

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA

Cuantificación de material particulado generado por tronaduras a cielo abierto mediante visión computacional

Memoria de Título presentada por:

Brian Valenzuela Vidal

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniería Civil Matemática

Otorgado por la Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía
Hantar Aguad

Octubre 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Cuantificación de material particulado generado por tronaduras a cielo abierto mediante visión computacional

Nombre del candidato(a): Brian Matías Valenzuela Vidal

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Matemática

Campus: Casa Central **Departamento:** Matemática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Hantar Aguad, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo NO contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

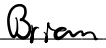
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29-10-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29-10-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

TÍTULO DE LA TESIS:

Cuantificación de material particulado generado por tronaduras a cielo abierto mediante visión computacional

AUTOR:

BRIAN VALENZUELA VIDAL

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniería Civil Matemática de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Hantar Aguad _____

Francisco Cuevas _____

César Naranjo _____

Valparaíso, Chile, Octubre 2026.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional durante toda la carrera, y a mis amigos y compañeros, con quienes compartí buenos y malos ratos en estos años de estudio.
A mi profesor guía, Hantar Aguad, por su orientación, sus observaciones y la confianza depositada en este trabajo. Agradezco también a los profesores correferentes por el tiempo dedicado a revisar esta memoria y por sus comentarios, que permitieron mejorarla.
En resumen, gracias a quienes estuvieron y están.

Memento vivere
Brian Valenzuela Vidal

RESUMEN

Generalmente, las tronaduras en minería a cielo abierto producen una nube compuesta por material particulado que permanece en suspensión tras la detonación. Esta nube constituye simultáneamente un problema ambiental, por su aporte a las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, que afectan también a las comunidades cercanas, y un problema operacional, ya que condiciona los tiempos de reanudación: la mina solo se entrega a la operación cuando se restablecen condiciones de visibilidad favorables. Conocer cómo se propaga el material particulado es la base para controlarlo y, en el futuro, mejorar su gestión, por ejemplo definiendo los tiempos de entrega de la mina en función de una métrica de calidad del aire o de visibilidad.
En este trabajo se desarrolla una herramienta para caracterizar dicha nube a partir de registros de video capturados por un dron sobre la mina Chuquicamata. La metodología se organiza en cinco fases:

0. Recepción y análisis previo del video, donde se preprocesa la imagen y también se consiguen datos intrínsecos al video y al dron, además de las configuraciones necesarias para las fases siguientes.

1. Detección y segmentación de la columna de gas mediante un esquema híbrido que combina ubicaciones semilla generadas con CLIPSeg y propagación temporal con SAM 2.

2. Reconstrucción tridimensional del volumen de gas mediante tallado espacial (*space carving*) y la sombra de la nube de gas sobre un modelo digital de elevación georreferenciado.

3. Estimación de la velocidad y dirección aparente del viento mediante flujo óptico denso.

4. Estimación de la concentración normalizada de material particulado (PMx) mediante la solución de puff gaussiano de la ecuación de advección-difusión.

A cada fase se le aplica un tipo de validación acorde a la información que se posee. Se documentan además enfoques descartados y el motivo de su descarte.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS i

RESUMEN ii

1. INTRODUCCIÓN 1
- 1.1. Contexto general 1
- 1.2. Motivación 2
- 1.3. Objetivos 2
- 1.4. Planteamiento y limitaciones del problema 3
- 1.5. Validaciones aplicadas 4

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 7
- 2.1. Fenomenología de la nube post-tronadura 7
  - 2.1.1. Evolución temporal 7
  - 2.1.2. Contraste óptico 8
- 2.2. Monitoreo de tronadura 8
  - 2.2.1. Enfoques instrumentales 8
  - 2.2.2. Enfoques predictivos 9
  - 2.2.3. Enfoques basados en visión computacional 9
- 2.3. Segmentación semántica y segmentación en video 9
  - 2.3.1. Segmentación abierta guiada por texto: CLIPSeg 10
  - 2.3.2. Propagación temporal y precisión subpíxel: SAM 2 10
- 2.4. Flujo óptico 11
- 2.5. Emisión y transporte de material 11
  - 2.5.1. Ecuación de Advección-Difusión 12
  - 2.5.2. Modelo de Puff Gaussiano y Método de las Imágenes 12
  - 2.5.3. Ley de Dispersión y Regímenes Turbulentos 13
- 2.6. Modelo de cámara y proyección al terreno 14
  - 2.6.1. Parámetros de orientación espacial y ángulos de la cámara 14

2.6.2. El problema inverso y la superficie de restricción 15
2.7. Reconstrucción tridimensional a partir de siluetas 16
2.7.1. Envolvente visual y tallado espacial 16
2.7.2. Restricción por sombra proyectada 16

3. DATOS Y HERRAMIENTAS 17
3.1. Datos de entrada 17
3.2. Sitio de estudio 18
3.3. Herramientas de software 18

4. FASE 0: PLANIFICACIÓN Y PREPROCESAMIENTO 21
4.1. Organización 21
4.2. Escaneo preliminar 23
4.3. Extracción de metadatos 25
4.4. Ubicación pivote 27
4.5. Georreferencia 27

5. FASE 1: DETECCIÓN Y SEGMENTACIÓN DE LA COLUMNA DE GAS 29
5.1. Formulación del problema 29
5.2. Arquitectura de la solución 30
5.2.1. Selección de anclajes 31
5.3. Resultados: Segmentación y Validación 31
5.4. Validación de la segmentación 33
5.4.1. Confianza interna del modelo 33
5.4.2. Acuerdo entre propagación y segmentación por fotograma 34
5.4.3. Consistencia bajo ediciones del video 34
5.4.4. Contraste con un trazado manual 36
5.4.5. Alcance de la validación 38
5.4.6. Validación sintética de la Fase 1 38

6. FASE 2: RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA COLUMNA 42
6.1. Formulación del problema 42
6.2. Arquitectura de la solución 43
6.2.1. Evidencia de sombra 43
6.2.2. Tallado espacial y cierre por revolución 43
6.2.3. Estimación de altura por sombra 44
6.2.4. Exportación a Blender 45
6.3. Resultados: Proyección de sombra y Reconstrucción 46
6.3.1. Estimación de altura y dinámicas temporales 46

6.3.2. Aislamiento y filtrado de sombras 47
6.3.3. Revisión de la proyección de sombra 48
6.3.4. Resultados de la reconstrucción visual 48
6.3.5. Validación sintética de la Fase 2 48

7. FASE 3: ESTIMACIÓN DE VIENTO MEDIANTE FLUJO ÓPTICO 52
7.1. Formulación del problema 52
7.2. Metodología 53
7.2.1. Definición de la ventana de estimación válida 54
7.2.2. Dominio de cálculo del flujo 55
7.2.3. Consolidación espacial del campo vectorial 55
7.2.4. Agregación temporal sobre la ventana de observación 57
7.2.5. Conversión a unidades métricas y azimut geográfico 58
7.2.6. Convenciones de reporte 60
7.2.7. Reconstrucción de la trayectoria del centroide 62
7.2.8. Degeneración geométrica de la vista monocular 62
7.2.9. Análisis de coherencia direccional y distribución angular 62
7.3. Resultados 64
7.3.1. Campo de flujo sobre la columna 64
7.3.2. Serie temporal y ventana de viento establecido 65
7.3.3. Concentración angular del campo 66
7.3.4. Resultado georreferenciado 67
7.3.5. Contraste con estaciones meteorológicas 68
7.3.6. Validación sintética de la Fase 3 69

8. FASE 4: ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO 71
8.1. Formulación del problema 71
8.2. Modelo de advección-difusión 72
8.2.1. Ecuación y solución inicial 72
8.2.2. El efecto del suelo (reflexión) 73
8.3. Medición de los parámetros de dispersión 73
8.3.1. Proyección espacial y cálculo de momentos 73
8.3.2. Cota del plano de retroproyección 74
8.3.3. Proyección oblicua y dispersión vertical 74
8.3.4. Leyes de crecimiento de la nube 75
8.4. Evaluación del modelo 76
8.5. Resultados 76
8.5.1. Ventana medida y parámetros heredados 76

8.5.2. Leyes de dispersión 76
8.5.3. Evolución de la concentración 77
8.5.4. Validación sintética de la Fase 4 77

9. ENFOQUES EVALUADOS Y DESCARTADOS 83
9.1. Detección por sustracción de fondo 83
9.2. Detección basada en YOLO 84
9.3. Velocidad por centroide de la máscara 84

10. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 86
10.1. Conclusiones 86
10.2. Trabajo futuro 89

REFERENCIAS 90

BIBLIOGRAFÍA 95

A. CÓDIGO FUENTE Y ENTORNO DE EJECUCIÓN 98
A.1. Estructura del repositorio 98
A.2. Datos no incluidos en el repositorio 99
A.3. Entorno de ejecución 99

B. NOTACIÓN 101
B.1. Abreviaturas 101
B.2. Símbolos 101
B.3. Ediciones del video 105

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto general

La tronadura es una operación mediante la cual se fragmenta el material rocoso en una minería y, que en este caso, es a cielo abierto. Consiste en la detonación secuenciada de una o más cargas explosivas alojadas en pozos perforados según un diseño de malla. Una tronadura de producción involucra típicamente cientos de pozos, y en minas de gran escala puede superar los 1000 pozos por disparo [52]. Por simplicidad, el caso de estudio de este trabajo corresponde a una tronadura secundaria, con un único pozo como caso base. Esta detonación libera al ambiente una fracción importante de la energía en formas que no contribuyen a la fragmentación [5, 22]. Entre estos efectos se encuentran las vibraciones del terreno, la onda de sobrepresión aérea o *airblast*, el ruido, la proyección de fragmentos (*flyrock*) y, de manera particularmente visible, la emisión de una nube de polvo y, en ocasiones, gases tóxicos [2, 43]. El foco de este trabajo es el polvo.

Esta nube no es un fenómeno homogéneo. Por el lado de su movimiento y forma, presenta tanto una expansión como una traslación, y estas componentes pueden tener velocidades muy distintas. Asimismo, tiene propiedades ópticas muy dependientes del material y de la iluminación. Podemos tener zonas con una apariencia clara y de alta reflectancia y al mismo tiempo presentar un aspecto oscuro [4] y de distintos colores en la misma nube, esta diferencia nos impide usar un único descriptor de color para separar la nube del fondo de la imagen.

1.2. Motivación

La motivación de este trabajo proviene de dos fuentes.

- **Motivación ambiental:** En Chile, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ [8, 9] en el aire están reguladas por normas de calidad ambiental. La superación de estas normas en una zona conduce a su declaración como zona saturada y a la exigencia de un plan de descontaminación, que alcanza a las fuentes emisoras de esa zona, entre ellas las faenas mineras. Además, en diciembre de 2025 se aprobó (actualmente postergada) una actualización de la norma de $PM_{2.5}$ que reduce los límites a 38 $\mu g/m^3$ para 24 horas y 15 $\mu g/m^3$ para el promedio anual [10].

  El monitoreo convencional de estas concentraciones se realiza con estaciones fijas o con sensores embarcados en aeronaves, ambos con limitaciones conocidas: las estaciones fijas entregan una medición puntual que no captura la estructura espacial de la pluma, y los sensores embarcados presentan tiempos de respuesta largos y requieren atravesar físicamente la nube [2]. La estimación de concentraciones a partir de imágenes ofrece una alternativa no invasiva, de campo completo y bajo costo [3, 46, 47].

- **Motivación operacional:** Tras cada tronadura, el área permanece evacuada hasta que la nube se disipa y se restablecen condiciones de visibilidad que permitan entregar la mina a la operación. Caracterizar la propagación del material particulado, es decir, su extensión, su dirección de transporte y su dilución en el tiempo, es el primer paso para definir ese tiempo de entrega a partir de una métrica de calidad del aire o de visibilidad.

Ambas motivaciones requieren describir la propagación de la nube, y el primer requisito para ello es una segmentación confiable. Ese es el núcleo esencial de este proyecto.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un sistema de visión computacional que detecte y segmente automáticamente las nubes de polvo y gases generadas por tronaduras, estime la velocidad y dirección del viento a partir del movimiento del humo, y entregue estimaciones de concentración normalizada de material particulado.

Objetivos específicos

1. Implementar un algoritmo de detección y segmentación de una columna de gas en video que, a partir de la ubicación del punto de emisión (pivote) entregada como dato de entrada, opere sin intervención manual en el resto del proceso. (Fase 1, Capítulo 5)

2. Reconstruir el volumen tridimensional ocupado por la columna de gas como una simulación sobre un modelo digital de elevación georreferenciado. (Fase 2, Capítulo 6)

3. Estimar la velocidad y dirección aparente del desplazamiento de la nube mediante técnicas de flujo óptico, y adaptar dicha estimación para que sea comparable con mediciones meteorológicas. (Fase 3, Capítulo 7)

4. Estimar un indicador proporcional a la concentración de material particulado resolviendo la ecuación de advección-difusión para una emisión instantánea, con parámetros de dispersión obtenidos desde la región segmentada. (Fase 4, Capítulo 8)

1.4. Planteamiento y limitaciones del problema

Este enunciado esconde varias dificultades que no son evidentes a primera vista y que conviene declarar desde el inicio, porque condicionan las decisiones metodológicas de los capítulos siguientes:

- **Cámara de visión monofocal.** El dron observa la escena desde una posición elevada y con un ángulo de elevación. Bajo ciertas condiciones, la extensión horizontal y la altura que presenta la columna se proyectan sobre direcciones similares en la imagen, y una reconstrucción de vista única no puede separarlas. Este punto se retoma en detalle en la Fase 2 (Capítulo 6).

- **Similitud entre humo oscuro y sombra.** Los detectores de sombra basados en relaciones multicanal, diseñados bajo el supuesto de que la sombra conserva la crominancia del objeto que ocluye [14], fallan sistemáticamente sobre cierto tipo de humo. Los cuales, ya sea por su composición o ubicación respecto al sol, pueden tener tonos oscuros y una textura similar al fondo.

- **Ausencia de validaciones reales.** No se dispone de mediciones instrumentales tomadas en la mina durante el evento, ni una segmentación de referencia de la nube ni registros meteorológicos o ambientales en el sitio específico. Las mediciones más cercanas corresponden a dos estaciones meteorológicas ubicadas a unos 16 km del pivote. Por ello, se construye un trazado manual para la Fase 1 y se usan dichas estaciones en la Fase 3. La primera referencia proviene del propio video y la segunda es

externa al sitio de estudio, de modo que los resultados son estimaciones sin verificación instrumental en terreno.

- **Columnas múltiples y simultáneas.** En una tronadura de producción, la detonación secuenciada de varios pozos genera más de un foco de emisión. Las columnas pueden nacer en instantes distintos, crecer a tasas distintas y eventualmente fusionarse, lo que impide tratarlas como un único objeto desde el primer cuadro. Por esto, el trabajo se limita al caso base de un único pozo.
- **Modelo de elevación desactualizado.** El modelo digital de elevación (DEM) utilizado remonta a los años 2006–2011 [1], mientras que la geometría del rajo cambia continuamente. Esto introduce un sesgo estructural en toda la georreferenciación.

En base a estas dificultades, a continuación se explicitan los límites del trabajo, con el fin de evitar interpretaciones excesivas de los resultados:

- El primer obstáculo, de la cámara de observación, es lo que más limita este trabajo, pues de un conjunto bastante amplio de videos, sólo uno cumple con tener una perspectiva adecuada para la implementación del algoritmo.
- Para abordar el problema de validación, se utilizan distintos tipos de métricas que buscan medir la confiabilidad de los resultados.
- El trabajo se desarrolla sobre un registro con un único pivote (tronadura secundaria). No se pretende generalizar sobre otras minas u otros diseños de tronaduras.
- La reconstrucción tridimensional se realiza a partir de una única cámara. La envolvente visual es una cota superior del volumen real, pero al acotarla con la altura obtenida por sombra, la altura de la columna resulta una cota inferior.
- El DEM disponible introduce un desfase altimétrico respecto de la geometría actual del rajo que asumiremos parte del error de estimación para simplificar los cálculos.

1.5. Validaciones aplicadas

A continuación mencionamos los métodos de validación que aplicaremos particularmente en cada fase. Pero además de estos, el profesor César Naranjo desarrolló una simulación con el modelo ARD3D, que resuelve la ecuación de advección-reacción-difusión en tres dimensiones mediante elementos finitos estabilizados SUPG [48] sobre una malla tetraédrica del terreno. Procesamos esta simulación con el algoritmo completo y comparamos los resultados contra los parámetros fijados previamente. Esta validación es una componente externa del algoritmo, por lo que no participa de la automatización que se busca conseguir.

- **Fase 1 (Detección):** Se evalúa la métrica de confianza interna del modelo SAM 2 y se ejecuta una prueba de consistencia sometiendo el video original a diversas transformaciones, como espaciales (rotación y reflexión) y visuales (brillo y saturación) para verificar la invariancia del área segmentada en píxeles. Adicionalmente, los resultados automáticos se contrastan con mediciones manuales de la columna. Finalmente, de la simulación podemos comparar qué tanto se desvía la detección de una verdad sintética.

- **Fase 2 (Reconstrucción 3D):** Si bien esta fase carece de una referencia física en terreno, podemos verificar su consistencia interna, donde contrastamos la sombra que proyecta el volumen estimado contra la sombra efectivamente observada en la imagen. Además, la simulación nos permite comparar la estimación de altura con la que realmente se simuló.

- **Fase 3 (Velocidad):** La validez de las estimaciones se verifica comparándolas con registros de estaciones meteorológicas regionales. Para ello, los resultados se adaptan al mismo sistema de referencia de las estaciones. Por otro lado, se compara contra el valor determinado con que se reproduce la simulación.

- **Fase 4 (Concentración):** De forma similar a la Fase 2, tampoco tenemos una medición o valores reales contra los que contrastar. Por ello, se utiliza la simulación junto a los resultados de las fases anteriores para llegar a una validación sintética de los parámetros obtenidos. Es importante destacar que, si alguna fase anterior falla al tratar la simulación, la validación para esta última fase puede verse comprometida.

- **ARD3D:** Corresponde a un modelo euleriano, donde la concentración se describe en un sistema de referencia fijo, como un campo $C(\mathbf{x}, t)$ definido sobre los nodos de la malla, que se actualiza en cada paso de tiempo al resolver numéricamente la Ecuación (2.5.1) junto con un término de reacción. Esto le permite incorporar un campo de viento $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ variable, difusividades que dependen de la posición y la topografía como condición de borde. El modelo de *puff* gaussiano (Sección 2.5.2), utilizado en la Fase 4, describe en cambio la nube en un sistema que se traslada con ella y entrega una solución analítica, a cambio de suponer un viento uniforme, difusividades homogéneas y un suelo plano. Así, el modelo euleriano es más general, pero requiere conocer el viento y el terreno en todo el dominio, mientras que el *puff* gaussiano solo requiere los parámetros de la nube.

  Además, ARD3D comparte algunas de las dificultades señaladas en la Sección 1.4. Depende de una buena representación de la geografía para la construcción de la malla y como paso previo a la simulación, el campo de viento tridimensional se ajusta a la geografía mediante el modelo HDWind [19], que idealmente requiere varias mediciones de viento dentro del dominio. En este caso se dispuso de una sola, obtenida a partir de

un modelo meteorológico, ya que las estaciones meteorológicas disponibles se encuentran demasiado lejos del pivote para ser utilizadas por el modelo.

En caso de contar con datos meteorológicos medidos en el sitio, sería posible usarlos para calibrar tanto el sistema como las validaciones.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Fenomenología de la nube post-tronadura

2.1.1. Evolución temporal

Durante la detonación se libera un volumen de gases a alta temperatura y presión que arrastra consigo material particulado desde la zona de fragmentación. La evolución de la nube resultante podemos describirla en tres etapas respecto al tiempo transcurrido [5, 25, 46]:

Etapa de eyección (0–2 s). Dominada por el impulso inicial. La columna asciende verticalmente con velocidad alta, sus bordes son turbulentos y su geometría se aproxima a un cuerpo de revolución en torno al eje vertical del pozo. Es también la etapa en que el *airblast* es visible como una perturbación que se propaga radialmente sobre el terreno.

Etapa de flotabilidad (2–10 s). El impulso inicial se disipa y el ascenso pasa a estar gobernado por la diferencia de densidad respecto del aire circundante. La columna se ensancha, sus bordes se comienzan a difuminar y aparece el efecto del viento como una inclinación sistemática del eje.

Etapa de advección y dispersión (>10 s). La nube se desacopla de la fuente y es transportada mayormente por el viento, dispersándose progresivamente. En esta etapa la nube deja de verse como un objeto compacto y su segmentación se vuelve mal condicionada.

La Figura 2.1 muestra un cuadro del registro del 15 de agosto en cada una de estas etapas.



Figura 2.1: Etapas de la nube en el registro del 15 de agosto con t medido desde la detonación.

Esta descomposición ayuda a definir la ventana temporal en que la metodología será aplicable. Pues tanto la segmentación como el flujo óptico necesitan una nube estable, pero con bordes nítidos.

2.1.2. Contraste óptico

Como se anticipó en la Sección 1.1, este tipo de nube presenta dos poblaciones ópticamente opuestas. Una de ellas refleja la luz y se ve más clara que el fondo, mientras que la segunda se ve más oscura, ya sea por su composición o porque no le llega la luz al estar superada por otra zona de la nube más alta. Cualquier intento de usar un único umbral de color para separar la nube del fondo fallará, porque recuperará solo una de estas dos poblaciones. Este es el argumento que motiva el abandono de los enfoques puramente fotométricos.

2.2. Monitoreo de tronadura

2.2.1. Enfoques instrumentales

Los métodos tradicionales de cuantificación de emisiones se basan en instrumentación física. Se han empleado técnicas espectroscópicas como la absorción infrarroja no dispersiva (NDIR) y la espectroscopía de absorción óptica diferencial (DOAS) para medir la difusión de gases nitrosos, así como sensores de partículas de principio óptico, ultrasónico o electroquímico [2, 4, 46]. Con la modernización de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), se han desarrollado plataformas que embarcan estos sensores; Alvarado et al. [2] presenta un sistema de bajo costo de este tipo. Las limitaciones reportadas son consistentes entre autores: tiempo de respuesta elevado, distancia de medición limitada y la necesidad de que la aeronave atraviese físicamente la pluma.

2.2.2. Enfoques predictivos

Una línea complementaria busca predecir la magnitud de la emisión a partir de los parámetros de diseño de la tronadura y las condiciones ambientales, sin observar la nube [5, 20, 45]. Hosseini et al. [25] desarrolla un modelo híbrido de análisis dimensional y redes neuronales artificiales que predice la distribución horizontal y vertical de la emisión a partir de doce variables de entrada, entre ellas el número de pozos, el burden, el espaciamiento, la humedad y la velocidad del viento. Bakhtavar et al. [6] extiende el análisis a la evaluación de riesgo mediante inferencia difusa.
Estos modelos son útiles en planificación, pero no entregan información sobre la nube efectivamente generada en un evento particular. Son, en ese sentido, complementarios y no sustitutos del enfoque de esta memoria.

2.2.3. Enfoques basados en visión computacional

El uso de cámaras y algoritmos de visión computacional ha ganado terreno como una alternativa no invasiva y de campo completo para el monitoreo de tronaduras [46, 47]. En este caso, la detección y segmentación se hace mediante máscaras binarias.
El paso fundamental es aislar computacionalmente la columna de gas del fondo de la imagen. Clásicamente, esto se aborda generando una máscara binaria, un arreglo donde a los píxeles de interés se les asigna un valor de 1 y al fondo un 0. Para lograrlo, los métodos tradicionales de visión usan umbrales en distintos espacios de color, filtros morfológicos o algoritmos de sustracción de fondo [3, 37, 46]. Sin embargo, debido a la heterogeneidad visual de la nube (discutida anteriormente en la sección de Contraste óptico) y al movimiento de la cámara de los VANT, estos enfoques estáticos suelen fallar como segmentadores por sí solos. Por esta razón, en este trabajo la sustracción de fondo no se usa para delimitar la nube, sino solo como un filtro complementario que confirma la detección semántica (Capítulo 5), mientras que la segmentación se apoya en los modelos de aprendizaje automático descritos en la Sección 2.3.

2.3. Segmentación semántica y segmentación en video

Para que un algoritmo logre aislar la nube de polvo, primero debe superar una barrera de abstracción, ya que el computador no comprende conceptos como “humo” o “terreno”, sino que procesa grillas numéricas basadas en intensidades de brillo, y usualmente divididas en pequeños parches de 16×16 píxeles [17]. Para cruzar esta brecha entre los valores crudos de los píxeles y el significado de la escena, este trabajo adopta una arquitectura de dos etapas usando modelos de Machine Learning.

2.3.1. Segmentación abierta guiada por texto: CLIPSeg

CLIPSeg [34] extiende el modelo CLIP [38] acoplándole un decodificador de segmentación. Su funcionamiento se basa en proyectar tanto la imagen (procesada por parches) como una descripción textual descriptiva (un *prompt*, por ejemplo, "columna de gas") hacia un mismo espacio de alta dimensionalidad, típicamente $\mathbb{R}^{512}$. En este espacio, el modelo evalúa la similitud angular entre el vector del texto y los vectores de cada parche de la imagen.
Para nuestro problema, esta capacidad de segmentación es decisiva. Ya que al no disponer de un conjunto masivo de imágenes de tronaduras anotadas manualmente, entrenar un modelo desde cero sería inviable. CLIPSeg nos permite buscar la nube basándonos puramente en la semántica del lenguaje natural.
La contrapartida de esta abstracción es que el mapa de calor fotométrico resultante tiene una resolución espacial limitada y carece de coherencia temporal entre fotogramas consecutivos. Por lo tanto, en nuestra arquitectura CLIPSeg no funciona como el segmentador definitivo, sino como un *generador de semillas* que le indica al siguiente modelo dónde debe concentrarse.

2.3.2. Propagación temporal y precisión subpíxel: SAM 2

Una vez que se determina *dónde* está la nube, se debe extraer su contorno exacto y seguir su evolución temporal. Para esto se emplea SAM 2 (*Segment Anything Model 2*) [39], un modelo que acepta como *prompt* de entrada los puntos o áreas de interés detectados previamente por CLIPSeg.
Una de las mayores fortalezas de SAM 2 es su precisión geométrica. En lugar de ajustar la máscara rígidamente a los bordes de la grilla de píxeles, el modelo calcula una frontera de segmentación evaluando el cruce por cero de un campo escalar continuo (una curva de nivel $\ell(x, y) > 0$). Donde, mediante una interpolación al campo de logits, el algoritmo asume una variación lineal dentro de las celdas, logrando trazar el contorno de la nube con precisión subpíxel.
Adicionalmente, SAM 2 extiende esta capacidad al resto del video mediante un mecanismo de memoria temporal. A partir de un cuadro de anclaje inicial, el modelo es capaz de propagar esta máscara bidireccionalmente hacia el resto de la secuencia. Entonces, la combinación resultante surge de manera natural: el procesamiento matricial de CLIPSeg resuelve la semántica (el *qué* aislar), mientras que el motor geométrico de SAM 2 aporta la definición de la frontera y su coherencia cinemática (el *cómo* seguirlo). Esta sinergia constituye el núcleo algorítmico de la Fase 1 (Capítulo 5).

2.4. Flujo óptico

El flujo óptico busca estimar el campo de desplazamiento aparente $\mathbf{u} = (u, v)$ de los píxeles entre dos cuadros consecutivos del video. El fundamento de esta técnica es la hipótesis de constancia de brillo, donde se asume que la intensidad luminosa I de un punto en movimiento no cambia en un pequeño intervalo temporal Δt, desplazándose espacialmente en $(\Delta x, \Delta y)$. Esto se expresa intuitivamente como:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \tag{2.4.1}$$

Al desarrollar esta igualdad matemática mediante una expansión de Taylor de primer orden, se llega a la ecuación fundamental del flujo óptico [24]:

$$\nabla I \cdot \mathbf{u} + I_t = 0, \tag{2.4.2}$$

donde ∇I es el gradiente espacial de la imagen (que indica hacia dónde cambia el brillo de la nube), I_t es la variación temporal de los fotogramas, y $\mathbf{u}$ es el vector de desplazamiento que se desea calcular.

Dado que la Ecuación (2.4.2) proyecta dos incógnitas sobre una sola igualdad matemática, se genera una indeterminación. Para resolverla, métodos densos como el de Farnebäck [21] asumen que el desplazamiento es coherente en áreas locales cercanas. En lugar de evaluar píxel por píxel, el algoritmo aproxima la intensidad de cada vecindad utilizando una expansión polinomial cuadrática (de la forma $I(\mathbf{x}) \approx \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} + c$).

En el contexto de esta memoria, este cálculo del campo $\mathbf{u}$ se aplica directamente sobre la región previamente segmentada para estimar la cinemática de la nube de gas.

2.5. Emisión y transporte de material

El transporte de material particulado en la atmósfera está regido por dos mecanismos fundamentales: la advección (arrastre por viento) y la difusión turbulenta (dispersión producto de fluctuaciones del flujo de aire) [43].

A diferencia de los problemas de contaminación industrial continua (modelados mediante plumas estacionarias), la detonación en una tronadura a cielo abierto libera de forma instantánea una masa finita en un volumen acotado. Este tipo de emisión se clasifica como una fuente puntual e instantánea, cuyo comportamiento dinámico corresponde al de una nube discreta o *puff* [13].

2.5.1. Ecuación de Advección-Difusión

El principio de conservación de masa para un contaminante pasivo en un fluido incompresible conduce a la ecuación de advección-difusión tridimensional:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D\nabla^2 C \tag{2.5.1}$$

donde $C(x, y, z, t)$ [kg/m^3] es la concentración instantánea, $\mathbf{u} = (u, v, w)$ son las componentes del campo de velocidad del viento en las direcciones (x, y, z), y $D = (D_x, D_y, D_z)$ son los coeficientes de difusividad turbulenta.
Bajo la suposición de un campo de viento uniforme alineado con el eje x ($u =$ constante, $v = 0, w = 0$) y coeficientes de difusión homogéneos en cada eje espacial, la ecuación se simplifica a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\,\frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \tag{2.5.2}$$

2.5.2. Modelo de Puff Gaussiano y Método de las Imágenes

Para una fuente puntual liberada en el instante $t = 0$ a una altura H sobre el nivel del suelo, la condición inicial se expresa usando la delta de Dirac,

$$C(x, y, z, 0) = Q\,\delta(x)\,\delta(y)\,\delta(z - H),$$

donde Q [kg] es la masa inicial emitida. La solución en espacio libre no acotado corresponde a una distribución gaussiana [13, 43]:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\,\sigma_x(t)\,\sigma_y(t)\,\sigma_z(t)} \exp\!\left(-\frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x(t)^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y(t)^2} - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z(t)^2}\right), \tag{2.5.3}$$

donde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ [m] representan las desviaciones estándar de la distribución de masa (tamaño de la nube) a lo largo de cada eje.
Dado que la superficie terrestre ($z = 0$) actúa como una barrera impermeable impidiendo la penetración de masa, se impone la condición de borde de flujo nulo, es decir, $\frac{\partial C}{\partial z}\big|_{z=0} = 0$. Entonces, mediante el Método de las Imágenes [43], esta condición se satisface superponiendo una fuente ficticia de igual magnitud ubicada simétricamente en $z = -H$.
Al no disponer de una medición directa de la masa Q generada por la explosión, se define la concentración normalizada $\chi(x, y, z, t) \equiv \frac{C(x,y,z,t)}{Q}$ [m^{-3}]. Incorporando el efecto de reflexión del suelo, la solución analítica para χ resulta:

$$\chi(x,y,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\,\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\!\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\!\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\!\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]. \tag{2.5.4}$$

La representación de una emisión mediante *puffs* gaussianos es la base de modelos de dispersión ampliamente usados en la industria, como CALPUFF [12]. En estos modelos la emisión se discretiza en una secuencia de *puffs*, cada uno de los cuales se traslada según un campo de viento variable en el espacio y el tiempo, mientras que en la formulación anterior un único *puff* se traslada con un viento constante alineado con el eje x. Esta suposición es un limitante de la formulación, ya que no es adecuada para vientos calmos ($u \approx 0$) en los que la dirección de transporte no está bien definida y, por lo tanto, menos aún la orientación de los ejes. Tampoco considera vientos que varían en el dominio por efecto de la geografía, como ocurre en el interior de un rajo.

2.5.3. Ley de Dispersión y Regímenes Turbulentos

El crecimiento de la nube con el tiempo está determinado por la tasa de expansión de sus varianzas espaciales $\sigma_i^2(t)$. En la atmósfera, esta expansión no siempre sigue la difusión Fickiana clásica (donde $\sigma_i^2 \propto t$), sino que obedece a una ley de potencia generalizada [36, 44]:

$$\sigma_i^2(t) = \sigma_{i,0}^2 + K_i\, t^{\alpha_i}, \quad i \in \{x,y,z\}, \tag{2.5.5}$$

donde $\sigma_{i,0}$ es la dimensión inicial del *puff*, K_i es la constante de dispersión y α_i es el exponente que caracteriza el régimen de turbulencia:

- **Régimen Subdifusivo ($\alpha_i < 1$):** La nube crece de forma más lenta. Ocurre cuando el aire está muy calmado y estable, impidiendo que el material se mezcle con facilidad, o cuando hay obstáculos físicos en el entorno, como edificios, que frenan el avance de las partículas.
- **Régimen Fickiano ($\alpha_i \approx 1$):** La nube se expande a un ritmo constante y predecible, similar a cómo se disuelve una gota de tinta en el agua. En la atmósfera, sucede cuando el viento es muy uniforme y dispersa las partículas de manera equilibrada en todas las direcciones.
- **Régimen Superdifusivo ($1 < \alpha_i$):** La nube se dispersa mucho más rápido de lo habitual. Esto se da típicamente en condiciones donde el aire es muy inestable, formando ráfagas o corrientes intensas que estiran, separan y esparcen el material a gran velocidad por el entorno.

El coeficiente de difusividad se relaciona con la variación temporal de las desviaciones

estándar mediante [13, 44]:

$$D_i(t) = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\sigma_i^2}{\mathrm{d}t} = \frac{\alpha_i K_i}{2}\, t^{\alpha_i - 1}. \tag{2.5.6}$$

2.6. Modelo de cámara y proyección al terreno

Toda medición métrica de este trabajo requiere relacionar el espacio bidimensional de la imagen con el espacio tridimensional del terreno. La relación se establece mediante el modelo de cámara *pinhole* [23], que proyecta un punto del mundo $\mathbf{P} = [X, Y, Z]^\top$ sobre un píxel $\mathbf{p} = [x, y]^\top$ según

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{2.6.1}$$

donde $\mathbf{K}$ es la matriz de parámetros intrínsecos, como la distancia focal expresada en píxeles. $\mathbf{R}$ y $\mathbf{t}$ son la rotación y la traslación extrínsecas, que sitúan y orientan la cámara en el sistema de coordenadas del terreno; y s es un factor de escala homogéneo.

2.6.1. Parámetros de orientación espacial y ángulos de la cámara

La matriz de rotación extrínseca $\mathbf{R}$ descompone la orientación tridimensional de la cámara mediante tres ángulos de rotación principales:

Azimut (ψ o *yaw*): Ángulo de orientación horizontal. Define la dirección cardinal hacia la cual apunta la cámara (por ejemplo, respecto al Norte geográfico) sobre el plano del terreno. Equivale al movimiento de girar la vista hacia la izquierda o derecha.

Inclinación (θ o *pitch*): Ángulo de elevación o depresión vertical. Mide la inclinación del eje óptico respecto al plano horizontal. Equivale al movimiento de mirar hacia arriba (al horizonte) o hacia abajo (al suelo).

Balanceo (ω o *roll*): Ángulo de rotación alrededor del propio eje óptico. Controla la nivelación del sensor respecto al horizonte. Equivale a inclinar la cabeza hacia un lado.

A partir del ángulo de inclinación (θ), la vista de la cámara se clasifica según su dirección de observación:

- **Vista Nadir:** Corresponde al caso en que el eje óptico apunta de forma perfectamente perpendicular hacia el suelo ($\theta = -90°$).

- **Vista Oblicua:** Corresponde a tomas donde la cámara tiene una inclinación intermedia entre el horizonte y la vertical ($0° < |\theta| < 90°$).

2.6.2. El problema inverso y la superficie de restricción

A diferencia del modelo directo expresado en la Ecuación (2.6.1), que proyecta un punto tridimensional del espacio sobre el plano de la imagen, la reconstrucción a partir de video requiere resolver el problema inverso: determinar la posición en el terreno que corresponde a un píxel dado. Debido a la pérdida de información dimensional inherente al proceso de proyección, un único píxel no define un punto único en el espacio, sino una dirección de visión o rayo proyectivo:

$$\mathbf{d}(\mathbf{p}) \;\propto\; \mathbf{R}^{-1}\mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{2.6.2}$$

A partir del centro óptico $\mathbf{C}$ y de la orientación de la cámara codificada en $\mathbf{R}$, el píxel define la semirrecta $\mathbf{P}(\lambda) = \mathbf{C} + \lambda\,\mathbf{d}(\mathbf{p})$, con $\lambda > 0$. Dado que desde una vista no se obtiene el factor de profundidad λ, todos los puntos contenidos en dicha semirrecta generan exactamente la misma proyección en la imagen.
Para resolver esta ambigüedad y recuperar la posición tridimensional x, y, z, es imprescindible incorporar una restricción geométrica externa que determine el punto exacto de intersección del rayo. En este trabajo se utilizan dos superficies de restricción complementarias:

Superficie del terreno: Representada por un Modelo Digital de Elevación (DEM). Dado que la topografía no suele admitir una solución analítica cerrada, la intersección se resuelve mediante un algoritmo de marcha sobre el rayo (*ray-marching*) refinado por bisección. Esta restricción permite georreferenciar la escena sobre el relieve real y delimitar el volumen reconstruido.

Plano horizontal de transporte ($z = h$): Asumimos que la dispersión y transporte de la nube ocurren sobre una capa o nivel de elevación h, estimada en la Fase 2. En este caso, la intersección con la semirrecta es analítica e inmediata, dando origen a la función de retroproyección π_h desarrollada en la Sección 7.2.5.

2.7. Reconstrucción tridimensional a partir de siluetas

2.7.1. Envolvente visual y tallado espacial

Si se dispone de imágenes de un objeto tomadas desde posiciones conocidas de la cámara, la **envolvente visual** [30] se define como el volumen en el espacio 3D formado por la intersección de las líneas de visión de todas las siluetas capturadas. El procedimiento para calcular esta envolvente se conoce como *space carving* (tallado espacial) [29]: el espacio tridimensional se divide en pequeñas celdas volumétricas o vóxeles (el equivalente a un píxel en 3D) y se elimina cualquier vóxel que quede fuera de la silueta en al menos una de las vistas.
Para comprender el alcance de este método, se deben considerar dos propiedades fundamentales:

1. La envolvente visual **contiene por completo al objeto real**. En consecuencia, el volumen calculado actúa como una cota superior y jamás subestima el tamaño verdadero del objeto.

2. La precisión de la reconstrucción depende de la **variedad de ángulos de visión** disponibles. Cuando las fotos se toman desde una misma perspectiva o sector acotado, la reconstrucción pierde calidad. En el caso extremo de contar con una sola vista (como en nuestro caso un único dron en una posición casi fija), la envolvente se reduce al cono de visión de esa cámara, el cual no entrega información sobre la profundidad o la altura del objeto en la dirección en que mira el lente.

2.7.2. Restricción por sombra proyectada

Una fuente adicional de información geométrica es la sombra que el objeto proyecta sobre el terreno [42]. Conocidos el azimut $\psi_\odot$ y la elevación $\theta_\odot$ solares, un punto del objeto a altura h sobre el terreno proyecta su sombra a una distancia horizontal

$$d = \frac{h}{\tan \theta_\odot} \tag{2.7.1}$$

en la dirección antisolar. Con $\theta_\odot$ pequeño, d se vuelve grande y la sombra actúa como un amplificador de la altura, lo que en principio la hace un estimador muy sensible.
El requisito operacional que impone la ecuación (2.7.1) es que el terreno visible se extienda en la dirección antisolar una distancia de al menos $h_{\text{máx}}/\tan\theta_\odot$. Si la sombra queda truncada por el borde del cuadro, la longitud medida es menor que la real y la altura estimada constituye solo una cota inferior, cuyo error crece con la fracción de sombra que queda fuera del cuadro.

Capítulo 3

DATOS Y HERRAMIENTAS

3.1. Datos de entrada

Los datos requeridos para la ejecución y validación del *pipeline* corresponden a:

- **Video de la tronadura**: Archivo de video en formato MP4 capturado por la cámara integrada del VANT (DJI) y cuyo nombre incluye la fecha y hora de la tronadura. Aunque se disponía de un conjunto de grabaciones de múltiples eventos, el desarrollo y análisis de este trabajo se centra exclusivamente en la tronadura del 15/08/2025. Las demás grabaciones presentan variaciones operacionales, ajenas al diseño del algoritmo, que introducen fallos en el procesamiento.
- **Datos meteorológicos**: Se emplean los registros de dos estaciones meteorológicas, la estación Chorrillos (Calama) de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) [15] y la estación Colegio Pedro Vergara Keller de SINCA [11]. Las variables consideradas son velocidad del viento, dirección del viento y material particulado. Debe tenerse en cuenta que las estaciones se ubican lejos del evento: Chorrillos a 16,5 km y P. Vergara Keller a 15,9 km del pivote, ambas hacia el sur y entre 460 y 500 m menos de altura. Por lo tanto, la comparación entre el viento estimado por flujo óptico y el viento medido por las estaciones es una validación de *consistencia*, no una comparación entre mediciones del mismo campo físico.
- **Topografía del terreno**: Se emplea un modelo digital de elevación (DEM) derivado de ALOS PALSAR [1], reproyectado a EPSG:32719. Este producto presenta una limitación, pues los datos corresponden al período 2006–2011, mientras que la geometría del rajo ha sido modificada continuamente por la operación de la mina desde entonces.

3.2. Sitio de estudio

El trabajo se desarrolla sobre registros de la mina Chuquicamata, ubicada en la Región de Antofagasta, Chile, en las cercanías de la ciudad de Calama, a una altura de 2870 m sobre el nivel del mar.



Figura 3.1: Imagen extraída de Google Maps [22].

La Figura 3.1 muestra la topografía del rajo abierto de Chuquicamata, destacando su estructura de terrazas escalonadas y caminos de acarreo. Escenario sobre el cual se desarrolla la captura de video y la propagación de la nube de gas.

3.3. Herramientas de software

El desarrollo del proyecto se fundamenta en un ecosistema de herramientas de código abierto en lenguaje Python, complementado con plataformas de información geográfica y software de modelado 3D. En el Cuadro 3.1 se resumen las principales librerías y entornos utilizados. En el ámbito de visión computacional, `OpenCV`, `NumPy` y `SciPy` constituyen la base para la manipulación matricial de fotogramas y filtrado de imágenes, sobre la cual se integraron los modelos de aprendizaje profundo CLIPSeg [34] y SAM 2 [39] para la segmentación semántica y propagación temporal de la nube.

Para el análisis geométrico y georreferenciación, se emplearon `trimesh` en el manejo de mallas tridimensionales y trazado de rayos (ray-casting), `rasterio` y `pyproj` para la lectura de modelos digitales de elevación (DEM) y conversión de coordenadas UTM, e `pysolar` junto con Blender para estimar la posición del sol y generar las escenas de referencia en 3D. Finalmente, la validación de los datos espaciales y de las fases se apoyó en QGIS y ParaView respectivamente.

Cuadro 3.1: Herramientas empleadas en el desarrollo e implementación del método.

Ámbito	**Herramientas**
Visión computacional	Python, OpenCV, NumPy, SciPy, CLIPSeg, SAM 2
Geometría y 3D	`trimesh`, `rasterio`, `pyproj`, `pysolar`, Blender, ParaView
Análisis y visualización	Matplotlib, Jupyter Notebook
Sistemas de información geográfica	QGIS
Entorno de desarrollo	Windows, Anaconda, Visual Studio Code

Cabe señalar que la implementación completa se ejecutó en una arquitectura estándar basada en CPU, sin aceleración por GPU, lo que impone un costo computacional de aproximadamente 120 min para el procesamiento continuo de una secuencia de video completa y alrededor de 11 h para compilar las validaciones.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizó el asistente de IA Claude [16] como apoyo en la programación del *pipeline* (implementación y depuración). El diseño metodológico, la selección de datos, la ejecución de los experimentos y la interpretación de los resultados son de responsabilidad del autor, quien revisó y validó el código y el contenido generado con apoyo de la herramienta.

Capítulo 4

FASE 0: PLANIFICACIÓN Y PREPROCESAMIENTO

4.1. Organización

Antes de comenzar el análisis, debemos plantear un espacio de trabajo. El escenario propuesto consiste en dividir las fases del proyecto y unificarlas en un notebook como se muestra a continuación:

```
Proyecto/
├── Codigo.ipynb
├── funciones/
│   ├── funciones_F0.py
│   ├── funciones_F1.py
│   ├── funciones_F2.py
│   ├── funciones_F3.py
│   └── funciones_F4.py
├── datos/
│   ├── DEM_mina.tif
│   ├── satelital_utm.tif
│   ├── DJI_20250815165143_0003_V.MP4
│   ├── sam2_hiera_tiny.pt
│   ├── clipseg-rd64-refined/
│   └── estaciones/
│       ├── DMC_Chorrillos/
│       │   └── 2025-08.xls
│       └── SINCA_PVergaraKeller/
│           ├── datos_DIR_121130_260813.csv
│           └── datos_VEL_121130_260813.csv
└── resultados/
    ├── 0_preprocesamiento/
    ├── 1_deteccion_gas/
    ├── 2_reconstruccion3d/
    ├── 3_viento/
    └── 4_pmx/
```

Al inicio de esta fase es que se definen estas rutas para que las demás fases tengan acceso a ellas.

4.2. Escaneo preliminar

El objetivo de esta etapa es conseguir dos elementos que son clave: el instante exacto de la detonación (pivote) y una ventana temporal previa que sirva como modelo de fondo limpio, es decir, sin la nube de gas ni movimientos bruscos de la cámara.

Para optimizar el costo computacional, el video se procesa inicialmente a un cuarto de su resolución original (3840×2160 px $\rightarrow 960 \times 540$ px) y se convierte a escala de grises. Esta reducción no compromete el escaneo, ya que la nube es un objeto de gran tamaño que a pocos fotogramas de la detonación ya abarca varias celdas de la grilla descrita a continuación, y esta etapa solo busca localizar el instante del evento, no delimitar su contorno. Entonces, el escaneo se divide en los siguientes pasos:

1. Cálculo de actividad espacial por bloques

En lugar de analizar el cambio de cada píxel individualmente (lo cual es ruidoso y costoso), la imagen se divide en una grilla de 24×16 bloques, generando 384 celdas de 40×34 px cada una. Para cada par de fotogramas consecutivos, se calcula la diferencia absoluta de intensidades:

$$d_i = |g_i - g_{i-1}|, \tag{4.2.1}$$

donde g_i y g_{i-1} representan las matrices de intensidad en escala de grises del fotograma actual y el anterior, respectivamente. A partir de d_i, se calcula el promedio absoluto de variación dentro de cada celda de la grilla. Con esto, se extraen dos series temporales para cada fotograma i del video:

- **Actividad máxima ($act[i]$):** Es el valor de la celda más activa del cuadro. Si ocurre una detonación en un sector, esta celda registrará un *peak* de actividad.
- **Nivel de fondo ($bg[i]$):** Es la mediana de actividad de las 384 celdas, la cual representa el nivel general de movimiento en toda la escena.

2. Detección del evento de tronadura

Para identificar la explosión, se debe diferenciar entre un evento localizado (la tronadura) y un movimiento global (un reencuadre o paneo del dron). Si la cámara se mueve, tanto la actividad máxima como la mediana subirán a la par. Para filtrar este efecto, se define un indicador de localización:

$$ratio[i] = \frac{act[i]}{\text{máx}(bg[i], 10^{-3})}, \tag{4.2.2}$$

Este cociente se dispara únicamente cuando el movimiento se concentra en un punto específico de la imagen.

Complementariamente, para confirmar que se trata de un evento y no de simple ruido, se exige que la actividad supere un umbral estadístico:

$$act[i] > \text{base} + 4 \cdot \text{MAD}, \tag{4.2.3}$$

donde el término base representa la mediana histórica de la serie act a lo largo de todo el video (base = mediana(act)), y MAD corresponde a la Desviación Absoluta de la Mediana de dicha serie [31].

Si se detectan múltiples episodios que cumplen estas condiciones, el episodio definitivo de la tronadura se selecciona evaluando su "fuerza" F. Esta métrica representa el área bajo la curva del indicador de localización que excede un umbral mínimo th_{ratio}:

$$F = \sum_{i \in \text{episodio}} (ratio[i] - th_{ratio}). \tag{4.2.4}$$

Finalmente, se selecciona como detonación real aquel episodio que maximice el valor de F.

3. Selección del modelo de fondo

Una vez fijado el fotograma de la tronadura, se busca una ventana de 30 fotogramas en el pasado para construir el modelo de fondo. Esta ventana debe cumplir tres criterios:

1. Finalizar con un margen de seguridad de 10 fotogramas antes de la detonación.
2. Presentar estabilidad global, exigiendo que la actividad de todos los fotogramas en la ventana sea baja en relación a la actividad típica del video ($act[i] < 1.35 \cdot \text{base}$).
3. Ser la ventana temporal más cercana posible a la tronadura que cumpla lo anterior, minimizando así el riesgo de diferencias de encuadre por un movimiento del dron justo antes de la explosión.

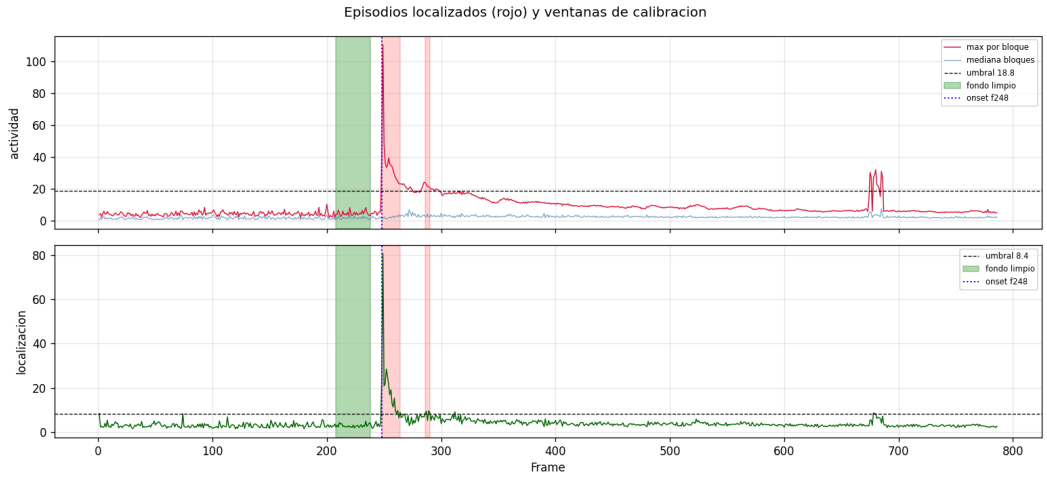


Figura 4.1: Frame de detonación y fondo limpio

En la Figura 4.1, las series temporales muestran cómo el cociente de localización filtra el ruido global del dron, logrando un *peak* distintivo que sitúa la detonación en el fotograma 248. Las áreas sombreadas en rojo indican los episodios localizados por el algoritmo, mientras que la franja verde confirma la extracción de los 30 fotogramas de fondo limpio, situados en un periodo de baja actividad justo antes del umbral de seguridad previo a la explosión.

4.3. Extracción de metadatos

A continuación se expone la información extraída, tanto del mismo video como parámetros fijos de la cámara usada.

Cuadro 4.1: Metadatos extraídos del archivo de video. Se distinguen cuatro orígenes: el video decodificado (a), el contenedor MP4 (b), la pista de telemetría DJI (c), y las constantes de cámara (d).

Campo	**Origen**	**Unidad**	**Valor**
(a) OpenCV `VideoCapture`			
`fps`	`CAP_PROP_FPS`	Hz	29,970
`n_frames`	`CAP_PROP_FRAME_COUNT`	—	787
`ancho`	`CAP_PROP_FRAME_WIDTH`	px	3840
`alto`	`CAP_PROP_FRAME_HEIGHT`	px	2160
(b) MP4 y nombre del archivo			
`ts_inicio_video`	patrón `DJI_AAAAMMDDhhmmss`	hora local	2025-08-15T16:51:43
`creation_time`	box `moov/mvhd`	UTC	control cruzado
`video_bytes`	`os.stat`	B	434 589 456
(c) Telemetría DJI (Protobuf)			
`lat_deg`	`.3.3.4.1.2`	°	−22,300393
`lon_deg`	`.3.3.4.1.3`	°	−68,903535
`absolute_altitude_m`	`.3.3.4.2`	m	2963,57
`drone_yaw_deg`	`.3.3.3.3`	°	−151,7
`gimbal_pitch_deg`	`.3.4.3.1`	°	−59,7
`width` / `height`	`.2.2.1`/`.2.2.2`	px	3840 / 2160
`fps` (telemetría)	`.2.2.3`	Hz	29,97
`n_muestras`	tabla `stsz`	—	787
(d) Intrínseco de cámara			
`focal`	`focal_px_por_ancho`	px	2700[†]

[†] Valor heredado de la validación previa del *visual hull*, no leído del archivo.

4.4. Ubicación pivote

Para conseguir la mejor estimación de la posición del pivote en el cuadro, la seleccionamos manualmente mediante dos herramientas. En primer lugar está la opción de calibración del airblast, donde anotamos el pivote y luego puntos visibles del frente de onda para conseguir una segunda aproximación de escala px/m. En segundo lugar, está la opción más simple de sólo marcar el pivote y quedarse sólo con la escala de los metadatos.



Figura 4.2: Ubicación de pivote en el frame.

4.5. Georreferencia

Toda la geometría del trabajo se expresa en el sistema de coordenadas proyectadas UTM zona 19 Sur (EPSG:32719). Los puntos de referencia principales se detallan en el Cuadro 4.2. El pivote corresponde al punto de emisión de la columna principal y se adopta como origen del sistema de coordenadas local de trabajo. Para validar la correcta alineación espacial de los datos, la Figura 4.3 presenta una comparativa visual entre la perspectiva capturada por el dron (un *frame* del video) y la topografía georreferenciada de la zona de estudio. Complementando esta representación, se calcularon y proyectaron los puntos cardinales asociados directamente sobre la topografía del terreno, tal como se ilustra en la Figura 4.4. Esta incorporación

Cuadro 4.2: Puntos georreferenciados.

Punto	**Este [m]**	**Norte [m]**	**Cota [m]**
Posición del dron	509936.12	7533919.93	2963.57
Pivote	509881.32	7533810.59	2760.96

proporciona una orientación geográfica explícita que facilita la interpretación de la escena y el posterior análisis direccional del viento.



Figura 4.3: Comparación frame contra georreferencia

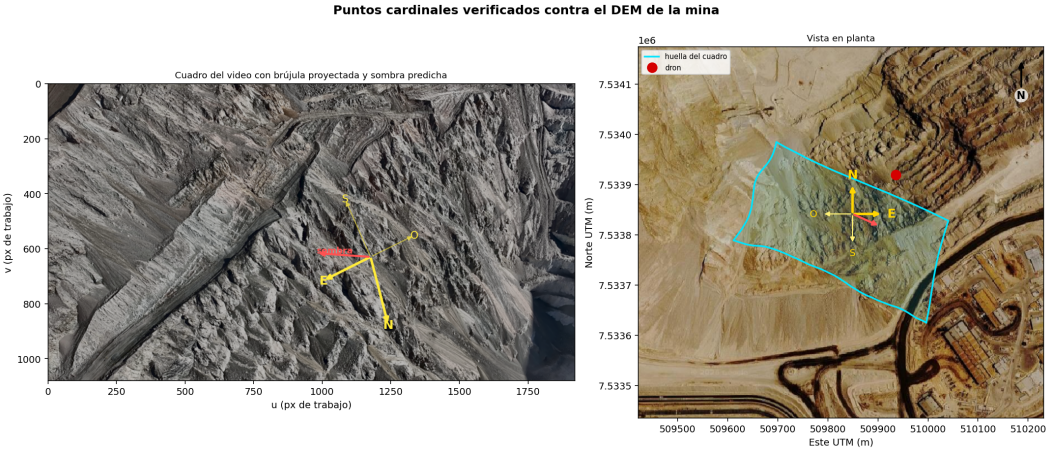


Figura 4.4: Obtención de puntos cardinales

Capítulo 5

FASE 1: DETECCIÓN Y SEGMENTACIÓN DE LA COLUMNA DE GAS

5.1. Formulación del problema

Se busca construir, para cada cuadro t posterior a la detonación, una máscara binaria $M_t \subset \Omega$, con Ω el dominio de la imagen, tal que M_t contenga la proyección de la nube principal de polvo y gases. Los requisitos del diseño son:

1. **Cobertura.** M_t debe contener la nube completa. Es esencial esta contención para las fases siguientes, mientras más refinada y completa sea esta cobertura, menor error arrastraremos.

2. **Coherencia temporal.** M_t y M_{t+1} deben ser consistentes. Buscamos evitar que las máscaras parpadeen entre frames o que sean muy lejanas entre sí.

3. **Automatización.** El método no debe requerir segmentación manual del video objetivo.

5.2. Arquitectura de la solución

La arquitectura adoptada combina un componente indicativo y un componente de seguimiento:

1. **Generación de semillas** con CLIPSeg sobre un subconjunto de cuadros, a partir de descripciones textuales de la clase objetivo.
2. **Selección de anclajes**: Identificación de los cuadros y regiones que servirán como *prompt* inicial para SAM 2.
3. **Propagación temporal** con SAM 2 desde los anclajes hacia el resto de la secuencia, en ambos sentidos temporales.

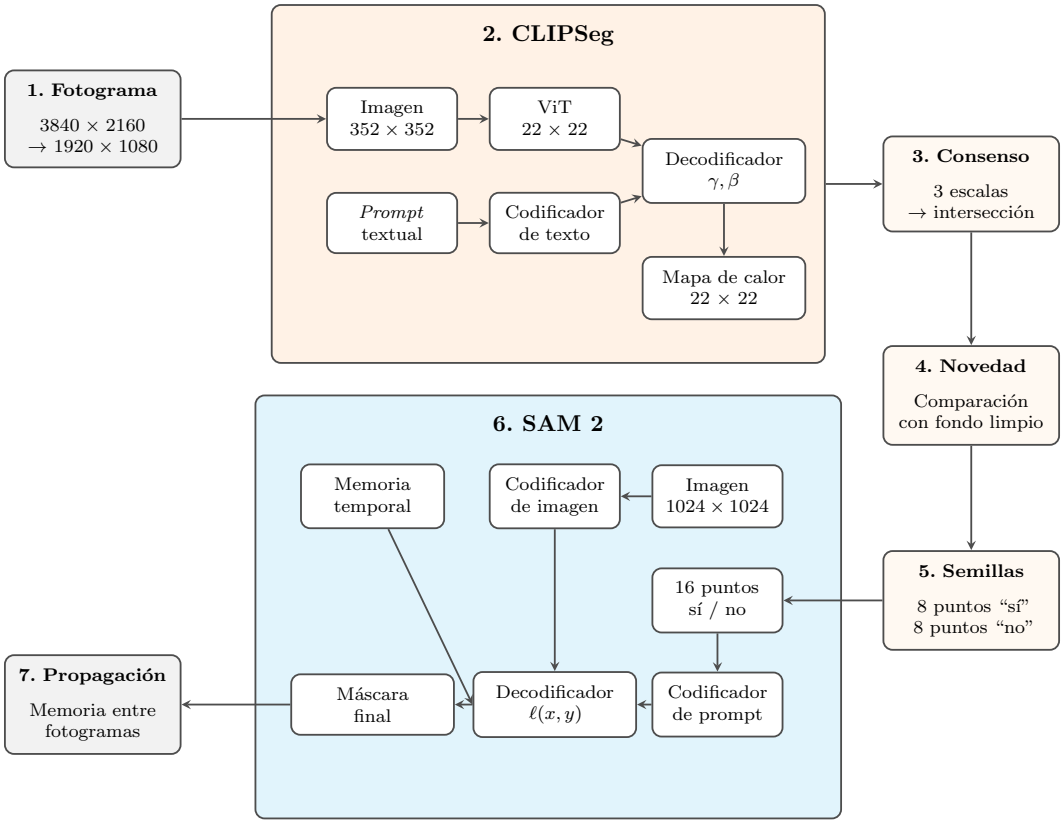


Figura 5.1: Flujo de procesamiento empleado en la Fase 1 desde la recepción de la imagen, aplicando primero CLIPSeg y luego SAM 2.

En la Figura 5.1 se muestra de forma resumida el proceso para la detección y segmentación de la columna de gas. El fotograma primero se reescala y se procesa mediante CLIPSeg,

que combina la información visual con un *prompt* textual para generar un mapa de calor semántico. Las predicciones obtenidas a distintas escalas se combinan mediante un consenso y se contrastan con un fondo limpio para seleccionar las semillas positivas y negativas. Estas semillas constituyen el *prompt* de SAM 2, que combina las características de la imagen, el *prompt* y la memoria temporal para obtener la máscara de la columna. Finalmente, la máscara se propaga al resto de los fotogramas.
Así, para cada fotograma t se obtiene un *mapa de logits* $\ell_t(u) \in \mathbb{R}$, con un valor por píxel u, y un escalar $s_t \in [0, 1]$. La máscara de la columna es el conjunto de nivel cero del primero:

$$M_t = \{\, u : \ell_t(u) > 0 \,\}. \tag{5.2.1}$$

El signo de ℓ_t separa el interior del exterior de la columna, mientras que su magnitud expresa el margen con que el modelo toma esa decisión: es grande en el núcleo de la nube, grande y negativa sobre el terreno, y se aproxima a cero cerca de la frontera. El escalar s_t, en cambio, proviene de una regresión independiente, entrenada para predecir el índice de Jaccard entre la máscara que el propio modelo produce y la anotación de referencia del ejemplo de entrenamiento [28, 39]. Es, por lo tanto, una estimación que el modelo hace de su propio acierto.

5.2.1. Selección de anclajes

La elección del cuadro de anclaje es el punto más sensible del pipeline. Un anclaje demasiado temprano captura una columna aún pequeña, con poca evidencia semántica; uno demasiado tardío captura un frame muy contaminado.
La búsqueda se restringe a la ventana

$$t \in \big[\, t_{\text{pivote}} + 0{,}07 \text{ s},\ t_{\text{pivote}} + 1{,}85 \text{ s} \,\big), \tag{5.2.2}$$

Dentro de ella se toma como anclaje el primer cuadro cuya región candidata M_t^{col} (consenso de CLIPSeg intersectado con la novedad contra el fondo) cubra al menos el 0,193 % del área del cuadro de trabajo (4 000 píxeles a 1920×1080) y su novedad mediana supere cierto umbral. Este valor indica cuando la columna ya alcanzó un tamaño y nitidez suficiente para ser detectada con confianza.

5.3. Resultados: Segmentación y Validación

A continuación se presentan los resultados obtenidos en esta fase para el video del 15/08/2025. En la figura 5.2 se muestran las segmentaciones al aplicar sólo CLIPSeg y comparar contra el fondo limpio. Luego se muestra la segmentación del pipeline completo, después de pasar



Figura 5.2: Segmentación de CLIPSeg y SAM 2 15/08/2025

por SAM 2. Finalmente se tiene la comparación entre ambas mediciones en conjunto, para destacar la detección de un modelo sobre otro.

5.4. Validación de la segmentación

Al carecer de una segmentación de referencia, en el video real no es posible medir la exactitud de la secuencia de máscaras $\{M_t\}$. Por lo tanto, la validación se construye sobre tres evidencias independientes: la confianza que tiene el modelo sobre su propia salida, la sensibilidad del resultado ante alteraciones del video de entrada, y la discrepancia contra un trazado manual sobre el mismo video.

5.4.1. Confianza interna del modelo

Las salidas del modelo permiten interrogarlo sobre la calidad de su propio resultado. Para esto, se seleccionan 40 fotogramas de la secuencia. En cada uno se construye un *prompt* a partir de la máscara ya propagada. Recuperando dos parámetros fundamentales, la estimación de acierto s_t y el mapa espacial de *logits* $\ell_t(u)$, donde u representa las coordenadas de cada píxel.

El primer indicador, s_t, es directamente la estimación interna que el modelo hace del índice de Jaccard (IoU) [26] entre su predicción y la máscara ideal. El segundo indicador evalúa la nitidez de la frontera calculada a partir del mapa de *logits*. Definiendo una familia de máscaras dependientes de un umbral τ:

$$M_t^{\tau} = \{\, u : \ell_t(u) > \tau \,\}, \tag{5.4.1}$$

se observa que están anidadas, es decir, $\tau_1 < \tau_2 \implies M_t^{\tau_2} \subseteq M_t^{\tau_1}$. A partir de esto, se define el *índice de estabilidad* S_t [28], el cual compara el área (medida en píxeles) de una versión exigente contra una permisiva, separadas por un desplazamiento $\delta > 0$:

$$S_t = \frac{\left|M_t^{+\delta}\right|}{\left|M_t^{-\delta}\right|} \in [0,1] \qquad \Longrightarrow \qquad 1 - S_t = \frac{\left|\{u : |\ell_t(u)| \le \delta\}\right|}{\left|M_t^{-\delta}\right|}. \tag{5.4.2}$$

La segunda igualdad entrega la interpretación física del indicador, pues $1 - S_t$ representa la fracción del área de la máscara que cae en una franja de *logit* ambiguo. Un S_t cercano 1 indica una frontera nítida que no depende de dónde se fije el corte; un valor bajo advierte que una parte de la máscara está en una zona de indecisión algorítmica. En este análisis se emplea $\delta = 1$.

Ambos indicadores describen propiedades complementarias: s_t evalúa la correcta identificación del objeto, mientras que S_t mide la definición de su contorno. La Figura 5.3 presenta la evolución de ambas series.

Ambas métricas se mantienen sobre 0,77 durante los primeros 9,7 s. Entre $t = 10{,}6$ s y $t = 12{,}9$ s, S_t desciende a 0,54–0,67, mientras s_t oscila y se desploma a valores de 0,17–0,29 a partir de los 11,5 s. Que la caída sea mayor en s_t indica que el modelo sigue trazando un

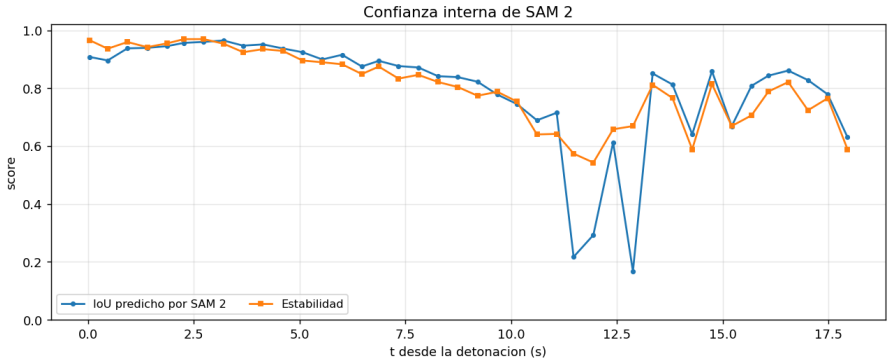


Figura 5.3: Estimación de acierto s_t (azul) e índice de estabilidad S_t (naranja) sobre 40 fotogramas equiespaciados de la secuencia.

contorno razonablemente definido, pero cuestiona estar identificando el objeto correcto. En ese instante la columna satura el cuadro y pierde la estructura compacta sobre la que el modelo fue entrenado.

5.4.2. Acuerdo entre propagación y segmentación por fotograma

El modelo permite dos regímenes de inferencia [39]. En el modo video, la secuencia de máscaras $\{M_t\}$ se construye propagando temporalmente un estado mediante la memoria del modelo. El riesgo inherente de este enfoque es que un error en un fotograma se propaga a los siguientes sin mecanismo correctivo. Para verificar esto, se compara M_t contra $\widetilde{M}_t$, la máscara obtenida al evaluar cada fotograma en modo imagen de forma aislada. El indicador de acuerdo espacial A_t se calcula unificando ambas predicciones mediante el índice de Jaccard:

$$A_t = \mathrm{IoU}\big(M_t, \widetilde{M}_t\big) = \frac{|M_t \cap \widetilde{M}_t|}{|M_t \cup \widetilde{M}_t|}. \tag{5.4.3}$$

La Figura 5.4 muestra que $A_t \in [0{,}83,\ 0{,}98]$ durante toda la secuencia, alcanzando su mínimo al inicio del tramo crítico ($t = 10{,}6$ s).

Esto sólo comprueba la coherencia del método, no su exactitud. El *prompt* del modo imagen se construye a posteriori, a partir de la máscara ya propagada. Si ésta incorporó una región errónea, el *prompt* señalará esa misma región y el modo imagen la reproducirá.

5.4.3. Consistencia bajo ediciones del video

Se verifica la invarianza de la segmentación frente a alteraciones del video. Se procesan 12 ediciones agrupadas en cinco familias (control, resolución, geometría, fotometría y sensor), repitiendo todo el proceso desde la etapa inicial de siembra semántica. Luego, las máscaras se comparan fotograma a fotograma.

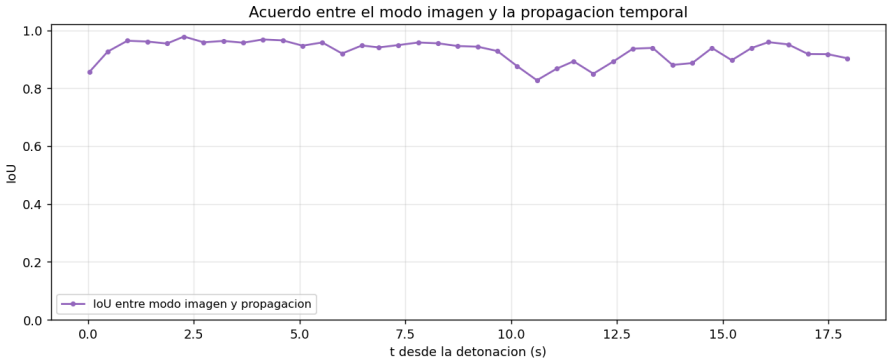


Figura 5.4: Acuerdo A_t entre la máscara propagada y la obtenida en modo imagen sobre el mismo fotograma sin memoria.

La variante de control (`identidad`) procesa el mismo video original con la misma semilla de siembra que la corrida de referencia, por lo que la reproduce exactamente. Dado que el muestreo de puntos negativos es estocástico, el control se repite con cuatro semillas adicionales. Para cada corrida $k = 0, \ldots, 4$, con $k = 0$ la de la semilla de referencia, se calcula la razón de área

$$r_k(t) = \frac{\left|M_t^{(k)}\right|}{\left|M_t^{\mathrm{ref}}\right|}, \tag{5.4.4}$$

donde $M_t^{(k)}$ es la máscara de la corrida k y M_t^{ref} la de referencia, por lo que $r_0(t) = 1$. El *piso de ruido* se define como la banda comprendida, en cada fotograma, entre

$$b_{\mathrm{mín}}(t) = \min_k r_k(t), \qquad b_{\mathrm{máx}}(t) = \max_k r_k(t). \tag{5.4.5}$$

Una edición cuya razón de área permanezca dentro de $[b_{\mathrm{mín}}(t),\, b_{\mathrm{máx}}(t)]$ se considera indistinguible de ejecutar nuevamente el modelo bajo las mismas condiciones.

El Cuadro 5.1 revela dos comportamientos claramente diferenciados. Las perturbaciones fotométricas y de resolución son altamente robustas ($0{,}93 \leq \mathrm{IoU} \leq 0{,}99$). En contraste, las alteraciones geométricas tienen una caída importante, bajando a 0,13 en la rotación de 90°. Esto evidencia que el modelo no es rotacionalmente invariante, lo cual es predecible dado que las imágenes de entrenamiento poseen una fuerte componente direccional.

Cabe mencionar que la falla en `jpeg40` ocurre por un colapso en el anclaje inicial provocado por la compresión, lo que detiene el flujo algorítmico antes de producir ninguna máscara.

Al analizar esta discrepancia en el tiempo (Figura 5.5), se excluye la familia geométrica. En `rot90`, la razón de área se mantiene entre 4,8 y 122 a lo largo de toda la secuencia, incluirla comprimiría la escala y ocultaría el comportamiento del resto de las ediciones. Las ediciones geométricas quedan caracterizadas por su IoU en el Cuadro 5.1.

En las familias restantes, la razón de área se mantiene cercana a la unidad, aunque el propio

Cuadro 5.1: Consistencia de la segmentación bajo ediciones del video, medida como IoU mediano contra la referencia.

Familia	**Edición**	**IoU mediano**
Resolución	`full` (4K nativo)	0,994
Sensor	`ruido5`	0,987
Fotometría	`saturacion_baja`	0,984
Fotometría	`brillo_menos`	0,978
Fotometría	`brillo_mas`	0,975
Fotometría	`gamma_alta`	0,957
Fotometría	`balance_calido`	0,931
Geometría	`rot180`	0,858
Geometría	`espejo_h`	0,850
Geometría	`rot90`	0,130
Sensor	`jpeg40`	sin resultado

control presenta una variabilidad considerable que cambia a lo largo de la secuencia. Durante los primeros 2 s, cuando la máscara aún es pequeña, la banda oscila entre 0,93 y 1,16 y las ediciones alcanzan desviaciones de hasta un 25 %. Entre los 2 y los 10,6 s la banda se ensancha hasta cubrir valores entre 0,83 y 1,18, y las desviaciones de las ediciones quedan en su mayoría dentro de ella, por lo que no se distinguen de volver a ejecutar el modelo con otra semilla. A partir de los 13 s la banda se estrecha por debajo de 0,05, y solo en este tramo se aprecian efectos atribuibles a las ediciones, con desviaciones de hasta un 11 %. En conjunto, dentro del rango confiable de la segmentación (Sección 5.4.5), las alteraciones fotométricas, de resolución y de sensor no producen cambios en el área mayores que la propia variabilidad del método.

5.4.4. Contraste con un trazado manual

Como métrica externa e independiente, la columna de polvo se delineó manualmente sobre doce fotogramas distribuidos entre la detonación y los 18 s. Aunque sufre de un claro sesgo humano, aporta una verificación base.

La comparación (Figura 5.6) muestra una razón mediana de área de 1,01, indicando ausencia de una sobre o subsegmentación global. La máxima discrepancia se ubica en $t = 11{,}4$ s, coincidiendo exactamente con la degradación identificada por las variables internas en la Sección 5.4.1.

Superponiendo los contornos (Figura 5.7), el IoU mediano alcanza 0,913. Las únicas desvia-

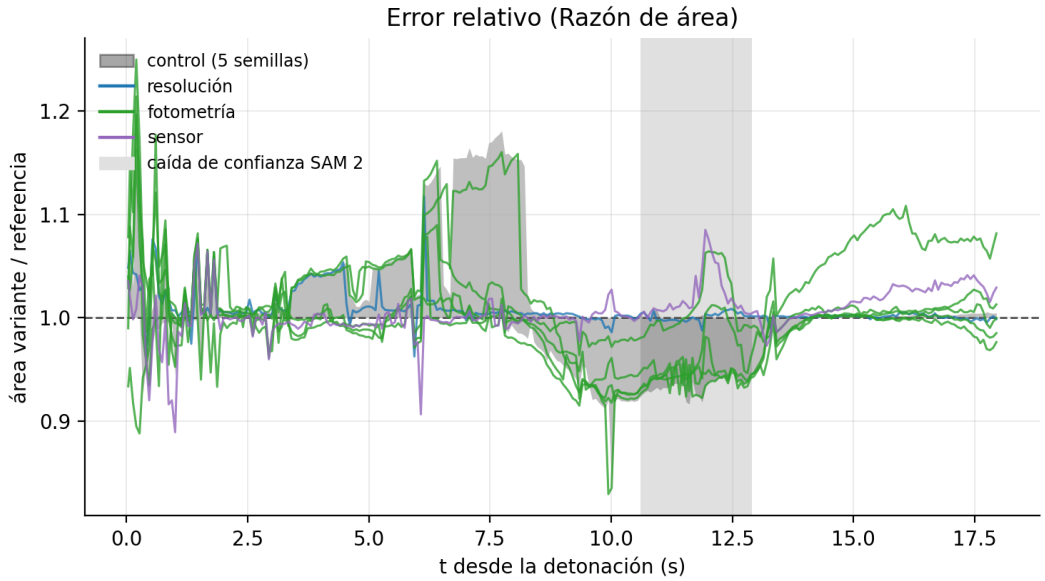


Figura 5.5: Razón entre el área segmentada en cada edición y la de referencia. La banda gris corresponde al control repetido con cinco semillas de siembra (piso de ruido) y la franja sombreada al intervalo de caída de la confianza interna de SAM 2 (10,6–12,9 s).

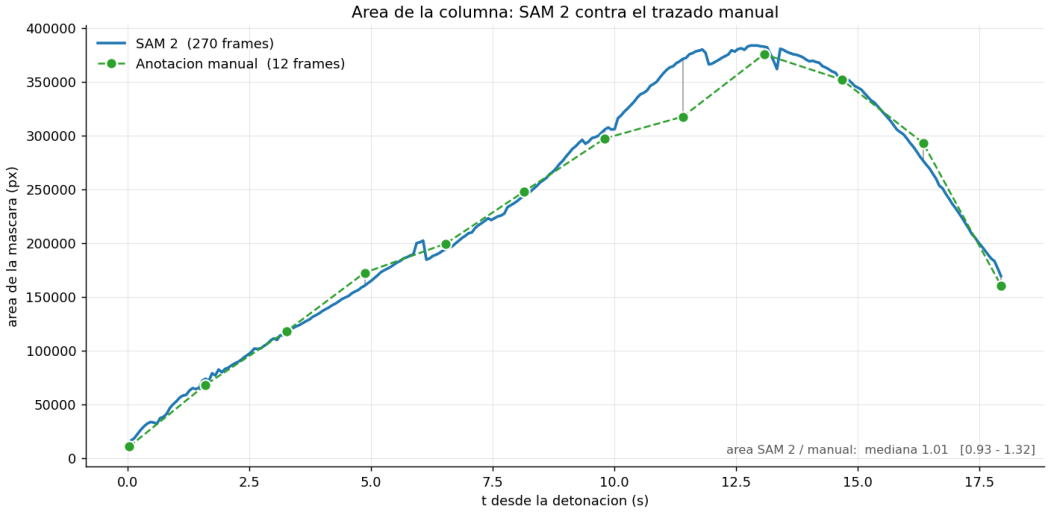


Figura 5.6: Área segmentada automáticamente contrastada con el área del trazado manual.

ciones ocurren al inicio de la expansión y, nuevamente, en $t = 11{,}4$ s, donde el algoritmo encierra 60 000 píxeles que en el trazo manual se excluyeron.

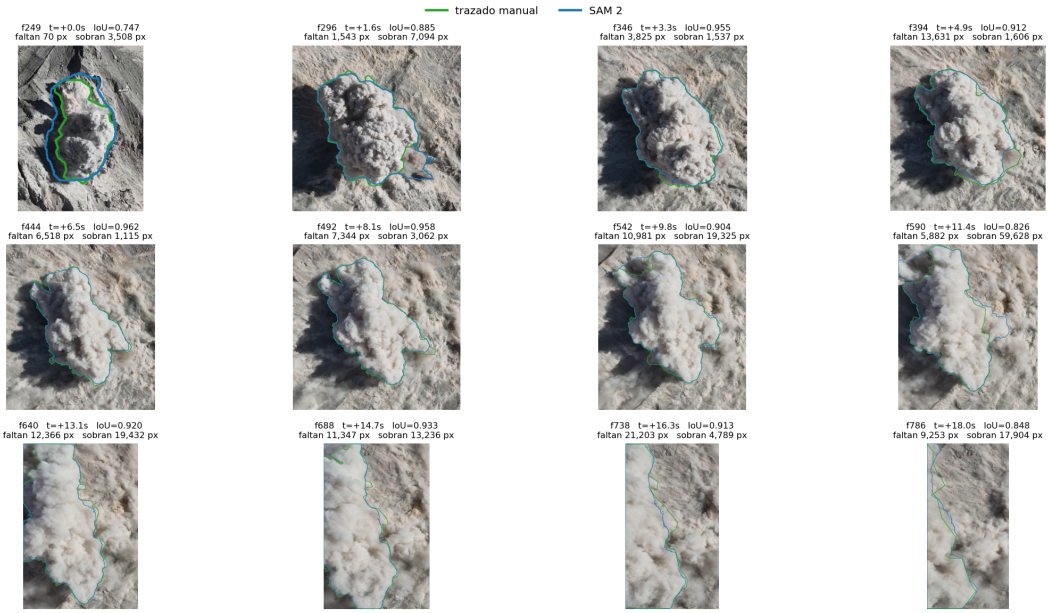


Figura 5.7: Contorno automático y trazado manual sobre los fotogramas anotados, detallando el índice de Jaccard y los píxeles residuales en cada cruce.

5.4.5. Alcance de la validación

Estas evidencias abordan vulnerabilidades distintas: la matemática interna alerta sobre falta de nitidez y caída de confianza algorítmica; las distintas ediciones descartan sobreajustes a características del sensor o luz; y el cruce manual certifica una zona mínima a ser cubierta. A pesar de sus naturalezas dispares, las tres evidencias convergen en un mismo diagnóstico y delimitan el rango temporal en que se puede confiar en la segmentación, desde la detonación hasta $t = 10{,}5$ s. Dentro de este rango, ambas métricas internas superan 0,77 hasta los 9,7 s y el índice de estabilidad se mantiene sobre 0,7, la máscara no toca el borde del cuadro y la razón de área frente al trazado manual se mantiene entre 0,93 y 1,08 después del primer fotograma. A partir de los 10,6 s, S_t cae bajo 0,7; desde los 11,1 s la máscara toca el borde del cuadro, y a los 11,5 s s_t se desploma, coincidiendo con la mayor discrepancia frente al trazado manual ($t = 11{,}4$ s). Este rango se emplea como límite en las fases siguientes: la ventana de viento de la Fase 3 termina en 9,9 s y la ventana de medición de la Fase 4 se restringe a $t \leq 10{,}5$ s (Cuadro 8.2).

5.4.6. Validación sintética de la Fase 1

Para evaluar la exactitud frente a una referencia absoluta, la segmentación se contrastó con la simulación del evento del 15 de agosto generada con el modelo ARD3D (Sección 1.5). Esta

simulación reproduce la pose de la cámara del dron y la hora del registro real, y se renderizó en tres formatos:

- **Volumétrico**: el gas se modela como un volumen opaco con sombreado, iluminación y contornos nítidos.
- **Difuso**: el gas se representa como un medio difuminado, cuya opacidad decae gradualmente hacia la periferia provocando bordes menos definidos, emulando una dispersión real.
- **Nube roja**: el gas se tiñe de un color rojo plano y uniforme, sin sombras proyectadas sobre el terreno, diseñada para extraer el área real.

La Figura 5.8 ilustra la diferencia visual entre los tres formatos para un mismo instante de tiempo.



Figura 5.8: Fotograma $t = 6{,}0$ s de la simulación en los tres formatos.

Extracción de la verdad-terreno

La máscara de verdad-terreno, denotada como G_t, se extrae aislando el formato de nube roja. Un píxel se clasifica como perteneciente a la nube si la intensidad de su canal rojo (I_t^R) supera por 100 al valor máximo entre los canales verde (I_t^G) y azul (I_t^B). Esto se expresa mediante la función indicatriz:

$$G_t(x, y) = \mathbb{I}\left[\, I_t^R(x, y) - \max\{I_t^G(x, y),\, I_t^B(x, y)\} > 100 \,\right], \tag{5.4.6}$$

Se descartan los píxeles que ya cumplían esta condición antes de la detonación (asociados a la interfaz gráfica del software). Además, la cámara del formato con nube roja está desfasada entre 20 y 50 px respecto a la de los otros formatos, por lo que a G_t se le aplica una homografía [23] estimada sobre un cuadro previo a la detonación, con un residuo mediano de 0,84 px.

Métricas de evaluación

Para cuantificar el desempeño, se compara la máscara estimada por el algoritmo (M_t) frente a la verdad-terreno (G_t). Denotando por $|\cdot|$ al recuento de píxeles (área), se calcula por

cuadro la intersección sobre la unión (IoU),

$$\mathrm{IoU}_t = \frac{|M_t \cap G_t|}{|M_t \cup G_t|}. \tag{5.4.7}$$

Para desagregar el origen de las discrepancias, se evalúa la razón de áreas $\rho_t = |M_t|/|G_t|$, acompañada por las tasas de falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN), normalizadas respecto al área verdadera:

$$\mathrm{FP}_t = \frac{|M_t \setminus G_t|}{|G_t|}, \qquad \mathrm{FN}_t = \frac{|G_t \setminus M_t|}{|G_t|}. \tag{5.4.8}$$

Cabe destacar que la Fase 1 se ejecutó manteniendo una configuración idéntica a la empleada en el registro real del 15 de agosto.

Resultados validación sintética

La Figura 5.9 detalla el comportamiento del algoritmo a lo largo del tiempo.

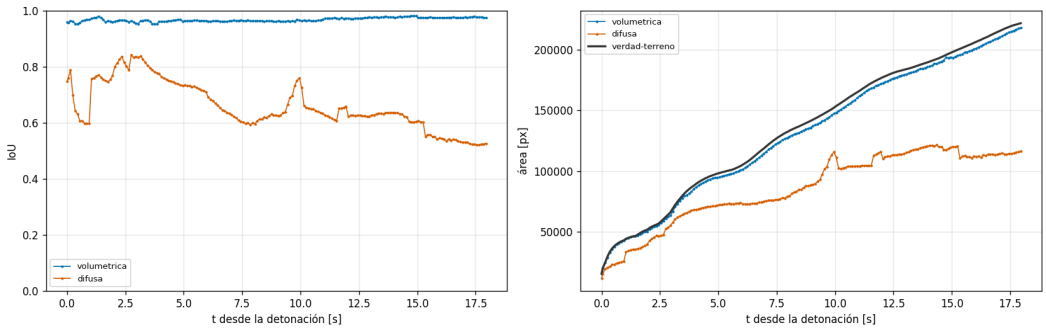


Figura 5.9: IoU por cuadro (izquierda) y área de las máscaras (derecha) en cada formato.

En el formato volumétrico, el modelo muestra un desempeño sobresaliente y estable: el IoU fluctúa muy cercano a 1,0 en todo momento. Asimismo, el área estimada replica casi perfectamente el crecimiento verdadero. Mientras que en el formato difuso muestra un decaimiento en su rendimiento. En mediana, el IoU es de 0,965 en el formato volumétrico y de 0,634 en el difuso, con razones de área ρ_t de 0,974 y 0,634, respectivamente.
La Figura 5.10 deja en evidencia cómo se desenvolvió el modelo espacialmente.
En el caso volumétrico vemos como el algoritmo produce un contorno muy ajustado, coincidiendo con los niveles de área mostrados anteriormente. Pero en el escenario difuso, los falsos negativos dejan claro que se está castigando la región fronteriza donde el simulador atenúa la opacidad del gas. Los falsos positivos son prácticamente nulos en ambos formatos (FP $\leq 0{,}1\,\%$), mientras que los falsos negativos alcanzan un $2{,}9\,\%$ en el volumétrico y un $36{,}6\,\%$ en el difuso. Por ello, en el formato difuso la máscara queda contenida en la

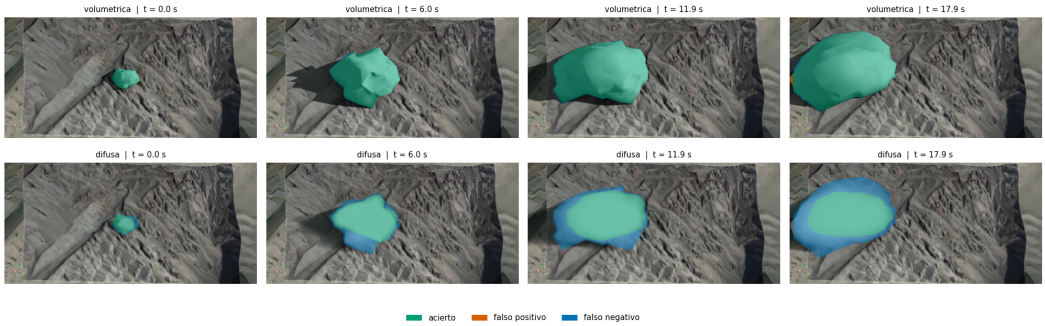


Figura 5.10: Aciertos, falsos positivos y falsos negativos de la Fase 1 en los formatos volumétrico (arriba) y difuso (abajo).

verdad-terreno y el IoU coincide con ρ_t.

Capítulo 6

FASE 2: RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA COLUMNA

6.1. Formulación del problema

Se busca estimar y simular el volumen tridimensional ocupado por la columna de gas, para ello es fundamental conseguir estimar su altura sobre el terreno, lo cual haremos con distintos insumos. Luego, las salidas de esta fase alimentarán las fases posteriores.

- **Entradas:** La secuencia de máscaras binarias M_t obtenida en la Fase 1, la máscara de sombra, el Modelo de Elevación Digital (DEM) del terreno y la posición de la cámara.
- **Salidas:** Estimación de altura $\hat{h}(t)$ y el volumen tridimensional de la columna (insumos requeridos para las Fases 3 y 4).

El diseño de esta fase se rige por los siguientes requisitos:

1. **Consistencia geométrica:** El volumen reconstruido debe proyectarse de forma similar sobre las máscaras M_t observadas desde la cámara.
2. **Cota inferior:** El modelado debe integrar las cotas del DEM para evitar que la geometría asuma volúmenes bajo el nivel del suelo.

3. **Robustez ante oclusiones:** El sistema debe contar con criterios para manejar encuadres donde la sombra se encuentra truncada o la cámara presenta una vista cenital.

El principio fundamental que resuelve esta fase es que una silueta única no determina un volumen cerrado, sino un cono de proyección infinito (o *visual hull*). Para acotar este volumen, el sol actúa aportando una segunda vista natural a la escena mediante la sombra proyectada [42].

6.2. Arquitectura de la solución

El procesamiento de los datos sigue un flujo secuencial estructurado en las siguientes etapas:

1. **Evidencia:** Extracción de la máscara de sombra y análisis del corredor de proyección.
2. **Grilla:** Discretización espacial mediante vóxeles.
3. **Envolvente:** Tallado espacial de la silueta.
4. **Cierre:** Ajuste por revolución y tope de altura.
5. **Altura:** Estimación trigonométrica de $\hat{h}(t)$.
6. **Exportación:** Generación del modelo volumétrico final.

6.2.1. Evidencia de sombra

Para integrar el sol como segunda vista, se emplea un detector multicanal [14] sobre la imagen para que capture todas las zonas que correspondan a sombra. A esta detección se le debe restar la sombra estática generada por el propio relieve del DEM, además de usar la posición del sol para delimitar las zonas físicamente posibles.
Además, una de las limitaciones del problema era la semejanza entre el humo o gas oscuro y la sombra, ya que este detector multicanal no puede diferenciarlos. Para trabajar esto, hacemos una sustracción de lo que nos entrega el detector con la máscara de la Fase 1, excluyendo gran porción de la columna de gas.

6.2.2. Tallado espacial y cierre por revolución

Para construir el volumen tridimensional, el espacio se divide inicialmente en una grilla de vóxeles tomando como origen el punto pivote. Luego, para cada fotograma, la máscara de la nube M_t se proyecta desde la posición de la cámara hacia el espacio 3D. El algoritmo

conserva únicamente los vóxeles que cruzan por este cono de visión y descarta de inmediato cualquier vóxel que quede enterrado bajo el relieve del terreno dictado por el DEM.
Sin embargo, este proceso de tallado produce una envolvente visual cruda que tiende a estirarse excesivamente a lo largo de la línea de visión de la cámara, generando un volumen distorsionado. Para corregir este efecto y recuperar una geometría más representativa de los gases, se aplica una regularización final: el volumen se ajusta mediante un cierre por revolución en torno al eje central de ascenso de la columna, y se recorta en su parte superior utilizando la altura estimada como tope.

6.2.3. Estimación de altura por sombra

En los instantes en que la columna es baja y su sombra está dentro del video, podemos conseguir una estimación de su altura mediante su proyección. En un escenario ideal, un punto en el tope de la nube con altura h proyecta su sombra a una distancia horizontal d, regida por:

$$d = \frac{h}{\tan \theta_{\odot}}. \tag{6.2.1}$$

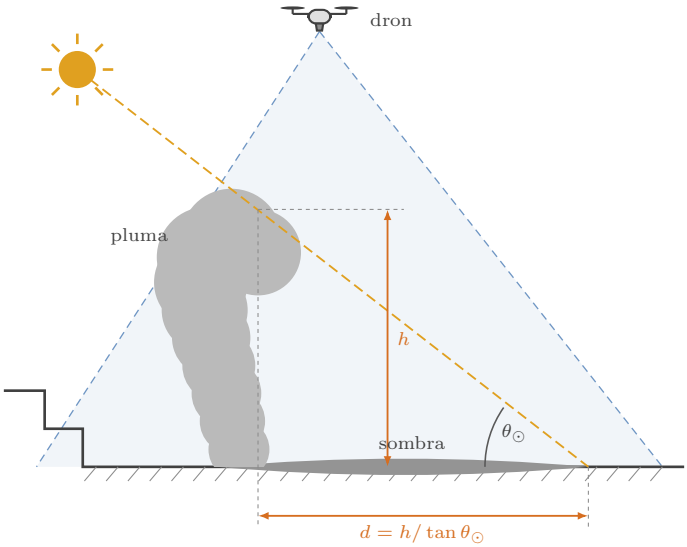
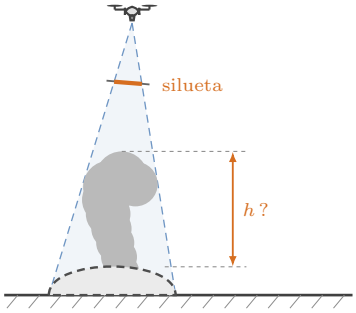
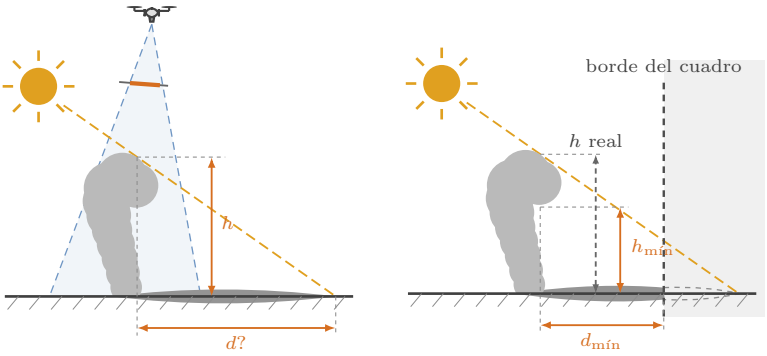


Figura 6.1: Geometría de la escena general.

No obstante, en la práctica el método está sujeto a los límites del encuadre y a la perspectiva de vuelo.
Como se muestra en la Figura 6.2, existen casos degenerados que impiden el cálculo directo. Por un lado, una vista completamente cenital del VANT sobre la columna provoca una pérdida de dimensionalidad ($3D \to 2D$), donde nubes de distintas alturas generan exactamente la



(a) Solo visión de la columna.



(b) Visión de columna y sombra parcial.

Figura 6.2: Escenarios típicos en tronaduras que complejizan el problema.

misma máscara, impidiendo ver la sombra. Por otro lado, si la cámara encuadra en ángulo pero el crecimiento de la columna hace que la sombra se salga de los márgenes de la imagen, el techo del encuadre trunca la medición, forzando a que la altura calculada se asuma solo como una cota inferior (subestimación).

6.2.4. Exportación a Blender

Para visualizar la coherencia espacial del volumen reconstruido, la secuencia se exporta a un entorno de renderizado tridimensional (Blender). Para ello, la evolución se discretiza extrayendo un *frame* cada ocho fotogramas del video, generando 68 estados tridimensionales de la nube entre $t = 0{,}03$ s y $t = 17{,}9$ s.

En cada instante, la matriz discreta obtenida por el tallado de vóxeles se transforma en una superficie continua. Para evitar el aspecto escalonado de los bloques, el campo se suaviza con un filtro gaussiano y se extrae su envolvente mediante el algoritmo de *marching cubes* [33]. Este entorno virtual consolida todos los parámetros geométricos del evento: la malla dinámica

del gas, el Modelo Digital de Elevación (DEM) texturizado en un radio de 800 m, la posición del dron, y un vector de iluminación que replica la posición del sol en ese instante.

6.3. Resultados: Proyección de sombra y Reconstrucción

Usando las salidas de las fases anteriores, procedemos a mostrar los resultados para esta fase.

6.3.1. Estimación de altura y dinámicas temporales

La posición del sol que se determinó [40], sugiere los siguientes valores de azimut y elevación solar:

$$\psi_{\odot} = 294{,}13^{\circ}, \qquad \theta_{\odot} = 18{,}59^{\circ}. \tag{6.3.1}$$

Debido a la baja elevación ($\theta_{\odot} < 20^{\circ}$), el factor de amplificación es $1/\tan\theta_{\odot} \approx 2.97$. Esto implica que una columna de 10 m de altura proyecta una sombra de casi 30 m sobre el terreno. Aunque esta amplificación mejora la sensibilidad para detectar pequeños cambios de altura en los primeros segundos, provoca que la sombra alcance rápidamente los márgenes de la imagen a medida que la nube asciende.

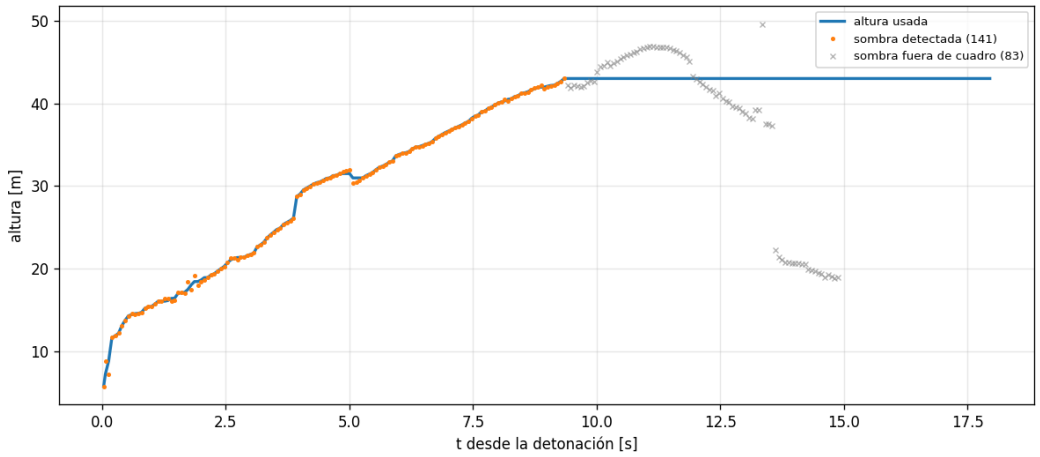


Figura 6.3: Evolución temporal de la altura estimada $\hat{h}(t)$.

En la Figura 6.3 se observa el comportamiento de la altura calculada mediante los ángulos obtenidos. Durante los primeros 9,3 segundos post-detonación, la sombra permanece contenida en el video (puntos naranjas), permitiendo una estimación continua y ascendente que pasa de 5,8 m a los 0,03 s hasta alcanzar un máximo de 43,0 m a los 9,34 s. Posterior a este instante, la sombra comienza a truncarse en los bordes del cuadro (cruces grises), por lo que, a partir de ese momento, asumimos un techo estático de 43,0 m para la reconstrucción volumétrica.

Cabe distinguir esta cantidad del centroide del volumen reconstruido, que es el estadístico que las Fases 3 y 4 emplean como altura efectiva de la columna. El centroide se sitúa en 0,54 del tope en mediana a lo largo de la secuencia, de modo que un tope de 43,0 m corresponde a un centroide del orden de los 25 m. La altura de columna describe hasta dónde llega la nube; el centroide, dónde se concentra su masa.

6.3.2. Aislamiento y filtrado de sombras

La extracción de la sombra de la nube, realizada con el detector multicanal, requiere descartar la sombra generada por la topografía que aparece incluso antes de la tronadura. La Figura 6.4 ilustra el desempeño del detector multicanal en cuatro instantes clave de la secuencia.

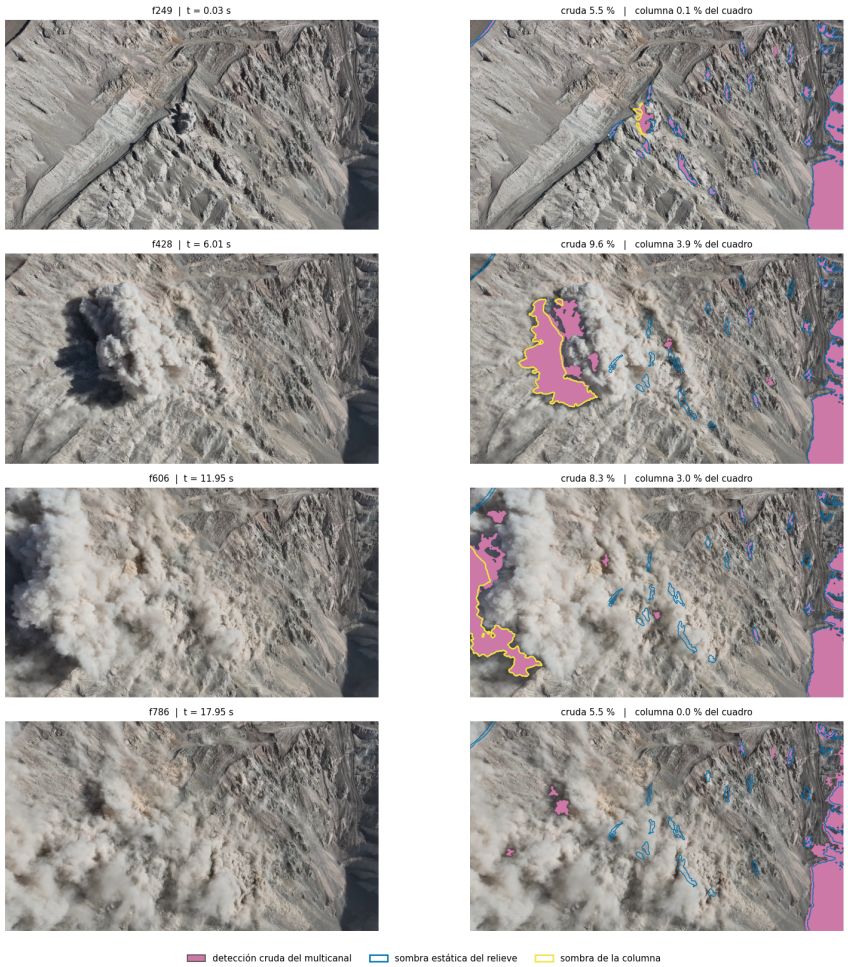


Figura 6.4: Descomposición de la detección de sombras.

En la columna izquierda vemos los fotogramas originales. En las máscaras de la derecha,

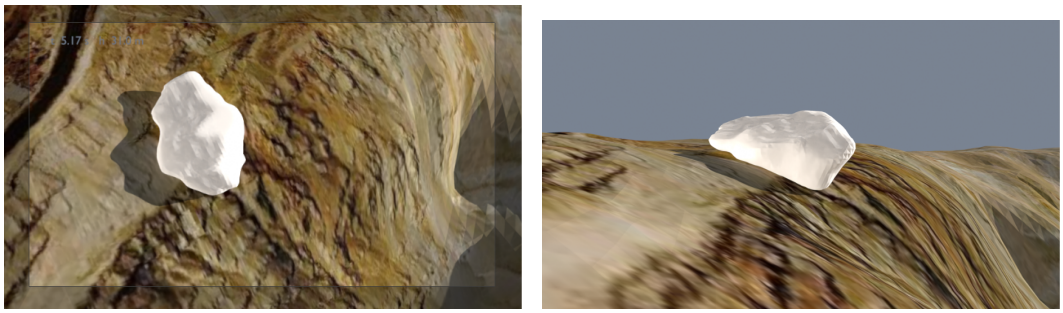
vemos como el detector clasifica las zonas oscuras como sombra, luego las zonas encerradas en azul son las sombras estáticas detectadas previo a la tronadura y la zona encerrada en amarillo es el resultante de restar las sombras estáticas, las máscaras de la fase 1 y al acotar por región admisible, usando la posición del sol y la ubicación de la columna.
A medida que la tronadura avanza ($t = 6{,}01$ s y $t = 11{,}95$ s), el área de sombra de la columna se incrementa hasta comenzar a retirarse del margen izquierdo del cuadro, momento en el cual el porcentaje de cobertura útil disminuye significativamente.

6.3.3. Revisión de la proyección de sombra

La Figura 6.5 presenta la superposición del volumen estimado (rojo) y su proyección de sombra correspondiente (azul/cian) en cinco instantes de la tronadura.
Los resultados muestran una alta coincidencia cuando la sombra está contenida dentro de la imagen. A partir de $t = 11{,}21$ s, la degradación en el valor de $\mathrm{IoU}_{\mathrm{sombra}}$ ($0{,}67 \rightarrow 0{,}11$) refleja cuantitativamente el efecto del truncamiento por borde, justificando la decisión de pausar el incremento de altura $\hat{h}$ en el modelo.

6.3.4. Resultados de la reconstrucción visual

La Figura 6.6 muestra la escena reconstruida en el instante $t = 5{,}17$ s desde dos puntos de vista. El render desde la cámara del dron reproduce la misma perspectiva del video, con el terreno texturizado y el gas iluminado por el sol. La vista lateral usa una cámara cercana al piso para que se pueda apreciar la altura estimada de 31 m.



(a) Vista desde la cámara del dron. (b) Vista lateral.

Figura 6.6: Reconstrucción de la columna de gas en Blender en $t = 5{,}17$ s, sobre el DEM texturizado.

6.3.5. Validación sintética de la Fase 2

La simulación descrita en la Sección 5.4.6 nos entrega la altura de la nube $h^{\mathrm{sim}}(t)$, calculada sobre la región con concentración mayor a 0,8 g/m^3 como la cota máxima de dicha región.

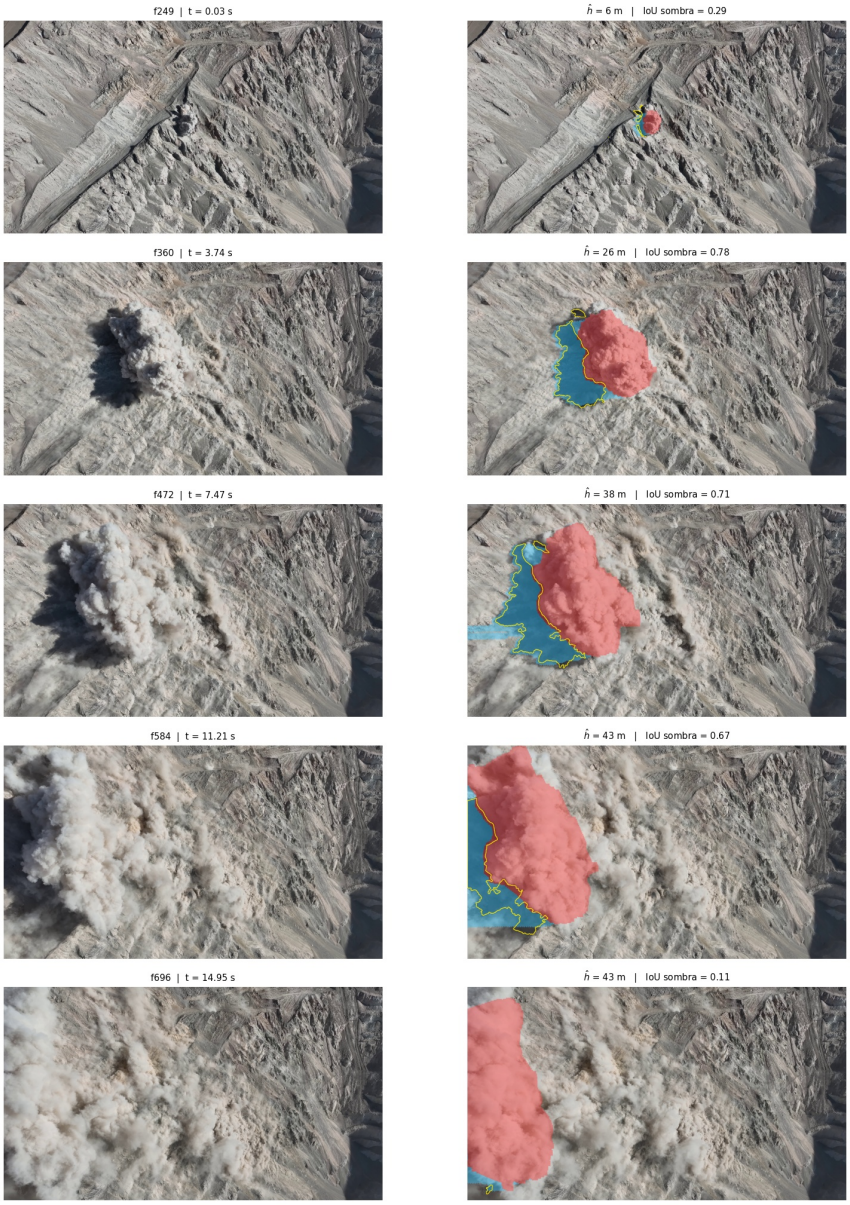


Figura 6.5: Proyección de sombra para la reconstrucción $3D$. Izquierda: fotogramas reales. Derecha: superposición de la columna reconstruida (rojo) y la proyección de su sombra (azul/cian).

Esta se compara con la altura del volumen reconstruido $h^{\mathrm{rec}}(t)$. La referencia se interpola a los instantes t_k de la reconstrucción, con $k = 1, \ldots, N$, y se define el error

$$e_k = h^{\mathrm{rec}}(t_k) - h^{\mathrm{sim}}(t_k), \tag{6.3.2}$$

a partir del cual se calculan el sesgo y el error relativo medio:

$$\bar{e} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_k, \qquad \varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \frac{|e_k|}{h^{\mathrm{sim}}(t_k)}. \tag{6.3.3}$$

Adicionalmente, se reporta la pendiente m_e de la recta ajustada por mínimos cuadrados a e_k en función de t_k, que indica si el error crece o decrece en el tiempo. El Cuadro 6.1 resume los resultados.

Cuadro 6.1: Altura del volumen reconstruido frente a la altura de la simulación, en los instantes comunes.

	Volumétrico	**Difuso**
Instantes comparados N	43	43
Sesgo $\bar{e}$ [m]	$-14{,}0$	$-18{,}8$
Error relativo medio ε	20,9 %	28,3 %
Pendiente m_e [m/s]	$-0{,}09$	$+0{,}18$
Altura máxima [m]	67,6 ($t = 6{,}35$ s)	58,7 ($t = 8{,}35$ s)

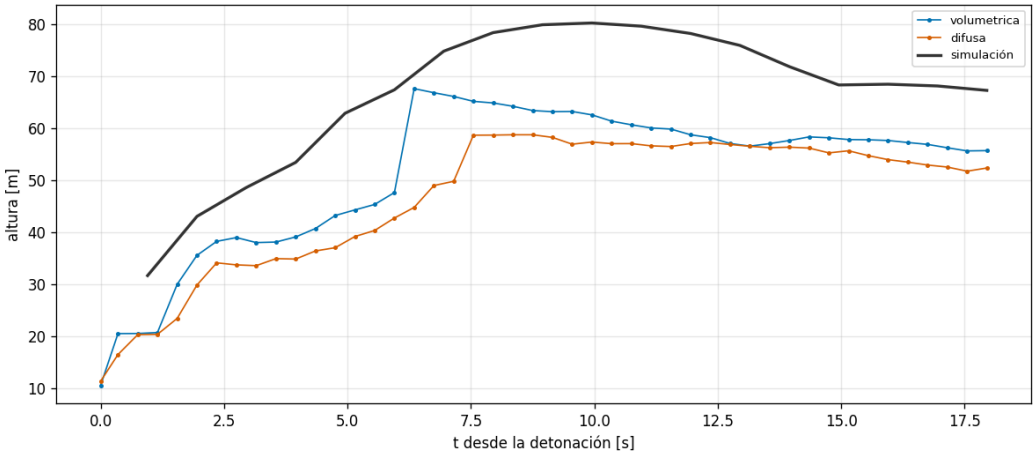


Figura 6.7: Altura del volumen reconstruido en los formatos volumétrico y difuso, junto a la altura de la simulación.

La simulación alcanza su altura máxima de 80,2 m en $t = 9{,}95$ s y luego desciende hasta 67,2 m. En ambos formatos la reconstrucción subestima la altura durante toda la ventana (Figura 6.7). Las pendientes del error son cercanas a cero ($-0{,}09$ y $+0{,}18$ m/s), es decir, el error no muestra una tendencia sostenida en el tiempo.

El error está presente desde los primeros instantes, antes de que la sombra alcance el borde de la imagen, por lo que no se explica solo por el límite del encuadre (Sección 6.3). Es consistente con dos efectos: la parte alta de la columna, de menor opacidad, proyecta una sombra débil que el detector no logra separar del terreno, y h^{sim} puede incluir gas por sobre el tope visible de la nube. Además, dado que ambos formatos comparten los mismos parámetros físicos, la diferencia de 4,8 m entre sus sesgos proviene de la representación visual de la nube. En el formato difuso, la periferia de baja opacidad queda fuera de la máscara (FN = 36,6 %, Sección 5.4.6), lo que reduce la silueta a partir de la cual se reconstruye el volumen.

Capítulo 7

FASE 3: ESTIMACIÓN DE VIENTO MEDIANTE FLUJO ÓPTICO

7.1. Formulación del problema

A partir de la secuencia de máscaras binarias M_t obtenidas en la Fase 1, esta fase tiene por objetivo estimar la velocidad y dirección del viento local que transporta la columna. El resultado final se expresa mediante dos magnitudes físicas: una **velocidad aparente** v en m/s y una **dirección de desplazamiento** α dada en grados respecto a los puntos cardinales.

Para extraer este movimiento, se analiza el campo de flujo óptico denso (introducido en la Sección 2.4)

$$\mathbf{u}_t(i,j) = [u_x(i,j),\, u_y(i,j)]^\top \in \mathbb{R}^2$$

evaluado exclusivamente sobre la región de la nube en la máscara. Sin embargo, el movimiento aparente de la columna en la imagen proyectada no responde únicamente al viento, sino a la superposición de tres componentes dinámicas:

$$\mathbf{u}_{\text{obs}}(i,j) = \mathbf{u}_{\text{adv}} + \mathbf{w}_{\text{exp}}(i,j) + \mathbf{v}_{\text{asc}}(i,j), \tag{7.1.1}$$

donde:

Advección ($\mathbf{u_{adv}}$): Transporte del material debido al viento. Es una componente espacialmente homogénea sobre la escala de la columna y constituye el término que buscamos en esta fase.

Expansión ($\mathbf{w_{exp}}$): Crecimiento radial de la nube provocado por la difusión turbulenta. Actúa de forma divergente desde el eje central de la pluma y se considerará en la fase 4 (Capítulo 8).

Ascenso ($\mathbf{v_{asc}}$): Movimiento vertical de la columna, el cual, debido a la posición de la cámara, se proyecta sobre el plano confundiéndose con desplazamiento por advección.

Dado que una sola cámara no permite desacoplar directamente estas tres componentes mediante información puramente visual, la metodología desarrollada en esta fase no busca eliminar w_{exp} y v_{asc} de forma analítica directa, sino atenuar su impacto estimando el flujo sobre un dominio restringido e identificando la dirección de máxima variabilidad mediante un análisis espectral.

7.2. Metodología

El procedimiento de estimación se estructura en seis etapas secuenciales:

1. **Ventana de estimación válida:** Tramo temporal sobre el cual se agregan los pares de cuadros. Se determina a partir de las propias mediciones de ángulos y de textura calculadas en las etapas siguientes.

2. **Cálculo del flujo denso sobre el núcleo común:** Restricción del dominio espacial a los píxeles presentes en cuadros consecutivos.

3. **Consolidación espacial del movimiento:** Reducción de todos los vectores calculados en un par de fotogramas a un único vector central $\mathbf{d}_t$. A partir de este, se extrae el ángulo de desplazamiento α_t del instante t mediante análisis de componentes principales [27].

4. **Síntesis temporal de la trayectoria:** Integración de la serie de vectores $\mathbf{d}_t$ obtenidos a lo largo del tiempo para definir una dirección representativa global $\bar{\alpha}$. En este paso también se calcula qué tanto varió la dirección entre los distintos instantes del video (dispersión $\sigma_{\bar{\alpha}}$).

5. **Proyección métrica y conversión geográfica:** Mapeo proyectivo del vector mediante el modelo de cámara de la Fase 0 para obtener la velocidad v en m/s y el ángulo en coordenadas geográficas reales.

6. **Análisis de coherencia direccional:** Mediante el ajuste de una distribución estadística para ángulos (von Mises) [35], se mide si los píxeles se desplazan en bloque dentro de cada par de cuadros (concentración κ_t). Luego, se analiza la ventana completa para verificar que el flujo tenga una dirección predominante y no sea caótico (dispersión σ_θ y control de unimodalidad).

7.2.1. Definición de la ventana de estimación válida

La estimación del viento no es válida en todos los cuadros del video. Al inicio del evento, la dinámica está dominada por el impulso inicial de la tronadura; al final del evento, la nube pierde contraste y el algoritmo de flujo óptico sesga el desplazamiento hacia cero. Por lo tanto, el inicio de la ventana $[t_{\text{inicio}}, t_{\text{fin}}]$ se define mediante el criterio de estabilización angular:

(A) Estabilización angular: La variación de los ángulos obtenidos $|\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t|$ se mantiene inferior a $5°/\mathrm{s}$ durante al menos 2 s.

Luego, el término de la ventana t_{fin} se impone como el instante más temprano, posterior a t_{inicio}, entre:

(B) Pérdida de textura interna (τ_t): Se evalúa la pérdida de contraste de la nube a medida que se disipa en el aire, definiendo τ_t como la proporción de píxeles de la máscara M_t cuyo gradiente de intensidad supera la mediana del gradiente del terreno ($\mathcal{E}_t$) que rodea a la máscara:

$$\tau_t = \frac{\left|\left\{(i,j) \in M_t : \|\nabla I_t(i,j)\| > \mathrm{med}_{(i',j')\in\mathcal{E}_t} \|\nabla I_t(i',j')\|\right\}\right|}{|M_t|}. \tag{7.2.1}$$

Un valor de $\tau_t = 0{,}50$ indica que la nube posee la misma nitidez/textura que el entorno; el proceso se interrumpe cuando τ_t, se mantiene bajo 0,30 durante al menos 2 s.

(C) Proximidad al borde de la imagen: Previene errores de truncamiento cuando la pluma comienza a salir del cuadro. La interrupción se activa mediante cualquiera de estos umbrales, sostenido durante 0,5 s:

- **Contacto directo:** Más del 2 % de los píxeles de la máscara M_t tocan el límite del encuadre.
- **Proximidad:** El percentil 5 de la distancia de los píxeles de la máscara al borde más cercano cae por debajo del 10 % de la dimensión menor de la imagen (ancho o alto).

7.2.2. Dominio de cálculo del flujo

Para cada instante t, se calcula el flujo óptico denso empleando el algoritmo de Farnebäck [21] entre el cuadro actual I_t y un cuadro previo I_{t-k}, donde $k \geq 1$ representa el desfase temporal (o *lag*).
El cómputo se restringe estrictamente al conjunto de píxeles $\mathcal{N}_t$, denominado *núcleo común*, definido por la intersección de las máscaras binarias cercanas:

$$\mathcal{N}_t = M_t \cap M_{t-k}. \tag{7.2.2}$$

Esta restricción es fundamental para la precisión física de la medida. En la región diferencia $M_t \setminus M_{t-k}$, la máscara M_t ha incorporado píxeles que en el instante $t-k$ correspondían al fondo (terreno o cielo). Calcular el flujo en dicho borde no mediría el transporte de la materia, sino la velocidad aparente con la que la frontera del segmento avanza sobre el fondo; fenómeno que identificamos previamente como expansión. Trabajar sobre $\mathcal{N}_t$ garantiza que la estimación del flujo óptico se realice exclusivamente entre píxeles que pertenecen a la nube en ambos instantes.
En la implementación operacional se aplican dos consideraciones técnicas sobre este dominio:

- **Verificación de continuidad temporal:** Se valida que el salto entre los dos cuadros de cada par no supere un máximo admisible de 3 cuadros. Los pares que lo superan se descartan y se contabilizan; los admitidos se normalizan por el salto efectivamente medido, de modo que el desplazamiento reportado corresponda siempre a $\Delta t = k/f_{\text{fps}}$.

- **Escala espacial:** El cálculo del flujo se realiza en la misma resolución reducida utilizada en la Fase 1 para optimizar el costo computacional.

7.2.3. Consolidación espacial del campo vectorial

El cómputo de la etapa anterior produce un campo de vectores velocidad $\{\mathbf{u}_t(i,j)\}_{(i,j)\in\mathcal{N}_t}$. Para reducir este conjunto a un vector representativo $\mathbf{d}_t$ por par de cuadros, debe seleccionarse un operador estadísticamente robusto.
Se descarta calcular la mediana componente a componente, $\tilde{\mathbf{u}}_t = [\text{med}(u_x), \text{med}(u_y)]^\top$, porque este cálculo depende directamente de la orientación de los ejes de la cámara. Si el sensor se rotara, las medianas de u_x y u_y cambiarían, alterando artificialmente el ángulo del viento estimado. Se requiere, por lo tanto, un método cuya dirección sea independiente de la rotación de la imagen. Para ello, se adopta un procedimiento basado en la estructura espectral de la matriz de covarianza.

Paso 1: Identificación de la dirección dominante ($\hat{\mathbf{e}}_t$)

Para identificar la dirección principal del movimiento de forma independiente a la orientación de la cámara, se analiza la estructura espacial del campo de velocidades. En lugar de promediar las componentes de manera aislada, se busca el "eje principal" a lo largo del cual se agrupa la mayor parte del desplazamiento.
Sea $\bar{\mathbf{u}}_t$ el vector velocidad promedio sobre el núcleo común de área $|\mathcal{N}_t|$:

$$\bar{\mathbf{u}}_t = \frac{1}{|\mathcal{N}_t|} \sum_{(i,j)\in\mathcal{N}_t} \mathbf{u}_t(i,j). \tag{7.2.3}$$

Se define la matriz de covarianza muestral del campo de velocidades $\mathbf{C}_t \in \mathbb{R}^{2\times 2}$ como:

$$\mathbf{C}_t = \frac{1}{|\mathcal{N}_t| - 1} \sum_{(i,j)\in\mathcal{N}_t} \big(\mathbf{u}_t(i,j) - \bar{\mathbf{u}}_t\big)\big(\mathbf{u}_t(i,j) - \bar{\mathbf{u}}_t\big)^\top. \tag{7.2.4}$$

Luego se define la dirección dominante del flujo $\hat{\mathbf{e}}_t$ como el autovector unitario de $\mathbf{C}_t$ asociado a su máximo autovalor $\lambda_{\text{máx}}$:

$$\mathbf{C}_t\hat{\mathbf{e}}_t = \lambda_{\text{máx}}\hat{\mathbf{e}}_t, \qquad \text{con } \|\hat{\mathbf{e}}_t\| = 1. \tag{7.2.5}$$

De forma equivalente, $\hat{\mathbf{e}}_t$ resuelve el problema de optimización:

$$\hat{\mathbf{e}}_t = \arg\max_{\|\mathbf{e}\|=1} \mathbf{e}^\top \mathbf{C}_t \mathbf{e}. \tag{7.2.6}$$

Para resolver la ambigüedad de signo en la descomposición de autovectores ($\pm\hat{\mathbf{e}}_t$), se impone la condición de orientarlo en el mismo sentido del transporte medio:

$$\text{Si } \bar{\mathbf{u}}_t \cdot \hat{\mathbf{e}}_t < 0 \implies \hat{\mathbf{e}}_t \leftarrow -\hat{\mathbf{e}}_t. \tag{7.2.7}$$

Paso 2: Proyección escalar y filtrado de expansión

Una vez obtenida la dirección principal $\hat{\mathbf{e}}_t$, se proyecta cada vector del campo sobre este eje. Descomponiendo $\mathbf{u}_t(i,j) = \mathbf{a}_t + \mathbf{w}_t(i,j)$, donde $\mathbf{a}_t$ representa el componente advectivo espacialmente constante y $\mathbf{w}_t(i,j)$ las fluctuaciones locales causadas por la expansión turbulenta:

$$q_t(i,j) = \mathbf{u}_t(i,j) \cdot \hat{\mathbf{e}}_t = (\mathbf{a}_t \cdot \hat{\mathbf{e}}_t) + (\mathbf{w}_t(i,j) \cdot \hat{\mathbf{e}}_t). \tag{7.2.8}$$

Cualquier componente de la expansión $\mathbf{w}_t$ ortogonal a la dirección principal $\hat{\mathbf{e}}_t$ se anula algebraicamente mediante este producto escalar.

Paso 3: Estimación del desplazamiento y ángulo

Sobre el conjunto de proyecciones escalares $\{q_t(i,j)\}_{(i,j)\in\mathcal{N}_t}$ se aplica el operador mediana para obtener una magnitud de desplazamiento escalar $\tilde{q}_t$ resistente a valores atípicos:

$$\tilde{q}_t = \text{med}_{(i,j)\in\mathcal{N}_t}\, q_t(i,j). \tag{7.2.9}$$

Pero debido a la equivarianza de la mediana frente a traslaciones, al aplicar la mediana sobre la Ecuación (7.2.8) se obtiene:

$$\tilde{q}_t = \mathbf{a}_t \cdot \hat{\mathbf{e}}_t + \varepsilon_t, \qquad \text{donde } \varepsilon_t = \text{med}_{(i,j)\in\mathcal{N}_t}\big(\mathbf{w}_t(i,j)\cdot\hat{\mathbf{e}}_t\big). \tag{7.2.10}$$

El término ε_t representa el sesgo inducido por la expansión sobre el eje principal. Si la expansión fuese perfectamente simétrica respecto al eje de la pluma, se tendría $\varepsilon_t = 0$. Sin embargo, debido a que el propio estiramiento de la columna es impulsado por la advección del viento, la distribución de la velocidad en la dirección $\hat{\mathbf{e}}_t$ presenta una asimetría que se traduce en $\varepsilon_t \neq 0$.

Entonces el vector de desplazamiento resultante $\mathbf{d}_t$ en el plano de la imagen (escalado por el número de cuadros de diferencia k) y su correspondiente ángulo de orientación α_t quedan definidos por:

$$\mathbf{d}_t = \frac{\tilde{q}_t}{k}\,\hat{\mathbf{e}}_t, \qquad \alpha_t = \text{atan2}(d_{t,y},\, d_{t,x})\,, \tag{7.2.11}$$

donde α_t se mide en sentido horario desde el eje x de la imagen. Dado que el sistema de coordenadas del sensor establece la dirección del eje y positivo hacia abajo, este ángulo requiere la transformación analizada en la Sección 7.2.5.

Antes de cualquier agregación temporal, ambas series se suavizan: el ángulo α_t mediante promedios circulares sobre ventanas de 9 y 15 pares, y la magnitud $\|\mathbf{d}_t\|$ mediante una media móvil de 15 pares. El suavizado no desplaza la dirección media de la ventana, pero sí reduce la dispersión $\sigma_{\bar{\alpha}}$ definida más adelante, que debe leerse como la estabilidad de la serie ya suavizada y no como una dispersión directa a los α_t.

7.2.4. Agregación temporal sobre la ventana de observación

El procesamiento de una secuencia de cuadros genera una serie temporal de n estimaciones $\{(\mathbf{d}_t, \alpha_t)\}_{t=1}^{n}$ dentro de la ventana válida. Para resumir los ángulos α_t en una única dirección representativa $\bar{\alpha}$, no es posible utilizar la media aritmética común debido a la discontinuidad angular entre 0 y 2π radianes ($0°/360°$). Por ejemplo, el promedio aritmético entre 350° y 10° resultaría erróneamente en 180°.

Para resolver esto, se utiliza la media circular [35] expresando cada ángulo como un vector

unitario en el plano complejo, ponderado por la rapidez instantánea v_t del par correspondiente:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{t=1}^{n} v_t \cos\alpha_t}{\sum_{t=1}^{n} v_t}, \qquad \bar{S} = \frac{\sum_{t=1}^{n} v_t \sin\alpha_t}{\sum_{t=1}^{n} v_t}, \tag{7.2.12}$$

$$\bar{\alpha} = \operatorname{atan2}\left(\bar{S},\ \bar{C}\right). \tag{7.2.13}$$

La ponderación por v_t evita que los pares de menor desplazamiento, cuya dirección está menos determinada, pesen lo mismo que aquellos en que la columna efectivamente avanza. La longitud del vector resultante medio R se calcula como:

$$R = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2} \in [0, 1]. \tag{7.2.14}$$

El valor de R cuantifica la concentración de la distribución angular: $R \to 1$ indica una concentración perfecta, es decir, todos los ángulos apuntan hacia la misma dirección, mientras que $R \to 0$ representa una dispersión perfecta, es decir, una distribución uniforme alrededor del círculo. A partir de R, se calcula la desviación estándar angular de Mardia $\sigma_{\bar{\alpha}}$ [35]:

$$\sigma_{\bar{\alpha}} = \sqrt{-2\ln R} \ \text{(en radianes)}, \tag{7.2.15}$$

la cual se convierte a grados para contrastar con los datos de estaciones más adelante.
Por otro lado, la velocidad se agrega de forma independiente. Tras proyectar métricamente cada vector (Sección 7.2.5) para obtener las velocidades instantáneas v_t en m/s, la velocidad representativa del evento $\bar{v}$ se calcula como el promedio sobre la ventana:

$$\bar{v} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} v_t. \tag{7.2.16}$$

El decaimiento de la rapidez aparente asociado a la dilución de la nube ocurre fuera de la ventana (Sección 7.2.1); dentro de ella la serie v_t es suficientemente estable como para simplemente tomar el promedio.

7.2.5. Conversión a unidades métricas y azimut geográfico

Las imágenes se obtienen bajo una perspectiva oblicua (con el eje óptico inclinado respecto al nadir). Esto provoca que la escala espacial o *Ground Sample Distance* (GSD) no sea uniforme, variando entre la parte inferior y superior de una misma toma. Por lo tanto, no es posible convertir los desplazamientos en píxeles a metros mediante un factor global constante.
Para transformar las coordenadas de la imagen a unidades métricas UTM, se utiliza el modelo de cámara calibrado en la Fase 0 mediante la función de retroproyección $\pi_h(\mathbf{p})$. Esta función mapea un píxel $\mathbf{p} = [x, y]^\top$ calculando la intersección de su rayo óptico con el plano

horizontal de advección $z = h$:

$$\pi_h(\mathbf{p}) = \mathbf{C} + \frac{h - C_z}{d_z(\mathbf{p})}\,\mathbf{d}(\mathbf{p}), \tag{7.2.17}$$

donde:

- $\mathbf{C} = [C_x, C_y, C_z]^\top$ es la posición 3D del centro óptico de la cámara.
- $\mathbf{d}(\mathbf{p}) = [d_x, d_y, d_z]^\top$ es el vector del rayo óptico expresado en el sistema geográfico.

La altura h no es un valor fijo: se toma desde el centroide de la reconstrucción en la Fase 2 (Capítulo 6), interpolado a cada par de cuadros.

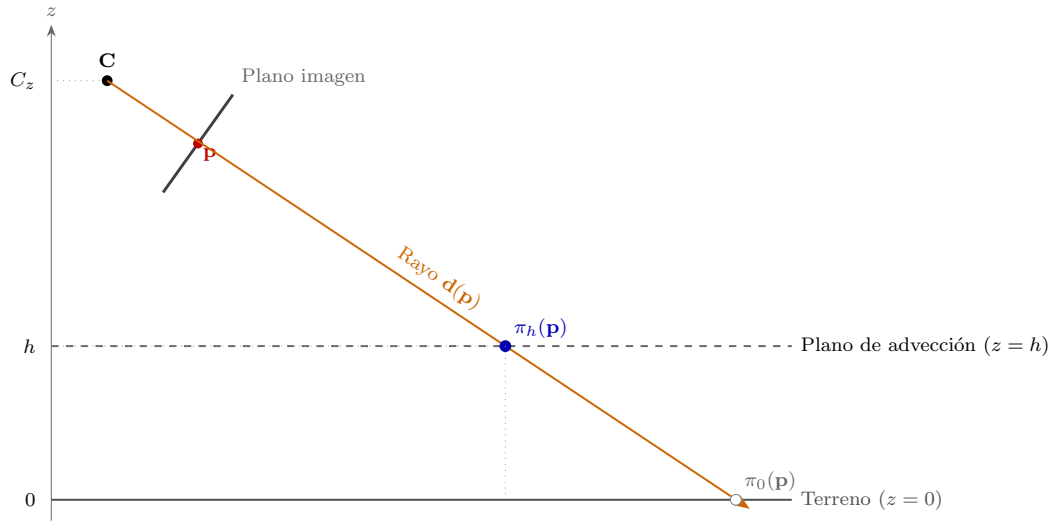


Figura 7.1: Esquema geométrico de la retroproyección.

Mapeo local mediante sonda vectorial

Debido a la perspectiva, la escala espacial y la orientación cambian en cada zona de la imagen. Por ello, la conversión a metros no puede aplicarse de forma global, sino que debe evaluarse de manera local en el centroide de la nube $\mathbf{p}_t = \text{centroide}(M_t)$.
Para determinar la conversión exacta en esa región, se evalúa un pequeño desplazamiento de prueba (sonda) a lo largo de la dirección del flujo $\hat{\mathbf{r}}_t = [\cos\alpha_t,\ \sin\alpha_t]^\top$. Al avanzar una distancia fija $L = 5$ px y retroproyectar ambos extremos al plano de advección $z = h$, se obtiene el vector de desplazamiento $\boldsymbol{\delta}_t$:

$$\boldsymbol{\delta}_t = \pi_h(\mathbf{p}_t + L\,\hat{\mathbf{r}}_t) - \pi_h(\mathbf{p}_t) = \begin{bmatrix} \delta_E \\ \delta_N \end{bmatrix}, \tag{7.2.18}$$

donde δ_E y δ_N corresponden a las componentes métricas en las coordenadas UTM Este y Norte.
A partir de $\boldsymbol{\delta}_t$ se derivan directamente la escala espacial local g_t (en metros por píxel nativo), la rapidez métrica v_t y el azimut geográfico:

$$g_t = \frac{\|\boldsymbol{\delta}_t\|}{L}\, s, \qquad v_t = g_t\, v_t^{\mathrm{px}}, \qquad \mathrm{azimut}_t = \mathrm{atan2}(\delta_E,\, \delta_N)\,, \tag{7.2.19}$$

donde s representa el factor de rescalado de la imagen y v_t^{px} es la rapidez en píxeles por segundo. Al ingresar la componente Este (δ_E) en el primer argumento de atan2, el ángulo resultante se mide en sentido horario tomando el Norte geográfico como referencia (0°).

Invariancia de la dirección respecto a la altura de advección

El cálculo de la rapidez v_t exige fijar la altitud h del plano de advección. Esa elección afecta la magnitud de la velocidad, pero no su orientación: el ángulo estimado es **independiente de la altura supuesta**, como ilustra la Figura 7.2.
Para dos alturas arbitrarias h_1 y h_2, la Ecuación (7.2.17) implica

$$\pi_{h_2}(\mathbf{p}) - \mathbf{c} = \eta\,(\pi_{h_1}(\mathbf{p}) - \mathbf{c})\,, \qquad \text{con } \eta = \frac{h_2 - C_z}{h_1 - C_z} > 0, \tag{7.2.20}$$

donde $\mathbf{c} = [C_x, C_y]^\top$ es la posición de la cámara proyectada sobre el terreno. Es decir, cambiar la cota del plano equivale a aplicar una homotecia de razón η centrada en $\mathbf{c}$. Y como toda homotecia de razón positiva escala los módulos y preserva la orientación, tenemos que

$$\boldsymbol{\delta}_t(h_2) = \eta\, \boldsymbol{\delta}_t(h_1) \implies \mathrm{azimut}_t(h_2) = \mathrm{azimut}_t(h_1), \tag{7.2.21}$$

con azimut_t definido en la Ecuación (7.2.19). Un error en la altura estimada de la pluma altera entonces la rapidez de forma proporcional a η, y deja el ángulo intacto.

7.2.6. Convenciones de reporte

Con el fin de mantener la consistencia con los datos meteorológicos, aplicamos las siguientes convenciones para exponer los resultados:

- **Azimut HACIA ($\bar{\alpha}_{\mathbf{hacia}}$):** Dirección a la cual se dirige la columna de gas, medida en grados sexagesimales de 0° a 360° en sentido horario ($N \sim 0°$). Esta es la variable que obtenemos desde el flujo óptico.
- **Azimut DESDE ($\bar{\alpha}_{\mathbf{desde}}$):** Dirección desde donde viene el viento. Se obtiene mediante la transformación:

$$\bar{\alpha}_{\mathrm{desde}} = (\bar{\alpha}_{\mathrm{hacia}} + 180°) \bmod 360°. \tag{7.2.22}$$

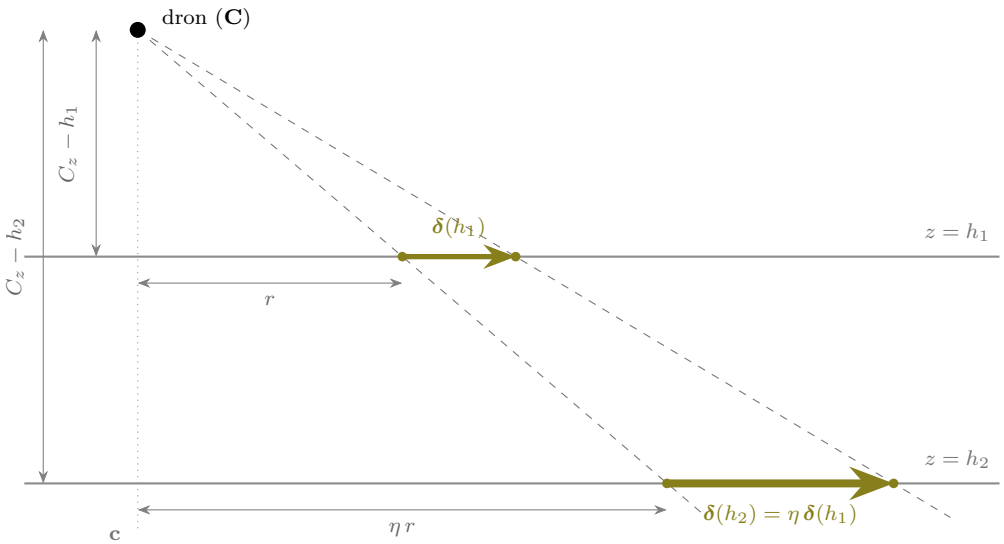


Figura 7.2: Invariancia del azimut respecto de la altura supuesta con $\eta = 2$.

Esta es la cantidad utilizada para validar los resultados frente a las estaciones meteorológicas.

- **Incertidumbre:** Toda dirección estimada se presenta en la forma $\bar{\alpha} \pm \sigma_{\bar{\alpha}}$.

7.2.7. Reconstrucción de la trayectoria del centroide

De manera complementaria a la estimación del campo de velocidades, se reconstruye la trayectoria global de la pluma registrando la posición espacial del centroide de M_t a lo largo del tiempo. El centroide se calcula en cada instante como el promedio de las coordenadas de los píxeles de la máscara segmentada M_t.
Además, al ser una construcción independiente evita la propagación de errores pasados y la trayectoria del centroide sirve como validación cualitativa de la dirección $\bar{\alpha}$ obtenida.

7.2.8. Degeneración geométrica de la vista monocular

Como se estableció al plantear las limitaciones del problema, la perspectiva de una única cámara representa la principal restricción física del sistema. La degeneración ocurre cuando la proyección del ascenso vertical de la columna coincide con la dirección del viento sobre la imagen 2D, volviendo ambas dinámicas prácticamente indistinguibles.
Para detectar esta condición, se toma el centroide de cada par, se lo lleva al plano de advección, se lo desplaza un metro en vertical y se lo reproyecta a la imagen, obteniendo la dirección teórica del ascenso puro $\alpha_{\uparrow}$ en el plano imagen. La separación respecto a la dirección medida en ese mismo plano, $\bar{\alpha}_{\text{img}}$, se calcula como la diferencia circular:

$$\delta_{\uparrow} = \text{mín}\big(|\bar{\alpha}_{\text{img}} - \alpha_{\uparrow}|\,,\; 360^{\circ} - |\bar{\alpha}_{\text{img}} - \alpha_{\uparrow}| \big). \tag{7.2.23}$$

Si $\delta_{\uparrow} < 45^{\circ}$, el ascenso y el movimiento se proyectan sobre direcciones similares y se marca una alerta para la estimación que se obtiene. El problema surge porque el ascenso vertical contamina el autovector principal $\hat{\mathbf{e}}_t$ y afecta la magnitud medida. En el video analizado se obtiene $\delta_{\uparrow} = 71{,}6^{\circ}$ ($\bar{\alpha}_{\text{img}} = 171{,}8^{\circ}$ frente a $\alpha_{\uparrow} = 243{,}4^{\circ}$), de modo que la proyección sobre $\hat{\mathbf{e}}_t$ suprime el ascenso.

7.2.9. Análisis de coherencia direccional y distribución angular

Para evaluar la uniformidad del movimiento de la nube, se analiza la dirección individual de cada píxel. A diferencia de la consolidación espacial, aquí cada píxel se trata como un vector unitario con exactamente el mismo peso, lo que permite evaluar estadísticamente si el flujo se desplaza en bloque o de forma caótica.
Sea $\mathcal{N}_t$ el núcleo común del par t (Ecuación (7.2.2)) y $\mathbf{u}_t(p)$ el vector de flujo en el píxel $p = (i, j) \in \mathcal{N}_t$. Cada píxel con un desplazamiento no nulo ($\|\mathbf{u}_t(p)\| > 0$) aporta una dirección

angular en el plano de imagen:

$$\theta_t(p) = \operatorname{atan2}\big(u_{t,y}(p),\, u_{t,x}(p)\big), \qquad \theta_t(p) \in [-\pi, \pi). \tag{7.2.24}$$

Para modelar estadísticamente estas direcciones y encontrar su tendencia central, se ajusta una distribución de von Mises. Este modelo es el equivalente circular de la distribución normal y permite resolver la discontinuidad en los ángulos. Su función de densidad está dada por:

$$f(\theta \mid \mu, \kappa) = \frac{\exp\big(\kappa \cos(\theta - \mu)\big)}{2\pi I_0(\kappa)}, \tag{7.2.25}$$

donde μ representa la dirección media, $\kappa \geq 0$ es la concentración angular e I_0 la función de Bessel modificada de orden cero.
Los parámetros de esta distribución se estiman a partir de la resultante media $\bar{R}_t$ del conjunto de píxeles de $\mathcal{N}_t$. Calculando los promedios de las componentes espaciales:

$$\mathcal{C}_t = \frac{1}{|\mathcal{N}_t|} \sum_{p \in \mathcal{N}_t} \cos\theta_t(p), \qquad \mathcal{S}_t = \frac{1}{|\mathcal{N}_t|} \sum_{p \in \mathcal{N}_t} \sin\theta_t(p), \qquad \bar{R}_t = \sqrt{\mathcal{C}_t^2 + \mathcal{S}_t^2}, \tag{7.2.26}$$

se obtienen directamente la dirección media y la concentración, siendo la longitud $\bar{R}_t$ un estadístico suficiente para κ [7, 35]:

$$\hat{\mu}_t = \operatorname{atan2}(\mathcal{S}_t, \mathcal{C}_t), \qquad \hat{\kappa}_t = \frac{\bar{R}_t\,(2 - \bar{R}_t^2)}{1 - \bar{R}_t^2}. \tag{7.2.27}$$

Físicamente, $\hat{\kappa}_t$ evalúa la coherencia del flujo: valores altos indican un desplazamiento en bloque y valores bajos señalan un movimiento caótico o ruidoso. Para flujos estables ($\hat{\kappa}_t \geq 4$), la desviación angular se aproxima a $\sigma_\theta \approx \hat{\kappa}_t^{-1/2}$. Finalmente, las métricas globales de toda la secuencia (μ, $\bar{R}$ y σ_θ) se estiman mediante un ajuste único sobre submuestras aleatorias de 200 direcciones extraídas por pares de fotogramas, con semilla fija. El ajuste se realiza en el plano imagen y luego se gira para su presentación en azimut geográfico, sin alterar $\bar{R}$ ni κ.

Control de unimodalidad

El modelo de von Mises presupone que el flujo tiene una única dirección predominante (distribución unimodal). Para prevenir este sesgo, se aplica una alerta de unimodalidad mediante una estimación de densidad por núcleo circular [35]. El algoritmo identifica los dos máximos locales principales, ubicados en θ_1 y θ_2 con alturas $m_1 \geq m_2$, mide su separación angular Δ, y evalúa la profundidad relativa del valle que los separa:

$$\begin{aligned} \text{dip} &= 1 - \frac{\text{mín}_{\theta\in[\theta_1,\theta_2]}\,\hat{f}(\theta)}{m_2}, \\ \Delta &= \text{mín}(|\theta_2-\theta_1|,\ 360^\circ - |\theta_2-\theta_1|). \end{aligned} \tag{7.2.28}$$

Si la separación $\Delta > 15^\circ$, la proporción $m_2/m_1 > 0{,}25$ y la profundidad del valle dip $> 0{,}30$ se cumplen simultáneamente, la estimación direccional de este ajuste se marca como no confiable.

7.3. Resultados

7.3.1. Campo de flujo sobre la columna

La Figura 7.3 presenta el campo de flujo denso calculado sobre el núcleo común de fotogramas consecutivos. Se destaca la máscara proveniente de la Fase 1 (rojo), los vectores individuales del campo (verde) y el vector central consolidado $\mathbf{d}_t$ (amarillo).

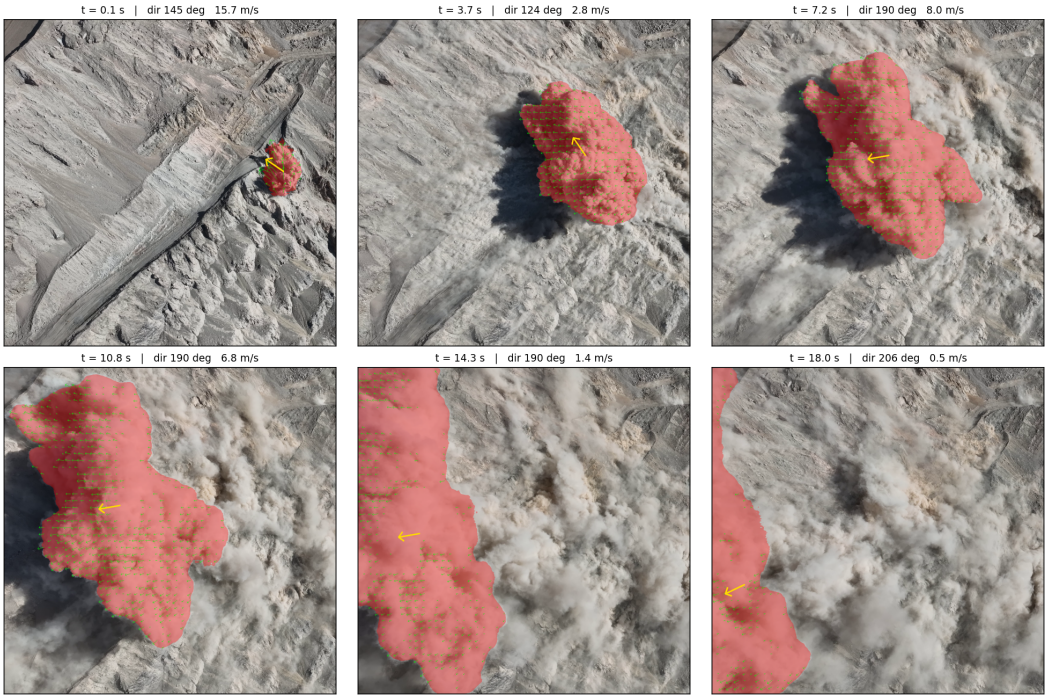


Figura 7.3: Campo de flujo óptico sobre la columna de gas en seis instantes de la secuencia. El tiempo se mide desde la detonación.

Visualmente, la cinemática de la nube atraviesa tres zonas. En el instante inicial ($t = 0{,}1$ s), la nube es compacta y su rapidez aparente alcanza valores altos, dominada por la expansión explosiva. Posteriormente, entre $t = 3{,}7$ s y $t = 7{,}2$ s, la dirección del movimiento se estabiliza mientras la nube crece, reflejando el transporte neto. Finalmente, a partir de $t \approx 14$ s, la columna satura gran parte del cuadro y pierde su estructura interna; esto provoca que el algoritmo sesgue el desplazamiento y la rapidez aparente decaiga drásticamente, a pesar de que el volumen de gas continúa avanzando.

7.3.2. Serie temporal y ventana de viento establecido

La evolución cinemática y los criterios temporales de análisis se detallan en la Figura 7.4.

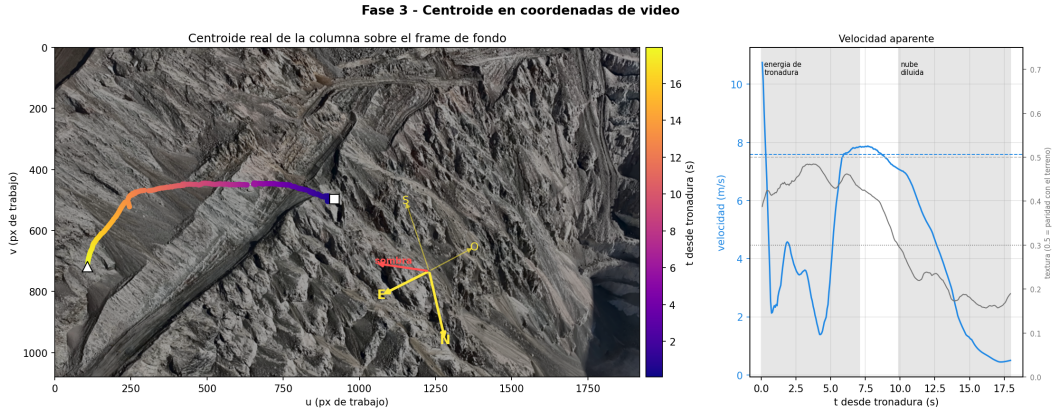


Figura 7.4: Izquierda: Trayectoria del centroide sobre el cuadro de fondo. Derecha: rapidez aparente y métrica de textura.

El panel izquierdo muestra la trayectoria espacial del centroide coloreada por su tiempo de evolución, desde la detonación (cuadrado) hasta el final de la secuencia (triángulo). El panel derecho contrasta la velocidad aparente (azul) con la métrica de textura de la nube (gris), donde la línea punteada en azul señala la velocidad promedio y en gris el umbral de 0,5 correspondiente al nivel del fondo.

La ventana de viento establecido queda fijada en el intervalo $t \in [7{,}1;\ 9{,}9]$ s, abarcando 43 pares de fotogramas. El límite inferior obedece al criterio de estabilización direccional, mientras que el superior es dictaminado por la pérdida de textura: la curva gris cruza el umbral de detención (0,30) en $t = 9{,}9$ s, anticipándose ligeramente al criterio de proximidad al borde que se habría activado en $t = 10{,}3$ s. El decaimiento de la rapidez aparente posterior a este corte acompaña de forma coherente a la pérdida de textura de la máscara.

7.3.3. Concentración angular del campo

La Figura 7.5 consolida 8 600 direcciones individuales del campo (200 vectores por cada uno de los 43 pares temporales válidos), junto al modelo de von Mises ajustado a la muestra.

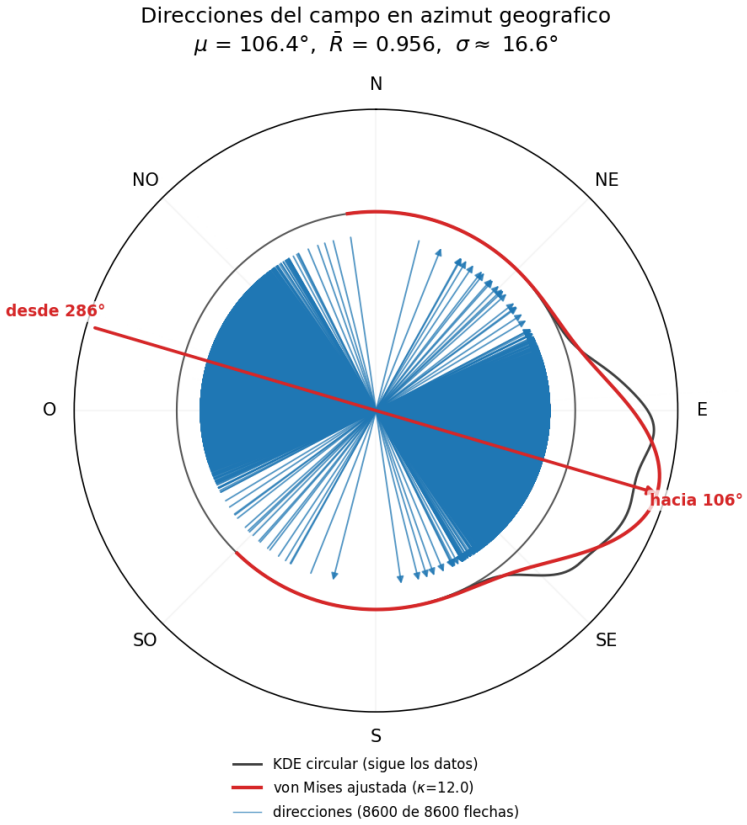


Figura 7.5: Distribución angular del campo de flujo óptico. Cada flecha azul es una dirección individual; en rojo, la distribución ajustada y su dirección media; en gris, la estimación de densidad por núcleo circular.

El ajuste estadístico entrega una dirección media $\mu = 106{,}4°$, una resultante $\bar{R} = 0{,}956$ y una concentración $\kappa = 12{,}0$, equivalente a una dispersión $\sigma_\theta \approx 16{,}6°$. El control de unimodalidad no activó alertas. Aunque la estimación de la densidad muestra pequeñas fluctuaciones (dos lomos suaves), la distribución de von Mises logra describir la posición de la dirección media. Es fundamental distinguir el alcance físico de las dispersiones calculadas. El valor $\sigma_\theta = 16{,}6°$ cuantifica la variabilidad angular *interna* entre los píxeles del núcleo común agrupados en el ajuste, caracterizando la textura y turbulencia espacial de la nube. Por el contrario, la dispersión $\sigma_{\bar{\alpha}} = 0{,}6°$ (reportada posteriormente) evalúa la variación *temporal* de los azimutes instantáneos ya consolidados por componentes principales y suavizados. La primera

caracteriza la estructura interna del campo de flujo, mientras que la segunda valida la altísima estabilidad de la dirección final estimada a lo largo del tiempo.

7.3.4. Resultado georreferenciado

Al proyectar la cinemática de la imagen hacia el espacio topográfico, la Figura 7.6 contextualiza el vector de desplazamiento sobre la faena.

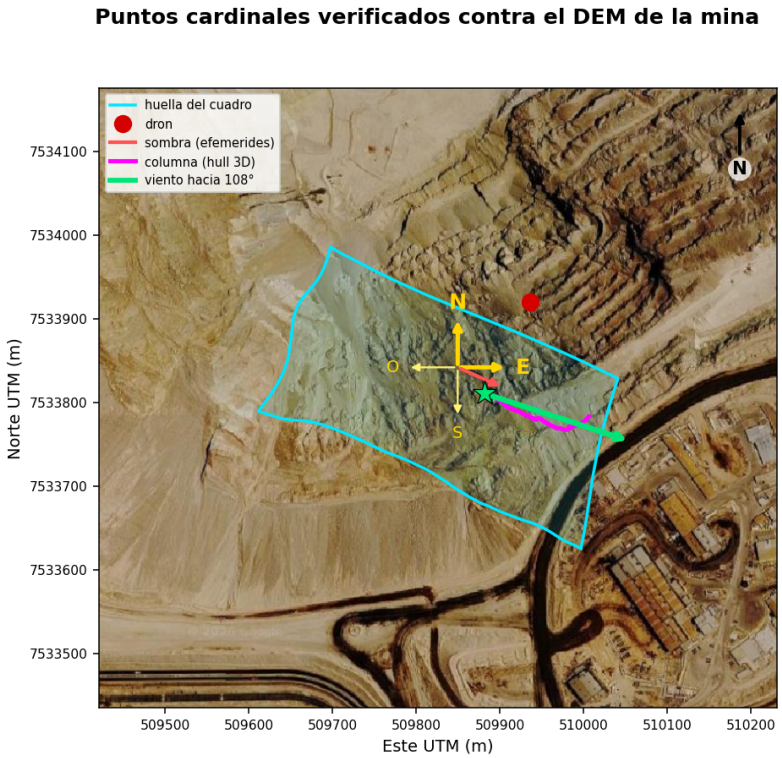


Figura 7.6: Vista en planta sobre la georreferencia, en coordenadas UTM.

En esta se identifica la huella del cuadro sobre el terreno (cian), la posición del dron y la sombra (rojo), la traza proyectada de la columna (rosa), y la dirección media del viento (verde) en contraste con los puntos cardinales (amarillo). La dirección media del viento en la ventana resulta en "$\bar{\alpha} = 108{,}1°$ hacia", lo que equivale a "288,1° desde". Su rapidez se estima en 6,8 m/s, calculada sobre un plano de advección situado a una altitud promedio de 22 m respecto al nivel del piso dentro de la ventana de viento establecido. Esta cota no es constante: corresponde al centroide del volumen reconstruido en la Fase 2.

7.3.5. Contraste con estaciones meteorológicas

Para validar externamente la medición, la Figura 7.7 y el Cuadro 7.1 comparan la estimación óptica con los registros de las dos estaciones meteorológicas seleccionadas.

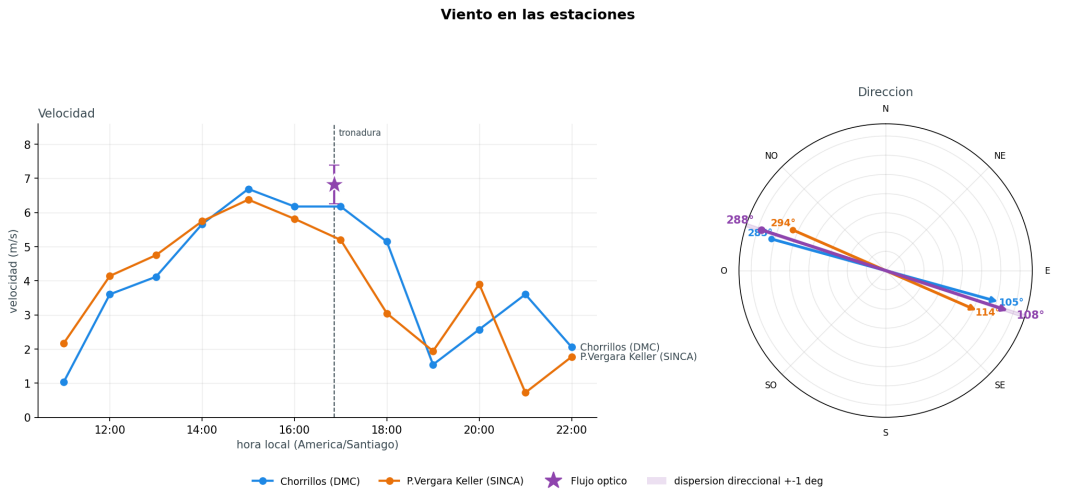


Figura 7.7: Izquierda: rapidez horaria registrada por las estaciones y estimación óptica (estrella) con barra de incertidumbre por altura. Derecha: vector de direcciones al instante del evento.

Cuadro 7.1: Contraste con las estaciones al instante del evento.

Fuente	Dirección desde	Rapidez
Flujo óptico	288,1°	6,8 m/s
Chorrillos (DMC)	285,5°	6,2 m/s
P. Vergara Keller (SINCA)	293,6°	5,3 m/s

La estimación obtenida para la dirección se posiciona entre ambas estaciones, presentando variaciones de 3° y 6° respectivamente.

Estas ligeras variaciones están físicamente justificadas por la posición, la topografía y las cotas de medición. Pues, estos instrumentos operan a una altura de 10 m sobre el suelo, cerca de 16 km al sur del pivote y unos 500 m por debajo de su cota (Sección 3).

Finalmente, se consigue una pequeña diferencia de 1,7° entre la dirección media angular puramente estadística ($\mu = 106{,}4°$) y la dirección obtenida por componentes principales ($\bar{\alpha} = 108{,}1°$). Dado que el primer modelo trata cada vector como unitario y promedia todos los pares por igual, mientras que el segundo extrae el eje principal proyectando el transporte. Esta sutil variación demuestra que ambos acercamientos matemáticos convergen a un mismo

comportamiento físico.

7.3.6. Validación sintética de la Fase 3

La simulación descrita en la Sección 5.4.6 se generó a partir de una medición de viento de componentes $(u_E,\, u_N) = (4{,}89,\ -2{,}60)$ m/s, ajustada al terreno mediante HDWind. Esto corresponde a una rapidez

$$U^{\mathrm{sim}} = \sqrt{u_E^2 + u_N^2} = 5{,}54 \text{ m/s} \tag{7.3.1}$$

y con una dirección "hacia" 118°, es decir, $\bar{\alpha}^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{desde}} = 298°$. Los formatos volumétrico y difuso comparten estos parámetros.

Se compara la ventana de viento establecido que entrega la Fase 3, mediante el error relativo de la rapidez y la diferencia circular de la dirección:

$$e_U = \frac{\bar{v}}{U^{\mathrm{sim}}} - 1, \qquad e_\alpha = \left[\left(\bar{\alpha}_{\mathrm{desde}} - \bar{\alpha}^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{desde}} + 180°\right) \bmod 360°\right] - 180°. \tag{7.3.2}$$

Adicionalmente, se reporta la dirección de la trayectoria del centroide (Sección 7.2.7). El Cuadro 7.2 resume los resultados.

Cuadro 7.2: Viento estimado por la Fase 3 frente a simulación ($U^{\mathrm{sim}} = 5{,}54$ m/s, $\bar{\alpha}^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{desde}} = 298°$).

	Volumétrico	**Difuso**
Ventana de viento establecido [s]	0,05 – 3,55	0,05 – 0,35
Rapidez $\bar{v}$ [m/s]	0,52	0,50
Error e_U	−90,5 %	−91,0 %
Dirección $\bar{\alpha}_{\mathrm{desde}}$ (flujo óptico)	359,3°	13,7°
Error e_α (flujo óptico)	+61,3°	+75,7°
Dirección $\bar{\alpha}_{\mathrm{desde}}$ (centroide)	297,5°	297,9°
Error e_α (centroide)	−0,5°	−0,1°

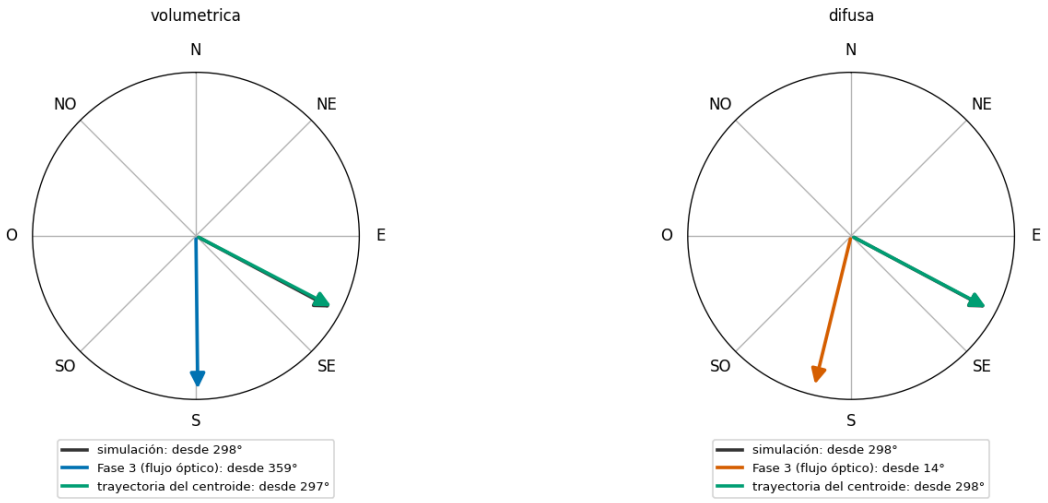


Figura 7.8: Dirección del viento de la simulación, de la Fase 3 y de la trayectoria del centroide en los formatos volumétrico (izquierda) y difuso (derecha). Las flechas apuntan hacia donde se desplaza la nube.

La Fase 3 subestima la rapidez en un 90 % y 91 % y su dirección se desvía entre 61° y 76° en los formatos volumétrico y difuso, respectivamente. El flujo óptico requiere variaciones de intensidad dentro de la columna que puedan seguirse entre cuadros. El render representa el gas como un medio sin estructura interna, por lo que el desplazamiento medido entre pares es inferior a un píxel (0,111 px/par en el formato volumétrico y 0,103 px/par en el difuso). En el formato difuso, el criterio de estabilización angular (A) no se cumple y el de pérdida de textura (B) se activa a los 0,35 s (Sección 7.2.1). Por lo tanto, la ventana se reduce a 0,05–0,35 s y los valores del formato difuso en el Cuadro 7.2 provienen de solo cuatro pares de cuadros, por lo que no representan un régimen de viento establecido.
El método de seguir la trayectoria del centroide, en cambio, recupera la dirección de la simulación con un error menor a 1° en ambos formatos (Figura 7.8).
En consecuencia, esta validación sintética no permite evaluar la estimación de rapidez de la Fase 3: su falla se debe a la ausencia de una textura dinámica en la nube simulada, es decir, de estructuras de intensidad que se desplacen junto con el gas.

Capítulo 8

FASE 4: ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

8.1. Formulación del problema

Las fases anteriores entregan la geometría, cinemática y desplazamiento de la nube (Fases 1, 2 y 3). El objetivo de esta fase es usar esa información para conseguir una estimación de la concentración de material particulado.

Una de las limitaciones del problema era la ausencia de mediciones internas, aquí nos encontramos con que no tenemos la masa inicial Q emitida en la detonación y que tampoco se puede medir desde el registro del video. En consecuencia, la ecuación de advección-difusión (2.5.1) no entrega valores de concentración en $\mathrm{kg/m^3}$, sin embargo, podemos conseguir una *concentración normalizada* χ:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{C(x, y, z, t)}{Q} \quad [\mathrm{m}^{-3}], \tag{8.1.1}$$

De esta forma, si posteriormente se dispone de una estimación externa de Q, la concentración real se obtiene simplemente escalando $C = Q\,\chi$.

Para organizar el cálculo, se fija el sistema de coordenadas de la siguiente manera: el origen es el centroide de la nube al inicio de la medición, y la cota $z = 0$ corresponde al terreno (obtenido del DEM). El eje x se alinea con la dirección del viento (azimut $\bar{\alpha}$ de la Fase 3)

y la rapidez de transporte u corresponde a su velocidad promediada $\bar{v}$. Toda la notación empleada se sintetiza en el Cuadro 8.1.

Cuadro 8.1: Notación de la Fase 4.

Símbolo	**Unidad**	**Definición**
$C(x, y, z, t)$	$\mathrm{kg/m^3}$	Concentración de material particulado
Q	kg	Masa emitida en la detonación
$\chi = C/Q$	$1/\mathrm{m^3}$	Concentración normalizada
x, y, z	m	Ejes longitudinal (viento), transversal y vertical ($z = 0$ en suelo)
u	m/s	Rapidez del viento según $+x$
$D_i(t)$	$\mathrm{m^2/s}$	Difusividad turbulenta en el eje i
$\sigma_i(t)$	m	Desviación estándar espacial en el eje $i \in \{x, y, z\}$
$\sigma_{i,0}$	m	Tamaño inicial de la nube tras el pulso explosivo
$K_i,\ \alpha_i$	$\mathrm{m^2/s^{\alpha_i}}$, —	Coeficiente y exponente de la ley de crecimiento
$H(t)$	m	Altura del centroide de la nube sobre el suelo
$\mathbf{S}$	$\mathrm{m^2}$	Matriz de covarianza de la máscara en el plano
θ_{n}	°	Ángulo de visión de la cámara respecto del nadir
ϕ	°	Ángulo entre la línea de vista y el eje del viento
$t_{\mathrm{ini}},\ t_{\mathrm{fin}}$	s	Límites temporales de la ventana de medición

8.2. Modelo de advección-difusión

8.2.1. Ecuación y solución inicial

Para describir cómo se mueve y dispersa el polvo en el aire, empleamos la ecuación de advección-difusión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\,\frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \tag{8.2.1}$$

En el contexto de una tronadura, la emisión no se comporta como la de una chimenea de operación continua, sino como la liberación instantánea de una masa total Q a una altura efectiva H. Esto se representa mediante la condición inicial

$$C(x, y, z, 0) = Q\,\delta(x)\,\delta(y)\,\delta(z - H),$$

que da lugar al modelo de dispersión denominado *puff* gaussiano, es decir, una nube finita y aislada.

Si analizamos la nube moviéndonos junto a ella a la velocidad del viento u (introduciendo un marco de referencia móvil $\xi = x - ut$), el efecto de desplazamiento se cancela y el problema se simplifica a una difusión pura tridimensional.

De este modo, el crecimiento de la nube en cada eje queda determinado por sus desviaciones estándar espaciales $\sigma_i^2(t) = 2D_i t$ (con $i \in \{x, y, z\}$ y D_i constante). Al integrar esto, la distribución de la concentración adopta la siguiente forma:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\,\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right). \tag{8.2.2}$$

8.2.2. El efecto del suelo (reflexión)

Como la nube no flota en el vacío, el suelo ($z = 0$) actúa como una barrera física que impide el paso del material. Esto se modela usando el "método de las imágenes" con una fuente idéntica en $z = -H$, se garantiza la reflexión total en la superficie. Dividiendo esta solución por Q, obtenemos la concentración normalizada final:

$$\begin{aligned}\chi(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\,\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \\ \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right].\end{aligned} \tag{8.2.3}$$

Para evaluar esta ecuación necesitamos cinco parámetros: la velocidad u, la altura H (ambos heredados de fases anteriores) y las tres dispersiones espaciales $\sigma_i(t)$, cuyo cálculo detallamos a continuación.

8.3. Medición de los parámetros de dispersión

8.3.1. Proyección espacial y cálculo de momentos

Para medir cómo se dispersa la nube, se selecciona un segmento continuo del video (ventana temporal) donde la segmentación sea estable, basándonos en los criterios del Cuadro 8.2.

Dado que mirar la escena en perspectiva distorsiona las distancias, proyectamos los píxeles de la máscara al plano del suelo en coordenadas UTM. Sobre este plano corregido, evaluamos la forma de la nube aplicando dos factores de peso a cada píxel:

1. **Por su área proyectada ($|\mathrm{d}\vec{u} \times \mathrm{d}\vec{v}|$):** Evita darle excesiva importancia a las zonas más cercanas a la cámara.
2. **Por su contraste u opacidad ($|I - I_{\mathbf{fondo}}|$):** Permite que la medición refleje la

Cuadro 8.2: Criterios de admisión para la ventana de medición.

Criterio	**Valor**	**Motivo**
Contacto con borde	$\leq 0{,}01$	Evita cortes artificiales en la silueta de la nube.
Cobertura de cuadro	$\leq 0{,}35$	Asegura que quede terreno visible para calcular contraste.
Área mínima	0,024 % del cuadro	Otorga estabilidad estadística al calcular la dispersión (500 px a 1920×1080).
Salto de área	$\leq 0{,}60$	Identifica y descarta fallas puntuales del algoritmo de segmentación.
Tiempo	$\leq 10{,}5$ s	Excluye el tramo de caída de las métricas internas de la Fase 1 (Sección 5.4.5).

acumulación real de polvo y no solo el contorno de la silueta.

Con estos pesos se construye la matriz de covarianza $\mathbf{S}$. A partir de ella, la dispersión horizontal en cualquier dirección β se obtiene proyectando geométricamente dicha matriz:

$$\sigma(\beta) = \sqrt{\hat{d}(\beta)^\top \, \mathbf{S} \, \hat{d}(\beta)}, \qquad \hat{d}(\beta) = (\sin\beta,\ \cos\beta)^\top, \tag{8.3.1}$$

de donde $\sigma_x = \sigma(\bar{\alpha})$ y $\sigma_y = \sigma(\bar{\alpha} + 90°)$.

8.3.2. Cota del plano de retroproyección

Para proyectar los píxeles de la máscara al espacio, es necesario definir a qué altura se encuentra la nube. En este modelo, una única serie temporal asume dos roles: define el plano donde se miden los momentos espaciales de dispersión y además entrega la altura efectiva $H(t)$ para evaluar la Ecuación (8.2.3). Esta serie corresponde a la misma cota del centroide ascendente derivada de la Fase 2 e interpolada cuadro a cuadro en la Fase 3.

8.3.3. Proyección oblicua y dispersión vertical

Observar una nube tridimensional desde un ángulo $\theta_{\mathrm{n}} = 90° - |\theta|$ respecto al nadir (con θ la inclinación de la Sección 2.6.1) genera que la silueta se estire en la dirección que apunta la cámara. En el modelo, esto infla el tamaño horizontal real sumando la proyección de su componente vertical:

$$\sigma^2_{\mathrm{proy}} = \sigma^2_{\mathrm{horiz}} + (\sigma_z \tan\theta_{\mathrm{n}})^2. \tag{8.3.2}$$

Para recuperar las dimensiones, este efecto de estiramiento debe descontarse de los ejes horizontales medidos. La magnitud de la corrección es según el ángulo ϕ entre la línea de

visión de la cámara y la dirección de avance del viento:

$$\sigma_x^2 \leftarrow \sigma_x^2 - (\sigma_z \tan\theta_{\mathrm{n}})^2 \cos^2\phi, \qquad \sigma_y^2 \leftarrow \sigma_y^2 - (\sigma_z \tan\theta_{\mathrm{n}})^2 \sin^2\phi. \tag{8.3.3}$$

De este modo, si la vista es perpendicular al viento ($\phi \to 90°$), el eje x queda libre de distorsión visual y la corrección recae sobre el ensanchamiento transversal y.
Por otro lado, la dispersión vertical de la nube (σ_z) no puede observarse en una imagen plana 2D. Para estimarla, recurrimos a la envolvente tridimensional reconstruida en la Fase 2 y empleamos la razón geométrica de sus momentos. Esta proporción entre alto y ancho es invariante a la escala de reconstrucción, se interpola instante a instante y se acopla a la medición horizontal en video:

$$\sigma_z(t) = \left[\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right]_{\mathrm{hull}}(t)\,\sigma_y(t). \tag{8.3.4}$$

Finalmente, las ecuaciones (8.3.3) y (8.3.4) son interdependientes: limpiar la perspectiva 2D requiere conocer el grosor vertical σ_z, pero calcular σ_z exige el ancho transversal σ_y ya descontado. Este sistema se resuelve iterativamente, deteniéndose al alcanzar una tolerancia o un tope de iteraciones.

8.3.4. Leyes de crecimiento de la nube

En lugar de asumir una dispersión constante, medimos el tamaño real de la nube en cada fotograma y ajustamos una curva matemática de crecimiento temporal para cada eje:

$$\sigma_i^2(t) = \sigma_{i,0}^2 + K_i\, t^{\alpha_i}, \qquad t \in [t_{\mathrm{ini}}, t_{\mathrm{fin}}]. \tag{8.3.5}$$

Aquí, el término $\sigma_{i,0}$ representa el tamaño físico que alcanzó la nube inmediatamente después de la explosión, antes de que el viento domine la dispersión.
Dado que estas leyes representan el comportamiento del polvo mientras la nube es pequeña y compacta, no podemos extenderlas, pues crearían una nube desproporcionada. Para proyectar el comportamiento en el futuro ($t > t_{\mathrm{fin}}$), simplemente mantenemos constante la última tasa de crecimiento observada:

$$\sigma_i^2(t) = \begin{cases} \sigma_{i,0}^2 + K_i\, t^{\alpha_i}, & t \le t_{\mathrm{fin}}, \\ \sigma_i^2(t_{\mathrm{fin}}) + \left.\dfrac{\mathrm{d}\sigma_i^2}{\mathrm{d}t}\right|_{t_{\mathrm{fin}}} (t - t_{\mathrm{fin}}), & t > t_{\mathrm{fin}}. \end{cases} \tag{8.3.6}$$

Finalmente, la altura del centroide $H(t)$ se interpola a partir de la Fase 2 y se asume constante una vez que la nube alcanza su estabilización.

8.4. Evaluación del modelo

Una vez resueltos todos los parámetros, la concentración normalizada $\chi(t)$ se evalúa en el centroide de la nube ($x = ut$, $y = 0$, $z = H(t)$).
Como la masa real Q es desconocida, la concentración absoluta se proyecta analizando una familia de emisiones hipotéticas (ej. $Q \in \{1, 10, 100, 1000\}$ kg) mediante la regla de escala $C(t) = Q\,\chi(t)$. Esto permite estudiar la caída temporal de la concentración y los instantes críticos.
Es importante recordar que esta fase es la más dependiente de los resultados anteriores, propagando cualquier incertidumbre que tengan. Además, el análisis asume que no hay sedimentación (las partículas no se concentran en el piso), con un suelo plano en $z = 0$ y no se trabaja la termodinámica del instante inicial.

8.5. Resultados

8.5.1. Ventana medida y parámetros heredados

La ventana de medición estuvo conformada por 158 fotogramas, desde $t_{\text{ini}} = 0.03\,\text{s}$ hasta $t_{\text{fin}} = 10.48\,\text{s}$ tras la detonación. De la Fase 3 se heredó un campo de viento de rapidez $u = 6.82\,\text{m/s}$ y ángulo 108.1°, junto con la serie de altura del centroide, que evoluciona desde 4.9 m hasta 25.3 m y se estabiliza en $H = 25.1\,\text{m}$.
La geometría de observación presentó una inclinación de la cámara de 30.3° respecto al nadir ($\tan\theta_{\text{n}} = 0{,}584$) y un ángulo $\phi = 79.8°$ con el eje de advección, de modo que los factores de la Ecuación (8.3.3) resultan $\cos^2\phi = 0{,}031$ y $\sin^2\phi = 0{,}969$.
Por su parte, la reconstrucción de la Fase 2 aportó 68 fotogramas, que mostraron una grilla espacial de 2.5 m, con una razón vertical de dispersión $[\sigma_z/\sigma_y]_{\text{hull}} = 0{,}410$ dentro de un rango de [0,370, 0,577] a lo largo de la ventana.

8.5.2. Leyes de dispersión

El Cuadro 8.3 y la Figura 8.1 exponen cómo creció la nube en cada eje. Los tres ejes presentan un comportamiento superdifusivo con exponentes similares ($\alpha_i \approx 1{,}34$–$1{,}35$). La diferencia entre ellos está en el coeficiente K_i: en el plano horizontal, K_y es cerca de tres veces K_x, por lo que la nube se expandió lateralmente más rápido que hacia el frente.
El crecimiento vertical alcanzó $\sigma_z = 17{,}2$ m al final de la ventana, con una difusividad de 17,2 m^2/s, menor que la de ambos ejes horizontales.

Cuadro 8.3: Parámetros de la ley de dispersión. La difusividad D_i corresponde al último instante medido.

Eje	$\sigma_{i,0}$ [m]	K_i	α_i	R^2	$\sigma_i(t_{\text{fin}})$ [m]	D_i [m^2/s]
x (longitudinal)	9,21	24,7	1,345	0,974	25,8	37,4
y (transversal)	11,11	73,5	1,340	0,996	42,8	109,5
z (vertical)	5,39	11,2	1,350	0,980	17,2	17,2

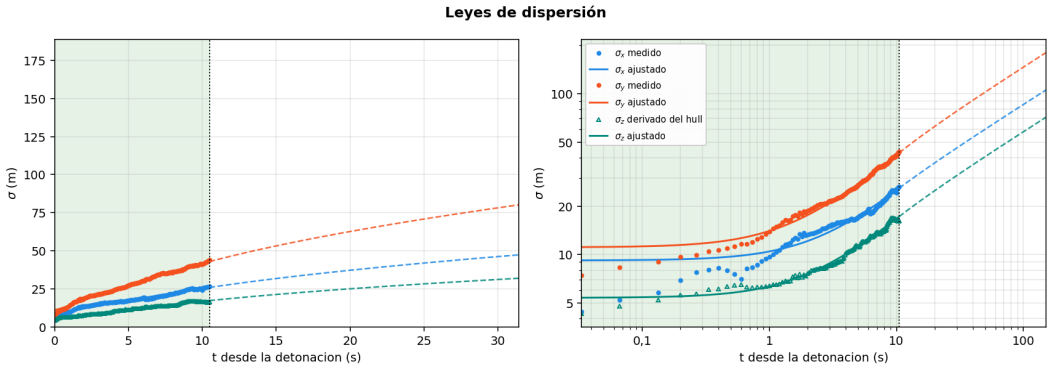


Figura 8.1: Expansión temporal en los tres ejes. La zona sombreada indica la ventana de medición, mientras que la línea segmentada proyecta la extrapolación.

8.5.3. Evolución de la concentración

Aplicando los parámetros deducidos al modelo matemático, la concentración normalizada en el núcleo de la nube (Figura 8.2) mostró una dilución temprana. En los primeros 10,5 segundos, el nivel base de concentración cayó cerca de 40 veces (desde $1{,}35 \times 10^{-4}$ hasta $3{,}4 \times 10^{-6}$ m^{-3}), impulsado por la violenta expansión inicial de los gases y el polvo.
Finalmente, el Cuadro 8.4 proyecta esta misma dinámica para cuatro masas hipotéticas de material particulado emitido (Q). Puesto que la ventana de video útil sólo abarca los primeros 71 m de viaje físico de la nube, las lecturas posteriores a los 10,5 s operan con la extrapolación del modelo, entregando una previsión teórica del alcance e impacto de la emisión.

8.5.4. Validación sintética de la Fase 4

En ARD3D la difusión turbulenta está dada por el tensor diag(D_h, D_h, D_z), con D_h calculada mediante una fórmula tipo Smagorinsky [50] (mínimo de 5 m^2/s) y D_z según la parametrización de Troen y Mahrt [51] empleada en CHIMERE [49]. Los valores promedio en la nube son

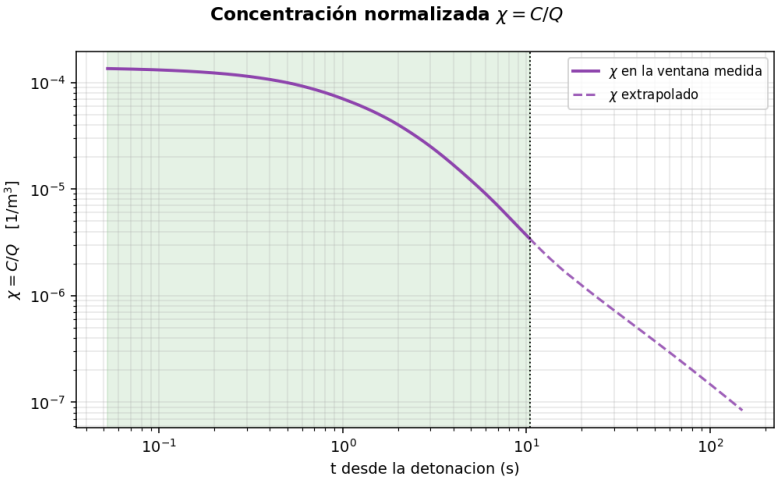


Figura 8.2: Concentración normalizada en el núcleo de la nube.

Cuadro 8.4: Proyección de concentración en el núcleo ($C = Q\,\chi$, en kg/m^3) para escenarios hipotéticos de masa de emisión.

t [s]	Distancia [m]	χ [m^{-3}]	$Q = 1$ kg	$Q = 10$ kg	$Q = 100$ kg	$Q = 1000$ kg
5	34	$1{,}20 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-3}$	$1{,}2 \times 10^{-2}$
20	136	$1{,}25 \times 10^{-6}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-3}$
60	409	$2{,}95 \times 10^{-7}$	$2{,}9 \times 10^{-7}$	$2{,}9 \times 10^{-6}$	$2{,}9 \times 10^{-5}$	$2{,}9 \times 10^{-4}$
150	1023	$8{,}39 \times 10^{-8}$	$8{,}4 \times 10^{-8}$	$8{,}4 \times 10^{-7}$	$8{,}4 \times 10^{-6}$	$8{,}4 \times 10^{-5}$

$$D_h^{\text{sim}} = 5{,}68 \text{ m}^2/\text{s}, \qquad D_z^{\text{sim}} = 8{,}5 \text{ m}^2/\text{s}. \tag{8.5.1}$$

Con difusividad constante, una emisión instantánea cumple $\sigma_i^2(t) = \sigma_{i,0}^2 + 2D_i^{\text{sim}}\, t$ [13], es decir, la Ecuación (8.3.5) con $\alpha_i = 1$ y $K_i = 2D_i^{\text{sim}}$. Como las leyes ajustadas tienen en general $\alpha_i \neq 1$, la difusividad $D_i(t) = \frac{1}{2}\,\mathrm{d}\sigma_i^2/\mathrm{d}t$ [44] varía en la ventana medida, y se compara su valor medio en $[t_{\text{ini}}, t_{\text{fin}}]$:

$$\bar{D}_i = \frac{1}{t_{\text{fin}} - t_{\text{ini}}} \int_{t_{\text{ini}}}^{t_{\text{fin}}} D_i(t)\,\mathrm{d}t = \frac{\sigma_i^2(t_{\text{fin}}) - \sigma_i^2(t_{\text{ini}})}{2\,(t_{\text{fin}} - t_{\text{ini}})}, \qquad e_i = \frac{\bar{D}_i}{D_i^{\text{sim}}} - 1, \tag{8.5.2}$$

donde $D_x^{\text{sim}} = D_y^{\text{sim}} = D_h^{\text{sim}}$.

La comparación se realiza en dos escenarios: **A**, el algoritmo completo con el viento de la Fase 3, y **B**, la Fase 4 con el viento de la simulación, que aísla su error del de la Fase 3. No se considera un escenario análogo con la altura de la simulación, ya que la Fase 4 no utiliza el tope de la columna sino el centroide del volumen reconstruido y la razón σ_z/σ_y de

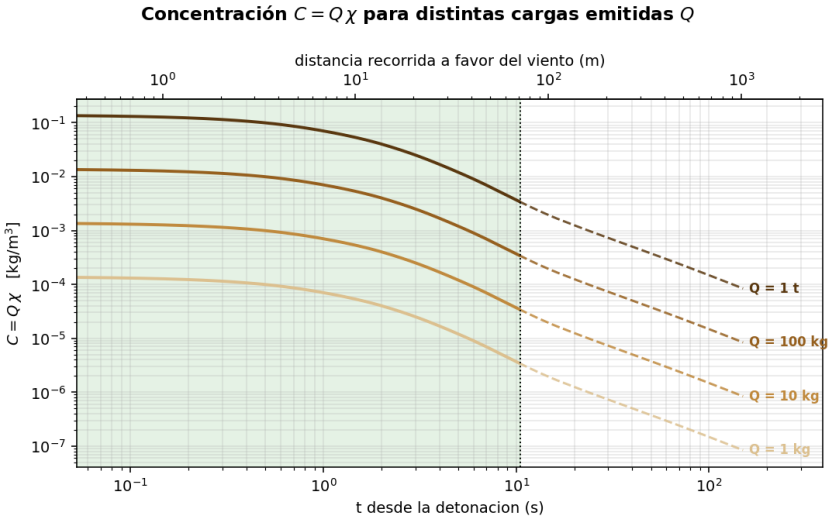


Figura 8.3: Magnitud de concentración absoluta en el centroide de la nube a medida que se desplaza por el terreno.

la envolvente, que la simulación no entrega en la misma forma.

Cuadro 8.5: Difusividad media $\bar{D}_i$ [m^2/s] y error relativo e_i en ambos escenarios.

		Volumétrico		**Difuso**	
Eje	D_i^{sim}	A	B	A	B
x	5,68	15,93 (+181 %)	22,84 (+302 %)	10,32 (+82 %)	18,25 (+221 %)
y	5,68	20,36 (+258 %)	13,91 (+145 %)	16,04 (+182 %)	8,57 (+51 %)
z	8,50	11,22 (+32 %)	9,23 (+9 %)	10,57 (+24 %)	7,72 (−9 %)

Las Figuras 8.4 y 8.5 comparan las dispersiones medidas y ajustadas con la que implica la simulación,

$$\sigma_i^{\text{sim}}(t) = \sqrt{\sigma_{i,0}^2 + 2D_i^{\text{sim}}\, t}, \tag{8.5.3}$$

donde $\sigma_{i,0}$ es el valor inicial de la ley ajustada. En el eje vertical no se grafican mediciones por cuadro, ya que σ_z se obtiene de la Ecuación (8.3.4).

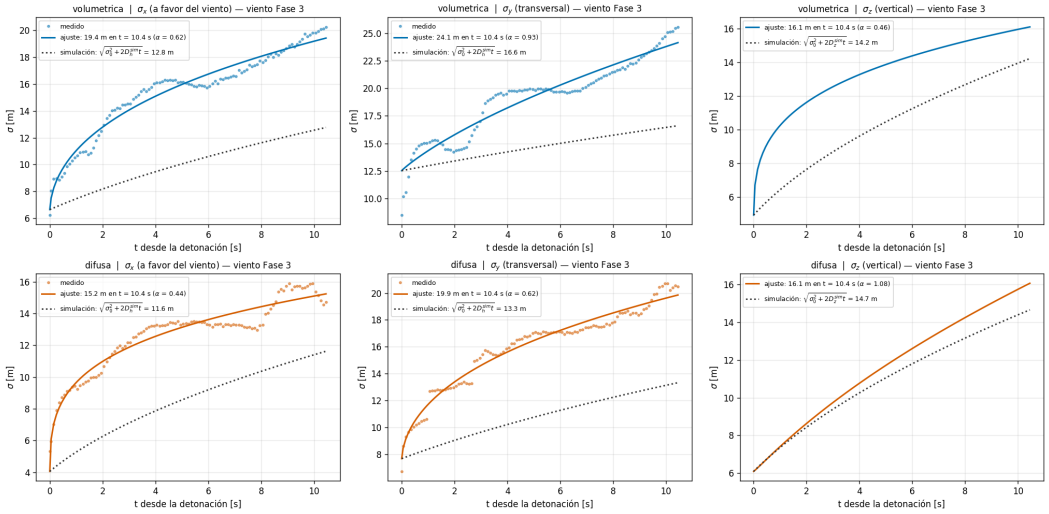


Figura 8.4: Escenario A: dispersiones medidas (puntos) y ajustadas (línea continua) con el viento de la Fase 3, junto a la dispersión de la simulación (punteada), en los formatos volumétrico (arriba) y difuso (abajo).

En el escenario A, los ejes de la Fase 4 están girados 61,3° (volumétrico) y 75,7° (difuso) respecto al viento de la simulación, por lo que el estiramiento a favor del viento se proyecta sobre el eje transversal. Además, como σ_z se obtiene a partir de σ_y, se hereda su error.

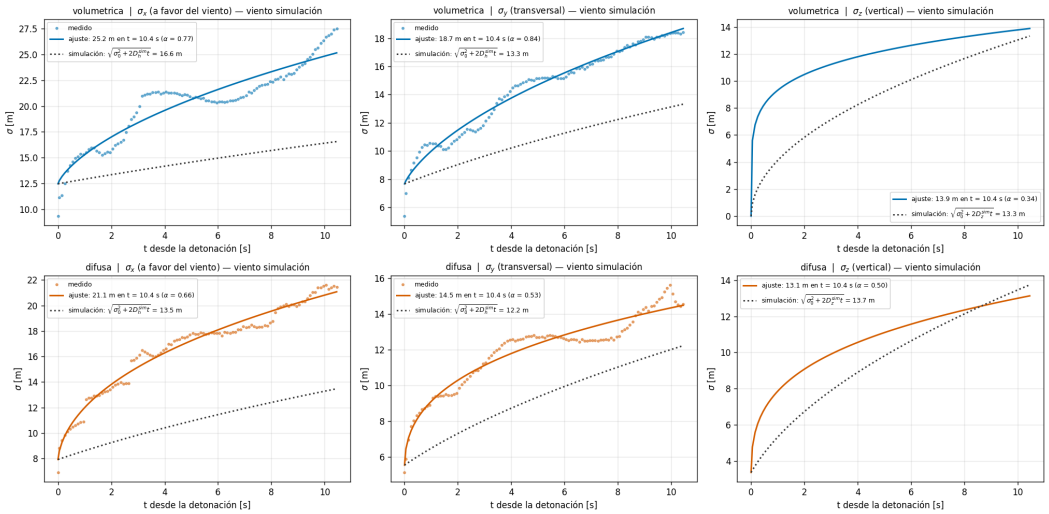


Figura 8.5: Escenario B: dispersiones medidas (puntos) y ajustadas (línea continua) con el viento de la simulación, junto a la dispersión de la simulación (punteada), en los formatos volumétrico (arriba) y difuso (abajo).

En el escenario B, el eje transversal es directamente comparable con D_h^{sim}. En el formato volumétrico, σ_y crece con un régimen subdifusivo ($\alpha_y = 0{,}84$) y alcanza 18,7 m frente a 13,3 m. En el difuso termina en 14,5 m frente a 12,2 m, con un crecimiento más lento ($\alpha_y = 0{,}53$). Como ambos formatos comparten los mismos parámetros físicos, esta diferencia proviene únicamente de la representación visual de la nube. En el eje vertical, ambos alcanzan $\sigma_z(t_{\text{fin}}) \approx 13$–$14$ m, cercano a la referencia (13,3 y 13,7 m).

Para la concentración, la simulación emite $Q = 10^5$ g (100 kg) y registra en cada instante el máximo de la nube, $C_{\text{máx}}^{\text{sim}}$. En la Fase 4, el máximo corresponde al centro de la nube,

$$C_{\text{máx}}(t) = Q\,\chi(t)\big|_{x=ut,\ y=0,\ z=H(t)}. \tag{8.5.4}$$

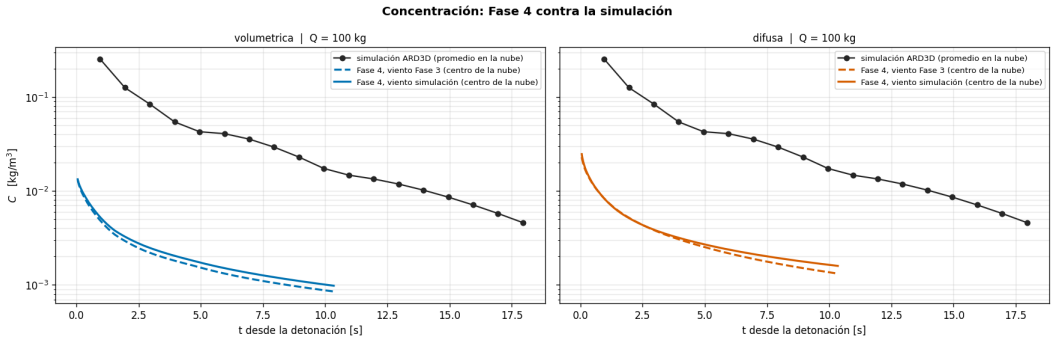


Figura 8.6: Concentración máxima de la simulación (puntos) y de la Fase 4 en los escenarios A (segmentada) y B (continua), para los formatos volumétrico (izquierda) y difuso (derecha), con $Q = 100$ kg.

El equivalente en ppm corresponde a la fracción másica $C/\rho_{\text{aire}} \cdot 10^6$, con $\rho_{\text{aire}} = 0{,}93$ kg/m^3 según la atmósfera estándar a la altura del pivote (≈ 2761 m s.n.m.).

Cuadro 8.6: Concentración máxima simulada y razón $r = C_{\text{máx}}/C_{\text{máx}}^{\text{sim}}$ en ambos escenarios.

			Volumétrico		Difuso	
t [s]	$C_{\text{máx}}^{\text{sim}}$ [kg/m^3]	$C_{\text{máx}}^{\text{sim}}$ [ppm]	A	B	A	B
0,95	$2{,}55 \times 10^{-1}$	$2{,}74 \times 10^{5}$	0,019	0,021	0,033	0,033
4,95	$4{,}28 \times 10^{-2}$	$4{,}59 \times 10^{4}$	0,036	0,041	0,059	0,063
9,95	$1{,}74 \times 10^{-2}$	$1{,}87 \times 10^{4}$	0,051	0,058	0,079	0,094
17,95	$4{,}60 \times 10^{-3}$	$4{,}94 \times 10^{3}$	0,112	0,130	0,167	0,219

La Fase 4 subestima la concentración máxima en toda la ventana y en ambos formatos

(Figura 8.6, Cuadro 8.6): entre 30 y 53 veces en el primer instante y entre 5 y 9 veces en el último. Ambos escenarios entregan valores similares, y el formato difuso queda más cerca de la simulación, en concordancia con sus dispersiones transversales.

Como $C_{\text{máx}} \propto 1/(\sigma_x \sigma_y \sigma_z)$, el error de las dispersiones se traslada a la concentración. En el escenario B y en el último instante, el producto de las dispersiones ajustadas es 2,22 (volumétrico) y 1,77 (difuso) veces el de la referencia (8.5.3). Sin embargo, aun con las dispersiones de referencia, la Ecuación (8.5.4) entrega solo un 13 % y un 18 % de $C_{\text{máx}}^{\text{sim}}$. Por lo tanto, la sobreestimación de las dispersiones explica solo una parte de la diferencia. El resto es compatible con que la extensión visible de la nube, de la que se obtienen $\sigma_{i,0}$ y las leyes de crecimiento, sea mayor que la dispersión de su concentración, es decir, que la simulación concentre la masa en el núcleo más de lo que describe una gaussiana con esas dispersiones.

En síntesis, con el viento correcto la Fase 4 reproduce el orden de magnitud de la difusividad transversal, pero su exactitud depende de la relación entre la extensión aparente de la nube y su distribución de concentración, que no es observable desde el video. La dispersión vertical queda acotada por la altura máxima observable en la Fase 2, y la concentración máxima se subestima entre 5 y 53 veces, con una diferencia que disminuye en el tiempo.

Capítulo 9

ENFOQUES EVALUADOS Y DESCARTADOS

Este capítulo documenta algunos enfoques que fueron implementados pero posteriormente descartados.

9.1. Detección por sustracción de fondo

En la primera versión de la Fase 1 se construyó un fondo calculado como la mediana de los cuadros previos a la detonación y marcaba como gas los píxeles que, respecto de ese fondo, cambiaban de intensidad o perdían textura, siempre que además presentaran movimiento según el flujo óptico. Los píxeles más oscuros que el fondo que conservaban su textura se descartaban como sombra. La máscara resultante se representaba de dos formas: como el *hull convexo* de los puntos cercanos al centroide, o como una *geometría irregular* usando Douglas-Peucker [18].

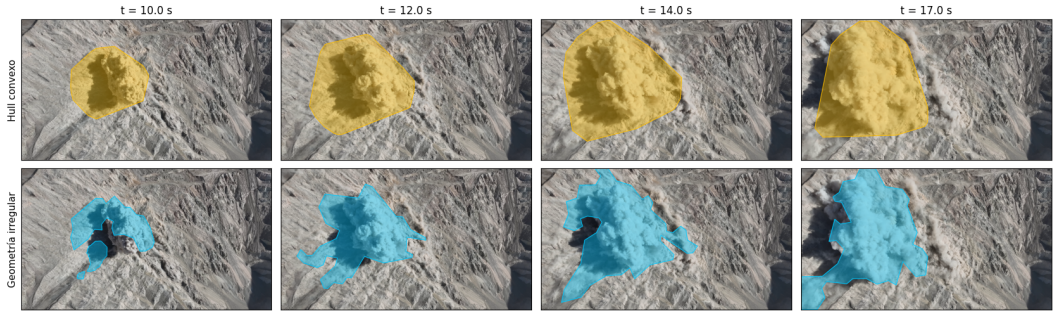


Figura 9.1: Detección por sustracción de fondo con hull convexo (arriba) y geometría irregular (abajo).

La Figura 9.1 muestra ambas variantes. El hull convexo captura gran porción de la nube, pero también incluye mucho terreno y la sombra de la columna. La geometría irregular sigue un poco mejor el contorno de la nube, pero continúa con un poco de la sombra proyectada por el gas y con regiones de terreno alejadas. En ambos casos, la falla proviene de que los criterios de detección no son exclusivos del gas, ya que la sombra proyectada por la nube también cambia la intensidad del terreno, se desplaza junto con ella y atenúa su textura, por lo que no se puede separar con la regla de sombra, y otros cambios del terreno ajenos a la columna cumplen las mismas condiciones. El método carece de una noción de qué es gas, lo que motivó incorporar la segmentación semántica con CLIPSeg.

9.2. Detección basada en YOLO

En un inicio, el primer método de machine learning que se evaluó para la segmentación fue YOLO [41]. El resultado fue insatisfactorio, ya que este detector estaba diseñado para objetos con bordes definidos y geometría acotada, mientras que la nube es un objeto de bordes difusos y sin una envoltura natural. A esto se le sumó la ausencia de datos anotados para reentrenarlo.

9.3. Velocidad por centroide de la máscara

Una primera estimación del viento en la Fase 3 seguía el centroide de la máscara de gas. En cada cuadro se calculó el centroide de la máscara en la imagen y la velocidad se obtenía como el desplazamiento de ese punto entre cuadros dividido por el intervalo de tiempo.
En el video del 15 de agosto, dentro de la ventana de viento establecido, este método entregó 9,21 m/s, mientras que el flujo óptico dio 6,82 m/s y las estaciones DMC y SINCA 6,17 y

5,28 m/s. La dirección coincidió con los demás métodos, pero la magnitud quedó muy por sobre el flujo óptico.

El error se debe a que el centroide de la máscara no sigue al gas, pues la nube asciende y se expande mientras avanza, y desde una cámara oblicua ese crecimiento desplaza su centroide. Además, la máscara puede incluir zonas de gas inferiores de la columna, que lo desplazan aún más. Por ello, la Fase 3 utiliza la velocidad con flujo óptico.

Capítulo 10

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

10.1. Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad de caracterizar la nube generada por una tronadura a cielo abierto utilizando exclusivamente un registro de video aéreo, logrando extraer mediciones físicas y cinemáticas sin recurrir a instrumentación en terreno ni requerir una anotación previa del dominio. A continuación, se evalúa el cumplimiento de cada objetivo específico.

Segmentación de la columna

El objetivo se cumplió: a partir del pivote indicado en la Fase 0, el sistema detectó y segmentó la columna sin intervención manual adicional. Esto fue posible mediante la implementación de una arquitectura híbrida, el sistema atribuyó la semántica (el qué aislar) a CLIPSeg, el cual localizó la nube a partir de descripciones en lenguaje natural, evitando construir un conjunto de datos anotado para un dominio específico. Por su parte, el motor de SAM 2 resolvió la geometría y el cómo seguirlo, propagando temporalmente la semilla inicial y delineando la frontera del gas con precisión subpíxel. El rigor con que se construyó esta máscara fue el insumo del que dependió todo el análisis posterior.
La validación se estructuró sobre tres métodos independientes: la métrica interna de confianza de SAM 2, una prueba de consistencia bajo ediciones del video y el contraste con un trazado manual de la nube. Los tres coinciden en que la segmentación es confiable desde la detonación

hasta los 10,5 s. Dentro de ese rango, las alteraciones fotométricas, de resolución y de sensor no cambian el área más allá de la variabilidad propia del método, mientras que los cambios geométricos, como rotaciones o reflexiones, producen la mayor caída.

Reconstrucción tridimensional

El segundo objetivo se alcanzó con éxito dentro de las fronteras impuestas por la perspectiva, encontrando un límite geométrico. Puesto que una silueta única no define un volumen cerrado, sino un cono de proyección infinito (*visual hull*), el principio que resolvió esta fase consistió en utilizar la sombra proyectada por el sol como una segunda vista natural para acotar el volumen sobre el DEM.

Con una elevación solar de $\theta_{\odot} = 18{,}59°$, el modelo enfrentó un factor de amplificación de sombra cercano a 2,97, lo cual aportó gran sensibilidad y provocó que la proyección abandonara el cuadro antes que la nube. Este fenómeno explica por qué la estimación de altura crece de forma continua desde los 5,8 m hasta los 43,0 m durante los primeros 9,3 s, momento en el cual se pierde el límite de la sombra, lo que obliga a truncar el cálculo y congelar la estimación.

Esta fase entrega la altura máxima de la columna (tope de la envolvente) y el centroide del volumen. Este último representa la ubicación donde se concentraría la masa, y que resultó crucial para anclar la altitud de los cálculos aerodinámicos en las Fases 3 y 4.

Estimación de viento

La cinemática también se resolvió, logrando establecer bajo qué condiciones un análisis de imagen es comparable con una medición meteorológica. El estudio de flujo óptico demostró que la dinámica visible de la nube atraviesa tres regímenes diferenciados: una expansión explosiva inicial, una etapa de transporte, y una etapa final de pérdida de estructura interna, donde el algoritmo sesga el movimiento aparente.

El aporte central fue la definición de la "ventana de viento establecido". Delimitar el análisis al periodo donde la nube posee direccionalidad estable y textura suficiente, permitió aislar 8 600 direcciones individuales. El ajuste estadístico de von Mises sobre esta muestra confirmó la alta consistencia del fenómeno: si bien la dispersión angular interna reflejó la turbulencia espacial propia del gas ($\sigma_{\theta} = 16{,}6°$), el ángulo consolidado en el tiempo mostró una gran estabilidad ($\sigma_{\bar{\alpha}} = 0{,}6°$), resolviendo una dirección neta de 108,1° y una rapidez de 6,8 m/s. Esta estimación fue contrastada externamente y se posicionó con una consistencia comparable, tanto en dirección como en magnitud, con los registros locales de las estaciones meteorológicas.

Estimación de concentración

Por último, este objetivo se cumplió dentro de las condiciones en que se formuló, se entregó como indicador proporcional la concentración normalizada ($\chi = C/Q$ en m^{-3}). Esta decisión deja la masa emitida (Q) como una variable explícita para una futura calibración, pero mostrando ejemplos de cómo se comportaría la concentración frente a distintas cargas iniciales.

El logro de esta fase consistió en medir los tres coeficientes de dispersión desde la propia evolución visual de la nube. Los ajustes gaussianos (R^2 entre 0,974 y 0,996) revelaron un comportamiento superdifusivo en los tres ejes ($\alpha_x = 1{,}345$, $\alpha_y = 1{,}340$, $\alpha_z = 1{,}350$), con una expansión transversal mayor que la longitudinal. Finalmente, la concentración normalizada en el núcleo del *puff* experimenta una caída de cerca de 40 veces (de $1{,}35\times10^{-4}$ a $3{,}4\times10^{-6}$ m^{-3}) durante la ventana medida.

Validación sintética

La simulación del evento del 15 de agosto en ARD3D permitió contrastar cada fase con una referencia conocida, en dos representaciones visuales del gas, volumétrica y difusa, generadas con los mismos parámetros físicos.

En la Fase 1, la segmentación reprodujo el área verdadera en el formato volumétrico, con un IoU cercano a 1,0 durante todo el registro. En el formato difuso el IoU mediano descendió a 0,634, con falsos negativos concentrados en la periferia, donde el simulador atenúa la opacidad del gas.

En la Fase 2, la altura del volumen reconstruido subestimó la de la simulación durante toda la ventana, con un sesgo de $-14{,}0$ m (20,9 %) en el formato volumétrico y de $-18{,}8$ m (28,3 %) en el difuso, sin una tendencia sostenida en el tiempo. La reconstrucción alcanzó 67,6 m y 58,7 m frente a un máximo simulado de 80,2 m. Como el error aparece desde los primeros instantes, no se explica solo por el límite del encuadre, y es consistente con la sombra débil de la parte alta de la columna.

En la Fase 3, la trayectoria del centroide recuperó la dirección del viento simulado con un error menor a 1°. En cambio, el flujo óptico subestimó la rapidez en más de un 90 % y desvió la dirección entre 61° y 76°, ya que la nube simulada carece de estructuras de intensidad que se desplacen junto con el gas. Por ello, la estimación por flujo óptico no pudo evaluarse en este escenario, y su contraste queda sostenido por las estaciones meteorológicas.

En la Fase 4, al usar el viento de la simulación, la difusividad transversal reprodujo el orden de magnitud de la referencia, y la diferencia entre los formatos volumétrico y difuso proviene únicamente de la representación visual de la nube, ya que ambos comparten los parámetros físicos. En cambio, con el viento de la Fase 3, el error de dirección se trasladó a la dispersión transversal. En todos los casos, la concentración máxima quedó por debajo de la simulada, con una diferencia que disminuye en el tiempo, ya que la extensión aparente de la nube

no equivale a la distribución de su concentración. Estas observaciones son cualitativas: la referencia es también un modelo con parámetros supuestos, por lo que otra configuración de la simulación entregaría otros errores, y su ajuste cuantitativo requerirá mediciones de concentración en terreno.

10.2. Trabajo futuro

- **Levantamiento topográfico actualizado.** Reemplazar el DEM por un levantamiento contemporáneo eliminaría una fuente de incertidumbre estructural.
- **Calibración de concentración.** Mediciones de PMx simultáneas al registro permitirían convertir el índice relativo de la Fase 4 en una estimación calibrada.
- **Ubicación automática del pivote.** Estimar la posición del punto de emisión en la imagen a partir del cuadro de detonación, que la Fase 0 ya detecta de forma automática.
- **Medición de viento en el rajo.** Un anemómetro cercano a la tronadura, con registro sincronizado, permitiría validar la Fase 3 sin depender de estaciones a varios kilómetros.
- **Más eventos.** Aplicar el pipeline a otras tronaduras, con una posición de cámara similar, pero condiciones distintas de viento, iluminación y geometría de vuelo.
- **Contraste con modelos especializados en humo.** Comparar la Fase 1 con modelos entrenados para segmentar humo (como SmokeNet [32]) permitiría evaluarla contra una referencia independiente.
- **Criterio de entrega de la mina.** Relacionar la extensión y la concentración estimadas con una métrica de visibilidad o de calidad del aire, para apoyar la definición de los tiempos de entrega.
- **Procesos no modelados.** Incluir deposición y sedimentación de partículas, el efecto del terreno sobre la pluma y la variación del viento con la altura.
- **Vista panorámica.** Registrar la tronadura desde una posición más alejada o con mayor campo de visión, de modo que la nube y su sombra permanezcan dentro del cuadro durante toda su evolución.
- **Múltiples cámaras.** Observar el evento desde dos o más drones sincronizados, lo que resolvería la ambigüedad de la visión monofocal entre la extensión horizontal y la altura de la columna.

REFERENCIAS

[1] Alaska Satellite Facility (ASF DAAC). *ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High Resolution*, mosaico regional de Antofagasta a 12,5 m, alturas referidas a EGM2008. Includes Material © JAXA/METI 2006–2011. Disponible en `https://asf.alaska.edu`. Consultado el 1 de julio de 2026.

[2] M. Alvarado, F. Gonzalez, A. Fletcher y A. Doshi. *Towards the Development of a Low Cost Airborne Sensing System to Monitor Dust Particles after Blasting at Open-Pit Mine Sites*. Sensors, 15(8):19667–19687, 2015. DOI: 10.3390/s150819667.

[3] H. R. Arjomandi, K. Kheiralipour y A. Amarloei. *Estimation of Dust Concentration by a Novel Machine Vision System*. Scientific Reports, 12:13697, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-18036-8.

[4] M. I. Attalla, S. J. Day, T. Lange, W. Lilley y S. Morgan. *NO_x Emissions from Blasting Operations in Open-Cut Coal Mining*. Atmospheric Environment, 42(34):7874–7883, 2008.

[5] E. Bakhtavar, S. Hosseini, K. Hewage y R. Sadiq. *Green Blasting Policy: Simultaneous Forecast of Vertical and Horizontal Distribution of Dust Emissions Using Artificial Causality-Weighted Neural Network*. Journal of Cleaner Production, 283:124562, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124562.

[6] E. Bakhtavar, S. Hosseini, K. Hewage y R. Sadiq. *Air Pollution Risk Assessment Using a Hybrid Fuzzy Intelligent Probability-Based Approach: Mine Blasting Dust Impacts*. Natural Resources Research, 30(3):2607–2627, 2021. DOI: 10.1007/s11053-020-09810-4.

[7] A. Banerjee, I. S. Dhillon, J. Ghosh y S. Sra. *Clustering on the Unit Hypersphere using von Mises-Fisher Distributions*. Journal of Machine Learning Research, 6:1345–1382, 2005.

[8] Chile. Ministerio del Medio Ambiente. *Decreto Supremo N.º 12 de 2011: Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2,5*. Diario Oficial de la República de Chile, 2011.

[9] Chile. Ministerio del Medio Ambiente. *Decreto Supremo N.º 12 de 2021: Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10*. Diario Oficial de la República de Chile, publicado el 4 de junio de 2022.

[10] Chile. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. *Consejo de Ministros aprueba nueva norma de calidad del aire para material particulado fino*, 26 de diciembre de 2025. Disponible en `https://www.economia.gob.cl/2025/12/26/consejo-de-ministros-aprueba-nueva-norma-de-calidad-del-aire-para-material-particulado-fino.htm`. Consultado el 22 de octubre de 2026.

[11] Chile. Ministerio del Medio Ambiente. *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)*: estación Colegio Pedro Vergara Keller, Calama. Disponible en `https://sinca.mma.gob.cl`. Consultado el 13/08/2026.

[12] J. S. Scire, D. G. Strimaitis y R. J. Yamartino. *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*. Earth Tech, Inc., Concord, MA, 2000.

[13] G. T. Csanady. *Turbulent Diffusion in the Environment*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1973.

[14] R. Cucchiara, C. Grana, M. Piccardi y A. Prati. *Detecting Moving Objects, Ghosts, and Shadows in Video Streams*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25(10):1337–1342, 2003.

[15] Dirección Meteorológica de Chile. *Servicios Climáticos*: estación Chorrillos, Calama. Disponible en `https://climatologia.meteochile.gob.cl`. Consultado el 13/08/2026.

[16] Anthropic. *Claude* [modelo de lenguaje de gran escala], versiones utilizadas entre julio y septiembre de 2026. Disponible en `https://claude.ai`.

[17] A. Dosovitskiy et al. *An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale*. En International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021.

[18] D. H. Douglas y T. K. Peucker. *Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature*. Cartographica, 10(2):112–122, 1973.

[19] L. Ferragut, M. I. Asensio y J. Simon. *High Definition Local Adjustment Model of 3D Wind Fields Performing only 2D Computations*. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 27(4):510–523, 2011.

[20] S. Du, H. Chen, X. Ding, Z. Liao y X. Lu. *Development of Dust Emission Prediction Model for Open-Pit Mines Based on SHPB Experiment and Image Recognition Method*. Atmosphere, 15(9):1118, 2024. DOI: 10.3390/atmos15091118.

[21] G. Farnebäck. *Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion*. En Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA), Lecture Notes in Computer Science, vol. 2749, Springer, pp. 363–370, 2003.

[22] Google. *Google Maps*: vista satelital de la mina Chuquicamata, Región de Antofagasta. Disponible en `https://maps.google.com`. Consultado el 06/07/2026.

[23] R. Hartley y A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2.ª ed. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

[24] B. K. P. Horn y B. G. Schunck. *Determining Optical Flow*. Artificial Intelligence, 17(1–3):185–203, 1981.

[25] S. Hosseini, M. Monjezi, E. Bakhtavar y A. Mousavi. *Prediction of Dust Emission Due to Open Pit Mine Blasting Using a Hybrid Artificial Neural Network*. Natural Resources Research, 30(6):4773–4788, 2021. DOI: 10.1007/s11053-021-09930-5.

[26] P. Jaccard. *The Distribution of the Flora in the Alpine Zone*. New Phytologist, 11(2):37–50, 1912.

[27] I. T. Jolliffe. *Principal Component Analysis*. 2.ª ed. Springer, Nueva York, 2002.

[28] A. Kirillov et al. *Segment Anything*. En Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 4015–4026, 2023.

[29] K. N. Kutulakos y S. M. Seitz. *A Theory of Shape by Space Carving*. International Journal of Computer Vision, 38(3):199–218, 2000.

[30] A. Laurentini. *The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(2):150–162, 1994.

[31] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard y L. Licata. *Detecting Outliers: Do Not Use Standard Deviation Around the Mean, Use Absolute Deviation Around the Median*. Journal of Experimental Social Psychology, 49(4):764–766, 2013.

[32] X. Liu y E. J. Ientilucci. *SmokeNet: Efficient Smoke Segmentation Leveraging Multiscale Convolutions and Multiview Attention Mechanisms*. arXiv preprint arXiv:2502.12258, 2025.

[33] W. E. Lorensen y H. E. Cline. *Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 21(4):163–169, 1987.

[34] T. Lüddecke y A. Ecker. *Image Segmentation Using Text and Image Prompts*. En Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 7086–7096, 2022.

[35] K. V. Mardia y P. E. Jupp. *Directional Statistics*. John Wiley & Sons, Chichester, 2000.

[36] R. Metzler y J. Klafter. *The Random Walk's Guide to Anomalous Diffusion: A Fractional Dynamics Approach*. Physics Reports, 339(1):1–77, 2000.

[37] M. Piccardi. *Background Subtraction Techniques: A Review*. En IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4, pp. 3099–3104, 2004.

[38] A. Radford et al. *Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision*. En Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR 139, pp. 8748–8763, 2021.

[39] N. Ravi et al. *SAM 2: Segment Anything in Images and Videos*. En International Conference on Learning Representations (ICLR), 2025. arXiv:2408.00714.

[40] I. Reda y A. Andreas. *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*. Solar Energy, 76(5):577–589, 2004.

[41] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick y A. Farhadi. *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. En Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779–788, 2016.

[42] S. Savarese, M. Andreetto, H. Rushmeier, F. Bernardini y P. Perona. *3D Reconstruction by Shadow Carving: Theory and Practical Evaluation*. International Journal of Computer Vision, 71(3):305–336, 2007.

[43] J. M. Stockie. *The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling*. SIAM Review, 53(2):349–372, 2011.

[44] G. I. Taylor. *Diffusion by Continuous Movements*. Proceedings of the London Mathematical Society, s2-20(1):196–212, 1922.

[45] X. Xu, C. Li, Y. Zhao, X. Gu, Y. Zhao, Z. Wu, Y. Zhong y D. Lu. *Dust Diffusion Characteristics of Deep Concave Open-Pit Mine Based on Multi-Scale Monitoring and Machine Learning*. Powder Technology, 478:122465, 2026. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122465.

[46] J. Yin, J. Lu, F. Tian y S. Wang. *Pollutant Migration Pattern during Open-Pit Rock Blasting Based on Digital Image Analysis Technology*. Mathematics, 10(17):3205, 2022. DOI: 10.3390/math10173205.

[47] J. Yin, J. Lei, K. Fan y S. Wang. *Integrating Image Processing and Deep Learning for Effective Analysis and Classification of Dust Pollution in Mining Processes*. International Journal of Coal Science & Technology, 10:84, 2023. DOI: 10.1007/s40789-023-00653-x.

[48] A. N. Brooks y T. J. R. Hughes. *Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 32(1–3):199–259, 1982. DOI: 10.1016/0045-7825(82)90071-8.

[49] LMD (CNRS), INERIS y LISA (CNRS). *CHIMERE Chemistry-Transport Model v2020r1: Documentation*. Laboratoire de Météorologie Dynamique, 2020. Disponible en `http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/`.

[50] J. Smagorinsky. *General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Experiment*. Monthly Weather Review, 91(3):99–164, 1963. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091¡0099:GCEWTP¿2.3.CO;2.

[51] I. Troen y L. Mahrt. *A Simple Model of the Atmospheric Boundary Layer: Sensitivity to Surface Evaporation*. Boundary-Layer Meteorology, 37(1–2):129–148, 1986. DOI: 10.1007/BF00122760.

[52] O. Perincek, R. Loxton, S. Kulkarni et al. *Drill Pattern Optimisation for Large Complex Blasts to Improve Fragmentation and Dig Efficiency*. Mathematical Geosciences, 57(3), pp. 577–599, 2025.

BIBLIOGRAFÍA

J. Ahrens, B. Geveci y C. Law. *ParaView: An End-User Tool for Large-Data Visualization*. En C. D. Hansen y C. R. Johnson (eds.), The Visualization Handbook, Elsevier, pp. 717–731, 2005.

Blender Online Community. *Blender – a 3D Modelling and Rendering Package*, versión 5.1.2. Blender Foundation, Ámsterdam. Disponible en `https://www.blender.org`.

G. Bradski. *The OpenCV Library*. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000.

M. Dawson-Haggerty et al. *trimesh*, versión 4.12.2. Disponible en `https://trimesh.org`.

L. R. Dice. *Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species*. Ecology, 26(3):297–302, 1945.

Y. Eldar, M. Lindenbaum, M. Porat y Y. Y. Zeevi. *The Farthest Point Strategy for Progressive Image Sampling*. IEEE Transactions on Image Processing, 6(9):1305–1315, 1997.

G. D. Evangelidis y E. Z. Psarakis. *Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(10):1858–1865, 2008.

Z. Fan et al. *Enhancing Urban Real-Time PM2.5 Monitoring in Street Canyons by Machine Learning and Computer Vision Technology*. Sustainable Cities and Society, 100:105009, 2024. DOI: 10.1016/j.scs.2023.105009.

S. Gillies et al. *Rasterio: Geospatial Raster I/O for Python Programmers*, 1.5.0. Disponible en `https://github.com/rasterio/rasterio`.

C. R. Harris et al. *Array Programming with NumPy*. Nature, 585(7825):357–362, 2020.

J. D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Computing in Science & Engineering, 9(3):90–95, 2007.

T. Kluyver et al. *Jupyter Notebooks – a Publishing Format for Reproducible Computational Workflows*. En F. Loizides y B. Schmidt (eds.), Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas, IOS Press, pp. 87–90, 2016.

A. Paszke et al. *PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library*. En Advances in Neural Information Processing Systems 32 (NeurIPS), pp. 8024–8035, 2019.

QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*, versión 4.0.3-Norrköping. Open Source Geospatial Foundation. Disponible en `https://qgis.org`.

L. F. Richardson. *Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbour Graph*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 110(756):709–737, 1926.

C. Ryali et al. *Hiera: A Hierarchical Vision Transformer without the Bells-and-Whistles*. En Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR 202, pp. 29441–29454, 2023.

J. H. Seinfeld y S. N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3.ª ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2016.

A. D. Snow et al. *pyproj: Python Interface to PROJ*, versión 3.7.2. Disponible en `https://github.com/pyproj4/pyproj`.

B. Stafford et al. *Pysolar*, versión 0.13. Disponible en `https://github.com/pingswept/pysolar`.

V. J. D. Tsai. *A Comparative Study on Shadow Compensation of Color Aerial Images in Invariant Color Models*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(6):1661–1671, 2006.

U.S. Environmental Protection Agency. *AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, 5.ª ed., vol. I, sección 11.9: Western Surface Coal Mining. Research Triangle Park, 1998.

P. Virtanen et al. *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*. Nature Methods, 17(3):261–272, 2020.

T. Wolf et al. *Transformers: State-of-the-Art Natural Language Processing*. En Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations, pp. 38–45, 2020.

World Meteorological Organization. *Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)*, vol. I: Measurement of Meteorological Variables. WMO, Ginebra, edición 2018.

K. Zuiderveld. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*. En P. S. Heckbert (ed.), Graphics Gems IV, Academic Press, pp. 474–485, 1994.

Apéndice A

CÓDIGO FUENTE Y ENTORNO DE EJECUCIÓN

El código del *pipeline* se encuentra en el repositorio `https://github.com/Brianmvv-afk/Memoria-----Cuantificacion-de-Gases`.

A.1. Estructura del repositorio

```
Proyecto/
├── Codigo.ipynb ..... Fases 0 a 4 sobre el video del 15/08/2025
├── funciones/
│   ├── funciones_F0.py ..... configuración, video, telemetría, cámara
│   ├── funciones_F1.py ..... CLIPSeg, SAM 2, sombra, validación
│   ├── funciones_F2.py ..... tallado espacial, altura, exportación
│   ├── funciones_F3.py ..... flujo óptico, georreferencia, estaciones
│   └── funciones_F4.py ..... χ, puff
├── datos/ ..... video, DEM, ortofoto, estaciones
├── resultados/ ..... se genera al ejecutar
└── Validacion_sintetica/
    ├── validacion_completa.ipynb ..... pipeline sobre la simulación
    ├── funciones/ ..... mismos módulos
    └── datos/ ..... videos sintéticos y los mismos archivos anteriores
```

El contrato entre fases es por archivo: cada fase lee desde el disco los resultados de las anteriores. Las salidas principales se resumen en el Cuadro A.1.

Cuadro A.1: Salidas que produce cada fase, dentro de `resultados/`.

Fase	Salida
0	`config.json`, `geometria.json`, `georreferencia.json`, `modelo_fondo.npz`, `onset.json`, `video_meta.json`
1	`mascaras_gas.pkl`, `mascaras_sombra.pkl`, `overlay_sam2.mp4`
2	`serie_columna.csv`, `gas_secuencia.glb`, `terreno.glb`, `camara_dron.json`
3	`viento_georreferenciado.csv`, `viento_mundo.csv`, `viento_video.csv`
4	`parametros_dispersion.json`, `refinamiento_fase2.json`

A.2. Datos no incluidos en el repositorio

Por su tamaño o por pertenecer a la operación minera, algunos archivos de entrada no están en el repositorio y deben ubicarse en la carpeta `datos/` antes de ejecutar el código:

- **Video del dron** (`DJI_20250815165143_0003_V.MP4`): registro de tronadura del 15 de agosto de 2025, se requiere solicitud.
- **Foto mapa** (`satelital_utm.tif`): se obtiene exportando desde QGIS la capa *Google Satellite* (complemento QuickMapServices) en EPSG:32719, a 1 m/px, sobre la extensión E 506 500–513 668 m, N 7 532 356–7 538 500 m.
- **Pesos de SAM 2** (`sam2_hiera_tiny.pt`): se descargan desde el repositorio oficial de Meta (`facebookresearch/sam2`).
- **Modelo CLIPSeg** (`clipseg-rd64-refined/`): se descarga automáticamente desde Hugging Face en la primera ejecución, lo que requiere conexión a internet, y queda guardado en `datos/` para las ejecuciones siguientes.
- **Videos de la simulación** necesarios solo para el notebook de validación, disponibles a solicitud: (`nube_volumetrica.avi`, `nube_difusa.avi`, `fondo_nube_roja_sin_sombra.avi`).

El DEM (`DEM_mina.tif`), los registros de las estaciones meteorológicas y el trazado manual de la columna sí se incluyen en el repositorio.

A.3. Entorno de ejecución

Cuadro A.2: Entorno de ejecución.

Componente	**Versión**
Python	3.13.5
PyTorch	2.11.0+cpu
SAM 2 (`facebookresearch/sam2`)	1.1.0
Pesos de SAM 2	`sam2_hiera_tiny.pt`, configuración `sam2_hiera_t.yaml`
CLIPSeg	`CIDAS/clipseg-rd64-refined` (Hugging Face `transformers` 5.14.1)
OpenCV	5.0.0.93
NumPy / SciPy	2.3.2 / 1.16.3
`rasterio` / `pyproj` / `trimesh`	1.5.0 / 3.7.2 / 4.12.2
Sistema operativo	Windows 11 (10.0.26200)
Procesador	13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1355U, sin aceleración por GPU

Apéndice B

NOTACIÓN

B.1. Abreviaturas

Sigla	Significado
IoU	Intersección sobre unión (*Intersection over Union*), índice de Jaccard
KDE	Estimación de densidad por núcleos (*Kernel Density Estimation*)

B.2. Símbolos

Los símbolos se agrupan por el capítulo donde se definen.

Cuadro B.1: Símbolos del marco teórico y de las Fases 0 y 1.

Símbolo	**Unidad**	**Significado**
Modelo de cámara		
$\mathbf{P} = [X, Y, Z]^\top$	m	Punto del terreno
$\mathbf{p} = [x, y]^\top$	px	Píxel
$\mathbf{K}$	px	Matriz de parámetros intrínsecos
$\mathbf{R}$, $\mathbf{t}$	—	Rotación y traslación extrínsecas
$\mathbf{C}$	m	Centro óptico de la cámara
$\mathbf{d}(\mathbf{p})$	—	Dirección del rayo del píxel $\mathbf{p}$
ψ, θ, ω	°	*Yaw*, *pitch* y *roll* de la cámara
$\pi_h(\mathbf{p})$	m	Retroproyección del píxel $\mathbf{p}$ al plano $z = h$
Fase 0		
$act[i]$, $bg[i]$	niveles	Actividad máxima y nivel de fondo del cuadro i
$ratio[i]$	—	Indicador de localización
F	—	Fuerza de un episodio
Fase 1		
M_t	—	Máscara de la columna en el cuadro t
$\ell_t(u)$	—	*Logit* de SAM 2 en el píxel u
s_t	—	Estimación de acierto (IoU) de SAM 2
S_t, δ	—	Índice de estabilidad y desplazamiento del umbral
A_t	—	Acuerdo entre la máscara propagada y la de modo imagen
$\widetilde{M_t}$	—	Máscara en modo imagen
I_t	niveles	Cuadro t en escala de grises, en $[0, 255]$
M_t^{col}	—	Región candidata de CLIPSeg y novedad
$M_t^{(k)}$, M_t^{ref}	—	Máscara de la corrida de control k y de referencia
$r_k(t)$	—	Razón de área de la corrida de control k
$b_{\mathrm{mín}}$, $b_{\mathrm{máx}}$	—	Límites de la banda de control (piso de ruido)

Cuadro B.2: Símbolos de las Fases 2, 3 y 4.

Símbolo	**Unidad**	**Significado**
Fase 2		
$\hat{h}(t)$	m	Altura estimada de la columna
d	m	Distancia horizontal de la sombra
$\psi_\odot$, $\theta_\odot$	°	Azimut y elevación solar
Fase 3		
$\mathbf{u}_t(i,j)$	px/cuadro	Campo de flujo óptico
$\mathcal{N}_t$	—	Núcleo común $M_t \cap M_{t-k}$
k	cuadros	Desfase entre los cuadros de un par
τ_t	—	Textura interna de la máscara
$\mathcal{E}_t$	—	Región de terreno que rodea a la máscara
$\mathbf{C}_t$, $\hat{\mathbf{e}}_t$	—	Covarianza del flujo y su dirección dominante
$q_t(i,j)$, $\tilde{q}_t$	px/cuadro	Proyección sobre $\hat{\mathbf{e}}_t$ y su mediana
$\mathbf{d}_t$, α_t	px, °	Desplazamiento del par y su ángulo en la imagen
$\bar{\alpha}$, R	°, —	Dirección media y longitud de la resultante
$\sigma_{\bar{\alpha}}$	°	Dispersión temporal de la dirección
v_t, $\bar{v}$	m/s	Rapidez del par y rapidez representativa
$\boldsymbol{\delta}_t = [\delta_E, \delta_N]^\top$	m	Desplazamiento de la sonda en el plano de advección
η	—	Razón de la homotecia entre dos planos de advección
$\delta_\uparrow$	°	Separación entre la dirección medida y el ascenso puro
μ, κ	°, —	Dirección media y concentración de von Mises
σ_θ	°	Dispersión angular interna del campo
Fase 4		
C	kg/m^3	Concentración
Q	kg	Masa emitida
$\chi = C/Q$	m^{-3}	Concentración normalizada
u	m/s	Rapidez del viento
$H(t)$	m	Altura del centroide de la nube
$\sigma_i(t)$, $\sigma_{i,0}$	m	Desviación estándar en el eje $i \in \{x, y, z\}$ y su valor inicial
K_i, α_i	m^2/s$^{\alpha_i}$, —	Constante y exponente de la ley de dispersión
$D_i(t)$	m^2/s	Difusividad turbulenta
$\mathbf{S}$	m^2	Covarianza de la máscara en el plano
θ_{n}	°	Ángulo de la cámara respecto del nadir
ϕ	°	Ángulo entre la línea de vista y el eje del viento
t_{ini}, t_{fin}	s	Límites de la ventana de medición

Cuadro B.3: Símbolos de las validaciones sintéticas.

Símbolo	**Unidad**	**Significado**
Fase 1		
G_t	—	Máscara de verdad-terreno del formato nube roja
I_t^R, I_t^G, I_t^B	niveles	Canales rojo, verde y azul del cuadro t
ρ_t	—	Razón de áreas $\lvert M_t\rvert/\lvert G_t\rvert$
FP_t, FN_t	—	Tasas de falsos positivos y falsos negativos
Fase 2		
$h^{\mathrm{sim}}(t)$	m	Altura de la nube en la simulación
$h^{\mathrm{rec}}(t)$	m	Altura del volumen reconstruido
t_k, N	s, —	Instantes comparados y su número
e_k, $\bar{e}$	m	Error de altura en t_k y sesgo
ε	—	Error relativo medio
m_e	m/s	Pendiente del error en el tiempo
Fase 3		
(u_E, u_N)	m/s	Componentes Este y Norte del viento simulado
U^{sim}	m/s	Rapidez del viento simulado
$\bar{\alpha}^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{desde}}$	°	Dirección de procedencia del viento simulado
e_U, e_α	—, °	Error relativo de la rapidez y diferencia circular de la dirección
Fase 4		
D_h^{sim}, D_z^{sim}	m^2/s	Difusividades horizontal y vertical de la simulación
$\bar{D}_i$, e_i	m^2/s, —	Difusividad media en la ventana y su error relativo
$\sigma_i^{\mathrm{sim}}(t)$	m	Dispersión implicada por la simulación
$C_{\mathrm{máx}}$, $C^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{máx}}$	$\mathrm{kg/m}^3$	Concentración máxima de la Fase 4 y de la simulación
r	—	Razón $C_{\mathrm{máx}}/C^{\mathrm{sim}}_{\mathrm{máx}}$

B.3. Ediciones del video

Cada edición se aplica sobre el video original, antes de cualquier etapa del *pipeline*, y se procesa desde la siembra con CLIPSeg.

Cuadro B.4: Definición de las ediciones del estudio de consistencia.

Familia	**Edición**	**Transformación**
Control	`identidad`	Video original
Resolución	`full`	Resolución nativa (3840×2160) con los umbrales en píxeles reescalados
Geometría	`rot90`	Giro de 90° en sentido horario
	`rot180`	Giro de 180°
	`espejo_h`	Reflexión horizontal
Fotometría	`brillo_mas`	$I' = I + 30$
	`brillo_menos`	$I' = I - 30$
	`gamma_alta`	$I' = 255\,(I/255)^{1,4}$
	`saturacion_baja`	Canal S (HSV) multiplicado por 0,5
	`balance_calido`	Canales (B, G, R) multiplicados por (0,90; 1,00; 1,12)
Sensor	`ruido5`	Ruido gaussiano aditivo de desviación 5 niveles, semilla fija
	`jpeg40`	Recompresión JPEG con calidad 40