrupación de filas y columnas de paneles, normalmente con dos filas y un número variable de columnas para adaptarse a las características de cada diseño en el que también interviene la forma del terreno.
- Bloque de arrays de paneles, contemplado como una agrupación de arrays de paneles.
- Inversor, como elemento de conexión de uno o varios bloques de arrays de paneles.

La forma de definir el parque solar es lo más sencilla posible, a partir de dos ficheros vectoriales en formato shapefile:

- Fichero shapefile de la zona de interés, con la geometría de tipo polígono 2D que encierra todo el parque solar, utilizado como límite para la información de interés a integrar, tanto de nubes de puntos, imágenes del proyecto fotogramétrico, etc.
- Fichero shapefile de arrays de paneles, contemplándose dos alternativas: un fichero con geometría de tipo punto donde cada array de paneles se define con un punto en su interior, lo más centrado posible, o un fichero de tipo polígono donde cada array se define con un rectángulo. En el segundo caso, si el polígono es 2D su geometría 3D se obtendrá en un paso posterior. En ambos casos, para los dos tipos de geometría, el shapefile puede incluir un conjunto de atributos para la definición del modelo de datos, adoptándose valores por defecto para aquellos parámetros que no figuren en ningún atributo. En estos atributos se encuentran: identificador único del array de paneles, identificador del bloque al que pertenece el array, identificador del inversor al que se conecta, número de filas de paneles en cada array, número de filas y columnas de celdas en cada panel, dimensión de celda, tipo de montaje, mínima y máxima altura sobre el suelo, número de partes en que habría que dividir la geometría del array para que cada una de ellas se corresponda aproximadamente con un plano, número de filas de paneles y número de columnas de paneles.
- **Productos geomáticos derivados de vuelos fotogramétricos con cámara RGB,** resultado de la exportación de resultados de proyectos de Agisoft Metashape: ortoimagen de detalle, en formato GeoTIFF, nube de puntos densa, en formato

LAS/LAZ y modelo digital raster de terreno (DTM) y de superficie (DSM), en formato GeoTIFF.

- **Productos del vuelo térmico a usar en la inspección:**
 - Fichero XML exportado del proyecto de Agisoft Metashape donde figura toda la información relativa a las orientaciones internas (calibraciones geométricas de las cámaras), a las orientaciones externas y a las imágenes procesadas.
 - Carpeta con los ficheros de todas las imágenes térmicas del proyecto fotogramétrico, con la misma estructura de subcarpetas empleada en el proyecto de Agisoft Metashape, para que coincidan con su información de ubicación relativa en el fichero XML. Pueden ser las imágenes originales o las resultantes de aplicar la calibración radiométrica térmica, según un procedimiento también diseñado e implementado.
- **Datos adicionales** que varían en función del tiempo, registrados por equipamiento instalado en los propios parques fotovoltaicos con una frecuencia alta que permite que los resultados de la interpolación en función del tiempo sean correctos, contemplándose la opción de no disponer de esta información a través de la introducción de valores constantes en parámetros en los procesos necesarios:

- Fichero CSV con la secuencia de datos temporales de irradiancia solar (W/m^2).

Fichero CSV con la secuencia de datos temporales de los datos meteorológicos: temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%). Si no se dispone de esta información se indicará un valor constante de irradiancia para todo el proyecto en un parámetro en el proceso en que se utiliza esta información.

Los **resultados** de interés para la inspección de puntos calientes se concretan en:

- Base de datos del proyecto del componente libModelManagementTools, resultante de todos los pasos del procesamiento.
- Informes en formato PDF generados automáticamente.

Como parte de los resultados adicionales, se incluyen:

- Bases de datos de los proyectos de los componentes libPointCloudDbManager y libPhotogrammetryTools
- Imágenes auxiliares generadas en diferentes pasos del procesamiento: máscaras proyección de arrays sobre imágenes, máscaras de zonas de reflexión, valores de ángulos de observación, valores de distancia, valores con las temperaturas corregidas, valores de emisividad, etc.

A continuación, se enumeran los **pasos diseñados**:

1. Generación de modelos digitales de elevaciones optimizados.

Este paso se puede obviar si se decide optar por utilizar los modelos de elevaciones (DSM y DTM) resultantes del procesamiento fotogramétrico con Agisoft Metashape, salvo que se detectaran problemas motivados por errores en el mismo cuya solución pasaría por editar la nube de puntos con el componente point_cloud_tools.

Este paso se realiza con el componente point_cloud_tools, partiendo de la nube de puntos densa y sometiéndola a una serie de procesos con LAStools a través del componente libPointCloudDbManager. El resultado se concreta en unos modelos optimizados en resolución espacial y clasificación que agilizará y mejorará los pasos posteriores en la determinación de la geometría 3D de los arrays del parque solar.

2. Preparación del proyecto fotogramétrico del vuelo térmico.

Este paso se realiza con el componente photogrammetry_tools, partiendo del fichero XML del proyecto de Agisoft Metashape y de la carpeta con los ficheros de las imágenes térmicas. El resultado será una base de datos del componente libPhotogrammetryTools que será conectada con el proyecto de modelización del parque solar.

Consta de los siguientes pasos:

- a. Creación de la base de datos del componente libPhotogrammetryTools, con la información descriptiva, la especificación del CRS y la selección del fichero shapefile con la definición de la región de interés, ROI.
- b. Importación del fichero XML de Agisot Metashape con la indicación de la ruta base de las imágenes.
- c. Importación de las rutas de los ficheros de las imágenes.
- d. Cálculo de las huellas de las imágenes térmicas sobre el DSM para optimizar la determinación de las huellas de los arrays de paneles sobre las imágenes térmicas.
- e. Extracción de instante de captura en tiempo UTC y cálculo de problemas por la posición relativa del terreno, punto de captura y Sol, proceso en el que se calcula la elevación y azimut del Sol para cada imagen.

De forma opcional, en este paso se contempla la aplicación de la calibración radiométrica a las imágenes térmicas para obtener imágenes de temperatura calibrada. El proceso de calibración radiométrica de cámaras térmicas no refrigeradas se compone de tres fases: 1) captura de información en ambiente controlado, 2) tratamiento de la información para generar ficheros de

calibración y 3) aplicación de la calibración a imágenes obtenidas con drones o cualquier otra plataforma. Los dos primeros pasos se realizan con hardware y software desarrollados y explotados por la UCLM. En el presente proyecto se integra la generación de software para la aplicación de la calibración radiométrica a imágenes obtenidas con las cámaras calibradas. Este software trata imágenes de cámaras no refrigeradas con medida de temperatura del FPA. Para el resto de cámaras, sin medida de la temperatura del FPA, no tiene sentido realizar este tipo de calibraciones radiométricas. El entorno de desarrollo en una primera fase de desarrollo es Matlab®, con licencia académica de la UCLM, y en una segunda fase de explotación C++/Qt. Los pasos a realizar, el software y la librería necesarios para calibrar las imágenes en post proceso son:

1. Carga y lectura de los ficheros *.TMC de las imágenes capturadas. El software permitirá leer un solo fichero que contenga todos los frames o diferentes archivos con distinto número de frames. Se requiere el software ThermoViewer.
 2. Carga del fichero de calibración.
 3. Aplicación de la calibración a cada píxel de todas las imágenes capturadas, empleando un programa desarrollado en C++/Qt que utiliza como componentes externos: Netlat, Toolbox para Matlab de aplicación de redes neuronales artificiales, y Tensorflow, framework de deep learning para Python.
 4. Guardar las imágenes en formato TIFF 16 bits, con una operación similar a la empleada de forma convencional por FLIR de manera que el valor del nivel digital es tal que la temperatura se obtiene al aplicar la expresión: $0.04 \cdot ND - 273.15$
3. Creación del proyecto de modelización del parque solar.
- a. Creación de la base de datos del componente libModelManagementTools, con la información descriptiva, la especificación del CRS y la selección del fichero shapefile con la definición de la región de interés, ROI.
 - b. Creación de la definición de parque solar, a partir de la importación del fichero shapefile de definición.
4. Asignación del proyecto fotogramétrico del vuelo térmico, resultado del paso 2.
 5. Cálculo de la geometría 3D de los arrays de paneles y de los paneles.

6. Cálculo de las huellas de la geometría 3D de los arrays de paneles sobre las imágenes térmicas.
7. Cálculo de imágenes auxiliares para aplicar corrección a los datos térmicos por: ángulo de observación, distancia, emisividad y zonas afectadas por la reflexión de otros paneles.
8. Cálculo de estadísticas de temperatura para cada array de paneles y para cada panel, tras aplicar las correcciones, proceso en el que además se generarán imágenes con los valores corregidos.
9. Cálculo de los puntos calientes por arrays de paneles y por paneles.
10. Generación automática de informes, contemplando como opciones hacerlo para todos los puntos calientes, los de un array de paneles, los de un panel, o, a modo de inspección de detalle, únicamente para el hot spot seleccionado en el área gráfica de QGIS (Map Canvas). Además, se puede elegir entre generar los informes para todas las imágenes en que aparece el hot spot o sólo la óptima, según criterios de distancia (la más cercana) o de ángulo de observación (la más ortogonal).

3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DIRIGIDA POR UN CASO DE USO

3.1 INTRODUCCIÓN

El ejemplo utilizado corresponde a un trabajo de Eiffage en el Parque Solar de Pozo Cañada, situado unos veinte kilómetros al sur este de Albacete y unos tres kilómetros al noroeste de la localidad de Pozo Cañada, con 77 arrays de paneles distribuidos en una superficie de 9 has. y con una potencia de tres megavatios, cuya ubicación se corresponde con la siguiente figura, donde además se muestra que el vuelo de PNOA de 2019 a 25 cm no es adecuado para definir la geometría de los arrays de paneles. Se utilizan dos vuelos realizados y procesados por Eiffage en mayo de 2019:

- Vuelo visible: DJI Phatom 4 RTK (f=8.8 mm, 5472x3648, 2.4 micras)
- Vuelo térmico: DJI Matrice 600 + Flir Duo Pro R (f=13 mm, 640x512, 17 micras)



Figura 2. Mapa de situación del caso de uso

La solución consiste en un conjunto de complementos (plugins) desarrollados para el programa QGIS, versión 3.4.2, o posteriores, que se completan con llamadas a programas de LASTOOLS, del que se posee licencia en el contexto de este proyecto de investigación.

Las herramientas se encuentran en el NAS de Eiffage, en la ruta: proyectos\uclm\software

Estas herramientas se despliegan en varias carpetas instaladas en los equipos:

- Las herramientas LASTOOLS se deben instalar en C:\LAStools2019, de forma que los programas ejecutables estarán en la carpeta: C:\LAStools2019\bin
- Los complementos para QGIS se encuentran en la carpeta de complementos de QGIS de versión 3 o superior:
 - C:\Users\PCRPAS03\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\point_cloud_tools
 - C:\Users\PCRPAS03\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\model_management_tools
 - C:\Users\PCRPAS03\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\photogrammetry_tools

El hilo conductor de la descripción de las herramientas es un caso de uso facilitado por Eiffage correspondiente al vuelo de un parque fotovoltaico situado en Pozo Cañada (Albacete) realizado en mayo de 2019. Se recomienda emplear una ruta en un disco de estado sólido para agilizar todas las operaciones de lectura y escritura en disco.

Los datos de partida y el resultado de todo el procesamiento explicado en este documento se encuentran en el fichero comprimido: proyectos\uclm\Ejemplo_PozoCanada.7z en el NAS. Esta carpeta se debe copiar en la ruta elegida para el procesamiento, que para este ejemplo es C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada:

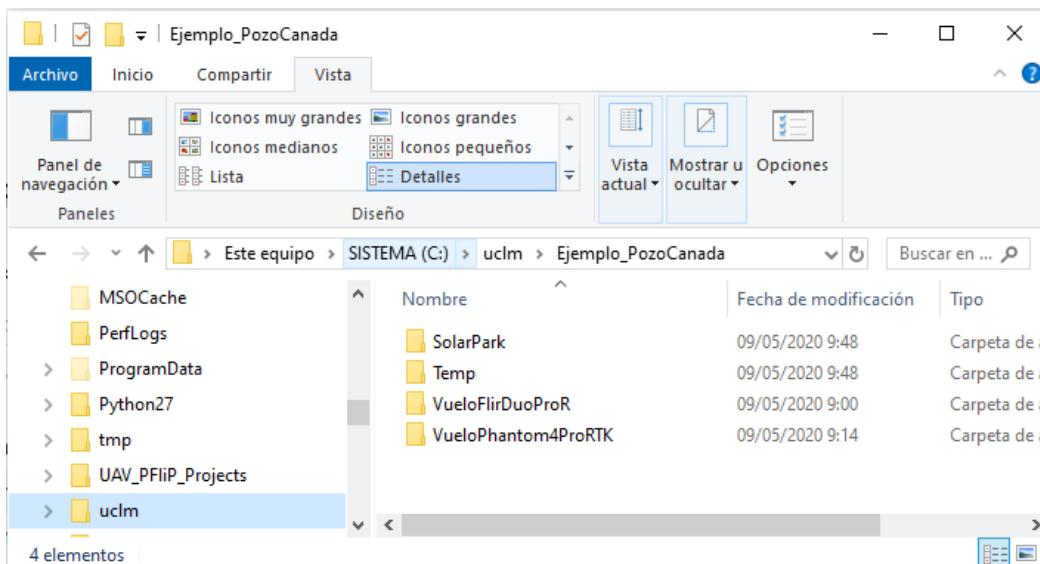


Figura 3. Información de partida para el caso de uso

En este proyecto se utiliza el CRS EPSG: 25830. Todos los ficheros que se creen y que se importen deben estar referidos a este CRS.

3.2 DEFINICIÓN DEL PARQUE SOLAR

La definición de la geometría y de la semántica del parque solar, así como la zona de interés vinculada, se concreta en un conjunto de ficheros en formato shapefile que pueden ser creados con la funcionalidad propia de QGIS. La ruta empleada en este caso es:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition

Para crear la definición se debe utilizar una ortoimagen actualizada, siendo recomendable usar la obtenida a partir de un vuelo fotogramétrico del propio parque solar realizado a con cámara visible embarcada en el UAV. Sería ideal realizar los vuelos con equipos que embarquen simultáneamente cámara visible y térmica, como los que ha comenzado a realizar Eiffage recientemente empleando el UAV DJI Matrice 300 RTK, embarcando el sensor Zenmuse H20:

<https://www.dji.com/es/zenmuse-h20-series>

Para este ejemplo se dispone de un vuelo visible realizado con un UAV DJI Phantom4 RTK:

<https://www.dji.com/es/phantom-4-rtk>

del que se han obtenido en un proyecto de Agisoft Metashape una serie de productos:

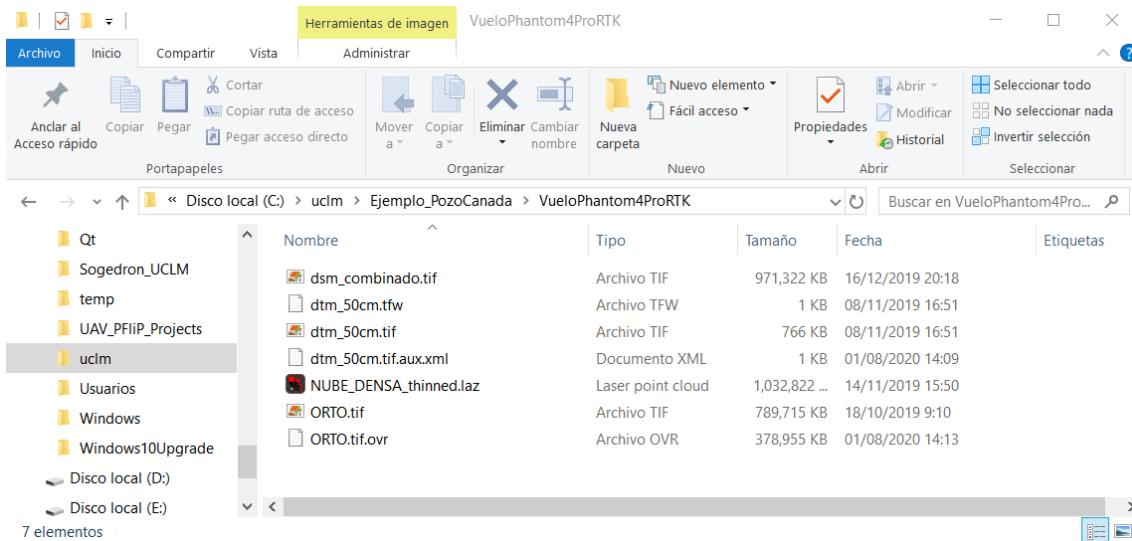


Figura 4. Información de partida a partir del vuelo con cámara visible

- **OrtoImagen**, C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloPhantom4ProRTK\ORTO.tif, con una resolución espacial de 0.02 m. Para agilizar las operaciones de visualización se han creado pirámides en QGIS, fichero ORTO.tif.ovr

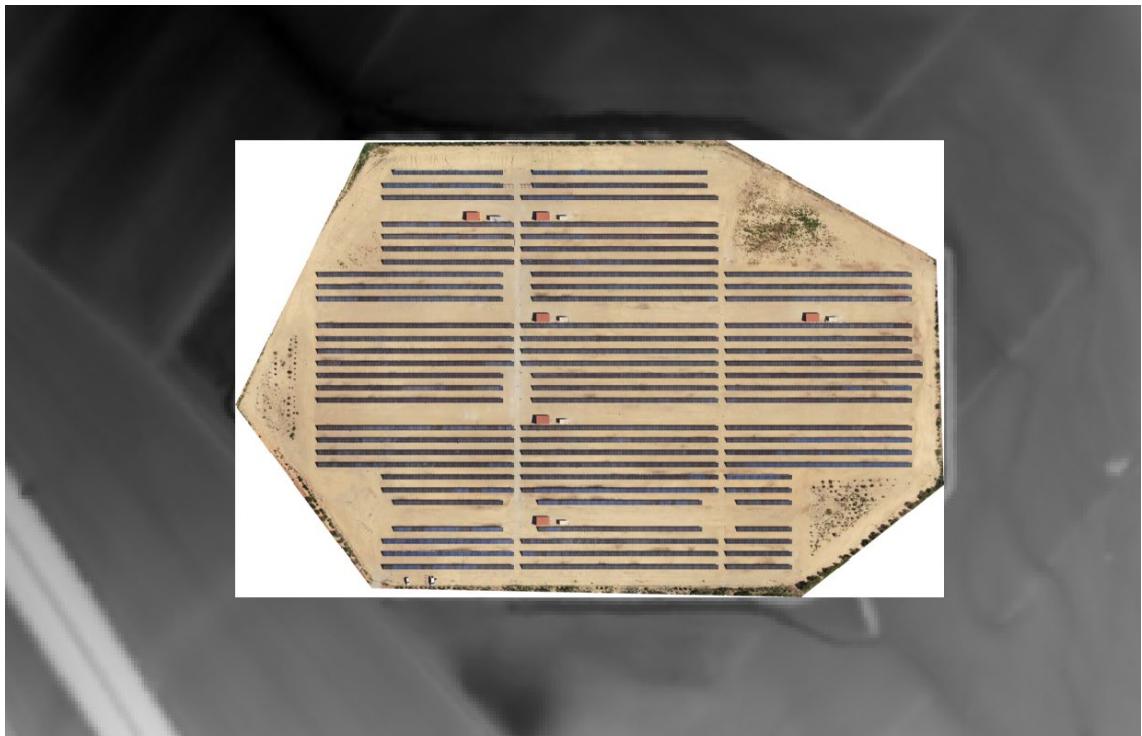


Figura 5. Información de partida: Ortoimagen de la cámara visible

- **DSM,**

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloPhantom4ProRTK\dsm_combinado.tif, con una resolución espacial de 0.035 m.

Este modelo digital de superficie es el resultado de fusionar el DSM generado en Agisoft Metashape con el modelo digital del terreno de 2 m descargado del CNIG procedente de PNOA LIDAR. El motivo es que el no disponer de información de altitudes en los límites de la zona del vuelo puede provocar fallos en algunos algoritmos. La fusión se puede hacer con cualquier programa de GIS, incluido QGIS. La precisión estimada es la propia de cada uno de los dos productos, unos 0.03 m para el DSM del UAV y unos 0.15 m para el DSM de PNOA LIDAR. Se ha implementado un algoritmo para poder usar únicamente el DSM generado en el proyecto de Agisoft Metashape, pero que no ha podido ser probado en pocos casos, recomendándose en caso de fallo proceder a obtener un DSM fusionado con PNOA LIDAR.



Figura 6. Información de partida: DSM postprocesado a partir del vuelo visible y LIDAR PNOA

- **DTM**, C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloPhantom4ProRTK\dtm_50cm.tif, con una resolución espacial de 0.5 m, suficiente para el relieve del terreno del parque solar.

En algunas fases del procesamiento hay que disponer de un modelo digital del terreno. Se puede utilizar uno obtenido a partir de la clasificación automática de Agisoft Metashape. Sin embargo, se ha generado un modelo más ligero a partir de un proceso de la nube densa original, con el complemento point_cloud_tools, que no es sino una secuencia de comandos de LASTTOOLS, tal y como se describe en el apartado 4.5 de este documento.

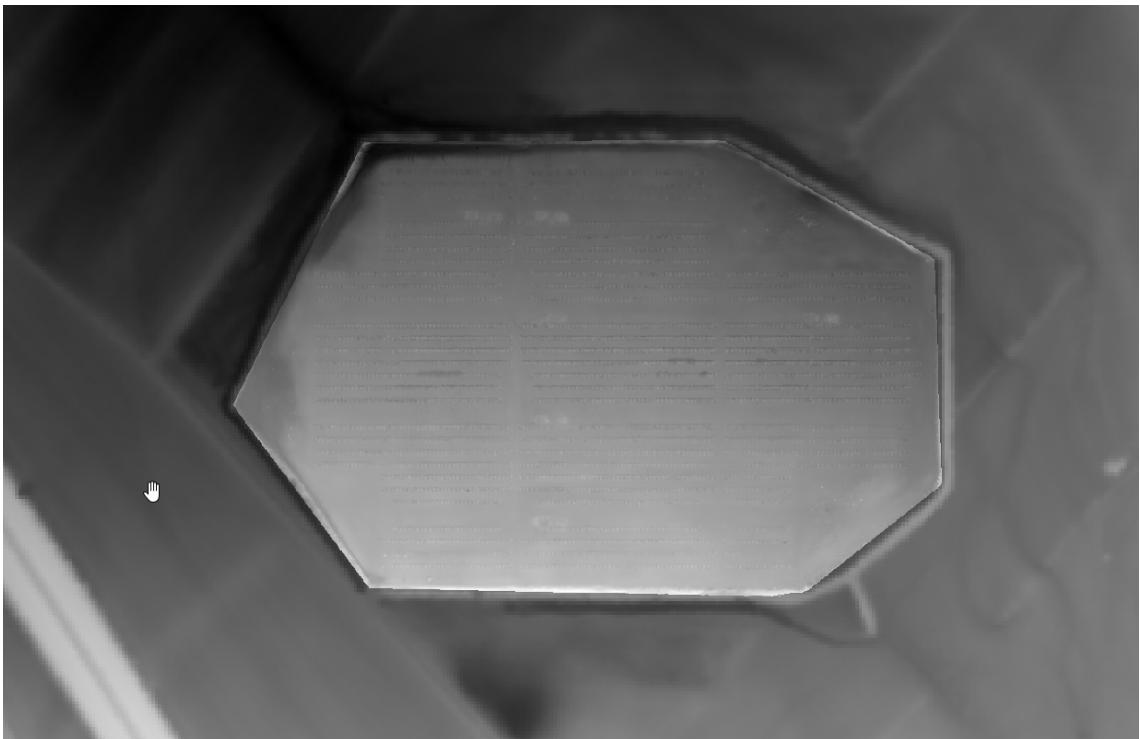


Figura 7. Información de partida: DTM postprocesado a partir del vuelo visible y LIDAR PNOA

Se contemplan dos opciones para el shapefile inicial de definición del parque solar:

- Caso de un fichero con geometría de tipo punto en el que cada fenómeno, cada vértice, represente un array de paneles del parque solar. En el ejemplo este fichero es:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\arrays.shp

Este fichero se ha creado fotointerpretando la posición aproximada del centro de los arrays sobre la ortoimagen. No es necesario que el punto corresponda exactamente con el centro, bastando con que sea un punto interior situado en la parte central para que funcione el algoritmo de determinación de la geometría 3D que se explica posteriormente.

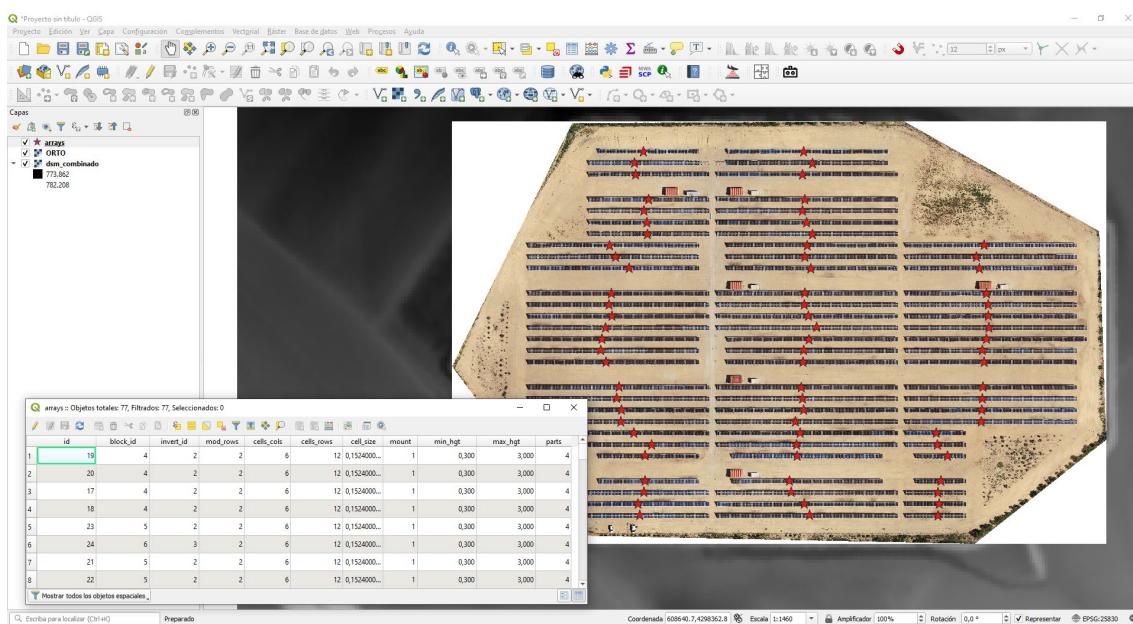


Figura 8. Definición inicial del parque solar con un fenómeno con geometría de punto por array de paneles

- Caso de un fichero con geometría de tipo polígono, 2D o 3D, en el que cada fenómeno, cada polígono, represente la geometría conocida a priori del array de paneles correspondiente. Sirva de ejemplo el fichero:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\
arrays_pol_all_fields.shp

o el fichero:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\
arrays_pol_no_fields.shp

La procedencia de este fichero podría ser información disponible del parque solar, as built mejor que de proyecto, el resultado de procesamiento con herramientas de visión computacional de detección automática de los paneles sobre las imágenes o sobre la ortoimagen (no contempladas en este proyecto), o la edición manual sobre la ortoimagen.

Descripción de la Solución

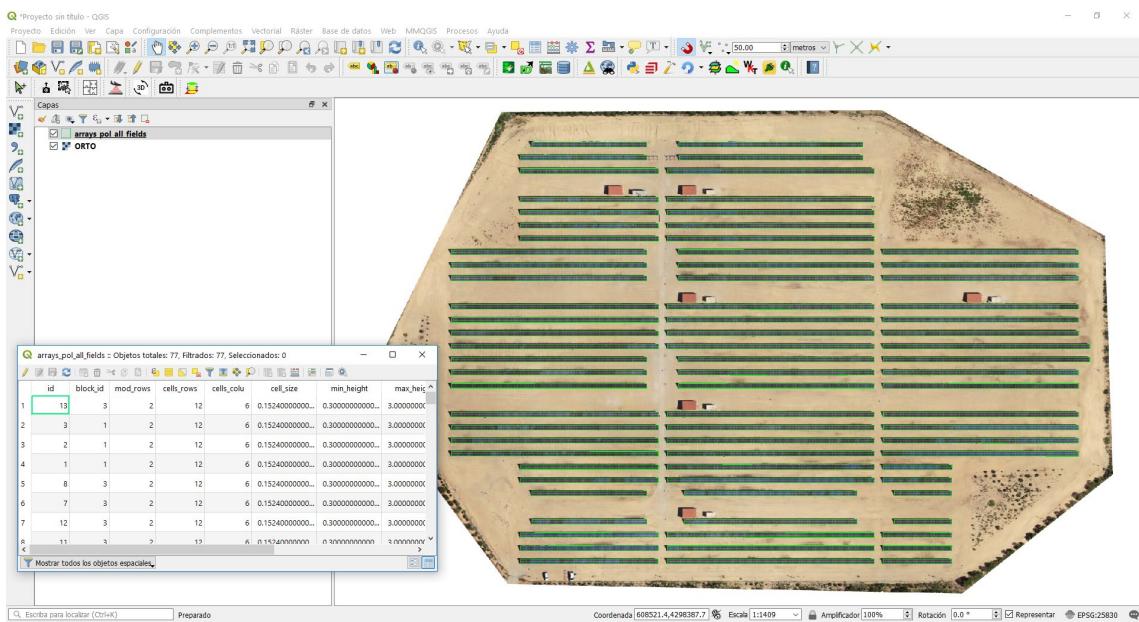


Figura 9. Definición inicial del parque solar con un fenómeno con geometría de tipo polígono para cada array de paneles

Cualquiera de los ficheros shapefile puede incluir campos a partir de los que se obtendrían algunas variables necesarias en el proceso. Si el shapefile no incluye alguno de los campos, o ninguno, se adoptarían valores por defecto, tal y como se detalla a continuación. Los campos disponibles en el shapefile de puntos del ejemplo son:

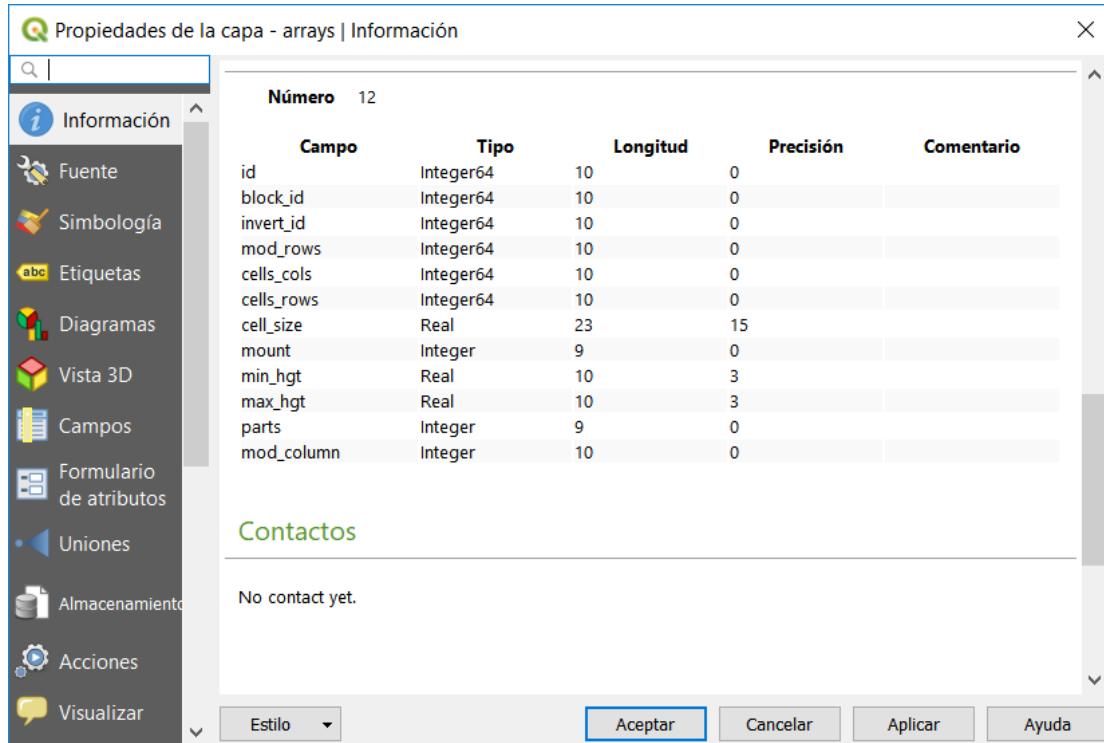


Figura 10. Definición incial opcional del modelo de datos

- **id**, entero único. Si el shapefile no incluye un campo entero único que se pueda usar como id, se asignaría por defecto un contador por elemento según el orden de lectura.
- **block_id**, entero único. Esta funcionalidad está diseñada para permitir realizar análisis de patologías en arrays de paneles vinculados por pertenecer al mismo bloque. Si no existe un campo con este identificador, se asignará por defecto el valor 1 a todos los arrays de paneles.
- **invert_id**, entero único. Esta funcionalidad de momento no se está usando, pero está incluida en el diseño por si en un futuro interesaría la vinculación entre bloques de array de paneles que estuvieran conectados al mismo inversor. Si no existe un campo con este identificador, se asignará por defecto el valor 1 a todos los array de paneles.
- **mod_rows**, entero con el número de filas de paneles en el array de paneles. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 2 a todos los array de paneles. Si se desconoce se puede utilizar un valor 0, lo que indicará a un algoritmo que se deben determinar, tal y como se detalla en la descripción del algoritmo posteriormente, en función de la geometría del array de paneles y de la medida de cada panel, calculada en función del tamaño de cada celda y del número de filas y columnas de celdas que integran cada panel. En este ejemplo se ha introducido un valor de 2 para todos los array de paneles.
- **mod_column**, entero con el número de columnas de paneles en el array de paneles. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 0 a todos los array de paneles, lo que indicará a un algoritmo que se deben determinar, tal y como se detalla en la descripción del algoritmo posteriormente, calculada en función de la geometría del array de paneles y de la medida de cada panel, en función del tamaño de cada celda y del número de filas y columnas de celdas que integran cada panel. En este ejemplo se ha introducido un valor de 0 para todos los array de paneles.
- **cells_cols**, entero con el número de columnas de celdas en cada panel. Se ha introducido un valor de 6 en todos los casos. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 6 a todos los array de paneles, al ser el valor más frecuente en los paneles.
- **cells_rows**, entero con el número de filas de celdas en cada panel. Se ha introducido un valor de 12 en todos los casos. Si no existe un campo con este

valor, se asignará por defecto el valor 12 a todos los array de paneles, al ser el valor más frecuente en los paneles fotovoltaicos.

- **cell_size**, con el tamaño del lado de cada celda, considerada cuadrada. En todos los casos se ha introducido un valor tipo, 0.125 m. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 0.125 m a todos los array de paneles, al ser el valor más frecuente en las celdas fotovoltaicas.
- **mount**, entero que identifica el tipo de montaje, de momento sólo se contempla la opción 1, que corresponde a array de paneles de tipo fijo. Está pensado por si en futuras versiones se pudiera tener en cuenta el caso de seguidores, si se dispusiera de la información necesaria para reconstruir la geometría en función del tiempo. Si no existe un campo con este identificador, se asignará por defecto el valor 1 a todos los array de paneles.
- **min_hgt**, valor real correspondiente a la altura mínima sobre el suelo de la parte más baja del array de paneles. Se utiliza para detectar la geometría de los paneles, empleando el MDS y el MDT para calcular la altura que se compara con este valor. Se ha introducido un valor de 0.3 m en todos los casos. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 0.3 a todos los array de paneles.
- **max_hgt**, valor real correspondiente a la altura máxima sobre el suelo de la parte del array más alta. Se utiliza para detectar la geometría de los paneles, empleando el MDS y el MDT para calcular la altura que se compara con este valor. Se ha introducido un valor de 3.0 m en todos los casos. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 3.0 a todos los array de paneles.
- **parts**, valor entero con el número de partes, número de formas planas en que se podría descomponer el array de paneles. Es un parámetro que permite aproximar la geometría del array de paneles completo no sólo por un único plano, sino por la secuencia encadenada de tantos planos como el valor introducido. Esto permite mejores resultados en la automatización de la extracción de la geometría. Se ha introducido un valor de 4 para todos los casos debido a que el terreno presenta muy poco desnivel. Si no existe un campo con este valor, se asignará por defecto el valor 4 a todos los array de paneles.

Se entregan dos versiones de los ficheros shapefile de polígonos, uno con los campos anteriores y otro sin ningún campo.

También se incluye el fichero con la definición del área de interés, que es la envolvente de todo el parque solar:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\roi.shp.

Con toda esta información se genera un modelo de datos que permite explotar las relaciones incluidas en la definición, tal y como será descrito posteriormente.

3.3 PROYECTO FOTOGRAFÉTRICO DEL VUELO CON CÁMARA TÉRMICA

En este apartado se describen los pasos a realizar para obtener un proyecto del complemento *photogrammetry_tools* para el vuelo térmico que será utilizado posteriormente en el proyecto del complemento *model_management_tools*.

Este proceso se realizará con el complemento *Photogrammetry Tools*, accesible con el botón . Conviene cerrar QGIS, volver a abrirlo y pulsar en el ícono a continuación, desplegándose el componente gráfico principal del proyecto en la parte inferior izquierda.

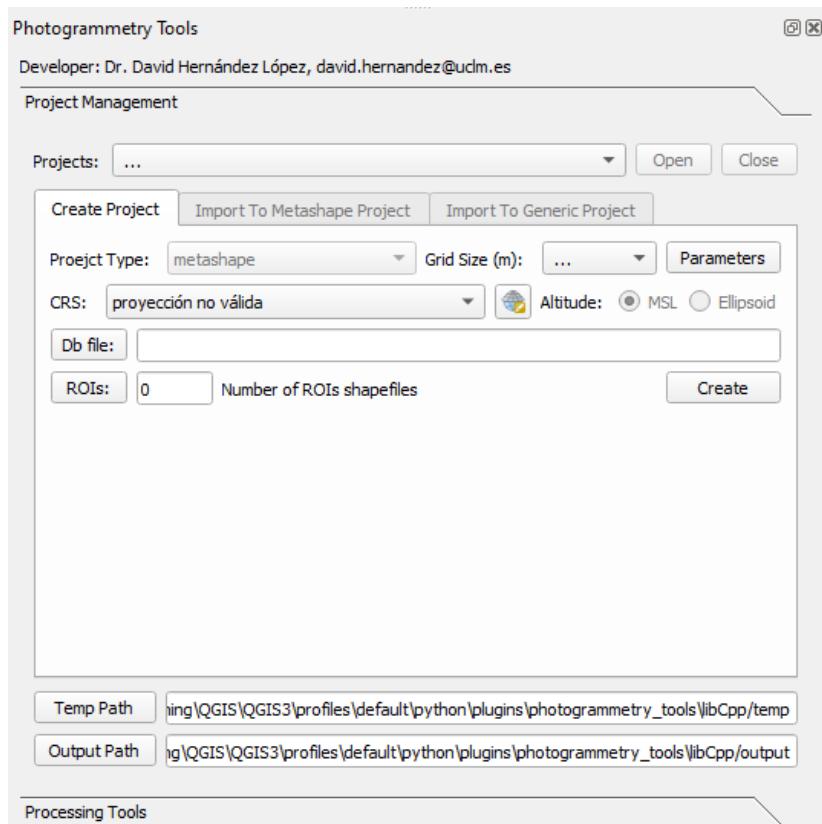


Figura 11. Interfaz Photogrammetry Tools: Project Management, Create Project

El componente gráfico principal consta de dos apartados distribuidos en vertical:

- **Project Management**, donde se creará el proyecto, se importará el proyecto de Agisoft Metashape y se importarán las imágenes.
- **Processing Tools**, dedicado a lanzar procesos útiles para diferentes fines, como la formación de las huellas de las imágenes.

El primer paso consiste en crear el proyecto, para lo que, tras abrir QGIS y abrir el complemento *Photogrammetry Tools*, se debe seleccionar la pestaña *Project Management*, apareciendo activa la pestaña *Create New Project*.

Definición del proyecto

Para crear un nuevo proyecto se deben elegir:

- **Tipo de proyecto**, no siendo necesario elegirlo realmente dado que el único tipo contemplado en esta versión es para importar desde el programa Agisoft Metashape, sólo se contempla la opción metashape, estando pensado para incorporar en un futuro la importación de proyectos de otros programas de fotogrametría, como: Pix4D, COLMAP, etc.
- **Tamaño para el tileado**, eligiéndose un valor de 50 m. Este parámetro se utilizaría si se vincularan nubes de puntos, lo que de momento no ha sido necesario.
- **Parámetros** (pulsando en el botón Parameters, y que de momento sólo incluye variables para el autor y la empresa).
- **CRS**, ESPG:25830 en este ejemplo. Es importante utilizar siempre el mismo CRS en todo el proceso, tanto con este complemento como con el de modelado del parque solar. Adviértase que de momento sólo se contempla la opción de trabajar con altitudes ortométricas, referidas al nivel medio del mar (Mean Sea Level, MSL).
- **Fichero para la base de datos**, de extensión sqlite, pulsando en el botón Db File, que para este ejemplo será:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloFlirDuoProR\PhTools_FlirPozoCanada.sqlite

- Shapefile de tipo polígono donde figura la **definición de la región de interés**, creado en un paso anterior en la definición del parque solar:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\ROI.shp

- **Ruta temporal para resultados de procesos**, que debe elegirse con la precaución de que tenga el suficiente espacio, al menos 1 GByte. Por defecto, esta ruta está establecida a una carpeta del propio complemento:

C:\Users\PCRPAS03\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\photogrammetry_tools\libCpp\temp

- Ruta para los ficheros de resultados de algunos procesos, que serán comentados posteriormente. Por defecto, esta ruta está establecida a una carpeta del propio complemento:

C:\Users\PCRPAS03\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\photogrammetry_tools\libCpp\output

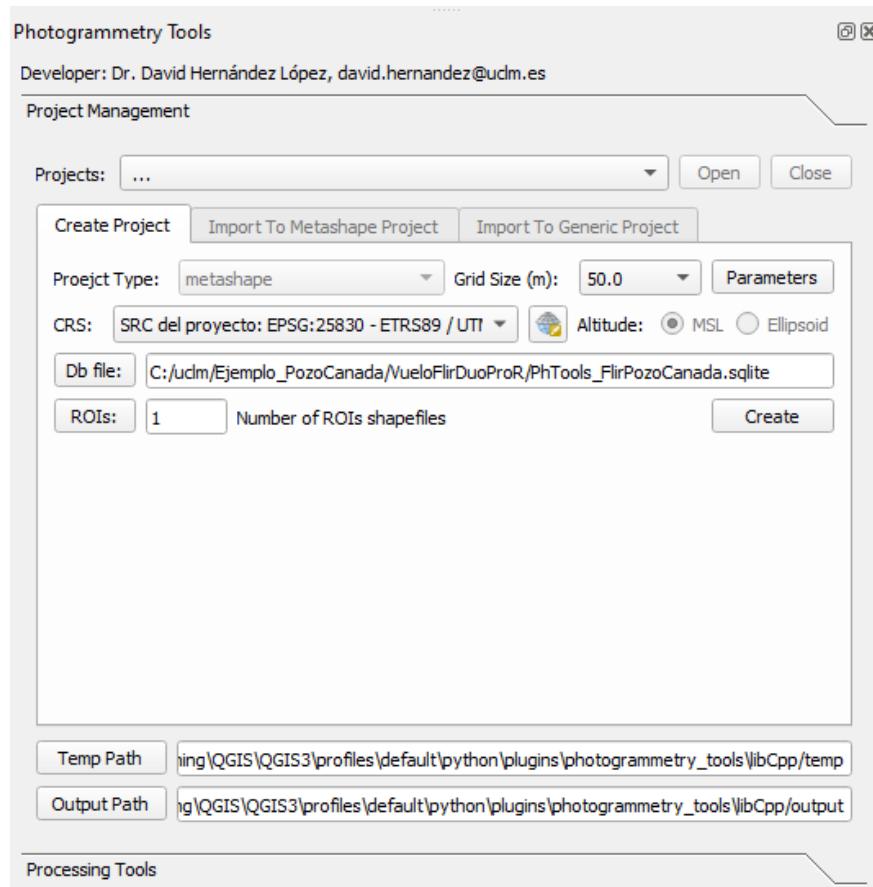


Figura 12. Photogrammetry Tools: Definición del proyecto

Tras pulsar en el botón *Create*, se habrá creado el fichero de la base de datos, a partir de una plantilla.

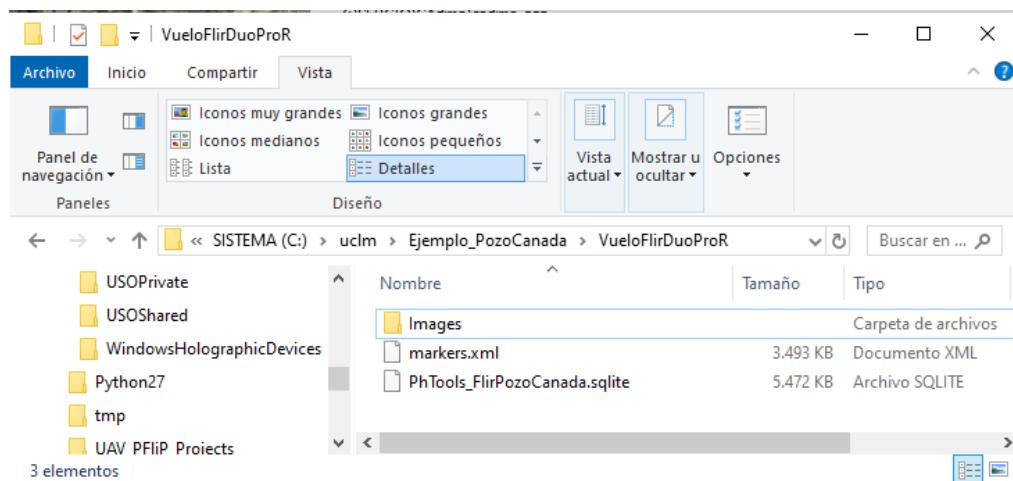


Figura 13. Base de datos creada para el proyecto fotogramétrico

Aunque en el paso anterior se ha creado el proyecto, todavía no ha sido abierto, de manera que lo primero es proceder a su apertura, seleccionándolo de la lista de proyectos disponibles y pulsando en el botón *Open*, que se habilita cuando hay algún proyecto seleccionado.

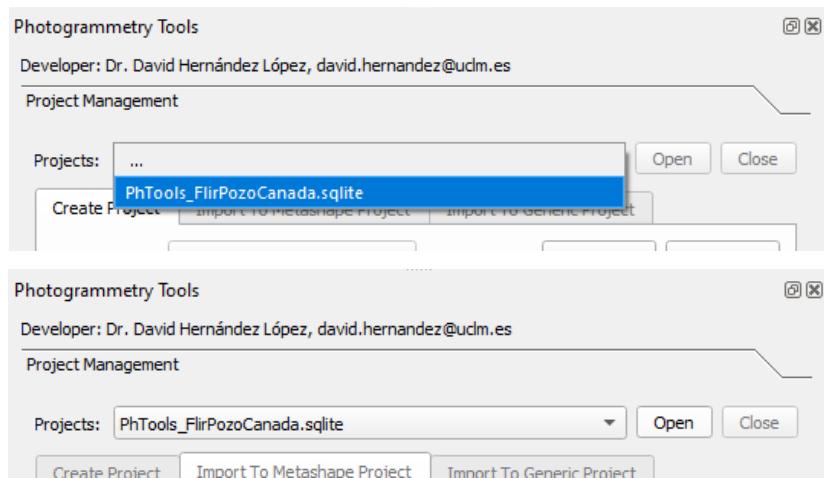


Figura 14. Apertura de proyecto fotogramétrico

Una vez abierto el proyecto, se deshabilita el botón *Open* y se habilita el botón *Close*. La apertura y cierre de diferentes proyectos en la misma ejecución de QGIS no está lo suficientemente testeada por lo que se puede provocar algún error que se resolvería sin más que cerrar y volver a abrir QGIS.

Tras abrir el proyecto, automáticamente se cargan algunas capas en el proyecto activo de QGIS (a veces es necesario hacer un pequeño movimiento en el Map Canvas para refrescar las capas cargadas y que se actualice su geometría).

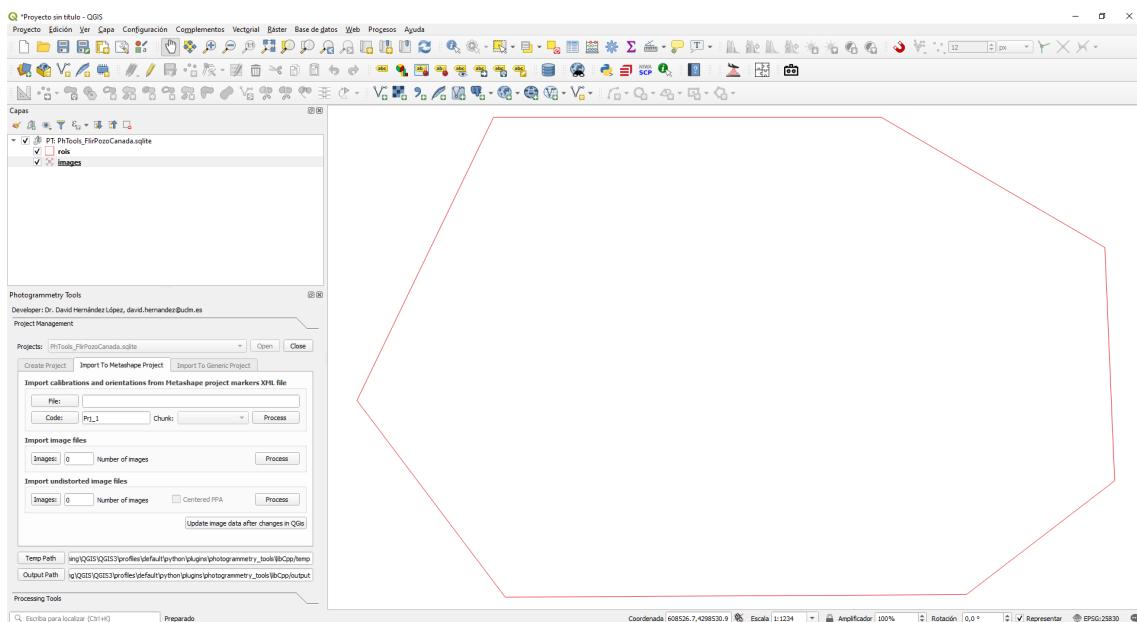


Figura 15. Carga automática de información geográfica generada en QGIS tras la creación del proyecto fotogramétrico

Adviértase que en este momento todavía no hay imágenes cargadas en el proyecto a partir de un proyecto de Agisoft Metashape, por lo que únicamente tendrá contenido la capa *rois*.

Al abrir el proyecto también se activa la pestaña *Import to Metashape Project* que se usa para importar al proyecto la definición del proyecto de Agisoft Metashape.

A continuación, se debe importar la solución fotogramétrica del proyecto exportada automáticamente desde el proyecto de Agisoft Metashape, en el formato de fichero *Markers.xml*, facilitado en este ejemplo:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloFlirDuoProR\markers.xml.

Para ello, se debe pulsar en el botón *File*, seleccionar el XML a importar, y pulsar en el botón *Process*. De momento no se ha probado con proyectos fotogramétricos de Metashape con varios *chunks*, pero la interfaz se ha preparado para que en caso de existir varios se pueda elegir uno en concreto.

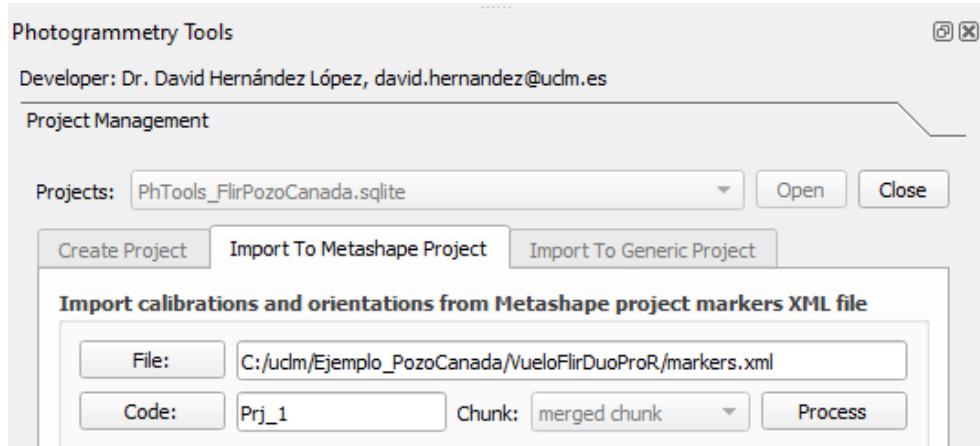


Figura 16. Importación de proyecto de Metashape en un proyecto fotogramétrico

Una vez finalizado el proceso se despliega un diálogo informando de ello. Tras cerrar ese diálogo y hacer un pequeño movimiento en el *Map Canvas* de QGIS se cargará automáticamente la capa con la geometría de los puntos de las cámaras del proyecto importado.

Descripción de la Solución

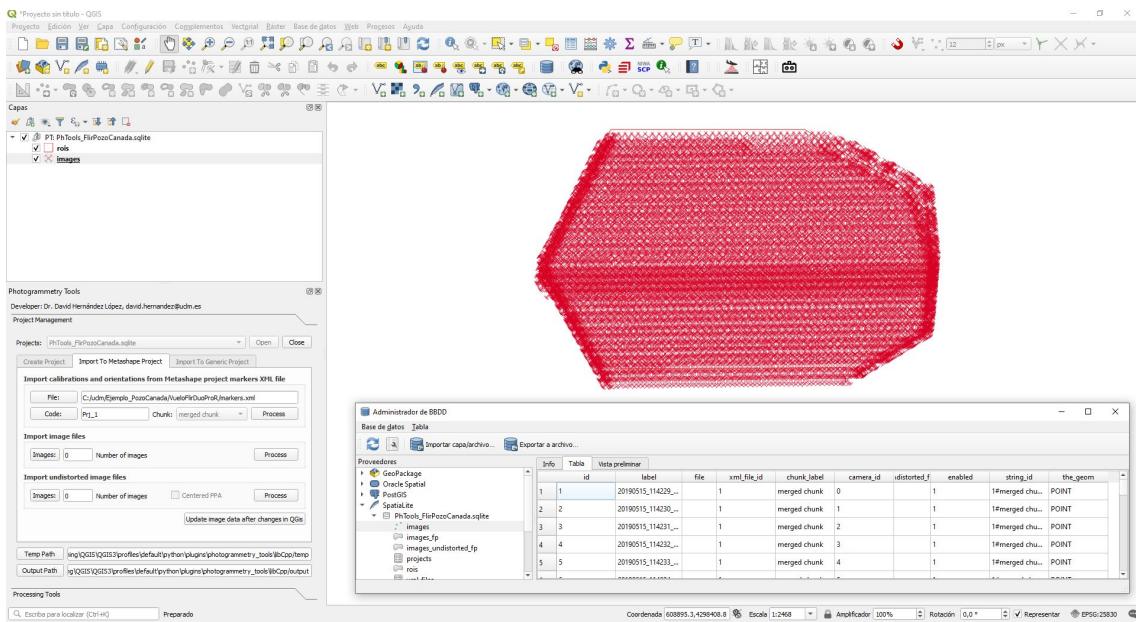


Figura 17. Carga automática de información geográfica generada en QGIS tras la importación del proyecto de Metashape

En este proceso se habrá generado información en la base de datos en dos tablas:

- *images*, donde se almacena la geometría de tipo punto con la posición ajustada de cada cámara del proyecto de Agisoft Metashape, y otra información que usará internamente la librería en C++. Hay un campo *enabled*, puesto a 0 para aquellas imágenes inhabilitadas en el proyecto de Agisoft Metashape, y a 1 para las restantes, y que permitirá deshabilitar algunas imágenes que no se deseen usar en alguna fase del procesamiento con este complemento o con el complemento *model_management_tools*, incluso para aquellas imágenes que no estaban deshabilitadas en el proyecto de Agisoft Metashape, para lo que bastará con poner este valor a 0. En esta tabla también figura un campo para el fichero de la imagen, *file*, y otro para el fichero de la imagen libre de distorsión, *undistorted_file*, no estando rellenos hasta realizar los pasos de importación correspondiente, tal y como se describe posteriormente.
- *xml_files*, donde se inserta un registro para cada fichero de Agisoft Metashape importado. En la versión actual sólo se contempla la importación de un fichero. En el campo *content* se escribe el contenido completo del fichero, lo que hace persistir esta información y permite a la librería en C++ reconstruir el modelo matemático cada vez que se abre el proyecto.

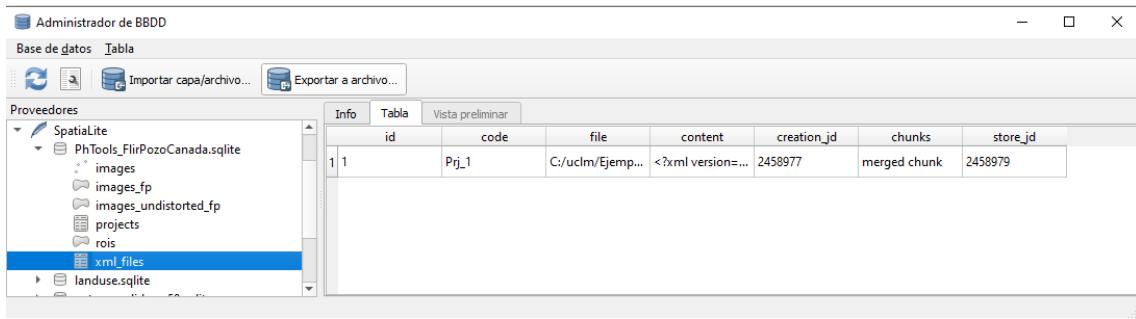


Figura 18. Base de datos del proyecto fotogramétrico tras la importación del proyecto de Metashape

Nota.- Tanto para este complemento como para los restantes, tras hacer cambios con las herramientas propias de QGis en atributos de tablas de los modelos de datos se recomienda cerrar y volver a abrir QGis y el proyecto, siendo esto debido a que los valores se cargan en memoria en el momento de apertura del proyecto y si no se vuelve a cargar no tendrán efecto los cambios realizados en QGis.

El siguiente paso consiste en importar los ficheros de las imágenes. En este paso se consigue asignar a cada registro de la tabla *images*, a cada cámara incluida en el proyecto de metashape, el fichero de la imagen que le corresponde. Este proceso puede fallar si el algoritmo no es capaz de vincular los ficheros de las imágenes seleccionadas con la cámara correspondiente. Para ello, se deberían tener los ficheros de las imágenes con una estructura de directorios similar a la empleada en el proyecto de metashape. Para este ejemplo, se ha facilitado la estructura recogida en la siguiente imagen:

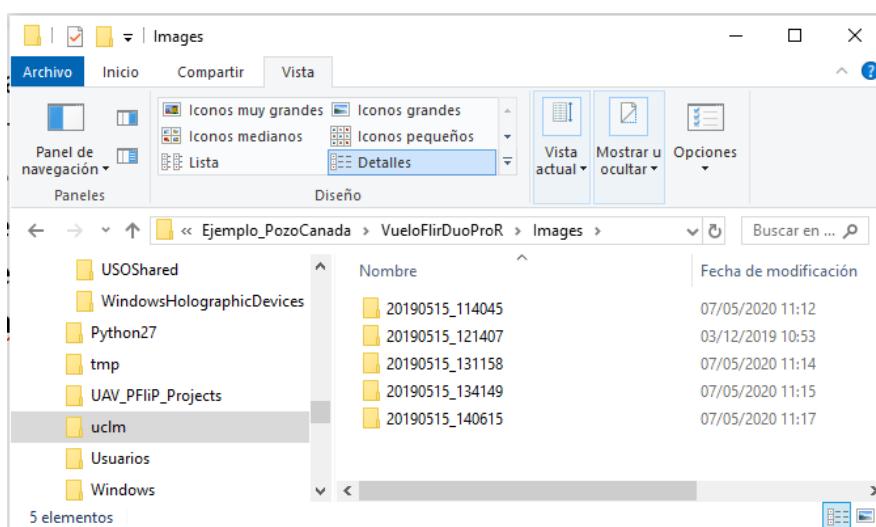


Figura 19. Estructura de los ficheros de las imágenes térmicas

Para realizar este paso, en la parte de la interfaz identificada como *Import image files*, se debe pulsar en el botón *Images*, desplegándose un diálogo que permite seleccionar por fichero, por directorio o por directorio y subdirectorio, así como eliminar

un conjunto de ficheros seleccionados. En este caso, basta con seleccionar por directorio y subdirectorios y elegir la ruta base, es decir:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloFlirDuoProR\Images

pulsando en el botón *Select directories*:

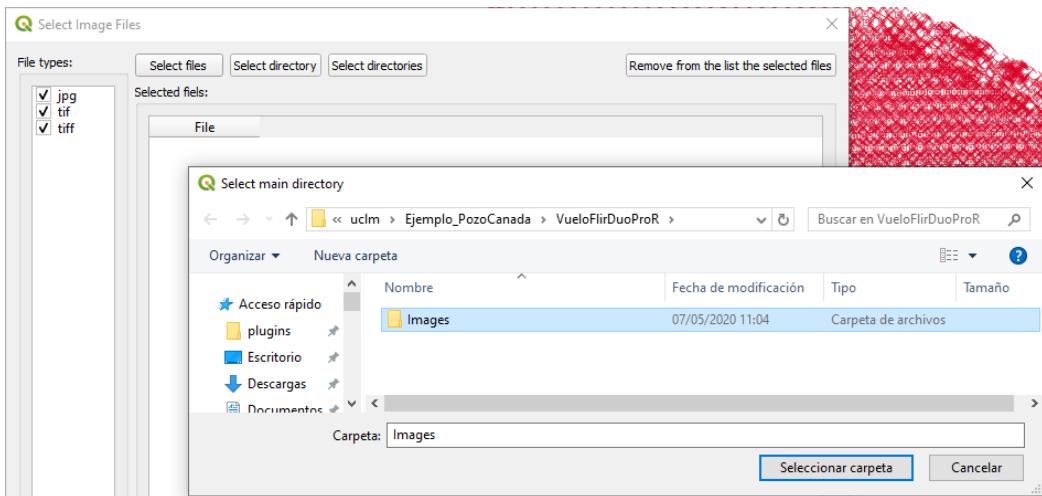


Figura 20. Importación de ficheros de imágenes mediante selección de directorios anidados

Resultando la selección automática de 6318 ficheros:

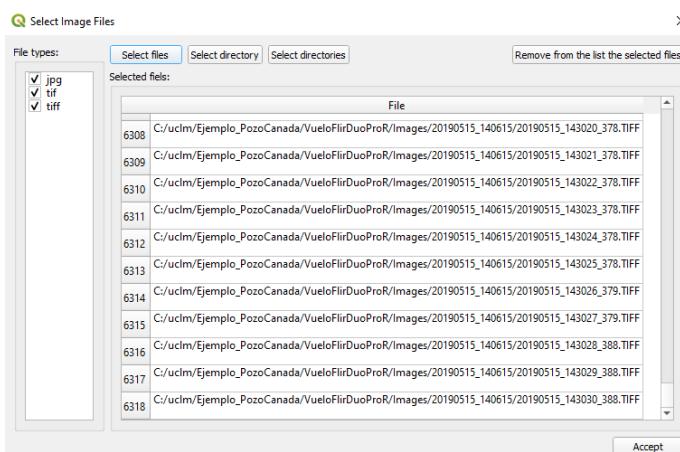


Figura 21. Resultado de la selección de ficheros de imágenes mediante directorios anidados

Una vez que se han añadido todos los ficheros en este diálogo, se cierra, pulsando en el botón *Accept*, y en la interfaz figurará el número de ficheros seleccionados. Antes de procesar se puede volver a pulsar en el botón *Images* para modificar la selección, añadiendo o eliminando los que se deseé. Una vez que se hayan seleccionado todos los ficheros se debe pulsar en el botón *Process*. Finalizado el proceso se habrá actualizado la tabla *images* de la base de datos con los ficheros de las imágenes, para todas las imágenes orientadas en el proyecto de metashape, 5313 imágenes, ya que hay ficheros

de imágenes seleccionadas en la estructura de directorios que no se corresponden con ninguna cámara del proyecto de Agisoft Metashape.

Administrador de BBDD

Base de datos Tabla

Importar capa/archivo... Exportar un archivo...

Proveedores

- GeoPackage
- Oracle Spatial
- PostGIS
- SpatialLite
 - PHTools_Candado.sqlite
 - PHTools_FlirPozoCanada.sqlite
 - images
 - images_fp
 - images_undistorted_fp
 - projects
 - rois
 - xml_files
- landuse.sqlite
- pct_pnoa_lidar_g50.sqlite
- pct_pnas_lidar_g20.sqlite
- pwl_pnoa_lidar.sqlite
- pwl_pnas_lidar.sqlite
- Capa virtual

	Info	Tabla	Vista preliminar					
	id	label	file	xml_file_id	chunk_label	camera_id	undistorted_file	enabled
1	1	20190515_11422...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	0	1	1
2	2	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	1	1	1
3	3	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	2	1	1
4	4	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	3	1	1
5	5	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	4	1	1
6	6	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	5	1	1
7	7	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	6	1	1
8	8	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	7	1	1
9	9	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	8	1	1
10	10	20190515_11423...	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/2019...	1	merged chunk	9	1	1

Figura 22. Base de datos del proyecto tras la importación de los ficheros de las imágenes

En este ejemplo no se utilizarán imágenes libres de distorsión, de manera que no es necesario importar los ficheros correspondientes a estas imágenes. Con la importación de las imágenes ha finalizado el trabajo en la pestaña *Import To Metashape Project*. El botón *Update image data after changes in QGIS* se debe pulsar si se modifican las imágenes habilitadas, empleando las herramientas de QGIS para cambiar el valor del campo *enable* de 1, habilitada, a 0, deshabilitada.

A continuación, se realizan una serie de procesos en el proyecto, necesarios para su uso en el complemento *model_management_tools*, para lo cual se debe desplegar la pestaña *Processing Tools*.

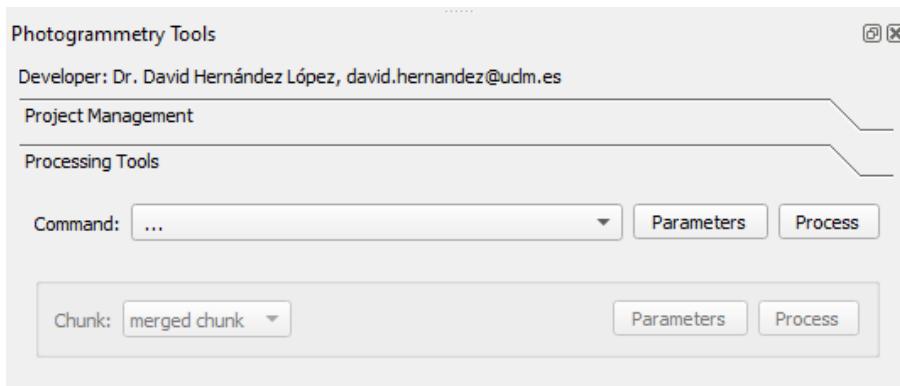


Figura 23. Interfaz Photogrammetry Tools: Processing Tools

Los procesos a realizar de forma secuencial, en este ejemplo, son:

1. Construcción de las huellas de las imágenes sobre el DSM.

La huella de las imágenes, entendidas como la proyección del marco de la imagen sobre el DSM, como polígono, se utilizará en cualquier proceso que consulte acerca de en qué imágenes se ve un punto u objeto del DSM, como por ejemplo los arrays de paneles fotovoltaicos.

Para realizar este proceso se debe seleccionar el comando *Get images footprints from DSM*, elegir los parámetros adecuados, pulsando en el botón *Parameters*, y pulsar en el botón *Process*, tal y como ilustra las siguientes figuras.

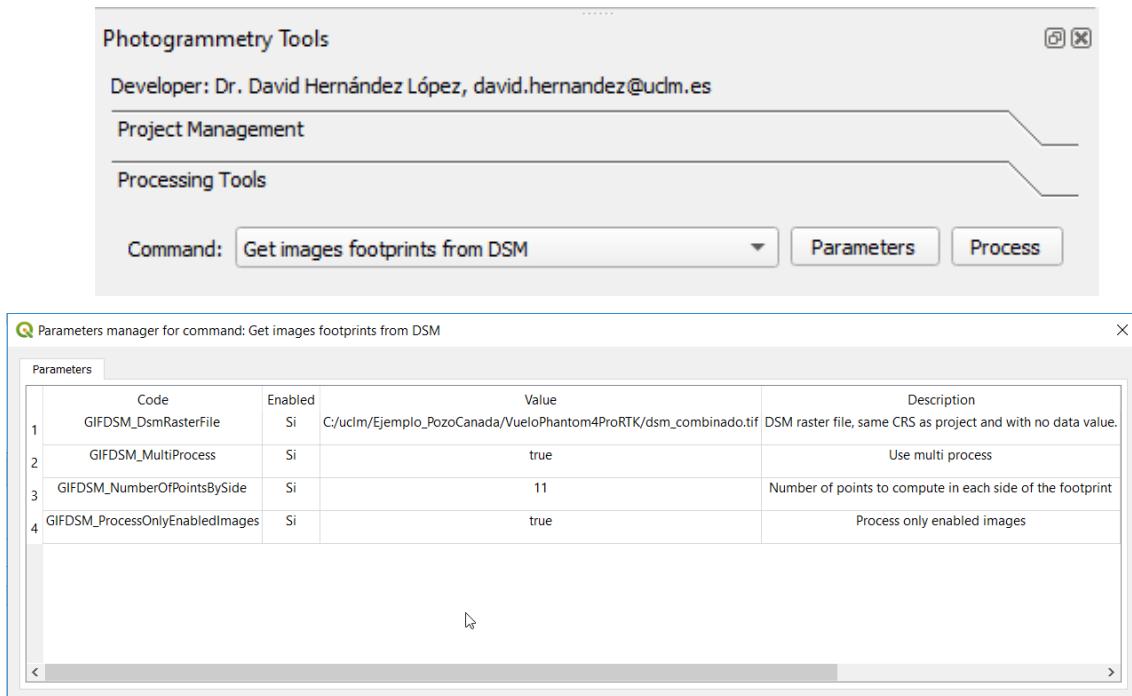


Figura 24. Parámetros para el proceso de construcción de las huellas de las imágenes sobre el DSM

Adviértase que es conveniente seleccionar un DSM que no sólo cubra toda el área de interés, ROI, sino que cubra todas las huellas de las imágenes, de ahí que se elija el que se ha obtenido como combinación del obtenido con Agisoft Metashape a partir del vuelo de cámara RGB, con gran precisión y detalle, y del obtenido a partir de PNOA-LIDAR, con menos precisión, pero suficiente para las huellas fuera del área de interés.

Finalizado el proceso, en el que sólo se invierten unos segundos a pesar del gran número de imágenes, más rápido si se activa la opción de multiproceso con el parámetro correspondiente, se habrá almacenado la geometría poligonal de cada huella en la tabla *images_fp*, que se puede cargar en QGIS, tal y como ilustra las siguientes figuras.

	id	image_id	image	the_geom
5307	5307	5307	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142927_359.TIFF	POLYGON
5308	5308	5308	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142928_358.TIFF	POLYGON
5309	5309	5309	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142929_358.TIFF	POLYGON
5310	5310	5310	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142930_358.TIFF	POLYGON
5311	5311	5311	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142931_359.TIFF	POLYGON
5312	5312	5312	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142932_358.TIFF	POLYGON
5313	5313	5313	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/Images/20190515_140615/20190515_142933_361.TIFF	POLYGON

Figura 25. Base de datos del proyecto tras la generación de huellas de imágenes sobre el DSM

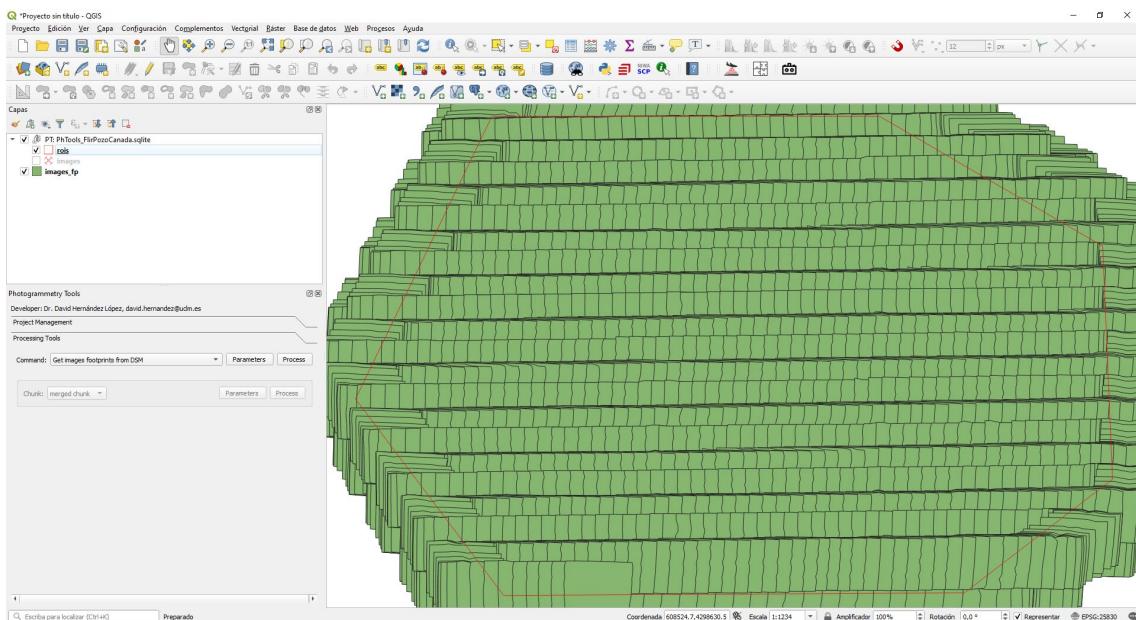


Figura 26. Carga en QGis de las huellas de las imágenes sobre el DSM

2. Cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes.

En este proceso se calcularán los datos de orientación del Sol para cada imagen, azimut y elevación, necesarios para procesos posteriores, así como la posición de la aparición de los efectos de hot spot y reflexión especular en función de la orientación de la imagen (interna y externa) y la dirección del Sol, efectos que carecen de interés para la aplicación con cámara térmica, pero muy importantes para otras aplicaciones de teledetección de rango cercano. En este proceso también se extrae el instante de adquisición de cada imagen que será usado para estimar corrección en función de parámetros que dependen del tiempo, tales como: temperatura, humedad relativa e irradiancia solar.

Para realizar este proceso se debe seleccionar el comando *Compute Sun artifacts in images: sun glint and hotspots*, elegir los parámetros adecuados, pulsando en el

botón *Parameters*, y pulsar en el botón *Process*, tal y como ilustra las siguientes figuras.

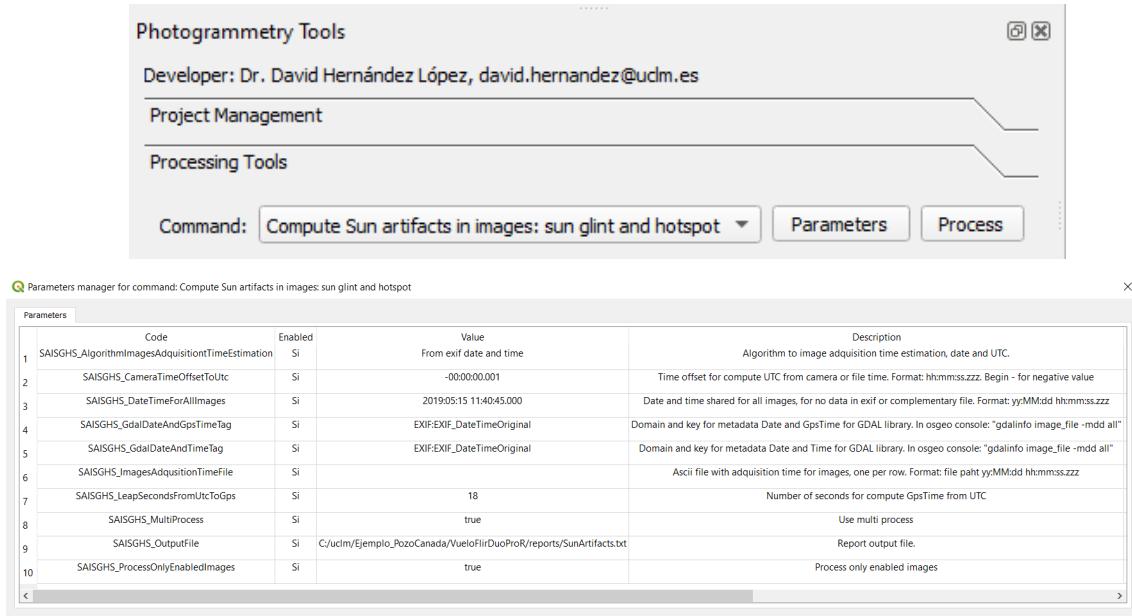


Figura 27. Parámetros para el proceso cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes

Un parámetro muy importante en el objeto de este trabajo, y otros muchos, es el instante de adquisición de cada imagen, que el algoritmo debe poder obtener en tiempo UTC, sistema de tiempo elegido para todos los procesos implementados. Hay varias opciones para determinar el sistema de tiempo. En el caso de las imágenes de este ejemplo, la opción adecuada es la que se corresponde con los valores elegidos para los parámetros. En la descripción de los parámetros 4 y 5 se puede ver que hay un comando de GDAL que permite listar las etiquetas de la cabecera de una imagen, EXIF, para encontrar los valores que hay que utilizar para estos parámetros. A modo de ejemplo, abriendo una consola de OSGeo4W Shell, cambiando a la primera ruta de imágenes de este proyecto:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloFlirDuoProR\Images\20190515_114045
y ejecutando el comando para la primera imagen incluida en el proyecto, 20190515_114229_588.TIFF, redirigiendo la salida a un fichero ASCII, se obtiene que la etiqueta a utilizar para leer el tiempo es EXIF:EXIF_DateTimeOriginal:

```
gdalinfo 20190515_114229_588.TIFF -md all >20190515_114229_588.txt
```

```

107 </rdf:RDF>
108
109 <?xpacket end="w"?>
110 Metadata (DERIVED_SUBDATASETS):
111   DERIVED_SUBDATASET_1_NAME=DERIVED_SUBDATASET:LOGAMPLITUDE:20190515_114229_588.TIFF
112   DERIVED_SUBDATASET_1_DESC=log10 of amplitude of input bands from 20190515_114229_588.TIFF
113 Metadata (EXIF):
114   EXIF_DateTimeOriginal=2019:05:15 11:42:29
115   EXIF_FNumber=(1.25)
116   EXIF_FocalLength=(13)
117   EXIF_FocalPlaneResolutionUnit=4
118   EXIF_FocalPlaneXResolution=(10.88)
119   EXIF_FocalPlaneYResolution=(8.7)
120   EXIF_GPSAltitude=(813.724)
121   EXIF_GPSAltitudeRef=0x00
122   EXIF_GPSLatitude=(38) (49) (47.691)
123   EXIF_GPSLatitudeRef=N
124   EXIF_GPSLongitude=(1) (44) (48.961)
125   EXIF_GPSLongitudeRef=W
126   EXIF_GPSMapDatum=WGS-84
127   EXIF_GPSVersionID=0x03 0x02 0x00 0x00
128   EXIF_SensingMethod=15
129   EXIF_SubSecTime_Original=70
130 Image Structure Metadata:
131   INTERLEAVE=BAND
132 Corner Coordinates:
133   Upper Left ( 0.0, 0.0)
134   Lower Left ( 0.0, 512.0)
135   Upper Right ( 640.0, 0.0)
136   Lower Right ( 640.0, 512.0)
137   Center ( 320.0, 256.0)
138 Band 1 Block=640x6 Type=UInt16, ColorInterp=Gray
139

```

Normal text file length: 3.126 lines: 139 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0 | 0 Windows (CR LF) UTF-8 INS

Para resolver la posible conversión necesaria del sistema de tiempo en que se ha registrado el instante de captura en vuelo al tiempo UTC se incluye un parámetro que permite definir un offset, en el que se debe sumar el valor correspondiente al huso horario y la posible aplicación del *daylight saving time* (DST, https://es.wikipedia.org/wiki/Horario_de_verano), de ahí que el valor introducido en este caso sea prácticamente 0, al haber registrado la cámara directamente en UTC.

Finalizado el proceso, tras un breve espacio de tiempo, más rápido si se activa la opción de multiproceso con el parámetro correspondiente, se habrá actualizado la tabla *images*, añadiéndose campos y su contenido, tal y como ilustra la siguiente figura.

		enabled	string_id	the_geom	date	utc	sun_azimuth	sun_elevation	sun_glint	hotspot
1	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:28.999	165.74542	69.529455			
2	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:29.999	165.756462	69.530243			
3	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:30.999	165.767442	69.531028			
4	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:31.999	165.778383	69.531813		POINT(191.2 12.0)	
5	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:32.999	165.789298	69.532598			
6	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:33.999	165.800201	69.533386		POINT(194.3 11.9)	
7	1	1#merged chu...	POINT	2019:05:15	11:42:34.999	165.811092	69.534173		POINT(199.9 6.5)	

Figura 28. Base de datos tras el proceso de construcción de cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes

También se ha generado el informe de resultados en el fichero elegido como parámetro.

Descripción de la Solución

```

new 37 new 36 new 38 images.py metadata.py new 39 capture.py new 40 SunArtifacts.txt
1 SUN ARTIFACTS IN IMAGES, SUN GLINT AND HOTSPOT ...: C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloFlirDuoProR/PhTools_FlirPozoCanada.sqlite
2 =====
3
4 CHUNK .....: merged chunk
5
6 Ground control points data:
7 - Project CRS description .....: +proj=utm +zone=30 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs
8 - Project CRS PROJ4 .....: +proj=utm +zone=30 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs
9 - Project CRS EPSG code .....: 25830
10 Ellipsoid semi-major axis .....: 6378137.0000
11 Ellipsoid inverse flattening .....: 298.257222101000
12 - CHUNK ECEF CRS description .....: +proj=geocent +ellps=GRS80 +units=m +no_defs
13 - CHUNK Local CRS scale .....: 2.628651133709
14 Images Sun Effects:
15   Longitude Latitude Altitude Date UTC Sun.Azi Sun.Elev Sun.Glint Hotspot Image
16   -1.746939644 38.829891191 808.0610 2019:05:15 11:42:28.999 165.745420 69.529455 C:/uclm/Ejemplo
17   -1.746940911 38.8298905139 808.0802 2019:05:15 11:42:29.999 165.756462 69.530243 C:/uclm/Ejemplo
18   -1.746965136 38.829916586 808.0584 2019:05:15 11:42:30.999 165.767442 69.531028 C:/uclm/Ejemplo
19   -1.747003886 38.829924225 808.0044 2019:05:15 11:42:31.999 165.778383 69.531813 C:/uclm/Ejemplo
20   -1.747051760 38.829929635 807.9461 2019:05:15 11:42:32.999 165.789298 69.532598 C:/uclm/Ejemplo
21   -1.747103426 38.829931066 807.9249 2019:05:15 11:42:33.999 165.800201 69.533386 C:/uclm/Ejemplo
22   -1.747159821 38.829931748 807.9364 2019:05:15 11:42:34.999 165.811092 69.534173 C:/uclm/Ejemplo
23   -1.747217493 38.829932176 807.9997 2019:05:15 11:42:35.999 165.821980 69.534959 C:/uclm/Ejemplo
24   -1.747271507 38.829932685 807.9929 2019:05:15 11:42:36.999 165.832879 69.535746 C:/uclm/Ejemplo
25   -1.747323992 38.829932981 807.9768 2019:05:15 11:42:37.999 165.843782 69.536532 C:/uclm/Ejemplo
26   -1.747376327 38.8299334019 807.9657 2019:05:15 11:42:38.999 165.854688 69.537317 C:/uclm/Ejemplo
27   -1.747433496 38.829933987 807.9924 2019:05:15 11:42:39.999 165.865580 69.538101 C:/uclm/Ejemplo
28   -1.747490376 38.829934583 807.9324 2019:05:15 11:42:40.999 165.876474 69.538885 C:/uclm/Ejemplo
29   -1.747543305 38.829935028 807.8473 2019:05:15 11:42:41.999 165.887379 69.539669 C:/uclm/Ejemplo
30   -1.747599533 38.829935900 807.8404 2019:05:15 11:42:42.999 165.898277 69.540451 C:/uclm/Ejemplo
31   -1.747654681 38.829935122 807.8271 2019:05:15 11:42:43.999 165.909177 69.541234 C:/uclm/Ejemplo
32   -1.747710974 38.829935263 807.8480 2019:05:15 11:42:44.999 165.920075 69.542015 C:/uclm/Ejemplo
33   -1.747768447 38.829936046 807.7972 2019:05:15 11:42:45.999 165.930972 69.542796 C:/uclm/Ejemplo

```

Figura 29. Informe del proceso de construcción de cálculo de los artefactos solares y extracción de instante de adquisición de las imágenes

El proyecto fotogramétrico ya está preparado para ser utilizado en el complemento *model_management_tools*.

3.4 PROYECTO DE GESTIÓN DE MODELOS DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

Este proceso se realizará con el complemento *Model Management Tools*, accesible con el botón .

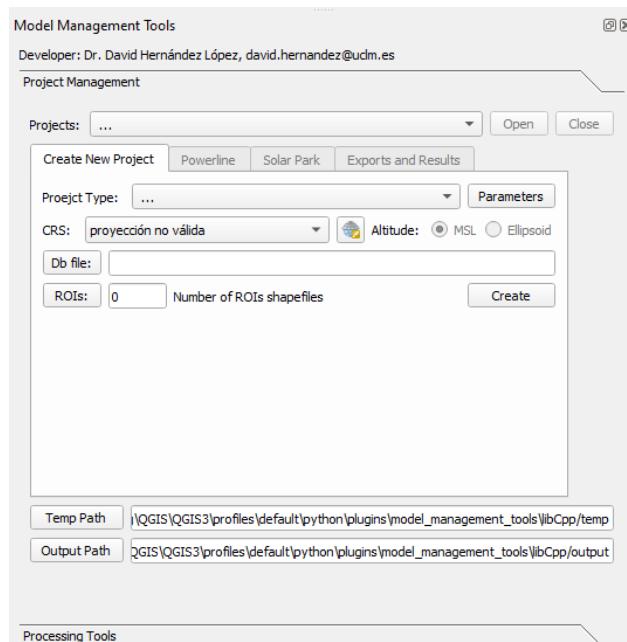


Figura 30. Interfaz Model Management Tools: Project Management

Para completar un proyecto con la herramienta desarrollada se deben realizar una serie de procesos secuenciales, habiéndose incluido otros procesos para resolver

problemas puntuales y así permitir el volver a realizar algún proceso sólo con la parte del parque solar del que se quiere probar a mejorar los resultados en ese proceso con otros parámetros. Todos los resultados obtenidos por cada proceso persisten en memoria, tanto al finalizar los cálculos como al volver abrir el proyecto posteriormente, ya que se ha integrado un mecanismo de lectura de la base de datos en función del estado de procesamiento del proyecto. De esta forma, los datos ya procesados pueden ser utilizados en procesos posteriores que precisen de esta información.

A continuación, se describen cada uno de los pasos a realizar.

1. Creación del proyecto de parque solar

Para crear un proyecto de este complemento se sigue un procedimiento similar al caso del complemento de fotogrametría: se elige el tipo de proyecto (solarpark), los parámetros (autor, empresa, fecha de la inspección y denominación del proyecto), el CRS (25830 y altitudes ortométricas), fichero de la base de datos Spatialite, que para este ejemplo son:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\MnTools_sp_pozocanada.sqlite

fichero Shapefile con la definición del área de interés, eligiendo el mismo fichero que en el proyecto de fotogrametría:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\roi.shp

y las rutas temporales y de salida, dejando los valores por defecto que se establecen a carpetas dentro de este complemento.

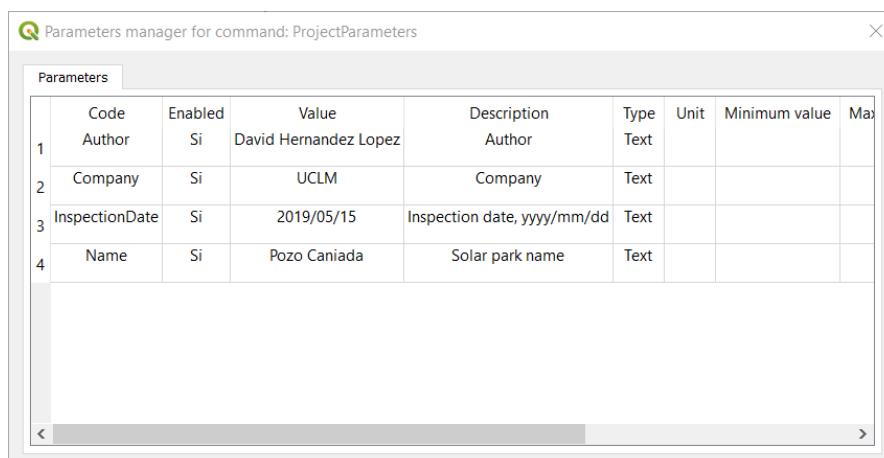


Figura 31. Parámetros de un proyecto del gestor de modelos

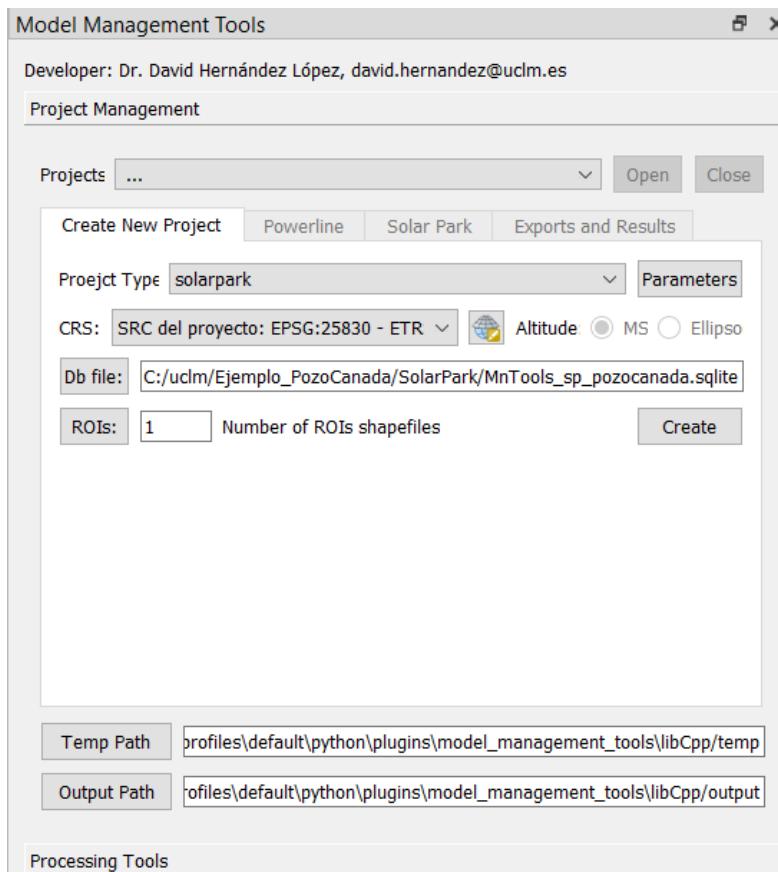


Figura 32. Model ManagementTools: Definición del proyecto

Tras introducir la información y pulsar en el botón *Create* se construye el proyecto, desplegándose el diálogo que información de la finalización correcta, pudiéndose consultar la base de datos con la herramienta de QGIS. La estructura irá creciendo a medida que se vayan completando los procesos.

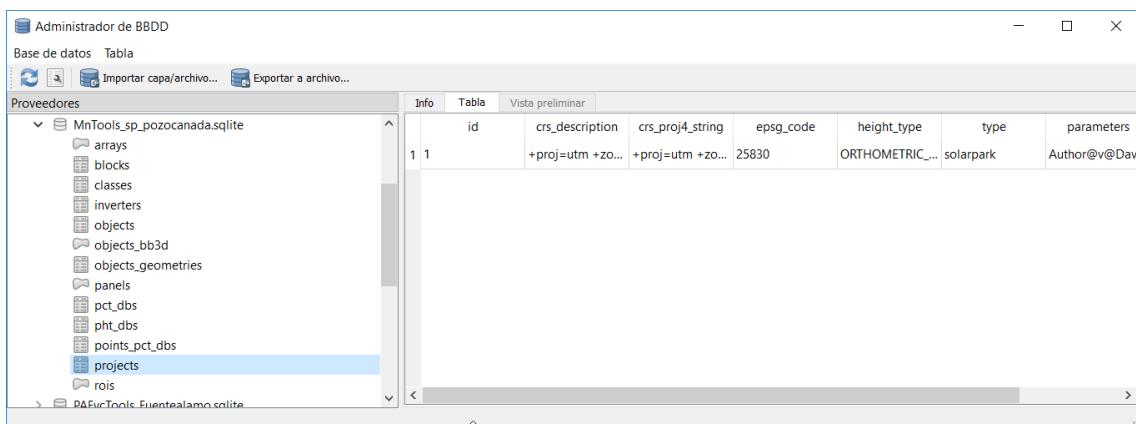


Figura 33. Base de datos de proyecto de parque fotovoltaico

2. Definición del parque solar

Tras crear el proyecto, también se ha creado automáticamente una conexión a la base de datos Spatialite del mismo. Para abrir el proyecto basta con elegir la conexión

en la lista *Projects* y, a continuación, pulsar en el botón *Open*, que se habilita cuando en la lista de selección hay un proyecto seleccionado y todavía no se ha abierto.

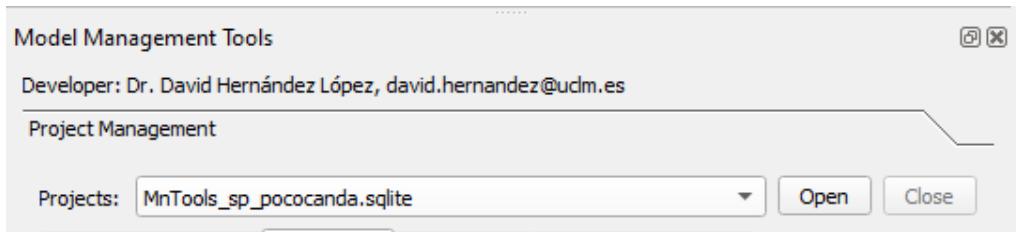


Figura 34. Apertura de proyecto de parque fotovoltaico

Una vez abierto el proyecto, se deshabilita el botón *Open* y se habilita el botón *Close*.

Tras abrir el proyecto se añade un grupo de capas a QGIS incluyendo la ROI y dos capas que todavía carecen de información en el estado de procesamiento: la de los arrays de paneles fotovoltaicos (*arrays*) y la de los paneles fotovoltaicos (*panels*). También se habilita la pestaña *Solar Park*, que permite proceder a la definición del parque solar.

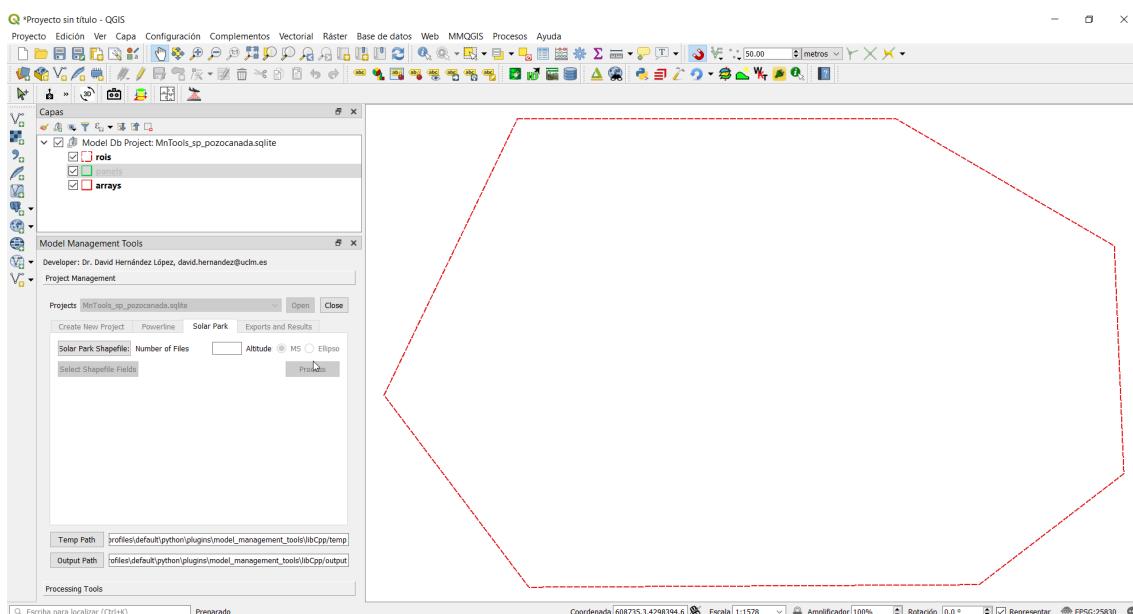


Figura 35. Carga de información geográfica generada en QGIS tras la creación del proyecto de parque fotovoltaico

Para definir el parque solar se deben seguir los siguientes pasos:

- Elegir el fichero shapefile de arrays de paneles previamente creado, con geometría de tipo punto o polígono, con o sin campos con los valores de las variables descritas, pulsando en el botón *Solar Park Shapefile*, eligiéndose en este ejemplo:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\solar_park_definition\arrays_pol_all_fields.shp

Si se ha seleccionado un único fichero shapefile se habilita el botón *Process*.

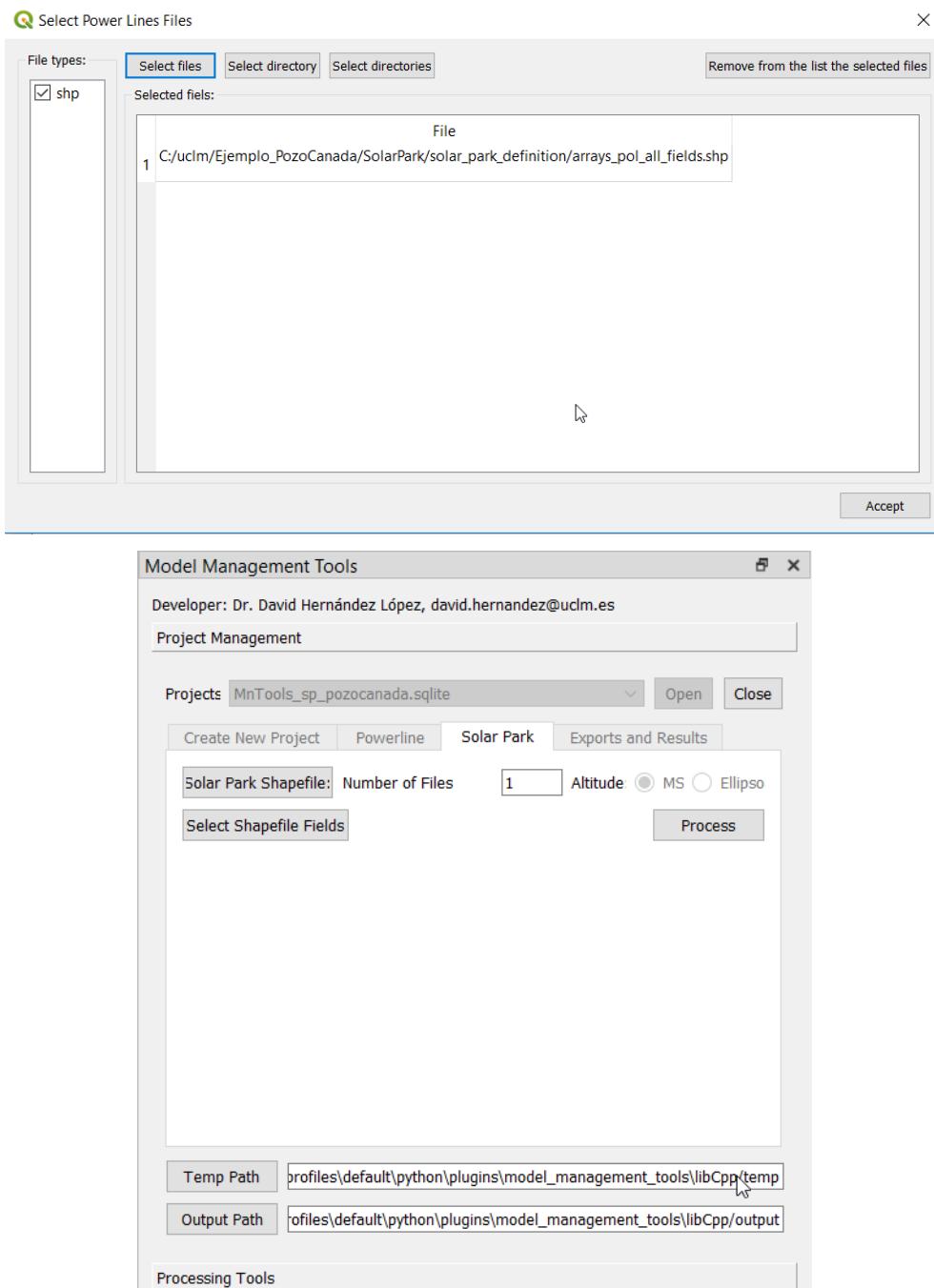


Figura 36. Definición de parque solar

- b. En el caso de que el fichero shapefile seleccionado tenga algún campo con alguna de las variables descritas, el usuario podría indicarlo tras pulsar en el botón *Select Shapefile fields*, procediendo a elegir los valores correctos en el diálogo que se despliega, pudiendo dejar sin seleccionar todas aquellas para las que no exista el correspondiente atributo con el valor. Si en el fichero

shapefile no hay atributos y el usuario pulsa en este botón, se despliega un diálogo que informa de que el proceso ha finalizado con éxito.

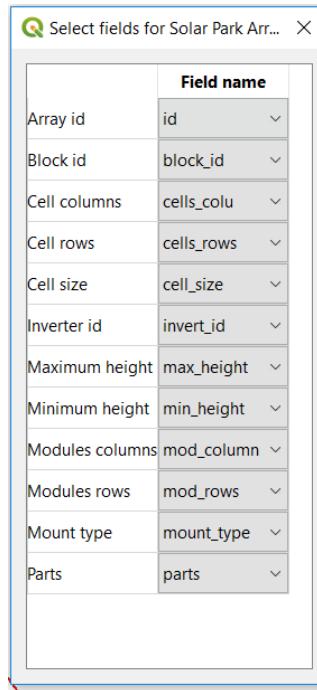


Figura 37. Selección de atributos de shapefile de definición del parque solar

c. Pulsar en el botón *Process*.

Finalizado el proceso, se habrá creado la definición inicial del parque solar, tal y como ilustra la siguiente figura. Si se ha elegido un shapefile con geometría de tipo punto, a pesar de que se han importado las coordenadas del punto en el interior de cada array, todavía no hay geometría poligonal para cada array, debido a que se determinará en un proceso posterior.

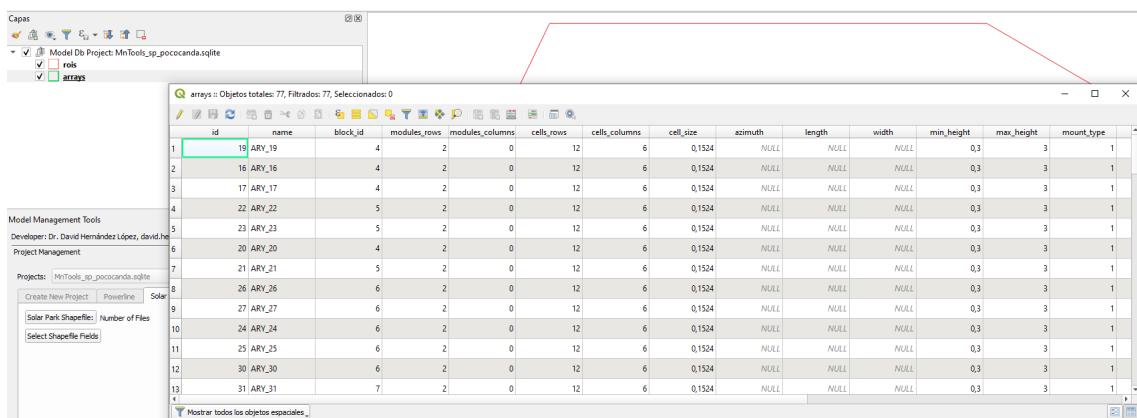


Figura 38. Visualización de la definición inicial del parque solar con geometría puntual

Si se ha elegido un fichero shapefile con geometría de tipo polígono, se habrá asignado a cada array de paneles la geometría de polígono del propio shapefile, tal y como ilustra la siguiente figura.

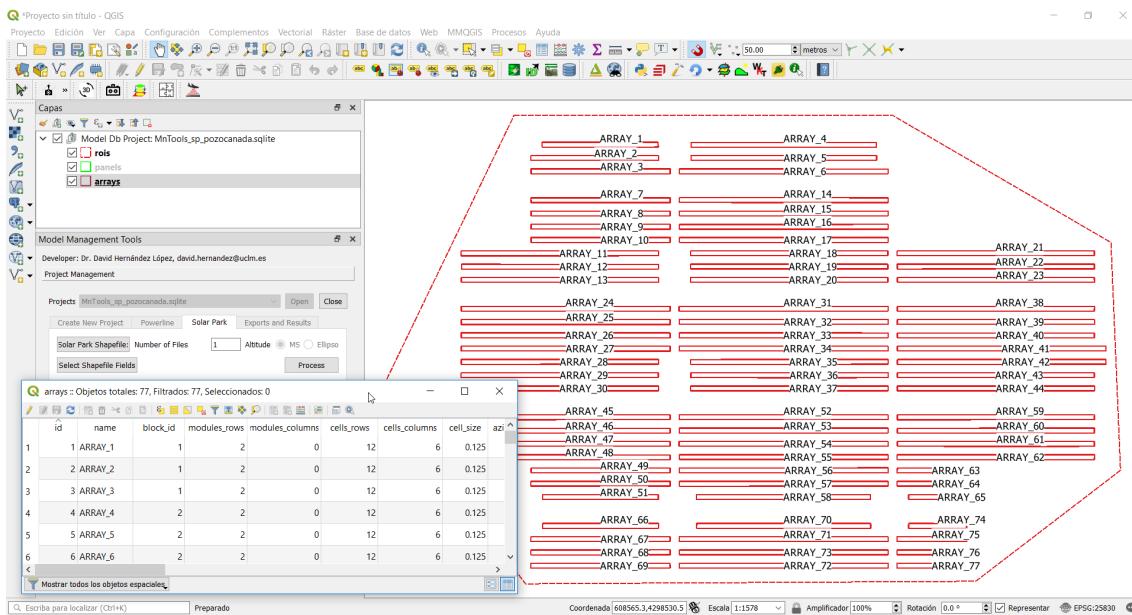


Figura 39. Visualización de la definición inicial del parque solar con geometría superficial

En cualquier caso, para aquellas variables no extraídas de campos existentes en el fichero shapefile elegido, se habrán asignado los valores por defecto, tal y como se ha descrito anteriormente. Si se modifican los valores de algunos atributos se debería recargar el proyecto, para lo que se debe cerrar QGis, volver a abrirlo y abrir también el proyecto.

También se crea información del modelo de datos en otras tablas de la base de datos, tal y como ilustra las siguientes figuras, correspondiendo la primera a un caso en que se dispone de los valores para los bloques e inversores, y mostrando la segunda que se ha creado una tabla para almacenar la información de los paneles, *panels*, con geometría de tipo polígono, que en este estado del procesamiento está vacía, ya que se creará tras calcular la geometría 3D de los arrays de paneles.

The screenshot shows the QGIS Model Management Tools interface. The main window title is "Model Management Tools". Under the "Project Management" section, there is a "Processing Tools" tab. Below it, there are three input fields: "Point Cloud Project:" with an "Add" button, "Photogrammetric Project:" with an "Add" button, and "Command:" with an "Add" button. To the right of these fields are "Parameters" and "Process" buttons.

Figura 40. Modelo de datos implementado

3. Vinculación del proyecto fotogramétrico del vuelo térmico del complemento photogrammetry_tools

Una vez definido el parque solar, los siguientes pasos se realizarán empleando comandos disponibles en la pestaña *Processing Tools*.

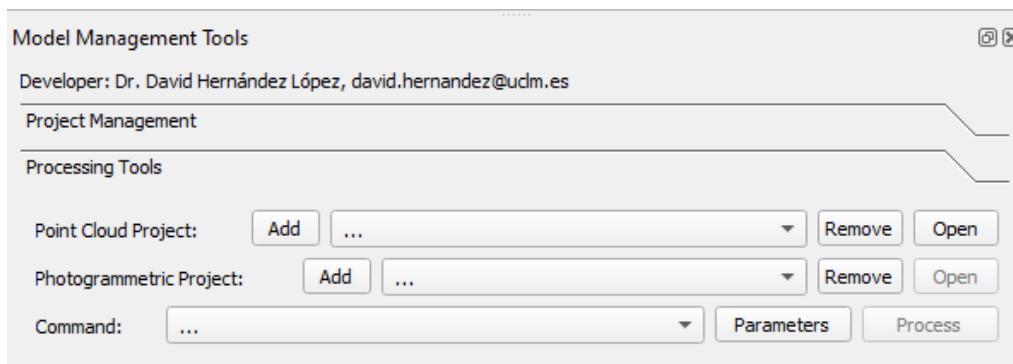
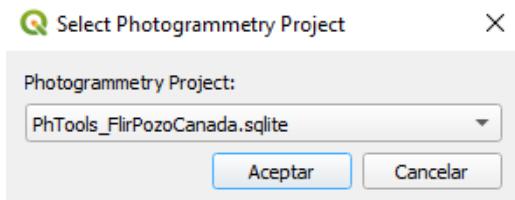


Figura 41. Interfaz Model ManagementTools: Processing Tools

El primer paso consiste en vincular a este proyecto el del complemento *photogrammetry_tools* correspondiente al vuelo térmico. Para ello, se debe pulsar en el botón *Add* situado a la derecha del texto *Photogrammetry Project*, y elegir su conexión:



que se corresponde con el fichero *Spatialite*:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\VueloFlirDuoProR\ PhTools_FlirPozoCanada.sqlite

Tras pulsar en el botón *Aceptar*, se añade en una tabla de la base de datos y estará disponible para ser seleccionado para aquellos procesos que precisen del vuelo.

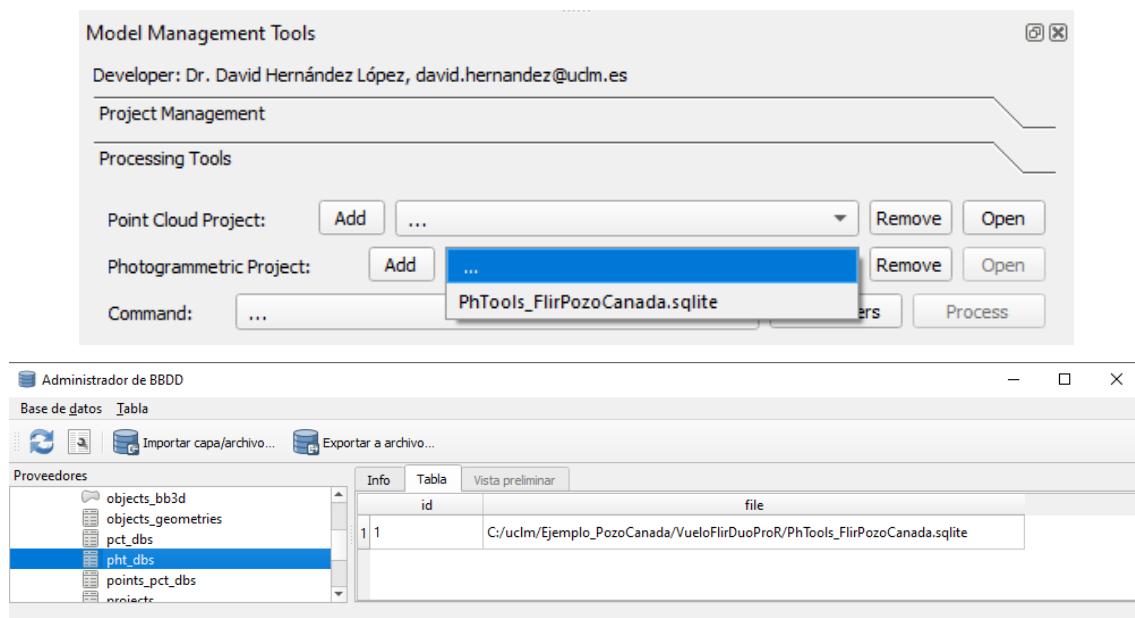


Figura 42. Vinculación del proyecto fotogramétrico térmico

4. Cálculo de la geometría 3D de los arrays de paneles y de los paneles a partir de modelos digitales del terreno (DTM) y de superficie (DSM)

Para lanzar este proceso se debe seleccionar el comando *1. Compute panels geometry from DSM and DTM*, elegir los parámetros adecuados, pulsando en el botón *Parameters* y eligiéndolos en el diálogo que se despliega, y, finalmente, pulsar en el botón *Process*.

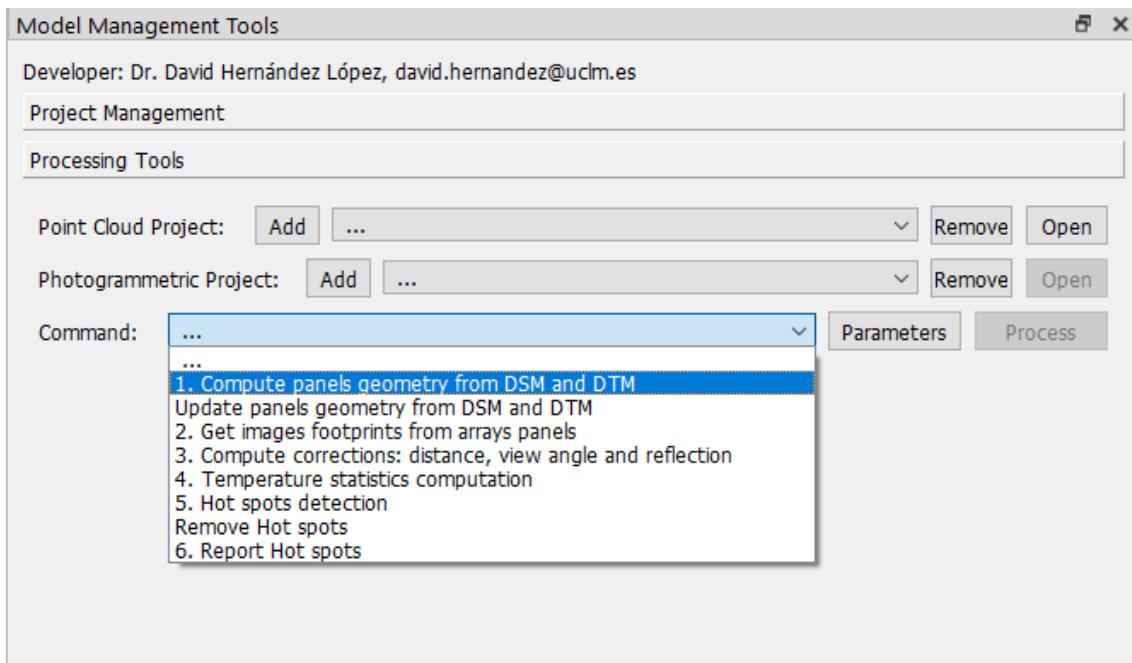


Figura 43. Proceso de cálculo de la geometría 3D de los arrays de paneles y de los paneles a partir de modelos digitales

El algoritmo desarrollado se describe en el apartado 4.1 de este documento.

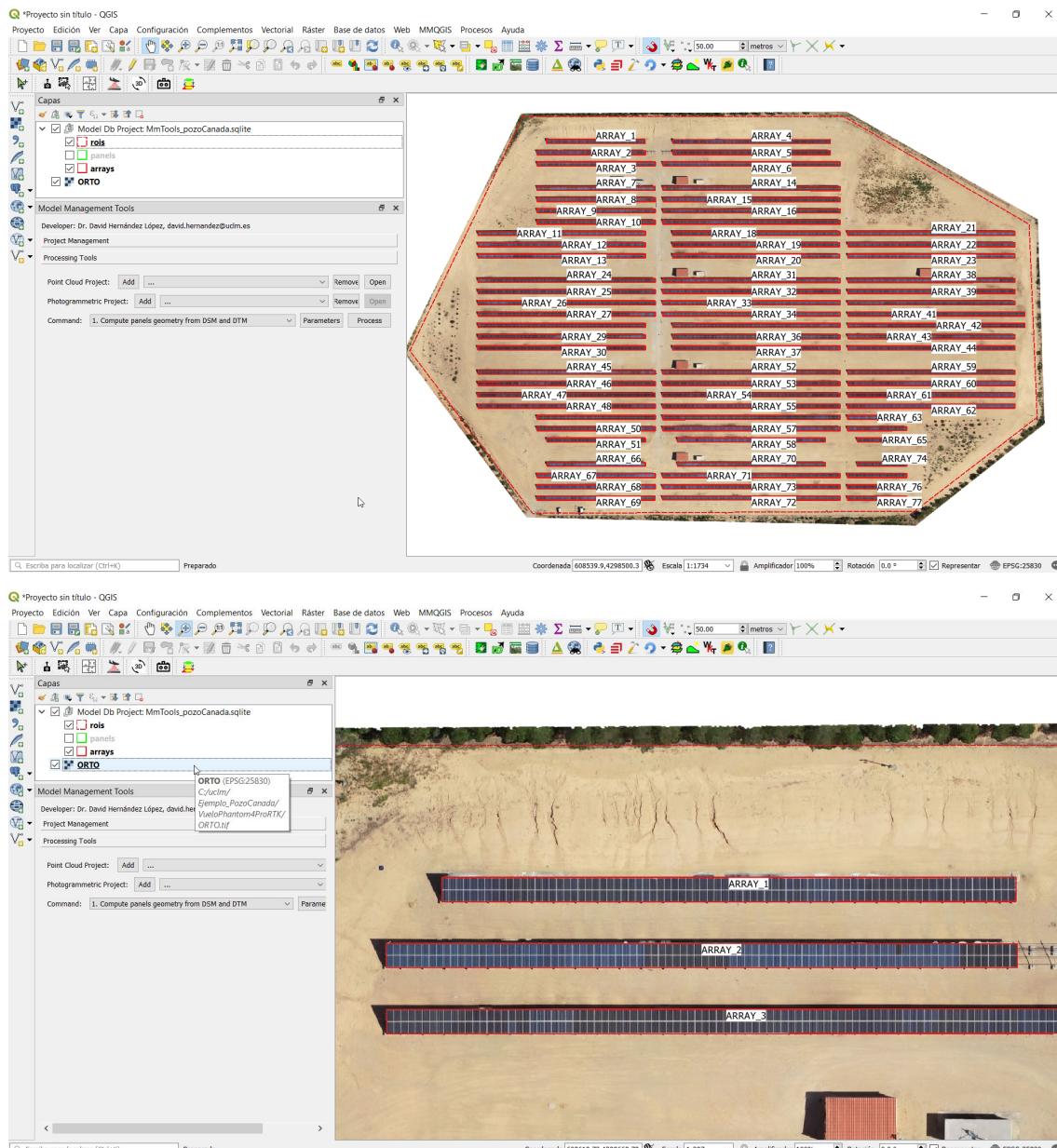
Los parámetros elegidos para este ejemplo son:

Parameters				
	Code	Enabled	Value	Description
1	CPGDSMDTM_CheckPanelsRowsColumnsSize	Si	false	Check the number of rows and columns of panels compared to size
2	CPGDSMDTM_MeanAltitudeTolerance	Si	0.20	Mean altitude tolerance for arrays parts
3	CPGDSMDTM_MeanSlopeTolerance	Si	5.00	Mean slope tolerance for arrays parts
4	CPGDSMDTM_MinimumSizeArrayPanels	Si	2.00	Minimum size of array panels
5	CPGDSMDTM_MultiProcess	Si	true	Use multi process
6	CPGDSMDTM_OutputPath	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/outputs_pf	Output path for report files
7	CPGDSMDTM_PanelFrameWidth	Si	0.035	Panel frame width
8	CPGDSMDTM_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
9	CPGDSMDTM_dsm_raster_file	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/VueloPhantom4ProRTK/dsm.tif	DSM raster file, same CRS as project.
10	CPGDSMDTM_dtm_raster_file	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/VueloPhantom4ProRTK/dtm.tif	DTM raster file, same CRS as project.

Figura 44. Parámetros de cálculo de la geometría 3D

La duración de este proceso dependerá del tamaño del parque y de la resolución espacial de los modelos digitales de elevaciones. En este caso, eligiendo la opción multi proceso tarda unos segundos, y algunos minutos si se usa un único procesador. Tras cerrar el diálogo de éxito en el proceso y mover ligeramente el *Map Canvas*, la capa arrays se refresca y ya figura la geometría calculada, tal y como ilustran las siguientes capturas en las que se incluye la ortoimagen de un vuelo con cámara visible.

Para evitar la ralentización en la visualización debido al gran número de geometrías de la capa *panels*, el complemento establece para esta capa una escala mínima de visualización de 1/100, de manera que para ver la geometría de los paneles hay que aumentar la escala por encima de este valor. El usuario puede cambiar esta propiedad de representación a través de las opciones correspondientes, tal y como ilustra una captura incluida.



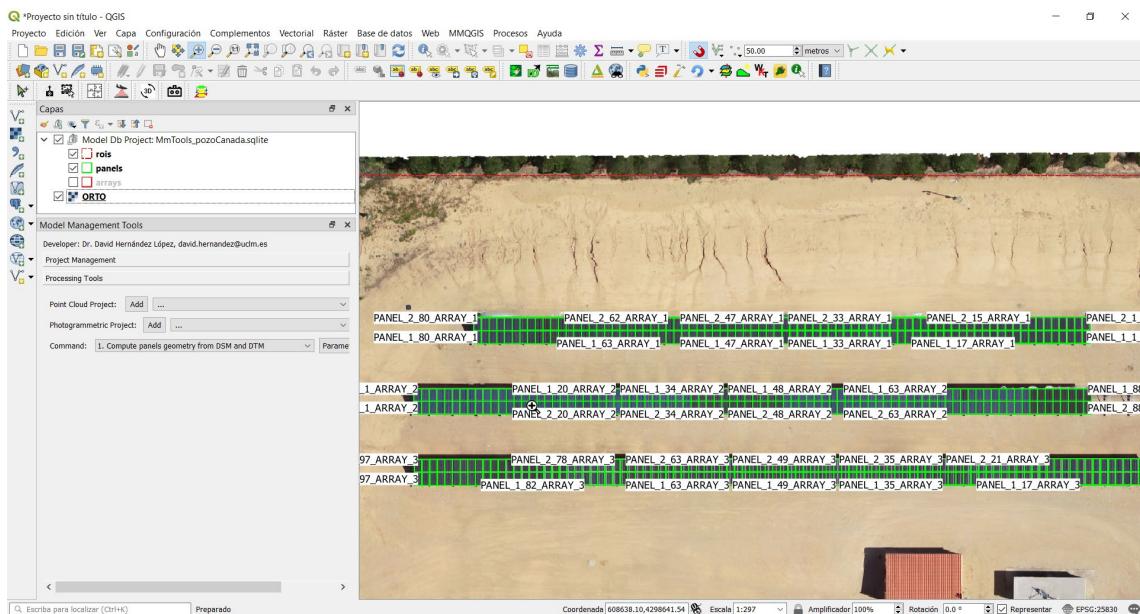


Figura 45. Resultado calculado para la geometría de los arrays de paneles y paneles

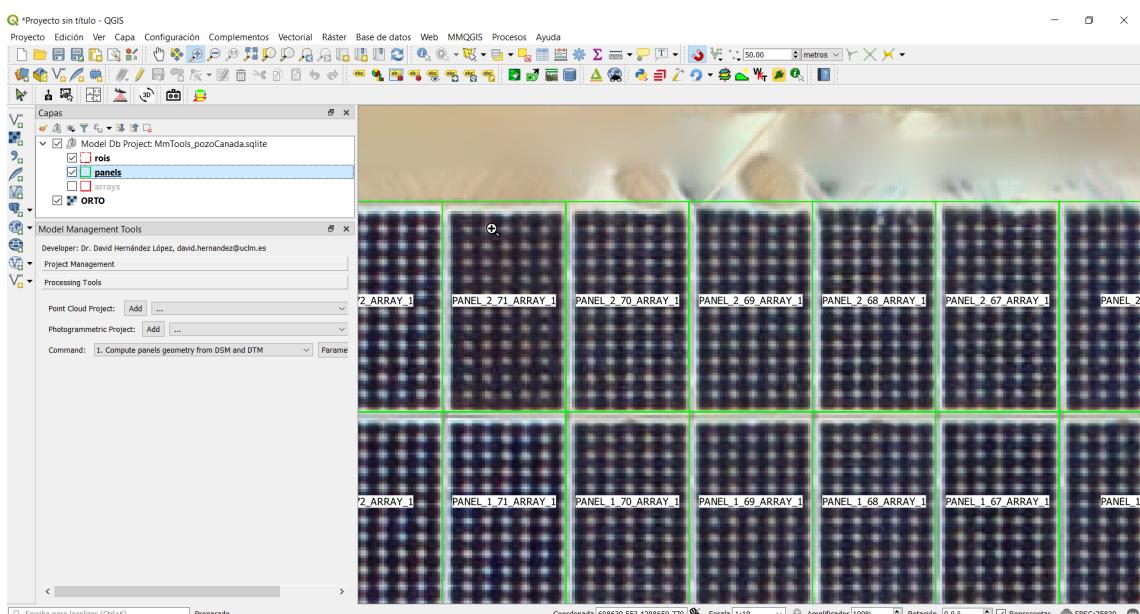


Figura 46. Vista de detalle de la geometría de los paneles

Descripción de la Solución

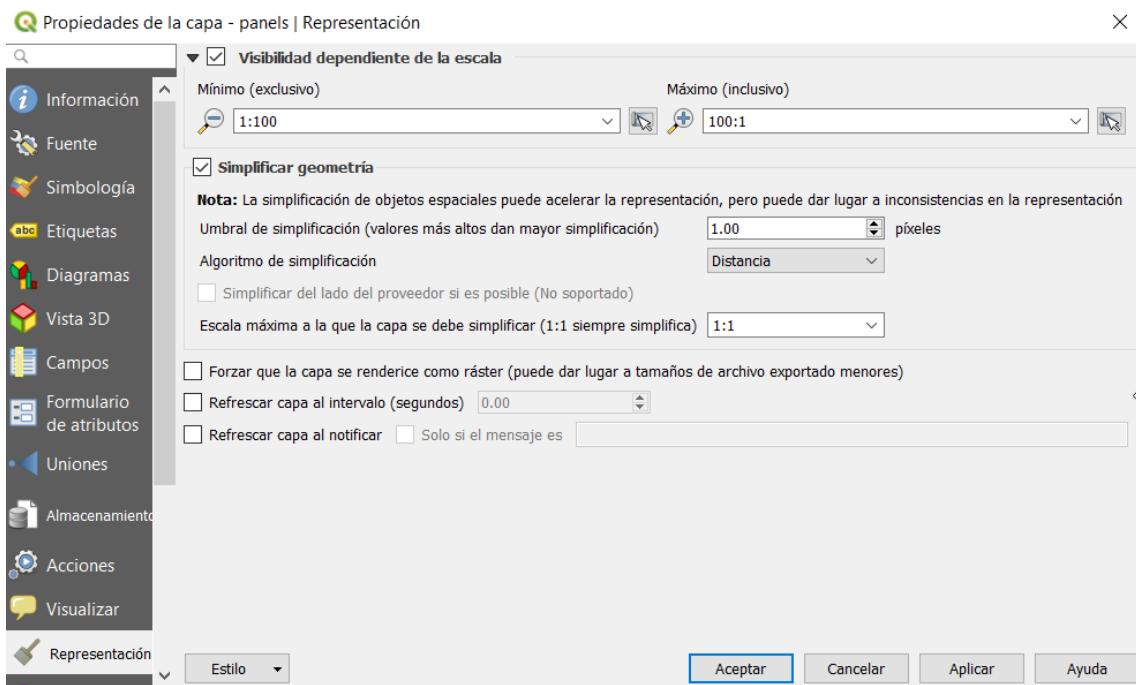


Figura 47. Control de escala para la visualización de geometría de los arrays de paneles

La geometría 3D se determina en función del DSM, de manera que su precisión queda supeditada a la propia precisión del DSM. Para este ejemplo, el único array de paneles que queda ligeramente sobredimensionado es el número 61, tal y como ilustra la siguiente figura. La solución a este problema podría pasar por corregir el DSM, a partir del tratamiento de la nube de puntos con el componente *point_cloud_tools*, o por editar a mano la geometría y utilizar el proceso implementado de actualización, que se ha programado de forma que no alteraría la geometría en planta resultado de la edición manual realizada por el usuario.

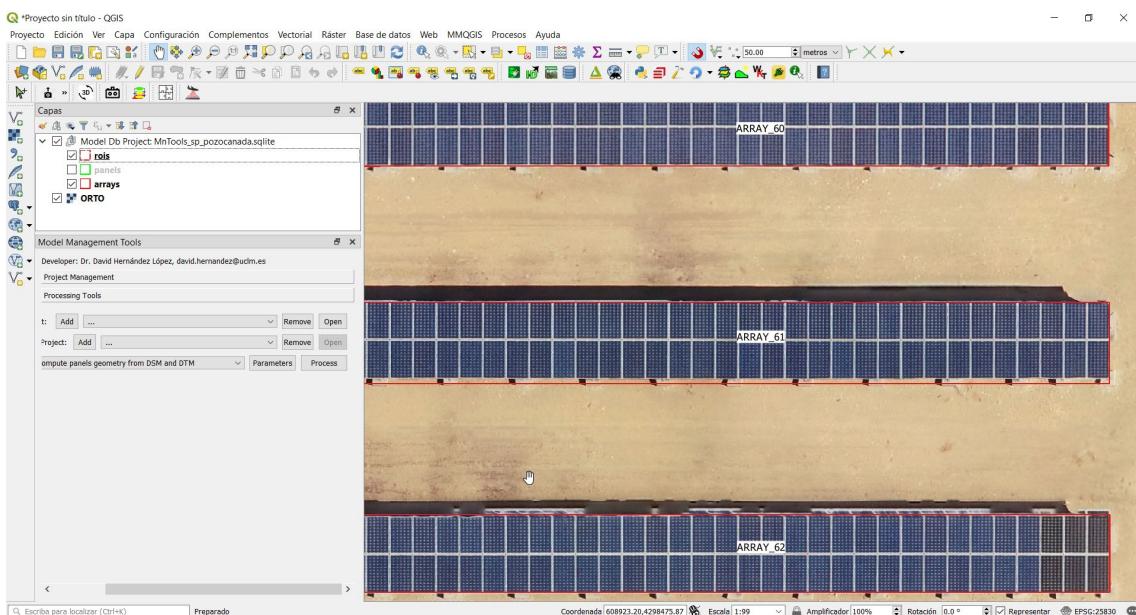


Figura 48. Vista del orden de precisión de la geometría calculada de los arrays de paneles

En el caso de haber usado el shapefile de puntos para crear la definición del parque fotovoltaico, se puede observar la sobreestimación del perímetro de cada array de paneles hacia el exterior, lo que se traducirá en la posible detección de falsos positivos de puntos calientes en esa zona exterior si se calculan deltas de temperatura a partir del vuelo térmico. La explicación es la calidad del modelo digital de superficie empleado, tal y como muestra en la siguiente figura.

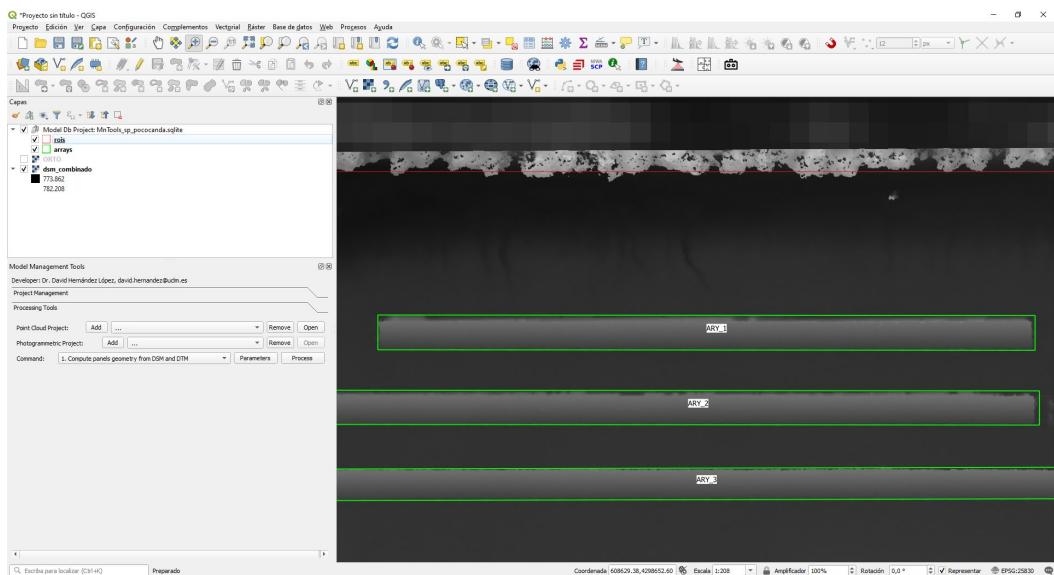


Figura 49. Geometría de los arrays de paneles generada a partir de geometría puntual

El proceso actualiza las tablas *arrays* y *panels*, incorporando no sólo la geometría 3D de los arrays de paneles y de los paneles, sino también valores en campos relativos a aspectos geométricos que serán utilizado posteriormente:

	name	block_id	modules_rows	modules_columns	cells_rows	cells_columns	cell_size	azimuth	length	width	min_height	max_height	mount_type	parts	fc	sc	enabled	axis	parts_wkt	parts_slope
1	ARY_19	4	2	0	12	6	0.1524	269.8388905285	111,8823	3,3392	0,3	3	1	4	608766,2764	4298580,8663	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-34.3171,593...	
2	ARY_16	4	2	0	12	6	0.1524	269.903686566	118,5001	3,3953	0,3	3	1	4	608767,541	4298603,1833	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-33.923,0,674...	
3	ARY_17	4	2	0	12	6	0.1524	90.02785208	118,3959	3,4669	0,3	3	1	4	608771,2605	4298595,6699	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-36.358,1,460...	
4	ARY_22	5	2	0	12	6	0.1524	90.077723224	111,8555	3,0549	0,3	3	1	4	608878,605	4298580,7919	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-32.2531,1,199...	
5	ARY_23	5	2	0	12	6	0.1524	90.086117195	111,8529	3,2161	0,3	3	1	4	608880,1677	4298573,0533	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-32.067,1,624...	
6	ARY_20	4	2	0	12	6	0.1524	90.016052055	111,8876	3,0304	0,3	3	1	4	608770,1447	4298573,2041	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-34.033,0,930...	
7	ARY_21	5	2	0	12	6	0.1524	269.924980784	112,0613	3,1347	0,3	3	1	4	608883,3644	4298588,3797	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-35.397,1,075...	
8	ARY_26	6	2	0	12	6	0.1524	269.833134187	116,3879	3,2129	0,3	3	1	4	608640,3139	4298542,0732	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-35.666,2,028...	
9	ARY_27	6	2	0	12	6	0.1524	90.137355496	118,434	3,2031	0,3	3	1	4	608636,0551	4298534,6304	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-34.853,1,342...	
10	ARY_24	6	2	0	12	6	0.1524	90.084029027	118,4032	3,2311	0,3	3	1	4	608640,1616	4298556,9788	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-31.933,2,282...	
11	ARY_25	6	2	0	12	6	0.1524	269.908081037	118,3182	3,3254	0,3	3	1	4	608638,4126	4298549,602	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-32.697,1,617...	
12	ARY_30	6	2	0	12	6	0.1524	90.154907211	112,1613	3,2673	0,3	3	1	4	608636,5114	4298512,0337	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-32.172,2,442...	
13	ARY_31	7	2	0	12	6	0.1524	269.983413737	118,7115	3,1536	0,3	3	1	4	608766,3728	4298557,168	1	LINESTRING(60...	POLYGON Z((...,-32.703,1,890...	

Descripción de la Solución

		id	name	array_id	module_row	module_column	cells_rows	cells_columns	cell_size	azimuth	length
1		1	PANEL_1_1_ARRAY_1	1	0	0	12	6	0.125	269.9866	1.3946
2		2	PANEL_1_2_ARRAY_1	1	0	1	12	6	0.125	269.9866	1.3946
3		3	PANEL_1_3_ARRAY_1	1	0	2	12	6	0.125	269.9866	1.3946
4		4	PANEL_1_4_ARRAY_1	1	0	3	12	6	0.125	269.9866	1.3946
5		5	PANEL_1_5_ARRAY_1	1	0	4	12	6	0.125	269.9866	1.3946
6		6	PANEL_1_6_ARRAY_1	1	0	5	12	6	0.125	269.9866	1.3946
7		7	DANCI_1_7_ADDAV_1	1	0	6	12	6	0.125	269.9866	1.3946

Figura 50. Tablas de arrays de paneles y paneles de la base de datos

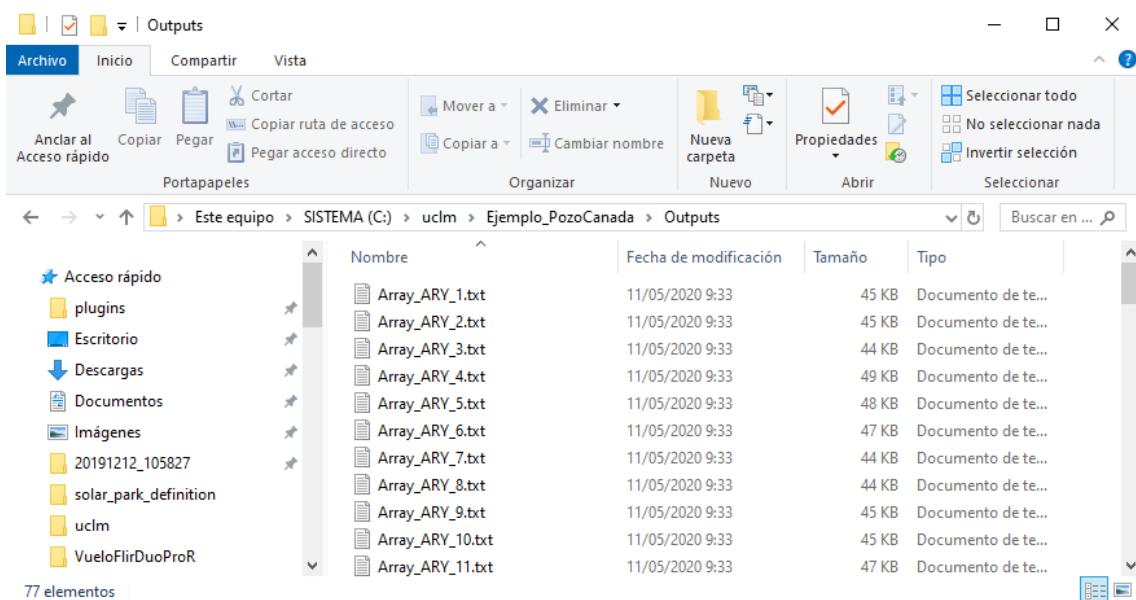
La geometría de un array de paneles no es un plano, depende del número de partes que se haya indicado para cada array. A modo de ejemplo, para el array número 1, ARY_1, en el campo *parts_wkt* figura la siguiente información:

```
POLYGON Z ((608631.5381 4298651.5935 777.8000,608648.0872 4298651.5808 777.8000,
608648.0845 4298648.0816 775.8000,608631.5353 4298648.0944 775.8000,608631.5381 4298651.5935 777.8000));
POLYGON Z ((608648.0872 4298651.5808 777.8000,608664.6362 4298651.5680 777.8217,
608664.6336 4298648.0689 775.7783,608648.0845 4298648.0816 775.8000,608648.0872 4298651.5808 777.8000));
POLYGON Z ((608664.6362 4298651.5680 777.8217,608681.1853 4298651.5553 777.8274,
608681.1826 4298648.0561 775.7726,608664.6336 4298648.0689 775.7783,608664.6362 4298651.5680 777.8217));
POLYGON Z ((608681.1853 4298651.5553 777.8274,608697.7344 4298651.5425 777.8114,
608697.7317 4298648.0434 775.7886,608681.1826 4298648.0561 775.7726,608681.1853 4298651.5553 777.8274))
```

Se puede apreciar que se han determinado cuatro geometrías tipo polígono con altitud, uno para cada una de las cuatro partes indicadas por el usuario. Además, en el campo *parts_slope*, figura el resultado del análisis estadístico para obtener la pendiente de cada parte, que se resume en el valor medio y su error medio cuadrático, ambos valores expresados en %:

-59.821;2.462;-57.364;2.702;-60.720;2.675;-57.364;4.165

En la carpeta elegida en el parámetro *outputs* se habrá creado un fichero informe de resultados para cada uno de los arrays de paneles:



```

1 Array panel geometry estimation report
2 - Project file .....: C:/Ucm/Ejemplo_PozoCanada/SolarPark/MnTools_sp_pococanda.sqlite
3 - Array .....: ARY_1
4 - - Footprint line wkt .....: POLYGON ((608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0738 4298651.5093, 608631.0738 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5101))
5 - - Footprint line wkt .....: LINESTRING(608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093)
6 - - Footprint line wkt .....: LINESTRING(608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5101)
7 - - Footprint line wkt .....: LINESTRING(608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093)
8 - - Footprint line wkt .....: LINESTRING(608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5101)
9 - - Minimum 2D rectangle wkt ..: POLYGON((608631.0938 4298651.5101, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5093, 608631.0938 4298651.5101))
10 - - Axis length .....: 66.1143
11 - - Axis length .....: 66.1143
12 - - Orthogonal axis lenght ...: 3.4991
13 - - Axis 2D wkt .....: LINESTRING((608631.5368 4298649.8440, 608697.7330 4298649.7930))
14 - - Final geometry wkt .....: POLYGON ((608631.5368 4298649.8440, 608697.7330 4298649.7930, 608648.0872 4298651.5008 777.8000, 608664.6362 4298651.5680 777.8217, 608681.1853 4298651.5553 777.8274, 608631.5381 4298651.5935 608631.5354 4298640.0944, 608697.7317 4298640.0434, 608697.7344 4298651.5425, 608631.5381 4298651.5935))
15 - - Structure's parts .....: 4
16 - - Structure part number ..: 1
17 - - Axis number of points ..: 467
18 - - Mean axis height .....: 776.8000
19 - - Standard deviation ....: 0.0087
20 - - Number of inliers ....: 464
21 - - Mean slope .....: 32.7485
22 - - Standard deviation ....: 0.2894
23 - - Number of inliers ....: 466
24 - - Structure part number ..: 2
25 - - Axis number of points ..: 473
26 - - Mean axis height .....: 776.8000
27 - - Standard deviation ....: 0.0019
28 - - Number of inliers ....: 473
29 - - Mean slope .....: 32.7485
30 - - Standard deviation ....: 0.6043
31 - - Number of inliers ....: 473
32 - - Structure part number ..: 3
33 - - Axis number of points ..: 473
34 - - Mean axis height .....: 776.8000
35 - - Standard deviation ....: 0.0063
36 - - Number of inliers ....: 473
37 - - Mean slope .....: 34.1707
38 - - Standard deviation ....: 0.4141
39 - - Number of inliers ....: 469
40 - - Structure part number ..: 4
41 - - Axis number of points ..: 471
42 - - Mean axis height .....: 776.8000
43 - - Standard deviation ....: 0.0068
44 - - Number of inliers ....: 464
45 - - Mean slope .....: 33.1213
46 - - Standard deviation ....: 0.5517
47 - - Number of inliers ....: 461

```

Figura 51. Informe de resultados de cálculo de la geometría de los arrays de paneles

En este informe se puede observar que la estimación es el resultado de un encadenamiento de procesos que incorporan análisis estadísticos para rechazar errores groseros, dado que la calidad de esta geometría es muy importante para procesos posteriores, estando supedita a la propia calidad de las fuentes de información empleadas.

La geometría 3D de cada panel es un plano. Todos los paneles de un mismo array de paneles medirán lo mismo. La calidad resultante dependerá de la calidad de la información de partida. En el caso del ejemplo, a partir de un shapefile de tipo polígono, los resultados obtenidos son muy buenos, tal y como ilustra la siguiente figura.

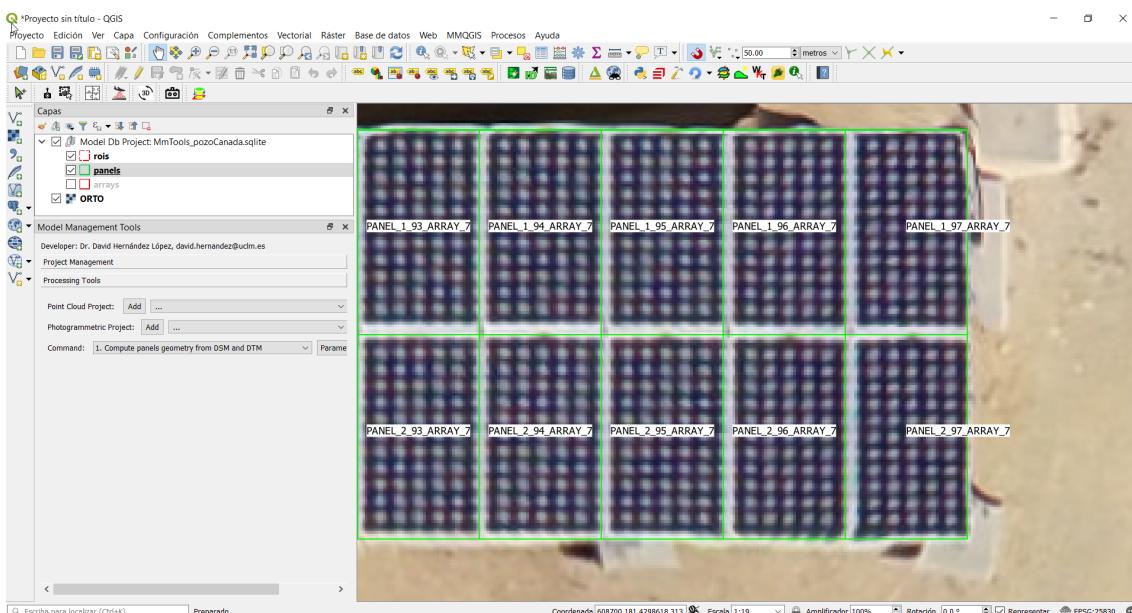


Figura 52. Detalle de la precisión geometría generada

Se almacena información en otras tablas de utilidad para otros procesos, tal y como ilustra la siguiente figura.

The figure consists of three separate windows of the MySQL Workbench application. Each window has a title bar 'Administrador de BBDD' and 'Base de datos: Tabla'. The left pane of each window shows a tree view of database providers: PostGIS, Spatialite, and MnTools_sp_pococanda.sqlite. The right pane displays a table with columns 'id', 'table_name', 'description', and 'name_prefix' (in the first window) or 'id', 'class_id', and 'object_id' (in the other two windows). The third window also lists tables like arrays, blocks, classes, inverters, objects, objects_bb3d, objects_geometries, pct_dbs, pht_dbs, and points_pct_dbs.

Table	id	table_name	description	name_prefix
arrays	1	arrays	Array of modular...	ARY_
blocks	2			
classes	3			
inverters	4			
objects	5			
objects_bb3d				

Table	id	class_id	object_id
arrays	1	1	1
blocks	2	1	2
classes	3	1	3
inverters	4	1	4
objects	5	1	5
objects_bb3d			

Table	id	object_id	geometry	enabled	visible
arrays	1	1	PhotovoltaicArrayPanel@p@poly...	1	1
blocks	2	2	PhotovoltaicArrayPanel@p@poly...	1	1
classes	3	3	PhotovoltaicArrayPanel@p@poly...	1	1
inverters	4	4	PhotovoltaicArrayPanel@p@poly...	1	1
objects	5	5	PhotovoltaicArrayPanel@p@poly...	1	1
objects_bb3d					
objects_geometries					
pct_dbs					
pht_dbs					
points_pct_dbs					

Figura 53. Información adicional asociada a los objetos 3D

5. Formación de las huellas de los arrays de paneles en las imágenes térmicas

Este proceso se corresponde con el comando 2. *Get images footprints from arrays panels*.

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear.

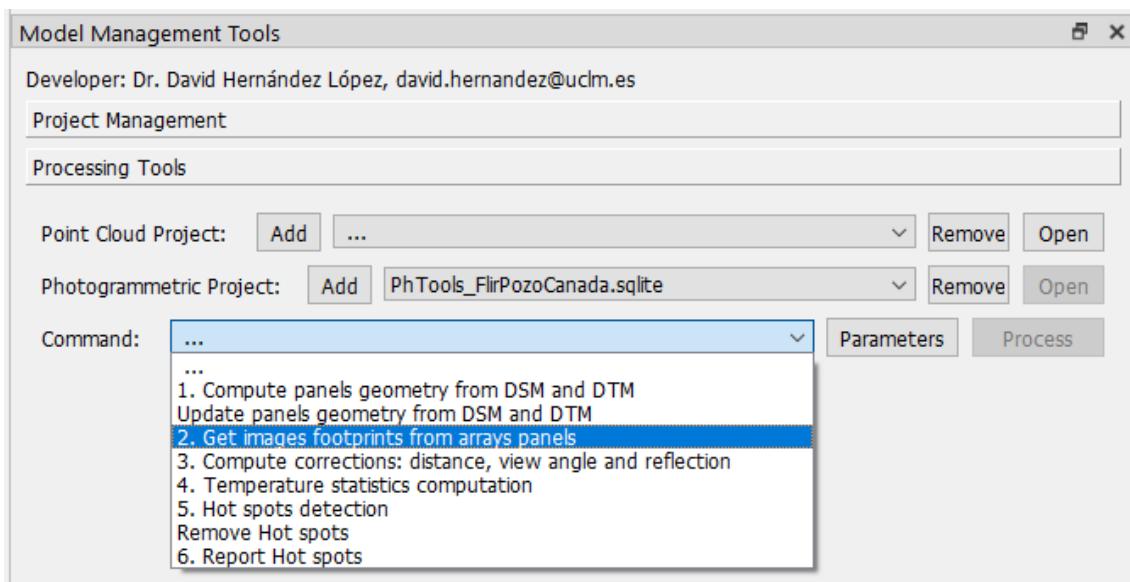


Figura 54. Proceso de formación de las huellas de los array de paneles en las imágenes térmicas

Los parámetros elegidos para este comando y ejemplo aparecen en la siguiente figura.

	Code	Enabled	Value	Description
1	GIFAP_DsmRasterFile	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/dsm_combinado.tif	DSM raster file, same CRS as project and with no data value.
2	GIFAP_ImagesFootprintBufferDistance	Si	1.000	Images footprint buffer distance to check points within images
3	GIFAP_MinimumSideSmallestObjectInImage	Si	1.300	Minimum side of the smallest object in image (computed as area region)
4	GIFAP_MultiProcess	Si	true	Use multi process
5	GIFAP_NumberOfPointsBySide	Si	31	Number of points to compute in each side of the footprint
6	GIFAP_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
7	GIFAP_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true	Process only enabled images

Figura 55. Parámetros del proceso de formación de las huellas de las imágenes

El proceso se basa en el conocimiento de las huellas de las imágenes térmicas proyectadas sobre el DSM, proceso realizado en la construcción del proyecto del componente *photogrammetry_tools*, y en la geometría 3D de las partes de los arrays de paneles, resultado del proceso anterior. Para cada uno de los arrays de paneles a procesar, excluyéndose sólo aquellos que estén deshabilitados en el caso de elegir a verdadero el parámetro de procesar sólo habilitados, se obtienen las proyecciones de cada una de sus partes sobre aquellas imágenes térmicas para las que existe intersección con su huella. El algoritmo aplica el backward fotogramétrico con el modelo matemático completo, incluyendo la orientación interna (parámetros de la cámara y modelo de calibración) y la orientación externa. Se ignorarán las imágenes deshabilitadas en el proyecto fotogramétrico si el parámetro correspondiente, usar sólo imágenes habilitadas, está a verdadero.

El proceso finaliza transcurridos menos de dos minutos desde su inicio, activando la opción de multiproceso, o cinco minutos, con un único procesador, generando los resultados en la tabla *images_fp_dbs*, que se concretan en que se ha obtenido la geometría de la proyección de cada imagen sobre cada array, ignorando aquellas cuyas dimensiones sean tales que la mínima magnitud, en la dirección del eje del array o su perpendicular, sea inferior al valor de un parámetro elegido, que se ha establecido en 1.3 metros para este caso, lo que viene a corresponder a la anchura de un módulo. El motivo de evitar usar zonas pequeñas en imágenes térmicas es que pueden producir resultados erróneos en estadística muestral aplicada en procesos posteriores.

The screenshot shows the MySQL Workbench interface. On the left, the 'Proveedores' tree view lists various spatial formats like GeoPackage, Oracle Spatial, PostGIS, and Spatialite. Under Spatialite, there is a folder named 'MnTools_sp_pococanda.sqlite' which contains several tables: arrays, blocks, classes, images_fp_dbs, inverters, objects, objects_bb3d, objects_geometries, pct_dbs, pht_dbs, points_pct_dbs, projects, and rois. A table named 'Capa virtual' is also listed. On the right, a table view titled 'Vista preliminar' displays data from the 'images_fp_dbs' table. The columns are id, pht_id, object_id, image_id, and the_geom. The data shows multiple rows with id values ranging from 12284 to 12298, pht_id and object_id both being 1, image_id values from 3954 to 5262, and the_geom type being MULTIPOLYGON.

	id	pht_id	object_id	image_id	the_geom
12284	12284	1	77	3954	MULTIPOLYGON
12285	12285	1	77	3955	MULTIPOLYGON
12286	12286	1	77	3956	MULTIPOLYGON
12287	12287	1	77	3957	MULTIPOLYGON
12288	12288	1	77	3958	MULTIPOLYGON
12289	12289	1	77	5253	MULTIPOLYGON
12290	12290	1	77	5254	MULTIPOLYGON
12291	12291	1	77	5255	MULTIPOLYGON
12292	12292	1	77	5256	MULTIPOLYGON
12293	12293	1	77	5257	MULTIPOLYGON
12294	12294	1	77	5258	MULTIPOLYGON
12295	12295	1	77	5259	MULTIPOLYGON
12296	12296	1	77	5260	MULTIPOLYGON
12297	12297	1	77	5261	MULTIPOLYGON
12298	12298	1	77	5262	MULTIPOLYGON

Figura 56. Información asociada en la base de datos de las huellas de las imágenes

6. Cálculo de información para correcciones en las imágenes térmicas

Antes de proceder a calcular estadísticas de temperaturas y detectar hot spots, es necesario obtener información auxiliar que será empleada en los modelos para aplicar correcciones por ángulo de observación, atmósfera y distancia. En este proceso también se realiza una estimación de las zonas en un array de paneles que pueden estar afectadas por la recepción de radiación procedente de otros arrays de paneles situados al sur, en función de la posición relativa de los arrays involucrados y de la geometría de observación, que incluye la posición y dirección de adquisición de cada imagen térmica desde el UAV. Estas zonas serán enmascaradas para no ser usadas al no corresponder la temperatura observada exclusivamente a la de la región de la placa observada.

En este proceso no se calculan correcciones, sino que se genera información que persistirá en forma de imágenes y que se utilizará en un paso posterior para el cálculo y aplicación de las correcciones.

Este proceso se corresponde con el comando *Compute corrections: distance, view angle, and reflection*. Los algoritmos empleados se recogen en el apartado 4.2 de este documento.

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear.

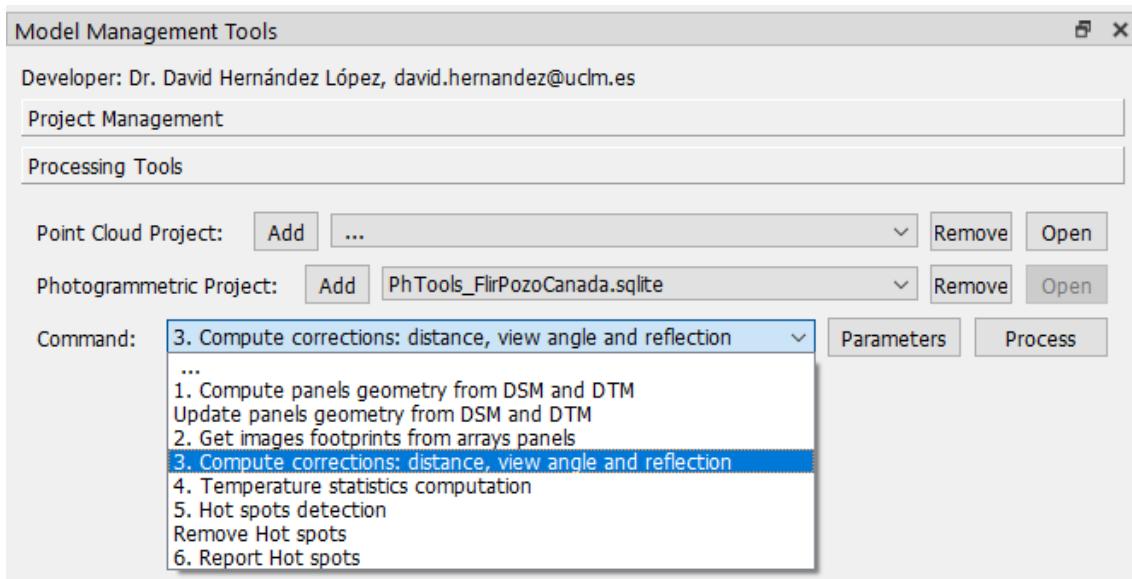


Figura 57. Proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura.

Parameters manager for command: 3. Compute corrections: distance, view angle and reflection				
	Code	Enabled	Value	Description
1	CDTC_DsmRasterFile	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/dsm_combinado.tif	DSM raster file, same CRS as project and with no data val
2	CDTC_MaximumDistanceAxisReflections	Si	1.500	Maximum distance to array panel axis in reflection pair
3	CDTC_MinimumSideSmallestObjectInImage	Si	1.300	Minimum side of the smallest object in image
4	CDTC_OutputDistancesImagesSuffix	Si	_distances	Suffix for image to store the distance to panel
5	CDTC_OutputMaskImagesSuffix	Si	_mask	Suffix for image to store the pixels where is visible the array
6	CDTC_OutputReflectedPixelsImagesSuffix	Si	_reflectedPixels	Suffix for image to store the pixel where exists reflection from another panel
7	CDTC_OutputViewAnglesImagesSuffix	Si	_viewAngles	Suffix for image to store the view angle from normal to panel
8	CDTC_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
9	CDTC_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true	Process only enabled images

Figura 58. Parámetros de cálculo del proceso de correcciones en las imágenes térmicas

La duración del proceso con la opción de multiproceso activada es de apenas 11 minutos, mientras que si no se activa se alargaría hasta casi una hora. En el proceso se van generando los resultados en un conjunto de imágenes almacenadas en la misma ruta de las imágenes originales. Sirva de ejemplo la siguiente figura.

Descripción de la Solución

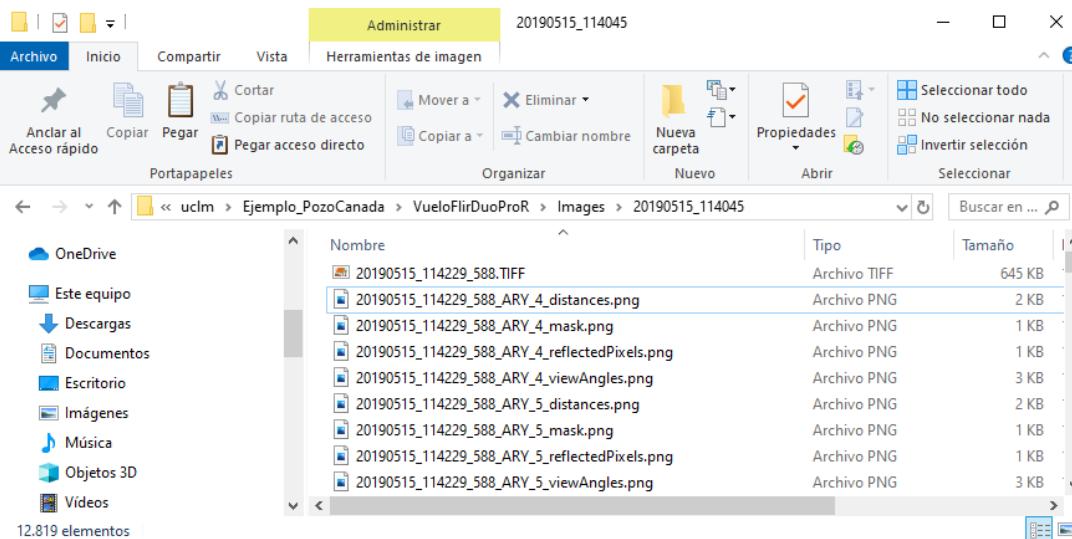


Figura 59. Imágenes resultado del proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas

A modo de ejemplo, para la imagen 20190515_114229_588.TIFF se aprecia que se generan imágenes para cada uno de los dos arrays de paneles que observan en la misma, el 4 y el 5. En la siguiente figura se puede observar la imagen y el valor de un píxel, 7760, en 16 bits, correspondiente a una temperatura registrada de $7760 * 0.04 - 273.15 = 37,25^{\circ}\text{C}$.

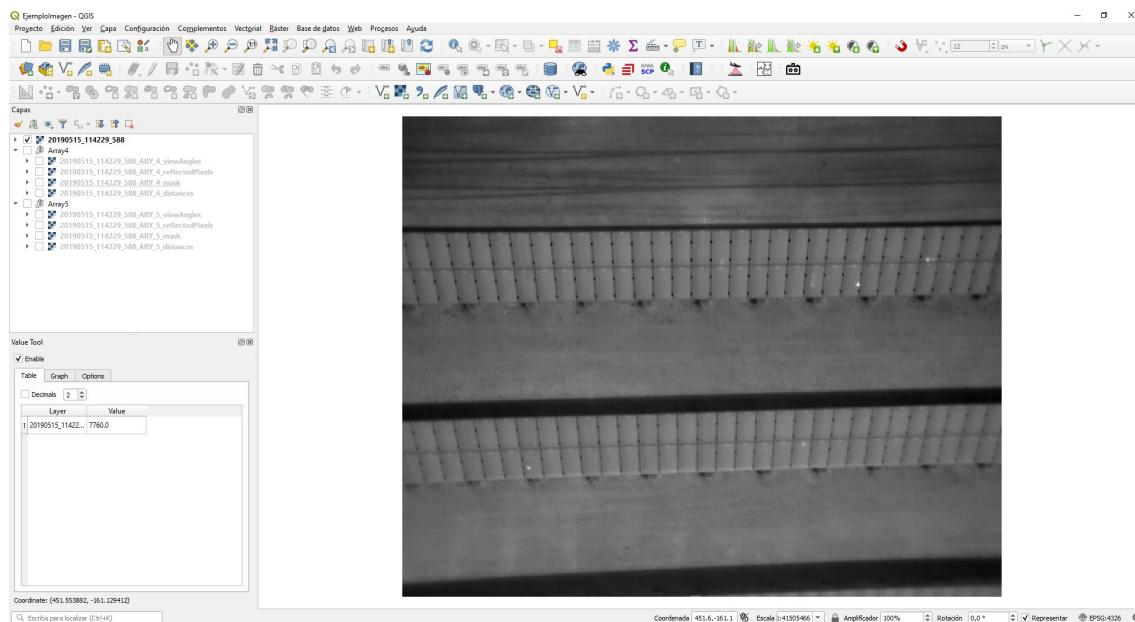


Figura 60. Visualización de imágenes resultado del proceso de correcciones

Para cada imagen y array de paneles se generan las siguientes imágenes, con un nombre resultado de concatenar dos sufijos al propio nombre de la imagen: un primer sufijo que indica el array observado y un segundo sufijo que depende de la información almacenada en la imagen, y que ha sido elegido por el usuario como parámetro:

- _mask.png.- Imagen de 8 bits máscara con un valor de 255 en los píxeles en los que se observa ese array. Es una imagen comprimida que apenas ocupa 1 kbyte.
- _distances.png.- Imagen de 8 bits que almacena el valor de la distancia desde el centro de la óptica, centro de proyección, a cada píxel del array proyectado sobre el objeto observado, multiplicada por dos y redondeada al entero más próximo. Como la altura máxima de vuelo legal de UAVs en España es de 120 m, almacenar en un byte permite con la operación indicada alcance una precisión de 0.5 m, más que suficiente para las operaciones de corrección a realizar en otros procesos. Es una imagen comprimida que apenas ocupa algunos kbytes.
- _viewAngles.png.- Imagen de 8 bits que almacena el valor del ángulo que forma la recta del píxel en el panel al centro de proyección con la normal al panel en el píxel, multiplicada por dos y redondeada al entero más próximo. Como el ángulo máximo nunca alcanzaría el valor de 90 grados sexagesimales, almacenar en un byte permite de esta forma alcanzar una precisión de medio grado sexagesimal, más que suficiente para las operaciones de corrección a realizar en otros procesos. Es una imagen comprimida que apenas ocupa algunos kbytes.
- _reflectedPixels.png.- Imagen de 8 bits máscara con un valor de 255 en los píxeles en los que se puede recibir radiación procedente de otro array de paneles situado al sur. Es una imagen comprimida que apenas ocupa 1 kbyte. Esta imagen no se crea si el algoritmo no detecta zonas donde puedan aparecer estos efectos.

A continuación, se recogen ejemplos de estas imágenes.

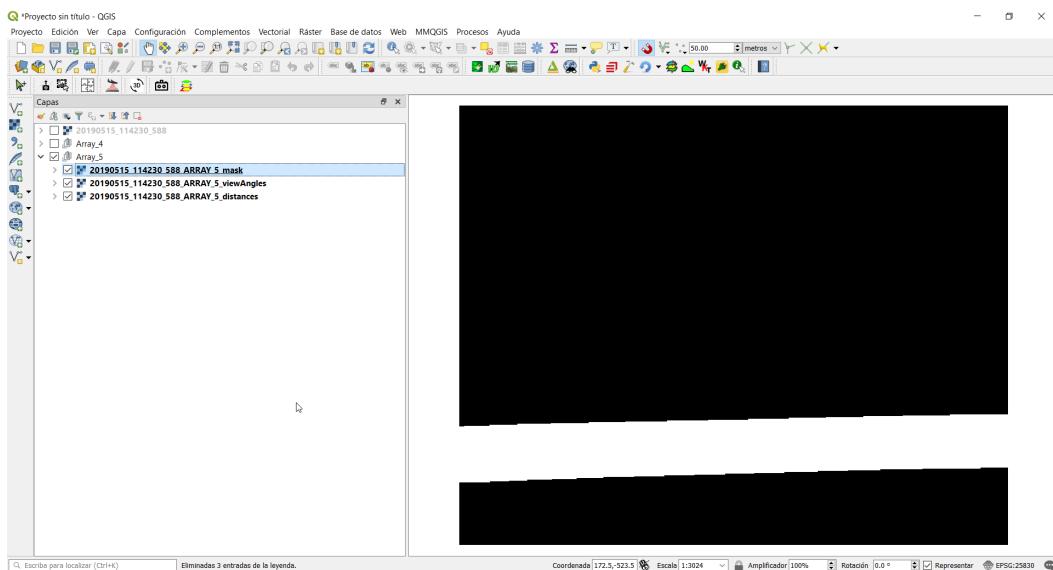


Figura 61. Imagen de máscara

Descripción de la Solución

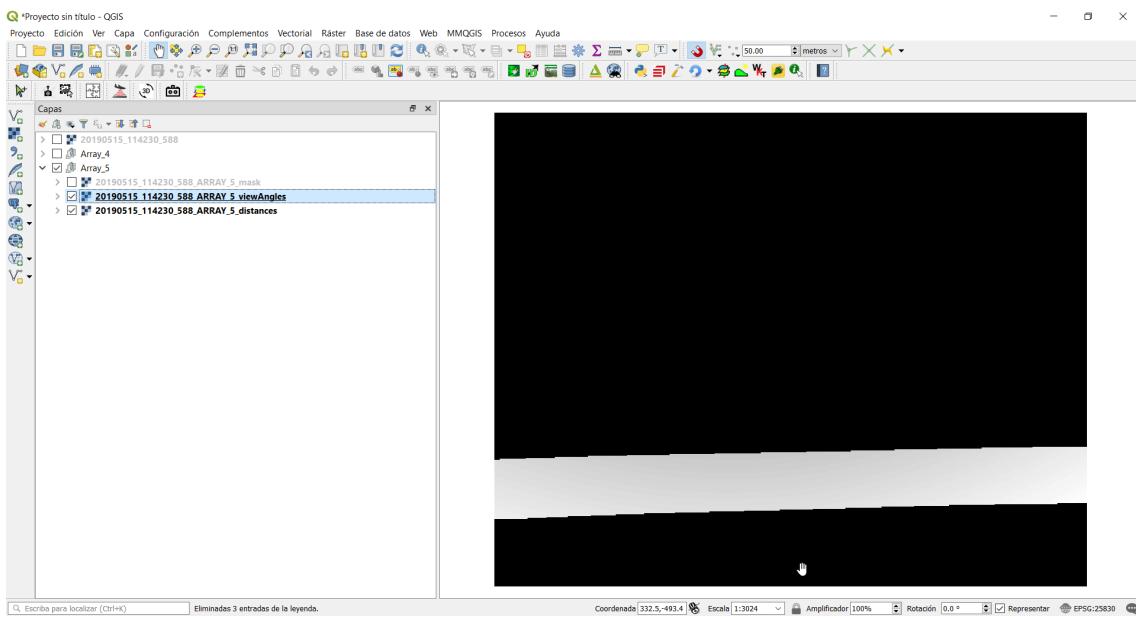


Figura 62.

Imagen de ángulos de vista

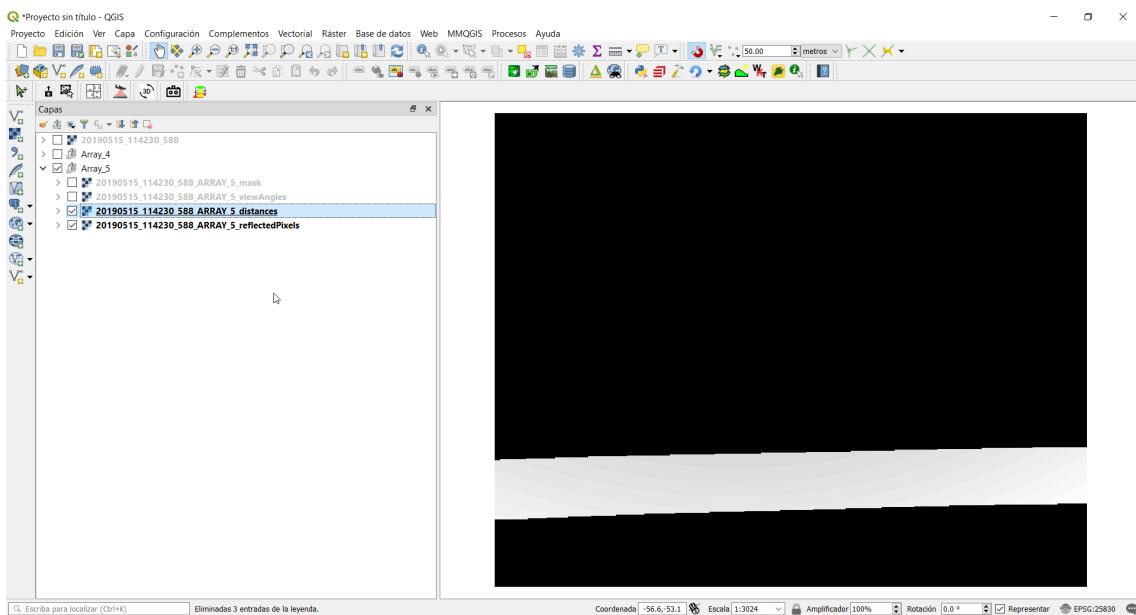


Figura 63.

Imagen de distancias centro de proyección y píxeles proyectados

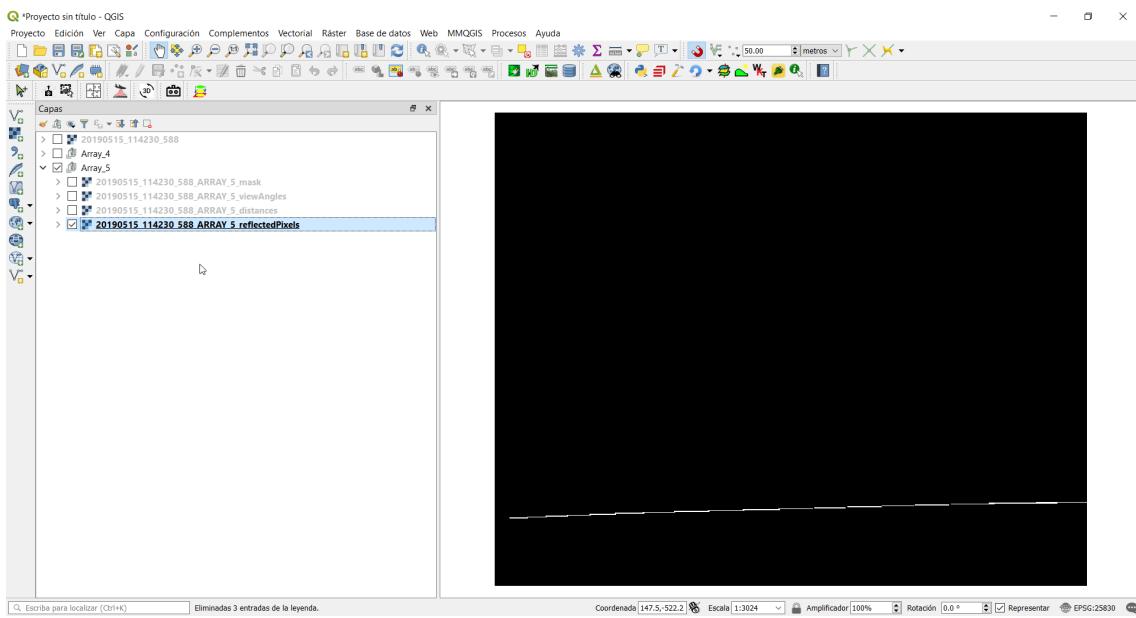
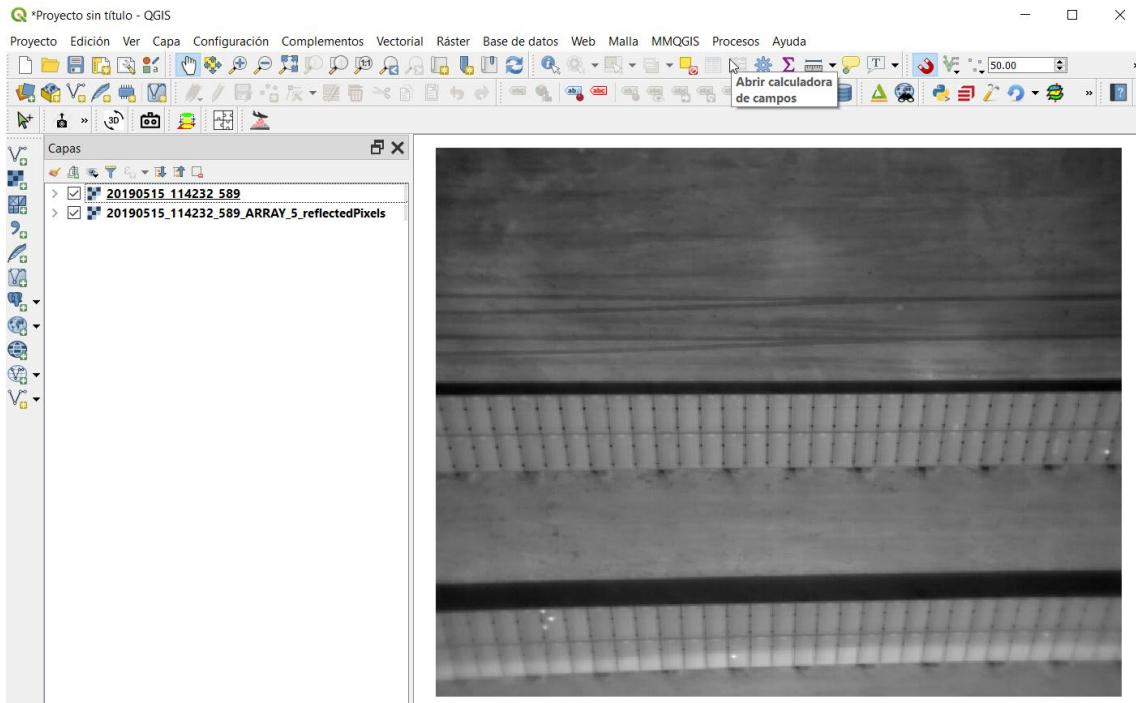


Figura 64. Imagen de píxeles afectados por recepción de radiación de otro array de paneles

En las siguientes capturas se muestra un caso de mayor afección del área de recepción de radiación procedente de un array de paneles al sur, apreciándose que el algoritmo implementado se ha diseñado para buscar el máximo efecto.



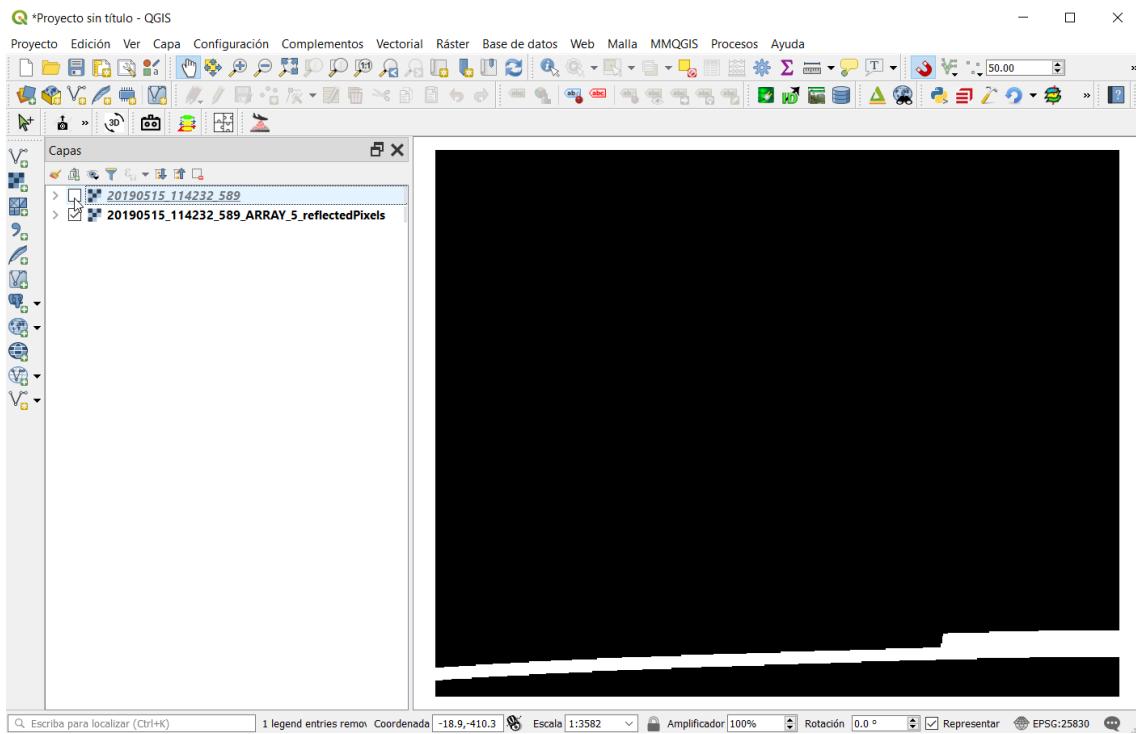


Figura 65. Ejemplo con mayor grado de afección de área de recepción de radiación procedente de otro array de paneles al sur.

7. Cálculo de estadísticas de temperatura

Para evitar errores en las temperaturas absolutas de las cámaras térmicas empleadas, a pesar de aplicar a las imágenes adquiridas calibraciones y de tener en cuenta las correcciones correspondientes, la detección de puntos calientes se debe basar en estimación de incrementos de temperatura sobre valores representativos de cada array de paneles y de cada panel, cuya determinación se debe realizar a partir de estadística muestral empleando toda la información disponible en las imágenes térmicas que los observan. En este proceso se aborda la estimación estadística para realizar la estimación muestral a nivel de imagen y array de paneles, a nivel de array con todas las imágenes que lo observan, a nivel de imagen y panel, y a nivel de panel con todas las imágenes que lo observan. Del análisis de las diferencias entre las estadísticas de un array de paneles y las estadísticas de cada uno de sus paneles se podrían derivar conclusiones de problemas a nivel de panel.

Este proceso se corresponde con el comando *Temperature statistics computation*. Los algoritmos empleados se recogen en el apartado 4.3 de este documento.

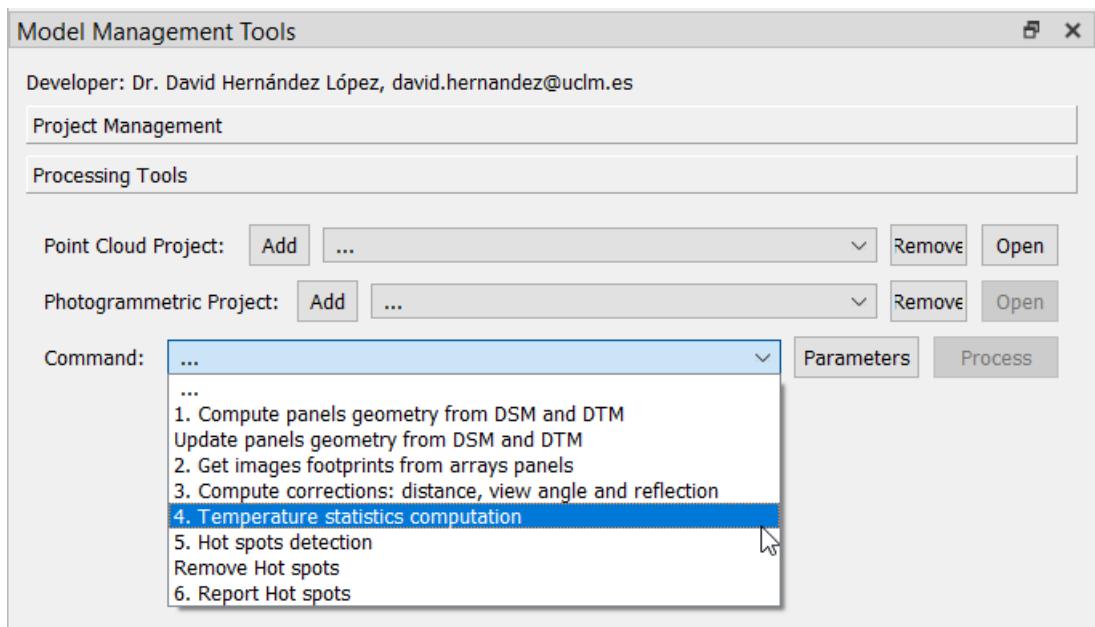


Figura 66. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear.

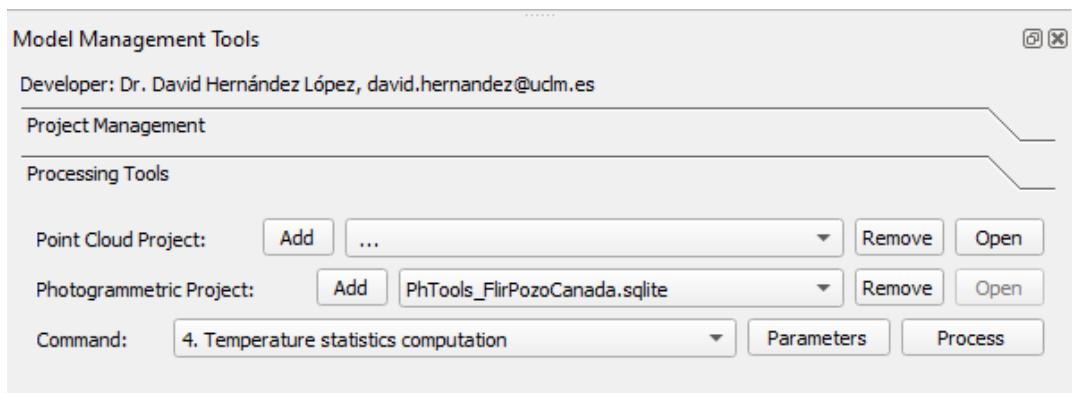


Figura 67. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura.

Descripción de la Solución

Parameters manager for command: 4. Temperature statistics computation			
	Code	Enabled	Description
1	TSC_AlgorithmTemperatureHomogenizationinArrayPanel	Si	Algorithm for temperature homogenization in array panel
2	TSC_ArrayPanelTemperatureEstimationPercentileThreshold	Si	Percentile threshold for estimation of array panel temperature
3	TSC_AtmosphereRelativeHumidity	Si	Atmosphere relative humidity (%), for input data format value and default value
4	TSC_AtmosphereTemperature	Si	Atmosphere temperature (°C), for input data format value and default value
5	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityDataFormat	Si	Data format for atmosphere temperature and relative humidity
6	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityFile	Si	Atmosphere temperature and relative humidity CSV file: date(yyyy/MM/dd);time(hhmm:ss);temp(°C);humidity(%)
7	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityFileOffsetToUTC	Si	Offset to UTC from time in file, example: -02:00:00 (hhmmss)
8	TSC_AtmosphericTransmissionCoefficientEquation	Si	Equation for atmospheric transmission coefficient, for temperature and relative humidity
9	TSC_DN2TemperatureEquation	Si	Equation for conversion digital number to temperature
10	TSC_InputDistancesImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the distance to panel
11	TSC_InputImagesSuffix	Si	Suffix for input corrected thermal images or empty for use database images
12	TSC_InputMaskImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the pixels where is visible the array panel
13	TSC_InputReflectedPixelsImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the pixel where exists reflection from another array panel
14	TSC_InputViewAnglesImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the view angle from normal to panel
15	TSC_MultiProcess	Si	Use multi process
16	TSC_OutputEmissivityEquation	Si	Equation for write output emissivity values to 8 bits images
17	TSC_OutputEmissivityImagesSuffix	Si	Suffix for output emissivity images
18	TSC_OutputImagesSuffix	Si	Suffix for output corrected thermal images
19	TSC_OutputTemperatureEquation	Si	Equation for write output corrected values to 16 bits thermal images
20	TSC_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	Process only enabled arrays
21	TSC_ProcessOnlyEnabledImages	Si	Process only enabled images
22	TSC_ReflectedTemperature	Si	Reflected temperature (°C), for clear sky usually -50 to -60
23	TSC_TemperatureEquationEmissivityAngleOfView	Si	Equation for emissivity for angle of view

Figura 68. Parámetros del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

Se han contemplado varios métodos para el cálculo del valor representativo en un array de paneles y panel a partir de la muestra integrada por los valores de las temperaturas obtenidas de todos los píxeles de todas las imágenes que lo observan, tal y como ilustra la siguiente figura. El valor elegido en el ejemplo resuelto es la media del percentil en cada una de las imágenes que observan el array de paneles o el panel, con un valor del 75% del umbral establecido en otro parámetro.

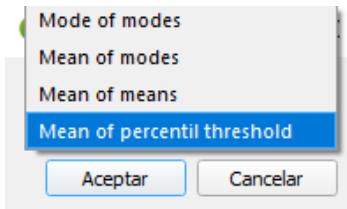


Figura 69. Métodos contemplados para estimación representativa de temperaturas

Para realizar la corrección atmosférica, conforme al modelo descrito en el anexo A.3, es necesario disponer de los valores de temperatura y humedad relativa. Se contemplan dos opciones: que sólo se disponga de una estimación de un valor medio y constante para todo el vuelo, o que se disponga de secuencia temporal de valores de medidas en estaciones meteorológicas ubicadas en las propias instalaciones del parque solar, opción ideal que se cumple para este ejemplo, siendo el formato contemplado para el fichero de datos un fichero CSV con valores de temperatura en grados centígrados y humedad relativa en tanto por ciento, por día y hora, sobre el que se interpola

linealmente para cada imagen en función de su instante de adquisición. En este ejemplo el fichero utilizado es:

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\SolarPark\data\TemperatureAndRelatieHumidity.csv

141	2019:05:15;11:11:32;12.4798;22.3
142	2019:05:15;11:16:19;12.576101;22.3
143	2019:05:15;11:21:07;12.903639;22.3
144	2019:05:15;11:25:55;12.744246;22.3
145	2019:05:15;11:30:43;12.950201;22.3
146	2019:05:15;11:35:31;12.992626;22.3
147	2019:05:15;11:40:18;12.978012;22.3
148	2019:05:15;11:45:06;13.480531;22.3
149	2019:05:15;11:49:54;13.596618;22.3
150	2019:05:15;11:54:42;13.714729;22.3
151	2019:05:15;11:59:30;14.142401;22.3
152	2019:05:15;12:04:17;13.828886;22.3
153	2019:05:15;12:09:05;13.59753;22.3
154	2019:05:15;12:13:53;13.884826;22.3
155	2019:05:15;12:18:41;13.971682;22.3
156	2019:05:15;12:23:29;13.952463;22.3
157	2019:05:15;12:28:16;14.157433;22.3
158	2019:05:15;12:33:04;14.386978;22.3

Figura 70. Fichero con información temporal de temperatura y humedad relativa

Para resolver la conversión a tiempo UTC del tiempo del fichero anterior se incluye un parámetro que permite definir un offset, en el que se debe sumar el valor correspondiente al huso horario y a la aplicación del *daylight saving time* (DST, https://es.wikipedia.org/wiki/Horario_de_verano), y dado que el reloj del sistema de registro de estos datos estaba en hora oficial el valor introducido es -2 horas, una porque el parque solar está en el huso 1 (España/Europa central) y otra porque en la fecha del vuelo, mayo, está activo el DST en España.

Si no se introduce el fichero de datos meteorológicos se utilizarían los parámetros donde figuran los valores medios de temperatura y humedad relativa.

Se debe indicar la operación a realizar para convertir a temperatura en grados centígrados los valores registrados en las imágenes, que en este caso es el empleado normalmente por las cámaras termográficas de FLIR: $ND \cdot 0.04 - 273.15$, donde ND es el nivel digital de cada píxel en el rango de 0 a 65535, correspondiente a la resolución radiométrica del sensor de 16 bits. Si se tratara de imágenes con un formato de dato que almacenara directamente la temperatura en grados centígrados, en formato entero o real, la expresión sería: $ND \cdot 1.0$

Para contemplar el caso de que se hubiera aplicado una calibración radiométrica a las imágenes, que no es el caso de este ejemplo, se incluye un parámetro donde se

podría indicar el sufijo de estas imágenes. En este caso el valor del parámetro de conversión debería ser adecuado, de forma que, sí, por ejemplo, los valores ya fueran temperaturas en grados centígrados con decimales, con un tipo de dato real (float32 o float64) en los ficheros, la ecuación de conversión debería ser $ND * 1.0$

Se deben indicar los ficheros de máscaras, distancias y ángulos de vista, elegidos para el paso anterior, introduciendo el sufijo de los ficheros elegidos en el parámetro correspondiente, que coincidirá con el empleado en el paso anterior del procesamiento.

En este proceso se va a generar para cada imagen y array de paneles un fichero de imagen con los valores de las emisividades en los píxeles observados, calculadas en función del ángulo de vista, siendo necesario para ello introducir valores para varios parámetros: la ecuación a aplicar, que se detalla en un apartado posterior, la operación a aplicar para almacenar en ficheros de tipo byte (8 bits, valores de 0 a 255), por lo que se ha elegido $100*x$ (con una precisión del 1%), y el sufijo para los ficheros generados.

Como resultado de este proceso, además del cálculo de estadísticas que se almacena en la base de datos, como se describe posteriormente, se crea para cada imagen y array de paneles observado un fichero de imagen con los valores de temperatura corregida en grados centígrados, siendo necesario definir dos parámetros: la operación a aplicar para almacenar en ficheros de tipo entero sin signo de 16 bits, uint16 (16 bits, valores de 0 a 65535), por lo que se ha elegido $100 \times x$ (con una precisión superior a 0.01 °C, mayor que la que es posible medir y corregir) y el sufijo para los ficheros generados.

Finalizado el proceso, que se extiende por una hora y dos minutos, con la opción de multiproceso, se habrán generado dos tipos de resultados: imágenes auxiliares para procesamientos posteriores y resultados estadísticos en la base de datos.

Figura 71. Actualización de la tabla de huellas de los arrays sobre las imágenes con estadísticas de temperatura

Tal y como ilustra la figura anterior, la tabla *images_fp* ha sido actualizada, creándose los campos necesarios para almacenar, para cada imagen y array de paneles: el número de píxeles, estadísticas de temperatura corregida (media, desviación típica, máximo y mínimo), la moda y el número de píxeles con ese valor, el percentil, así como el valor elegido como umbral para el percentil. Estas estadísticas son a nivel de la huella generada por cada array en cada imagen, pero es necesario contar con un valor estadístico único por array de paneles, representativo de todas las imágenes que lo observan. Esta información se almacena, con unos campos similares a los descritos para almacenar los valores por imagen y array de paneles, en una nueva tabla creada, *arrays_temperatures*, tal y como ilustra la siguiente figura.

1	1	1	48.6901	40.5	48.073	44.1653	0.3544	23.3	64.9	2918588	1465	75.0	45.6901
2	2	1	45.3773	40.7	44.078	40.6726	0.3375	20.0	61.6	3341096	1348	75.0	45.3773
3	3	1	45.763	37.6	45.0191	45.3599	0.3176	18.9	63.0	3987267	1291	75.0	45.763
4	4	1	50.2256	40.4	49.1576	46.1338	0.2669	22.3	72.5	4034267	1662	75.0	50.2256
5	5	1	47.8715	41.3	46.6612	45.2393	0.3314	19.7	69.4	495412	2990	75.0	47.8715
6	6	1	46.2733	46.8	45.3422	45.2153	0.3096	21.0	66.0	5466430	1311	75.0	45.2733
7	7	1	44.1321	37.6	43.1788	42.1932	0.319	14.0	62.8	3683149	1331	75.0	44.1321
8	8	1	45.5596	41.7	44.7665	42.949	0.2771	19.9	60.5	3595542	1605	75.0	45.5596
9	9	1	44.4613	41.0	43.0978	43.5397	0.2646	21.8	72.9	3134905	1656	75.0	44.4613
10	10	1	44.7614	43.4	44.1129	44.1724	0.2967	22.6	62.1	2743888	1316	75.0	44.7614
11	11	1	45.4096	38.9	44.6523	44.5582	0.2698	19.6	70.0	5464530	1587	75.0	45.4096
12	12	1	45.4526	45.8	45.6519	44.1	0.2396	22.5	61.3	4080500	1547	75.0	45.4526
13	13	1	45.4172	42.7	44.6387	43.641	0.1742	23.4	67.4	5084002	2862	75.0	45.4172
14	14	1	44.61	45.2	43.4594	44.5871	0.3227	15.5	64.4	5355019	1666	75.0	44.61
15	15	1	45.8792	42.3	42.8062	44.3916	0.2553	20.0	71.8	5282296	1508	75.0	45.8792

Figura 72. Tabla de estadísticas de temperatura por array de paneles

La siguiente figura muestra las imágenes auxiliares creadas.

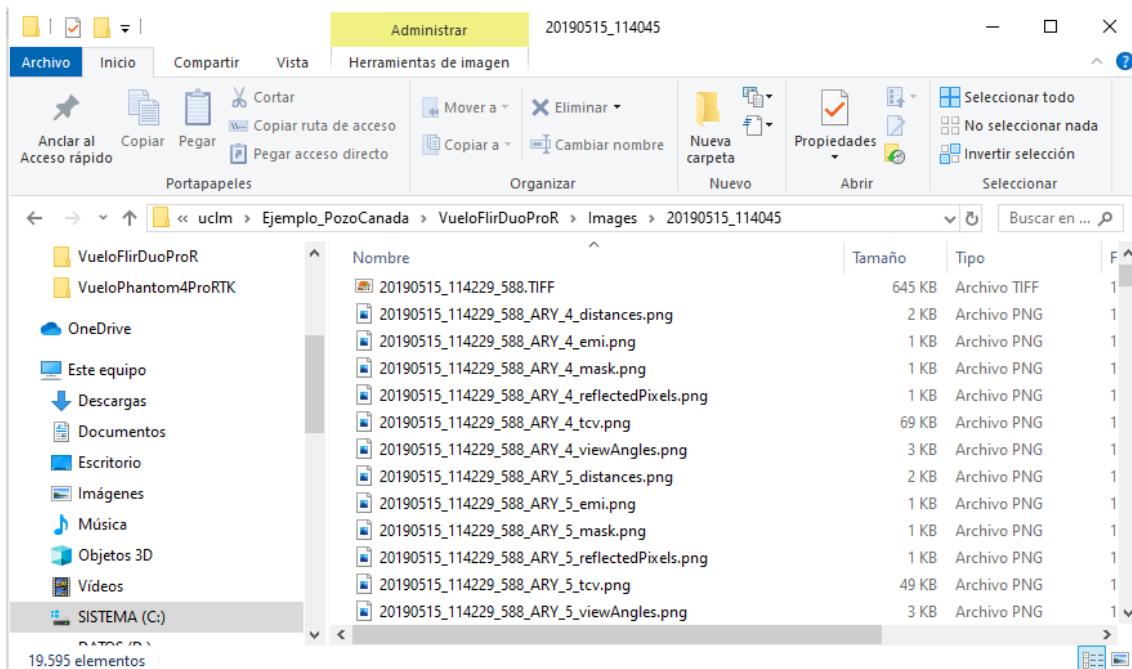


Figura 73. Imágenes resultado del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

Para cada imagen y array de paneles observado se generan dos ficheros adicionales a los creados en el paso anterior:

- _emi.- fichero donde se almacena la emisividad en cada píxel para el que hay dato de temperatura en ese array de paneles, como un porcentaje expresado en tanto por ciento, de manera que al ser un fichero de tipo byte se consigue una precisión del 1%, mejor que la precisión estimada por el modelo de corrección empleado en función del ángulo de observación. Los valores de emisividad cambian muy poco, y son normalmente algo superiores a 0.9.
- _tcv.- fichero donde se almacenan los valores corregidos de temperatura, con la operación indicada como parámetro, $100*x$ en este ejemplo, de manera que la temperatura corregida en cada píxel será el resultado de dividir por 100 el valor del nivel digital. A modo de ejemplo, en una captura posterior se muestran para un píxel los valores en la imagen corregida, 48.85°C , y en la imagen original, 7863, que se corresponde con 41.37°C ($7863*0.04-273.15$), lo que evidencia la importancia de las correcciones incluidas.

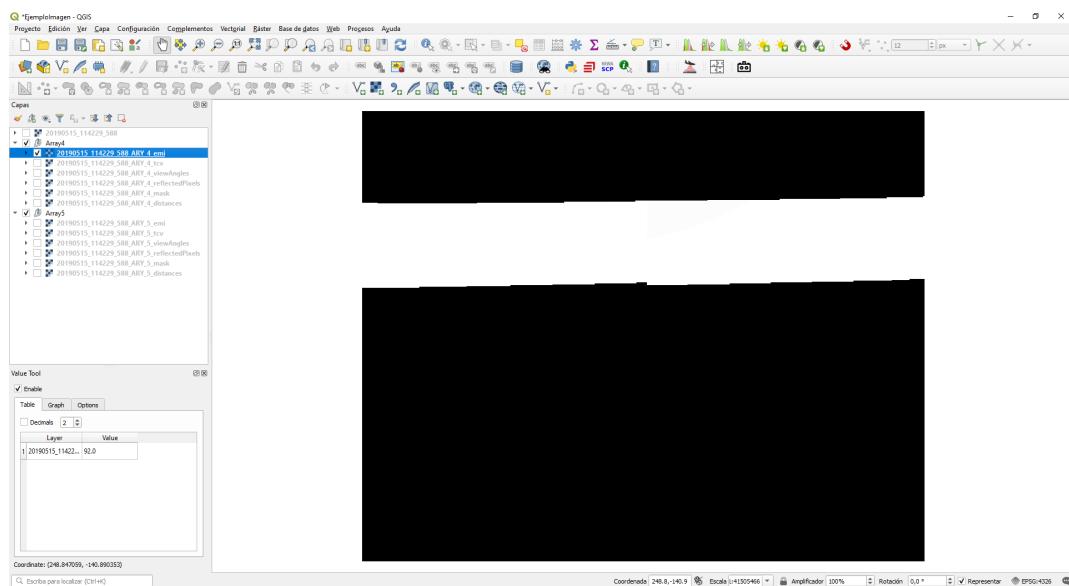


Figura 74. Ejemplo de imagen de emisividades

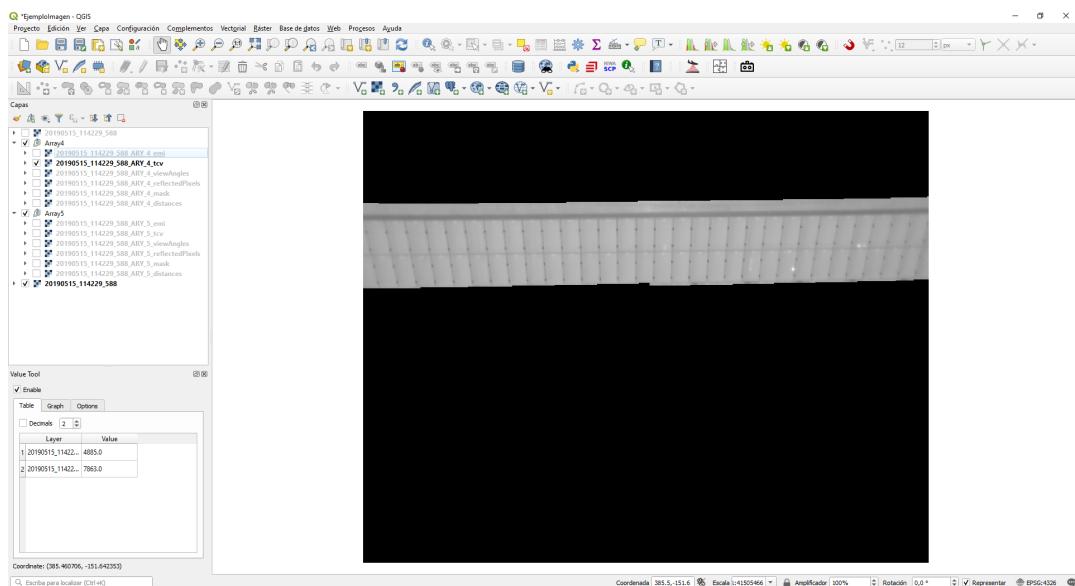


Figura 75. Ejemplo de imagen de temperaturas corregidas

8. Detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots

Este proceso se corresponde con el comando *Hot spots detection*. Los algoritmos empleados se recogen en el apartado 4.4 de este documento.

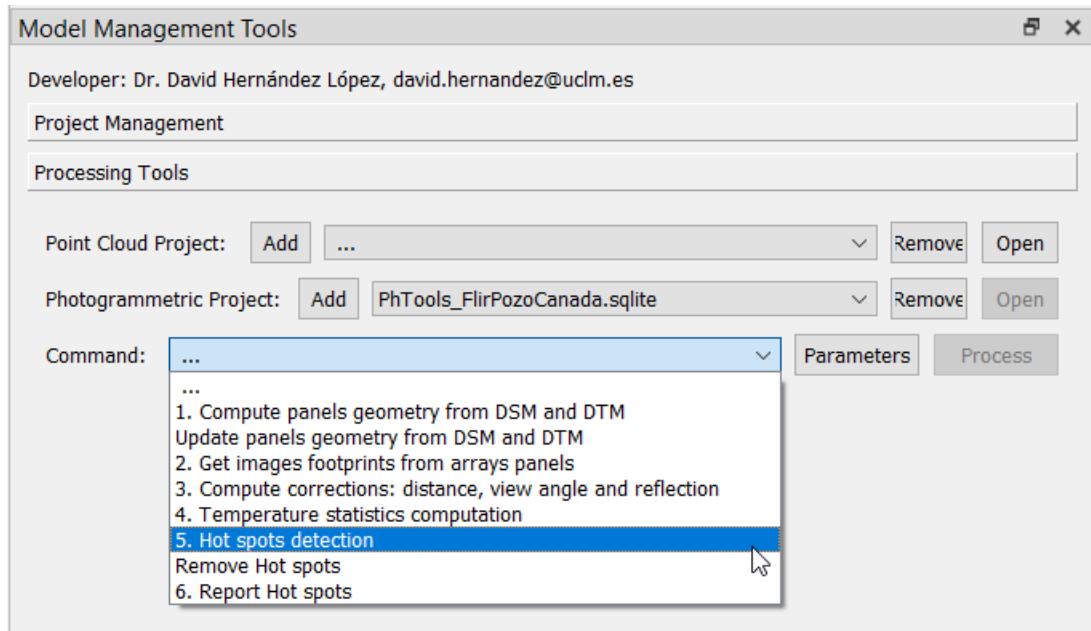


Figura 76. Proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear.

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura.

Descripción de la Solución

Parameters			
	Code	Enabled	Description
1	HSD_AlgorithmHotSpotsDetection	Si	Delta Algorithm for hot spots detection
2	HSD_AlgorithmHotSpotsDetection_DeltaValue	Si	10.00 Minimum value of delta temperature for hot spots detection. (10,20,30,100):(leve,moderada,grave,urgente)
3	HSD_ClusterDistance	Si	0.450 Maximum separation between hot spots to group them
4	HSD_ImageClusterDistance	Si	3 Maximum separation between hot spots pixels in image to group them
5	HSD_InputDistancesImagesSuffix	Si	_distances Suffix for image to read the distance to panel
6	HSD_InputEmissivityImagesSuffix	Si	_emi Suffix for image to read the distance to panel
7	HSD_InputImagesSuffix	Si	_tcv Suffix for input corrected thermal images
8	HSD_InputTemperatureEquation	Si	x/100.0 Equation for read input corrected values to 16 bits thermal images
9	HSD_InputViewAnglesImagesSuffix	Si	_viewAngles Suffix for image to read the view angle from normal to panel
10	HSD_MinimumDeltaInImageValue	Si	10.00 Minimum value of delta temperature in image for hot spots detection.
11	HSD_MinimumNumberOfImages	Si	2 Minimum number of images for hot spot
12	HSD_MultiProcess	Si	true Use multi process
13	HSD_OutputImagesSuffix	Si	_hsd Suffix for output images with detected hotspots
14	HSD_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true Process only enabled arrays
15	HSD_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true Process only enabled images
16	HSD_SunIrradianceDateFormat	Si	File Sun irradiance data format
17	HSD_SunIrradianceFile	Si	C:/ulcm/Ejemplo_PozoCanada/data/SunIrradiance.csv Sun irradiance CSV file: date(yyyy:MM:dd);time(hh:mm:ss);panel;value
18	HSD_SunIrradianceFileOffsetToUTC	Si	-02:00:00 Offset to UTC from time in file, example: -02:00:00 (hh:mm:ss)
19	HSD_SunIrradianceValue	Si	600.000000 Value of Sun irradiance, W/m2, for input data format value and default value. 0 for ignore normalization

Figura 77. Parámetros del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas

Algunos de los parámetros se explican por los procesos previos, debiendo introducir algunos nuevos relacionados con este proceso:

- Se debe indicar el valor de incremento de temperatura para que un píxel o región sea considerado hot spot, habiéndose elegido en este ejemplo, siguiendo las indicaciones de técnicos de Eiffage, el valor de 10 °C. También se puede elegir que en lugar de ser un incremento el método consista en superar un umbral absoluto de temperatura.

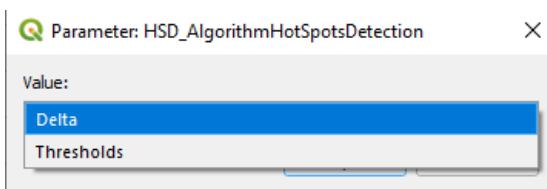


Figura 78. Elección del criterio de temperatura para detección de hot spot

También se puede indicar un umbral mínimo de incremento de temperatura con respecto a la media en la imagen para que se considere hot spot. Esto es importante cuando hay imágenes en que se ha producido un salto de temperatura, por el propio proceso de autocalibración de la cámara en la captura por el cambio de temperatura del sensor, y todos sus píxeles presentan valores altos, sirviendo este parámetro para evitar falsos positivos. Las cámaras térmicas basadas en micro bolómetro acumulan de forma gradual una lectura residual, lo que provoca que con el paso del tiempo cada píxel registre una lectura distinta de sus adyacentes (suponiendo una escena uniforme) resultando una imagen con efecto tipo ruido. Para solucionar este inconveniente, las cámaras incluyen un procedimiento de auto corrección, denominado *Flat Field Correction* (FFC), que se realiza de forma periódica y/o por delta de temperatura del sensor y del cuerpo de la cámara. Esta corrección se lleva a cabo mediante la presentación

de una cortinilla de temperatura homogénea y conocida delante del sensor para eliminar los errores acumulados desde la última corrección, dando lugar este proceso a la aparición de pequeños saltos de temperatura en el momento que se aplica. En algunas cámaras que no poseen esta cortinilla, se puede utilizar el procedimiento *Scene-Based Non-uniformity correction* (SBN), el cual utiliza datos estadísticos del movimiento de la escena entre fotogramas, para aplicar esta corrección de deriva de forma dinámica necesita que la escena sea cambiante en todo el sensor.

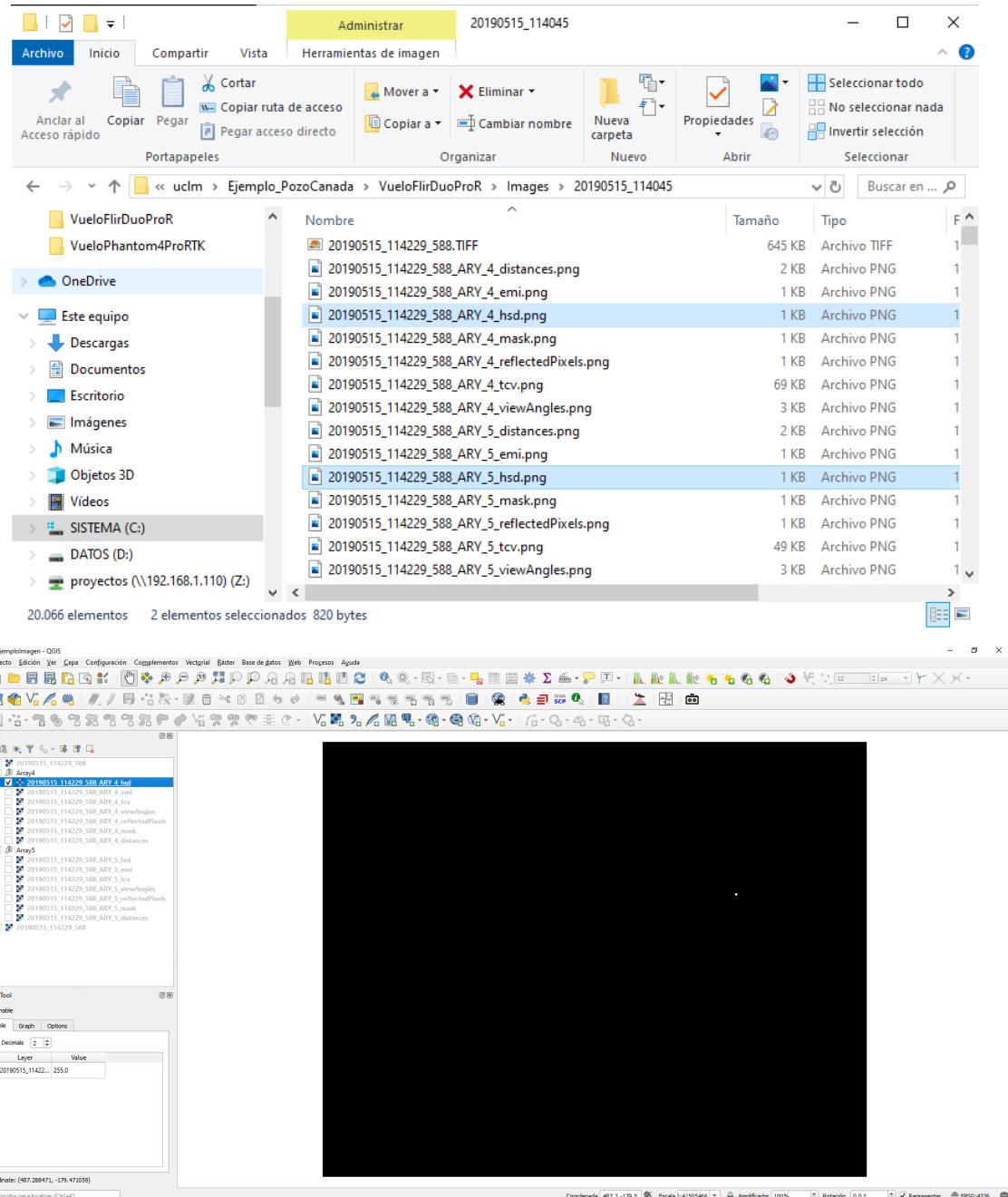
- Máxima separación en el sistema imagen existente entre píxeles para agruparlos como un mismo hot spot, habiéndose elegido un valor de 3, por el posible efecto de afección entre celdas contiguas, valor que en distancia dependería del GSD, que además varía.
- Máxima separación en el sistema objeto entre hot spots para agruparlos como una única entidad, con un valor de 45 cm, que vendría a corresponder a la dimensión de unas tres celdas fotovoltaicas, por un criterio similar al anterior parámetro.
- Mínimo número de imágenes en que se tiene que detectar el incremento de temperatura en el área de un píxel para que sea considerado realmente un hot spot, establecido en 2. El propósito es evitar falsos positivos que aparecen sólo en una imagen.
- Sufijo para las imágenes creadas con máscaras para los hot spots detectados, correspondientes a cada imagen y array, por su utilidad en procesos de depuración de errores.
- Información de la irradiancia solar, dato necesario para normalizar la temperatura a una irradiancia de referencia, según la norma. Esta información se puede introducir, de forma similar a los valores meteorológicos, bien a través de un fichero, lo ideal, o como valores constantes para todo el vuelo. En este ejemplo se utiliza un fichero de valores facilitado por la instalación del parque solar, donde figuran valores por tiempo, lo que obliga a definir un posible offset para convertir al tiempo común empleado en todo el proceso, tiempo UTC, offset que para este caso es de menos dos horas, debido a que el sistema de registro trabaja en tiempo oficial y el vuelo se realiza en mayo, de manera que se corrige una hora por huso horario y otra hora por DST.

La duración de este proceso para este ejemplo es de unos cincuenta minutos sin usar multiproceso, y de treinta y uno minutos con multiproceso.

Los resultados de este proceso son de dos tipos: imágenes de tipo máscara, por imagen y array de paneles observado, para registrar los píxeles donde se detecta hot spot, y actualizaciones en la base de datos.

Las siguientes figuras ilustran los dos ficheros de imagen máscara con los hot spots para el ejemplo de imagen y arrays que se viene mostrando en este manual.

Descripción de la Solución



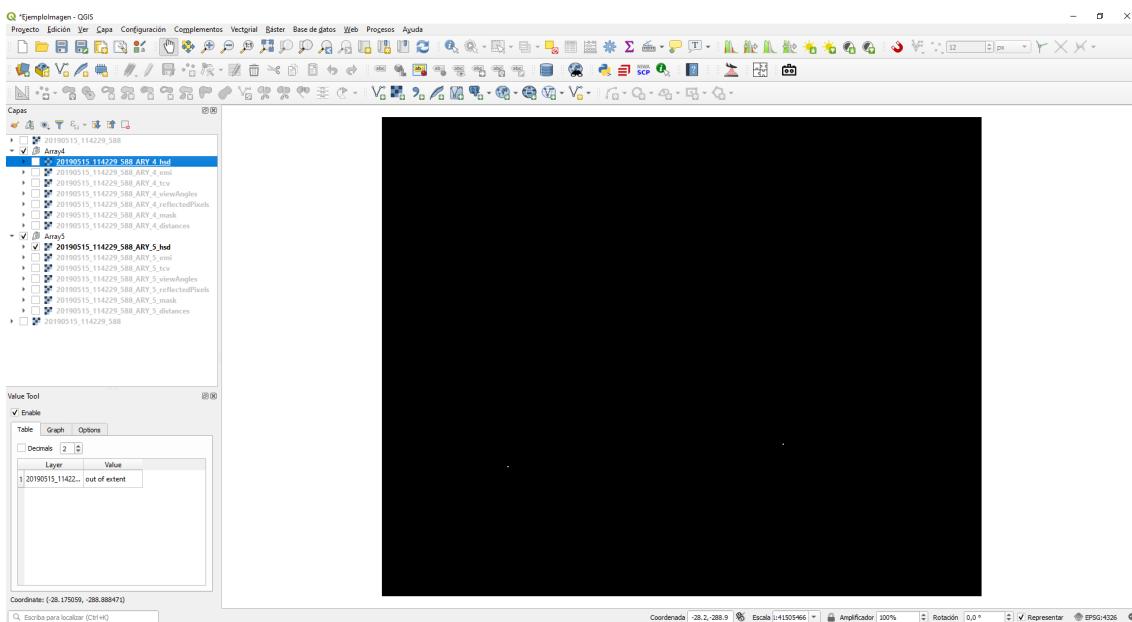


Figura 79. Imágenes resultado del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas

En lo que respecta a la actualización en la base de datos:

- Se han creado dos nuevos tipos de objeto, *pv_anomalies* y *pv_anomalies_panels*, recogido en la tabla *classes*.

Administrador de BBDD	
	Base de datos Tabla
<input type="button" value="Importar capa/archivo..."/>	<input type="button" value="Exportar a archivo..."/>
Proveedores	
MnTools_sp_pozocanada.sqlite	
arrays	
arrays_temperatures	
blocks	
classes	
images_fp_dbs	
images_panels_temperatures	
images_pv_anomalies	
images_pv_anomalies_panels	

	Info	Tabla	Vista preliminar
1	id	table_name	description name_prefix name_suffix me_first_numt ie_number_
1	1	arrays	Array of modules of cells ARRAY_
2	2	panels	Panel of cells PANEL_
3	3	pv_anomalies	Photovoltaic anomaly PVA_
4	4	pv_anomalies_panels	Photovoltaic anomaly panel PVAP_

Figura 80. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla *classes*

- Se ha creado una nueva tabla, *images_pv_anomalies*, con geometría de tipo polígono que expresa el recinto de los píxeles en el sistema de coordenadas imagen (fila y columna), que almacena la información estadística y la geometría del conjunto de píxeles conjuntos que corresponden a ese hot spot. Se almacenan, tal y como ilustra las siguientes figuras: estadísticas de incremento de temperatura (media, desviación típica, mínimo y máximo), área, distancia mínima y máxima, estadísticas de GSD (media y desviación típica), estadísticas del ángulo de observación respecto a la normal al panel (media y desviación típica), estadísticas de emisividad (media y desviación típica), y si está o no habilitado, para ser o no usado en procesos de borrado o de generación de informes.

Descripción de la Solución

The screenshot displays two windows of the 'Administrador de BBDD' (SQLite Database Manager) application. Both windows show the same table structure and data.

Table Structure:

	id	pht_id	image_id	anomaly_id	temp_gap_mean	temp_gap_std	temp_gap_min	temp_gap_max	area	distance_mn	distance_std	gsd_mn	gsd_std
1	1	3161	1	10.36	0.29	10.0	10.72	0.0381	63.0	0.0	0.0795276	1.52024e-17	
2	2	1	3162	1	10.6	0.51	10.03	11.48	0.0375	62.5	0.0	0.0788965	1.52024e-17
3	3	1	3163	1	10.57	0.33	10.22	10.99	0.0257	63.5	0.0	0.0801588	0.0
4	4	1	4007	1	10.49	0.34	10.01	11.33	0.3202	48.069	0.204206	0.0606795	0.000257778
5	5	1	4007	1	10.48	0.28	10.0	10.98	0.1742	48.75	0.252763	0.0615392	0.000319073
6	6	1	4008	1	11.63	0.8	10.0	13.72	0.9336	47.0075	0.379318	0.0593397	0.00047883
7	7	1	4009	1	11.67	0.83	10.01	13.82	0.952	46.7967	0.404239	0.0590735	0.000510402
8	8	1	4010	1	11.11	0.62	10.0	12.45	0.8234	47.8473	0.39712	0.0603998	0.000501301
9	9	1	4040	1	10.72	0.43	10.04	11.6	0.0869	47.625	0.221163	0.0601191	0.000279184
10	10	1	4040	1	10.8	0.48	10.01	12.0	0.4491	48.4792	0.100332	0.0611973	0.000126654

Table Data:

	mn	distance_std	gsd_mn	gsd_std	view_angle_mn	view_angle_std	emissivity_mn	emissivity_std	enabled	the_geom
1	0.0	0.0795276	1.52024e-17	20.0	0.0	0.91	0.0	1	MULTIPOLYGON	
2	0.0	0.0788965	1.52024e-17	18.9167	0.204124	0.91	0.0	1	MULTIPOLYGON	
3	0.0	0.0801588	0.0	21.0	0.0	0.91	0.0	1	MULTIPOLYGON	
4	0.204206	0.0606795	0.000257778	43.4138	0.2771	0.92	1.33999e-15	1	MULTIPOLYGON	
5	0.252763	0.0615392	0.000319073	44.3913	0.208514	0.92	1.01024e-15	1	MULTIPOLYGON	
6	0.379318	0.0593397	0.00047883	41.9981	0.597498	0.92	5.11669e-15	1	MULTIPOLYGON	
7	0.404239	0.0590735	0.000510402	41.6154	0.588228	0.92	5.33886e-15	1	MULTIPOLYGON	
8	0.39712	0.0603998	0.000501301	43.0885	0.536367	0.92	3.89441e-15	1	MULTIPOLYGON	
9	0.221163	0.0601191	0.000279184	28.7917	0.251805	0.92	4.53641e-16	1	MULTIPOLYGON	
10	0.100332	0.0611973	0.000126654	30.675	0.334626	0.92	1.44934e-15	1	MULTIPOLYGON	

Figura 81. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla images_pv_anomalies

- Se crea otra tabla similar para los paneles, *images_pv_anomalies_panels*
- En la tabla *objects* se genera una entrada para cada objeto del tipo hot spot, de arrays de paneles y de paneles.

The screenshot shows the 'Administrador de BBDD' interface with the 'objects' table selected. The table contains data for various objects, including arrays and panels.

Table Structure:

	id	class_id	object_id
76	76	1	76
77	77	1	77
78	78	2	1
79	79	2	2
80	80	2	3
81	81	2	4
82	82	2	5
83	83	2	6
84	84	2	7
85	85	2	8

Figura 82. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla objects

- Se ha creado la tabla *pv_anomalies*, con geometría georreferenciada de tipo punto en el sistema objeto, que resume la información de cada uno de los hot spots y que será empleada para dar posición a los hot spots y poder ser cargada en el MapCanvas de QGIS. Para los puntos calientes en paneles se crea una tabla similar, denominada *pv_anomalies_panels*.

			id	name	type	object_id	temp_gap_mean	temp_gap_std	temp_gap_min	temp_gap_max	area	enabled	the_geom
1	1		ARY_1_1		1	10.9	0.6	10.0	15.6	9.6018	1	POINT Z	
2	2		ARY_1_2		1	10.7	0.5	10.0	16.9	13.4814	1	POINT Z	
3	3		ARY_1_3		1	10.7	0.5	10.0	14.2	4.9705	1	POINT Z	
4	4		ARY_1_4		1	10.7	0.5	10.0	12.5	0.3423	1	POINT Z	
5	5		ARY_1_5		1	10.8	0.6	10.0	14.2	2.338	1	POINT Z	
6	6		ARY_1_6		1	10.8	0.5	10.0	15.4	5.6179	1	POINT Z	
7	7		ARY_1_7		1	10.5	0.1	10.0	11.4	0.0145	1	POINT Z	
8	8		ARY_1_8		1	11.1	0.6	10.0	13.8	0.2884	1	POINT Z	
9	9		ARY_1_9		1	10.6	0.4	10.0	13.2	5.2133	1	POINT Z	
10	10		ARY_1_10		1	10.7	0.5	10.0	14.1	8.902	1	POINT Z	

Figura 83. Almacenamiento de los resultados del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas en la base de datos: tabla *pv_anomalies*

			id	pht_id	object_id	temp	temp_mode	temp_mean_mo
1	1		1	758	54.6229	49.4	54.66	
2	2		1	759	52.5028	47.3	51.9722	
3	3		1	760	52.7143	47.2	52.3543	
4	4		1	761	51.9114	41.3	51.9286	
5	5		1	762	52.8676	46.3	52.75	
6	6		1	763	52.6114	43.9	52.5543	
7	7		1	764	52.0324	42.4	52.0118	
8	8		1	765	52.3861	43.8	52.25	
9	9		1	766	52.6861	41.6	52.7278	
10	10		1	767	51.9432	44.3	51.9595	
11	11		1	768	52.8083	45.8	52.7528	
12	12		1	769	52.0417	42.2	51.9333	
13	13		1	770	51.8743	42.2	51.4914	

Figura 84. Estructura final de la base de datos

Finalizado el proceso, o cuando se vuelve a abrir un proyecto en el que se completó este proceso, automáticamente se cargan las capas correspondientes a las anomalías en arrays de paneles, y en paneles, con escalas mínimas de visualización establecidas en 1:1000 y 1:200, respectivamente.

Descripción de la Solución

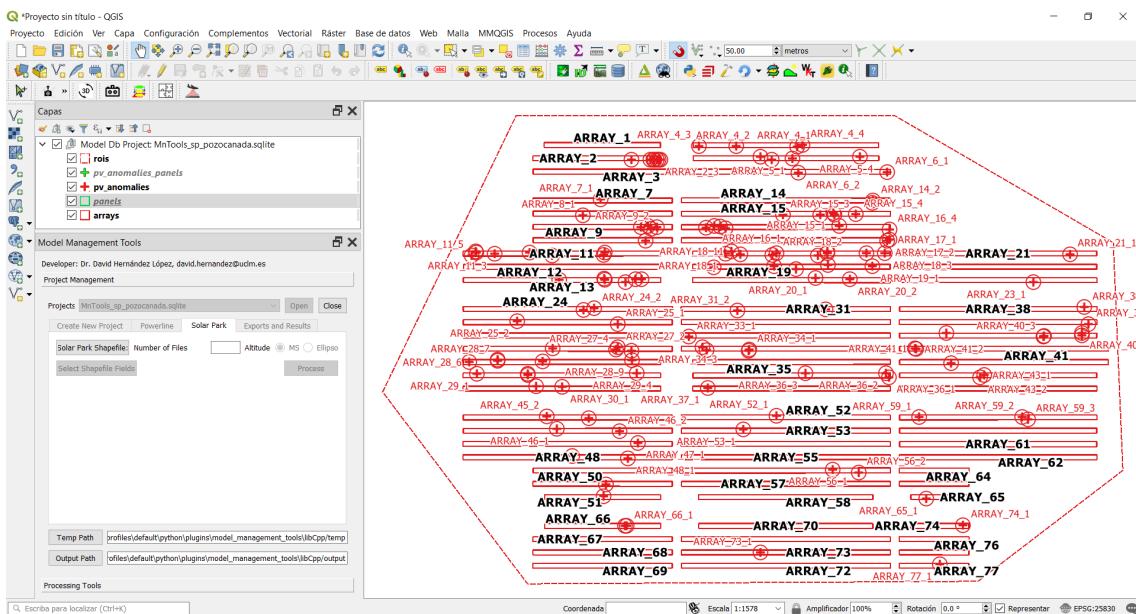


Figura 85. Carga automática en QGIS del proyecto tras el cálculo de los puntos calientes

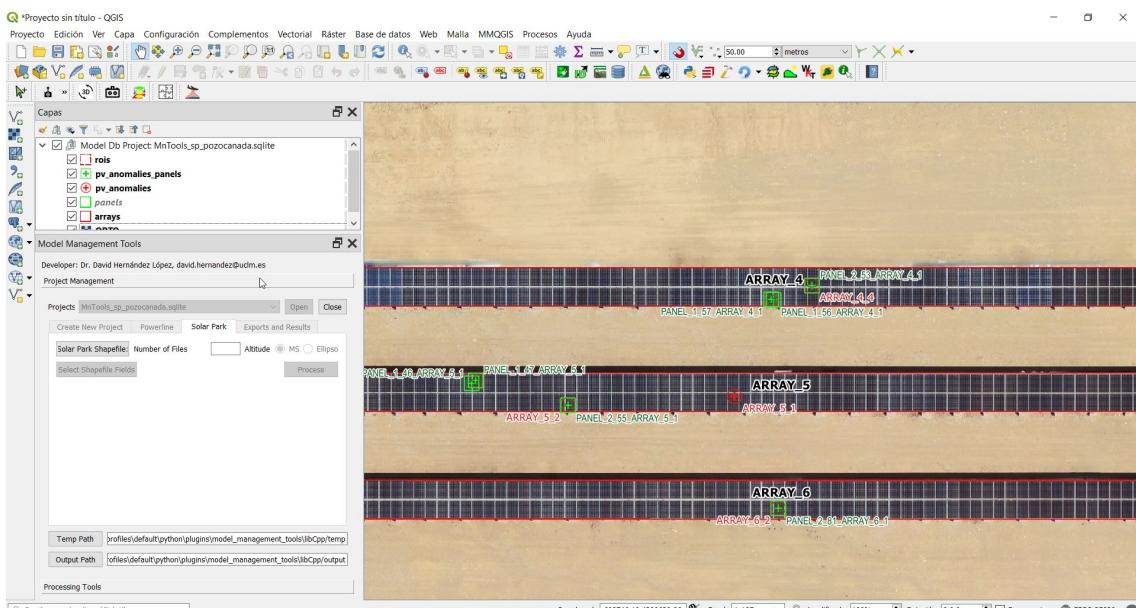


Figura 86. Visualización en QGIS de pv_anomalies

9. Generación automática de informes

Este proceso se corresponde con el comando *Report Hot spots*. Su utilidad es la generación automática de informes en formato PDF para hot spots en imágenes, para lo que se debe utilizar información de varias tablas y bases de datos, así como las propias imágenes adquiridas, tal y como indica la normativa.

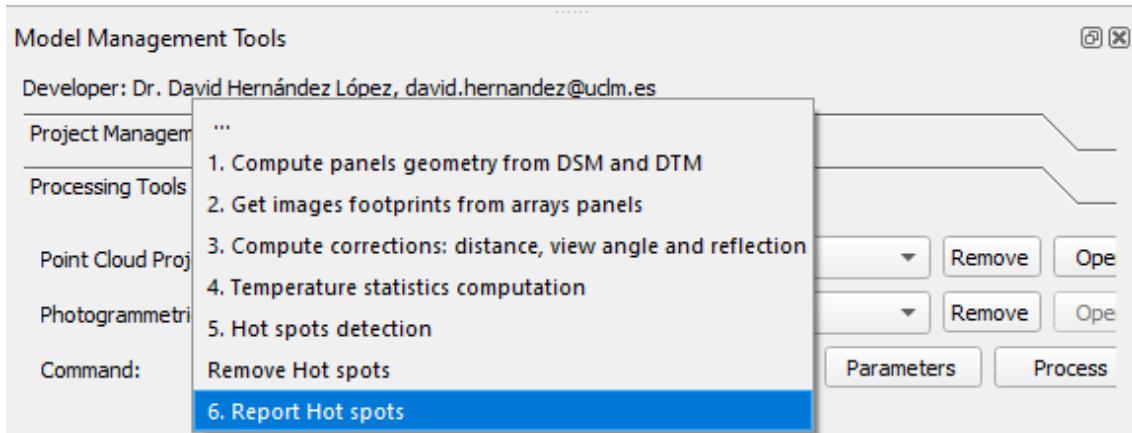


Figura 87. Proceso de generación automática de informes de hot spots

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear. Al seleccionarlo se añaden componentes gráficos en la parte inferior, tal y como ilustra la siguiente figura.

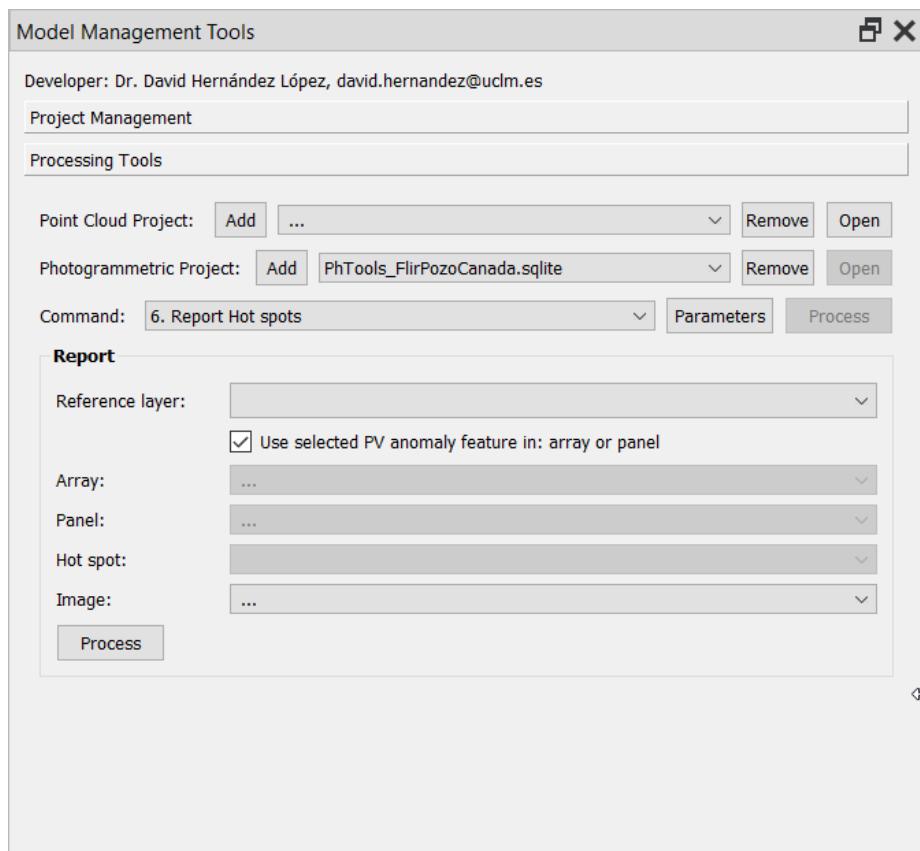


Figura 88. Selección de parámetros dinámicos para el proceso de generación automática de informes de hot spots

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura.

Parameters			
	Code	Enabled	Value
1	REHS_DN2TemperatureEquation	Si	0.04*x-273.15
2	REHS_OutputPath	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/Reports
3	REHS_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true
4	REHS_ProcessOnlyEnabledHotspots	Si	true
5	REHS_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true
6	REHS_SunIrradianceDataFormat	Si	File
7	REHS_SunIrradianceFile	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/SolarPark/data/SunIrradiance.csv
			Sun irradiance CSV file: date(yyyy;MM;dd);time(hh:mm:ss);panel;value
8	REHS_SunIrradianceFileOffsetToUTC	Si	-02:00:00
9	REHS_SunIrradianceValue	Si	600.000000
			Value of Sun irradiance, W/m ² , for input data format value and default value. 0 for ignore normalization.

Figura 89. Parámetros de configuración el proceso de generación automática de informes de hot spots

Como el extracto de la imagen térmica a mostrar, únicamente a efectos de visualización, se corresponde con la imagen adquirida, se debe indicar la expresión de conversión de niveles digitales a temperatura en °C. De nuevo hay que indicar la información para recuperar la irradiancia de cada imagen en función del tiempo. Los informes se generarán en la ruta elegida.

Antes de seleccionar los hot spots de los que se quiere obtener el informe, es necesario cargar en QGIS la ortoimagen que se desea usar como capa de referencia, correspondiendo en este ejemplo a la derivada del vuelo con cámara visible.

La interfaz permite elegir entre dos opciones: un método gráfico, consistente en elegir un único hot spot seleccionado en QGIS en la capa de arrays de paneles o en la capa de paneles, o un método de selección mediante listas, que permite generar informe de un único hot spots o de todos aquellos que se encuentran en uno o varios arrays de paneles o en uno o varios paneles.

En el caso de selección gráfica, se puede elegir entre imprimir un pdf para cada una de las imágenes en que aparece el hot spot, sólo la más próxima o sólo la más ortogonal, tal y como ilustra la siguiente figura. Si tras pulsar el botón *Process* no se tiene ningún hot spot seleccionado en alguna de las dos capas, array de paneles o paneles, o se tiene seleccionados varios, el programa advierte de ello para que el usuario lo corrija.

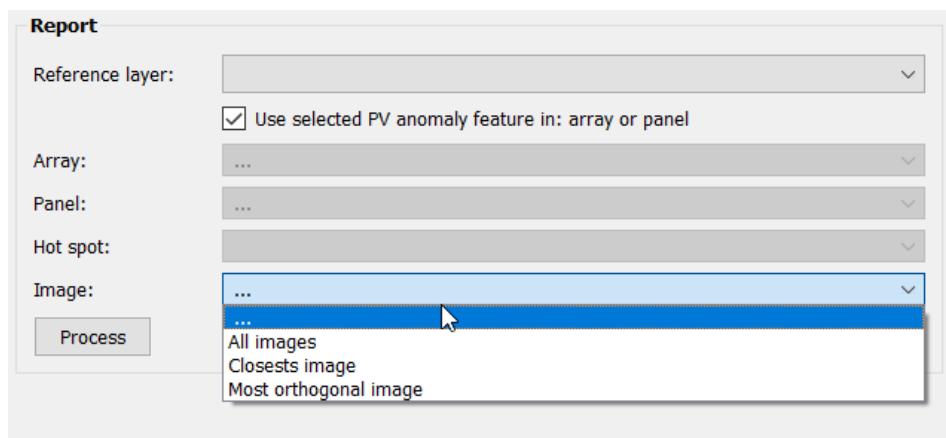


Figura 90. Opciones de generación de informes de hot spot

A modo de ejemplo, correspondiente al caso del método de selección mediante listas, tras cargar y seleccionar como capa de referencia la ortoimagen, cargar manualmente la capa *pv_anomalies*, elegir un estilo de visualización adecuado, se procede a centrar la vista en una zona de interés para identificar el array y hot spot del que se desea generar el informe. A continuación, se procede a elegir los valores en la interfaz, tal y como ilustra la siguiente figura, donde se ha optado por generar los informes para todas las imágenes en que aparece. Siguiendo con el mismo ejemplo, se ha elegido el primer hot spot del array 4, que ya se observaba en la parte inferior de la imagen 20190515_114229_588.TIFF.

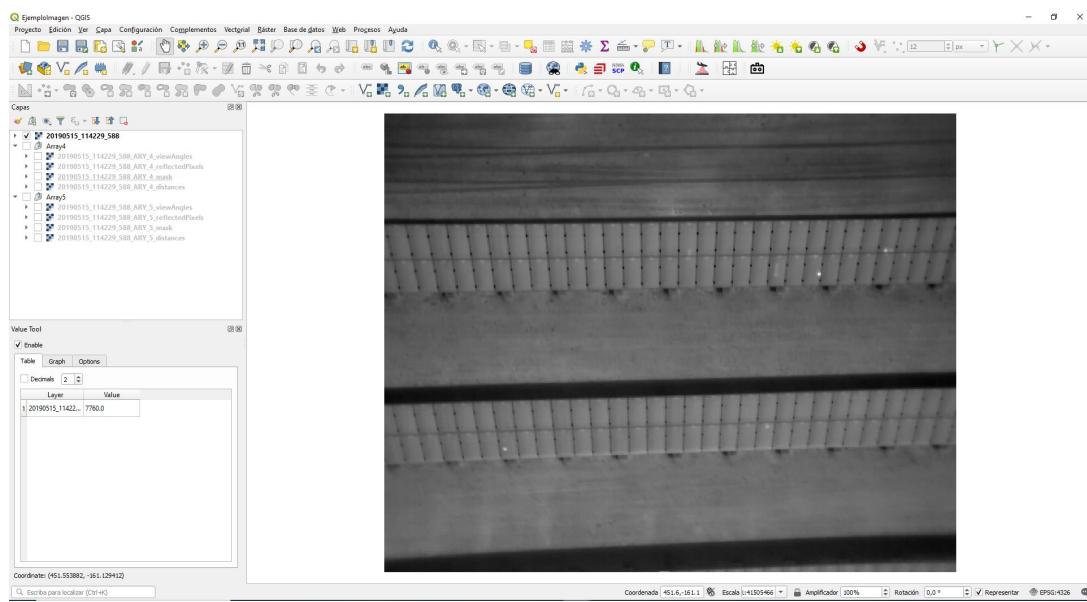
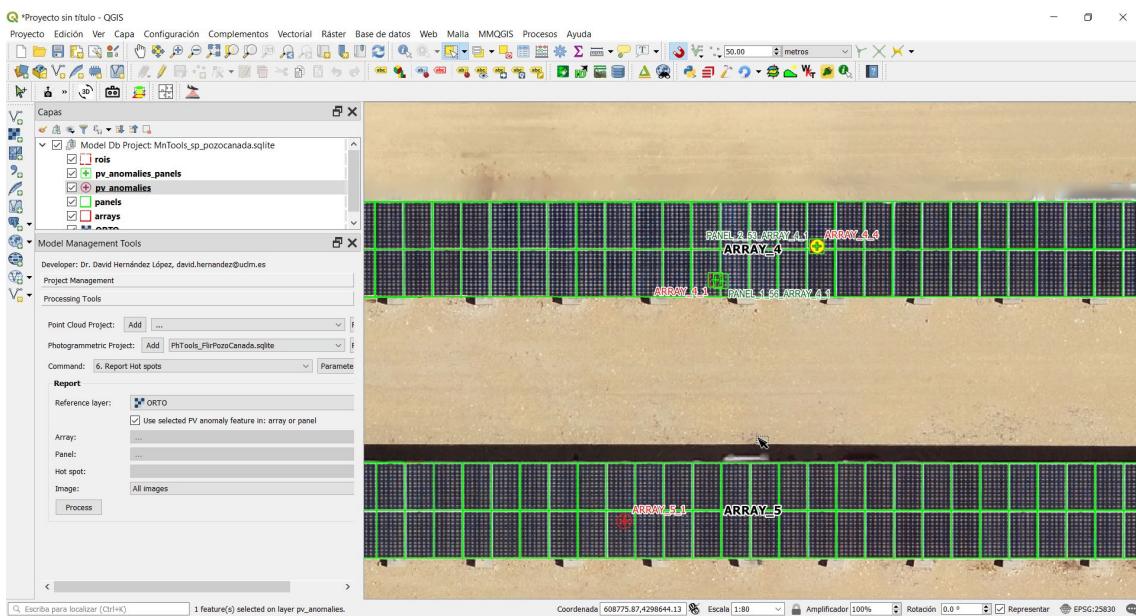


Figura 91. Visualización de hot spot en imagen térmica

Descripción de la Solución



Transcurridos unos segundos desde la pulsación en el botón *Process*, se despliega un diálogo y QGIS advierte de un error, que en realidad no tiene importancia y se debe a que en el proceso de creación de cada informe ha sido necesario cargar en memoria los ficheros de las imágenes térmicas y estas carecen de información relativa al CRS. Para este ejemplo el resultado es que se han generado un total de 6 documentos PDF, correspondiendo cada uno a cada una de las imágenes en que se observa el hot spot elegido.

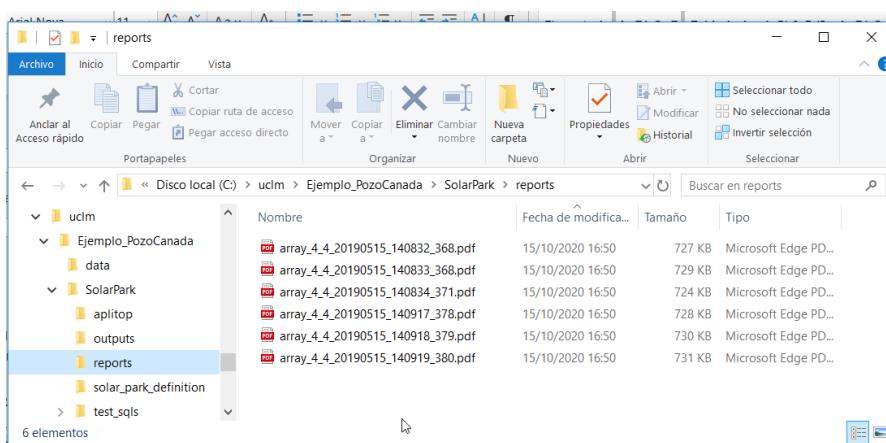


Figura 92. Informes resultado generados

La siguiente figura se corresponde con el resultado para la imagen de ejemplo, 20190515_140833_368.TIFF, donde se incluye toda la información solicitada por la norma.

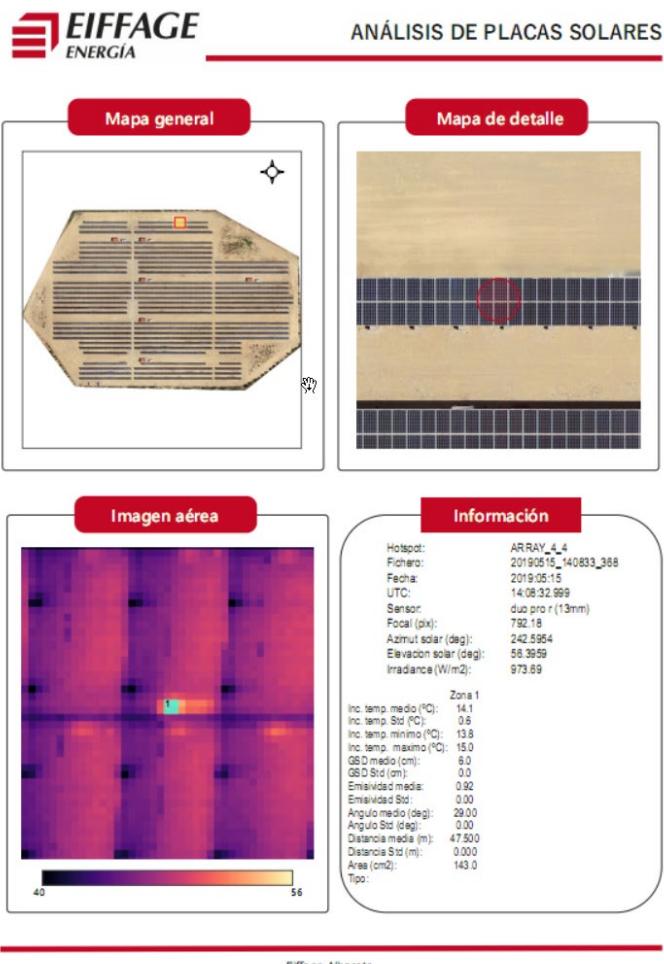


Figura 93. Ejemplo de informe resultado

4. AVANCES EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO Y EN LA MEJORA DE LOS RESULTADOS

En esta sección se incluye la descripción de los avances que justifican el carácter innovador realizado en este proyecto, especialmente en relación a la integración rigurosa del modelo fotogramétrico, a la aplicación de las correcciones a las imágenes térmicas y al avanzado procesamiento estadístico y geométrico para determinar los hot spots.

4.1. AVANCES EN LA DETERMINACIÓN PRECISA DE LA GEOMETRÍA TRIDIMENSIONAL DE LOS ARRAYS DE PANELES Y DE LOS PANELES

La geometría tridimensional de los arrays de paneles y de los paneles es imprescindible porque se utiliza en varios pasos de la metodología desarrollada:

- Para determinar las huellas de cada array de paneles en cada imagen térmica, necesarias para calcular estadísticas de temperatura por array de paneles y por panel.
- Para obtener en las imágenes térmicas zonas de la huella de un array de paneles que no se pueden utilizar porque están afectadas de la temperatura reflejada procedente de la emisión de otro panel.
- Para obtener la proyección sobre el espacio objeto de los hot spots detectados en las imágenes térmicas y así obtener su posición en el espacio y la vinculación entre el mismo hot spot en diferentes imágenes, permitiendo el agrupamiento de hot spots muy próximos que permita mejorar su gestión.

La geometría en planta de un array de paneles se obtendrá como un rectángulo. En el caso de que existiera un array de paneles con una geometría en planta diferente a un rectángulo, la solución sería tan sencilla como dividirlo en las partes necesarias para que cada una de ellas pudiera adoptar en planta la forma de rectángulo. Dentro de cada array de paneles se determinará la geometría en planta de los paneles como un mosaico de filas y columnas de paneles también con forma rectangular. La determinación de la geometría 3D se obtendrá a partir del DSM empleado en el proyecto, de manera que la precisión de la solución queda supeditada a la precisión del propio DSM. Si el DSM arrojara errores en algún array de paneles, se ha

incorporado una variante de actualización que permite al usuario definir manualmente la geometría en planta, aportando el algoritmo únicamente la altimetría.

Para el caso de paneles de tipo seguidor, dotados de movimiento de orientación para mejorar la ortogonalidad en la recepción de la radiación solar, la geometría de los arrays de paneles y de los paneles cambia en el tiempo y es necesario que los datos de partida que se usan para determinarla, el DSM, se haya obtenido para la posición que ocupaban los arrays de paneles en el momento de realizar el vuelo térmico, lo que es posible porque los parques están preparados para situar todos los arrays de paneles horizontales para labores de mantenimiento u otras operaciones. Mejorar la herramienta para incorporar la variación de la posición en función del tiempo sería objeto de trabajos futuros.

La precisión en la determinación de la geometría influirá en la calidad de los resultados derivados de la misma. Si bien la geometría en planta de un array de paneles será un rectángulo, en 3D puede no corresponder a un plano, debido a que se construye a partir de la unión secuencial de varias estructuras que se fijan al terreno, que puede no ser plano, tal y como ilustra la siguiente figura.



Figura 94. Array de paneles montados adaptándose a la orografía del terreno

A continuación, se describen los algoritmos desarrollados para encontrar el equilibrio entre la necesidad del automatismo y la precisión en los resultados.

A partir un vuelo fotogramétrico con cámara visible se puede obtener una nube de puntos densa de la que se pueden derivar modelos digitales del terreno (DTM) y de superficie (DSM) de gran detalle y precisión, tales que permitirán modelizar con precisión la geometría tridimensional de los paneles.



Figura 95. Nube fotogramétrica densa

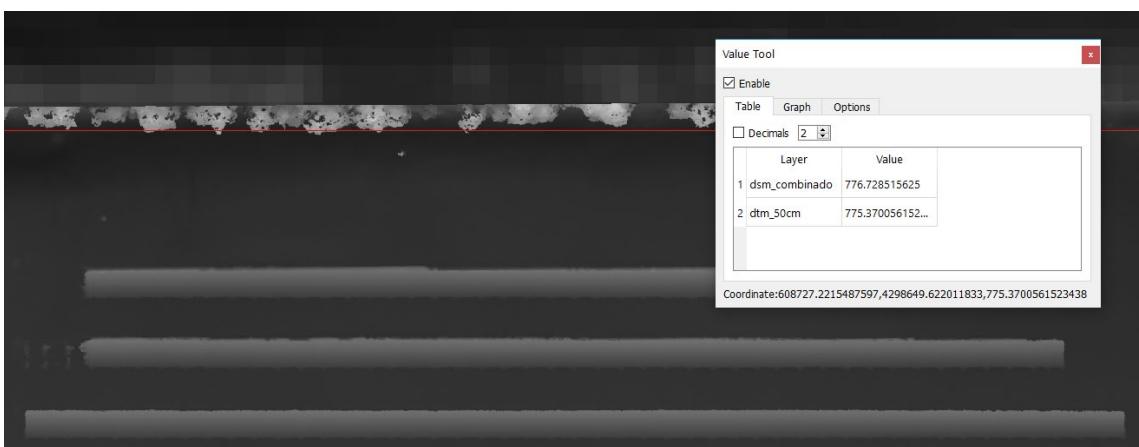


Figura 96. Altimetría procedente de DSM y DTM

En este caso de uso se está empleando un vuelo fotogramétrico realizado con un DJI Phantom 4 RTK que ha permitido obtener los modelos digitales del terreno y de superficie, DTM y DSM, a partir de los resultados de su procesamiento con Agisoft Metashape y con herramientas desarrolladas apoyadas en LASTools. Las resoluciones del DTM y del DSM son de 0.5 m y 0.035 m, respectivamente, con una precisión estimada del orden de 0.03 m. Sin embargo, se puede observar en los límites de los paneles, tal y como ilustra la siguiente figura, aparecen imperfecciones en la nube de puntos como consecuencia de la precisión de todos los datos y de los procesos que intervienen en el flujo fotogramétrico, siendo necesario tenerlos en cuenta en el desarrollo de los algoritmos para minimizar su efecto. Si estos problemas dieran lugar a errores se podrían resolver empleando el componente *point_cloud_tools* para editar y mejorar la nube de puntos antes de proceder a generar los modelos a partir de ella, DTM y DSM. En caso de no poder resolver estos

problemas se podría utilizar una variante de actualización de geometría descrita posteriormente.



Figura 97. Imperfecciones en la nube de puntos en zonas de borde

En la definición de un parque fotovoltaico se utiliza un shapefile que puede tener geometría de tipo punto o de tipo polígono, de forma que para cada array de paneles se cuenta con un punto interior, en el primer caso, o con una geometría poligonal que define el borde, tal vez aproximadamente, en el segundo. A continuación, se describe en primer lugar el algoritmo para el caso de contar con un punto interior, seguido del caso de contar con un polígono, que no es sino una variante del anterior, dado que se evitan algunos pasos iniciales del primer algoritmo. Finalmente, se describe un tercer algoritmo que permite la actualización de la geometría para el caso de que se haya realizado una modificación manual que mejore la geometría calculada de forma automática por cualquiera de los dos primeros algoritmos.

Algoritmo 1. CÁLCULO AUTOMÁTICO A PARTIR DE UN PUNTO INTERIOR, DEL DTM Y DEL DSM

Para determinar la geometría de cada array de paneles, en este algoritmo es suficiente con partir de la posición planimétrica de un punto en el interior del panel, información disponible a partir de la definición de los arrays de paneles incluida en el fichero shapefile con geometría de tipo punto empleado en la creación del proyecto de parque fotovoltaico.

Para lanzar este proceso se debe seleccionar el comando *1. Compute panels geometry from DSM and DTM*, elegir los parámetros adecuados, pulsando en el botón *Parameters* y eligiéndolos en el diálogo que se despliega, y finalmente, pulsar en el botón *Process*.

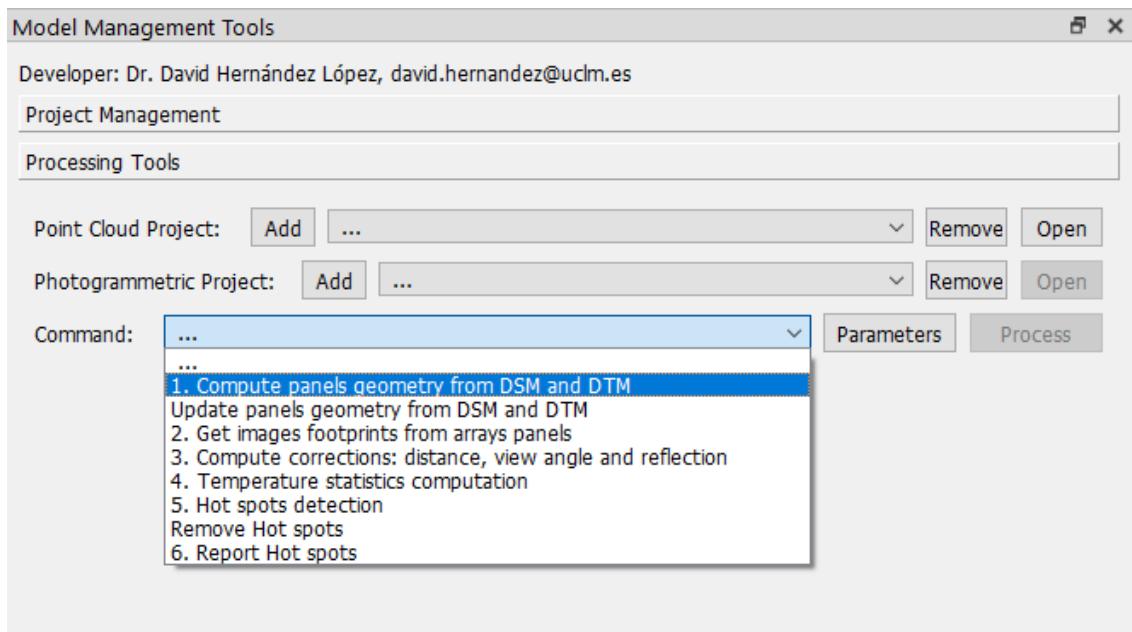


Figura 98. Proceso de cálculo de la geometría 3D a partir de modelos digitales

Este algoritmo solicita al usuario el valor de un conjunto de parámetros que se corresponden con la siguiente figura, y cuya justificación y uso se detallará en la descripción del flujo del algoritmo.

Parameters manager for command: 1. Compute panels geometry from DSM and DTM				
	Code	Enabled	Value	Description
1	CPGDSMDTM_CheckPanelsRowsColumnsSize	Si	false	Check the number of rows and columns of panels compared to size
2	CPGDSMDTM_MeanAltitudeTolerance	Si	0.20	Mean altitude tolerance for arrays parts
3	CPGDSMDTM_MeanSlopeTolerance	Si	5.00	Mean slope tolerance for arrays parts
4	CPGDSMDTM_MinimumSizeArrayPanels	Si	2.00	Minimum size of array panels
5	CPGDSMDTM_MultiProcess	Si	true	Use multi process
6	CPGDSMDTM_OutputPath	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/outputs_pf	Output path for report files
7	CPGDSMDTM_PanelFrameWidth	Si	0.035	Panel frame width
8	CPGDSMDTM_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
9	CPGDSMDTM_dsm_raster_file	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/VueloPhantom4ProRTK/dsm.tif	DSM raster file, same CRS as project.
10	CPGDSMDTM_dtm_raster_file	Si	C:/uclm/ejemplo_coreses_REDEN/VueloPhantom4ProRTK/dtm.tif	DTM raster file, same CRS as project.

Figura 99. Parámetros del proceso de cálculo de la geometría 3D a partir de modelos digitales

El parámetro `CPGDSMDTM_ProcessOnlyEnabledArrays` está definido para permitir que únicamente se procesen los paneles habilitados, que se corresponden con aquellos que tienen un valor 1 en un atributo de su tabla, denominado *enabled*, evitando realizar el proceso en aquellos paneles deshabilitados, con un valor 0 en este atributo, bien porque hayan sido procesados correctamente anteriormente, o bien porque no se deseé utilizarlos por cualquier motivo. Este parámetro se utiliza en la mayoría de los algoritmos desarrollados. Para modificar el estado, habilitado o deshabilitado, basta con usar las herramientas de QGIS para introducir el valor

correcto en el campo antes de lanzar este algoritmo. Este parámetro sólo puede adoptar dos valores, *true* o *false*.

El parámetro *CPGDSMDTM_OutputPath* es la ruta de salida para algunos informes que se crean en el proceso.

Para cada uno de los arrays de paneles habilitados se siguen los siguientes pasos:

1. **Obtención del punto origen del array**, tanto su posición 2D, como sus altitudes interpoladas sobre el DTM y DSM, comprobando que su altura, diferencia entre DSM y DTM, está en el rango de alturas válida para el array de paneles, altura mínima y máxima sobre el terreno, definidas a partir del valor de un atributo del shapefile de definición empleado en la creación del proyecto, o el valor por defecto en caso de no figurar esta información en el shapefile. En este ejemplo el valor de la altura mínima es 0.3 m y el valor de altura máxima es 3.0 m.
2. **Determinación del polígono 2D límite**, o borde, del panel, obtenido como la unión de un conjunto puntos determinados a partir del punto origen con un algoritmo que busca un punto borde en cada dirección, de 0 a 360 DEG de azimut cartográfico, con un paso angular adaptativo, tal y como se describe en el propio algoritmo, que consta de los siguientes pasos:
 - a. Para cada dirección se realiza un algoritmo que representa una recta desde el punto origen con el azimut de la dirección en la que se busca el punto borde, y que, mediante un proceso iterativo, determina un punto 2D en la dirección considerada con una distancia que se va incrementando en cada paso en un valor igual a la resolución espacial del DSM, hasta que se alcanza el borde.
 - b. Para cada punto se calcula su altura sobre el terreno como la diferencia entre las altitudes interpoladas en el DSM y DTM.
 - c. Hay dos criterios para determinar que se ha alcanzado el borde:
 - i. Cuando en el punto se obtiene una altura sobre el terreno por debajo del valor mínimo de altura del array de paneles, caso que se produce cuando se alcanza el borde exterior del array de paneles, cuando prácticamente coinciden el DSM y el DTM.
 - ii. Cuando en el punto se obtiene una altura sobre el terreno superior al valor máximo de altura del array, caso de puntos de estructuras

muy próximas al array de paneles en las que el DSM fotogramétrico es continuo para su GSD.

- d. El punto se añade al polígono borde y se calcula el ángulo que hay que incrementar la última dirección para pasar a la siguiente, obtenido como la relación entre la resolución del DSM y la distancia del punto borde obtenido al origen del array.

Esta geometría no es sino una primera aproximación, debido a los errores en el DSM, que debe ser mejorada en los siguientes pasos.

3. **Determinación de las cuatro líneas envolventes del polígono borde**, siendo ortogonales dos a dos y estando separadas por encima de una distancia mínima. A partir de todos los puntos del perímetro del paso anterior, se inicia un proceso iterativo que se detiene cuando se han alcanzado las cuatro líneas buscadas, con una tolerancia angular de falta de paralelismo/ortogonalidad inferior a 10 DEG y una tolerancia en separación lineal mínima entre líneas, elegido en el parámetro *CPGDSMDTM_MinimumSizeArrayPanels*, establecido en este ejemplo a 2 m. El motivo para elegir 2 m es la propia anchura de un array de paneles, lo que se cumplirá si el array de paneles tiene al menos dos filas de paneles.

- a. En cada paso se parte de todos los puntos del polígono borde que no han sido asignados previamente a ninguna línea, de manera que en el primer paso se usarán todos, y se busca la mejor línea a partir de ellos con un algoritmo RANSAC, con un umbral para la detección de errores groseros establecido en 5 veces la resolución espacial del DSM, resultando para este caso 17.5 cm. El valor de 5 se corresponde con una estimación de error medio cuadrático en la altitud del DSM del orden de 1.5 veces su resolución espacial y su multiplicación por 3 para convertirlo en error máximo.
- b. A la línea encontrada se le asignan todos los puntos que se ajustan a la misma, permaneciendo los restantes para la búsqueda de la siguiente línea.
- c. Para cada línea se calculan los puntos extremos, más alejados del baricentro, y se obtiene su azimut.
- d. Si tras obtener la nueva línea ya se cuenta con cuatro o más, incluida la recién obtenida, se calcula si existen dos líneas paralelas y dos

ortogonales, con diferencias frente a paralelismo y ortogonalidad inferior a 10 DEG, y tales que la separación mínima entre las dos paralelas y las dos ortogonales es superior al umbral de 2 m, para cuyo cálculo se utilizan todos los puntos asignados a las líneas. Si se alcanzan las dos condiciones se detiene el algoritmo.

- Nota.- Se ha optado por no considerar parámetros a introducir por el usuario los umbrales para la falta de paralelismo/ortogonalidad debido a que los valores elegidos se ha demostrado por las pruebas que son válidos para esta aplicación por la geometría rectangular de los arrays individuales.
4. **Determinación de las primitivas 2D básicas del array de paneles:** rectángulo 2D, eje 2D, azimut, longitud en el eje y longitud ortogonal al eje. A partir de los puntos asignados a las cuatro líneas resultantes del paso anterior, se obtiene el rectángulo 2D girado de área mínima que los encierra, así como el eje 2D definido por los puntos medios de los lados más cortos del rectángulo, que además permiten calcular el azimut y la longitud del eje. La longitud ortogonal al eje se calcula como la del lado más corto del rectángulo girado de área mínima.
 5. **Determinación de la geometría 3D de cada una de las partes del array de paneles.**
 - a. Se divide el eje 2D del array de paneles resultante del paso anterior en el número de partes para el array de paneles, valor definido a partir de un atributo del shapefile de definición empleado en la creación del proyecto.
 - b. Para cada parte se determina la altitud media del array de paneles en el eje y la pendiente media, así como las correspondientes desviaciones típicas. Para ello se obtienen en primer lugar unas muestras de valores para altitud media y para pendiente media, siguiendo el siguiente algoritmo.
 - i. Se va recorriendo el eje en la parte, desde el punto inicial al final, con una separación entre puntos en el eje igual a la resolución espacial del DSM.
 - ii. Para cada punto en el eje se obtiene la altitud del punto en el DSM y DTM, y si la altura, diferencia entre ellas, supera el umbral de mínima altura, lo que quiere decir que no hay un hueco en el modelo fotogramétrico, se añade la altitud, valor del DSM, en la muestra de altitudes de la parte.

- iii. Para cada punto en el eje se obtiene un punto 2D a izquierda y derecha del eje, con un azimut girado en 90 y -90 DEG respecto al azimut del eje, y con una distancia igual a 0.25 veces la longitud ortogonal del array de paneles, de manera que los puntos estarán separados la mitad de dicha longitud. Para evitar usar puntos en un hueco del modelo fotogramétrico, a continuación, se obtiene la altura en dichos puntos como la diferencia entre su altitud interpolada en el DSM y DTM. Si la altura de los dos puntos supera el umbral de altura mínima del panel se calcula la pendiente, como la diferencia entre las alturas de los dos puntos, dividida por la distancia entre los dos puntos, y se añade a la muestra de pendientes de la parte. La pendiente puede ser positiva o negativa, debido a que se calcula de la mitad de la derecha hacia la mitad de la izquierda, estando derecha e izquierda referidas al eje del array de paneles con el sentido del primer al segundo punto, de manera que para un array de paneles con un azimut tipo 90 DEG la pendiente será positiva, al ser el primer punto del eje el más al oeste, resultando negativa si el resultado del algoritmo hubiera elegido como primer punto del eje el más al este. Esto no es un problema ya que se usará correctamente en cada caso
- iv. Se calcula la altitud media en el eje del array de paneles de la parte empleando el método RANSAC sobre la muestra obtenida en el paso anterior, con un umbral de detección de errores groseros elegido por el usuario en el parámetro *CPGDSMDTM_MeanAltitudeTolerance*, con un valor de 0.2 m en este ejemplo. Este parámetro puede variar en función de las características del vuelo y de los DSM y DTM. Además de calcular el valor medio de altitud se obtiene su desviación típica empleando sólo los valores que no han sido evaluados como errores groseros.
- v. Se calcula la pendiente media de la parte del array de paneles empleando RANSAC sobre la muestra obtenida en el paso anterior, con un umbral de detección de errores groseros elegido en el parámetro *CPGDSMDTM_MeanSlopeTolerance*, con un valor de 0.5 DEG en este ejemplo. Este parámetro puede variar en

función de las características del vuelo y de los DSM y DTM.

Además de calcular el valor medio de la pendiente se obtiene su desviación típica empleando sólo los valores que no han sido evaluados como errores groseros.

- c. Para cada parte del array de paneles se determina su geometría como un polígono 3D integrado por cuatro vértices, calculado según el siguiente procedimiento. A partir de cada punto extremo del eje se calcula en la ortogonal dos puntos, con azimut girado en 90 DEG y -90 DEG, con distancia igual a la mitad de la longitud ortogonal del panel y su altitud se obtiene a partir de los valores medios para la altitud media del eje y su pendiente.
6. Determinación de la geometría del array de paneles como un polígono 3D resultado de la combinación, topológicamente correcta, de los polígonos 3D de sus partes.
7. Determinación de la geometría 3D de cada uno de los paneles que componen el array de paneles. Para esto es necesario conocer o estimar el número de filas y columnas de paneles. En este proceso se utilizan atributos importados desde el shapefile de partida: module_columns, module_rows, cell_size, cells_columns, cells_rows y el parámetro UPGDSMDTM_PanelFrameWidth. El programa calcula un valor del número de filas y columnas de paneles a partir de la estimación de la medida de cada panel, en sus dos dimensiones, como resultado del producto del número de celdas en la dirección correspondiente y la dimensión de la celda, sumando la dimensión del marco de cada panel introducida en el parámetro correspondiente. Dividiendo la dimensión del array de paneles entre la dimensión del panel, en la dirección correspondiente, se obtiene el número de filas y columnas, redondeado a entero. A continuación, si un valor del atributo de número de filas o columnas de paneles es cero, se usará el calculado, empleándose el valor del atributo si es diferente de cero, haciendo una comprobación para detectar un posible error en el valor introducido en el atributo, consistente en contrastar, para longitud y anchura, si la diferencia entre el valor derivado del introducido en el atributo y el estimado en la geometría 3D del array de paneles supera en 0.5 veces la medida correspondiente de un panel, en cuyo caso se lanza un error y se detiene el proceso. El control anterior se ignora si el parámetro CPGDSMDTM_CheckPanelsRowsColumnsSize está a falso. Este

planteamiento del algoritmo permite resolver el error en el caso en el que el cálculo automático falla por redondeo en una fila o columna.

Una vez obtenido el número de filas y columnas de paneles en el array de paneles, se realiza un proceso iterativo y se calcula la geometría 3D de cada uno de ellos como un polígono de cuatro vértices que pertenecen a la geometría 3D del array de paneles, en base a la geometría del eje y pendientes, de forma similar a como se ha determinado la geometría 3D de las partes de los arrays de paneles.

8. Finalmente, se almacenan en la base de datos todos los valores que han de ser usados en procesos posteriores.

Durante el proceso se crea un informe para cada uno de los arrays de paneles, con un contenido que resume los resultados principales y que ayudaría en la detección de posibles errores. Sirva de ejemplo el fichero para el primer array de paneles de este caso, incluido en la siguiente imagen.

1	Array panel geometry estimation report
2	- Project file: C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/SolarPark/MmTools_pozoCanada.sqlite
3	- Array: ARY_1
4	- DSM footprint wkt: POLYGON((608661.0036 4298651.5101, 608661.0386 4298651.5098, 608661.0736 4298651.5101, 608661.0036 4298651.5101))
5	- Footprint line wkt: LINESTRING(608697.1564 4298651.1916, 608697.1548 4298651.2265, 608697.1182 4298651.2265, 608697.1564 4298651.1916)
6	- Footprint line wkt: LINESTRING(608697.5585 4298648.3379, 608697.5224 4298648.3041, 608697.4862 4298648.3041, 608697.5585 4298648.3379)
7	- Footprint line wkt: LINESTRING(608631.9002 4298651.2835, 608631.8981 4298651.2485, 608631.6384 4298651.2485, 608631.9002 4298651.2835)
8	- Footprint line wkt: LINESTRING(608697.4128 4298650.9217, 608697.4491 4298650.8880, 608697.6952 4298650.8880, 608697.4128 4298650.9217)
9	- Minimum 2D rectangle wkt: POLYGON((608631.5381 4298651.5935, 608631.5354 4298648.0944, 608697.7317 4298648.0944, 608631.5381 4298651.5935))
10	- Axis azimuth: 90.0441
11	- Axis lenght: 66.1963
12	- Orthogonal axis lenght: 3.4991
13	- Axis 2D wkt: LINESTRING(608631.5368 4298649.8440, 608697.7330 4298649.7930)
14	- Final geometry wkt: POLYGON Z((608631.5381 4298651.5935 777.8000, 608648.0872 4298651.5808 777.8000, 608697.7317 4298648.0944 777.8000, 608631.5368 4298649.8440 777.8000))
15	- Structure's parts: 4
16	- Structure part number: 1
17	- Axis number of points ..: 467
18	- Mean axis height: 776.8000
19	- Standard deviation: 0.0087
20	- Number of inliers: 464
21	- Mean slope: 32.7485
22	- Standard deviation: 0.2994
23	- Number of inliers: 466
24	- Structure part number: 2
25	- Axis number of points ..: 473
26	- Mean axis height: 776.8000
27	- Standard deviation: 0.0019
28	- Number of inliers: 473
29	- Mean slope: 32.7485
30	- Standard deviation: 0.6043
31	- Number of inliers: 473
32	- Structure part number: 3
33	- Axis number of points ..: 473
34	- Mean axis height: 776.8000
35	- Standard deviation: 0.0063
36	- Number of inliers: 473
37	- Mean slope: 34.1707
38	- Standard deviation: 1.4141
39	- Number of inliers: 469
40	- Structure part number: 4
41	- Axis number of points ..: 471
42	- Mean axis height: 776.8000
43	- Standard deviation: 0.0068
44	- Number of inliers: 464
45	- Mean slope: 33.1213
46	- Standard deviation: 0.5517
47	- Number of inliers: 461

Figura 100. Informe de resultados de array de panel

Tras analizar los resultados de varios casos de uso, se ha llegado a la conclusión de que con el algoritmo desarrollado se obtiene una geometría que sobredimensiona la real del array de paneles, tal y como ilustra la siguiente figura, donde se puede apreciar este efecto de alargamiento en el borde norte del panel número 1, siendo la causa el error en la nube de puntos que se hace también patente en el propio estiramiento de la ortoimagen.

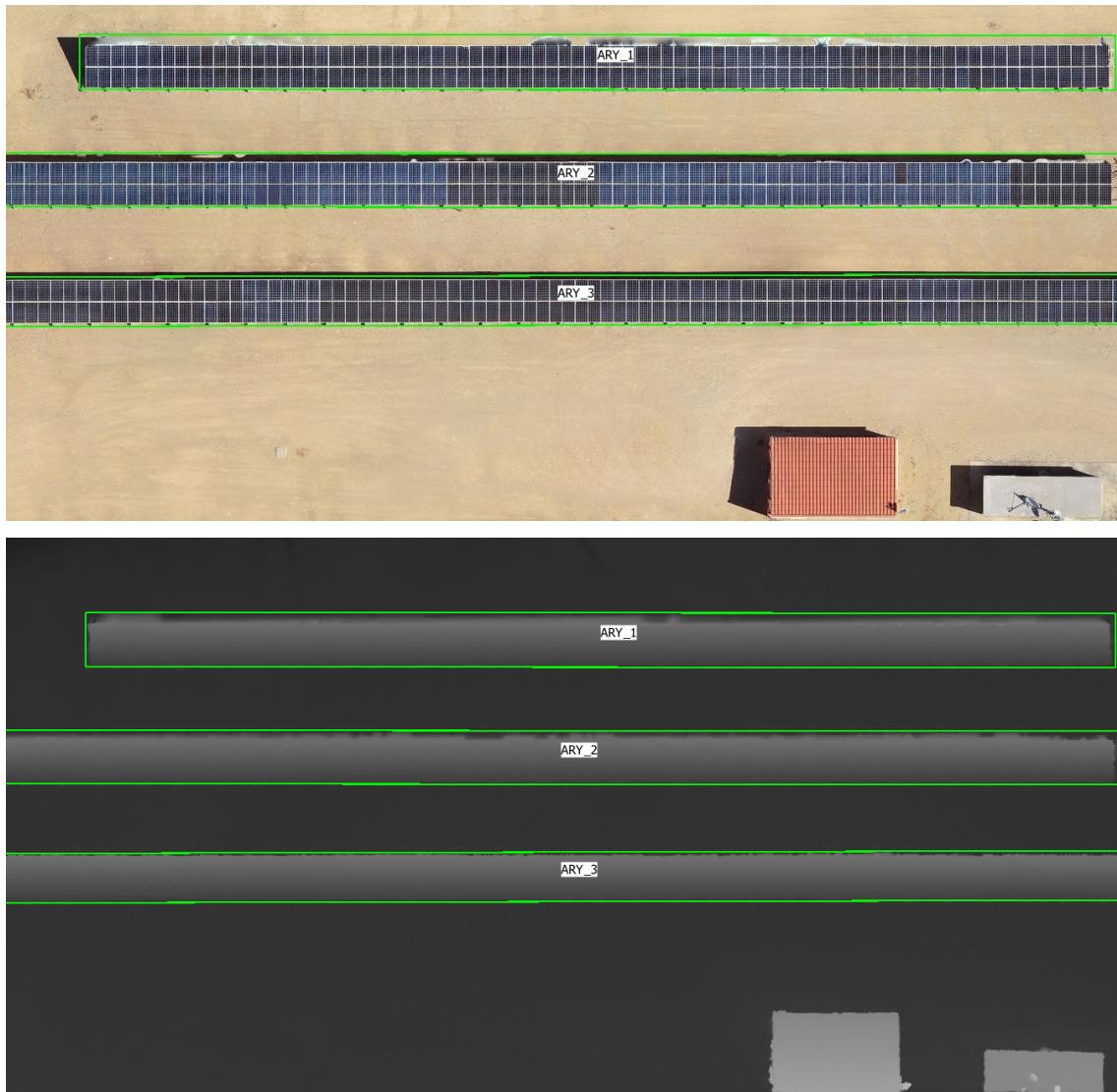


Figura 101. Efecto de sobredimensionamiento

Este problema podría dar lugar a la obtención de falsos positivos en los hot spots, motivo que ha llevado a plantear una variante de este algoritmo válido cuando se dispone de la geometría en planta de los arrays de paneles, ya provenga de un plano de proyecto o de un plano as built, procedente de la empresa gestora del parque fotovoltaico, o de la aplicación sobre las imágenes u ortoimágenes visibles de algoritmos para la detección automática del borde de los arrays de paneles (no incluido en este trabajo), y un nuevo algoritmo que mejora la solución de los dos anteriores, tras la intervención del operador para mejorar, manualmente o por cualquier otro procedimiento, la geometría obtenida automáticamente.

Algoritmo 2. CÁLCULO AUTOMÁTICO A PARTIR DEL POLÍGONO BORDE, DEL DTM Y DEL DSM

Este algoritmo es el que se aplica cuando en la definición del parque fotovoltaico se ha empleado un fichero shapefile con geometría de tipo polígono donde para cada array de paneles se cuenta con el polígono que lo limita, que podría ser preciso o una aproximación.

Es una variante del algoritmo anterior que comienza en el punto 4, realizándose los pasos 4, 5, 6, 7 y 8, dado que los pasos anteriores tenían como objetivo determinar una primera aproximación al borde del array de paneles, expresado como una secuencia de puntos borde, que en este caso se hace coincidir con el propio polígono del shapefile de partida.

El informe de resultados cambia ligeramente al no incluir información de pasos previos al 4. Este algoritmo continúa presentando el mismo problema de vinculación de la precisión a la del DSM que el algoritmo anterior.

```

1 Array panel geometry estimation report
2 - Project file .....: C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/SolarPark/MmTools_pozoCanada.sqlite
3 - Array .....: ARY_1
4 - DSM footprint wkt .....: POLYGON((608631.8519 4298650.9493,608648.1140 4298650.9037,608664.6081
5 - Minimum 2D rectangle wkt .....: POLYGON((608697.3738 4298650.9646,608631.8519 4298650.9493,608631.8521
6 - Axis azimuth .....: 269.9866
7 - Axis lenght .....: 65.5219
8 - Orthogonal axis lenght .....: 2.7892
9 - Axis 2D wkt .....: LINESTRING(608697.3741 4298649.5700,608631.8522 4298649.5547)
10 - Final geometry wkt .....: POLYGON Z((608697.3745 4298648.1754 775.8657,608680.9940 4298648.1716
11 - Structure's parts .....: 4
12   - Structure part number .....: 1          28      - Structure part number ....: 3
13   - Axis number of points ..: 469          29      - Axis number of points ..: 469
14   - Mean axis height .....: 776.7000       30      - Mean axis height .....: 776.7000
15   - Standard deviation ....: 0.0067        31      - Standard deviation ....: 0.0051
16   - Number of inliers .....: 469          32      - Number of inliers .....: 469
17   - Mean slope .....: -34.2751          33      - Mean slope .....: -34.7898
18   - Standard deviation ....: 1.4107        34      - Standard deviation ....: 1.5324
19   - Number of inliers .....: 468          35      - Number of inliers .....: 469
20 - Structure part number ....: 2          36      - Structure part number ....: 4
21   - Axis number of points ..: 469          37      - Axis number of points ..: 469
22   - Mean axis height .....: 776.7000       38      - Mean axis height .....: 776.7000
23   - Standard deviation ....: 0.0000        39      - Standard deviation ....: 0.0199
24   - Number of inliers .....: 469          40      - Number of inliers .....: 469
25   - Mean slope .....: -32.8673          41      - Mean slope .....: -32.8673
26   - Standard deviation ....: 1.5483        42      - Standard deviation ....: 2.3863
27   - Number of inliers .....: 469          43      - Number of inliers .....: 469
28 - Structure part number ....: 3          43

```

Figura 102. Informe de resultados de array de panel mejorado

Algoritmo 3. ACTUALIZACIÓN AUTOMÁTICA DE LA GEOMETRÍA DE PANELES EMPLEANDO LA GEOMETRÍA EN PLANTA EDITADA, EL DTM Y EL DSM

Este algoritmo permite recalcular, de forma automática, la geometría 3D del array de paneles, y toda la parametrización vinculada (azimut, longitud, pendiente, geometría 3D de las partes, etc), así como la geometría 3D de los paneles, después de que su geometría en planta haya sido mejorada y actualizada en la base de datos, bien por edición manual del usuario en QGIS, bien por la importación en QGIS de una geometría de cualquier fuente. En este caso la geometría 2D no se modifica.

A modo de ejemplo, considérese el caso de que el usuario hubiera editado en QGIS la geometría en planta del panel número 1, en base a la fotointerpretación sobre la ortoimagen, tal y como ilustra la siguiente figura, evidenciándose el cambio frente a la geometría sobredimensionada detectada de forma automática por el algoritmo descrito anteriormente.

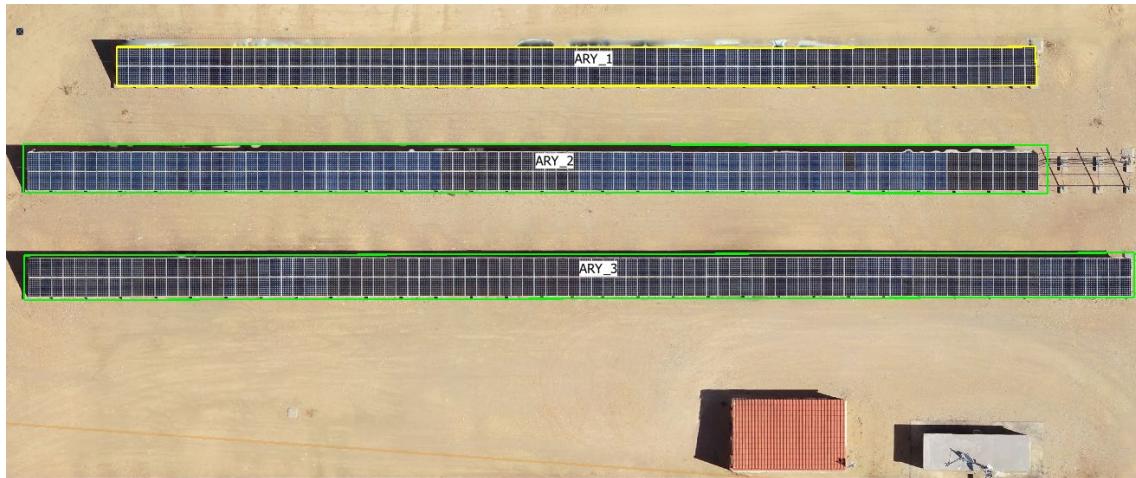


Figura 103. Geometría de panel ajustada

Los parámetros de este algoritmo son equivalentes a los empleados en el cálculo automático de la geometría, si bien tienen una denominación distinta para hacer persistir los conjuntos de parámetros de los dos algoritmos, cálculo y actualización, para ejecuciones posteriores.

Parameters				
	Code	Enabled	Value	Description
1	UPGDSMDTM_CheckPanelsRowsColumnsSize	Si	false	Check the number of rows and columns of panels compared to size
2	UPGDSMDTM_MeanAltitudeTolerance	Si	0.20	Mean altitude tolerance for arrays parts
3	UPGDSMDTM_MeanSlopeTolerance	Si	5.00	Mean slope tolerance for arrays parts
4	UPGDSMDTM_MultiProcess	Si	true	Use multi process
5	UPGDSMDTM_OutputPath	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/Outputs	Output path for report files
6	UPGDSMDTM_PanelFrameWidth	Si	0.03	Panel frame width
7	UPGDSMDTM_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
8	UPGDSMDTM_dsm_raster_file	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/dsm_combinado.tif	DSM raster file, same CRS as project.
9	UPGDSMDTM_dtm_raster_file	Si	C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/dtm_50cm.tif	DTM raster file, same CRS as project.

Figura 104. Parámetros del proceso de actualización geométrica de los paneles

Este algoritmo es equivalente al descrito a partir del polígono borde, de forma que únicamente se realizan los pasos 5, 6, 7 y 8 del algoritmo inicial. El informe de resultados es similar al del caso de partir del polígono borde, si bien el fichero incluye en su denominación el sufijo *_update*.

4.2. AVANCES EN PASOS PREVIOS PARA APLICAR CORRECCIONES EN LAS IMÁGENES TÉRMICAS: DETERMINACIÓN DE ÁREAS NO VÁLIDAS POR REFLEXIONES Y CORRECCIONES POR DISTANCIA Y ÁNGULO

En este apartado se describe el algoritmo diseñado e implementado para obtener información que será empleada en el cálculo de correcciones en los valores de temperatura que alcanzan el sensor embarcado en el UAV para aproximarlas a los valores reales en el objeto. Además, en este proceso se obtienen aquellos recintos en las imágenes térmicas correspondientes a zonas de arrays de paneles donde se observa radiación que procede de la energía emitida por otros arrays de paneles situados al sur, falseando la temperatura resultante, lo que se debe resolver mediante un enmascaramiento para evitar usar esa región de la imagen térmica.

Este comando requiere que se haya seleccionado el proyecto fotogramétrico a emplear.

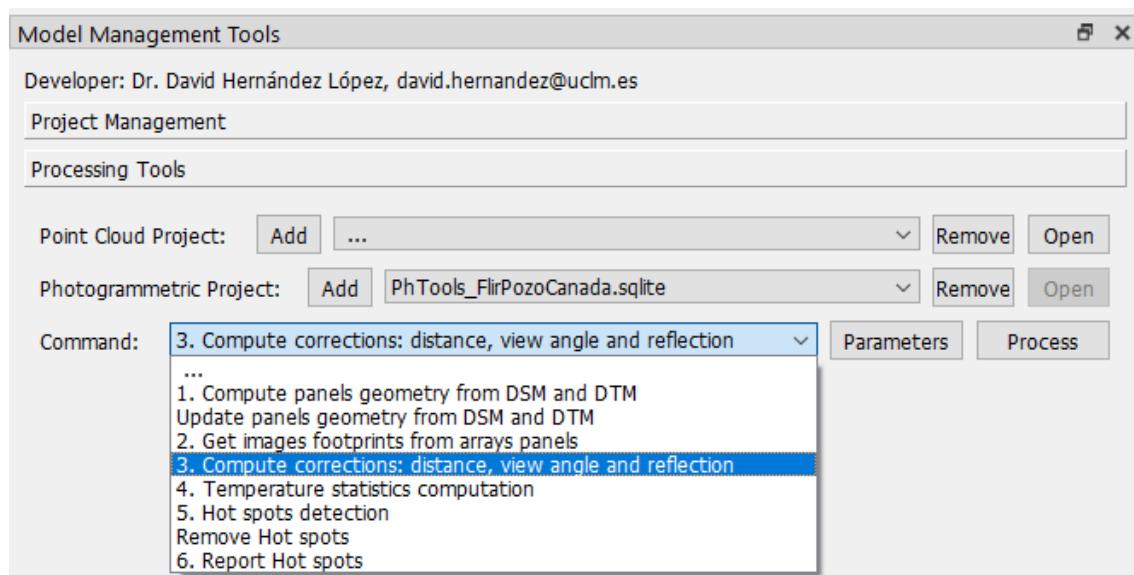


Figura 105. Proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas

Los parámetros que debe introducir el usuario se recogen en la siguiente figura y serán descritos en este apéndice.

Parameters manager for command: 3. Compute corrections: distance, view angle and reflection				
	Code	Enabled	Value	Description
1	CDTC_DsmRasterFile	Si	C:/ucim/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/dsm_combinado.tif	DSM raster file, same CRS as project and with no data value.
2	CDTC_MaximumDistanceAxisReflections	Si	1.500	Maximum distance to array panel axis in reflection points
3	CDTC_MinimumSideSmallestObjectInImage	Si	1.300	Minimum side of the smallest object in image
4	CDTC_MultiProcess	Si	true	Use multi process
5	CDTC_OutputDistancesImagesSuffix	Si	_distances	Suffix for image to store the distance to panel
6	CDTC_OutputMaskImagesSuffix	Si	_mask	Suffix for image to store the pixels where is visible the array panel
7	CDTC_OutputReflectedPixelsImagesSuffix	Si	_reflectedPixels	Suffix for image to store the pixel where exists reflection from another array panel
8	CDTC_OutputViewAnglesImagesSuffix	Si	_viewAngles	Suffix for image to store the view angle from normal to panel
9	CDTC_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	true	Process only enabled arrays
10	CDTC_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true	Process only enabled images

Figura 106. Parámetros del proceso de cálculo de correcciones en las imágenes térmicas

En este proceso se calculan datos por imagen térmica y por array de paneles. Para evitar procesar imágenes o arrays de paneles que, o bien no se desean procesar por algún motivo, o bien son los únicos que se desea reprocesar porque se pueden obtener mejores resultados variando algún otro parámetro, se contemplan dos parámetros: **CDTC_ProcessOnlyEnabledImages** y **CDTC_ProcessOnlyEnabledArrays**, que se pueden poner a verdadero o falso. Estando alguno de estos parámetros a verdadero, sólo se procesarán los objetos correspondientes que estén habilitados, aquellos que en el atributo *enabled* correspondiente tengan un valor de 1. Para modificar el estado, habilitado o deshabilitado, basta con usar las herramientas de QGIS para introducir el valor deseado en el campo antes de lanzar este algoritmo.

En este proceso se van a generar tres imágenes para cada combinación de imagen térmica y array de paneles observado en la misma: la primera, a modo de imagen máscara, donde se indican los píxeles donde se observa el array de paneles en cuestión, la segunda donde para cada píxel visible se almacenará la distancia al centro de proyección de la cámara, y la tercera donde para cada píxel visible se almacenará el ángulo que forma la línea de observación con la normal a la superficie del array de paneles en la proyección del píxel sobre el array de paneles. La distancia se almacena en una imagen de tipo byte, en metros multiplicada por dos y redondeada a entero, lo que permite alcanzar una precisión de 0.5 metros en el rango válido para vuelos legales de UAVs en España, hasta 120 m. El ángulo de vista se guarda, en una imagen de tipo byte, en DEG multiplicado por dos y redondeado a entero, lo que permite alcanzar una precisión de 0.5 DEG, para ángulos en el dominio de 0 a 90 DEG. Además, se puede generar una cuarta imagen, a modo de imagen máscara, donde se indican los píxeles del área observada donde puede observarse

la temperatura alterada por la recepción de radiación procedente de algún array de paneles situado al sur. Para estas cuatro imágenes se debe elegir un sufijo en el correspondiente parámetro, proponiéndose por defecto los valores de: `_mask`, `_distances`, `_viewAngles` y `_reflectedPixels`, respectivamente.

A continuación, se describe el algoritmo paso a paso:

1. Para cada array de paneles a procesar se obtienen los datos de las partes de los arrays de paneles situados al sur, candidatos a ser origen de radiación recibida en el array observado, recuperando para cada array de paneles y parte su geometría 3D, pendiente media y desviación típica de la pendiente media.
2. Para cada array de paneles a procesar se recuperan de la base de datos la geometría de las huellas de las imágenes a procesar donde se observa, resultado de un proceso anterior. Se obvian aquellas geometrías que tengan una dimensión inferior al parámetro elegido como valor mínimo de interés, `CDTC_MinimumSideSmallestObjectInImage`, que para este ejemplo se ha establecido en 1.3 m.
3. Para cada geometría resultante del paso anterior, correspondiente a la huella de cada array de paneles sobre cada imagen, se recorre un proceso por imagen y se realizan los siguientes pasos:
 - a. Se recuperan los parámetros de orientación interna y externa de la imagen en su CRS ENU (diferente para cada imagen).
 - b. Para cada array de paneles visible:
 - i. Se crean las imágenes máscara, de distancia y de ángulo de vista que se irán rellenando en un paso posterior.
 - ii. Se construye una malla 3D del array de paneles en el CRS ENU de la imagen a partir de la recuperación y conversión de CRS de la geometría 3D de las partes del array de paneles. También se recupera la pendiente media y desviación típica de cada parte.
 - iii. Se construye una malla 3D de los arrays de paneles situados al sur en el CRS ENU de la imagen, de forma similar a la del array de paneles principal.
 - iv. Se inicializa a vacío un contenedor con los píxeles afectados por radiación recibida procedente de otros arrays de paneles.
 - v. Se crean y abren para escritura las tres imágenes: máscara, distancias, ángulo de vista.

vi. Se realiza un proceso iterativo para cada uno de los píxeles de la imagen que observan el array de paneles, conocido por la determinación previa de la huella sobre la imagen. Para cada píxel se realizan los siguientes pasos:

1. Se obtiene su proyección en el CRS ENU sobre el objeto resolviendo el proceso directo de fotogrametría, para lo que se calcula el vector de observación hacia el array de paneles desde el centro de proyección de la imagen con el píxel en cuestión, empleando la orientación interna y externa. Si existe intersección con la malla 3D correspondiente, lo que podría no suceder en zonas próximas al borde:
 - a. Se escribe el píxel en la imagen máscara.
 - b. Se calcula y escribe la distancia entre el punto proyectado y el centro de proyección de la imagen.
 - c. Se calcula el vector normal a la superficie del array de paneles en el punto proyectado, en el CRS ENU, empleando el azimut y la pendiente media en ese sistema de coordenadas.
 - d. Se calcula y escribe el ángulo que forman el vector de observación y el vector normal a la superficie del objeto.
 - e. Se calcula el rayo reflejado al de observación respecto a la normal al array de paneles en el punto proyectado, en el CRS ENU de la imagen, contenido en el plano de observación para ese píxel, definido por la normal al panel en el punto del panel y el centro de proyección de la imagen.
 - f. Se recorren las mallas 3D de los arrays de paneles situados al sur para comprobar si existe intersección del rayo reflejado, en cuyo caso se almacena el píxel de la imagen como de reflexión.
2. Se cierran las tres imágenes: máscara, distancias y ángulo de observación.
3. Si el contenedor de píxeles afectados de radiación reflejada no está vacío, se almacenan en la imagen correspondiente.

4.3. AVANCES EN LA DETERMINACIÓN TEMPERATURAS Y SUS ESTADÍSTICAS

El cálculo de los hot spots en los arrays de paneles y paneles se debe realizar a partir de los valores de temperatura y sus variaciones. Como paso previo es necesario calcular diferentes conjuntos de estadísticas de temperatura para los dos tipos de geometrías contempladas, arrays de paneles y paneles, a partir de los datos de las imágenes térmicas:

- Estadísticas de temperatura para la combinación de cada imagen y cada array de paneles.
- Estadísticas de temperatura para la combinación de cada imagen y cada panel.
- Estadísticas de temperatura de cada array de paneles, considerando todas las imágenes que lo observan.
- Estadísticas de temperatura de cada panel, considerando todas las imágenes que lo observan.

En este proceso habrá que aplicar el modelo radiométrico de la cámara y aquellas correcciones que afectan en la observación, de forma que se estime lo mejor posible la temperatura real de la huella de cada píxel de cada imagen, teniendo en cuenta todas estas correcciones.

Las correcciones que se deben aplicar se recogen en la norma IEC TS 62446-3, Thecnical Specification: Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography, según la Edition 1.0 2017-06, url: <https://webstore.iec.ch/publication/28628>

A continuación, se describe el algoritmo empleado para obtener las estadísticas de temperatura anteriores.

Para lanzar el proceso se debe elegir el comando 4. *Temperature statistics computation*, habiendo seleccionado el proyecto fotogramétrico térmico a emplear, y habiendo seleccionado los parámetros adecuados.

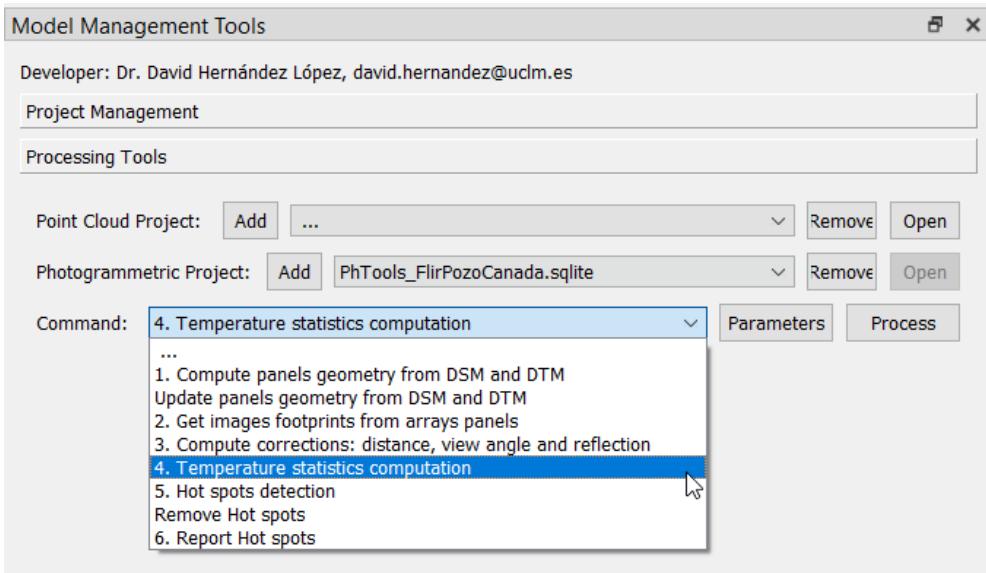


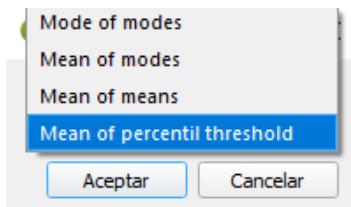
Figura 107. Proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura y se describen en detalle a continuación.

Parameters				
	Code	Enabled	Value	Description
1	TSC_AlgorithmTemperatureHomogenizationInArrayPanel	Si	Mean of percentil threshold	Algorithm for temperature homogenization in array panel
2	TSC_ArrayPanelTemperatureEstimationPercentileThreshold	Si	75.0	Percentil threshold for estimation of array panel temperature
3	TSC_AtmosphereRelativeHumidity	Si	30.0	Atmosphere relative humidity (%), for input data format value and default value
4	TSC_AtmosphereTemperature	Si	28.0	Atmosphere temperature (°C), for input data format value and default value
5	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityDataFormat	Si	File	Data format for atmosphere temperature and relative humidity
6	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityFile	Si	C:/udm/Ejemplo_PozoCanada/data/TemperatureAndRelativeHumidity.csv	Atmosphere temperature and relative humidity CSV file: date(yyyy-MM-dd);time(hhmmss);temp(°C);humidity(%)
7	TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityFileOffsetToUTC	Si	-02:00:00	Offset to UTC from time in file, example: -02:00:00 (hh:mm:ss)
8	TSC_AtmosphericTransmissionCoefficientEquation	Si	FlirToolkit	Equation for atmospheric transmission coefficient, for temperature and relative humidity
9	TSC_DN2TemperatureEquation	Si	0.04*x-273.15	Equation for conversion digital number to temperature
10	TSC_InputDistancesImagesSuffix	Si	_distances	Suffix for image to read the distance to panel
11	TSC_InputImagesSuffix	Si		Suffix for input corrected thermal images or empty for use database images
12	TSC_InputMaskImagesSuffix	Si	_mask	Suffix for image to read the pixels where is visible the array panel
13	TSC_InputReflectedPixelsImagesSuffix	Si	_reflectedPixels	Suffix for image to read the pixel where exists reflection from another array panel
14	TSC_InputViewAnglesImagesSuffix	Si	_viewAngles	Suffix for image to read the view angle from normal to panel
15	TSC_MultiProcess	Si	true	Use multi process
16	TSC_OutputEmissivityEquation	Si	100.0*x	Equation for write output emissivity values to 8 bits images
17	TSC_OutputEmissivityImagesSuffix	Si	_emi	Suffix for output emissivity images
18	TSC_OutputImagesSuffix	Si	_tcv	Suffix for output corrected thermal images
19	TSC_OutputTemperatureEquation	Si	100.0*x	Equation for write output corrected values to 16 bits thermal images
20	TSC_ProcessOnlyEnableArrays	Si	true	Process only enabled arrays
21	TSC_ProcessOnlyEnabledImages	Si	true	Process only enabled images
22	TSC_ReflectedTemperature	Si	-55.0	Reflected temperature (°C), for clear sky usually -50 to -60
23	TSC_TemperatureEquationEmissivityAngleOfView	Si	0.8979+0.00060*x-1.3285e-05*x^2+1.199e-06*x^3-2.11e-08*x^4	Equation for emissivity for angle of view

Figura 108. Parámetros del proceso de cálculo de estadísticas de temperatura

- **TSC_AlgorithmTemperatureHomogenizationInArrayPanel.-** Se utiliza para indicar el algoritmo a usar para estimar el valor representativo en los muestrazos estadísticos de temperaturas. Se han contemplado varios métodos, tal y como ilustra la siguiente figura. El valor elegido en los ejemplos es la media del percentil en cada una de las imágenes, con un valor del 75% del umbral establecido en otro parámetro.



- **TSC_ArrayPanelTemperatureEstimationPercentileThreshold.**- Se utiliza para establecer el valor del percentil para el caso de elegir ese método de estimación muestral de temperaturas. En el ejemplo se ha usado el valor del 75%, de forma que se eviten temperaturas muy altas que pueden corresponder a anomalías, objeto de detección en un paso posterior, que funcionará mejor si se compara frente a una estimación muestral en cuya determinación no han intervenido esos valores altos.
- **TSC_AtmosphereRelativeHumidity.**- Se utiliza para establecer la humedad relativa, en tanto por ciento, cuando se considera la aproximación de que es constante para todo el vuelo.
- **TSC_AtmosphereTemperature.**- Se utiliza para establecer la temperatura seca, en grados centígrados, cuando se considera la aproximación de que es constante para todo el vuelo.
- **TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityDataFormat.**- Se utiliza para indicar si se va a usar un fichero con una serie temporal de datos de temperatura seca y humedad relativa o si se desea usar un valor constante para todo el vuelo. Por tanto, puede adoptar dos valores: *File* o *Value*.
- **TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityFile.**- Se utiliza para asignar el fichero con ruta completa, en formato CSV, con la serie temporal de valores de temperatura seca, en grados centígrados, y humedad relativa, en porcentaje. La estructura del fichero se incluye en la descripción del parámetro. Sirva de ejemplo la siguiente figura del fichero empleado en el caso de uso.

C:\uclm\Ejemplo_PozoCanada\data\TemperatureAndRelativeHumidity.csv - ...	
Archivo Editar Buscar Vista Codificación Lenguaje Configuración Herramientas Macro	
Ejecutar Plugins Ventana ?	
new 38	new 35
TemperatureAndRelativeHumidity.csv	
153	2019:05:15;12:09:05;13.59753;22.3
154	2019:05:15;12:13:53;13.884826;22.3
155	2019:05:15;12:18:41;13.971682;22.3
156	2019:05:15;12:23:29;13.952463;22.3
157	2019:05:15;12:28:16;14.157433;22.3
158	2019:05:15;12:33:04;14.386978;22.3
159	2019:05:15;12:37:52;14.362;22.3
160	2019:05:15;12:42:40;14.661452;22.3
161	2019:05:15;12:47:28;14.710118;22.3
162	2019:05:15;12:52:15;14.826962;22.3

- **TSC_AtmosphereTemperatureAndRelativeHumidityOffsetToUTC.**- Se utiliza para indicar el offset a aplicar para convertir en UTC el tiempo registrado en el fichero de serie temporal de temperatura seca y humedad relativa.

- **TSC_DN2TemperatureEquation** .- Sirve para indicar la operación a realizar sobre los valores de los niveles digitales de las imágenes térmicas para obtener la temperatura en grados centígrados captada en el sensor de la cámara. En el ejemplo se utiliza el empleado por Flir para la cámara usada en el caso de uso: 0.04×273.15 , que expresa que el valor del nivel digital en 16 bits registrado en la imagen hay que multiplicarlo por 0.04 para convertirlo a temperatura en grados kelvin, y restarle a continuación 273.15 para pasarlo a grados centígrados.
- **TSC_InputDistancesImagesSuffix**.- Sirve para indicar el sufijo de las imágenes donde para cada píxel se expresa la distancia al objeto, obtenida en el paso anterior de cálculo de datos para correcciones. Recordando el método de almacenamiento empleado en estas imágenes, el valor de la distancia en metros para cada píxel se obtiene dividiendo por dos el valor el nivel digital, con una precisión de 0.5 m, suficiente para la corrección a aplicar.
- **TSC_InputImagesSuffix**.- Sirve para indicar un sufijo para las imágenes térmicas por si no se correspondieran con las originales debido a que han sido sometidas a algún tipo de tratamiento, una corrección radiométrica por calibración, por ejemplo. En el caso de uso se deja vacío, de manera que se usarán las imágenes originales.
- **TSC_InputMaskImagesSuffix**.- Sirve para indicar el sufijo de las imágenes máscara para cada combinación de imagen térmica y array de paneles, obtenida en el paso anterior de cálculo de datos para correcciones. Este enmascaramiento permite optimizar el procesamiento.
- **TSC_InputReflectedPixelsImagesSuffix**.- Sirve para indicar el sufijo de las imágenes con el área a obviar para cada combinación de imagen térmica y array de paneles debido a la posible presencia de radiación procedente de otro array de paneles.
- **TSC_InputViewAnglesImagesSuffix**.- Sirve para indicar el sufijo de las imágenes donde para cada píxel se expresa el ángulo que forma el rayo de observación con la normal al panel en el punto observado, obtenida en el paso anterior de cálculo de datos para correcciones. Recordando el método de almacenamiento empleado en estas imágenes, el valor del ángulo en grados sexagesimales para cada píxel se obtiene dividiendo por dos el valor el nivel digital, con una precisión de 0.5 DEG, suficiente para la corrección a aplicar.
- **TSC_TemperatureEquationEmissivityAngleOfView**.- Sirve para indicar la ecuación que se debe aplicar para estimar la emisividad en función del ángulo de observación, ángulo que forma el rayo de observación con la normal al panel en el punto observado. En este ejemplo se ha empleado la ecuación $0.8979 + 0.00060 \times x - 1.3285e-05 \times x^2 + 1.199e-06 \times x^3 - 2.11e-08 \times x^4$, donde x es el ángulo en DEG, procedente del ajuste mínimos cuadrados de una curva al resultado del artículo: A directional-spectral approach to estimate temperature of outdoor PV panels, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.049> , explicado

por la siguiente imagen, donde además se establece el límite en 65 DEG para obviar píxeles de las imágenes térmicas:

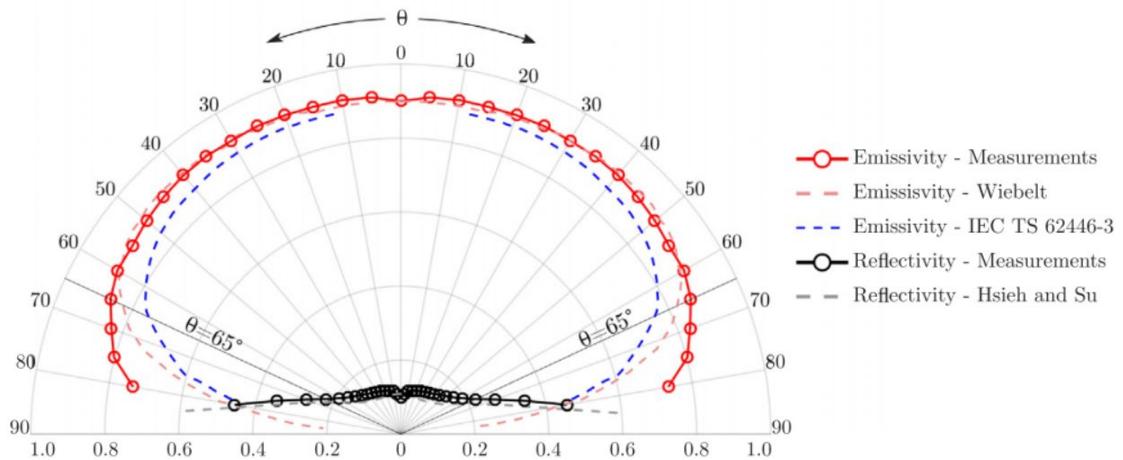


Figura 109. Estimación de la emisividad en función del ángulo de observación recogida en un artículo científico

En este artículo se justifica que el resultado es mejor que el indicado por la norma IEC TS 62446-3, explicado por la figura:

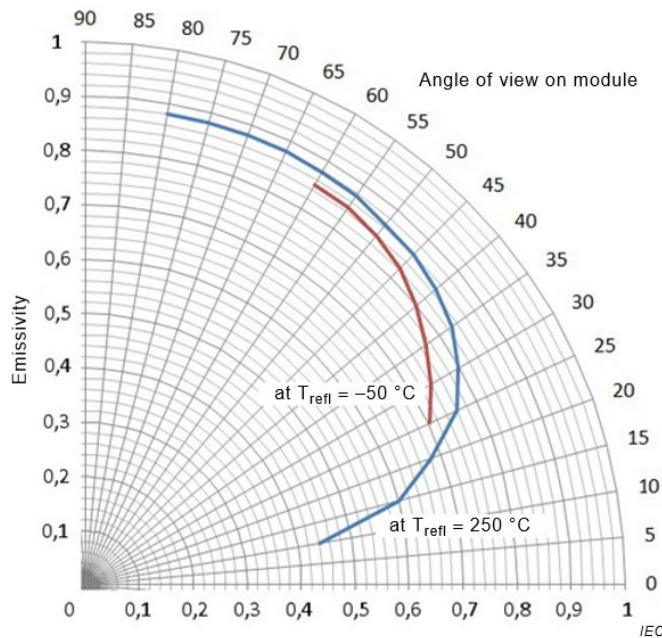


Figure 2 – Dependence of the emissivity of glass on the angle of view [10]

Figura 110. Relación entre el ángulo de observación y la emisividad recogida en la norma

- **TSC_OutputEmissivityEquation.-** Sirve para indicar la expresión a aplicar sobre la emisividad calculada para cada píxel de una imagen térmica para almacenarlo en una imagen de emisividades generada. En el ejemplo se ha empleado la ecuación: $100.0*x$, que permite almacenar la emisividad en tanto por ciento en imágenes con formato de byte, dado que el rango de valores estará entre 0 y 100, y la precisión será del 1%, más que suficiente para la precisión del modelo empleado.

- **TSC_OutputEmissivityImagesSuffix.**- Sirve para indicar el sufijo para las imágenes de emisividades, cuyos valores se almacenan conforme a la ecuación establecida en el parámetro anterior.
- **TSC_ReflectedTemperature.**- Se utiliza para establecer la temperatura correspondiente a la radiación reflejada, que para esta aplicación se corresponde con la temperatura reflejada del cielo, cuyo valor para unas condiciones de cielo despejado suele ser del orden de -50 °C a -60 °C, según la bibliografía (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=146543>), y que se debería medir en el momento de realizar el vuelo.
- **TSC_AtmosphericTransmissionCoefficientEquation.**- Sirve para indicar si el cálculo del coeficiente de transmisión atmosférica se debe realizar según el algoritmo de FlirTools o según la ecuación indicada, como por ejemplo la que se propone que utiliza como parámetros la temperatura seca y la humedad relativa:

$$1.0 - (0.02 - 0.002 * t - 0.0008 * rh) * d / 200.0$$

En el ejemplo se ha usado el algoritmo de FlirTools, tal y como se describe en el artículo: Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging, DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081718>. De acuerdo a la siguiente imagen, extraída del citado artículo, primero se calcula el coeficiente que expresa el contenido de vapor de agua, ω , expresión (4), en función de la humedad relativa, $\omega\%$ y de la temperatura atmosférica. A continuación, se calcula el coeficiente de transmisión atmosférica, τ , empleando la ecuación (3), donde además interviene la distancia. Finalmente, se puede estimar la temperatura del objeto en el píxel observado empleando las ecuaciones (1) y (2).

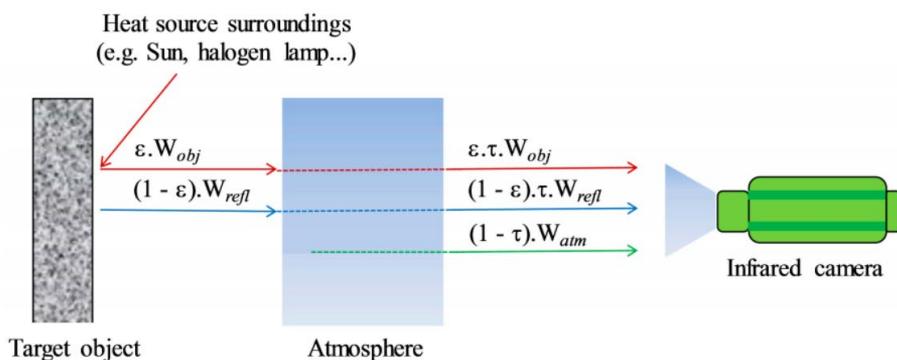


Figure 2. Principle of an infrared (IR) thermal camera receiving radiation.

The total radiation (W_{tot}) received by the IR camera comprises the emission of the object, $\varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj}$, the emission of the surroundings and reflected by the object, $(1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl}$, and the emission of the atmosphere, $(1 - \tau) \cdot W_{atm}$, [14–16] as follows:

$$\begin{aligned} W_{tot} &= \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \\ &= \varepsilon \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 - (1 - \tau) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon \cdot \tau \cdot \sigma}}, \quad (2)$$

According to Equation (2), three parameters are needed to automatically calculate the atmospheric transmission (τ) using the IR camera: survey distance, relative humidity, and atmospheric temperature. The formula used by the FLIR camera is as follows [17,18]:

$$\tau(d, \omega) = K_{atm} \cdot \exp[-\sqrt{d}(\alpha_1 + \beta_1\sqrt{\omega})] + (1 - K_{atm}) \cdot \exp[-\sqrt{d}(\alpha_2 + \beta_2\sqrt{\omega})], \quad (3)$$

$$\omega(\omega\%, T_{atm}) = \omega\% \cdot \exp(h_1 + h_2 \cdot T_{atm} + h_3 \cdot T_{atm}^2 + h_4 \cdot T_{atm}^3), \quad (4)$$

Here, ω is the coefficient indicating the content of water vapor in the atmosphere and $\omega\%$ is the relative humidity. Other parameters include distance (d), the scaling factor for the atmosphere damping ($K_{atm} = 1.9$), attenuation for atmosphere without water vapor (α_1, α_2), attenuation for water vapor (β_1, β_2), and $h_1 = 1.5587$, $h_2 = 6.939 \times 10^{-2}$, $h_3 = -2.7816 \times 10^{-4}$, and $h_4 = 6.8455 \times 10^{-7}$.

The characteristics were specified using Equations (3) and (4) by Minkina et al. [17], and shown in Figure 3 with specific parameters of $\alpha_1 = 0.0066$, $\alpha_2 = 0.0126$, $\beta_1 = -0.0023$, and $\beta_2 = -0.0067$.

Figura 111. Formulación para cálculo de temperatura corregida recogida en un artículo científico

- **TSC_OutputTemperatureEquation.**- Sirve para indicar la expresión a aplicar sobre la temperatura corregida en grados centígrados, calculada para cada píxel de una imagen térmica. para almacenarla en un fichero imagen generado con tipo de dato de 16 bits. En el ejemplo se ha empleado la ecuación: $100.0*x$, que permite almacenar con una precisión superior al 0.01°C en una imagen de 16 bits, donde se pueden registrar valores de 0 a 65535, mayor que la que es posible medir y corregir. El motivo de utilizar esta expresión es que facilita la interpretación del valor de la temperatura si se usa cualquier herramienta de inspección de valor digital en la imagen, el complemento *Value Tool* en QGIS, por ejemplo.
- **TSC_OutputImagesSuffix.**- Sirve para indicar el sufijo para las imágenes de temperaturas corregidas, cuyos valores se almacenan conforme a la ecuación establecida en el parámetro anterior.
- **TSC_ProcessOnlyEnabledArrays.**- Sirve para indicar que solamente se deben procesar los arrays de paneles habilitados, aquellos que tienen un valor 1 en el atributo *enabled* de la base de datos, ignorando aquellos que tienen un valor de 0 en dicho atributo.
- **TSC_ProcessOnlyEnabledImages.**- Sirve para indicar que solamente se deben procesar las imágenes habilitadas del proyecto fotogramétrico térmico, aquellas que tienen un valor 1 en el atributo *enabled* de la base de datos, ignorando aquellas que tienen un valor de 0 en dicho atributo.

A continuación, se describe el proceso que realiza el algoritmo paso a paso:

1. Sólo en la primera ejecución de este algoritmo en un proyecto, se realizan algunas actualizaciones en el modelo de la base de datos para almacenar los resultados del algoritmo:

- a. En la tabla *images_fp_dbs*, si no existen, se crean los campos para almacenar las estadísticas de temperatura por imagen y por array de paneles.
 - b. Se crea la tabla *arrays_temperatures*, donde se almacenarán todas las estadísticas de temperatura para los arrays de paneles.
 - c. Se crea la tabla *panels_temperatures*, donde se almacenarán todas las estadísticas de temperatura para los paneles.
 - d. Se crea la tabla *images_panels_temperatures*, donde se almacenarán las estadísticas de temperatura por imagen y panel.
2. Se calculan las estadísticas de temperatura para cada imagen y array de paneles, y para cada array de paneles a partir de todas las imágenes, obviando aquellas imágenes o arrays de paneles que están deshabilitados, si se ha indicado que sólo se desea procesar los habilitados. Para cada imagen y array de paneles se siguen los siguientes pasos:
 - a. Se obtienen los píxeles de la imagen térmica del recinto del array de paneles a partir del área válida, leída del fichero de la imagen máscara, que no están afectados de temperatura emitida por otro array de paneles al sur, leído del fichero de la imagen generada con la máscara de los píxeles afectados.
 - b. Se obtienen los valores de temperatura y humedad relativa, interpolando en función del instante UTC de captura de la imagen si se ha indicado el fichero con la serie temporal de estos valores, o utilizando el valor constante introducido, en el caso de que se hubiera elegido esta opción.
 - c. Se obtienen los valores de los ángulos de vista y distancias para los píxeles del recinto del array de paneles, leídos de los ficheros de imágenes correspondientes.
 - d. Se genera la muestra de temperaturas por imagen y array de paneles, y por imagen y panel, a partir del conjunto de píxeles, calculando la temperatura corregida en cada píxel, conforme a la elección de los modelos establecidos en los parámetros. El panel en que se encuentra cada píxel se calcula por la intersección del rayo proyectivo contra la geometría de paneles, con un procedimiento similar al descrito en 4.2, en el CRS ENU de la imagen empleando el procedimiento directo de la fotogrametría y una malla 3D para expresar la geometría de cada panel. Para evitar posibles problemas debidos a presencia de paneles en las zonas exteriores de las imágenes, no se tienen en cuenta las muestras de imagen y panel cuando el número de píxeles que incluye es inferior a 100, que equivale a incluir unas seis celdas con un GSD de 0.03 m. Para calcular la temperatura corregida en cada píxel, se siguen los siguientes pasos:

- i. Se calcula la emisividad, conforme a la ecuación indicada por el usuario en función del ángulo de vista del píxel, pero si este ángulo supera el umbral establecido como máximo por la normativa, 65 DEG, derivado de la figura del cambio de la emisividad con el ángulo, el píxel se ignora.
- ii. Se calcula la transmisividad atmosférica y la temperatura corregida, tal y como se ha descrito anteriormente.
- e. Se almacenan los valores de emisividades y temperaturas corregidas en los ficheros de las imágenes con nombres de ficheros que emplean los sufijos y las ecuaciones de conversión indicadas en los parámetros correspondientes.
- f. Se almacenan en la base de datos las estadísticas por imagen y array de paneles, en la tabla *images_fp_dbs*.
- g. Se almacenan en la base de datos las estadísticas por imagen y panel, en la tabla *images_panels_temperatures*.
- h. Una vez calculadas las estadísticas para un array de paneles de todas las imágenes que lo observan, se calculan y almacenan las estadísticas para el array de paneles a partir de todas las imágenes, en la tabla *arrays_temperatures*.
- i. Una vez calculadas las estadísticas para un panel de todas las imágenes que lo observan, se calculan y almacenan las estadísticas para el panel a partir de todas las imágenes, en la tabla *panels_temperatures*.

4.4. AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DE HOT SPOTS

La estimación de los hot spots en los arrays de paneles y paneles se debe realizar a partir de los valores de temperatura y sus variaciones, determinados en un paso previo, tal y como se ha descrito en 4.3:

- Estadísticas de temperatura para cada combinación de imagen y cada array de paneles.
- Estadísticas de temperatura para cada combinación de imagen y cada panel.
- Estadísticas de temperatura de cada array de paneles considerando todas las imágenes que lo observan.
- Estadísticas de temperatura de cada panel considerando todas las imágenes que lo observan.

La irradiancia solar en los paneles fotovoltaicos cambia constantemente, pudiendo ser conocida una serie temporal de la misma medida por sensores del propio parque solar. Todos los cálculos se deben realizar, o normalizar, con respecto a una irradiancia de referencia, 1000 W/m², tal y como exige la norma IEC TS 62446-

3, Thecnical Specification: Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography, según la Edition 1.0 2017-06, url: <https://webstore.iec.ch/publication/28628>. La siguiente figura recoge la metodología de cálculo a aplicar, conforme a esta norma.

7.4 Projection of temperature differences to nominal irradiance

7.4.1 General

The following gives guidance for the extrapolation of the measured temperature difference between functioning and non/partial-functioning components under actual conditions, to the expected temperature difference under nominal in plane irradiance of the PV module, defined as 1 000 W/m². This applies for PV modules and for other BOS components for any thermal abnormality, and does not consider other conditions such as wind speed which are separately reported.

Here, thermal abnormalities are differentiated between:

- a) point abnormalities (e.g. localized hot-spots in solar cells or a fuse), and
- b) extended area abnormality (e.g. an entire warm/hot solar cell or a heat sink plate).

For temperature difference extrapolation the following formula shall be used:

$$\Delta T_2 = \left(\frac{G_2}{G_1} \right)^x \Delta T_1$$

NOTE 1 Reference for the formula: Guidelines to thermographic inspection of electrical installations; Thomas Perch-Nielsen; Jens Christian Sørensen; 1994 [1].

where

ΔT_i is the temperature difference between functional and non-functioning components under identical irradiance condition i ;

G_i is the irradiance or load (DC current) at condition i ;

Index $i = 1$ is the value at actual/partial irradiance/load (see Table 3 for minimum required partial irradiance/load conditions);

Index $i = 2$ is the value at nominal load/temperature (100 % irradiance/load condition);

x is the exponential factor, considering different shapes of abnormalities. For impact of x see Figure 5.

Since DC current load generated by the PV modules is proportional to irradiance and if the nominal current load at 1 000 W/m² is known, DC current load may be substituted for irradiance in the above formula and Table 5.

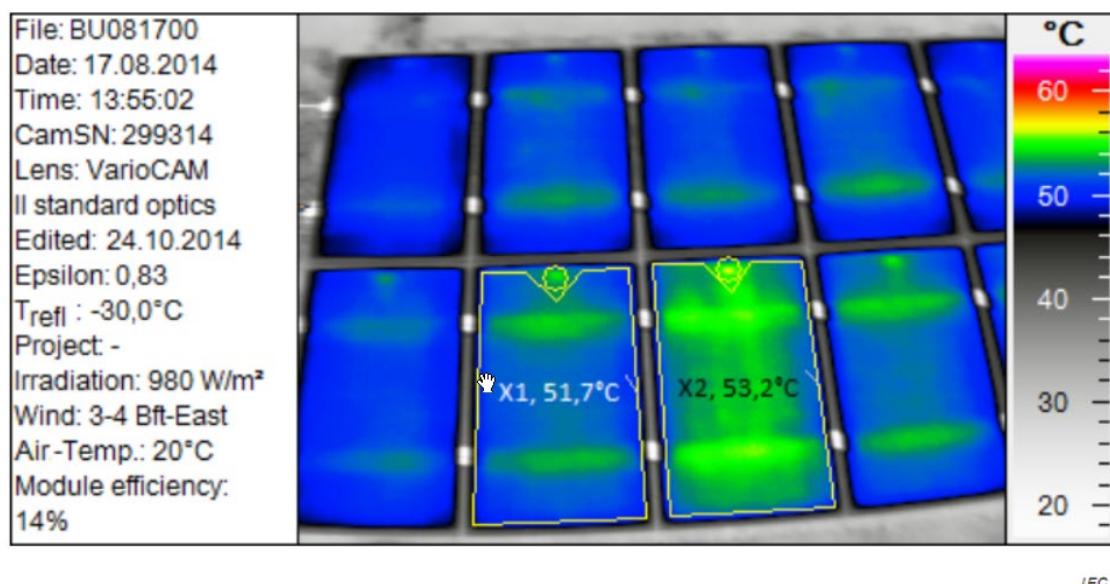
Figura 112. Normalización de temperatura a irradiancia de referencia conforme a la norma

A continuación, se describe el algoritmo empleado para obtener la estimación de los hot spots, tanto con respecto al array de paneles como al panel en que se encuentran. Se debe obtener toda la información necesaria no sólo para estimar su magnitud sino también su ubicación, en el espacio imagen y objeto, información que será utilizada para generar informes de forma automática en otro proceso de la solución desarrollada. La siguiente figura, correspondiente a un ejemplo de informe

incluido en la norma IEC TS 62446-3, ilustra la información a incluir en los informes a generar.

IEC TS 62446-3:2017 © IEC 2017

– 23 –

**Key**

right: color scheme of temperature, center: IR image, left: image information like file name, date, time, used equipment with setting, ambient conditions like T_{refl} , T_{atm} , irradiance, wind speed and project information such as module efficiency

Figure 6 – Example of image reporting

Figura 113. Ejemplo de informe de anomalía extraído de la norma

Para lanzar el proceso se debe elegir el comando 5. *Hot spots detection*, habiendo seleccionado el proyecto fotogramétrico térmico a emplear, y habiendo seleccionado los parámetros adecuados.

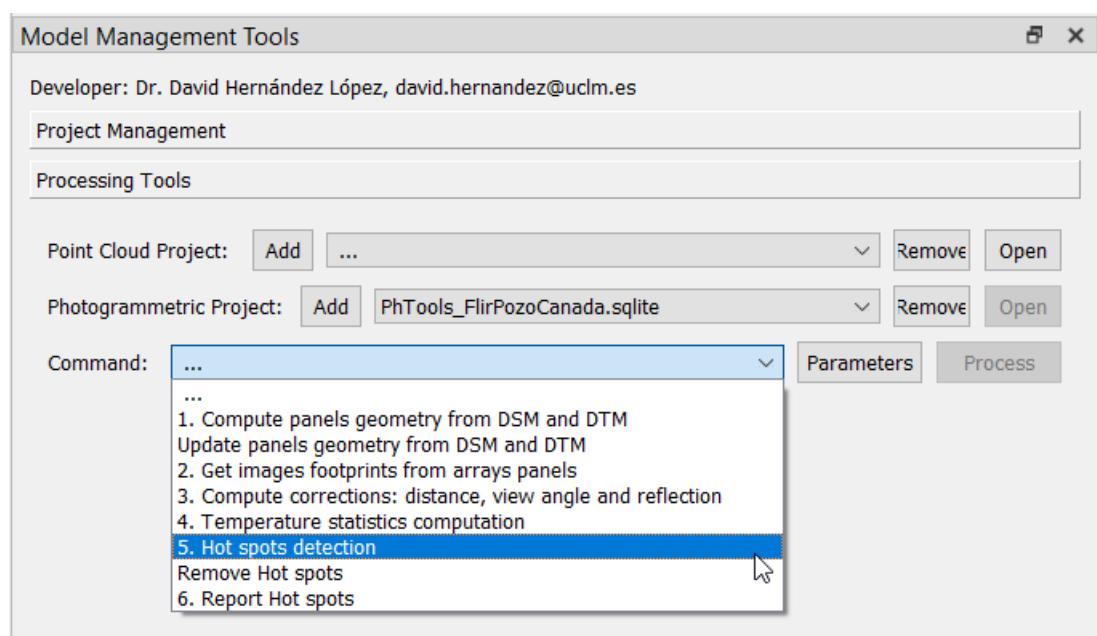


Figura 114. Proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots

Los parámetros elegidos se recogen en la siguiente figura y se describen en detalle a continuación.

Parameters			
	Code	Enabled	Description
1	HSD_AlgorithmHotSpotsDetection	Si	Algorithm for hot spots detection
2	HSD_AlgorithmHotSpotsDetection_DeltaValue	Si	Minimum value of delta temperature for hot spots detection. (10,20,30,100):(lev,elev,moderada,grave,urgente)
3	HSD_ClusterDistance	Si	Maximum separation between hot spots to group them
4	HSD_ImageClusterDistance	Si	Maximum separation between hot spots pixels in image to group them
5	HSD_InputDistancesImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the distance to panel
6	HSD_InputEmissivityImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the distance to panel
7	HSD_InputImagesSuffix	Si	Suffix for input corrected thermal images
8	HSD_InputTemperatureEquation	Si	Equation for read input corrected values to 16 bits thermal images
9	HSD_InputViewAnglesImagesSuffix	Si	Suffix for image to read the view angle from normal to panel
10	HSD_MinimumDeltaInImageValue	Si	Minimum value of delta temperature in image for hot spots detection.
11	HSD_MinimumNumberOfImages	Si	Minimum number of images for hot spot
12	HSD_MultiProcess	Si	Use multi process
13	HSD_OutputImagesSuffix	Si	Suffix for output images with detected hotspots
14	HSD_ProcessOnlyEnabledArrays	Si	Process only enabled arrays
15	HSD_ProcessOnlyEnabledImages	Si	Process only enabled images
16	HSD_SunIrradianceDataFormat	Si	Sun irradiance data format
17	HSD_SunIrradianceFile	Si	Sun irradiance CSV file: date(yyyy-MM-dd);time(hh:mm:ss);panel;value
18	HSD_SunIrradianceFileOffsetToUTC	Si	Offset to UTC from time in file, example: -02:00:00 (hh:mm:ss)
19	HSD_SunIrradianceValue	Si	Value of Sun irradiance, W/m2, for input data format value and default value. 0 for ignore normalization

Figura 115. Parámetros del proceso de detección de anomalías fotovoltaicas, hot spots

- **HSD_AlgorithmHotSpotsDetection**.- Se utiliza para indicar el método para que un píxel o región sea considerado hot spot, pudiendo optar entre que la diferencia (delta) o el valor (thresholds) supere un valor establecido en otro parámetro. En el ejemplo de este caso de uso, siguiendo las indicaciones de técnicos de Eiffage, se ha elegido la opción de diferencia.

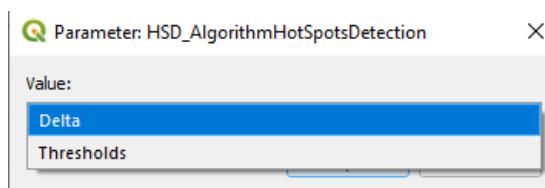


Figura 116. Elección del criterio para detección de hot spot

- **HSD_AlgorithmHotSpotsDetection_DeltaValue**.- Se utiliza para establecer el valor de temperatura para el método elegido, una diferencia o un umbral absoluto. En el caso del ejemplo se ha elegido un valor de delta de 10 °C, de nuevo siguiendo las indicaciones de técnicos de Eiffage. Este valor puede depender del tipo de anomalía a detectar.
- **HSD_MinimumDeltaInImageValue**.- Sirve para indicar un umbral mínimo de incremento de temperatura con respecto a la media en la imagen para que se

considere hot spot. Esto es importante cuando hay imágenes en que se ha producido un salto de temperatura y todos sus píxeles presentan valores altos, sirviendo este parámetro para que se ignoren. Adviértase, que de acuerdo al cálculo de huellas de arrays de paneles sobre las imágenes térmicas, y al algoritmo empleado para el caso de los paneles, esta media no es con respecto a la totalidad de la imagen sino a la parte de la imagen donde se observa el array de paneles o el panel para el que se produciría la aparición del hot spot.

- **HSD_ImageClusterDistance.-** Se utiliza para establecer la máxima separación existente en el sistema imagen entre píxeles para agruparlos como un mismo hot spot, habiéndose elegido un valor de 3, por el posible efecto de afección entre celdas contiguas, valor que en distancia dependería del GSD, que además varía, no sólo entre imágenes sino en el interior de cada imagen.
- **HSD_ClusterDistance.-** Se utiliza para definir la máxima separación en el espacio objeto entre hot spots para agruparlos como una única entidad, con un valor establecido en 45 cm, que vendría a corresponder a la dimensión de unas tres celdas fotovoltaicas, que tienen unos 15 cm de lado. Este parámetro puede depender del tipo de patología a detectar.
- **HSD_InputDistancesImagesSuffix.-** Sirve para indicar el sufijo de las imágenes donde para cada píxel se expresa la distancia al objeto, obtenida en un paso anterior de cálculo de datos para correcciones. Recordando el método de almacenamiento empleado en estas imágenes, el valor de la distancia en metros para cada píxel se obtiene dividiendo por dos el valor el nivel digital, con una precisión de 0.5 m, suficiente para la corrección a aplicar.
- **HSD_InputEmissivityImagesSuffix.-** Sirve para indicar el sufijo de las imágenes donde para cada píxel se expresa la emisividad, obtenida en un paso anterior de cálculo de en función de distancia, ángulo de observación, etc.
- **HSD_InputImagesSuffix.-** Sirva para indicar el sufijo de las imágenes con los valores corregidos de temperatura, proceso realizado en un paso anterior.
- **HSD_InputTemperatureEquation.-** Sirve para indicar la expresión a aplicar para obtener la temperatura en grados centígrados a partir del valor leído en la imagen de 16 bits de temperatura corregida. En este caso el valor es $x/100.$, debido a que

las temperaturas se han almacenado en las imágenes multiplicadas por 100, tal y como se ha descrito en el apartado 4.3

- **HSD_InputViewAnglesImagesSuffix.**- Sirve para indicar el sufijo de las imágenes donde para cada píxel se expresa el ángulo que forma el rayo de observación con la normal al panel en el punto observado, obtenida en un paso anterior de cálculo de datos para correcciones. Recordando el método de almacenamiento empleado en estas imágenes, el valor del ángulo en grados sexagesimales para cada píxel se obtiene dividiendo por dos el valor el nivel digital, con una precisión de 0.5 DEG, suficiente para la corrección a aplicar.
- **HSD_MinimumNumberOfImages.**- Sirve para establecer el mínimo número de imágenes en que se tiene que detectar el incremento de temperatura (o temperatura superior al umbral absoluto, en su caso según el criterio elegido) en el área de un píxel para que sea considerado realmente un hot spot, establecido en 2. El propósito es evitar falsos positivos que aparecen sólo en una imagen.
- **HSD_OutputImagesSuffix.**- Se utiliza para asignar el sufijo para las imágenes máscara creadas con los hot spots detectados, correspondientes a cada imagen y array, por su utilidad en procesos de depuración de errores.
- **HSD_ProcessOnlyEnabledArrays.**- Sirve para indicar que solamente se deben procesar los arrays de paneles habilitados, aquellos que tienen un valor 1 en el atributo *enabled* de la base de datos, ignorando aquellos que tienen un valor de 0 en dicho atributo.
- **HSD_ProcessOnlyEnabledImages.**- Sirve para indicar que solamente se deben procesar las imágenes habilitadas del proyecto fotogramétrico térmico, aquellas que tienen un valor 1 en el atributo *enabled* de la base de datos, ignorando aquellas que tienen un valor de 0 en dicho atributo.
- **HSD_SunIrradianceDataFormat.**- Se utiliza para establecer el tipo de información disponible para la irradiancia solar en el instante de captura de las imágenes térmicas, pudiendo optarse por un fichero que recoge una serie temporal sobre la que interpolar, caso de este ejemplo, o disponer únicamente de un valor constante para todo el vuelo.
- **HSD_SunIrradianceFile.**- Sirve para elegir el fichero de serie temporal de irradiancias, con un formato CSV muy sencillo explicado en la propia descripción

del parámetro, consistente en que cada línea corresponde a un dato, incluyendo la fecha, hora e irradiancia solar en W/m², y que se resumen en la siguiente imagen:

364	2019:05:15;13:03:00;0;	878, 976563
365	2019:05:15;13:04:00;0;	897, 984375
366	2019:05:15;13:05:00;0;	909, 421875
367	2019:05:15;13:06:00;0;	926, 015625
368	2019:05:15;13:07:00;0;	930, 1875
369	2019:05:15;13:08:00;0;	912, 304688
370	2019:05:15;13:09:00;0;	936, 421875
371	2019:05:15;13:10:00;0;	902, 226563
372	2019:05:15;13:11:00;0;	899, 484375
373	2019:05:15;13:12:00;0;	926, 320313
374	2019:05:15;13:13:00;0;	904, 710938
375	2019:05:15;13:14:00;0;	860, 695313
376	2019:05:15;13:15:00;0;	849, 328125

Figura 117. Ejemplo de fichero de serie temporal de irradiancia solar

- **HSD_SunIrradianceFileOffsetToUTC.**- Se utiliza para indicar el offset a aplicar para convertir en UTC el tiempo registrado en el fichero de serie temporal de irradiancias.
- **HSD_SunIrradianceValue.**- Se utiliza para indicar el valor constante de irradiancia a considerar para todas las imágenes térmicas, cuando no se dispone de un fichero de serie temporal de esta variable. El valor de este parámetro se ignora si se ha elegido usar un fichero.

A continuación, se describen los pasos que realiza el algoritmo.

1. Sólo en la primera ejecución de este algoritmo, se realizan algunas actualizaciones en el modelo de la base de datos para almacenar los resultados del proceso:
 - a. Se actualiza la tabla *classes* para incluir una nueva clase que representa a la anomalía, el hot spot.
 - b. Se crea la tabla *pv_anomalies*, donde se almacenará la información de cada anomalía de un array de paneles. El tipo de geometría es puntual, y representa la proyección sobre el array de paneles del punto medio del

conjunto de píxeles de todas las imágenes en que aparece la patología. Esta geometría permite ubicar la anomalía en el CRS del proyecto.

- c. Se crea la tabla *images_pv_anomalies*, donde se almacenará la información de cada anomalía de un array de paneles en cada una de las imágenes en las que aparece. El tipo de geometría es multipolígono, formado por la geometría de los píxeles en coordenadas imagen, de forma que permita representar el recinto en la imagen donde aparece la patología.
 - d. Se crea la tabla *pv_anomalies_panels*, similar a la tabla *pv_anomalies*, pero para almacenar las anomalías detectadas en paneles.
 - e. Se crea la tabla *images_pv_anomalies_panels*, similar a la tabla *images_pv_anomalies*, pero para almacenar la información por imagen y anomalía en panel.
2. Se determinan dos conjuntos de píxeles que presentan anomalía por imagen: uno por array de paneles y otro por panel. Para determinar si presentan anomalía se utiliza el criterio elegido por el usuario, que la diferencia frente al valor del array de paneles o panel supere un umbral (caso elegido en este ejemplo) o que la temperatura supere un umbral absoluto, normalizando en ambos casos para la irradiancia de referencia. Para cada conjunto de píxeles se almacena toda la información a utilizar posteriormente: valores de los píxeles (diferencia o temperatura absoluta), posición en coordenadas píxel, ángulo de vista, distancia, emisividad, y resto de valores cuyas estadísticas han de almacenarse en la base de datos. Este paso del algoritmo se realiza en varios bucles anidados. El bucle más externo itera sobre las imágenes. Dentro de la iteración para cada imagen, se realiza un segundo bucle que itera sobre los arrays de paneles que se observan en la imagen, accediendo a los valores correctos por lectura de los ficheros de las imágenes de temperatura corregida, generadas en un proceso anterior, al igual que otros datos por píxel, como el ángulo de vista, la distancia y la emisividad, leídos de los ficheros de imagen correspondientes. Cuando en un píxel se detecta anomalía, para determinar el panel en que se encuentra se utiliza el algoritmo directo de fotogrametría, resuelto en el CRS ENU de la imagen, según un procedimiento similar al descrito en 4.2, empleando todos los parámetros de orientación de la imagen y la geometría tridimensional de los paneles del array de

paneles. Se generan ficheros de imágenes con los puntos calientes detectados por imagen y array de paneles, a modo de máscara, con el propósito de facilitar la depuración de errores.

3. A continuación, para cada uno de los dos conjuntos de píxeles por imagen, se obtienen dos tipos de agrupaciones (clusters) por imagen: uno por array de paneles y otro por panel, en función del criterio de distancia en píxeles elegido por el usuario, parámetro HSD_ImageClusterDistance, con un valor de 3 en el ejemplo, de manera que estarán en la misma agrupación todos los píxeles conectados por una distancia en píxeles igual o inferior a 3 píxeles. Cada una de estas agrupaciones es candidata a representar una anomalía diferente, un hot spot, pero pueden ser agrupadas posteriormente en el espacio objeto. Para cada agrupación, por array de paneles y por panel, se calculan y almacenan el número de píxeles y las estadísticas (valor medio, mínimo, máximo y desviación típica) del valor que genera la anomalía (diferencia o temperatura absoluta), del ángulo de vista, de la emisividad y de la distancia. También se calcula su geometría como multipolígono en coordenadas imagen, así como la posición media en coordenadas imagen y su proyección en el espacio objeto.
4. En el siguiente paso se determinan las anomalías por array de paneles y por paneles. Para ello, se buscan las agrupaciones por criterio espacial en el espacio objeto, parámetro HSD_ClusterDistance, con un valor de 45 cm en el ejemplo, a partir todas las agrupaciones para el array de paneles o panel cuyos puntos centrales se conectan con distancia igual o inferior a la elegida. Para cada anomalía, por array de paneles y panel, se calculan las estadísticas por imagen, en base a las estadísticas por imágenes de las agrupaciones que la integran, y las estadísticas globales.
5. Finalmente, se almacenan todos los resultados en la base de datos, en las cuatro tablas creadas a tal efecto. La información persiste en memoria y es leída en una nueva apertura del proyecto.

4.5. AVANCES EN LA AUTOMATIZACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS PROCEDENTE DEL PROYECTO FOTOGRAMÉTRICO DEL VUELO VISIBLE Y EN LA INTEGRACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE EDICIÓN 2D Y 3D EN UN SOFTWARE LIBRE (QGIS)

4.5.1. INTRODUCCIÓN

Tal y como ha quedado justificado a lo largo de la exposición de este trabajo, la calidad de los resultados finales, de la estimación de los hot spots, está condicionada, entre otros factores, a la calidad de la estimación de la geometría tridimensional de los arrays de paneles y paneles, que a su vez depende de la calidad de los modelos digitales de elevaciones generados a partir de los proyectos fotogramétricos de los vuelos realizados con cámara en el visible. Además, un reto importante de este proyecto es conseguir la mayor automatización posible, lo que ha llevado a desarrollar algoritmos robustos, no afectados de errores groseros.

Los modelos digitales de elevaciones obtenidos por fotogrametría con las herramientas informáticas actuales, entre las que se incluye el programa comercial Agisoft Metashape empleado por Eiffage en este proyecto, utilizan algoritmos de correlación densa que generan unos resultados cuya calidad depende de muchos factores, entre los que destacan: la calidad de las imágenes, los resultados de orientación, las estrategias de multicorrelación para elegir geometrías más favorables, etc. La acumulación de fuentes de error se traduce en la aparición de puntos de posición errónea, habitualmente denominados puntos de ruido, siendo especialmente conflictivos, en el contexto de este trabajo, aquellos que afectan a la modelización del terreno, puntos que resultan por debajo de la superficie del mismo, y a la modelización de las placas solares, puntos que resultan por encima de las mismas o que conectan las placas con construcciones cercanas. Otro problema importante de las nubes de puntos densas obtenidas por correlación es su gran tamaño, que para el ejemplo de este trabajo se corresponde con un fichero de 10 Gbytes en formato LAS, incluyendo más de 410 millones de puntos, con una densidad media de 1600 ptos/m² para vuelo con un GSD de unos 0.025 m. En el contexto de este trabajo, donde el terreno presenta muy pocos cambios de pendiente, y donde la forma de los objetos de

interés, las placas fotovoltaicas, presentan las formas paramétricas más sencillas, planos, la gran mayoría de estos puntos carecen de interés ya que sólo aportan información redundante. Las siguientes figuras ilustran los problemas apuntados.

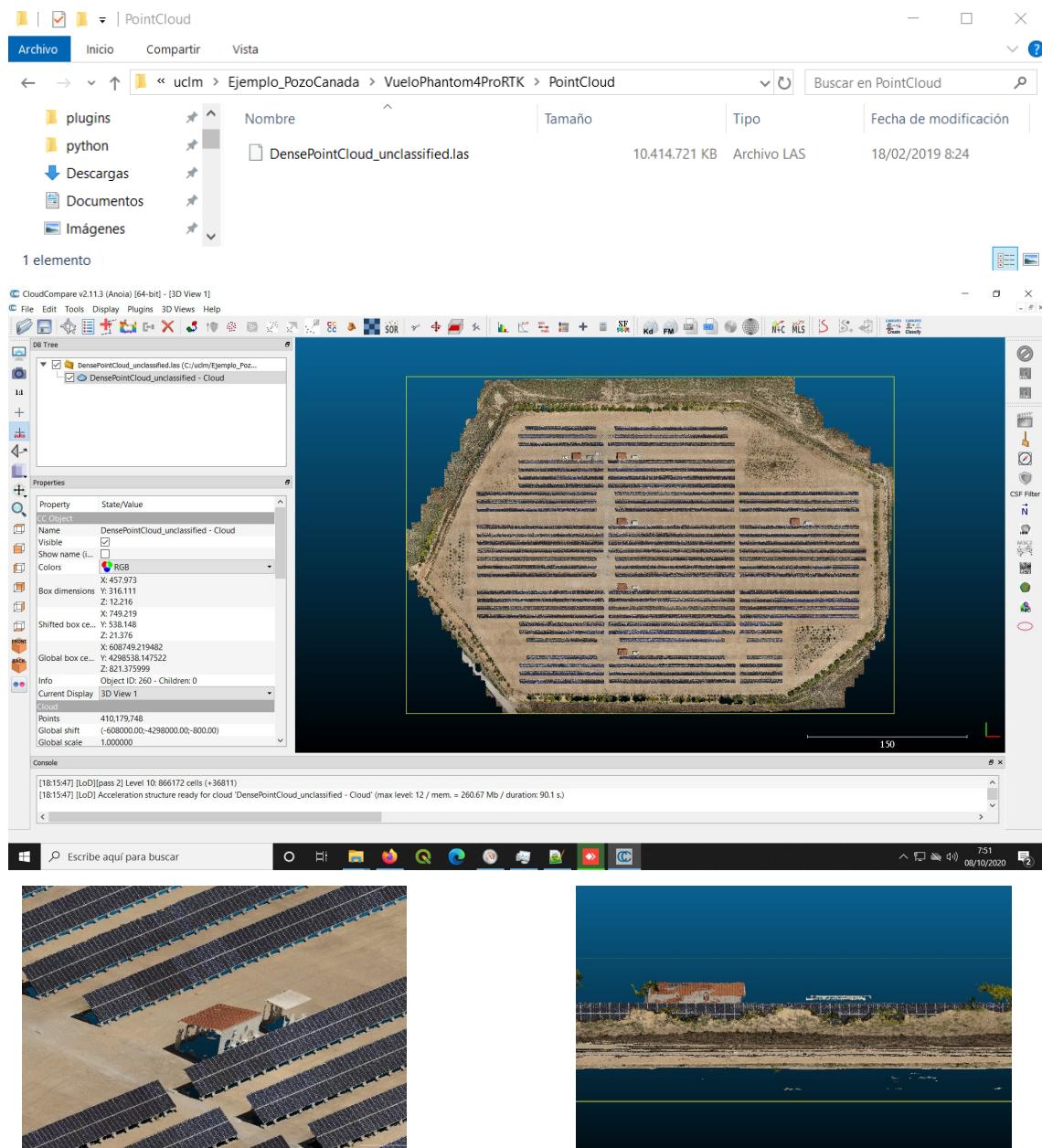


Figura 118. Problemas de las nubes densas resultantes de la correlación en el proyecto fotogramétrico de la cámara visible

En consecuencia, se plantea la necesidad de dotar a Eiffage de herramientas para generar nubes de puntos optimizadas para el objeto de este proyecto. Estas herramientas deben permitir abordar un proceso lo más automático posible y deben ser lo más rentables posibles, en base a criterios económicos y de rendimiento. La opción elegida es una combinación de LASTOOLS y el desarrollo de herramientas de edición, 2D y 3D, en QGIS, integradas en el componente *point_cloud_tools*

desarrollado para QGIS. LASTOOLS es un desarrollo de software con una variante de software libre, como librería C++ utilizada en los desarrollos, y un conjunto de programas ejecutables a modo de herramientas que tiene versión libre limitada por la cantidad de puntos a procesar y una versión comercial para trabajos de producción, solución esta última que encaja en este proyecto. Durante el desarrollo se ha usado una licencia adquirida por la UCLM y Eiffage debería adquirir su propia licencia en el momento del despliegue en producción.

A continuación, se describen los avances en esta cuestión en base a la explicación del uso del componente desarrollado en el ejemplo del caso de uso de este trabajo.

4.5.2 OPTIMIZACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS DENSA

El problema de la optimización de la nube de puntos densa derivada de fotogrametría en diferentes tipos de escenarios es muy importante y ha llevado al autor de LASTOOLS a integrar en la documentación de esta herramienta diferentes experiencias de usuarios, recogidas en la url:

<https://rapidlasso.com/category/photogrammetry/>

En estas experiencias se apuntan soluciones basadas en el encadenamiento de procesos parametrizados en función de las características particulares de cada aplicación. Para facilitar a los usuarios, técnicos de Eiffage en este caso, se ha diseñado una herramienta basada en comandos adaptadas a cada tipo de escenario contemplados en el proyecto, contemplándose uno en particular para los parques solares, y otro para líneas de alta tensión que no se describe en este documento. Cada comando incluye la selección de unas entradas (ficheros, CRS, etc), una secuencia encadenada de programas de LASTOOLS, parametrizados convenientemente, y unas salidas. La solución desarrollada permite editar y particularizar, en caso de ser necesario, tanto los procesos como sus parámetros.

En la siguiente figura se muestra el componente en QGIS. Para la aplicación de procesos basados en LASTOOLS no es necesario crear un proyecto de este componente, lo que sí es necesario para el caso de abordar la edición, tal y como se explica en un apartado posterior, siendo suficiente con acceder a la pestaña *Processing Tools*.

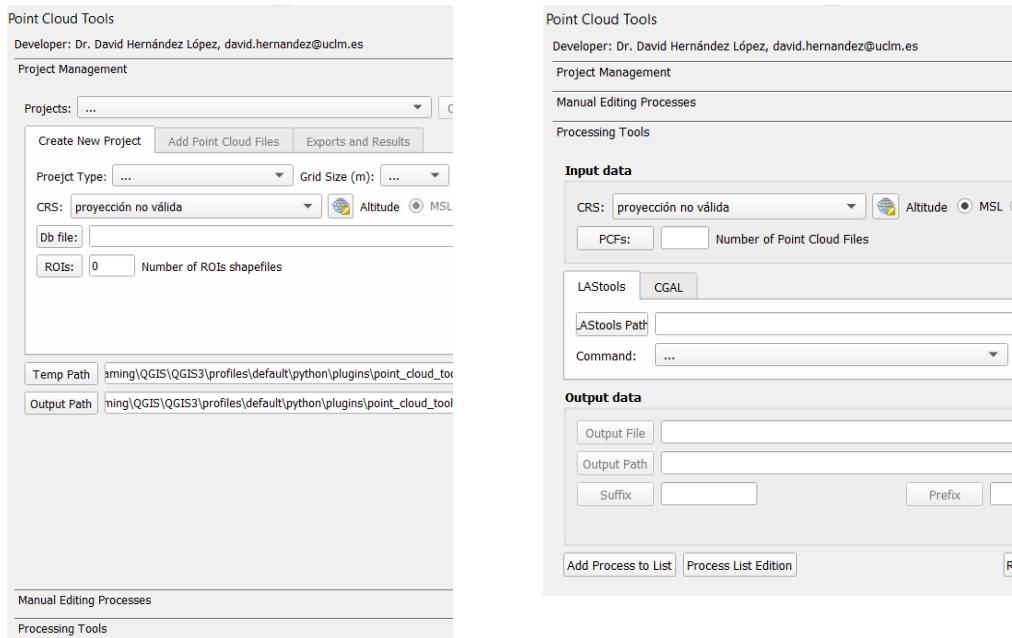


Figura 119. Interfaz Points Cloud Tools: Project Magnament y Point Cloud Tools

Tras elegir el CRS, los ficheros de nubes de puntos de partida (sólo el de la nube densa en este caso), la ruta de instalación de LASTTOOLS y el comando que se desea procesar, se pulsa en el botón de parámetros, desplegándose un diálogo donde se pueden elegir los parámetros del comando elegido, tal y como ilustra la siguiente figura.

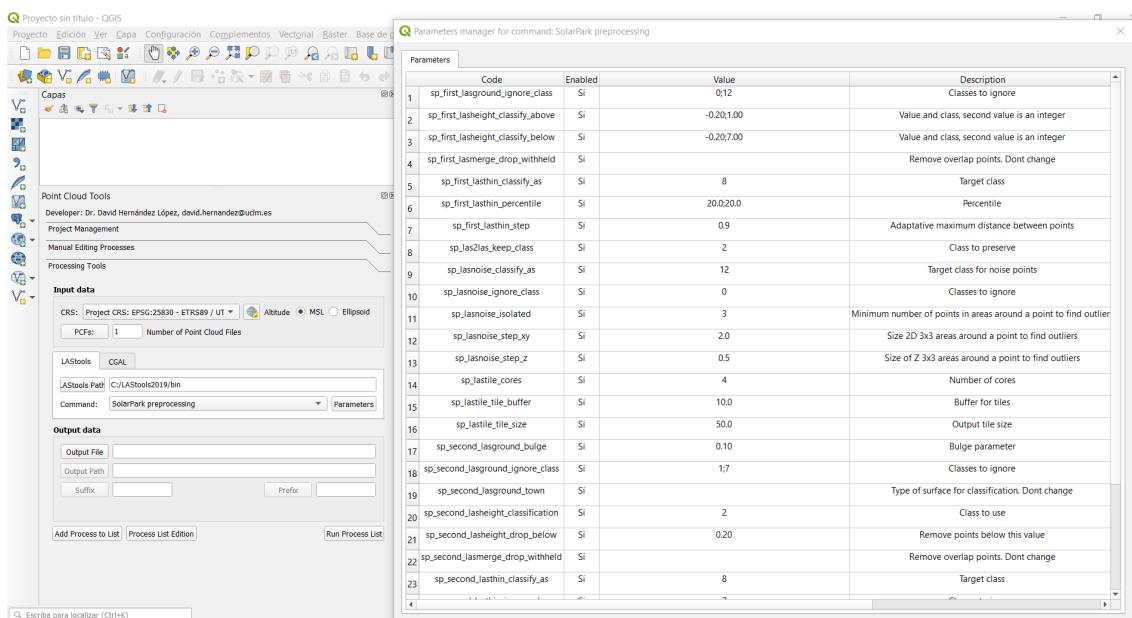


Figura 120. Parámetros de configuración del proceso para la optimización de la nube de puntos de un parque solar

Tras seleccionar el fichero de salida, en el formato comprimido LAZ en este caso, dado que este comando únicamente tiene un fichero como resultado, se añade

los procesos del comando a la lista de procesos, que puede ser editada, completada, etc, tal y como ilustra la siguiente figura.

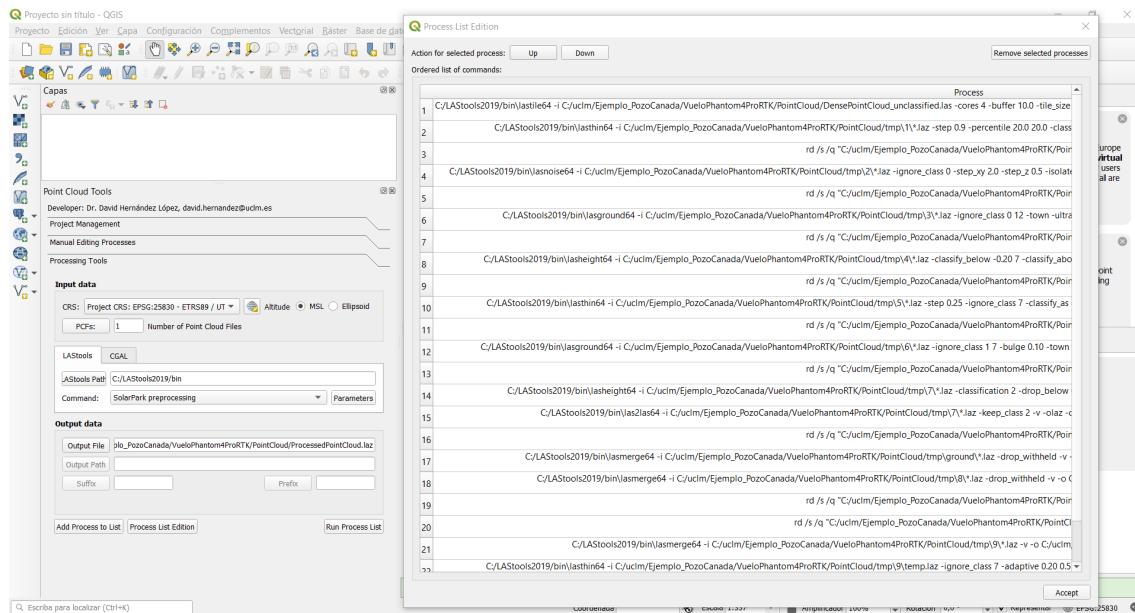


Figura 121. Ejemplo de lista de procesos de Points Cloud Tools

Una vez que se ha finalizado la definición de la lista de procesos, tras pulsar en el botón *Run Process List*, se crea un fichero .bat en la carpeta libCpp del plugin de QGIS:

C:\Users\PCNuevo\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\point_cloud_tools\libCpp\temp.bat

y se lanza su ejecución, que puede ser seguida en un diálogo que se despliega, tal y como ilustra la siguiente figura.

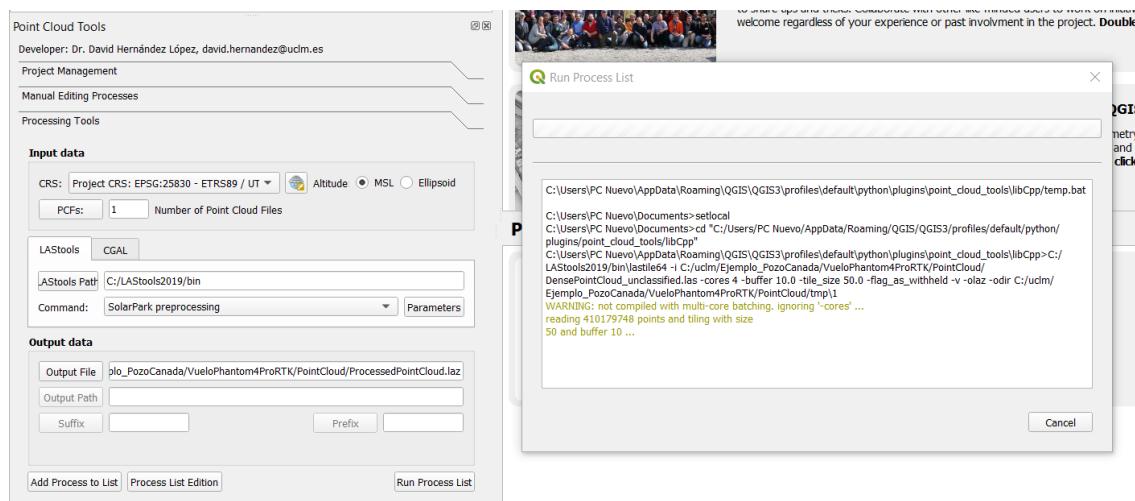
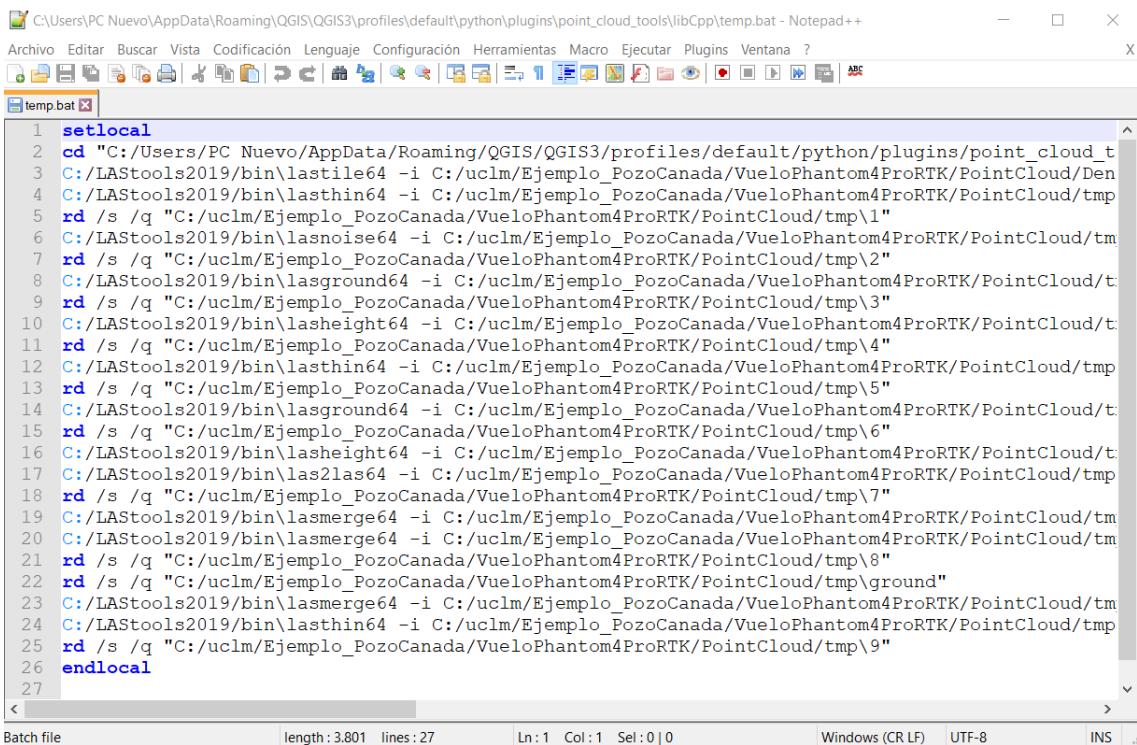


Figura 122. Ejecución de lista de procesos de Points Cloud Tools



```

C:\Users\PC Nuevo\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\point_cloud_tools\libCpp\temp.bat - Notepad+++
Archivo Editar Buscar Vista Codificación Lenguaje Configuración Herramientas Macro Ejecutar Plugins Ventana ?
temp.bat x
temp.bat
1 setlocal
2 cd "C:/Users/PC Nuevo/AppData/Roaming/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins/point_cloud_t
3 C:/LASTools2019/bin\lastile64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/Den
4 C:/LASTools2019/bin\lasthin64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp
5 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\1"
6 C:/LASTools2019/bin\lasnoise64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tm
7 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\2"
8 C:/LASTools2019/bin\lasground64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/t
9 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\3"
10 C:/LASTools2019/bin\lasheight64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/t
11 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\4"
12 C:/LASTools2019/bin\lasthin64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp
13 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\5"
14 C:/LASTools2019/bin\lasground64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/t
15 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\6"
16 C:/LASTools2019/bin\lasheight64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/t
17 C:/LASTools2019/bin\las2las64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp
18 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\7"
19 C:/LASTools2019/bin\lasmerge64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tm
20 C:/LASTools2019/bin\lasmerge64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tm
21 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\8"
22 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\ground"
23 C:/LASTools2019/bin\lasmerge64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tm
24 C:/LASTools2019/bin\lasthin64 -i C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp
25 rd /s /q "C:/uclm/Ejemplo_PozoCanada/VueloPhantom4ProRTK/PointCloud/tmp\9"
26 endlocal
27

```

Batch file length : 3.801 lines : 27 Ln : 1 Col : 1 Sel : 0 | 0 Windows (CR LF) UTF-8 INS

Figura 123. Ejemplo de fichero .bat de ejecución de lista de procesos

En el proceso se van creando carpetas y ficheros auxiliares que el propio proceso elimina en el momento que dejan de ser necesarios. Sin embargo, el fichero .bat no se elimina al finalizar el proceso, lo que permitiría poder corregir algún parámetro y volver a lanzarlo, total o parcialmente.

La duración del proceso completo diseñado para el escenario de parque solar depende del tamaño de la información de partida, de las características del hardware y de los parámetros elegidos, incluyendo entre ellos opciones de multiproceso. En el caso particular de este ejemplo, utilizando un PC con procesador i7, con 32 Gbytes de RAM, y procesando en un disco de estado sólido, la duración se ha prolongado durante algo menos de cuatro horas y cuarto, tal y como muestra el diálogo final incluido en la siguiente figura.

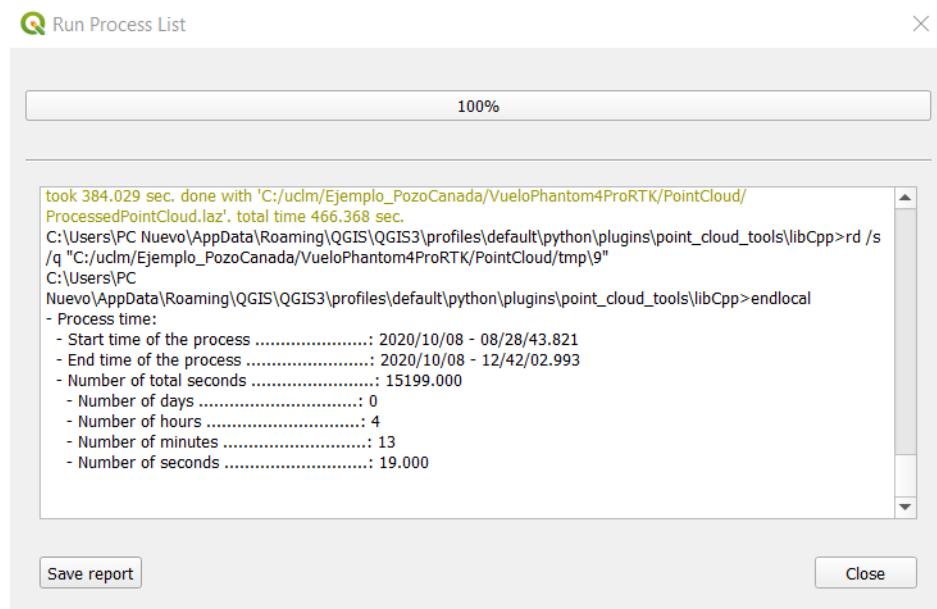
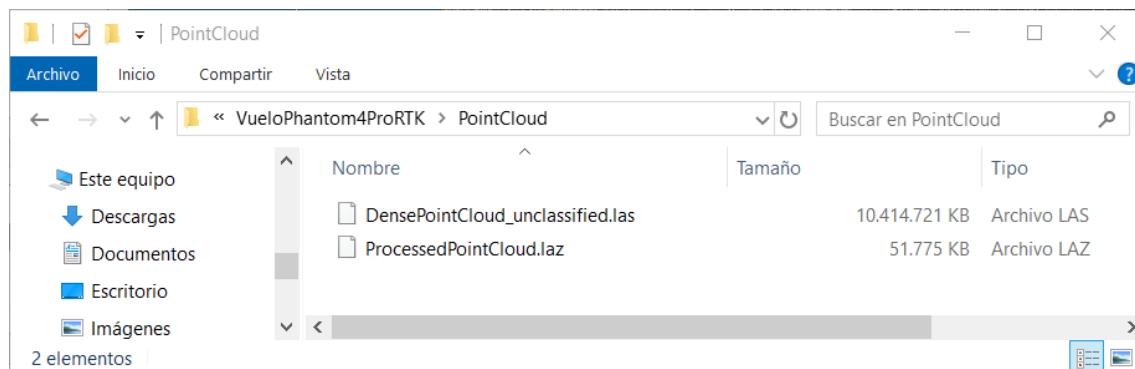


Figura 124. Información del tiempo invertido en la ejecución de una lista de procesos de Points Cloud Tools

El resultado del proceso es un fichero de nube de puntos optimizado en formato LAZ, tal y como ilustran las siguientes figuras, apreciándose que se ha pasado de 10 GBs a 52 MB, y de unos 410 millones de puntos a 5.2 millones de puntos. Además, la nube de puntos se ha clasificado, únicamente incluyendo dos clases: terreno (ground) y no clasificado (unclassified), tal y como ilustra la última de las figuras incluidas a continuación.



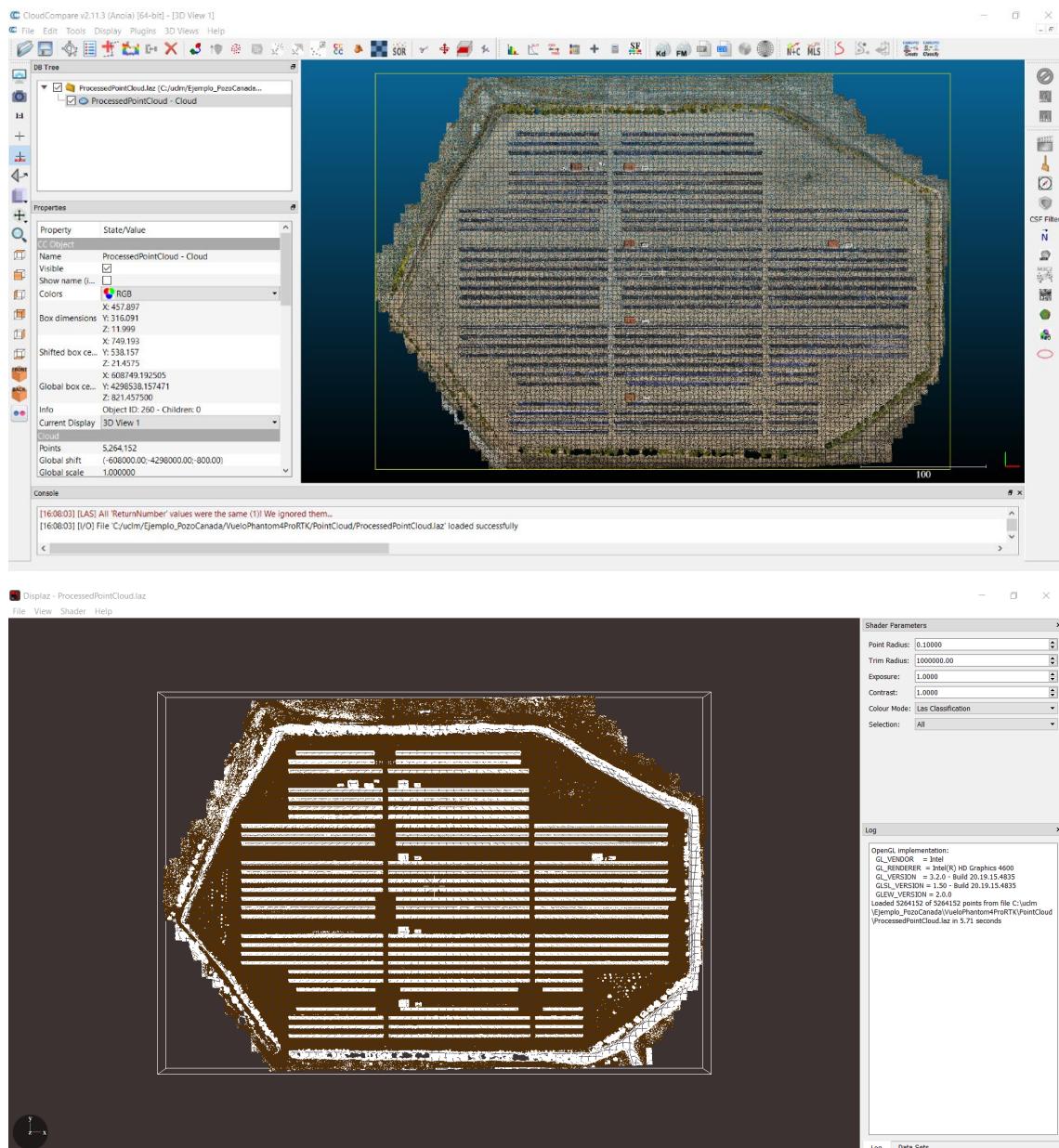


Figura 125. Resultados finales del proceso de optimización de la nube de puntos en el parque solar

4.5.3 INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS DE EDICIÓN 2D Y 3D EN QGIS

En el componente *point_cloud_tools* se debe generar un proyecto, tal y como ilustra la siguiente figura, de forma similar al caso de los componentes de proyectos fotogramétricos, *photogrammetry_tools*, y de gestión de modelos, *model_management_tools*, para lo que se debe indicar el CRS, el fichero en spatialite a crear, la definición de la ROI y un tamaño de tileado para optimizar la gestión de puntos, establecido en este caso en 10 m, tamaño muy importante ya que influye en el rendimiento de la herramienta al permitir limitar el mínimo número de puntos con el que se opera. A continuación, tras abrir el proyecto, se despliega la pestaña donde

se pueden seleccionar todos los ficheros de nubes de puntos a importar, únicamente el optimizado resultante del procesamiento anterior en este caso, y a continuación basta con pulsar en el botón *Process*, tal y como ilustra la siguiente figura.

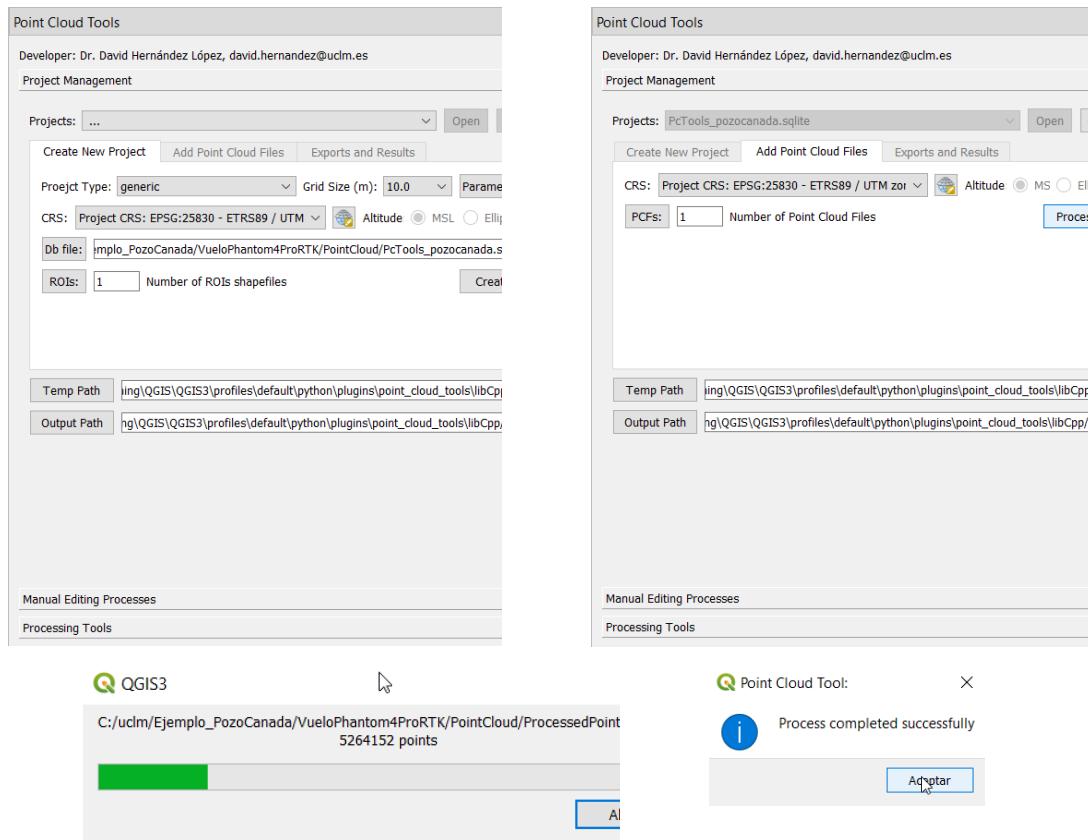


Figura 126. Construcción e inserción de nubes de puntos en un proyecto de Point Cloud Tools

En el proceso de carga de los puntos se crea una capa de tileado, con el tamaño indicado, 10 m en este ejemplo, que permite optimizar el proceso posterior de visualización y edición. En la siguiente figura se muestra la capa de tileado sobre la ortoimagen empleada en el resto del proyecto.

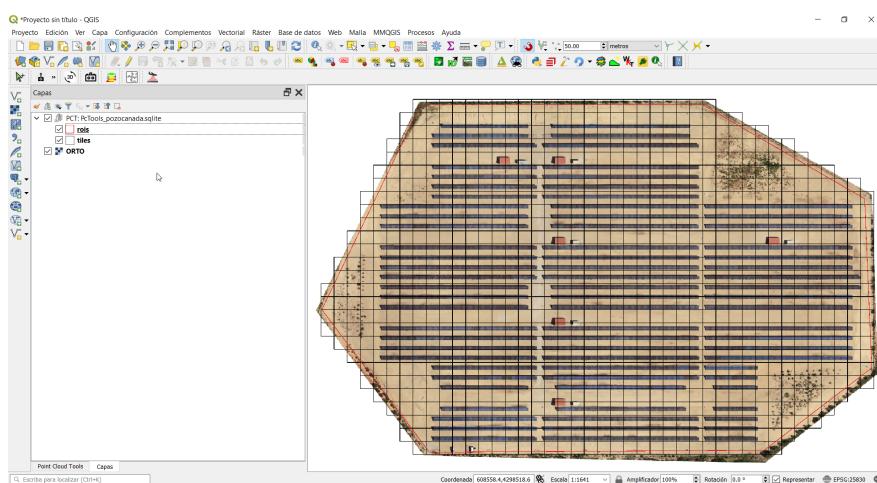
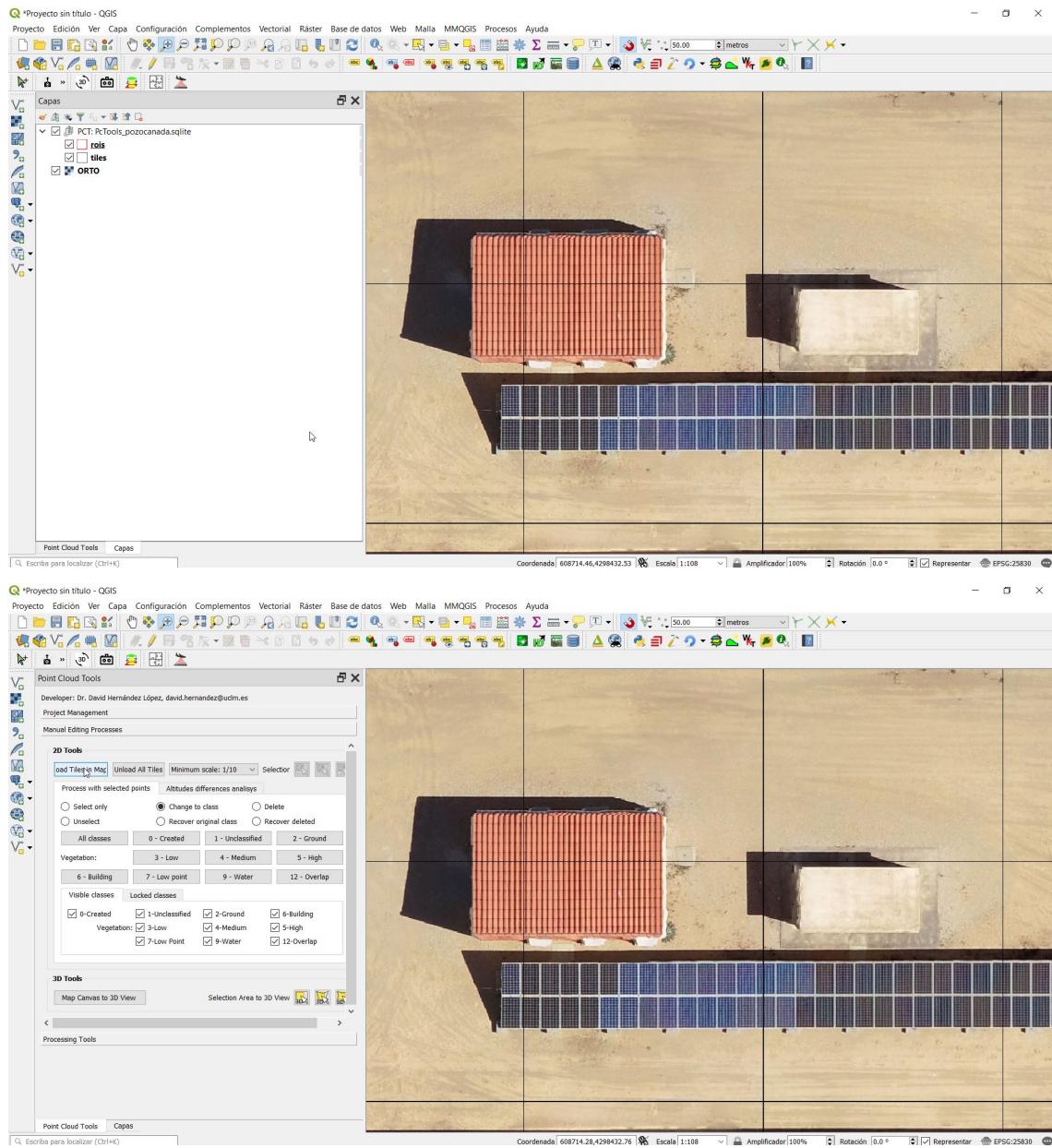


Figura 127. Visualización de capa de tileado

En la pestaña *Manual Editing Process* del complemento se incorporan herramientas para carga, visualización y edición, en 2D y en 3D. Para muchas aplicaciones es suficiente con realizar la edición desde la propia vista 2D de QGIS, apoyándose en la fotointerpretación sobre una ortoimagen, y por ello se ha dotado a la herramienta de la funcionalidad de selección y edición de puntos, incluyendo las clásicas operaciones de borrado, recuperación y cambio de clase de puntos, contemplándose incluso la opción de bloquear clases. Para optimizar la velocidad de refresco del MapCanvas de QGIS se puede actuar eligiendo la escala mínima para permitir la visualización de la nube de puntos cargados, proponiendo la herramienta una en función de la densidad de puntos media estimada. Las siguientes figuras ilustran la funcionalidad principal incluida en la carga y visualización.



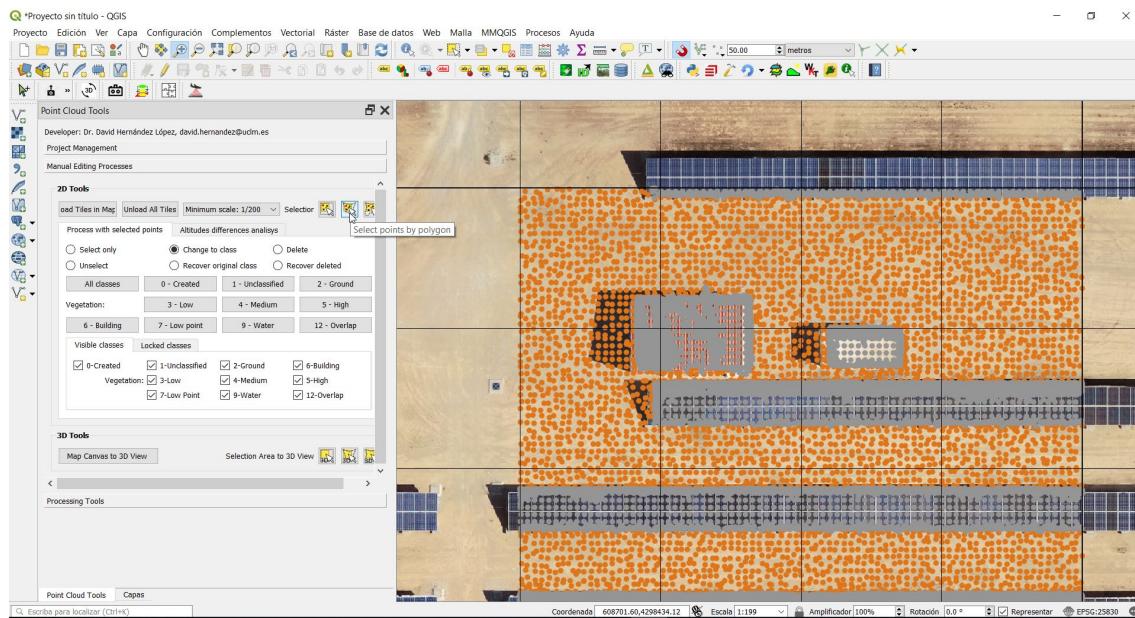


Figura 128. Visualización 2D de la nube de puntos en el MapCanvas de QGIS optimizada con control de escala

En lo que respecta a la parte 3D, primero se debe seleccionar la región que se desea cargar, contemplándose como opciones el conjunto del MapCanvas actual o una región definida por rectángulo, polígono o mano alzada. A continuación, el control pasa a un componente con un visor 3D que incluye funcionalidad similar a 2D, tal y como ilustra las siguientes figuras.

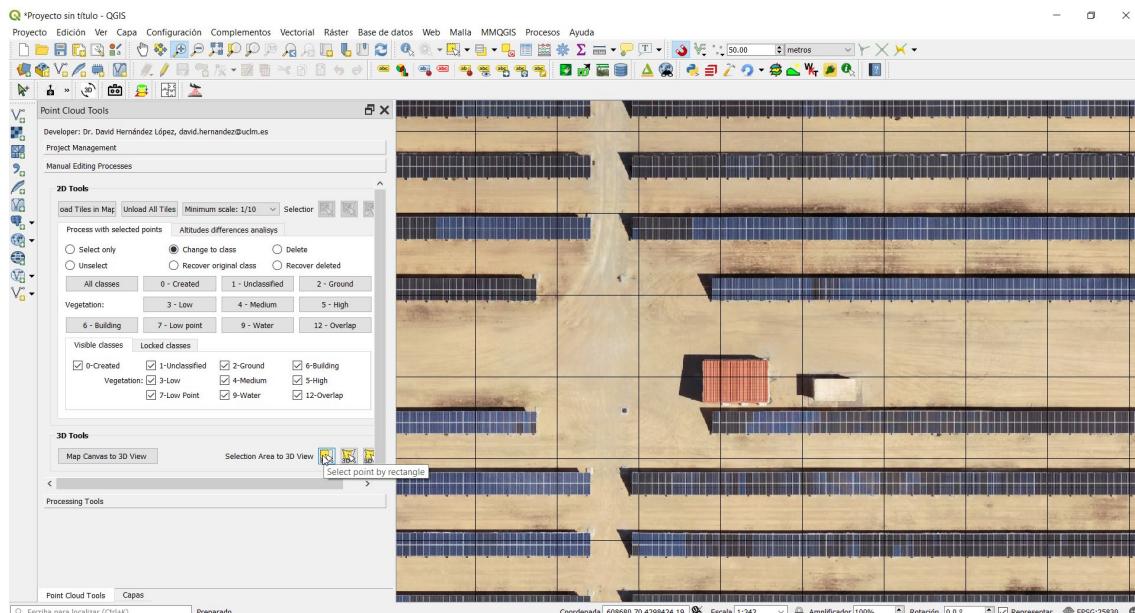


Figura 129. Selección del recinto de la nube de puntos a desplegar en el visor 3D

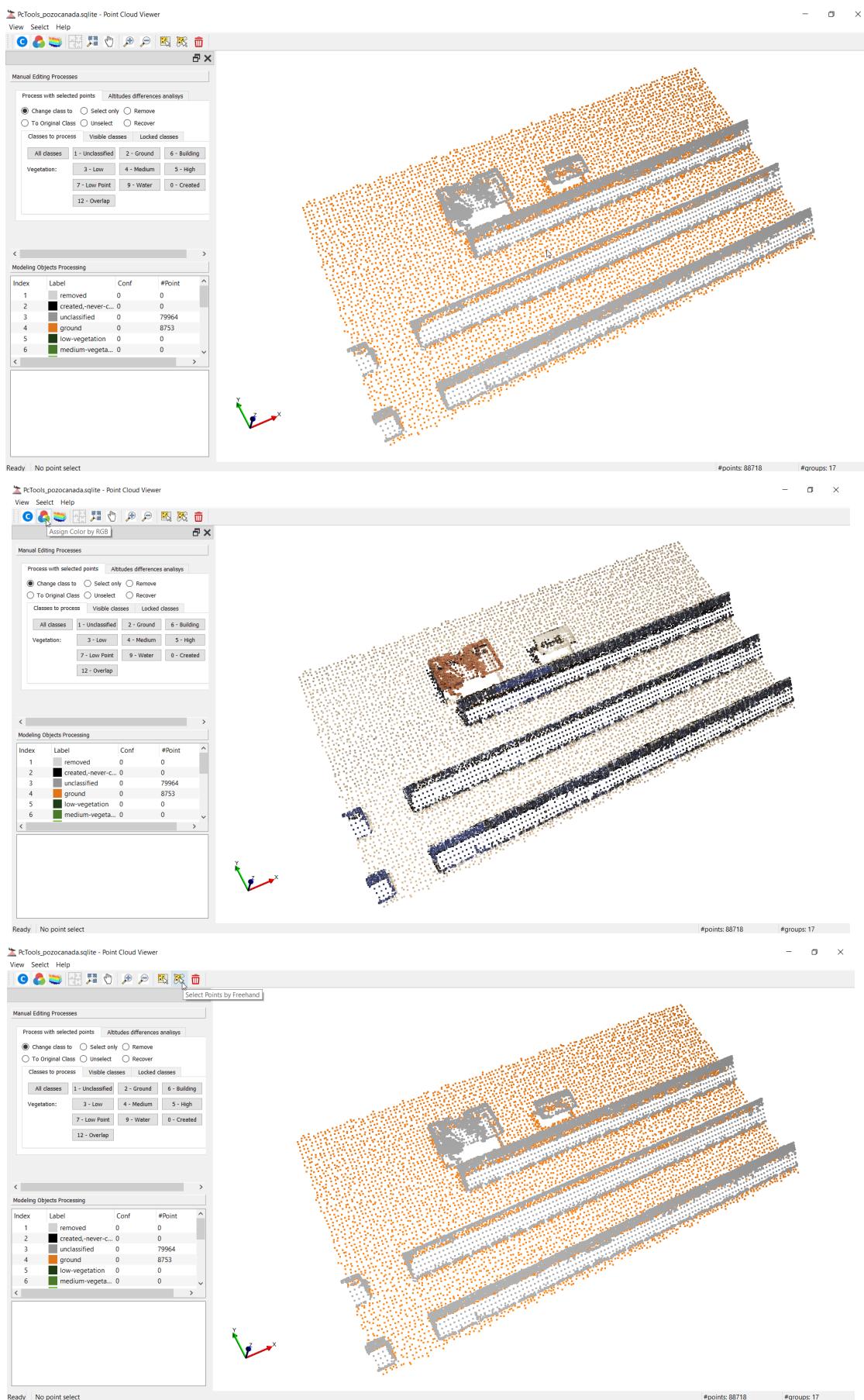


Figura 130.

Visualización 3D de la nube de puntos clasificada

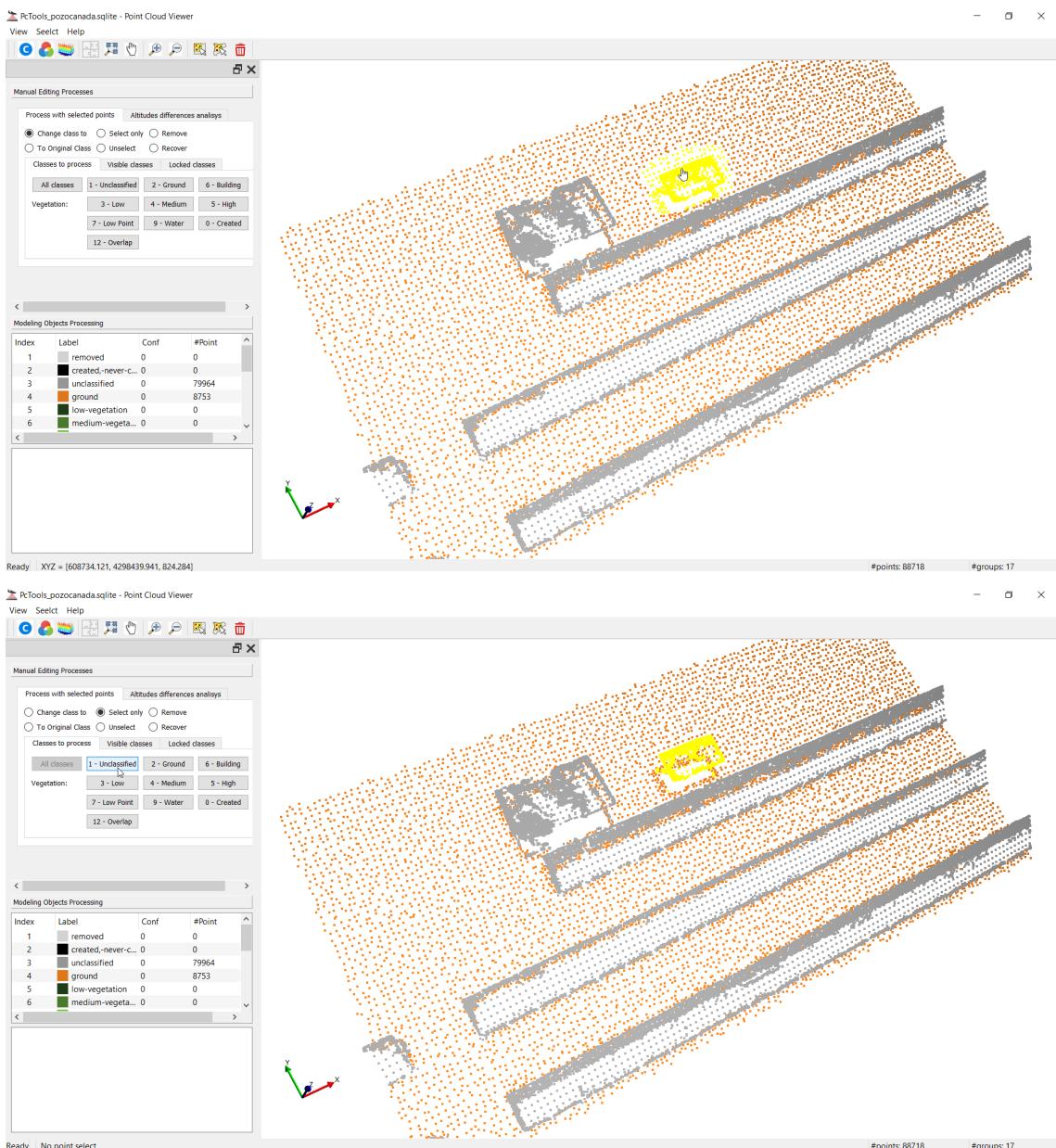


Figura 131. Operaciones 3D de selección y edición de la nube de puntos

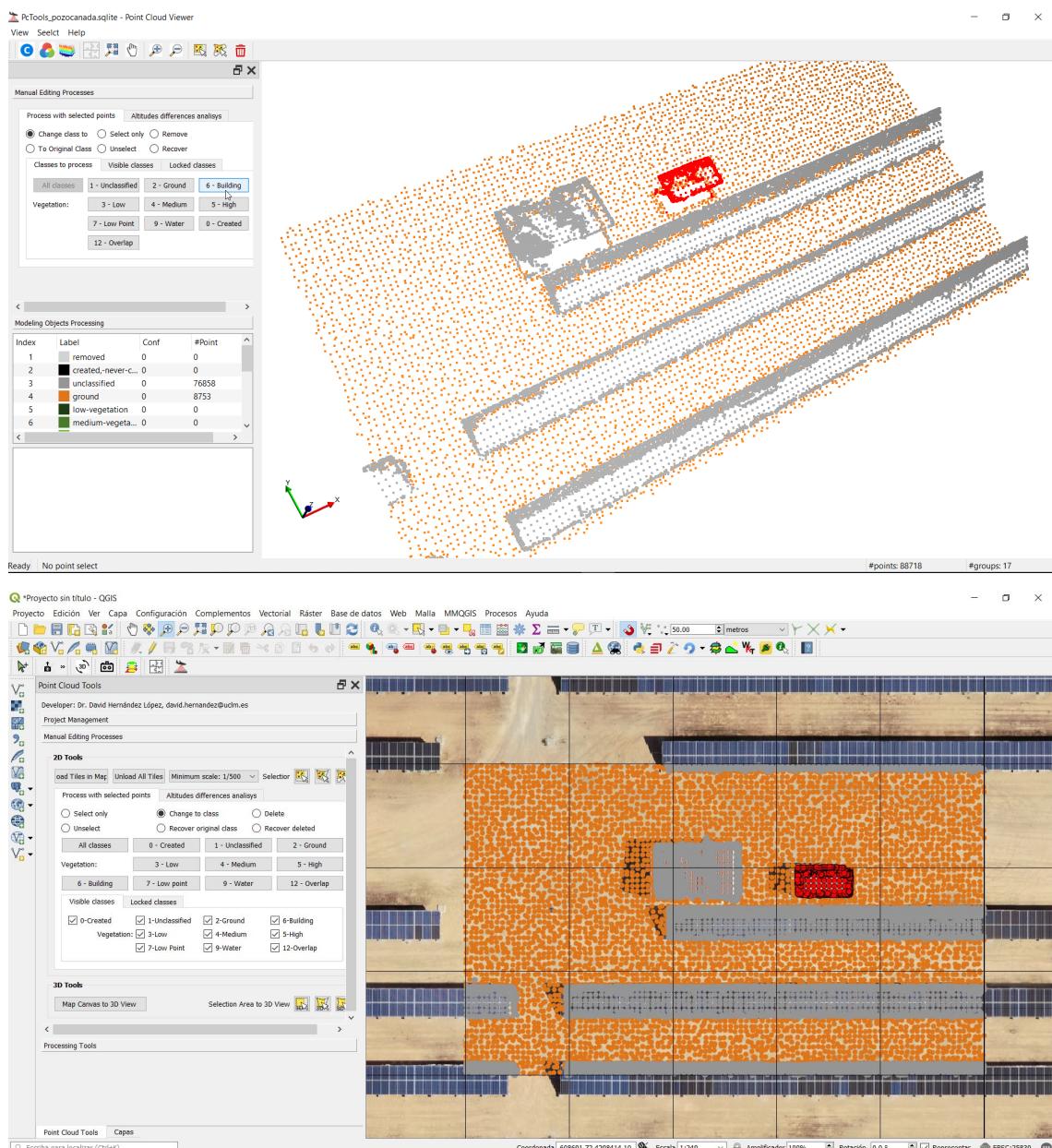
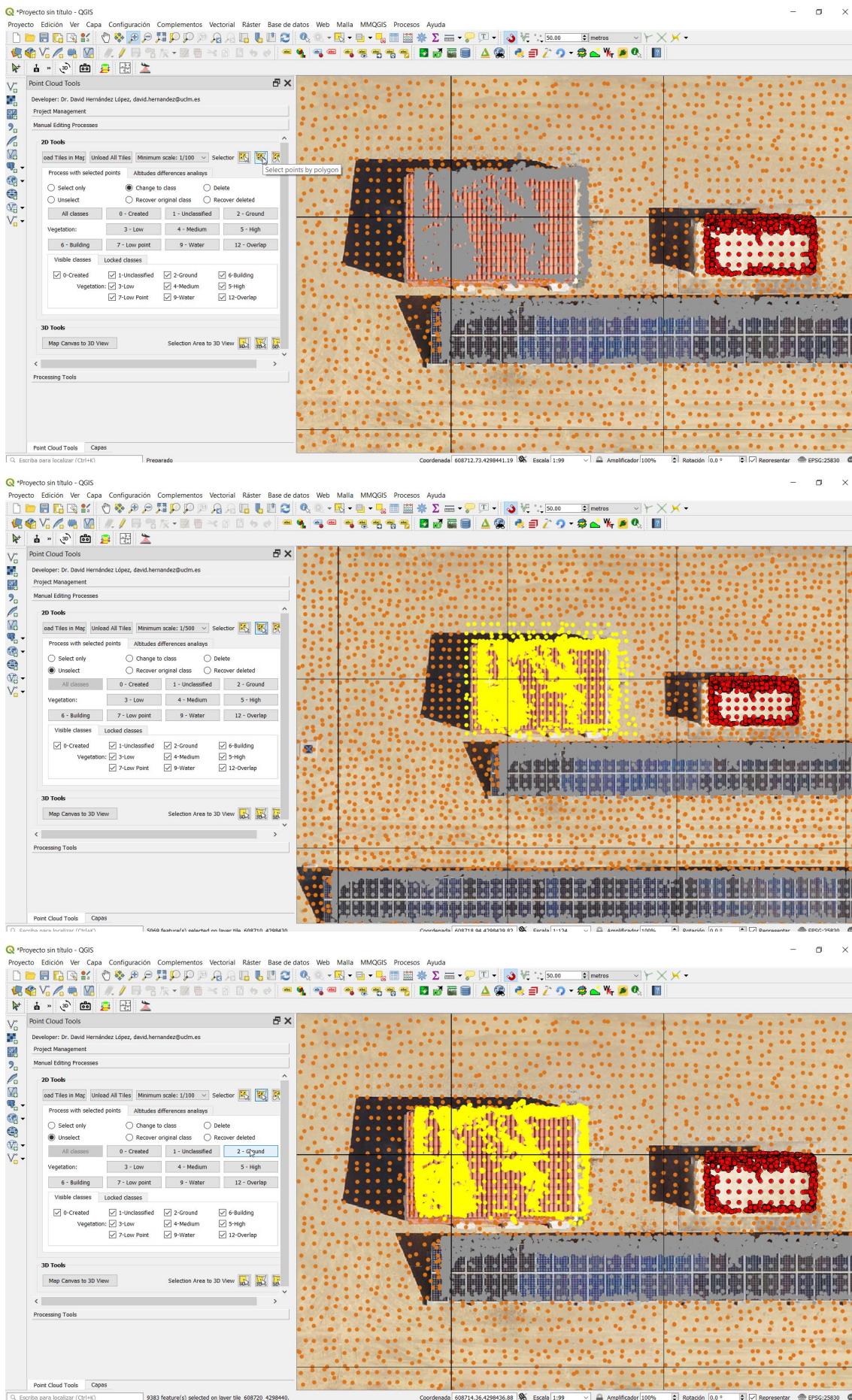


Figura 132. Vista en 2D de la reclasificación de la nube de puntos realizada en el visor 3D

La edición en 2D es similar, tal y como ilustran las siguientes figuras.



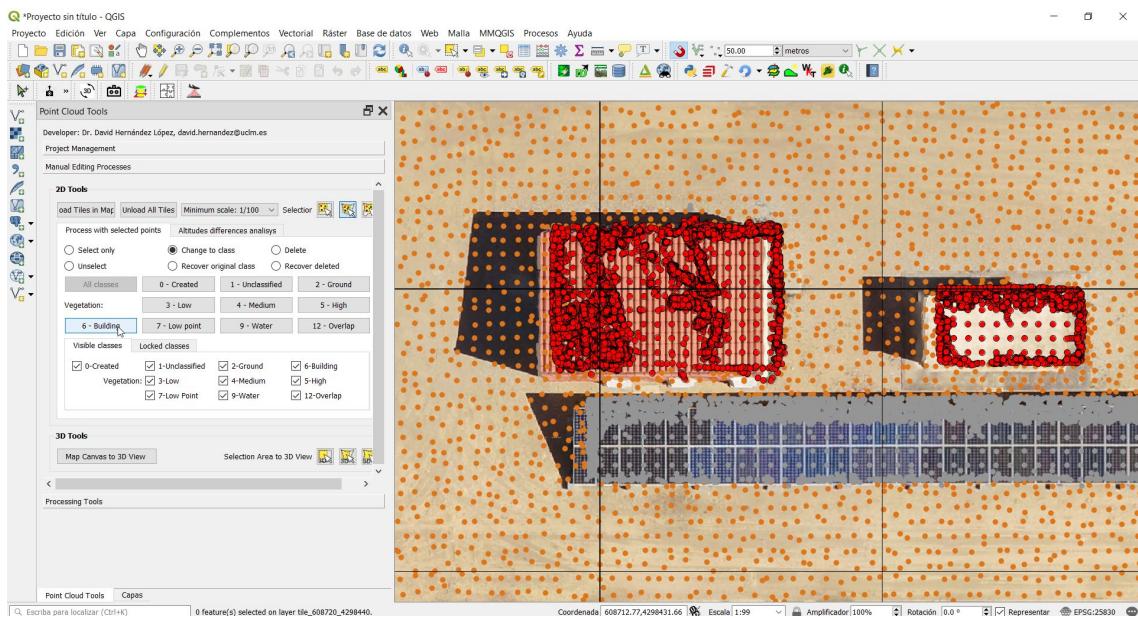


Figura 133. Operaciones de selección y edición de la nube de puntos en 2D

Una vez finalizada la edición, se procedería a exportar a los mismos ficheros que se utilizaron en la carga, o en otras versiones con una denominación que incluya el sufijo que elija el usuario, contemplándose también la opción de elegir otra carpeta de salida, tal y como ilustra la siguiente figura.

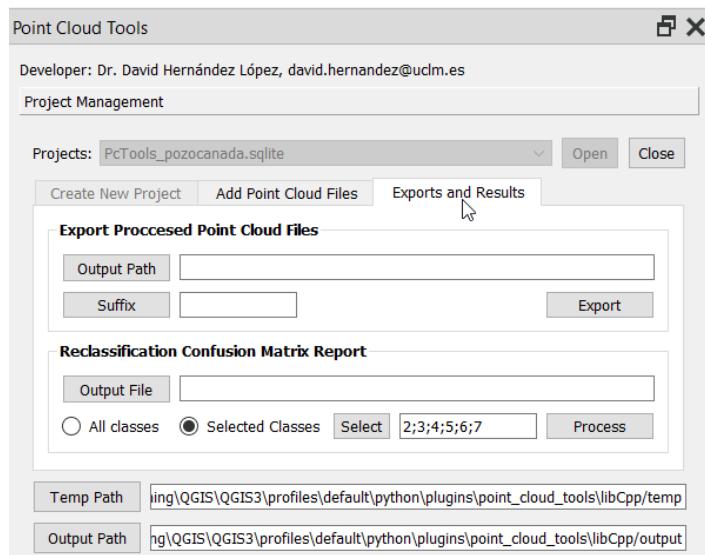


Figura 134. Almacenamiento y exportación de resultados de edición

En el complemento se han incluido otras funcionalidades como procesos, que han resultado necesarios en este proyecto, entre los que se encuentran la conversión entre sistemas de altitudes y la generación de modelos de elevaciones a partir de nubes de puntos originales o corregidas por edición manual, tal y como ilustra la siguiente figura.

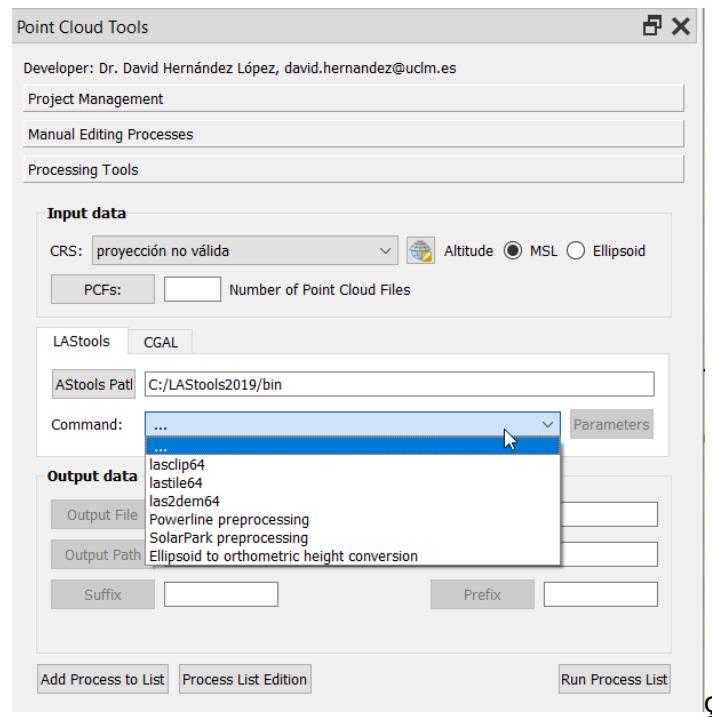


Figura 135. Lista de comandos disponibles para procesamiento de nubes de puntos en Point Cloud Tools

5. CONCLUSIONES, MEJORAS Y DIVULGACIÓN

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Se ha diseñado e implementado una herramienta informática para la automatización completa de la detección de hot spots y generación de informes en la inspección de parques solares a partir de vuelos con UAVs embarcando sensores visibles y térmicos, cumpliendo con la normativa internacional.
- Se han conseguido importantes avances en la automatización de la estimación de la geometría tridimensional precisa de los arrays de paneles y de los paneles incluidos en los mismos.
- Se han desarrollado algoritmos que hacen uso del modelo fotogramétrico de forma rigurosa, teniendo en cuenta tanto los datos de orientación del proyecto fotogramétrico como la geometría del objeto, haciendo uso del proceso directo e inverso de la fotogrametría sin considerar la frecuente aproximación basada en la generación de ortoimágenes.
- Se han desarrollado e integrado algoritmos para la optimización de correcciones necesarias en el tratamiento de la información capturada con las cámaras térmicas: corrección por distancia, por ángulo de observación, por parámetros atmosféricos y por normalización a irradiancia solar de referencia.
- Se han desarrollado algoritmos para agrupar las soluciones cercanas del mismo hot spot, tanto en el espacio imagen como en el espacio objeto.
- Se han desarrollado herramientas para la mejora en la clasificación automática de nubes de puntos y para permitir la edición 2D y 3D en software libre, QGIS.

Entre las principales mejoras y futuras líneas de investigación se pueden citar:

- Desarrollo de algunas herramientas integradas en software libre para la mejora de la geometría tridimensional de arrays de paneles por restitución fotogramétrica asistida para zonas donde la calidad de la nube de puntos derivada del procesamiento fotogramétrico y su posterior edición no permita alcanzar los resultados deseados.
- Desarrollo de algoritmos para contemplar arrays de paneles montados en seguidores permitiendo parametrizar la geometría tridimensional en función del tiempo.
- Integración de técnicas de deep learning para determinar el tipo de patología en función de la geometría y magnitud de los puntos calientes detectados.

- Modelización para la homogeneización de temperatura de las imágenes que elimine el efecto de los saltos por calibración radiométrica automática durante el vuelo, en base al uso en función del tiempo de estadísticas de diferentes imágenes en áreas comunes del objeto.

Los trabajos de divulgación se iniciarán una vez cerrado el proyecto, con fecha de finalización el 20 de marzo de 2021, y cuando se hayan resuelto al menos dos tipos de casos de uso: el incluido en este trabajo de investigación y el realizado en otro parque solar por Eiffage con el equipamiento recientemente adquirido, que embarca en el UAV DJI Matrice 300 RT el sensor dual Zenmuse H20. Está previsto plantear al menos la publicación de tres artículos que aportan novedades frente al estado del arte, en base a la revisión bibliográfica realizada a lo largo del proyecto: uno donde se incluya la aportación relativa a la detección de áreas afectadas en arrays de paneles de temperatura procedente de otros arrays de paneles, otro donde se evidencie la importancia cuantitativa de las correcciones aplicadas en este trabajo para la estimación de temperaturas de los arrays de paneles, y un último artículo donde se analicen las diferencias según los métodos de estimación de hot spots contemplados en este trabajo en relación a la estimación frente a valores medios de temperatura de array de paneles, de paneles, o de imágenes por array de paneles o de imágenes por panel.

6. BIBLIOGRAFÍA

IEC TS 62446-3, Thecnical Specification: Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography, según la Edition 1.0 2017-06, url: <https://webstore.iec.ch/publication/28628>

G. Álvarez-Tey, R. Jiménez-Castañeda, J. Carpio. Analysis of the configuration and the location of thermographic equipment for the inspection in photovoltaic systems. *Infrared Phys. Technol.*, 87 (2017), pp. 40-46

S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, O. Duque-Perez. Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 93 (2018), pp. 566-579

J.A. Tsanakas, L.D. Ha, F.A. Shakarchi. Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery. *Renew. Energy*, 102 (2017), pp. 224-233

R. A. M. Ferreira, D. L. F. Pottie, L. H. C. Dias, B. J. C. Filho and M. P. Porto, "A directional-spectral approach to estimate temperature of outdoor PV panels", *Sol. Energy*, vol. 183, pp. 782-790, May 2019.

Tran, Q.H.; Han, D.; Kang, C.; Haldar, A.; Huh, J. Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging. *Sensors* 2017, 17, 1718.

Ortega-Terol, D.; Hernandez-Lopez, D.; Ballesteros, R.; Gonzalez-Aguilera, D. Automatic Hotspot and Sun Glint Detection in UAV Multispectral Images. *Sensors* 2017, 17, 2352.

Zefri, Y.; ElKettani, A.; Sebari, I.; Ait Lamallam, S. Thermal Infrared and Visual Inspection of Photovoltaic Installations by UAV Photogrammetry—Application Case: Morocco. *Drones* 2018, 2, 41.

Flir. Using thermal imaging drones for solar field PV inspections. 19-1383-OEM-COR-Delta-Thermal Imaging Drones for Solar Videos. Updated: 06/26/19

Germán Alvarez Tey. Caracterización de instalaciones fotovoltaicas mediante técnicas de termografía infrarroja. Tesis doctoral UNED. url: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=146543>