

**Trabajo de fin de grado**

**“APLICACIÓN DE VUELOS CON DRON Y SENSOR TERMICO A LA  
PROSPECCION MINERA”**

**“APPLICATION OF FLIGHTS WITH DRONE AND THERMAL  
SENSOR TO MINING PROSPECTION”**



Para acceder al título de:

**Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros**

**Autor: Iván Ortiz Sánchez**

**Director/es: Julio Manuel de Luis Ruiz / Gema Fernández Maroto**

**Convocatoria: Septiembre 2022**

**CAPITULO I: Introducción.**

**CAPITULO II: Estado del arte.**

**CAPITULO III: Propuesta metodológica.**

**CAPITULO IV: Resultados.**

**CAPITULO V: Conclusiones**

**CAPITULO VI: Referencias**

## **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

## INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO GENERAL DEL TRABAJO .....	6
2. OBJETO.....	6
3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	6
4. JUSTIFICACIÓN .....	7
CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE.....	8
1.- INTRODUCCION .....	9
2.- PROSPECCIÓN MINERA .....	9
2.1.- Métodos indirectos .....	10
2.1.1.- Teledetección .....	10
2.2.- Cartografía geología de exterior y de minería de interior.....	11
2.3.- Cartografía de indicios mineros .....	12
2.4.- Geoquímica.....	12
2.5.- Geofísica.....	13
2.5.1.- Método Sísmico de refracción .....	14
2.5.2.- Método Sísmico de reflexión .....	14
2.5.3.- Método por Gravedad .....	14
2.5.4.- Método magnético .....	15
2.5.5.- Métodos eléctricos .....	16
2.6.- Fotogeología.....	16
3.- DRONES.....	21
3.1.-Historia de los drones .....	22
3.2.- Clasificación y tipos de drones.....	24
3.2.1.- Dron de ala fija.....	25
3.2.2.- Dron de ala rotatoria .....	26
3.3.- Componentes principales de un dron .....	26
4.- FOTOGAMETRÍA DIGITAL .....	32
4.1.-Introduccion.....	32
4.2.- Concepto de imagen digital .....	32
4.2.1-Resolución de imágenes digitales .....	32
4.2.2.- Captura de imágenes fotogramétricas digitales .....	33

4.2.3.- Sensores de captura de imágenes digitales .....	33
4.2.4.- Cámara fotogramétrica digital .....	35
4.3.- Orientación interna digital .....	36
4.4.- Correlación de imágenes .....	36
4.4.1.-Metodos de correlación.....	37
4.5.-Orientacion externa .....	39
4.5.1.- Puntos de apoyo .....	40
4.5.2.- Ecuaciones de colinealidad .....	41
4.5.3. Resección espacial.....	43
4.5.4 Autocalibración .....	44
4.5.5 intersección espacial.....	44
4.5.6 GPS/INS aerotransportado .....	44
4.6 ORTOFOTOGRAMETRIA DIGITAL .....	46
4.6.1 Ortorectificacion.....	46
4.6.2 Métodos de ortorectificacion digital .....	47
CAPITULO III: PROPUESTA METODOLÓGICA. ....	48
1.- INTRODUCCIÓN .....	49
2.- METODOLOGÍA .....	49
2.1.- Comportamiento térmico de las rocas a prospectar.....	49
2.2.- Obtención imágenes térmicas con dron.....	50
2.3.- Procesado de las imágenes térmicas.....	51
2.4.-Análisis e interpretación de la imagen térmica con GIS para la identificación de litología.....	54
2.5.- Validación de la metodología.....	55
CAPITULO IV: RESULTADOS. ....	56
1.-INTRODUCCIÓN .....	57
2.- RESULTADOS .....	58
2.1.- Comportamiento térmico de las rocas a prospectar.....	58
2.2.- Obtención imágenes RGB y térmicas con dron. ....	62
2.3.- Procesado de las imágenes térmicas.....	66
2.4.- Análisis e interpretación de la imagen térmica con GIS para la identificación de litología.....	70

2.5.- Validación de la metodología .....	72
CAPITULO V: CONCLUSIONES .....	77
CAPITULO VI: REFERENCIAS .....	80
REFERENCIAS .....	81

### INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Recubrimiento longitudinal.....	17
Ilustración 2.- Fotogramas necesarios para recubrir longitudinalmente una zona ...	17
Ilustración 3.- Recubrimiento transversal.....	18
Ilustración 4.- Fotogramas necesarios para cubrir transversalmente una zona .....	18
Ilustración 5.- Avance entre dos fotografías consecutivas .....	19
Ilustración 6.- - Separación entre pasadas .....	19
Ilustración 7.- Globos aerostáticos no tripulados con bomba sobre la ciudad de Venecia. 1849. ....	22
Ilustración 8.- MQ 9 Reaper Drone .....	23
Ilustración 9.- Dron usado para tareas de desinfección durante la pandemia COVID-19. ....	24
Ilustración 10.- Clasificación de los tipos de dron. ....	24
Ilustración 11.- Tipos de dron.....	25
Ilustración 12.- Drone de Ala fija Delair UX11. ....	25
Ilustración 13.- Chasis de drone .....	26
Ilustración 14.- Motores de dron. ....	27
Ilustración 15.- Hélices.....	27
Ilustración 16.- batería. ....	28
Ilustración 17.- Regulador de velocidad.....	29
Ilustración 18.- Placa controladora. ....	29
Ilustración 19.-Ejes de rotación de un gimbal. ....	30
Ilustración 20.- Gimbal de tres ejes. ....	30
Ilustración 21.- Cámara FPV .....	31
Ilustración 22.- Cámara de grabación.....	31
Ilustración 23.- Píxel de imagen digital.....	32
Ilustración 24.- Resolución espacial de imágenes digitales .....	33
Ilustración 25.- Tipos de sensores: pasivos y activos.....	34
Ilustración 26.- Sensores de tipo matricial, lineal y puntual. ....	35
Ilustración 27.- Cámara fotogramétrica Leica ADS80.....	35
Ilustración 28.- Reconstrucción del haz perspectivo de una imagen.....	36
Ilustración 29.- Identificación de puntos homólogos. ....	37
Ilustración 30.- Concepto de orientación externa de una imagen.....	39
Ilustración 31.-Representación de los giros del sistema de coordenadas imagen. ...	39
Ilustración 32.-Disposición puntos de apoyo continuo. ....	40
Ilustración 33.- Disposición de puntos del apoyo aerotriangulado .....	40
Ilustración 34.- Concepto de intersección espacial. ....	44

Ilustración 35.- Principio del GPS diferencial.....	45
Ilustración 36.- Imagen en perspectiva cónica. ....	46
Ilustración 37.- Imagen en perspectiva ortogonal. ....	46
Ilustración 38.-Principio metodológico para de la ratificación digital. ....	47
Ilustración 39.- Esquematación de las tareas del tratamiento fotogramétrico para la prospección minera. ....	53
Ilustración 40.- Localización zona de estudio. ....	57
Ilustración 41.- Cámara térmica Flir E40. ....	58
Ilustración 42.- Imagen térmica. ....	58
Ilustración 43.- Imagen térmica procesada. ....	59
Ilustración 44.- Dron UAV DJI Matrice 210 V2 con cámara Zenmuse XT2. ....	63
Ilustración 45.- Sensor radiométrico Zenmuse XT2. ....	63
Ilustración 46.- Imagen RGB obtenida con el vuelo. ....	64
Ilustración 47.- Diana fotogramétrica. ....	65
Ilustración 48.- Distribución puntos de apoyo.....	66
Ilustración 49.- Distribución de los puntos de apoyo térmico. ....	68
Ilustración 50.- Imagen térmica. ....	70
Ilustración 51.- Imagen tras la reclasificación en función de la temperatura limite. ....	71
Ilustración 52.- Contactos de la metodología propuesta.....	72
Ilustración 53.- Contacto entre ambas litologías en la zona de estudio.....	72
Ilustración 54.- Contactos obtenidos por la cartografía de detalle. ....	73
Ilustración 55.- Contactos obtenidos por fotointerpretación. ....	74
Ilustración 56.- Contactos entre litologías derivados de las diferentes metodologías planteadas. ....	75

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Especificaciones de la cámara térmica.....	58
Tabla 2.-Temperaturas de las muestras expuestas a la radiación solar. ....	60
Tabla 3.- Parámetros del vuelo fotogramétrico. ....	62
Tabla 4.-Parámetros del sensor RGB. ....	64
Tabla 5.- Parámetros del sensor térmico. ....	67
Tabla 6.- Puntos de control térmico.....	69
Tabla 7.- Resultados de la comparación de los métodos. ....	76

## **1. MARCO GENERAL DEL TRABAJO**

Este trabajo está enmarcado en la finalización de los estudios de Grado de Ingeniería de los Recursos Mineros donde se muestran los conocimientos obtenidos en las diversas materias impartidas en dicho grado, así como competencias adquiridas por el alumno.

Dicho trabajo está incluido en un proyecto de investigación llevado a cargo por diferentes miembros de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energías de la Universidad de Cantabria.

## **2. OBJETO**

El objeto general de este trabajo es la implementación de una nueva técnica de prospección minera mediante el uso de los drones y los sensores térmicos. En primer lugar, se debe realizar un estudio del comportamiento térmico de las litologías a estudio, comprobando si existe una diferencia en el comportamiento térmico que de justificación a esta nueva metodología. Tras la determinación de este primer paso, a continuación, se debe proceder a localizar una zona de estudio donde se procederá a realizar un vuelo fotogramétrico mediante el empleo de un dron equipado con un sensor RGB y uno térmico, para posteriormente tratar esas imágenes y obtener una ortoimagen de la zona, así como un mapa térmico de las diferentes litologías.

Por último, para la validación de los resultados se debe proceder a la comparación del mapa térmico obtenido con una ortoimagen y con la cartografía de detalle de la zona para verificar los resultados obtenidos.

Los objetivos específicos son:

- Conocer en profundidad la tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), también denominados drones, así como el posterior tratamiento de datos.
- Utilización del GPS para la realización de una cartografía geológica de detalle en un trabajo real.
- Aplicar los conocimientos aprendidos en las asignaturas en un caso real.
- Como fin último, se comparan el modelo RGB, modelo térmico y la cartografía geológica de detalle para determinar si hay coincidencia en los datos y es válida la prospección de una zona con un vuelo de dron con sensor térmico.

## **3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

El proyecto de investigación en el que se engloba este trabajo es muy amplio, puesto que antes de realizar el vuelo y la cartografía geológica hay que realizar un estudio del comportamiento térmico de las rocas de la zona de estudio, para comprobar si la hipótesis planteada sería factible trasladarla a campo mediante un vuelo de dron. Por ese motivo este trabajo se centra en la comparación de la cartografía geológica de

detalle de la zona, con el modelo RGB y el modelo térmico que nos proporciona el vuelo con dron.

En primer lugar, al no disponer de una cartografía geológica de detalle de la zona, se realizará mediante la toma de datos de los puntos de contacto de las diferentes litologías, así como de todos los objetos que puedan tener una influencia en el modelo térmico, como vegetación, fallas, dolinas, etc. Mediante la utilización de un receptor GPS.

Tras llevar a cabo dicho trabajo y tratarlo en gabinete, se compara con la cartografía de la zona, así como de una ortofoto de la zona para tener una primera comprobación de nuestro trabajo.

Una vez echo todo este trabajo, se lleva a cabo el vuelo de dron con el sensor RGB y el térmico, para obtener los modelos correspondientes. Al mismo tiempo, se capturan fotos térmicas con un receptor portátil de las diferencias mineralizaciones para tener una referencia con el modelo térmico del vuelo.

Para finalizar, se comparan los modelos térmicos, RGB y la cartografía de detalle realizada, para sacar las conclusiones pertinentes.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

Este trabajo tiene como fin último determinar la posibilidad de realizar la prospección minera de una zona mediante el uso de un dron con un sensor térmico. Esto surge con el incesante incremento del uso de los drones en el ámbito de la ingeniería y la necesidad de descubrir nuevos yacimientos minerales, siendo este un método rápido y barato con el que realizar una primera investigación aportando unos resultados muy fiables y útiles para posteriores actuaciones.

Con los resultados que arroje este trabajo podemos determinar las ventajas e inconvenientes de la utilización de este método, así como la incorporación de un método de prospección minera alternativo.

## **CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE**

## **1.- INTRODUCCION**

Con el incipiente crecimiento en la demanda de productos tecnológicos, así como la incipiente búsqueda de mejorar los ya existentes, nos vemos en la necesidad de encontrar nuevos materiales o mejorar las propiedades de los ya existentes, para los cual es imprescindible obtener una mayor cantidad de minerales, es por este hecho es cada día más importante encontrar yacimientos minerales con que abastecer dicha demanda.

La prospección minera es la primera etapa del proceso de análisis de un terreno. Antiguamente, dicha prospección se basaba en la observación de los afloramientos de mineralización, en la actualidad este proceso ha evolucionado considerablemente en las que se centra en las anomalías que generan los yacimientos en el terreno.

La Prospección de yacimientos minerales comprende los trabajos geológicos orientados al descubrimiento de depósitos minerales de interés económico. Se trata de trabajos a gran escala que permiten el reconocimiento de grandes extensiones de terreno. Comprenden tres etapas:

- 1) Reconocimiento.
- 2) Prospección preliminar.
- 3) Prospección detallada.

En ocasiones, se empleen indistintamente los términos investigación, exploración y prospección para los trabajos encaminados a la búsqueda, reconocimiento e identificación de yacimientos minerales.

En la prospección minera podemos clasificar en dos grandes grupos los diferentes métodos que se emplean, siendo esta clasificación métodos indirectos o directos. (1)

## **2.- PROSPECCIÓN MINERA**

Los métodos directos son procedimientos de investigación mediante los cuales se realizan observaciones directas sobre la mineralización y las rocas encajantes, contactos de los hastiales con el mineral, ensayos de la mena y geotecnia de las rocas encajantes. Los principales métodos directos de prospección son: la cartografía detallada de los afloramientos, calicatas o rozas con desmuestres, pocillos, galerías, y sondeos. Los métodos directos son mucho más costosos que los indirectos, pero tienen la ventaja de la seguridad de las observaciones. Por ello, y a pesar de su elevado precio de coste, los métodos directos son imprescindibles, para comprobar el origen de las anomalías, antes de iniciar el proceso de definición y cubicación del yacimiento. La definición y cubicación del yacimiento siempre se realizará partiendo de los resultados de los métodos directos, antes de tomar la decisión de poner en marcha un negocio minero. La ventaja de los métodos indirectos son su bajo coste y rapidez de realización.

Se definen como métodos indirectos de prospección a los sistemas utilizados para obtener información geológica del interior de la Tierra, sin tomar contacto directo con las rocas o mineralizaciones que la componen. La información se obtiene de las observaciones cartográficas externas o en las propiedades físico-químicas de los minerales que se investigan, y las rocas encajantes. No existe una relación directa y unívoca entre las diferentes propiedades físicas ó químicas de cada mineralización y sus hastiales, a veces la diferencia es tan escasa que no existe contraste, por lo que la información que proporcionan es difícil de interpretar. Los métodos indirectos no determinan, por sí solos, la existencia de un yacimiento, proporcionan información que permite situar y delimitar el depósito, minimizan el número de sondeos y labores mineras que son la fase más costosa de la exploración y son, en definitiva, esenciales para la aplicación de métodos directos.

## **2.1.- Métodos indirectos**

### **2.1.1.- Teledetección**

La teledetección es una técnica que permite obtener información de objetos, áreas o fenómenos situados sobre la superficie terrestre sin mantener contacto físico con ellos, constituyendo, por lo tanto, una herramienta de gran utilidad en el campo de la geología y ciencias afines. (Gutiérrez Claverol, 1993).

Se basa en la adquisición e interpretación de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra, estudiando las características de, “escala”, “brillo”, “contraste” y “poder de resolución”.

La absorción por las rocas de diferentes longitudes de onda produce imágenes con colores distorsionados (rojo la superficie vegetal), poniendo de relieve estructuras geológicas que no son visibles en la longitud de onda normal. La comparación de las fotografías de las diferentes pasadas, y sus variaciones en el tiempo, proporcionan información sobre las distintas clases de terrenos o rocas (reflectividad), reconociendo grandes estructuras o alteraciones, que pueden corresponder a fallas, yacimientos, o guías de la mineralización.

Los sistemas de teledetección se pueden dividir principalmente en dos apartados, estos son los teledetectores activos y los pasivos.

- **Teledetectores activos.** Se encargan de emitir la energía necesaria para poder escanear los objetos de estudio. Gracias a esta energía el teledetector es capaz de medir la radiación reflejada en el objeto. Un ejemplo de este sistema de teledetección son los radares de tráfico.
- **Teledetectores pasivos.** Son los que se encargan de detectar la radiación que emite o refleja el objeto de estudio, por ejemplo, el Sol. Los infrarrojos son unos de los teledetectores más conocidos.

Todo sistema de teledetección tiene los mismos componentes capaces de llevar a cabo las tareas de observación y medición. Son los siguientes:

- **Sensor.** Pieza, generalmente con cámara, con la cual se capta, codifica y transmite las imágenes o los datos del objeto de estudio.
- **Centro de recepción.** La información se recibe en el centro de recepción que puede estar situado a muchos kilómetros del sensor. Aquí se decodifica, se procesa y se corrige.
- **Canal de distribución.** Una vez la información está perfectamente procesada y corregida se puede llevar a su canal de distribución para que sea compartida y que sean los expertos o los usuarios, depende del tipo información, los que le den una interpretación y conclusión.

## 2.2.- Cartografía geología de exterior y de minería de interior

La Cartografía Geológica es la representación de los caracteres geológicos de un área de la Tierra por medio de símbolos y colores determinados. Los símbolos y colores son comunes en los grandes mapas, pero, a escala local, sufren variaciones de acuerdo con la necesidad de resaltar determinados caracteres. El reconocimiento geológico general de un área sirve de guía para posteriores trabajos y resulta imprescindible en el inicio de cualquier prospección minera.

En un mapa geológico se hacen resaltar los rasgos que interesan, quedando en segundo lugar los menos importantes. En la prospección minera, los detalles importantes a resaltar son los relacionados con la mineralización, metalotecto, indicios mineros, fallas, estratigrafía, litología, consistencia del macizo rocoso, hidrología etc. que afecten a la mineralización. La cartografía geológico-minera es la base para la colocación de las mallas correspondientes de geoquímica, geofísica y sondeos que deberán ser perpendiculares a la dirección de los estratos y, en caso de sondeos, perpendiculares al buzamiento. La cartografía será imprescindible para la interpretación de los datos de los métodos indirectos, ayudando a reconocer si una anomalía es producto de una mineralización o de un accidente geológico.

La cartografía geológico-minera es una particularidad de la cartografía geológica, consiste en representar la Geología de un área resaltando los datos que favorezcan la prospección de yacimientos, sus relaciones genéticas, estructuras tectónicas y cuantos rasgos nos ayuden a la explotación de la mina. La cartografía minera puede ser de exterior o de interior. En el primer caso suele hacerse en la fase de exploración y, la de interior, en la fase de explotación de la mina.

La cartografía minera representa una especialidad que se caracteriza por la minuciosidad de su detalle, con numerosas observaciones que, si no se pueden reflejar en el mapa, deben anotarse en la libreta de campo. En áreas con suelo vegetal abundante o cubiertas por sedimentos posteriores, los afloramientos suelen ser escasos y cuando existen son estudiados exhaustivamente.

Cartografía de una mina de interior: la representación de los detalles geológico-mineros de la cartografía de interior deben expresarse por coordenadas topográficas en planos horizontales de cada nivel de la mina, con escalas que permitan dibujar el detalle, tanto de los planos horizontales como de las secciones y perfiles que nos permitan una correcta interpretación espacial del yacimiento. las escalas más frecuentes en la cartografía minera en el interior son 1: 2.000, 1:1.000, 1:500, e incluso 1:200 en casos muy determinados. el plano base se confecciona mediante técnicas topográficas, distanciómetro, taquímetro, brújula ó aparatos similares. la precisión topográfica es necesaria para relacionar, fiablemente, los accidentes observados en el exterior con los datos aportados por la cartografía interior, sondeos, desmuestres, etc. la relación se consigue mediante un sistema de coordenadas común.

### **2.3.- Cartografía de indicios mineros**

Los indicios mineros son aportaciones muy importantes en la exploración de yacimientos pues indican la posible existencia de una mineralización y pueden indicar las propiedades de esta.

Los principales indicios mineros son:

- Afloramientos: Los afloramientos se situarán en todas las cartografías, a gran escala (relacionando sus lineamientos) o en detalle proporcionando datos sobre el modelo de mineralización.
- Calicatas: Son zanjas que eliminan la cobertura vegetal dejando la roca fresca al descubierto. Se hace un estudio de la zanja señalando las direcciones y buzamientos de las capas cortadas, los detalles estructurales observados, mineralizaciones, alteraciones, etc.
- Labores mineras: Se dibuja primero la galería y se cartografiará detenidamente la mineralización y los hastiales, tomando muestras a intervalos determinados.
- Escombreras: Las escombreras contienen los residuos de las labores mineras que, en muchos casos están hundidas y a las que no tenemos acceso. Son el único vestigio de la existencia de una mineralización y pueden, después de un minucioso estudio, proporcionar datos sobre la mineralogía, hastiales, alteraciones de las rocas encajantes, etc.

### **2.4.- Geoquímica**

La Geoquímica es la parte de la Geología que estudia la abundancia, distribución y migración de los elementos químicos en la litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera, dando a conocer el ciclo evolutivo de cada elemento, sus afinidades con otros elementos y las variaciones del contenido en suelos, rocas o sedimentos. El método geoquímico de exploración es un método indirecto. La exploración geoquímica de minerales incluye cualquier método basándose en la medición sistemática de una o varias propiedades químicas de material naturalmente formado. La prospección geoquímica, por su sencillez, rapidez y bajo coste, es uno de los primeros métodos de la exploración minera, inmediatamente después de la cartografía, a la que complementa.

Para la prospección geoquímica se toma una cantidad pequeña de muestra, mediante un muestreo lo menos costoso posible tratando de localizar sectores favorables en un área extensa, reconocida en grandes rasgos. Se establece una red de muestreo con un espaciamiento amplio para ubicar las áreas con valores elevados en comparación con el contenido medio (Clarke) del elemento en interés.

Cuando, en un punto, aparece una variación brusca (positiva o negativa) del contenido de un elemento químico determinado, en relación con el fondo geoquímico regional, se registra una "anomalía geoquímica". Las anomalías geoquímicas pueden ser producidas por la presencia de una mineralización o por causas ajenas al mineral (contaminación).

La determinación de las causas que originan la anomalía es el paso siguiente de la prospección.

La prospección geoquímica de minerales se basa en la medición sistemática del contenido de uno o más elementos químicos en las rocas, sedimentos o suelos de una zona, en búsqueda de una anomalía, producida por la presencia de una mineralización determinada.

Los métodos comúnmente empleados en la prospección detallada son los siguientes:

- **Muestreo sistemático de suelos residuales** para buscar anomalías situadas directamente encima del cuerpo mineralizado debido a que la composición del suelo residual depende altamente del cuerpo mineralizado subyacente.
- **Muestreo de suelos**, localiza anomalías desarrolladas en material transportado. Por medio de un muestreo profundo se puede comprobar si existe una relación geoquímica entre el suelo y el cuerpo mineralizado subyacente o no.
- **Muestreo de plantas (Geobotánica)**, recomendable bajo circunstancias que impiden la aplicación del muestreo de suelos como por ejemplo en áreas cubiertas con nieve o en áreas, donde las raíces de las plantas penetran profundamente una capa de material transportado.
- **Muestreo de rocas**, enfocado a la detección de anomalías de corrosión o difusión. Las anomalías de corrosión se pueden encontrar en las rocas de caja y en el suelo residual, que cubren el cuerpo mineralizado.

## 2.5.- Geofísica

La prospección geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimientos, por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la Tierra.

Mediante la aplicación de métodos geofísicos es posible determinar la estratificación de suelos y rocas, midiendo los cambios de características físicas de los materiales, como pueden ser la velocidad de propagación de ondas, la resistividad o conductividad o la susceptibilidad magnética entre otras.

Los principales métodos para el estudio del suelo aplicando la geofísica son los siguientes:

### **2.5.1.- Método Sísmico de refracción**

Este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas P desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos) situados a lo largo de una línea de adquisición. Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas P emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio situado entre ambos.

A partir de los valores de velocidad se puede obtener un modelo del subsuelo compuesto por capas de velocidad constante y espesor variable. Este método es muy útil para determinar, de manera rápida, la estructura del subsuelo.

Sus aplicaciones más frecuentes son la detección del sustrato rocoso, estudios sobre ripabilidad, estabilidad de taludes, etc.

### **2.5.2.- Método Sísmico de reflexión**

Cuando una onda sísmica incide en una discontinuidad que separa dos medios, una fracción de la energía incidente se propaga al segundo medio y el resto se refleja de vuelta al primer medio. La cantidad de energía que se transmite y se refleja depende del contraste de impedancia acústica entre ambos medios y del ángulo de incidencia.

Si el ángulo de incidencia es mínimo (incidencia perpendicular a la discontinuidad horizontal) la mayor parte de la energía incidente retorna al primer medio. Este comportamiento es el fundamento de los métodos de sísmica de reflexión vertical. En un ensayo de sísmica de reflexión vertical se instalan una serie geófonos a lo largo de una línea de adquisición y se registra la vibración del terreno inducida mediante una fuente conocida.

Después de un cuidadoso procesado de las señales adquiridas en campo se obtiene un ensamblaje en el que se pueden observar las principales discontinuidades que definen la estructura del subsuelo. Este método es comúnmente empleado en la exploración de hidrocarburos (para la detección de yacimientos) y en ingeniería civil (detección de fallas).

### **2.5.3.- Método por Gravedad**

En la prospección por gravedad se miden las variaciones en la atracción gravitatoria que ejercen las rocas emplazadas en los primeros kilómetros por debajo de la superficie del suelo. Los diferentes tipos de rocas tienen densidades diferentes y las rocas más densas ejercen mayor atracción gravitacional pudiendo esto ser señal de presencia de grandes masas mineralizadas. Este método fue empleado originariamente para la prospección petrolífera en Estados Unidos y el golfo de México.

Este método se basa en la primera y la segunda ley de Newton para determinar los valores de la aceleración de la gravedad en el lugar del ensayo, pudiendo comparar con un valor medio, determinando la posible localización de una estructura geológica susceptible de una investigación más amplia.

Existen tres aparatos para medir las variaciones gravimétricas como son la balanza de torsión que mide las diferentes distorsiones causadas por las diferencias de densidades del subsuelo, el péndulo que mide la gravedad absoluta o relativa y el gravímetro, el instrumento más utilizado pues mide directamente las variaciones de la componente vertical de la gravedad.

El gravímetro está formado por una masa suspendida por un muelle o un sistema elástico que varía su longitud en función de la atracción gravitatoria. Dentro de los gravímetros existen de dos tipos, los estables, los cuales la medida se obtiene por de forma directa en la variación de la longitud del muelle ya sea de forma óptica, mecánica o eléctrica y los inestables o astáticos, los cuales con las variaciones en la fuerza de la gravedad producen que un desequilibrio de la masa provocando el movimiento del sistema de muelles arrojando así un valor de medida.

#### **2.5.4.- Método magnético**

La prospección magnética determina las variaciones del campo magnético terrestre atribuibles a cambios de estructura, o de la susceptibilidad magnética de algunas rocas próximas a la superficie.

La magnetometría es un método que permite caracterizar el subsuelo a través de la distribución de la susceptibilidad magnética de los distintos materiales del subsuelo directamente relacionada con el contenido de minerales con propiedades magnéticas, haciendo mediciones del campo natural magnetométrico terrestre. Permite caracterizar el subsuelo desde algunos metros hasta decenas de kilómetros de profundidad.

Para captar las variaciones del campo magnético se utilizan los magnetómetros, instrumento formado por una aguja magnética equilibrada que se desvía con las variaciones magnéticas dándonos así una medida. Dicha medida puede ser el ángulo de desviación de la aguja como la fuerza necesaria para volver a la aguja a su posición original.

Inicialmente, los instrumentos empleados en prospección magnética solo median la componente vertical. Actualmente, son capaces de medir el campo magnético total, con una precisión de  $\pm 1$  nT.

Los primeros magnetómetros consistían en imanes de barras que se orientaban en el campo magnético, para medir era necesario una nivelación de precisión y zonas de mediada estables. (2)

### **2.5.5.- Métodos eléctricos**

Existen varias técnicas geofísicas destinadas a detectar anomalías en las propiedades eléctricas de las rocas, tales como la conductibilidad, auto-potencial y respuesta a la inducción. A base de estas anomalías puede resultar posible localizar minerales que ofrezcan características eléctricas distintivas, o levantar características estructurales asociadas a yacimientos de minerales.

El método de resistividad se emplea para determinar variaciones laterales o verticales de la conductibilidad en el interior del suelo, y se utiliza con frecuencia para medir la profundidad a que se encuentra los yacimientos.

El método auto-potencial se utiliza para detectar las presencias de ciertos minerales que reaccionan con electrólitos del suelo, engendrando potenciales electroquímicos.

Los métodos electromagnéticos detectan anomalías en las propiedades inductoras de las rocas del subsuelo. Se introduce en el suelo una corriente alterna, por lo general de alta frecuencia, y sobre la superficie o en el aire se miden la intensidad y el desfase de los potenciales inducidos por las rocas enterradas. Muchas menas de metales comunes engendran corrientes inducidas de intensidad muy superior a las de las rocas circundantes.

### **2.6.- Fotogeología**

La Fotogeología es una técnica de interpretación geológica partiendo de fotografías tomadas desde un avión, superpuestas estereoscópicamente. Cubren un campo espectral de 0,3 a 0,9  $\mu$ , algo más amplio de lo estrictamente visible, coincidiendo con el campo espectral de sensibilidad de las películas fotográficas.

La fotogeología es un instrumento muy importante para la cartografía general de una zona y delimita áreas de interés, más reducidas, que las que se pueden extraer de la teledetección. La fotogeología es la base de la cartografía, sin excluir el trabajo de campo, y su interpretación debe ser simultánea, con hipótesis de trabajo facilitadas por la fotografía aérea y corroboradas en el campo. No se puede hablar de fotogeología sin hablar de la fotogrametría, pues es la técnica que nos proporciona las imágenes áreas de la zona de estudio.

En primer lugar, se deben tomar las imágenes aéreas de la zona de interés. Para ello se debe planificar y ejecutar un buen vuelo considerando aspectos geométricos y los relativos a las características fotográficas como son los recubrimientos, el avance, la separación entre pasadas y la cadencia.

En el vuelo fotogramétrico se van obteniendo las fotografías de eje vertical dotadas de un recubrimiento que las hacen activas desde el punto de vista estereoscópico.

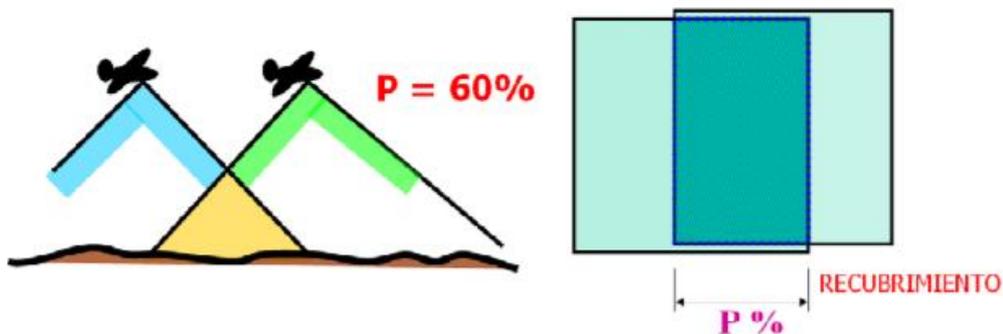


Ilustración 1.- Recubrimiento longitudinal

Los fotogramas aéreos verticales tienen, usualmente, un formato de 23x23 cm. y el recubrimiento longitudinal suele ser del 60%. En el caso de geometría perfecta se puede obtener la superficie real recubierta en una pasada, en un caso genérico.

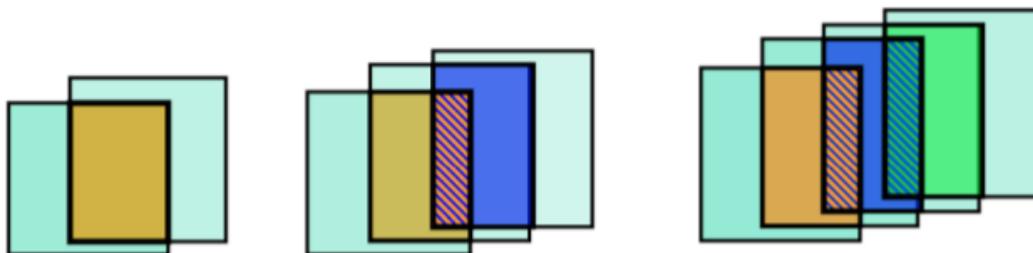


Ilustración 2.- Fotogramas necesarios para recubrir longitudinalmente una zona

Denominando P al recubrimiento longitudinal en tanto por ciento, resulta:

- Dos fotogramas:  $2 \dots l_2 = \frac{P}{100} L$
- Tres fotogramas:  $3 \dots l_3 = \frac{P}{100} L + \frac{100-P}{100} L$
- Cuatro fotogramas:  $4 \dots l_4 = \frac{P}{100} L + 2 \frac{100-P}{100} L$
- N fotogramas:  $N \dots l_N = \frac{P}{100} L + (N-2) \frac{100-P}{100} L$

obteniéndose la relación general:

$$l_N = \frac{L}{100} [P + (N - 2)(100 - P)]$$

El avión vuela la zona a fotografiar en sucesivas pasadas, cubriendo todo el territorio deseado, fijando los pares estereoscópicos para su interpretación simple o estereoscópica.

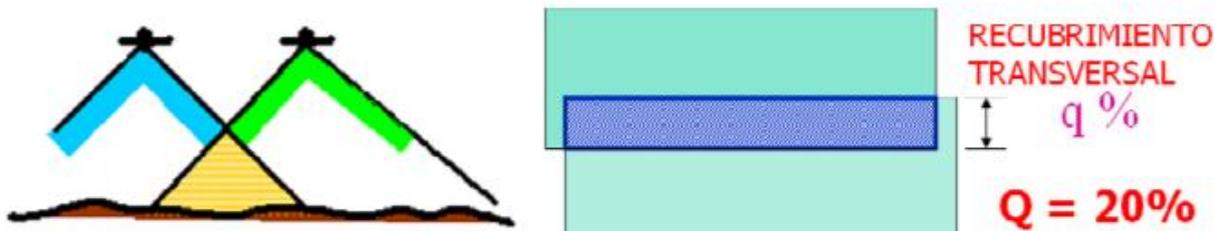


Ilustración 3.- Recubrimiento transversal

Los fotogramas aéreos verticales tienen usualmente un recubrimiento transversal del 20%. En el caso de geometría perfecta se puede obtener la superficie recubierta transversalmente en M pasadas.

Denominando q al recubrimiento transversal, en tanto por ciento, resulta:

- Dos pasadas:  $l_2 = L \cdot \left[ 1 + \frac{100 - q}{100} \right]$

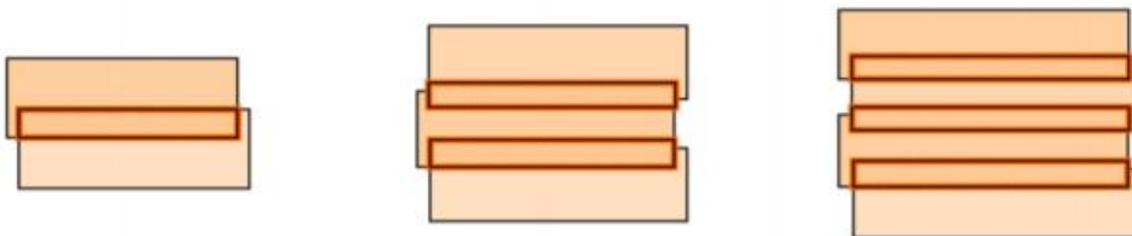


Ilustración 4.- Fotogramas necesarios para cubrir transversalmente una zona

obteniéndose la expresión general:

$$l_M = L \cdot \left[ 1 + (M - 1) \frac{100 - q}{100} \right]$$

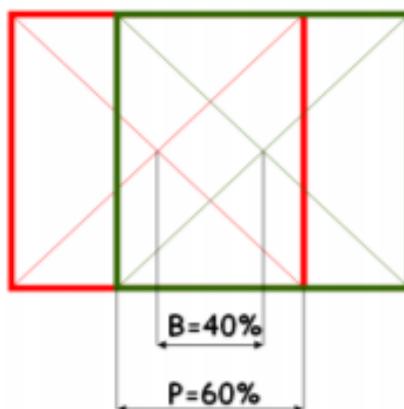


Ilustración 5.- Avance entre dos fotografías consecutivas

El avance es la distancia entre dos puntos principales de dos fotografías consecutivas.

La separación entre pasadas es la distancia entre dos trayectorias paralelas consecutivas del avión protagonista del vuelo.

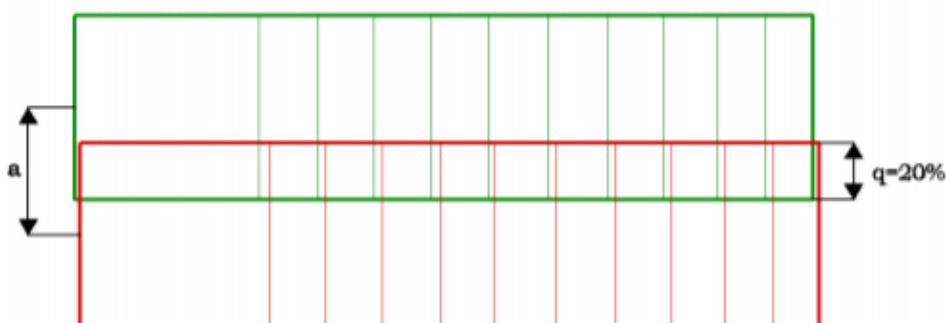


Ilustración 6.- - Separación entre pasadas

Se denomina cadencia y se designa por I al intervalo de tiempo transcurrido entre dos disparos consecutivos.

Una vez realizado el vuelo se debe realizar un trabajo de gabinete procesando las imágenes. Se pueden realizar dos métodos, la restitución en el cual se aplican los

giros, traslaciones y escalas, obteniendo así un modelo de coordenadas del terreno y se incluye el escalado del objeto para trabajar con medidas reales, o la rectificación, tras la orientación del haz de luz (interna y externa) se consigue la intersección entre esa luz y el modelo digital del terreno (MDT) del espacio a determinar.

La fotogrametría topográfica tiene ventajas sobre los métodos topográficos clásicos:

- Los trabajos de campo, cada vez más caros, son sustituidos en gran parte por los de gabinete.
- Mayor precisión y homogeneidad. Posibilidad de trazado de líneas continuas planialtimétricas sin interpolación.
- Posibilidad de levantamiento de terrenos difíciles o inaccesibles (montañas, desiertos...).
- Si la superficie es grande, menor coste y mayor rendimiento.

Actualmente, la fotogrametría es el método clásico de levantamiento topográfico, pero esta fotogrametría topográfica puede ser:

- Terrestre: Haces con punto de vista en el terreno.
- Aérea: Haces con punto de vista en el aire.

El comienzo de la fotogrametría es terrestre. Pero la fotogrametría de este tipo no es capaz de dar una representación del terreno completa, fiel y precisa, es decir, sus inconvenientes más característicos son:

- Representación incompleta: No existe, por lo general, un punto de vista desde el que se puede fotografiar todo. Siempre existirán zonas muertas que no figuran en la fotografía.
- Levantamiento no homogéneo: La precisión de las intersecciones es función de la distancia y las distancias son muy variables.

Pero este tipo de fotogrametría sigue siendo muy valioso para levantamientos topográficos de pequeña extensión (presas, explotaciones a cielo abierto) en los que el empleo del avión sería muy caro. En cambio, la fotogrametría aérea topográfica tiene grandes ventajas:

- Todo el terreno (excepto casos raros: cornisas de montañas, bosques muy cerrados) se ve sin ángulos muertos.
- Como todo el terreno está aproximadamente a la misma distancia de las tomas, las precisiones serán muy semejantes en todo el levantamiento.
- Es el único procedimiento viable para levantamientos extensos.

Su empleo es sistemático en todo el mundo, pero su aplicación es mucho más compleja que en fotogrametría terrestre ya que:

- No puede estacionarse en los puntos de vista cuya posición es desconocida.

- No pueden elegirse más que aproximadamente los elementos externos más favorables.

Por todo lo anteriormente enumerado, puede afirmarse que en fotogrametría aérea:

- Los elementos externos han de determinarse de modo indirecto. Por ello hacen falta los llamados puntos de apoyo que componen el canevas de restitución determinados por trabajos clásicos. Esto es una de las grandes servidumbres de la fotogrametría, aunque afortunadamente la fotogrametría es capaz de darse a sí misma este canevas (parcialmente).
- La restitución exige métodos más complejos que en fotogrametría terrestre, que han tardado mucho tiempo en ser puestos a punto.

Los drones o vehículos aéreos no tripulados pueden ir equipados con muchos sensores y entre ellos se encuentran las cámaras fotográficas digitales, cuando se les equipa con estos sensores permiten realizar tomas a partir de las cuales llevar a cabo el proceso de obtención cartográfica descrito anteriormente. Los drones en fotogrametría vienen a cubrir las funciones del avión que porta la cámara y permiten realizar vuelos de grandes extensiones de terreno en poco tiempo y con niveles de precisión óptimos. La limitación legislativa que actualmente tienen los drones relativa a la altura de vuelo (120 m.) genera una limitación de superficie que vuela en cada pasada, pero tienen la ventana del nivel de detalle que pueden llegar a alcanzar las tomas fotográficas.

Actualmente los drones utilizan Cámaras Digitales lo que supone que el tipo de técnica a utilizar con el producto derivado de una observación con Dron es la Fotogrametría Digital. En un proceso que permite la generación de Modelo Digital de Elevaciones, habitualmente denominado Modelo Digital del Terreno, y que habitualmente no se restituye por el elevado coste temporal y económico que conlleva, lo que en definitiva supone que no hay un plano de restitución clásico. Es decir, las imágenes captadas por las cámaras del dron son procesadas mediante programas y herramientas específicas que permiten obtener nubes de puntos más o menos densas (incluso millones de puntos) que son un fiel reflejo de la realidad.

A partir de dichas nubes de puntos se pueden obtener modelos digitales de elevaciones (MDE) también denominados modelos digitales del terreno (MDT), aunque un MDT sea la concreción de un MDE. Además, las imágenes se pueden georreferenciar y escalar, obteniendo las clásicas ortofotografías, cuya representación puede llegar a ser más representativa y menos simbólica incluso que la cartografía convencional. (3)

### **3.- DRONES**

Se define dron como vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo un operador humano, que utiliza fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar

autónomamente o ser tripulado de forma remota, puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no.

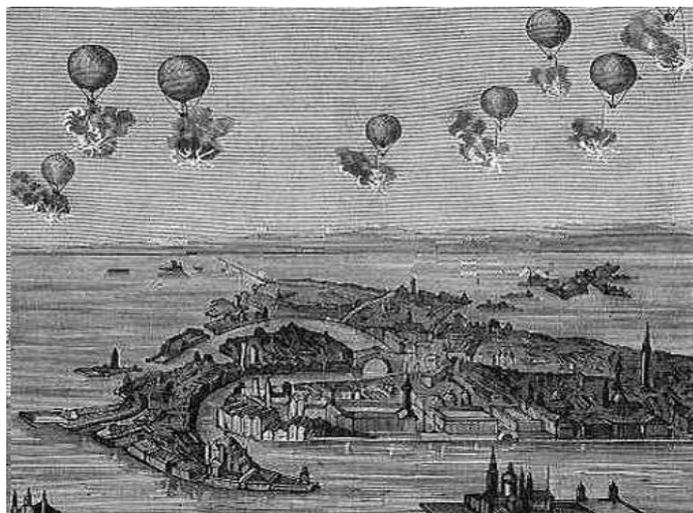
No obstante, la agencia de seguridad aérea y organismos oficiales, ante la generalidad de la palabra drone, prefieren usar términos como RPAS (del inglés, Remote Piloted Aircraft System) o UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

Estos artefactos tienen su origen en el contexto militar, ya que fue allí donde se diseñó este tipo de robot aéreo con cámaras, GPS y toda clase de sensores, para ser usado como arma, para misiones de combate o vigilancia. Sin embargo, en la actualidad el uso de estos aviones, va más allá de buscar un fin bélico, su venta y distribución está orientada hacia diversos usos, como por ejemplo: en los estudios científicos, para la toma de fotografías y videos, entre otros.

### **3.1.-Historia de los drones**

Hay una serie de hechos históricos y figuras relevantes que poco a poco han originado el crecimiento del drone o UAV como una tecnología potente a desarrollar no solo en el ambito militar sino también en el sector civil.

La idea del avión no tripulado es antigua. A pesar de que a menudo asociamos los drones con los robots militares de hoy, los aviones no tripulados, de una forma u otra, se han utilizado durante décadas. Uno de los primeros usos registrados fue por los austriacos en julio de 1849 después de que se pusieran en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados montados con bombas en la ciudad de Venecia. (4)



*Ilustración 7.- Globos aerostáticos no tripulados con bomba sobre la ciudad de Venecia. 1849.*

Menos de dos décadas después de la Guerra Civil en EE.UU, fuerzas de la Confederación y de la Unión volaban globos para misiones de reconocimiento. En

1896 Samuel P. Langley desarrolló una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto que fueron trasladados con éxito a lo largo del río Potomac, cerca de Washington DC. La práctica de la vigilancia aérea más tarde surgió en la Guerra Hispano-Americana de 1898, cuando los militares de EE.UU. equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.

En la Primera Guerra Mundial, se utilizó ampliamente la vigilancia aérea. Así, este sería uno de los pasos en la evolución de los aviones no tripulados en Estados Unidos. Durante la segunda guerra mundial, el dron fue rediseñado para convertirse en un arma, capaz de operar tras las líneas enemigas. Ya más tarde, durante la Guerra fría se empleó como medio de obtención de información de difícil acceso, evolucionando todo eso hasta nuestros días convirtiéndose en una fusión de arma y fuente de información delicada, convirtiéndose en una herramienta muy utilizada en la lucha contra el terrorismo.



*Ilustración 8.- MQ 9 Reaper Drone*

Hay que recordar que un dron no sólo puede ser pilotado por un operador humano, sino que puede volar de forma autónoma siguiendo planes de vuelo ordenados a través de un software y siguiendo sistemas de posicionamiento por coordenadas como el GPS o el GLONASS. Y aunque siempre han sido muy asociados a labores militares, los drones también son usados para rescate, vigilancia, control del tráfico, monitoreo del tiempo climático, extinción de fuegos y la agricultura entre otras aéreas.



Ilustración 9.- Dron usado para tareas de desinfección durante la pandemia COVID-19.

### 3.2.- Clasificación y tipos de drones.

No existe una única clasificación para los diferentes tipos de drones que existen, ya que se pueden clasificar dependiendo de características de vuelo, número de hélices, peso, altura de vuelo, forma de despegue y aterrizaje, etc.

No obstante, se puede hacer una primera clasificación entre los drones que despegan y aterrizan verticalmente y los que no son capaces. Cuando el despegue es vertical se denominan de ala rotatoria o multirrotor, mientras que los que no son capaces se denominan de ala fija.

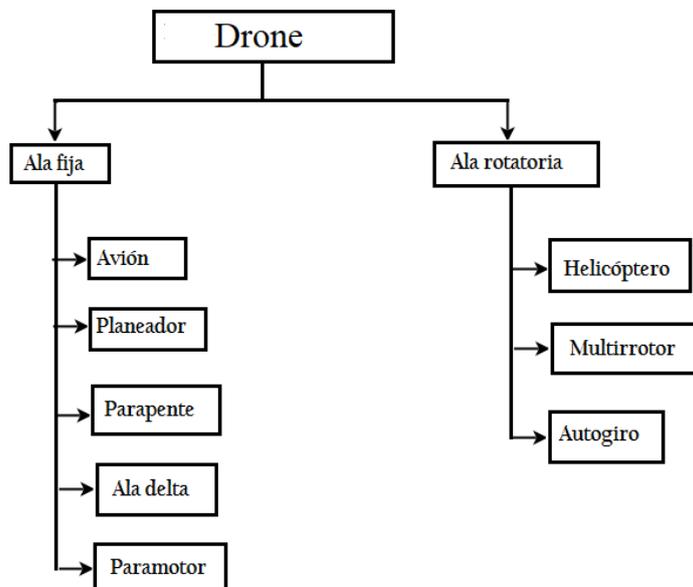


Ilustración 10.- Clasificación de los tipos de dron.



*Ilustración 11.- Tipos de dron.*

### 3.2.1.- Dron de ala fija

Los Drones de ala fija son diseñados como la mayoría de las aeronaves, luciendo similar a los aviones. El fuselaje está compuesto por un cuerpo central que tiene dos alas que son las encargadas de generar la sustentación necesario para poder mantenerse en el aire. Este hecho hace que requieran menor energía que los drones multirroto pudiendo tener una mayor autonomía y los hace ideal para el vuelo de grandes superficies.



*Ilustración 12.- Dron de Ala fija Delair UX11.*

### 3.2.2.- Dron de ala rotatoria

Este tipo de drones consigue la sustentación gracias a las hélices que lleva incorporadas en cada brazo. Dichas hélices son impulsadas por un motor que dota a este tipo de drones de una gran estabilidad, así como la capacidad, al contrario que los de ala fija, de permanecer inmóviles en el mismo sitio mientras vuelan y de realizar las maniobras de despegue y aterrizaje de forma autónoma sin ningún tipo de ayuda.

Podemos realizar una división dentro de esta categoría en función del número de brazos del que disponen.

- **Tricóptero.** Estos drones están compuestos por tres brazos y tres motores
- **Cuadricóptero.** Estos tipos de drones se componen de cuatro brazos y cuatro motores. Son los más comunes y utilizados.
- **Hexacópteros.** Los drones de seis brazos son los más comunes entre los drones profesionales. Tienen muy buena estabilidad, además son muy seguros puesto que podrían aterrizar si uno de los motores fallase.
- **Octocópteros.** Compuestos por ocho brazos y ocho motores. Cuantos más brazos y más motores, más estabilidad y más potencia.
- **Coaxiales.** La característica principal de estos drones no es el número de brazos, sino la cantidad de motores por brazo. Los drones coaxiales tienen dos motores en cada brazo, por lo que son capaces de aguantar más peso que los normales. Son la mejor opción para trabajos profesionales.

### 3.3- Componentes principales de un dron

- **Chasis.** Estructura central conformada de diferentes materiales, donde van insertado el resto de los elementos que conforman la aeronave. Esta parte determina el tamaño y características del dron.



*Ilustración 13.- Chasis de dron*

- **Motores.** Elemento encargado de proporcionar la rotación a las hélices para generar la sustentación necesaria del dron. Los motores pueden clasificarse de dos maneras en función de su colocación, motores normales (aquellos que tienen el motor colocado en la parte de arriba) o coaxiales (aquellos que tienen los motores arriba y abajo).



*Ilustración 14.- Motores de dron.*

- **Hélices.** Son las encargadas de elevar al dron en el aire. Están accionadas por los motores. Las hélices más comunes son las de dos aspas puesto que son las que menos energía consumen.



*Ilustración 15.- Hélices.*

- **Batería.** Parte fundamental del dron, Hay varios tipos de baterías utilizadas en los drones compuestas por diferentes materiales como níquel, cadmio, aunque las más habituales por su capacidad, eficiencia son las baterías de polímero de litio Li-Po.



*Ilustración 16.- batería.*

- **Placa controladora de vuelo.** Se trata de un ordenador integrado que procesa la información que captan los diferentes sensores que lleva incorporados el dron y ordena los movimientos que debe realizar enviados desde el control remoto. Dichos sensores son:
  - Giroscopio: mide la inclinación del dron respecto al horizonte.
  - Sensores de altitud y altura: dichos sensores miden la altura de vuelo, sobre el suelo y la altitud, distancia hasta el nivel del mar.
  - Sensor de variación de altura: obtiene las variaciones de altura del dron mediante la variación de presión.
  - Brújula: sensor de rumbo, mide la orientación del dron con respecto al norte magnético.
  - Sensor de velocidad: calcula la velocidad de vuelo del dron.
  - Sensores de posición: GPS, que recibe vía satélite para obtener la posición del aparato en un mapa en tiempo real, además de registrar la posición de despegue, y sistema inercial con giroscopios y acelerómetros, obteniendo las velocidades y las distancias para calcular la posición (5)

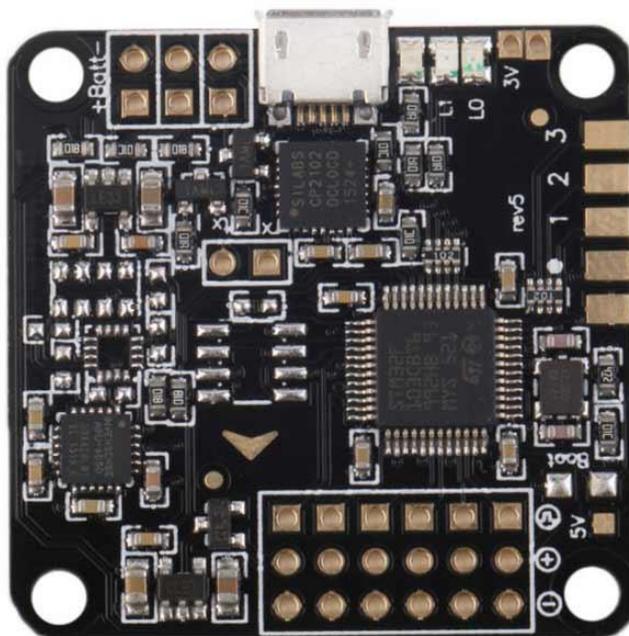


Ilustración 18.- Placa controladora.

- **Regulador de velocidad (ESC).** Son los encargados de que los motores giren a la velocidad adecuada para realizar los movimientos en el aire necesarios.

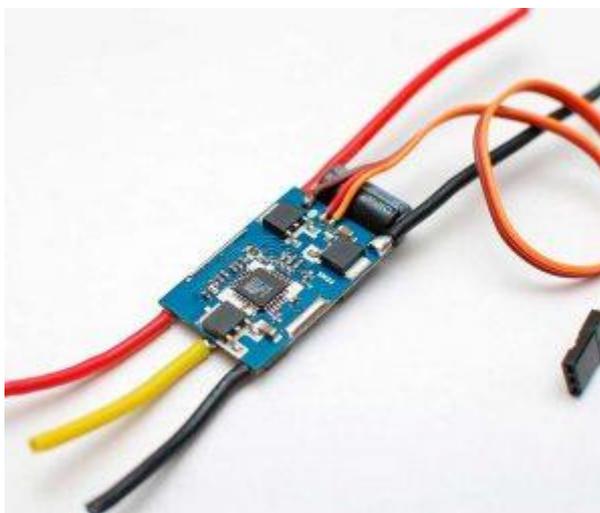


Ilustración 17.- Regulador de velocidad.

- **çGimal o Cardan.** Elemento estabilizador móvil que une la cámara al dron. La mantiene controlada y nivelada durante el vuelo, y hace que podamos controlar el giro en los ejes x, y, z de la cámara. Además, evita que los movimientos propios del dron y las vibraciones de las hélices y motores afecten al movimiento y la estabilidad de la cámara.



Ilustración 20.- Gimbal de tres ejes

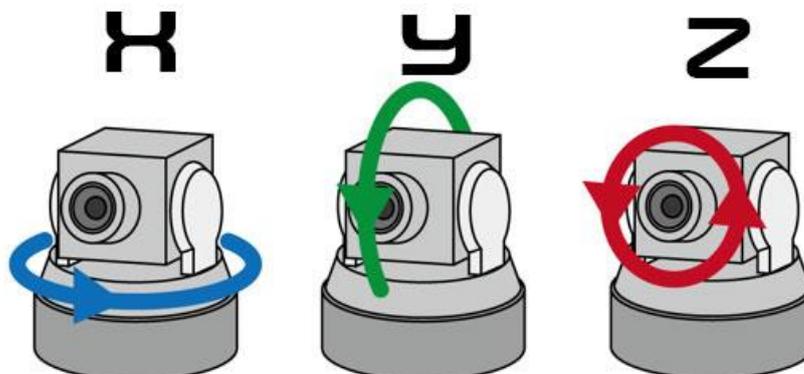


Ilustración 19.-Ejes de rotación de un gimbal.

- Cámara.

La variedad de cámaras capaces de ser portadas por un dron es muy amplia, pudiendo ser desde una cámara deportiva para grabar videos y sacar fotos hasta una cámara multiespectral o térmica a nivel profesional para trabajos concretos en agricultura, control de acopios, etc.

Dentro de las cámaras de ocio podemos distinguir entre dos tipos en función de la perspectiva, cámaras FPV o cámaras en primera persona y cámaras de grabación. Las cámaras FPV o cámaras en primera persona se denominan así por la posición delantera que ocupan en el dron y la perspectiva del piloto, además este tipo de cámaras carecen de retraso en la transmisión de las imágenes. Las cámaras de grabación son las mas extendida en el ámbito de la grabación con drones, estas cámaras funcionan a través de bluetooth o wifi lo que nos genera un pequeño retraso en la transmisión de las cámaras, pero una alta calidad de imágenes.

En el apartado profesional del uso de drones fuera del uso audiovisual, tenemos una amplia gama, pero dependiendo de cuál sea nuestro objetivo necesitaremos seleccionar un tipo de cámara u otra.

Podemos clasificarlas en tres grandes grupos, Cámaras multiespectrales, termográficas o pancromáticas.

- Pancromáticas. Las imágenes pancromáticas se suelen capturar a una resolución más alta que las bandas multiespectrales de los satélites. Es una fuente de información fundamental para muchas aplicaciones SIG. También para la interpretación y el análisis básicos.
- Multiespectrales. Cuentan con sensores que miden la luz más allá del espectro visible al ojo humano. El valor de estas mediciones es de gran utilidad, especialmente en sectores como o el forestal o la agricultura de precisión. A partir

de las imágenes multiespectrales que captan este tipo de sensores se pueden calcular diferentes índices y conocer el estado de salud y bienestar de la vegetación en una localización y momento determinados. Las cámaras multiespectrales que se montan en los drones son de pequeñas dimensiones y pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas de espectro diferentes. Con este tipo de cámaras vamos a ser capaces de captar la red edge (0,68 a 0,75 micras) y el infrarrojo cercano (0,75 a 1,7 micras).

- Termográficas. Las cámaras termográficas profesionales han abierto aún más el abanico de posibilidades para las inspecciones aéreas de grandes superficies. Su funcionamiento se basa en la detección y medición de la radiación infrarroja (calor) que emiten todos los cuerpos. Los usos más habituales suelen encontrarse en la inspección de infraestructuras, el diagnóstico de paneles solares y tendidos eléctricos, la detección de fugas térmicas en edificios, así como el diagnóstico de grandes extensiones agrícolas. Así, las cámaras termográficas permiten medir la temperatura de los cultivos y detectar, por ejemplo, situaciones de estrés hídrico. Hay que apuntar que la mayoría de los fabricantes disponen de una versión térmica y una versión termográfica de sus dispositivos. Ambas son capaces de detectar radiación infrarroja térmica, pero solo las termográficas son capaces de medir la temperatura absoluta en cada pixel. Esto es fundamental para detectar cambios de temperatura en una superficie y, lo que es más importante, clasificarlos de acuerdo al rango de temperaturas medidas. Los sensores térmicos permiten la detección de personas o animales de forma rápida en sitios de difícil acceso. Son capaces de identificar puntos de calor, incluso cuando la diferencia entre el entorno y el foco a detectar es de unos pocos grados. Por este motivo son muy interesantes sus prestaciones en materia de seguridad, asistencia en catástrofes y misiones de salvamento humanitario. De la misma manera, la termografía con dron es también de gran ayuda en la prevención y vigilancia de incendios, así como en el estudio y protección de especies vegetales y animales en peligro de extinción. (6)



*Ilustración 21.- Cámara FPV*



*Ilustración 22.- Cámara de grabación*

## 4.- FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

### 4.1.-Introduccion

La fotogrametría ha sufrido una gran evolución gracias al avance de los medios digitales dando lugar a lo que ahora denominamos fotogrametría digital, transformando el formato y la estructura, pero manteniendo la esencia y el resultado final.

Las ventajas que se obtienen con la fotogrametría digital son amplias con respecto a la analógica, puesto que el tratamiento de las imágenes se vuelve mas sencillo y tiene la capacidad de transformar las imágenes adaptándose a las necesidades requeridas.

### 4.2.- Concepto de imagen digital

Una imagen digital en niveles de gris es una matriz bidimensional compuesta por celdas

cuadradas, denominadas pixels ( picture element ). Dentro de cada píxel hay una coloración sólida, definida por un número digital que se corresponde con un nivel de gris. Una imagen digital en color tendrá las tres matrices correspondientes a los colores primarios y el color de un píxel se determinará por la combinación de los valores del mismo píxel en cada una de las matrices. (7)

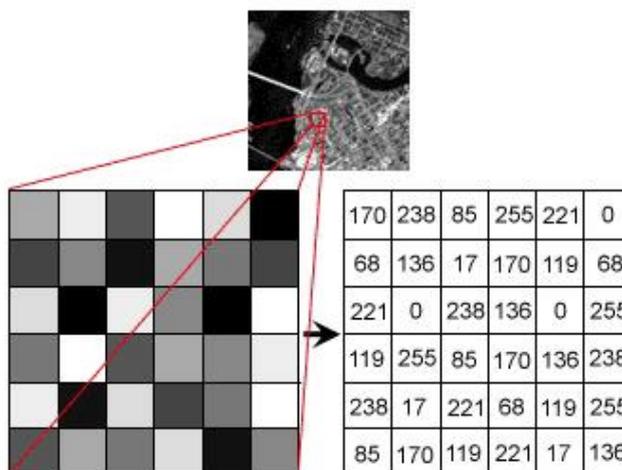


Ilustración 23.- Píxel de imagen digital

#### 4.2.1-Resolución de imágenes digitales

En una imagen digital, la resolución geométrica está directamente relacionada con el tamaño del píxel. El tamaño del píxel se expresa en micras y a través de la escala de la fotografía se traduce en magnitudes terreno, obteniéndose la resolución espacial. Para las imágenes digitales se maneja el tamaño del píxel a escala del terreno, GSD ( Ground Sample Distancie ). En la actualidad existen imágenes fotogramétricas

digitales con mayor resolución espacial que las analógicas, lo que permite abordar trabajos cartográficos de mayor escala. (7)



*Ilustración 24.- Resolución espacial de imágenes digitales*

#### **4.2.2.- Captura de imágenes fotogramétricas digitales**

Hay dos modos de adquirir una imagen fotogramétrica digital:

La adquisición indirecta mediante la digitalización o escaneado de una imagen analógica a través de un escáner fotogramétrico,

La adquisición directa en formato digital a través de una cámara fotogramétrica digital.

#### **4.2.3.- Sensores de captura de imágenes digitales**

Los sensores de captura de imágenes digitales están formados por un sustrato semiconductor que puede almacenar y transmitir carga eléctrica. El sustrato del semiconductor es silicio, al que se han añadido una serie de impurezas con una capa de dióxido de silicio que actúa como aislante.

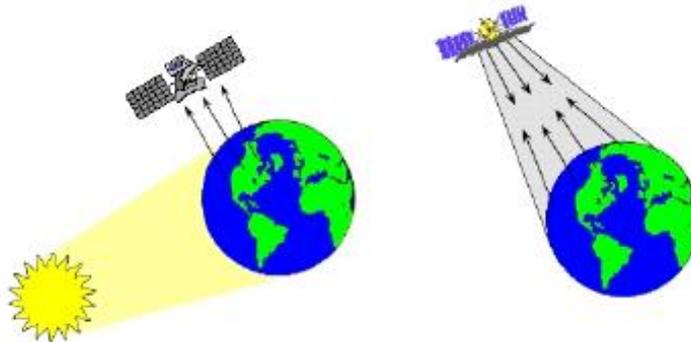
Los sensores se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios:

Según la fuente de emisión energética:

- **Sensores Pasivos:** Son capaces de captar la energía reflejada o emitida por la superficie de observación.

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

- **Sensores Activos:** Disponen de su propia fuente de emisión energética y el sistema de captura es únicamente las longitudes de onda en el mismo rango que el sistema emisor (sistemas de radar y láser).



*Ilustración 25.- Tipos de sensores: pasivos y activos.*

Según el formato de salida de la imagen:

- **Sensores Analógicos:** Son aquellos en los que el elemento fotosensible es una emulsión de una sustancia química que reacciona con la radiación de una determinada longitud de onda.
- **Sensores Digitales:** El elemento fotosensible es una sustancia que al recibir el impacto de determinados fotones genera una señal eléctrica que puede ser almacenada digitalmente.

Según el número de bandas:

- **Sensores Monoespectrales.:** Integran para cada píxel de la imagen toda la energía recibida dentro de un intervalo de longitudes de onda.
- **Sensores Multiespectrales.:** Para cada píxel son capaces de registrar separadamente los valores de radiación recibidos en distintas bandas de longitudes de onda.

Según el modo de captura:

- **Sensores puntuales:** Para cada instante el sensor registra un único punto. El registro de cada línea de la imagen se consigue por el denominado escaneo, balanceo mecánico del sensor en la dirección ortogonal al desplazamiento de la plataforma en que se montan.
- **Sensores lineales:** Para cada instante el sensor registra una línea de la imagen. Hay dos configuraciones comunes:
  - **Sensores de barrido** donde el sensor se orienta en la dirección ortogonal al movimiento de la plataforma y no requiere movimiento mecánico de escaneado.

- Sensores panorámicos, el sensor lineal se orienta en la dirección de vuelo y se incorpora un movimiento mecánico de escaneo en la dirección ortogonal.
- Sensores matriciales el cual registra una imagen completa para cada instante.

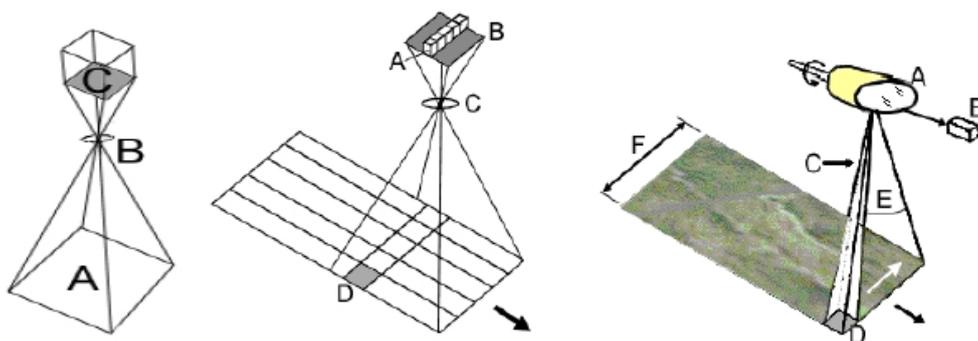


Ilustración 26.- Sensores de tipo matricial, lineal y puntual.

#### 4.2.4.- Cámara fotogramétrica digital

En la actualidad las cámaras analógicas están más en desuso frente a las cámaras fotogramétricas digitales. El principio de una cámara fotogramétrica digital es similar al de una cámara fotogramétrica analógica, pero en el plano focal, en lugar de colocar una película, se dispone sensores CCD en distribución matricial o lineal.

Las enormes ventajas de la captura digital directa de las imágenes consisten en evitar el proceso de revelado y escaneado.



Ilustración 27.- Cámara fotogramétrica Leica ADS80

### 4.3.- Orientación interna digital

La orientación interna de una imagen fotogramétrica es la primera fase del método general de la fotogrametría y consiste en la reconstrucción del haz proyectivo definido por el tipo de sensor y los puntos de la imagen.

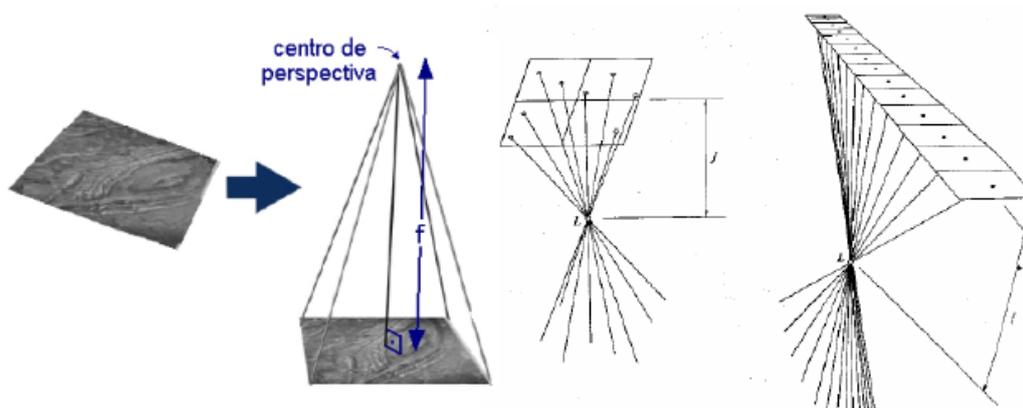


Ilustración 28.- Reconstrucción del haz perspectivo de una imagen.

A través de la orientación interna se establece la relación entre las coordenadas píxel de un punto, columna/.la, y las coordenadas en milímetros referidas al punto principal de simetría (PPS) y corregidas de una serie de sistematismos: distorsión radial de la lente, esfericidad terrestre y refracción atmosférica.

En el caso de que la imagen se haya adquirido con una cámara digital la información que necesitaremos es la que aparece en el certificado de calibración. (7)

### 4.4.- Correlación de imágenes

Se denominan puntos homólogos de las imágenes a los diferentes puntos sobre las imágenes que son imagen del punto.

En diferentes aplicaciones de la fotogrametría digital es necesario, identificado el punto en una imagen que corresponde a un punto del objeto fotografiado, localizar los puntos homólogos en otras imágenes.

La identificación de puntos homólogos se puede hacer de manera manual, tanto monoscópica como estereoscópicamente.



Ilustración 29.- Identificación de puntos homólogos.

La introducción del tratamiento de imágenes digitales en fotogrametría aporta el importante avance de permitir desarrollar métodos que automatizan la identificación de puntos homólogos.

La correlación de imágenes es una técnica que permite, entre otras cosas, la detección automática de puntos homólogos. (7)

#### 4.4.1.-Métodos de correlación

Los métodos de correlación de imágenes se diferencian principalmente según el tipo de cálculos realizados.

- Correlación por la función de covarianza.

Se calcula sucesivamente:

Los valores medios de niveles de gris en ambas matrices:

$$u_m = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}, \quad v_m = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij}$$

$$\sigma_{uv} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_m)(v_{ij} - v_m)$$

La covarianza entre las dos matrices:

que también se puede expresar como:

- Correlación por el coeficiente de correlación.

Para obtener el coeficiente de correlación se incluyen algunos cálculos del caso

$$\sigma_{uv} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij}v_{ij} - u_mv_m)$$

anterior y además se calculan:

Varianza en cada una de las matrices:

$$\sigma_{uu} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_m)^2, \quad \sigma_{vv} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_m)^2$$

O también,

$$\begin{aligned} \sigma_{uu} &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_m)^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij}^2 - 2u_{ij}u_m + u_m^2) \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}^2 - 2u_m \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij} + u_m^2 \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}^2 - 2u_m^2 + u_m^2 \\ \sigma_{uu} &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (u_{ij}^2 - u_m^2), \quad \sigma_{vv} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (v_{ij}^2 - v_m^2) \end{aligned}$$

Obteniendo el coeficiente de correlación de la siguiente forma. (7)

$$\rho_{uv} = \frac{\sigma_{uv}}{\sqrt{\sigma_{uu}\sigma_{vv}}}$$

#### 4.5.-Orientacion externa

Su objetivo consiste en la obtención de los parámetros que permiten el correcto posicionamiento del haz de rayos de la imagen, respecto a un sistema de referencia vinculado al terreno.

Según la figura mostrada continuación, existen dos sistemas de referencia:

- El sistema de referencia de la imagen (x,y,z), definido mediante orientación interna, donde el origen es el punto principal de simetría (PPS), el plano de la imagen es el plano z=0 el eje z coincide con el eje teórico óptico y la coordenada z de todos los puntos es la distancia focal cambiada de signo y el sistema de ejes (x, y) sigue las direcciones del sistema de coordenadas fiducial.
- El sistema de referencia vinculado al terreno. Generalmente un sistema geodésico para empleo de cartografía con carácter oficial.

La relación entre ambos sistemas de coordenadas no es más que una translación y un cambio de base, o tres rotaciones al ser bases de sistemas ortonormales, considerando la misma escala en ambos sistemas. (7) (8)

Para establecer esta relación se deben determinar los siguientes parámetros:

- Las coordenadas del centro de proyección de la imagen en el sistema de coordenadas terreno, (ECP , YCP , ZCP ).
- Las siguientes rotaciones:
- Rotación en torno al eje x,  $\omega$ . (9)
- Rotación en torno al eje y,  $\phi$ .
- Rotación en torno al eje z,  $\kappa$ .

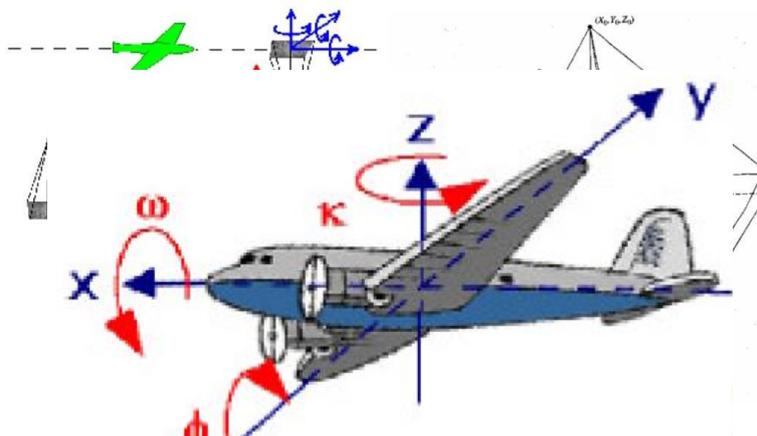


Ilustración 31.-Representación de los giros del sistema <sup>gen.</sup>

#### 4.5.1.- Puntos de apoyo

El apoyo fotogramétrico es la fase del proceso fotogramétrico en la que se obtienen las coordenadas de un conjunto de puntos identificables en las imágenes.

Hay dos tipos de configuración según la metodología que se emplee en la orientación externa:

- Apoyo continuo

Este es el método de apoyo tradicional y consiste en apoyar independientemente todos y cada uno de los pares fotogramétricos.

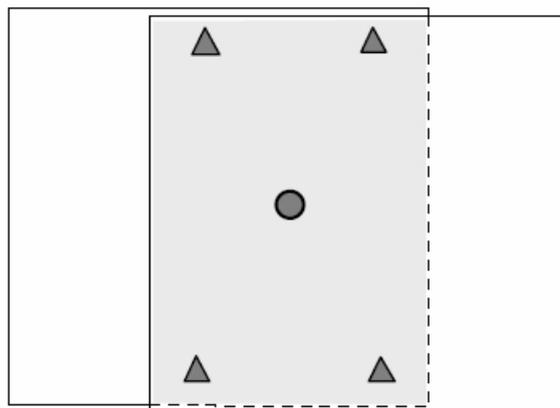


Ilustración 32.- Disposición puntos de apoyo continuo.

- Apoyo Aerotriangulado

La aerotriangulación es una técnica que permite reducir el número de puntos de apoyo a medir en campo. A medida que ha ido mejorando el software se han visto reducidos el número de puntos de apoyo necesarios. (7)

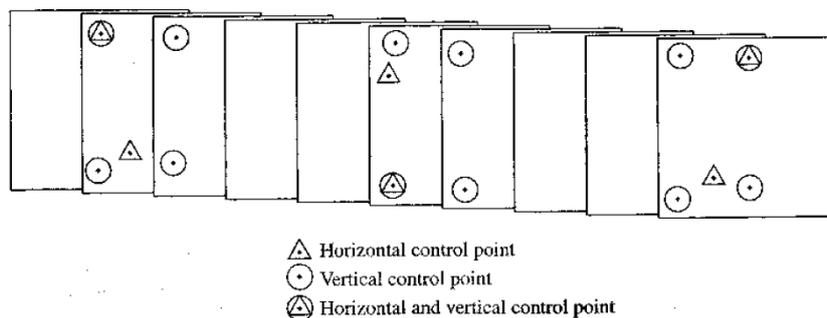


Ilustración 33.- Disposición de puntos del apoyo aerotriangulado

#### 4.5.2.- Ecuaciones de colinealidad

La condición de colinealidad expresa que el punto del terreno, la imagen y el centro de proyección, deben de estar alineados y pertenecer a una misma recta.

En fotogrametría la condición de colinealidad permite lo siguiente:

- Determinar la orientación externa de la imagen, mediante las coordenadas de la imagen y el terreno de un conjunto de puntos de control. Esta operación se denomina resección espacial.
- Determinar las coordenadas del terreno de cualquier punto que pertenezca a la zona de recubrimiento de dos imágenes, según los parámetros de orientación y las coordenadas de la imagen habiendo resuelto sus orientaciones previamente. Esta operación se denomina intersección espacial, consistiendo en solucionar la intersección de dos rectas en R3.

Dado un punto arbitrario P, de coordenadas del terreno  $\bar{X}=(X, Y, Z)$  y de coordenadas de la imagen  $\bar{x}=(x, y, z,)$  la recta que pasa por el centro de proyección, punto  $\bar{X}_{CP}=(X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP})$ , y por el punto de la imagen se expresa como:

$$\bar{X}=\bar{X}_{CP} + \lambda R\bar{x}.$$

matricialmente se expresa como,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

La matriz R es la matriz de cambio de base para pasar del sistema de referencia de la imagen al del terreno. Para deducir la matriz R, son necesarias tres matrices de rotación:

- Rotación en torno al eje z, ángulo positivo k

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_k \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

- Rotación en torno al eje y, ángulo positivo  $\phi$

Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = R_\phi \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

- Rotación en torno al eje x, ángulo positivo  $\omega$

$$\begin{pmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{pmatrix} = R_\omega \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix}$$

Sumando las tres rotaciones obtenemos la matriz  $R=R_\omega R_\phi R_k$  o lo que es lo mismo

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos k & -\cos \phi \cos k & \sin \phi \\ \cos \omega \sin k + \sin \omega \sin \phi \cos k & \cos \omega \cos k - \sin \omega \sin \phi \sin k & -\sin \omega \\ \sin \omega \sin k - \cos \omega \sin \phi \cos k & \sin \omega \cos k + \cos \omega \sin \phi \sin k & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix}$$

Para obtener las ecuaciones de colinealidad es necesario despejar la ecuación

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Obteniendo

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Las matrices de rotaciones individuales son matrices ortogonales por lo tanto su inversa coincide con la traspuesta,  $M=R^{-1}=R^T$ , obteniéndose:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{pmatrix}$$

Al desarrollar la expresión anterior en sus tres filas e introduciendo como coordenada  $f$  la distancia focal calibrada  $f$ , se obtiene:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{f} \lambda (m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)) \\ y &= \frac{1}{f} \lambda (m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)) \end{aligned}$$

$$f = 1/\lambda (m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0))$$

Después se dividen las dos primeras expresiones anteriores por la tercera, deduciéndose así las ecuaciones de colinealidad de la fotogrametría:

$$X = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = -f \frac{r}{q}$$

$$Y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = -f \frac{s}{q}$$

Siendo

$$r = m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)$$

$$s = m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)$$

$$q = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)$$

Por lo tanto, en las ecuaciones de colinealidad intervienen:

- Coordenadas de la imagen (x, y, -f)
- Coordenadas del terreno (X, Y, Z)
- Coordenadas del terreno del centro de proyección (X<sub>cp</sub>, Y<sub>cp</sub>, Z<sub>cp</sub>)
- Orientación del eje de toma respecto al sistema de coordenadas terreno definida por las rotaciones (ω, φ, κ). (7)

#### 4.5.3. Resección espacial

La resección espacial permite determinar los parámetros de orientación externa de una imagen con las ecuaciones de colinealidad.

Para ello son necesarios los datos siguientes:

- Focal de la cámara f.
- Coordenadas terreno de un conjunto de puntos de control (X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>) con i ∈ {1, 2, ... , np}
- Coordenadas imagen de los puntos de control (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) con i ∈ {1, 2, ... , np}

Así como la estimación de la precisión de las coordenadas imagen, que puede proceder de la solución de la orientación externa. Las ecuaciones de colinealidad permiten definir dos funciones:  $g$  (coordenada  $x$ ) y  $h$  (coordenada  $y$ )

#### 4.5.4 Autocalibración

Según la descripción de la resección espacial, realizada en el apartado anterior, se considera que es conocida la distancia focal conocida está calibrada y que las coordenadas imagen están referidas al punto principal de simetría. Esta situación se corresponde a cuando se dispone de la información necesaria del certificado de calibración de la cámara. Sin embargo, hay casos en los que no disponemos de esa información, por ejemplo, en una toma terrestre con una cámara no métrica.

La autocalibración es una variación de la resección espacial en la que incluimos como incógnitas parámetros de la orientación interna, así podemos abordar simultáneamente parte de la solución de la orientación interna y externa.

En uno de los casos más frecuentes, se incluyen como incógnita la corrección a la distancia focal aproximada y las coordenadas del punto principal de simetría.

#### 4.5.5 intersección espacial

La intersección espacial es un método que permite determinar las coordenadas terreno de un punto de un par estereoscópico a partir de dos imágenes, una vez se haya resuelto la orientación externa.

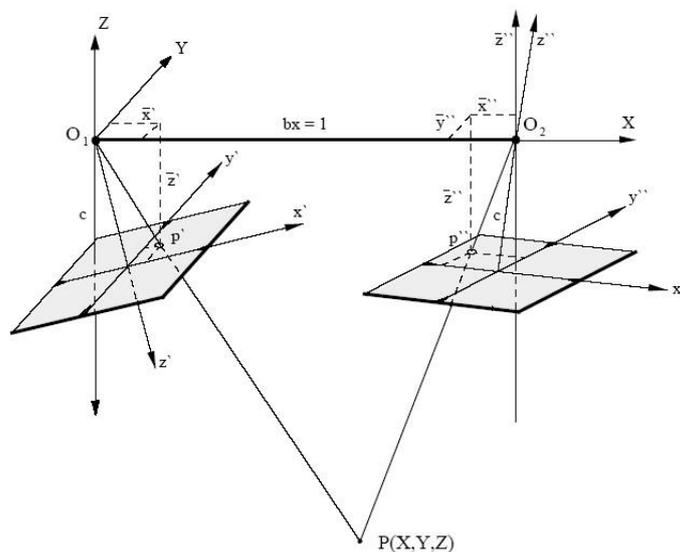


Ilustración 34.- Concepto de intersección espacial.

#### 4.5.6 GPS/INS aerotransportado

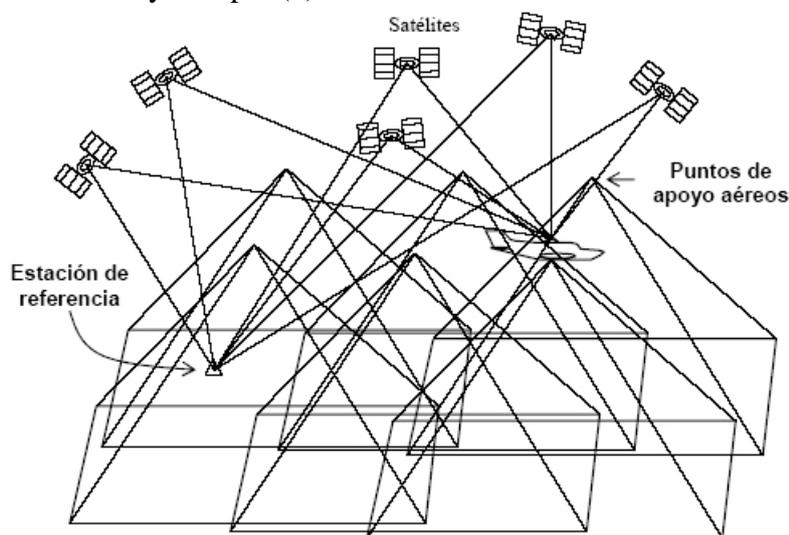
La integración en el proceso de captura de imágenes en vuelo de la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global, GPS, y del Sistema de Navegación Inercial, INS, ha permitido avances muy importantes en la propia gestión y control del vuelo, así como en la determinación de los parámetros de la orientación externa.

El sistema GPS registra mediciones sobre satélites de la constelación GPS en los instantes de las tomas fotográficas. La precisión que se puede alcanzar en el posicionamiento con esta información es del orden métrico. Sin embargo, procesando en gabinete conjuntamente la información captada por el GPS del avión junto a la información de un GPS de referencia ubicado en tierra en una zona próxima se pueden alcanzar precisiones incluso mejores que el decímetro. Al primero de los posicionamientos se le conoce como absoluto y al segundo como relativo. El resultado del GPS son las coordenadas del centro de proyección para cada una de las tomas.

El sistema INS, está integrado por una Unidad de Medición Inercial, IMU, compuesto por tres giróscopos y tres acelerómetros, y por el software necesario para determinar las aceleraciones y orientaciones con respecto a un sistema de tres ejes que se relaciona con el sistema de coordenadas imagen de la cámara.

El uso combinado del sistema GPS/INS permite obtener seis parámetros de orientación externa para cada toma, las coordenadas del centro de proyección y las tres orientaciones de los ejes del sistema de coordenadas imagen.

La contribución del sistema GPS/INS en la aerotriangulación es muy importante ya que permite reducir el trabajo de apoyo de campo al disminuir el número de puntos de apoyo necesarios para orientar un bloque fotogramétrico, con la consecuente reducción de costes y tiempo. (7)



*Ilustración 35.- Principio del GPS diferencial*

## 4.6 ORTOFOTOGRAMETRIA DIGITAL

### 4.6.1 Ortorectificación

En una imagen adquirida con una cámara convencional presenta una perspectiva central o cónica, mientras que una ortoimagen tiene una perspectiva ortogonal. Obtener información métrica precisa a partir de una imagen en perspectiva central es problemático debido a los propios principios geométricos inherentes a la perspectiva cónica y al problema de ocultamiento de parte del objeto.

Dicha problemática se resume en lo siguiente:

- La escala varía en función de la distancia del objeto al centro de la perspectiva, lo que se pone de manifiesto al aparecer el ancho del edificio a diferente tamaño a nivel de la línea de fachada o al nivel de la azotea.
- El edificio alto de la derecha hace de sombra impidiendo que parte del objeto pueda registrarse en la imagen.

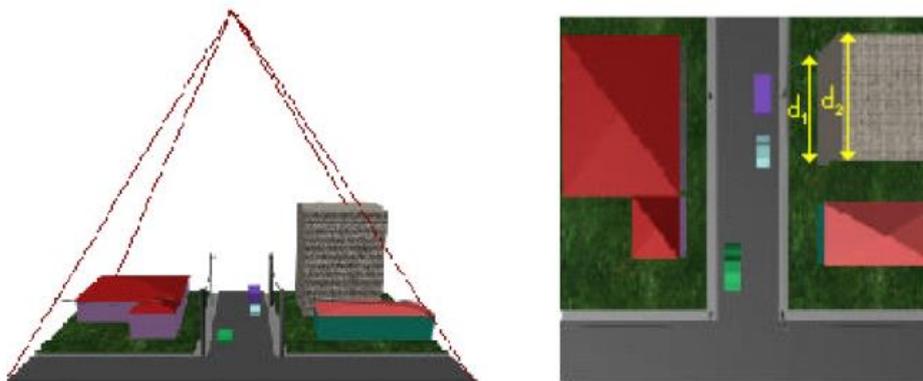


Ilustración 36.- Imagen en perspectiva cónica.

Los problemas anteriormente citados se ven amplificadas en el caso de que la toma no se ajuste al caso ideal de eje vertical.

En una perspectiva ortogonal desaparecen los dos problemas apuntados para la perspectiva cónica, resultando evidente que la escala es constante para toda la imagen y que no existe el ocultamiento debido a la perspectiva cónica.

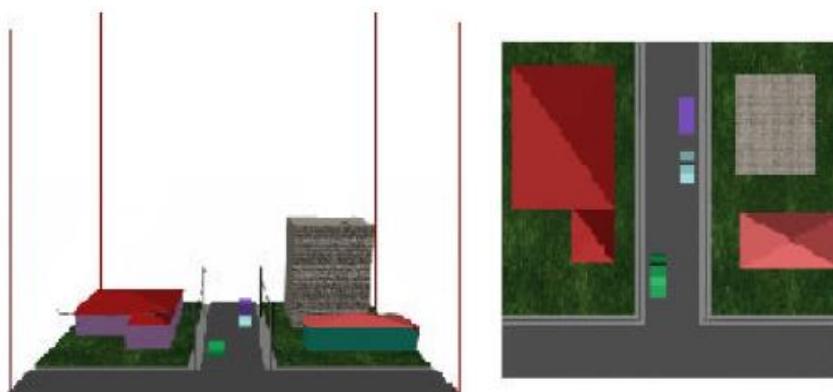


Ilustración 37.- Imagen en perspectiva ortogonal.

La ortorectificación es una evolución de la rectificación en el sentido de que, además de resolver el problema de las distorsiones debidas a la captura con el eje de toma no ortogonal al plano principal del objeto (toma oblicua), lo que ya se conseguía con la rectificación, resuelve el problema del cambio de escala en función del relieve, debido a la perspectiva cónica. (7)

#### 4.6.2 Métodos de ortorectificación digital

Para aplicar la ortorectificación digital a una imagen se suponen resueltas convenientemente sus orientaciones interna y externa, y que se dispone de un MDE.

Al estar resuelta la orientación externa conocemos el área definida por el perímetro en coordenadas terreno de la imagen.

Conocida también la huella del píxel en el terreno, podemos determinar la matriz de píxeles que corresponderá al área cubierta por la imagen de manera que estamos definiendo el formato de la ortoimagen a crear y cada uno de sus píxeles tendrán asociadas unas coordenadas terreno. Por tanto, podemos ir recorriendo los píxeles de la ortoimagen y realizando el proceso definido por los siguientes pasos:

- Determinar las coordenadas terreno del píxel en cuestión, (X; Y ).
- Con las coordenadas planimétricas se interpola sobre el MDE y se obtiene la altitud del punto, de manera que será conocida su posición espacial, (X; Y;Z).
- Con las coordenadas terreno y los parámetros de orientación externa de la imagen, se obtienen las coordenadas imagen, (x; y) a partir de las ecuaciones de colinealidad.
- Con las coordenadas imagen y los parámetros de orientación interna, se obtiene las coordenadas digitales, (col; row), a partir de invertir las operaciones de la orientación interna.
- Dado que las coordenadas digitales no corresponderán exactamente a las de un píxel de la imagen se debe obtener la información de la imagen, nivel de gris o RGB, aplicando alguna técnica de remuestreo: vecino más próximo, interpolación bilineal. (7)

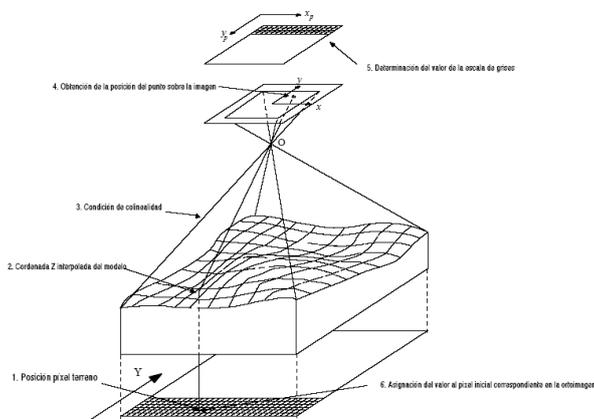


Ilustración 38.-Principio metodológico para de la ratificación digital.

### **CAPITULO III: PROPUESTA METODOLÓGICA.**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El incesante aumento en la demanda de minerales y materias primas hacen necesario la constante búsqueda de nuevas fuentes de recursos.

En minería la investigación y prospección son unas de las fases claves y que se están llevando a cabo constantemente, esto unido al gran avance en el ámbito de la captura de geoinformación y modelizado del territorio con la utilización de sensores de bajo coste y la irrupción de los drones han provocado una revolución en esta fase.

Habitualmente los drones se han usado en el ámbito de la minería para la monitorización en minería a cielo abierto, control de acopios en canteras e incluso en minería subterránea y minas abandonadas. Por todo esto es posible la incorporación de los drones a esta fase del ciclo minero proponiendo una nueva metodología.

El objeto de este apartado es el de establecer una metodología general para poder aplicar en un caso concreto el fundamento de este método de prospección.

## **2.- METODOLOGÍA**

La identificación de diversas litologías, basada en función de su comportamiento térmico, se plantea a través del tratamiento e interpretación con GIS de ortomosaicos térmicos generados a partir de bloques fotogramétricos obtenidos con sensores térmicos de bajo coste, integrados en plataformas UAV.

### **2.1.- Comportamiento térmico de las rocas a prospectar**

En un primer lugar hay que realizar un estudio térmico previo de las rocas, puesto que para que esta metodología sea válida, es necesario que exista un comportamiento térmico diferente entre ambas rocas a estudiar. Para la realización de este estudio puede utilizarse un análisis de sus correspondientes capacidades caloríficas específicas. Para comprobar que realmente existe ese diferencial térmico entre las litologías a estudiar, se debemos realizar una serie de ensayos en los que se simulan las condiciones reales a las que están expuestas las rocas para tomar información del comportamiento con un sensor térmico y posteriormente modelizar su comportamiento.

Es necesario comprobar como es el comportamiento térmico de las rocas, por lo que se realizaran tres ensayos con muestras de las rocas a estudiar. El primero pretende simular las condiciones reales en las que posteriormente se desarrollará la captura de información, y constatar la diferencia de comportamientos. Para ello se propone dejar las muestras expuestas a la radiación incidente natural. A pesar de la dependencia con respecto a muchos factores ( latitud, longitud, hora, condiciones climáticas, etc. (10)), se propone que el ensayo se realice en condiciones similares a las que posteriormente se realizará el vuelo con UAV. También se propone monitorizar el comportamiento mediante el registro de la temperatura de las muestras, con una frecuencia entre tomas en el entorno de 30 minutos, lo que permitirá obtener un número de datos suficiente

para modelizar el comportamiento (11). Una vez realizado este ensayo se proponen los otros dos. En el segundo ensayo comprobamos el comportamiento de las rocas con temperaturas bajo cero, para ello se procede a introducir nuestras muestras en una cámara frigorífica sometiendo a temperaturas por debajo de 0°C. En el tercer y último ensayo introduciremos las muestras de las rocas en un horno para calentarlas a altas temperaturas y así poder estudiar su comportamiento para posteriormente y al igual que en el anterior ensayo colocarlas en el exterior y modelizar su comportamiento en condiciones normales.

Una vez obtenidos los datos de los ensayos debemos analizarlos para establecer el comportamiento real de las litologías a prospectar. La información que se obtiene es una sucesión de temperaturas espaciadas temporalmente, por lo que para su análisis se propone una modelización en la que, mediante tablas y gráficos, se permita la identificación del comportamiento térmico real de las litologías estudiadas. Para ello, se representan gráficamente los datos en un sistema cartesiano, en el que el eje de abscisas alude al instante de la observación, y el de ordenadas la temperatura resultante. El análisis de los gráficos obtenidos permite determinar de forma lógica la evolución de las temperaturas para cada tipo de roca, permitiendo identificar tanto el comportamiento, como el instante en el que se produce la mayor diferencia de temperaturas entre ambas litologías, que obviamente se corresponde con el momento óptimo para la captura de las imágenes termográficas.

## **2.2.- Obtención imágenes térmicas con dron.**

Tras probar en el laboratorio la diferencia de comportamiento entre las dos litologías de estudio, se debe realizar la toma de imágenes, para lo cual debemos seleccionar el equipo más adecuado para esta labor. Dado que el vuelo se va a realizar con un dron, debemos tener en cuenta que el sensor a de poder montarse en el mismo, por lo que las dimensiones y el peso son unos factores muy importantes a tener en cuenta. Existen gran variedad de equipos disponibles en el mercado, debiéndose evaluar los formatos de exportación de las imágenes generadas en función del uso o aplicación a realizar, con el fin de satisfacer los requisitos de información cualitativa y cuantitativa. (11)

Tras elegir el equipo que se va a emplear para realizar la toma de datos, se debe establecer los parámetros del vuelo fotogramétrico, empezando por la altura. Esta altura viene determina por el Ground Sample Distance (GSD), parámetro que suele establecerse como estándar de la precisión o nivel de detalle del vuelo fotogramétrico. Las herramientas software más extendidas, como Pix4DCapture, DJI Pilot o MissionPlanner (12), no implementan alturas de vuelo adaptativas que permitan mantener una distancia constante con la superficie del terreno. Esto implica la necesidad de usar el software específico vinculado al UAV a utilizar. La propuesta metodológica recomienda alturas de vuelo que garanticen un valor del GSD para el sensor térmico de unos 5 cm/px.

Los valores de recubrimiento longitudinal y transversal deben considerarse teniendo en cuenta el tipo de sensor a emplear y el objetivo. Tradicionalmente, en fotogrametría aérea los valores empleados eran del 60 y 20% respectivamente. Sin embargo, con la irrupción de los UAVs, las recomendaciones han incrementado dichos valores hasta el 80 y 60% [29], pudiendo ampliarse para evitar las zonas ocultas. En caso de operar con sensores infrarrojos, dada la menor resolución radiométrica y nitidez de las imágenes (13), podemos incrementar hasta el 95%. (11)

La velocidad de vuelo es el parámetro fundamental para determinar el tiempo total de vuelo, el intervalo entre tomas y la velocidad de obturación. Al tratarse de un vuelo cuyo principal foco de interés es la componente térmica, se aconseja la reducción de la velocidad de vuelo respecto a la empleada tradicionalmente, hasta los 3-4 m/s. Se recomienda el apoyo del vuelo mediante puntos de apoyo, que permitan escalar y orientar las imágenes con respecto a un sistema de referencia establecido.

De forma complementaria al vuelo, debe establecerse una planificación de la fecha y hora de adecuada, evitando condiciones meteorológicas desfavorables, y buscando la mayor diferencia térmica entre litologías en función de los resultados de los ensayos previos. Las actividades deben realizarse en una única jornada, y en el menor tiempo posible, con el objetivo de que las condiciones térmicas no se vean alteradas, evitando así posibles afecciones al posterior procesado de las imágenes (11).

### **2.3.- Procesado de las imágenes térmicas**

Tras realizar el vuelo y obtener las imágenes deberán ser procesadas de forma semi automática basada en los principios de la fotogrametría. Este procesado de las imágenes se basa en la implementación de estas en un software basado en algoritmos Structure-from-Motion (SfM), y la correlación automática de imágenes para la generación de los productos que permitan interpretar los resultados. Cuando se trata de generar modelos térmicos, algunos autores han tratado de clasificar las diversas metodologías propuestas en diferentes categorías (11). Sin embargo, cuando se parte de imágenes térmicas, desde un punto de vista más general, los métodos se pueden dividir únicamente en tres categorías principales:

- Modelado de imágenes térmicas 2D: apoyado en los principios del método general de la fotogrametría se realiza la generación del modelo tridimensional únicamente empleando las imágenes del bloque fotogramétrico de imágenes termográficas. No siendo la alternativa más empleada debido a la menor calidad del resultado final asociada a la baja resolución y nitidez de las imágenes, con los problemas de procesado que lleva asociado.
- Mapeo de imágenes térmicas en modelos 3D existentes: En este proceso las imágenes termográficas se utilizan como fuente de datos para la textura de modelos tridimensionales ya existentes. Independientemente de la procedencia de modelo, ya que puede provenir de modelo realizados con CAD, laser-escáner,

---

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

fotogrametría, etc o el formato del modelo, nubes de puntos o modelo de triángulos.

- Combinación de imágenes RGB y térmicas: en esta categoría la fusión de imágenes y el empleo paralelo de las imágenes. La primera se basa en la combinación de la información radiométrica con la RGB en forma de imágenes de 4 bandas o de 3 bandas en las que se contiene la información térmica dentro de estas. La segunda, es una combinación de las dos categorías anteriores, en la que se generan dos modelos independientes por medio de la fotogrametría y estos son registrados en uno solo sobre el cual se proyecta la información térmica. De esta forma se cuenta con la veracidad de la información RGB y el interés de la información térmica. (11)

La metodología propuesta en este trabajo se centra en el desarrollo de la segunda categoría mencionada, en base a la generación de una nube de puntos a partir de las imágenes RGB, sobre la cual proyectar la información radiométrica proveniente de las imágenes infrarrojas.

En la actualidad, cuando se trabaja con bloques fotogramétricos obtenidos con drones, existe en el mercado una multitud de softwares capaces de procesar estas imágenes, obteniendo buenos resultados, tales como Metashape, Pix4D, PhotoModeler, Visual SfM, OpenDron Map o DronDeploy, entre otros muchos ejemplos. Sin embargo, los dos primeros mencionados destacan frente al resto, al ser las alternativas con mayor implementación y de uso más extendido, debido a la calidad de sus resultados, tratándose de softwares comerciales. A pesar de las posibles diferencias entre ellos, todos están basados en algoritmos SfM, permitiendo la obtención de información y representación de puntos a partir de su aparición en imágenes bidimensionales. De forma complementaria, estos softwares implementan otros algoritmos, como los Multiview-Stere (MVS), para la densificación de las nubes de puntos, o los Scale Invariant Figure Transform (SIFT), para la identificación automática de puntos homólogos, que minimizan la necesidad de interacción con el usuario, y ofrecen resultados de gran calidad. El método de procesado que se propone busca integrar la veracidad geométrica de los modelos obtenidos con imágenes RGB, de mayor resolución y nitidez, con el interés de la información radiométrica captada por el sensor termográfico. Se recomienda un flujo de trabajo que implementa la orientación de las imágenes RGB sobre sus homólogas térmicas, para una posterior proyección de la información infrarroja sobre el modelo tridimensional obtenido con las imágenes RGB (11).

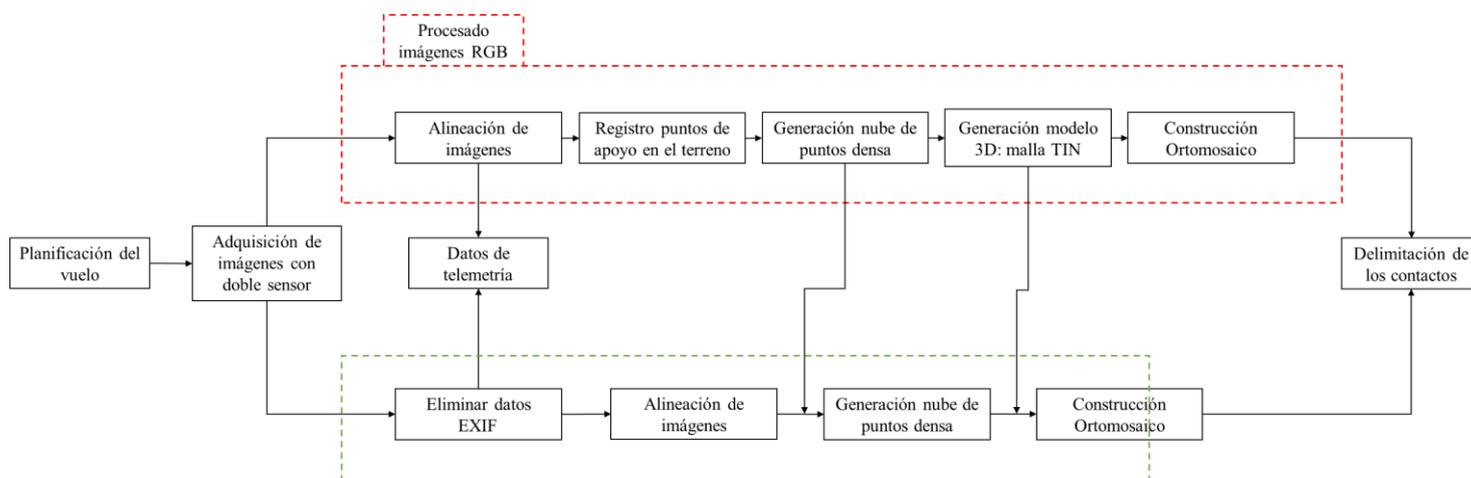


Ilustración 39.- Esquematisación de las tareas del tratamiento fotogramétrico para la prospección minera.

Una vez finalizado el proceso fotogramétrico, se propone el tratamiento del ortomosaico mediante herramientas GIS para la determinación de temperatura en cada uno de los píxeles que lo componen. Esto se debe a que generalmente la información almacenada por los sensores térmicos es radiométrica, permitiendo la conversión a temperatura a través de funciones de reclasificación.

El sistema de información geográfica (GIS), es un conjunto de herramientas utilizadas para la gestión, el procesado y el análisis de datos.

Con el objeto de obtener un resultado más acorde a la realidad, se propone realizar unas mediciones de la temperatura de algunos puntos georreferenciados del afloramiento en el momento del vuelo con motivo de realizar un ajuste de los datos obtenidos con posterioridad. De esta forma, se puede realizar una comparativa entre la medición sobre el ortomosaico transformado y las temperaturas observadas en campo, permitiendo establecer la desviación entre la temperatura real de la superficie y la obtenida en el mismo. Un análisis de la desviación entre la temperatura de la transformación inicial de la primera iteración, y las temperaturas medidas en los puntos del terreno, permitirá establecer un valor de ajuste térmico, a aplicar en una segunda iteración de la reclasificación, obteniendo de esta manera un resultado más acomodado a la realidad.

## **2.4.-Análisis e interpretación de la imagen térmica con GIS para la identificación de litología**

Como resultado se obtiene una ortoimagen con las temperaturas de la superficie de la zona de estudio en cada pixel, de forma que permita identificar las diferentes litologías presentes. La interpretación de la imagen puede realizarse de varias formas posibles. Una de ellas, muy rápida y sencilla, implica el empleo de la fointerpretación, que permite la identificación de elementos presentes en la imagen por medio del análisis e inspección visual. Sin embargo, esta técnica es subjetiva, debido a que depende de la percepción de la persona que realice el análisis, además de estar fuertemente influenciado por la experiencia y conocimiento del sujeto.

Es por ello por lo que debemos utilizar un método cuasiautomático mediante el empleo de GIS, que permita la segmentación de la imagen térmica, reflejando de forma aproximada por si sola las zonas de contacto, o la identificación de las áreas asociadas a las diferentes litologías presentes. Para ello, se debe determinar o establecer un límite térmico, es decir, una temperatura que permita distinguir las diferentes litologías presentes en la zona de estudio. De esta manera, los puntos con temperatura superior pertenecerán a un tipo de litología, y los inferiores a otra, siempre y cuando existan únicamente dos tipos de rocas en el afloramiento. En caso de existir varias litologías, deberán establecerse varios límites térmicos. Debido a que ambas litologías están en contacto, no existe una frontera térmica claramente definida, como puede ocurrir con las diferencias cromáticas, si no que existe una zona de transición de temperatura entre rocas. (11)

Se propone establecer dicha temperatura límite a partir de las temperaturas reales de las litologías captadas en campo mediante el empleo de una cámara termográfica al mismo tiempo que se esta realizando el vuelo fotogramétrico y las temperaturas obtenidas en los ensayos de laboratorios efectuados con anterioridad. La temperatura límite propuesta, se determina como la diferencia entre la temperatura media de la litología de menor temperatura, en base a las mediciones de campo, y la mitad de la diferencia media de temperaturas entre ambas litologías medida en base a los ensayos de laboratorio.

$$T_{Limit} = T_{RockMin} \pm \frac{\Delta T_{Average}}{2}$$

Donde:

$T_{Limit}$  : Temperatura limite.

$T_{RockMin}$  : Temperatura media de la litología en campo de la roca de interés.

$\Delta T_{Average}$  : Diferencia media de temperatura entre litologías determinada en laboratorio.

Aplicando la expresión anterior en la que el signo positivo o negativo depende de las temperaturas medias observadas en las litologías, de forma que el valor es positivo cuando la temperatura de la roca de interés es menor y negativo cuando es mayor que

la de la roca sin interés. De esta manera se obtendrá un nuevo mapa, a través de una operación de reclasificación que reasignará un nuevo valor para los píxeles de temperatura menor o igual a la temperatura límite, y otro valor para aquellos de temperatura superior a la temperatura límite. El nuevo mapa es una representación ráster de la distribución espacial de dos valores, sobre el cual ha de realizarse una labor de fotointerpretación representando, mediante líneas sobre la reclasificación, los contactos de forma que se delimiten las zonas asociadas a cada una de las litologías presentes. (11)

## **2.5.- Validación de la metodología**

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos por la metodología propuesta frente a las metodologías convencionales, se propone compararlos con los obtenidos por otros procedimientos como son la cartografía geológica de detalle y la fotointerpretación. Se recomienda emplear un software GIS que permita la integración y comparación de los contactos y áreas de interés resultantes de la aplicación de las diversas técnicas planteadas, a fin de poder comprobar la bondad de la nueva metodología frente a las alternativas convencionales. A partir de los resultados extraídos de GIS, pueden realizarse comparaciones de los contactos entre litologías y las áreas que estos definen.

En primer lugar, se propone realizar la cartografía geológica de detalle de la zona de estudio mediante la utilización de métodos de topografía clásica, en base a la toma de datos determinando las coordenadas conforme a un sistema de referencia establecido de los puntos que delimitan ambas litografías, así como los puntos donde pueden tener una afección relevante en el comportamiento térmico, como pueden ser estructuras geológicas, masas de vegetación, etc.

El conjunto de datos, son procesados con el software adecuado para la unión de los puntos y la generación de las líneas de delimitación de los contactos y otras estructuras presentes en la zona de estudio. Este procedimiento es sin duda alguna el más riguroso, pero también el más costoso. En la presente investigación se propone aplicar la validación a toda la zona objeto de estudio. En un caso real, obviamente se puede reducir a zonas representativas. En segunda instancia, se propone representar el contacto mediante la identificación del cambio cromático asociado a las diferentes litologías en base al ortomosaico generado por técnicas fotogramétricas con el bloque de imágenes RGB del sensor dual empleado (fotogeología). Esta validación requiere la posterior comparación entre los contactos determinados sobre los ortomosaicos RGB y Térmico (11).

## **CAPITULO IV: RESULTADOS.**

## 1.-INTRODUCCIÓN

Para verificar la metodología propuesta en el apartado anterior, se localizó una zona donde las condiciones fueran lo más favorables posibles donde exista una clara diferenciación de color entre dos litologías en superficie. Dicha zona se localiza en el Término Municipal de Udías (Cantabria, Norte de España), y se caracteriza por la existencia de importantes afloramientos de calizas y dolomías en contacto.



*Ilustración 40.- Localización zona de estudio.*

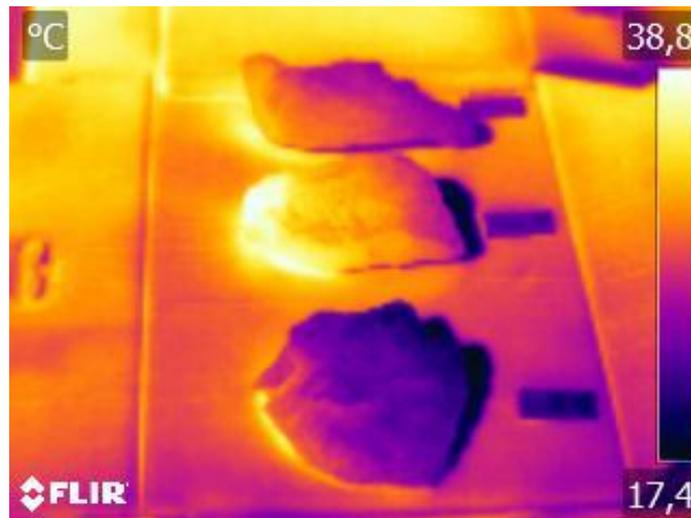
Cantabria tiene una gran tradición minera, basada en la explotación de yacimientos de sulfuros complejos de Pb-Zn, entre los que destaca el explotado en la Mina de Reocín, uno de los mayores yacimientos a nivel mundial de la tipología Mississippi Valley. Estos afloramientos están relacionados con el metalotecto denominado Formación Reocín, concretamente, están asociados a las dolomías de edad gargasiense, litologías con contenidos en hierro que constituyen la roca encajante de dichas mineralizaciones. Por ello, la identificación de estas dolomías permitiría la definición de zonas de interés para el descubrimiento de yacimientos de sulfuros de Pb-Zn.

La identificación de ambas litologías puede realizarse mediante fotointerpretación de imágenes capturadas con sensores RGB, debido a las diferencias de color de la dolomía, conferidas por el contenido en hierro de su composición dotándolas de un tono rojizo característico lo que permite identificar fácilmente zonas potencialmente mineralizadas con las formaciones a techo y muro. Además, las rocas presentes debieran de tener un comportamiento térmico diferente, debido a sus distintas características. Por ejemplo, existe una diferencia apreciable en el calor específico de la caliza ( $0.515 \pm 0.015$  kJ/kg °C) y el de la dolomía ( $0.553 \pm 0.082$  kJ/kg °C), lo que induce a pensar que existe un comportamiento térmico diferente entre ambas litologías.

## 2.- RESULTADOS

### 2.1.- Comportamiento térmico de las rocas a prospectar

Los ensayos iniciales de laboratorio buscan determinar si existe diferencia de temperaturas entre litologías y, en caso de ser así, en qué momento del día ésta es mayor, para programar el vuelo en esas condiciones. Para realizar dichos ensayos, se tomaron seis muestras, tres de cada tipo de roca, exponiéndolas a la radiación natural del sol, y se tomaron imágenes con una cámara térmica Flir E40. A continuación se muestra una de las imágenes tomadas en dicho ensayo.



*Ilustración 42.- Imagen térmica.*

La cámara termográfica debe estar debidamente calibrada. Las especificaciones técnicas de la cámara utilizada en este ensayo son las siguientes:

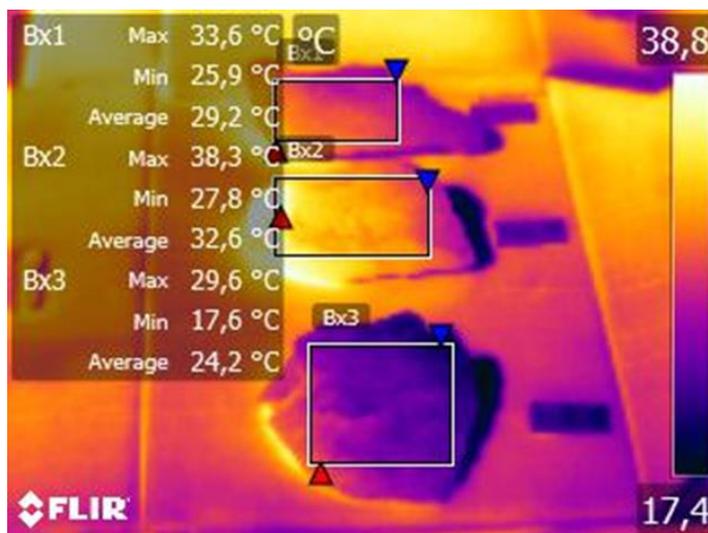


*Ilustración 41.- Cámara térmica Flir E40.*

*Tabla 1.- Especificaciones de la cámara térmica.*

PARAMETROS DE LA CAMARA	
Resolución	320x240 px
Resolución RGB	3.1M px
Sensibilidad térmica	< 0.05 °C
Precisión	+/- 2°C
Batería	4 horas

La determinación de la temperatura de cada una de las seis muestras se llevó a cabo empleando el software Flir Tools para el análisis de las imágenes termográficas. Para ello se delimitó sobre las propias muestras un área coincidente para las diferentes tomas, considerando tanto la temperatura media de las muestras como, la diferencia entre las temperaturas de las dos litologías en el momento de la toma.



*Ilustración 43.- Imagen térmica procesada.*

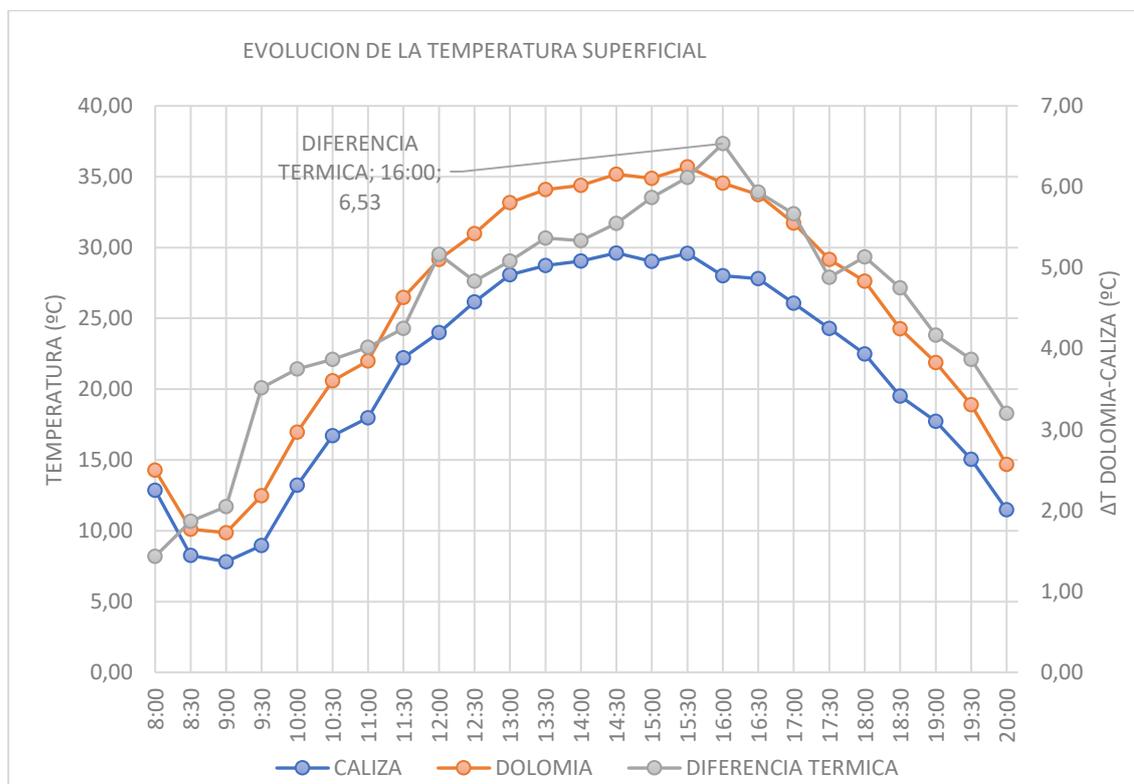
Dando como resultado la siguiente tabla con todas las temperaturas de las muestras así como la diferencia entre ambas litologías.

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

*Tabla 2.-Temperaturas de las muestras expuestas a la radiación solar.*

Hora	Temperatura °C	Humedad %	Presion miliBares	Observaciones	Temperatura muestras						Diferencia °C
					Muestra 1 Caliza	Muestra 2 Dolimia	Muestra 3 Caliza	Muestra 4 Dolimia	Muestra 5 Caliza	Muestra 6 Dolomia	
7:55	18	37	1018	Condiciones iniciales							
8:00	7	38	1018	Radiacion directa	13,4	14,1	12,3	14,9	13,4	14,1	1,43
					12,9	13,8	11,9	14,5	13,2	14,3	
8:30	9	54	1019		8,3	10,8	7,9	10,4	9,4	9,5	1,87
					7,8	9,8	7	11,1	9,1	9,1	
9:00	9	61	1020		8,5	10,9	7,4	10,4	8,9	9,3	2,05
					7,5	9,4	6,2	10,6	8,4	8,6	
9:30	10	61	1020		9,6	12,4	8,3	13,4	8,5	13,5	3,52
					9,3	10,8	7,2	13,7	10,8	11	
10:00	11	58	1020		13,7	16,9	11,7	18,6	15,8	18	3,75
					13,3	14,9	10,4	17,9	14,4	15,5	
10:30	12	56	1020		17,3	19,9	14,4	22,6	19,3	20,5	3,87
					17,3	19,3	14,2	22,1	17,8	19,1	
11:00	13	56	1020		19	21,3	15,7	24,4	20,1	21	4,02
					18,5	19,7	14,7	24,5	19,8	21	
11:30	13	56	1020		23,2	26,1	19,6	29,9	25,4	26,2	4,25
					22,7	23,8	18,7	28,5	23,7	24,3	
12:00	13	47	1019		22,5	28	20	31,1	25,7	26,1	5,17
					26,1	28,6	22	33,1	27,6	28	
12:30	14	47	1019		27,4	30,7	23,5	34,3	29,1	29,7	4,83
					26,5	28,7	22,2	33,7	28,2	28,8	
13:00	14	45	1019		30,3	33,7	25,1	36	30,4	31,5	5,08
					28,8	31,9	24	35,5	29,9	30,4	
13:30	14	44	1019		30,4	34,2	25,6	36,9	30,9	32,2	5,37
					29,8	33,3	25,1	36,5	30,6	31,5	
14:00	14	45	1019		31	34,7	25,6	37,7	31,3	31,8	5,33
					30	34,1	25,7	36,7	30,7	31,3	
14:30	14	44	1019		31,4	35,2	26,6	37,4	30,9	32,9	5,55
					30,5	34,5	26,4	37,5	31,9	33,5	
15:00	13	45	1018		30,7	34,3	25,7	37,9	30,9	33,3	5,87
					30	34,4	26	36,8	30,8	32,6	
15:30	13	44	1018		31,2	34,6	26,2	37,8	31,2	34,3	6,12
					31,1	36	26,3	37,4	31,5	34,1	
16:00	13	44	1018	Viento leve	28	31,6	22,5	36,6	30,2	33,4	6,53
					30,4	35,5	26,4	36,1	30,6	34,1	
16:30	13	42	1018		29,2	32,6	24,2	35,4	28,8	31,9	5,93
					29,5	34,3	25,5	35,3	29,6	32,9	
17:00	13	41	1018	Sol por el otro lado	27,1	30,9	23	32,4	26,1	29,9	5,67
					28,1	33,1	23,8	32,8	28,3	31,3	
17:30	13	40	1018		24,9	28,4	21,4	29,9	24,7	27,6	4,88
					25,9	31	23	28,6	25,8	29,5	
18:00	13	42	1018		23,9	26,7	20,3	27,3	21,2	26,6	5,13
					24,2	28,9	21,3	28	24	28,2	
18:30	12	42	1018		20,5	23,5	17,6	24	19,4	23,4	4,75
					20,7	25,2	18,6	24,1	20,3	25,4	
19:00	12	45	1019		18,2	20,9	16	21,6	17,7	21,4	4,17
					19	23,3	17,4	21,4	18	22,7	
19:30	12	46	1019		15,4	18,1	13,2	18,5	15,2	18,3	3,87
					16	19,4	14,5	19	15,9	20,1	
20:00	11	45	1019	Sombra	11,5	14,6	10,3	13,3	11,3	14,5	3,20
					11,9	16,8	12,6	13,5	11,3	15,4	

Tras realizar el procesado de todas las imágenes se obtiene el siguiente gráfico.



Como se puede comprobar en el gráfico hay una clara diferencia de temperatura entre las dos litologías, así como una evidente relación entre el diferencial térmico y el tiempo de exposición solar, alcanzando su máximo valor (6,53°C) al mismo tiempo que se alcanza la máxima temperatura de las rocas entorno a las 16:00 horas de la tarde.

Con el objetivo de confirmar los resultados anteriores y para realizar un amplio estudio del comportamiento de las dos litologías en condiciones extremas se llevan a cabo un par de experimentos complementarios de enfriamiento y calentamiento forzado.

- Enfriamiento forzado: consiste en el enfriamiento de las seis muestras a -30°C y la posterior colocación de estas a la exposición solar directa para el análisis de su evolución térmica. Como resultado de este experimento se obtiene una diferenciación entre la temperatura de la caliza y la dolomía, siendo la de esta última superior.
- Calentamiento forzado: consistente en calentar las muestras en un horno hasta los 75°C, donde permanecen tres horas. Posteriormente se dejan enfriar de forma natural hasta llegar a la temperatura ambiente. En este caso, los resultados fueron más alentadores en cuanto a la diferencia de temperatura entre las muestras, llegándose a obtener diferencias térmicas de hasta 7,2°C, entre calizas y dolomías.

Todos estos ensayos vienen a ratificar la condición fundamental que se debe cumplir para poder aplicar la metodología desarrollada en esta investigación: tiene que haber una diferencia del comportamiento térmico entre las litologías que se pretenden prospectar, para que los sensores infrarrojos se puedan utilizar. Además, estos ensayos vienen a deducir el momento del día en el que se produce la máxima diferencia, siendo éste el óptimo para la captura de información. De esta manera, se establecen las horas centrales del día como el mejor instante para la realización del vuelo fotogramétrico. (11)

## **2.2.- Obtención imágenes RGB y térmicas con dron.**

Para la obtención de las imágenes RGB y térmicas se llevó a cabo con la realización de un proyecto de vuelo programado y dimensionado en base a las especificaciones que se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 3.- Parámetros del vuelo fotogramétrico.*

PARAMETROS DEL VUELO	
Altura (m)	50
Velocidad (m/s)	1,75
Recubrimiento longitudinal	85
Recubrimiento trasversal	83
Resolución (cm/px)	1,3 (RGB) 5 (IR)
Distancia entre imágenes (m)	4,35
Numero de fotografías	2405
Trazado (mxm)	52x39 (RGB) 32x25,6(IR)
Tiempo de vuelo (min)	150
Intervalo de fotos (s)	2,5

Para la programación de los vuelos se utilizó el software específico de UgCS, que permite la programación de los proyectos de vuelo sobre MDT, estableciendo una altura de vuelo adaptativa, es decir, constante respecto la superficie. Todo ello incorporando la plataforma de vuelo seleccionada para el caso concreto, DJI Matrice 210 V2.



*Ilustración 44.- Dron UAV DJI Matrice 210 V2 con cámara Zenmuse XT2.*

El dron utilizado para el vuelo es de tamaño medio con unas dimensiones de 883x886x398 mm una vez desplegada y un peso de 4.8 kg. Su carga útil es hasta 2 kg, ya que cuenta con doble soporte de gimbal para la instalación de sensores. Ofrece una autonomía de hasta 38 min, alcanzado velocidades de 82.8 km/h y rangos de alcance de 8 km, gracias su sistema GNSS de GPS+GLONASS.

El sensor incorporado en la plataforma es un sensor radiométrico Zenmuse XT2 de DJI. Es un sensor dual que incorpora sensores RGB e infrarrojo, y además lleva



*Ilustración 45.- Sensor radiométrico Zenmuse XT2.*

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

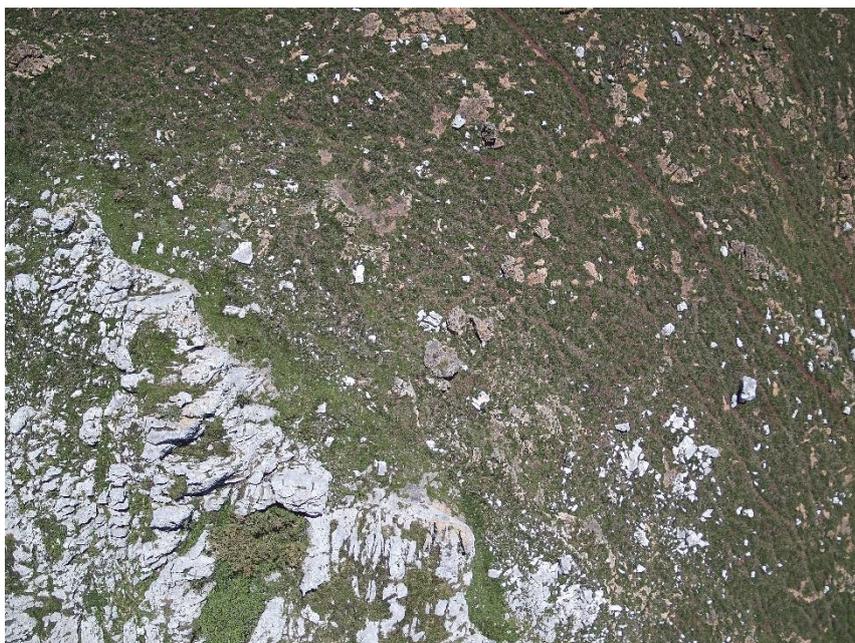
instalada la tecnología Multi-Spectral Dynamic Imaging (MSX) propia de Flir, para una mejor interpretación de las imágenes térmicas.

Se trata de un equipo de bajo coste cuyas características vienen descritas en la siguiente tabla.

*Tabla 4.-Parámetros del sensor RGB.*

PARAMETROS SENSOR RGB	
Tamaño del sensor	1/1.7" CMOS
Resolución	4000x3000 px
Distancia focal	8 mm
Formato	JPEG

El vuelo se realizó el 20 de mayo de 2021, con inicio a las 15:00 horas, con condiciones meteorológicas favorables y una temperatura media a lo largo del vuelo de unos 21°C. Estas condiciones son muy similares a las existentes durante el ensayo realizado en laboratorio, en base al que se determinó la situación en la que se producía la mayor variación térmica entre ambas rocas. Se volaron 76 hectáreas., El vuelo tuvo una duración de 1 hora 32 minutos y se obtuvieron 2,405 imágenes RGB en formato JPEG, y el mismo número de imágenes térmicas complementarias.

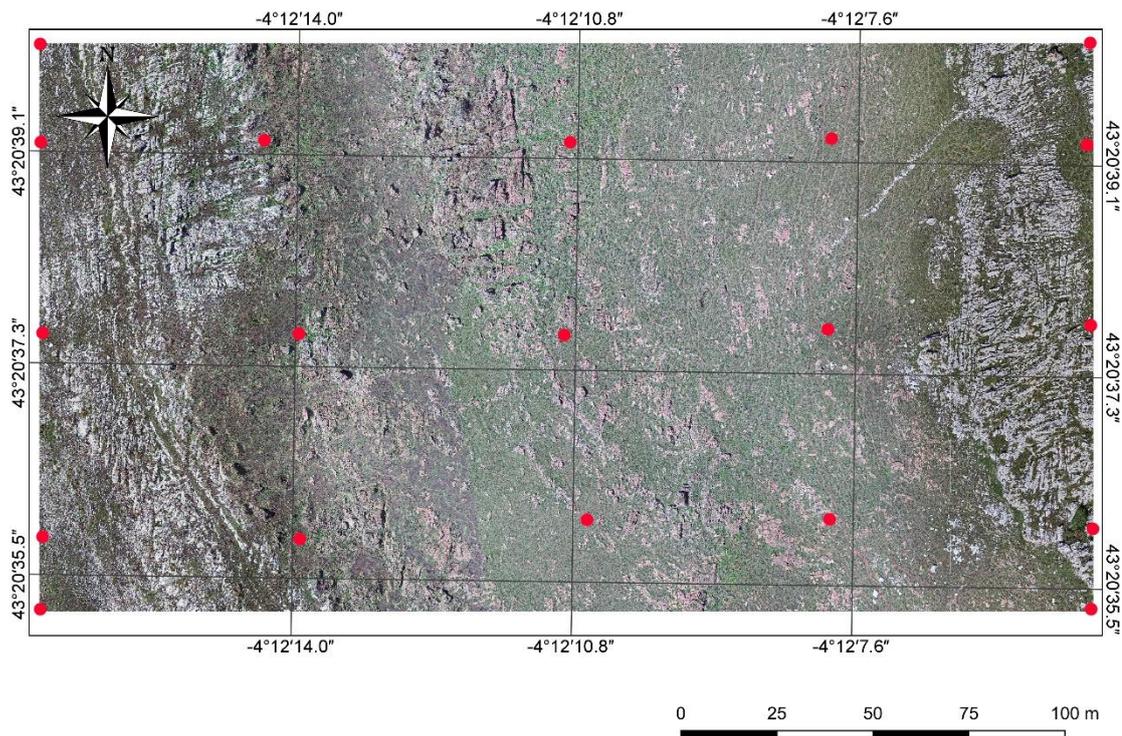


*Ilustración 46.- Imagen RGB obtenida con el vuelo.*

Para una correcta orientación y escalado del modelo, el vuelo fotogramétrico se apoyó con un total de 19 puntos colocados uniformemente formando una maya. Los puntos de apoyo son dianas fotogramétricas de acero inoxidable, de dimensiones 15x15 pintadas con una cuadrícula negra y blanca, cuyas coordenadas se obtuvieron mediante técnicas de posicionamiento global (GPS) en el sistema de referencia oficial (ETRS89-UTM Huso30), que a su vez constituye el sistema de referencia utilizado para toda la investigación.



*Ilustración 47.- Diana fotogramétrica.*



*Ilustración 48.- Distribución puntos de apoyo.*

### 2.3.- Procesado de las imágenes térmicas

El tratamiento de las imágenes obtenidas a partir del vuelo fotogramétrico se realizó empleando el software Agisoft Metashape versión 1.7.2. Se utilizó el flujo de trabajo establecido con anterioridad en la propuesta metodológica, dando como resultado la obtención de una nube de puntos con un total de 40.458.511 puntos, un modelo TIN con 9.692.656 caras y un ortomosaico con resolución de 1.38 cm/px. El objetivo de la generación del ortomosaico es la posterior comparación mediante la técnica de fointerpretación.

Las imágenes térmicas fueron obtenidas simultáneamente al RGB, gracias a la dualidad del sensor escogido. El sensor infrarrojo se caracteriza por las siguientes especificaciones técnicas.

*Tabla 5.- Parámetros del sensor térmico.*

PARAMETROS SENSOR TERMOGRAFICO ZENMUSE XT2	
Tipo	Microbolómetro Vox no refrigerado
Resolución	600x512 px
Distancia focal	19 mm
Banda espectral	7,5-13,5 μm
Sensibilidad	0,05°C
Formato	JPEG, TIFF, R-JPEG

Durante el vuelo se configuro la cámara, estableciendo el modo de alta ganancia, una emisividad del 0.9 y una temperatura ambiente de 22°C, condición medida con la estación meteorológica portátil llevada a campo el día del vuelo.

El set de imágenes fue procesado empleando el mismo software y hardware que se utilizó para las imágenes RGB. Al haber realizado una proyección de la información termográfica sobre el modelo RGB, ambos modelos son geoméricamente iguales, salvo que en el caso del modelo RGB para cada punto se obtiene el valor del nivel digital de cada color, mientras que para el modelo térmico el valor del nivel digital se corresponde con un valor correlacionado con la temperatura determinada para cada punto a partir de las imágenes térmicas. (11)

El conjunto de datos térmicos está constituido por un total de 2,405 de imágenes raw en formato TIFF propio de Flir. La resolución radiométrica del sensor permite almacenar rangos de valores de hasta 14-bits. La información está directamente relacionada con la conversión de temperaturas para cada pixel de la imagen capturada por el sensor en el momento de almacenamiento de la imagen. Con dicha información, es posible obtener la temperatura de cada pixel a partir de la relación aportada por el fabricante del sensor aplicando una operación de reclasificación para cada pixel del orto mosaico. Esta operación de reclasificación se hace con las herramientas que lleva incorporadas QGIS. La relación o fórmula para implementar para el modelo de sensor empleado es la siguiente:

$$S \cdot Res = T_{pixel}$$

Donde:

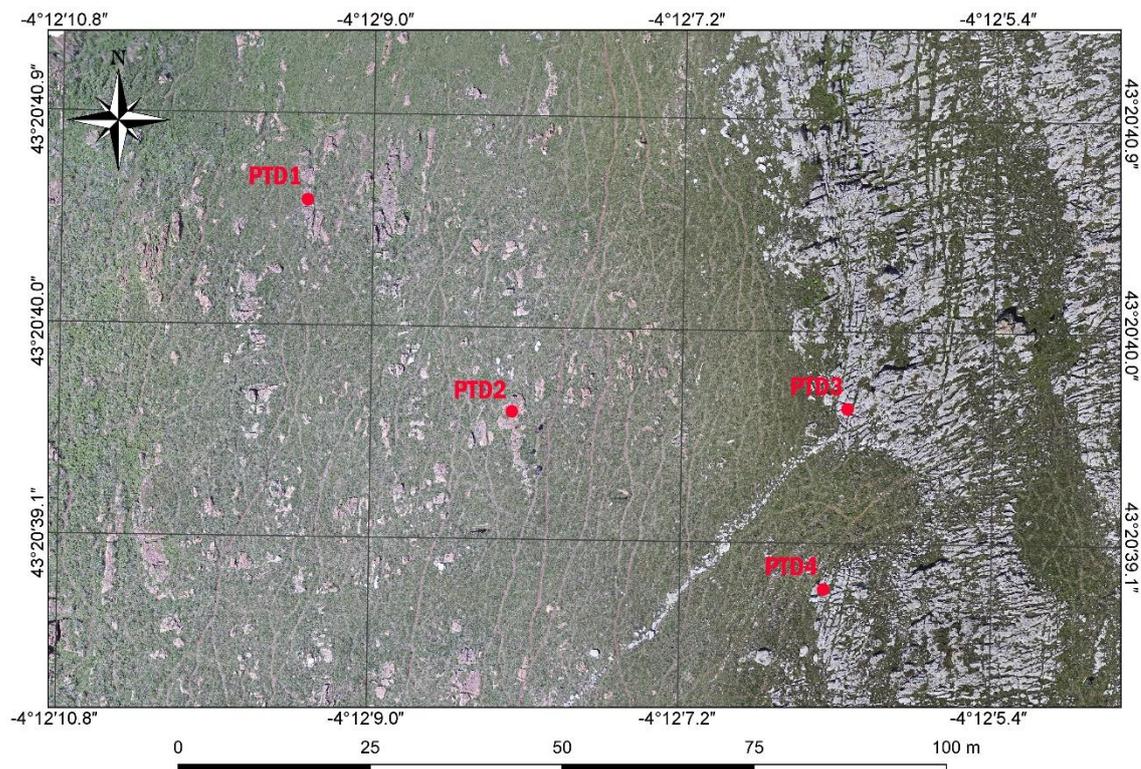
S: Valor del píxel en 14 bits.

Res: 0.4 Kelvin por conteo para baja resolución y 0.04 Kelvin por conteo para alta resolución.

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

$T_{\text{pixel}}$ : Temperatura del pixel en Kelvin

Durante la realización del vuelo y de forma complementaria se realizaron la toma de imágenes térmicas con la cámara Flir E40 en varios puntos del terreno, dos correspondientes al afloramiento de las dolomías y otros dos en las calizas (Ilustración 46). El objetivo de estas imágenes es la determinación de la temperatura en diferentes zonas, para poder verificar la medición de temperaturas realizadas por sensor del dron.



*Ilustración 49.- Distribución de los puntos de apoyo térmico.*

Los resultados de las observaciones termográficas son los recogidos en la tabla que se muestra a continuación:

*Tabla 6.- Puntos de control térmico.*

PUNTOS DE CONTROL CAMARA TERMICA FLIR E40						
ID	X	y	Z	CAMARA (°C)	ORTOIMAGEN (°C)	
PTD1	402527,461	4799785,31	339,304	33,97	33,69	
PTD2	402554,924	4799758,19	351,408	32,98	30,29	
PTC1	402597,061	4799735,16	368,758	28,84	27,5	
PTC2	402609,065	4799762,47	368,569	29,76	28,89	

Como se puede apreciar en los resultados de la tabla las mediciones de temperatura en la cámara y la ortoimagen no son iguales, siendo las temperaturas de la cámara de mano mayores que las obtenidas con el sensor aerotransportado. La diferencia media entre las mediciones en cada punto es de 1.05 °C. A pesar de ello, la diferencia térmica entre los puntos tomados en las dos litologías es notablemente mayor para ambos sensores, permitiendo realizar la identificación de los contactos.

Al obtener esa diferencia real entre la temperatura real de la roca y la obtenida con el sensor aerotransportado, se realiza un ajuste del modelo térmico, en lo que previamente se definió como segunda iteración. Este ajuste se hace mediante una nueva reclasificación de la imagen inicial, en la que al valor de cada pixel (temperatura) se le incrementa la diferencia media obtenida precisamente entre ambos sensores (1.05°C). La imagen resultante introduce un nuevo valor de la temperatura en cada pixel más próximo a la temperatura real de las rocas.

De esta forma, la segunda iteración de la transformación ráster implementada en el modelo sigue la siguiente expresión:

$$T_{pixel} (°C) = S \cdot Res - 273.15 \frac{°C}{K} + 1.05 °C$$

De esta manera se obtiene el mapa final térmico de la zona objeto de estudio.

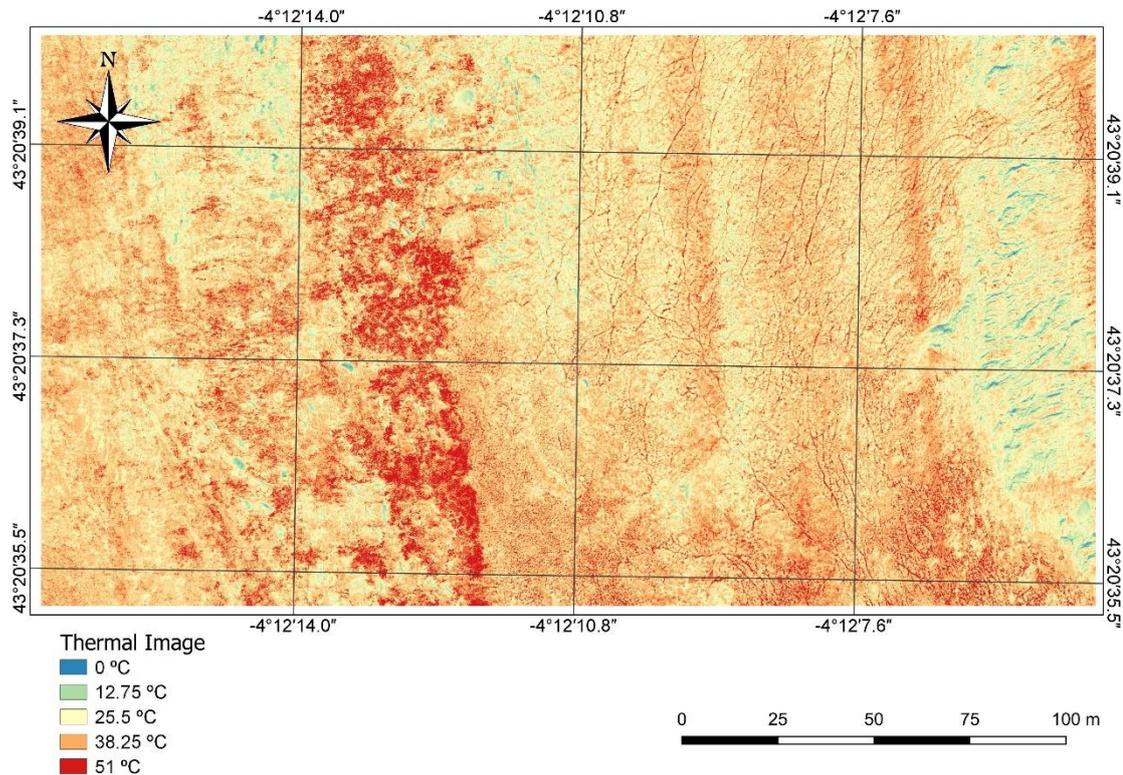


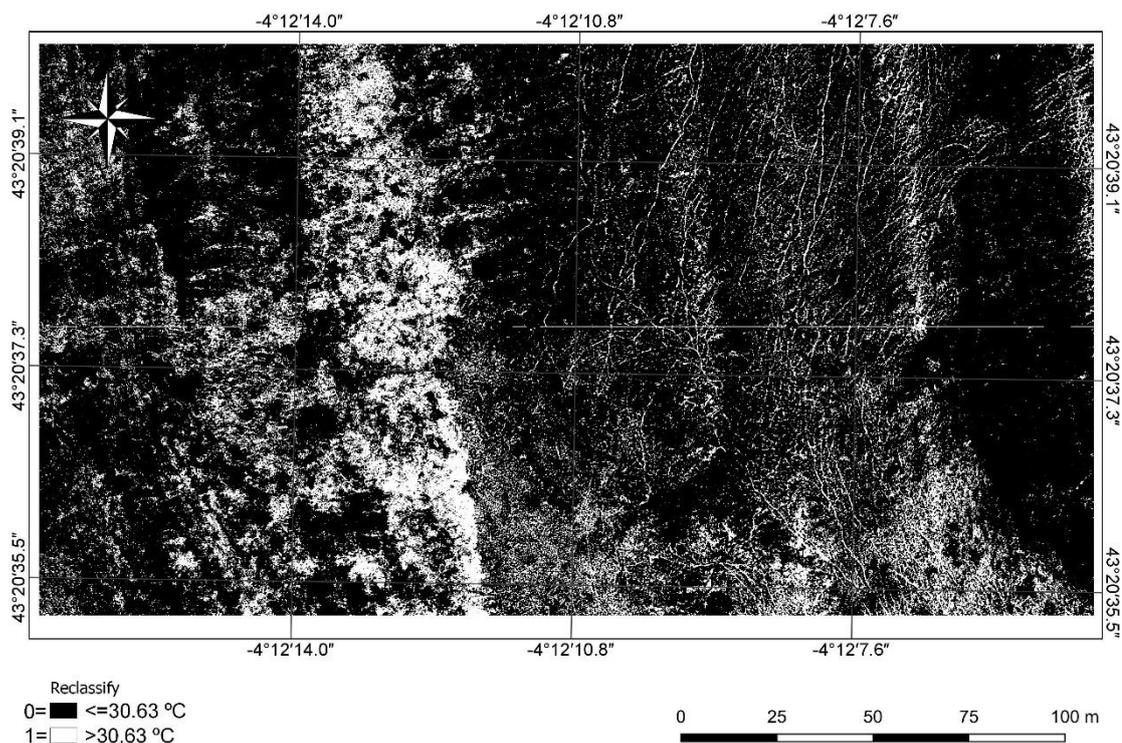
Ilustración 50.- Imagen térmica.

## 2.4.- Análisis e interpretación de la imagen térmica con GIS para la identificación de litología

Con el ortomosaico en la plataforma QGIS, se puede iniciar el análisis termográfico que conduce a la identificación de los contactos de ambas litologías en superficie. Un primer análisis consiste en la interpretación de los colores asignados a cada pixel, en función de la temperatura, obteniendo una primera delimitación en base a las variaciones térmicas (variaciones de colores). Dado que el contacto no es tan claro como en el caso RGB, en el que el cromatismo de ambas litologías marca inequívocamente la diferencia, se propone automatizar el procedimiento de análisis con el objeto de mejorar los resultados, aunque no esté exento de supervisión. La automatización del proceso se realiza según lo establecido en la propuesta metodológica, llevando a cabo una segmentación de la imagen que permite identificar la superficie de ambas litologías y por tanto el límite entre ellas.

Tal y como se ha descrito anteriormente, las mediciones de la cámara de mano dieron como resultado que la dolomia se encontraba a una temperatura media de 33,48 °C durante el momento de realización de vuelo. Por otro lado, el ensayo realizado en laboratorio con condiciones similares establece que la diferencia térmica media durante las horas de vuelo es de 5,7 °C. Siguiendo con la propuesta metodológica de la investigación, se establece que la temperatura límite que permite establecer la distinción entre las rocas de caliza y dolomía es 30,63 °C. (11)

Mediante QGIS se asigna el valor 0 a los píxeles del mapa cuyo valor es igual o menor que 30,63 °C y 1 los de valor superior. El resultado de la operación es una nueva imagen en el cual se representa por color blanco aquellos píxeles de valor 1 y negro los de valor 2.



*Ilustración 51.- Imagen tras la reclasificación en función de la temperatura límite.*

Sobre este nuevo mapa se pueden identificar las principales zonas de afloramiento de las dos litologías presentes, tanto la de caliza como la de dolomía. La zona de la derecha de la imagen sería la correspondiente a la caliza representada por un gran bloque negro, así como la gran mancha blanca del centro de la imagen correspondiente a la zona de afloramiento de dolomía. Esta dualidad de color permite de forma sencilla y rápida realizar una fointerpretación del propio mapa, para delimitar las litologías y por tanto establecer los contactos entre ambas, tal y como se puede apreciar en la ilustración 49.

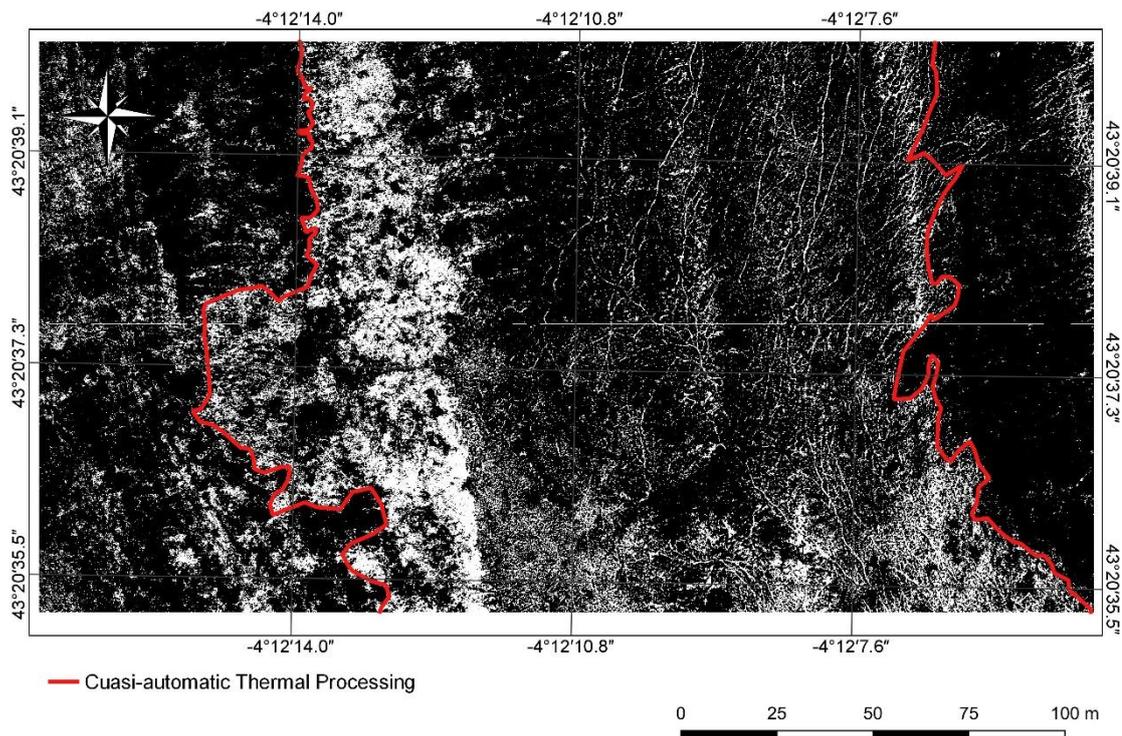


Ilustración 52.- Contactos de la metodología propuesta.

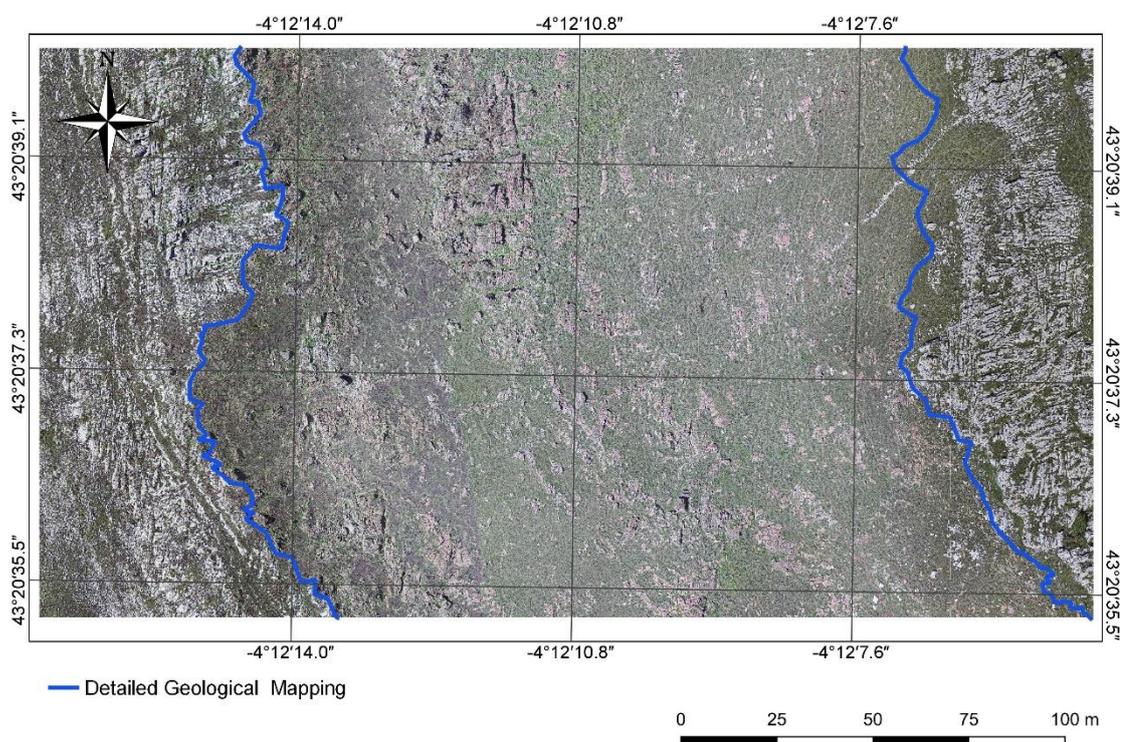
## 2.5.- Validación de la metodología

Tal y como se establece en la propuesta metodológica, con el objeto de validarla, se realiza el mismo análisis por otras dos técnicas, la cartografía geológica de detalle y fotointerpretación del mapa RGB. Todo ello se puede llevar a cabo en este caso concreto debido a la clara diferenciación en la coloración de las dos litologías y su facilidad de identificación en campo, como se muestra en la siguiente fotografía.



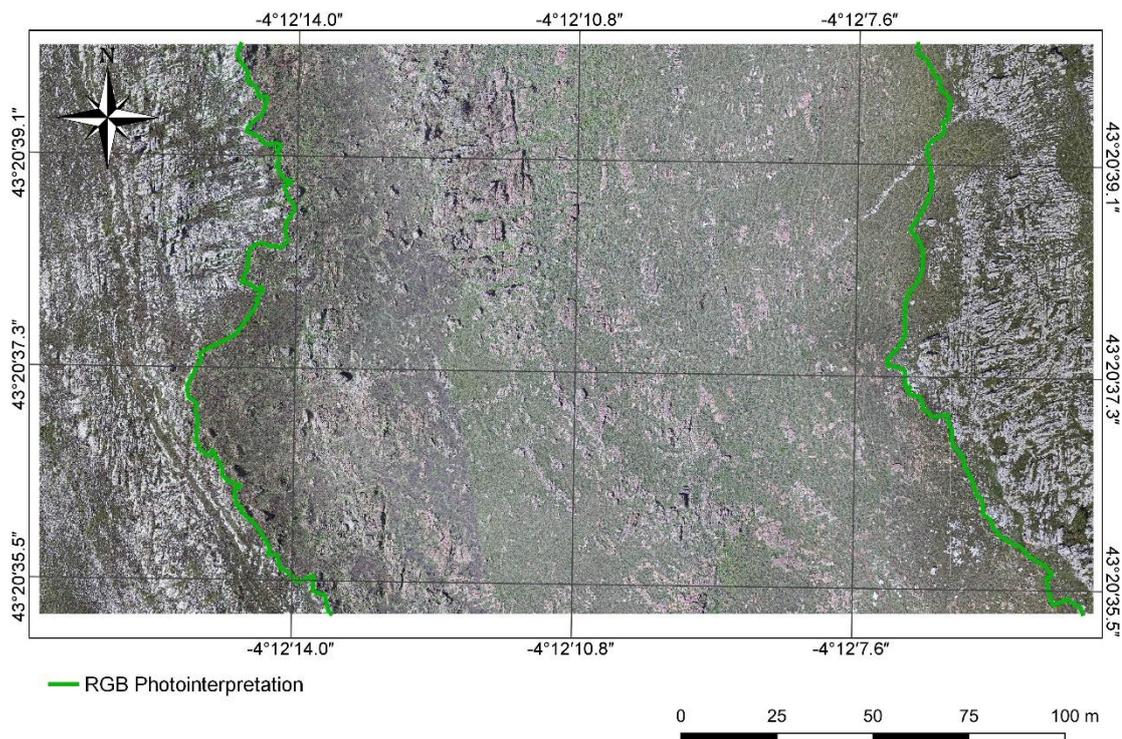
Ilustración 53.- Contacto entre ambas litologías en la zona de estudio.

La cartografía geológica de detalle se realizó mediante un recorrido por el contacto entre ambas litologías, en el que se obtuvieron las coordenadas de puntos espaciados de 2 a 3 metros a lo largo del propio contacto, con técnicas de posicionamiento global. Se registraron un total de 257 puntos, distribuidos a lo largo de ambos contactos superior e inferior del afloramiento. Los puntos fueron tomados con el método GPS/RTK, en el sistema de referencia ETRS89-UTM Huso30. Para el procesado de los datos GPS, se empleó el programa Leica Ski-pro. Posteriormente el conjunto de puntos se importó a QGIS, realizándose una capa vectorial con los contactos, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.



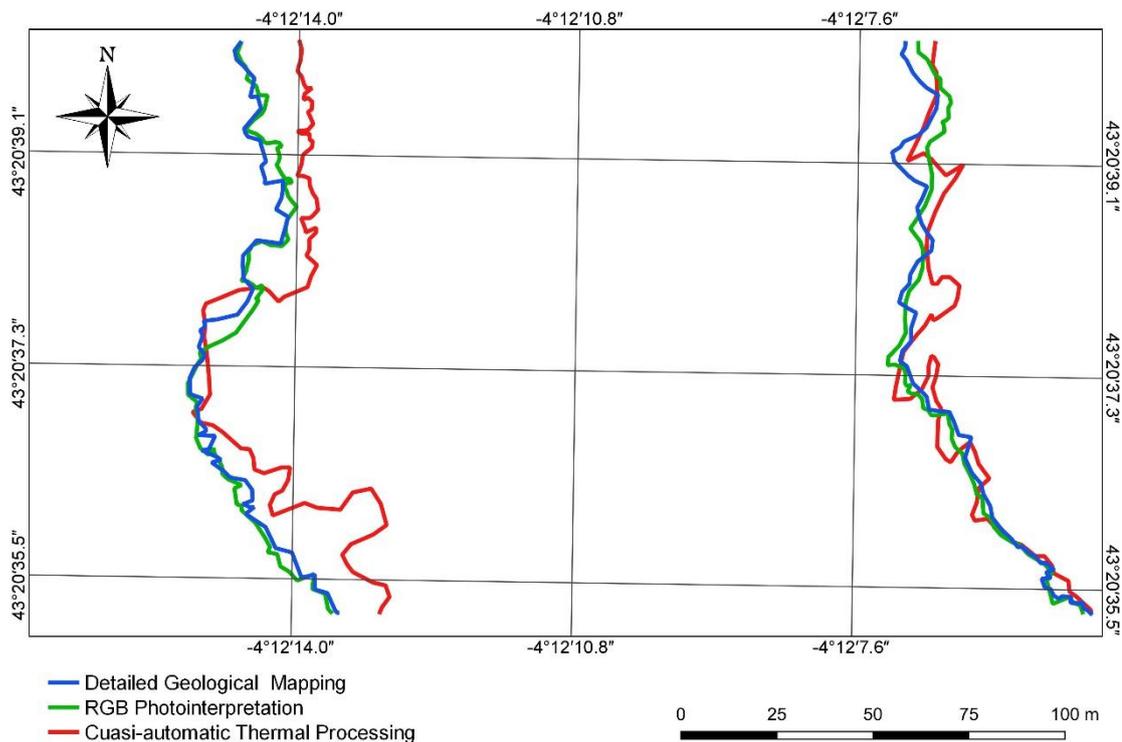
*Ilustración 54.- Contactos obtenidos por la cartografía de detalle.*

Al mismo tiempo, se realizaron actividades de fotointerpretación sobre el mapa RGB obtenido, con el propósito de identificar los contactos de las litologías. Para ello se importó en el mapa QGIS, y se delimitaron los contactos superior e inferior, tal y como se puede apreciar.



*Ilustración 55.- Contactos obtenidos por fotointerpretación.*

A partir de las diferentes técnicas utilizadas se han obtenido un conjunto de capas vectoriales en QGIS que representan los contactos entre ambas litologías, pudiéndose observar diferencias entre unos resultados y otros.



*Ilustración 56.- Contactos entre litologías derivados de las diferentes metodologías planteadas.*

A grandes rasgos, se puede observar una gran similitud entre los contactos en ambas zonas, superior e inferior que salen como resultado de utilizar las 3 diferentes metodologías. Existe una gran coincidencia entre la fotointerpretación de la imagen RGB y la cartografía de detalle. Las líneas generadas a partir de la información térmica muestran una gran similitud aunque hay ligeras variaciones con respecto a las dos anteriormente citadas.

Para evaluar los resultados se compara el área de dolomía delimitado por los contactos dentro del rectángulo objeto de estudio, al ser ésta la litología con mayor interés minero para la modelización del recurso. La determinación de las áreas correspondientes se realizó en GIS, en base a las líneas de contacto definidas por cada metodología. Se adoptó como referencia para la comparativa de resultados. Se utilizó el área delimitada por la cartografía de detalle como referencias al ser este método el más preciso de los tres utilizados.

*Tabla 7.- Resultados de la comparación de los métodos.*

	CALIZA OESTE (m <sup>2</sup> )	DOLOMIA (m <sup>2</sup> )	CALIZA ESTE (m <sup>2</sup> )	DESVIACION AREA DOLOMIA (%)
CARTOGRAFIA DE DETALLE	8285,14	27350,01	5690,54	-
FOTOINTERPRETACION RGB	8442,49	27620,75	5262,43	0,99
IMÁGENES TERMICAS	9805,19	26101,12	5419,38	-4,57

Los resultados obtenidos nos muestran una gran igualdad entre los resultados de la fotointerpretación RGB y la cartografía geológica de detalle, con una desviación que ronda el 1%. El método que utiliza el procesamiento cuasiautomático de las imágenes térmicas es el que nos arroja una mayor diferencia, con una desviación del 4.57%. No obstante, las desviaciones son muy pequeñas y prácticamente despreciables en la fase de la prospección minera en el que se plantea esta investigación.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES**

*Aplicación de vuelos con dron y sensor térmico a la prospección*

Una vez realizada la aplicación práctica de la metodología propuesta, y a la vista de los resultados obtenidos de la comparativa de las delimitaciones de la zona de posible interés minero mediante la nueva propuesta metodológica, y las otras dos metodologías, en este caso más habituales se plantean las siguientes interpretaciones sobre los resultados obtenidos:

- Antes de hacer el vuelo fotogramétrico, es fundamental realizar el ensayo con muestras reales de las diferentes litologías que se pretenden prospectar. Sin estos ensayos, no se conoce el comportamiento térmico real de las litologías, lo que supone no poder determinar la temperatura límite entre las litologías, ni el momento del día más apropiado para realizar el vuelo.
- El diseño del vuelo con sensor térmico es mucho más exigente que el del vuelo con un sensor RGB, dado que la resolución del segundo sensor es mejor que la del primero generalmente. En el caso de sensores duales de bajo coste, esto obliga a adecuar los parámetros de vuelo al sensor de menor resolución.
- El procesado de imágenes térmicas también es sensiblemente diferente al tratamiento de imágenes RGB. En este sentido, la propuesta de procesar tradicionalmente las imágenes RGB y utilizar los parámetros de orientación para el tratamiento de imágenes térmicas facilita en gran medida el tratamiento de los bloques de imágenes RGB y térmicas. Además, proporciona unos resultados finales muy satisfactorios, en los que el ortomosaico/mapa/imagen identifican para cada pixel la información térmica de partida.
- Las herramientas GIS permiten llevar a cabo operaciones lógicas sobre el mapa. La primera convierte la información térmica registrada por el sensor a temperaturas, y la segunda corrige la desviación que se produce en el sensor montado sobre el UAV debida a posibles correcciones atmosféricas y problemas derivados de la altura/resolución. Ambas operaciones son fundamentales para obtener resultados óptimos, dado que sin ellas la interpretación de la imagen térmica sería errónea.
- El uso de herramientas GIS tiene una vital importancia para el desarrollo de la metodología propuesta, ya que permiten la interpretación del mapa térmico final. Además, facilitan una operación que generalmente se hace de forma visual, dado que reducen la gama de colores que el operador tiene que interpretar, y además, permiten mejorar notablemente los tiempos requeridos para realizar el análisis.
- La validación de resultados establece desviaciones en la superficie estimada como posible zona de interés minero del orden del 4.57% frente a la cartografía geológica de detalle. Esta desviación es totalmente aceptable, máxime cuando se está realizando en una fase muy temprana de la prospección minera, que pretende determinar grandes zonas de interés y que posteriormente se complementará con otras técnicas (métodos directos) de prospección.

Las principales limitaciones surgidas se encuentran fundamentalmente en tres ámbitos. El primero es la poca versatilidad que tienen los sensores de bajo coste en lo relativo a los formatos, la información térmica y su conversión a temperatura. El

segundo se relaciona con la presencia de vegetación en la zona de prospección, que contamina la medición de la temperatura, generando zonas de menor contraste y dificultando el análisis posterior. Finalmente, la determinación del límite térmico, que desde el punto de vista empírico se ha resuelto de forma adecuada, pero que en la realidad no es un límite estricto, ya que realmente hay una zona de transición térmica en las rocas.

La prospección minera es una etapa fundamental en la búsqueda de nuevos recursos que permitan satisfacer la demanda creciente de la sociedad. La aparición de las plataformas UAV y los sensores térmicos de bajo coste permiten ampliar sus posibilidades, reportando grandes ventajas y beneficios. La nueva metodología propuesta para la identificación de diferentes litologías puede considerarse un ejemplo de estos potenciales aportes al campo de la prospección minera, suponiendo en primera instancia una alternativa sencilla, económica y rápida para su delimitación.

Las herramientas incluidas en los entornos GIS, permiten reclasificar los mapas termográficos que se obtienen con UAV y sensores térmicos de bajo coste, Estas herramientas proporcionan un nuevo mapa termográfico mucho más sencillo de analizar, y permiten realizar un reconocimiento cuasiautomático. Analizando los resultados, se puede apreciar que las desviaciones entre la metodología propuesta y otras más tradicionales son muy pequeñas, prácticamente despreciables en una fase tan temprana de la prospección minera. Esto satisface el objetivo marcado.

La metodología propuesta tiene grandes ventajas frente a las técnicas de prospección tradicionales, tales como su sencillez o la reducción de costes y tiempos, temporal, etc. La realización de cartografía geológica de detalle es la técnica más precisa pero también es la que consume mayores recursos. La fotointerpretación y/o fotogeología requieren que exista una diferencia cromática entre las litologías a prospectar, circunstancia que no siempre se produce.

En definitiva, el empleo de sensores infrarrojos aerotransportados en plataformas UAV en actividades de prospección minera es una metodología con gran potencial. Permiten llevar un paso más allá las labores de investigación, obteniendo resultados de forma rápida y económica. Además, aplicarse en zonas complejas y de difícil acceso, haciendo más atractiva su implementación

## **CAPITULO VI: REFERENCIAS**

## REFERENCIAS

1. **Fernández Maroto, Gema.** Bloque III. Evaluación y prospección de yacimientos minerales. 2020.
2. **Cañizal Berini, Jorge, Fernandez Maroto, Gema y Miranda Manzanares, Marina.** Geotecnia y prospección geofísica; Tema 8: Métodos de prospección geofísica generales. *Open Course Ware.* [En línea] 2021. [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/3444/course/section/3114/tema\\_8.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/3444/course/section/3114/tema_8.pdf).
3. **De Luis Ruiz, Julio Manuel.** Unidad Didáctica IV: Generalidades Fotogramétricas. 2011.
4. **Delgado, Victor.** Victor Delgado cinematographer. [En línea] 2016. <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>.
5. **Castro, Gregorio.** Dron Profesional. [En línea] 2019. <https://dronprofesional.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-dron/>.
6. **Desconocido.** Global Mediterraneo Geomatica. [En línea] 14 de Enero de 2020. <https://www.globalmediterranea.es/tipos-de-camaras-para-drones/>.
7. **Hernández López, David.** *Introducción a la fotogrametría digital E.T.S.I Agrónomos.* Universidad de Castilla La Mancha : s.n., 2006.
8. **Ferrer Torio, Rafael y Valverde Gonzalo, Ángel.** *Cartografía, Geodesia y Fotogrametría.* Ayuntamiento de Laredo : Universidad de Cantabria., 1998.
9. **Diego Soroa, Cristina.** Contraste metodológico en los MDT realizados con Drones. 2020.
10. "Solar radiation model", Appl. Energy, vol 69, no. 3, pp. 191-224. **L. T. Wong and W. K. Chow.** 2001.
11. **Rubén Pérez Álvarez, Javier Sedano Cibrián, Julio Manuel de Luis Ruiz, Gema Fernández Maroto y Raúl Pereda García.** Mining exploration with UAV, low-cost thermal cameras and GIS tool. Application to the specific case of the complex sulfides hosted in carbonates of Udias (Cantabria, Spain). s.l. : MDPI, 2022.
12. **T. Koch, M. Körner, and F. Fraundorfer.** Automatic and semantically-aware 3D UAV flight planning for image-based 3D reconstruction. 2019. 10.3360/rs11131550.
13. **W. H. Maes, A. R. Huete, and K. Steppe.** *Optimizing the processing of UAV-based thermal imagery.* 2017. 10.3390/rs9050476.