



Universidad San Sebastián

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería

Sede Concepción

Diseño metodológico para la caracterización de ríos intermitentes con tecnologías de Industria 4.0 y Ciencia Ciudadana

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial

Profesora guía: Dra. Katherine Brintrup Barría

Estudiante: Alejandro Becerra Arellano

Concepción, 10 de abril de 2025

© Alejandro Becerra Arellano.

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2025

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Ríos intermitentes y arroyos efímeros (IRES).....	6
2.2. Vehículos aéreos no-tripulados (UAV)	9
2.3. Reconstrucción 3D	13
2.3.1. Fotogrametría Structure from Motion (SfM)	13
2.3.2. Neural Radiance Fields (NeRF)	15
2.3.3. 3D Gaussian Splatting (3D-GS)	17
2.4. Ciencia ciudadana	21
3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	24
3.1. Metodología.....	24
3.1.1. Metodología del objetivo específico 1	24
3.1.2. Metodología del objetivo específico 2	27
3.1.3. Metodología del objetivo específico 3	29
4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1. Resultados.....	30
4.1.1. Resultados objetivo específico 1	30
4.1.2. Resultados objetivo específico 2	32
4.1.3. Resultados objetivo específico 3	40
4.2. Discusión	50
4.2.1. Importancia de una planificación adecuada	50
4.2.2. Oportunidades que brinda la reconstrucción 3D.....	51
4.2.3. Sinergia científico-ciudadana	52
5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	55

RESUMEN

En las últimas décadas se ha observado una creciente incidencia de ríos intermitentes, sistemas hídricos cuya alta variabilidad y limitada accesibilidad dificultan su caracterización. Factores como el cambio climático, la extracción de agua sin control y la degradación ambiental han acentuado esta situación, evidenciando la carencia de métodos de monitoreo adaptados a su naturaleza dinámica; mientras que en países de la Unión Europea se lideran avances en esta materia, en Chile las investigaciones son todavía muy escasas. El objetivo principal de esta investigación fue desarrollar una metodología de monitoreo hidrológico para ríos intermitentes y arroyos efímeros, integrando tecnologías de la Industria 4.0 y la participación ciudadana, orientada a generar herramientas operativas que permitan obtener información de alta calidad en zonas de difícil acceso y bajo condiciones cambiantes. La metodología se estructuró en tres ejes: primero, se planificó y ejecutó una campaña de adquisición de imágenes aéreas en la cuenca del río Lonquén mediante el uso de drones, garantizando una cobertura adecuada mediante criterios técnicos y logísticos; segundo, se aplicaron técnicas de reconstrucción tridimensional para transformar los datos en modelos precisos, que fueron georreferenciados y procesados con software especializado; y tercero, se integraron estos procesos en una propuesta metodológica que, sumado al aporte de la ciencia ciudadana, permite un monitoreo continuo y escalable del régimen intermitente. Los resultados demuestran la factibilidad del enfoque, ya que se obtuvieron modelos 3D capaces de captar variaciones morfológicas y comportamientos hidrológicos en tramos críticos, validándose la precisión de las mediciones en condiciones ambientales adversas y terrenos heterogéneos. La metodología diseñada representa un avance significativo para la caracterización de ríos intermitentes en regiones de clima mediterráneo en Chile, optimizando la obtención y análisis de datos hidrológicos y fomentando la participación comunitaria, lo que abre nuevas perspectivas para la conservación y manejo sostenible de estos ecosistemas.

Palabras clave: ríos intermitentes, drones, fotogrametría, Industria 4.0, ciencia ciudadana, monitoreo hidrológico, conservación ambiental.

ABSTRACT

In recent decades, there has been a growing incidence of intermittent rivers—hydrological systems whose high variability and limited accessibility hinder proper characterization. Factors such as climate change, uncontrolled water extraction, and environmental degradation have intensified this issue, highlighting the lack of monitoring methods adapted to their dynamic nature. While countries in the European Union are leading advances in this field, research in Chile remains extremely scarce. The main objective of this study was to develop a hydrological monitoring methodology for intermittent rivers and ephemeral streams by integrating Industry 4.0 technologies and citizen participation, aimed at generating operational tools that enable the collection of high-quality data in hard-to-access areas under changing conditions. The methodology was structured into three stages: first, a data acquisition campaign was planned and executed in the Lonquén River basin using drones, ensuring adequate coverage through technical and logistical criteria; second, 3D reconstruction techniques were applied to convert the data into precise tridimensional models, which were georeferenced and processed using specialized software; and third, these processes were integrated into a methodological proposal that, together with the contribution of citizen science, enables continuous and scalable monitoring of intermittent regimes. The results demonstrate the feasibility of the approach, as the 3D models captured morphological variations and hydrological behavior in critical reaches, validating the accuracy of the measurements even under adverse environmental conditions and heterogeneous terrain. The designed methodology represents a significant advance in the characterization of intermittent rivers in Mediterranean climate regions of Chile, optimizing hydrological data collection and analysis while promoting community engagement, thereby opening new perspectives for the conservation and sustainable management of these ecosystems.

Keywords: intermittent rivers, drones, photogrammetry, Industry 4.0, citizen science, hydrological monitoring, environmental conservation.

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La conservación de los ecosistemas acuáticos continentales (EAC) ha cobrado especial relevancia las últimas décadas, pues juegan un rol crítico en el medioambiente, albergando gran biodiversidad y brindando servicios ecosistémicos (SE) vitales para los seres humanos, como agua dulce para uso doméstico, agrícola, energético e industrial (Poff et al., 2002; Andreoli et al., 2012).

La disponibilidad del agua está intrínsecamente ligada a la existencia de los EAC, los cuales se ven amenazados por las presiones ambientales a las que son sometidos producto del cambio climático (CC) (FAO, 2020). Chile es uno de los países con mayor vulnerabilidad a los efectos del CC en el mundo, lo cual implica un serio riesgo de estrés hídrico debido al incremento de la frecuencia y gravedad de los fenómenos climatológicos futuros. Uno de los factores relevantes en esta proyección es la climatología del país, siendo las regiones con clima mediterráneo, entre Atacama y La Araucanía, las que experimentarán un mayor cambio (Araya-Osses et al., 2020).

El clima mediterráneo se caracteriza por su alta variabilidad climática y marcada estacionalidad (Skoulikidis et al., 2017), reuniendo las condiciones ideales para el desarrollo de actividades productivas como la agricultura, silvicultura y pesca. En consecuencia, se prevé que los EAC como ríos sufran alteraciones en su morfología, calidad del agua y caudal, dando paso a un régimen hidrológico intermitente producto de presiones antropogénicas, como lo son la extracción desmedida de agua, contaminación y degradación de los suelos (Poff et al., 2002).

Desde el año 2010, Chile enfrenta un fenómeno denominado ‘megasequía’ (MS), que afecta especialmente a regiones de clima árido, semiárido y mediterráneo (Muñoz et al., 2020). El período comprendido entre los años 2010 y 2015 tuvo una secuencia ininterrumpida de déficit de precipitación que osciló entre el 25% y 45% (Garreaud et al., 2017). Si bien los episodios de sequía de entre 1 y 2 años son comunes en la zona central de Chile (30°-38° S), la MS destaca por su inusual duración y gran extensión, siendo un evento sin precedentes desde Curicó hacia el sur (35° S), donde prevalece un clima mediterráneo.

Entre los EAC más comunes se encuentran los ríos, los cuales son considerados sistemas complejos vitales, heterogéneos y dinámicos en escalas de espacio y tiempo. Los ríos pueden ser clasificados según su régimen de caudal en dos categorías principales: los ríos perennes, cuyo caudal se mantiene relativamente constante en tiempo y espacio; y los ríos intermitentes y arroyos efímeros (*intermittent rivers and ephemeral streams*, IRES), los cuales ven interrumpido su caudal de forma temporal en algún punto de su extensión (Larned et al., 2010; Acuña et al., 2014). Actualmente, alrededor de un 50% de la red fluvial del mundo está formada por IRES (Datry et al., 2014; Skoulikidis et al., 2017), los cuales son el tipo de régimen dominante en regiones hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas

secas (Vander et al., 2020), por ende, su presencia en zonas de clima mediterráneo y templado es común. Los IRES están presentes en todos los continentes, incluso la Antártida (Steward et al., 2012), y se prevé que aumenten en número las siguientes décadas de manera artificial (Acuña et al., 2014; Datry et al., 2014) producto de la transformación de caudales perennes en intermitentes, teniendo como causas principales de este fenómeno la extracción de agua, la erosión de los suelos y los cambios en el clima (Steward et al., 2012).

Los IRES cuentan con características específicas que los diferencian de los perennes (Leigh et al., 2015), y brindan servicios ecosistémicos tanto en sus fases secas como húmedas: son utilizados por invertebrados terrestres como rutas de migración cuando el caudal es interrumpido, y son el hábitat de especies acuáticas y microorganismos en presencia de flujo hídrico (Datry et al., 2018).

Es en este contexto donde el monitoreo por parte de geólogos, agricultores, biólogos, ingenieros e hidrólogos resulta esencial para la preservación de ríos intermitentes (Acharya et al., 2021). Actualmente las herramientas disponibles para estos propósitos son limitadas por la difícil accesibilidad física y la falta de aplicación de tecnologías de monitoreo apropiadas (Borg et al., 2022). Los enfoques de la mayoría de las investigaciones de los EAC están puestos en ríos de régimen perenne, debido al interés que genera en la sociedad el aprovisionamiento de agua (Acuña et al., 2014; Datry et al., 2018).

El estudio de IRES se vuelve relevante, ya que, a pesar de ser el régimen predominante en la actualidad, la información disponible es considerablemente menor respecto a su contraparte (Leigh et al., 2015; Banegas-Medina et al., 2021). En los estudios de IRES suelen aplicarse metodologías diseñadas para la caracterización de ríos perennes (Stubbington et al., 2018b), lo cual tiene como consecuencia una brecha gigantesca respecto a la información disponible para un monitoreo eficaz de este tipo de cursos acuáticos.

El monitoreo de IRES en Chile es un tema poco relevante tanto en la comunidad científica como en las autoridades. Es necesario establecer metodologías y estrategias para llevar a cabo un monitoreo y diagnóstico eficaz de IRES, por lo que se propone el uso de tecnologías de Industria 4.0 como herramientas adicionales que pueden resultar especialmente útiles en el monitoreo, diagnóstico y levantamiento de información en el estudio de regímenes intermitentes, complementándose con las existentes.

1.1. Objetivos

Conocido el contexto en el cual surge la presente investigación, se definen los siguientes objetivos:

1.1.1. Objetivo general

- Desarrollar una metodología de monitoreo hidrológico para ríos intermitentes y arroyos efímeros, integrando Tecnologías de Industria 4.0 y ciencia ciudadana, con el fin de facilitar su caracterización y diagnóstico.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Planificar y ejecutar la adquisición de imágenes aéreas en la cuenca del río Lonquén mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), garantizando una cobertura adecuada que permita su posterior procesamiento y análisis.
2. Aplicar técnicas de fotogrametría digital para reconstruir un modelo 3D a partir de las imágenes capturadas, permitiendo la extracción de variables hidrológicas relevantes para la caracterización del río en su fase hidrológica.
3. Integrar los procesos de adquisición y análisis de imágenes en una propuesta metodológica que facilite el diagnóstico y seguimiento de ríos intermitentes, optimizando su monitoreo a través del uso de tecnologías emergentes y la participación comunitaria.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Ríos intermitentes y arroyos efímeros (IRES)

Los ríos intermitentes y arroyos efímeros (*intermittent rivers and ephemeral streams*, IRES) son aquellos sistemas fluviales que ven interrumpido su caudal en al menos un punto de su extensión de forma cíclica (Acuña et al., 2014; Datry et al., 2018). En la actualidad, las estimaciones indican que más del 50% de la red fluvial global está compuesta por IRES (Datry et al., 2014), siendo el tipo de régimen dominante en regiones áridas, semiáridas (Vander et al., 2020), mediterráneas y subhúmedas secas, llegando a comprender un 70% del total de cursos de agua de cabecera en estas zonas (Datry et al., 2017a). Los IRES se encuentran presentes en todos los continentes, incluida la Antártida, y son cada vez más comunes en zonas de clima templado y mediterráneo (ver Fig. 1). Albergan gran biodiversidad y brindan servicios ecosistémicos en sus alrededores (Stubbington et al., 2018a).

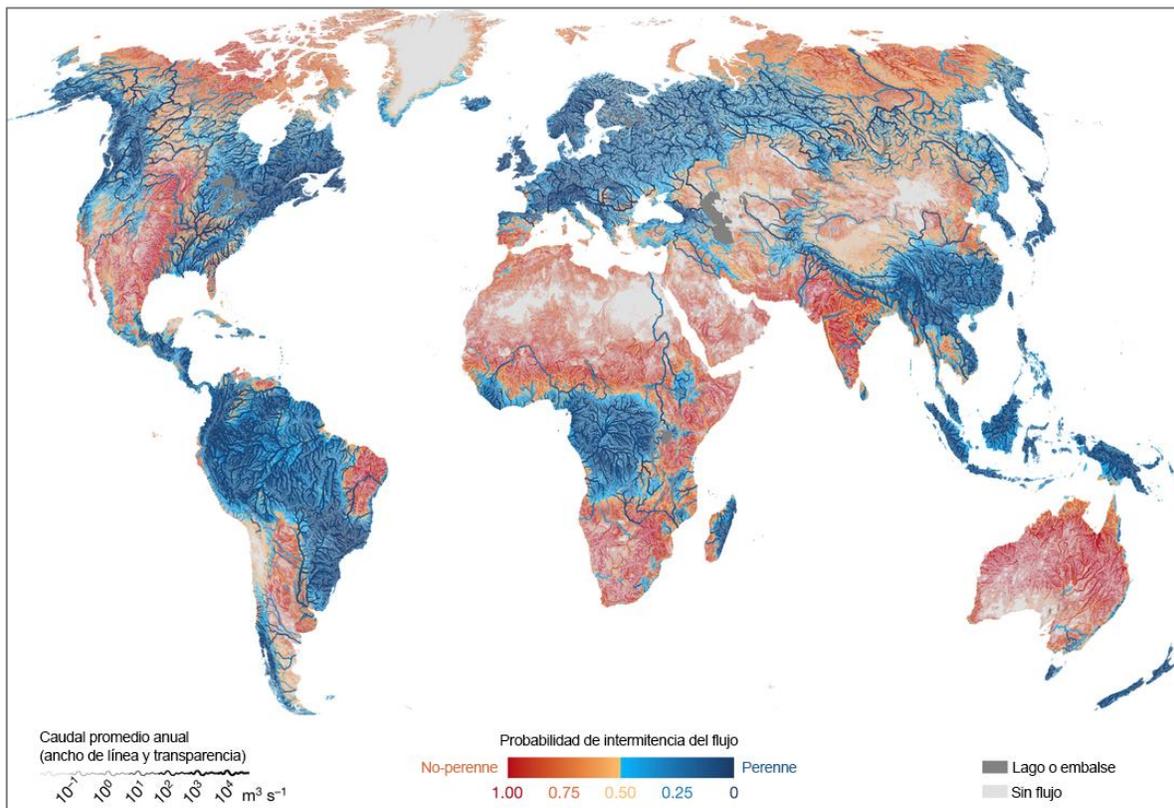


Figura 1: Mapa de distribución de ríos intermitentes y perennes. Modificado de Messenger et al. (2021).

Los IRES son uno de los EAC más comunes y dinámicos que se pueden encontrar en la naturaleza, variando en longitud y superficie (Messenger et al., 2021). En la Fig. 2 se ilustra de manera esquemática la transición de caudal a lo largo del tiempo, mostrando los distintos estados acuáticos que puede adoptar un río intermitente en función de procesos naturales como filtración en lechos porosos, evapotranspiración, congelación y cese de escorrentía

(Larned et al., 2010). Esta variación en el caudal da sustento a una gran diversidad de flora y fauna, haciendo que las especies acuáticas y terrestres colonicen o emigren, dependiendo de si la hidrología es seca o no (Fig. 3) (Snelder et al., 2013).

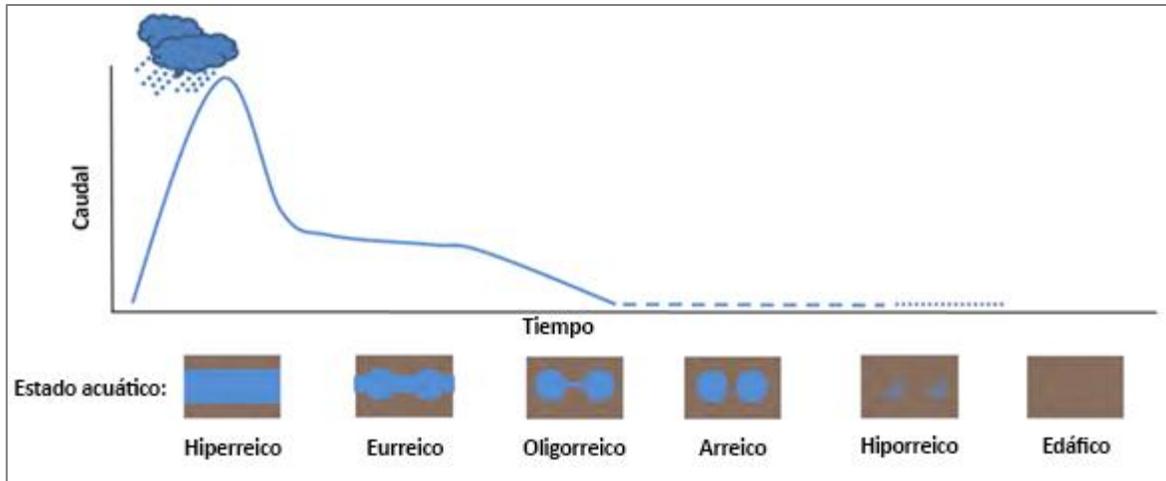


Figura 2: Ilustración de estados acuáticos de un río intermitente. Modificado de Fortuño et al., 2021.

Si bien la intermitencia de caudal en ríos es un fenómeno natural, el último siglo se ha registrado un alza significativa en la presencia de este tipo de regímenes, teniendo como causas principales factores climáticos y antropogénicos (Steward et al., 2012). Las zonas de clima mediterráneo presentan una alta variación de condiciones climáticas temporales, lo cual propicia la existencia de ríos naturalmente intermitentes (Fig. 3). Al mismo tiempo, las cuencas mediterráneas cada vez son más secas producto de la disminución de precipitaciones, por ejemplo, en Europa, las precipitaciones anuales disminuyeron en un 20% durante el siglo XX (Skoulikidis et al., 2017), provocando que el índice de evaporación sea superior al de precipitación (Messenger et al., 2021).

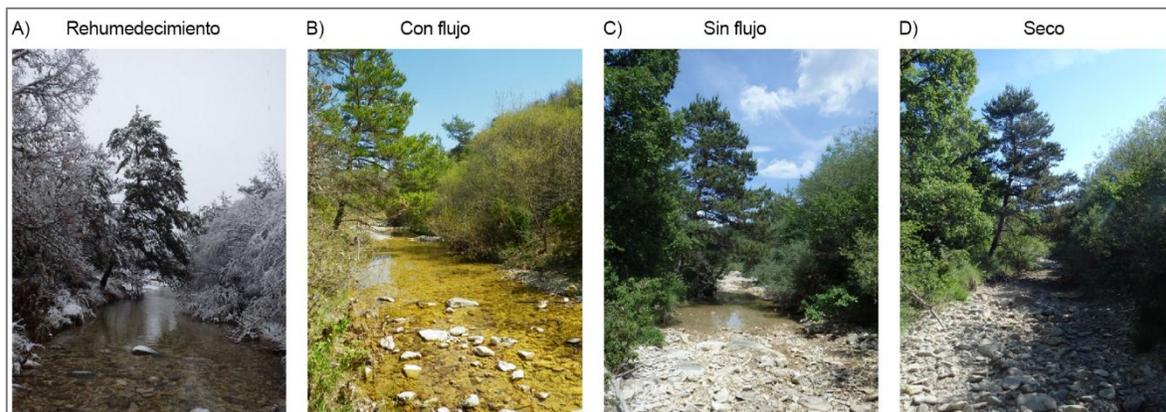


Figura 3: Fases del ciclo hidrológico de un río intermitente. Modificado de Allen et al. (2020).

La actividad antrópica es señalada como la principal responsable de acentuar los efectos del cambio climático, producto de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI),

contaminación de acuíferos, extracción desmedida de agua, erosión de suelos y alteración de ecosistemas ribereños (FAO, 2020). El estrés hídrico al que son sometidos los ríos perennes puede provocar cambios irreversibles en su hidrología, transformándose de forma artificial en ríos intermitentes (Vander et al., 2020).

La ecología de los ríos temporales ha comenzado a suscitar el interés de científicos y entes administradores de recursos hídricos la última década (Datry et al., 2011). Sin embargo, aún existen brechas importantes para la comprensión del funcionamiento de estos ríos, lo cual dificulta el desarrollo de métricas específicas para el estudio de estos cuerpos acuáticos (Stubbington et al., 2018b). Históricamente, tanto la comunidad científica como las autoridades han subestimado la importancia de los IRES, siendo considerados “sistemas de bajo valor ecológico y económico” (Datry et al., 2014; Skoulikidis et al., 2017; Stubbington et al., 2018a; Datry et al., 2018).

Es necesario que tanto los científicos como las autoridades encargadas de tomar decisiones tengan un mejor entendimiento acerca de los IRES, permitiendo realizar planificaciones adecuadas en el manejo de recursos hídricos en el futuro. Los principales desafíos a la hora de realizar un monitoreo adecuado en ríos intermitentes vienen dados por la inaccesibilidad de ciertos tramos (Fig. 4), en los que el caudal puede variar drásticamente según la fase hidrológica (húmeda o seca) y dificultar la recolección de datos en terreno (Borg et al., 2022).



Figura 4: Condiciones del terreno en fase húmeda (A) y seca (B) del Río Calavon, Francia. Extraído desde Datry et al. (2017b).

Ante esta necesidad de recopilar información, los sistemas remotos se han alzado como una herramienta válida para la cartografía y monitoreo de caudales intermitentes. Las estaciones fluviométricas son de gran utilidad para monitorear la cantidad y temporalidad de flujos de agua, sin embargo, la mayoría de IRES no cuentan con estaciones de monitoreo, pues además de los altos costos que implica la instalación, la información disponible puede no ser suficiente para realizar una caracterización adecuada para ríos intermitentes (Borg et al., 2022; Sefton et al., 2019).

Ante la falta de estaciones de monitoreo, la elaboración de mapas de zonas secas y húmedas de un río es una alternativa útil que permite registrar la ocurrencia de diferentes estados hidrológicos. Al tratarse de EAC con alta variabilidad, es imprescindible tener un monitoreo frecuente y con un alto nivel de detalle. Sin embargo, es un método altamente demandante, pues requiere de la planificación y ejecución *in situ* de campañas de caracterización, lo cual dificulta la disponibilidad de información con una mayor frecuencia, generalmente por problemas asociados a la accesibilidad del terreno y de costos de ejecución (Archarya et al., 2021).

2.2. Vehículos aéreos no-tripulados (UAV)

Los vehículos aéreos no tripulados (*unmanned aerial vehicles*, UAV), comúnmente conocidos como drones, son aeronaves diseñadas para operar sin la necesidad de un piloto humano a bordo (Nex & Remondino, 2014). Estos dispositivos se clasifican en función de criterios como su peso, resistencia, altitud de operación y radio de acción (ver Tabla 1) (Archarya et al., 2021).

Tabla 1: Clasificación de UAVs. Adaptado y modificado de Qi et al. (2018).

Categoría	Peso (kg)	Altitud (ft s.n.m.)	Radio (km)	Autonomía (h)
Micro	<2	Hasta 200	<5	<1
Mini	2-20	Hasta 3.000	<25	1-2
Pequeño	20-150	Hasta 5.000	<50	1-5
Táctico	150-600	Hasta 10.000	100-300	4-15
MALE	>600	Hasta 45.000	>500	>24
HALE	>600	Hasta 60.000	Global	>24

Al igual que con cualquier otro tipo de aeronave, los UAV son diseñados para múltiples propósitos, ya sean bélicos, civiles o científicos, debido a la versatilidad que ofrecen.

En el caso de estudios hidrológicos, los tipos más comunes de UAV utilizados son los de ala rotatoria y los de ala rígida (ver Fig. 5). La elección del tipo de dron depende de las necesidades del estudio (ver Tabla 2), considerando variables como la carga útil (*payload*), rangos de operación y la capacidad de maniobrabilidad.

Tabla 2: Ventajas y desventajas de tipos de UAV utilizados en estudios hidrológicos.

Tipo de UAV	Descripción	Ventajas	Desventajas
Ala rígida	Utilizan alas para controlar el vuelo y mantener la estabilidad.	Mayor autonomía, mayor capacidad de carga útil y mayor velocidad, menores costos de mantenimiento.	Menor maniobrabilidad y necesidad de pistas para despegue y aterrizaje.
Ala rotatoria	Utilizan hélices para mantener la estabilidad y controlar el vuelo.	Alta maniobrabilidad, capacidad de despegue y aterrizaje vertical, y adaptabilidad a espacios reducidos.	Menor autonomía, menor velocidad y mayor consumo energético.



Figura 5: Ejemplos de UAVs de ala rotativa (A) y ala rígida (B). Extraído desde Archarya et al. (2021).

Los UAV son solo un componente dentro de los sistemas aéreos no tripulados (*unmanned aerial systems*, UAS), y según lo detallado por Spence & Mengistu (2015), se componen por:

- Estación de control en tierra (ECT): Punto en tierra desde donde se opera el UAV.
- Piloto y observador: Encargados de controlar el vuelo y monitorear el entorno.
- Planificación y procesamiento: El desarrollo del plan de vuelo, la gestión del *payload* y el posterior procesamiento de las imágenes capturadas.
- *Payload*: Es el equipamiento adicional que transporta el UAV, como sensores y cámaras, y es crucial para realizar tareas específicas durante el vuelo. Los sensores más comunes utilizados en estudios hidrológicos con UAV se describen en la Tabla 3.

Tabla 3: Ventajas y desventajas de los principales sensores utilizados en estudios hidrológicos. Adaptado y modificado de Acharya et al. (2021).

Sensor	Aplicaciones hidrológicas	Ventajas	Desventajas
RGB	Fotogrametría aérea, modelos digitales de elevación (DEM), batimetría, monitoreo de inundaciones, flujo superficial, calidad del agua, nieve y hielo	Económico, portátil, común, imágenes de alta calidad, fácil integración.	Baja resolución espectral, sin calibración geométrica ni radiométrica.
Multiespectral	Batimetría, inundaciones, interacción entre aguas superficiales y subterráneas, calidad del agua.	Captura múltiples longitudes de onda, permite reconstrucción geométrica y calibración radiométrica.	Costoso, procesamiento complejo, puede requerir correcciones, compatibilidad limitada con UAV.
Hiperespectral	Batimetría, inundaciones, interacción entre aguas superficiales y subterráneas, hidrogeoquímica, mapeo de ríos y humedales.	Alta resolución espectral en el espectro visible e infrarrojo cercano (VIS-NIR).	Costoso, baja relación señal-ruido, compatibilidad limitada con UAV y software de vuelo, requiere correcciones radiométricas y atmosféricas.
Microondas	Inundaciones, monitoreo del nivel y descarga de ríos, humedad del suelo, altimetría, nieve.	Puede operar en condiciones de baja visibilidad (ej. nubosidad).	Sensible a la rugosidad de la superficie.
Térmico	Mapeo de temperatura, drenaje, evapotranspiración, humedad del suelo, plumas de turbidez, descarga subterránea, humedales.	Detecta un amplio rango de temperaturas, relativamente económico.	Sensible a la temperatura, baja resolución espacial, requiere correcciones, afectado por rugosidad y emisividad de la superficie.
LiDAR	Reconstrucción 3D, batimetría, elevación del agua, monitoreo de inundaciones, nieve, erosión, humedales.	Genera nubes de puntos densas, alta precisión geométrica.	Costoso, compatibilidad limitada con UAV, requiere filtrado del terreno.

Utilizar UAVs permite obtener una mayor resolución espacial y temporal, debido a que se pueden llevar a cabo estudios con mayor frecuencia y detalle respecto a otras alternativas, permitiendo alcanzar zonas de difícil acceso sin poner en riesgo la integridad de personas, debido a su alta maniobrabilidad, capacidad de despegue y aterrizaje vertical en el caso de UAVs de hélice (Jiang et al., 2020; Elkhachy, 2021). Sumado a lo anterior, su implementación supone un ahorro en tiempo y dinero respecto a métodos de muestreo tradicionales, como la realización de campañas de muestreo en terreno, o uso de imágenes satelitales.

Sin embargo, su uso no está exento de desafíos, pues existen limitaciones técnicas como la autonomía de baterías, capacidad de *payload*, resistencia a condiciones climáticas adversas, entre otros. Los estudios con UAV quedan sujetos a factores ambientales como la velocidad del viento, temperatura, humedad y hostilidad del entorno (Elkhrachy, 2021).

En la actualidad, los UAV tienen aplicaciones en múltiples campos, siendo considerados una herramienta útil y versátil (Nex & Remondino, 2014). Algunos ejemplos de aplicaciones destacadas incluyen:

- Agricultura: Monitoreo de salud de cultivos, detección de daños y evaluación del terreno (Velusamy et al., 2022).
- Silvicultura: Evaluación de parcelas forestales, vigilancia de incendios y control de vegetación (Torresan et al., 2016).
- Arqueología y Arquitectura: Mapeo de sitios y estructuras con tomas de baja altitud (ver Fig. 6) (Nex & Remondino, 2014; Fiz et al, 2022).
- Monitoreo Ambiental: Estudios de terrenos, aguas superficiales, volcanes, costas y recursos naturales (Nex & Remondino, 2014).
- Manejo de Emergencias: Toma de imágenes temprana para planificación de rescates y operaciones en áreas contaminadas o peligrosas (Boccardo et al., 2015).

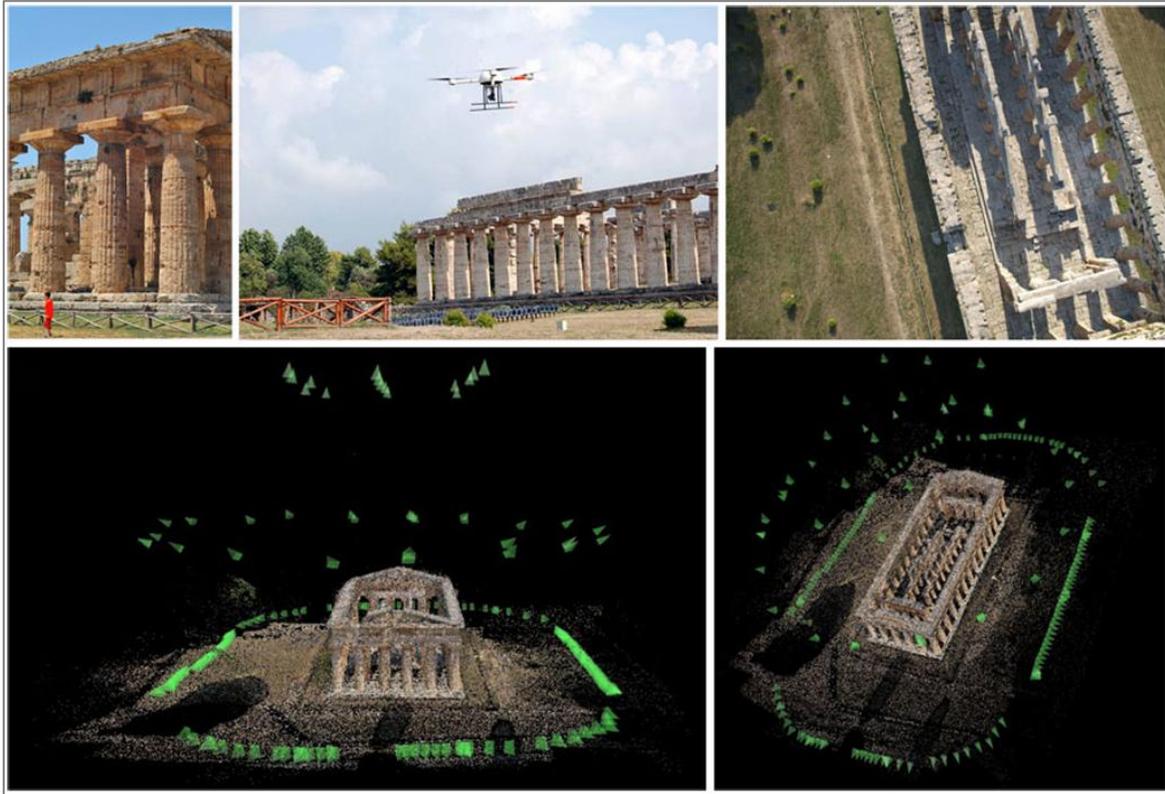


Figura 6: Realización de tomas horizontales, oblicuas y verticales con UAV del Segundo Templo de Hera, Paestum, Italia.
Extraído desde Nex & Remondino (2014).

Las ventajas ofrecidas por los UAV, según indica Spence & Mengistu (2015) es que “tienen el potencial de revolucionar los estudios hidrológicos de la misma forma que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) lo hicieron hace más de 30 años”.

2.3. Reconstrucción 3D

2.3.1. Fotogrametría Structure from Motion (SfM)

La fotogrametría *Structure from Motion* (SfM) es una técnica que permite generar modelos o escenarios tridimensionales (3D) a partir de una secuencia de imágenes bidimensionales (2D). Esta metodología se basa en principios de triangulación, similares a los de la visión binocular humana, pero utilizando múltiples puntos de vista para percibir la profundidad y la geometría de un objeto o escenario (Iglhaut et al., 2019). A diferencia de la visión binocular, que requiere de solo dos puntos de vista, el SfM requiere de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos, ya sea porque la cámara o el objeto se encuentren en movimiento.

La fotogrametría SfM es conocida por su capacidad de generar modelos 3D a partir de imágenes heterogéneas y sin un orden específico, debido a la capacidad de identificar puntos en común entre las distintas imágenes, sin importar la escala, ángulos y

orientaciones en que se encuentren (Wei et al., 2013). A diferencia de la fotogrametría tradicional, esta técnica permite generar escenarios 3D sin necesidad de información previa sobre la posición de la cámara o la ubicación de Puntos de Control en Tierra (*ground control points*, GCP) en el momento de la captura. No obstante, los GCP pueden ser utilizados de forma complementaria para mejorar la precisión del modelo, especialmente en aplicaciones que requieren un nivel alto de exactitud (Elkhrachy, 2021).

El proceso de fotogrametría SfM comienza con la captura de múltiples imágenes de un objeto o escena desde distintos ángulos, asegurando un solapamiento suficiente para identificar puntos en común (Fig. 7). Luego, el software detecta características clave en las imágenes y las compara para encontrar coincidencias, estableciendo relaciones espaciales entre ellas (James et al., 2019).

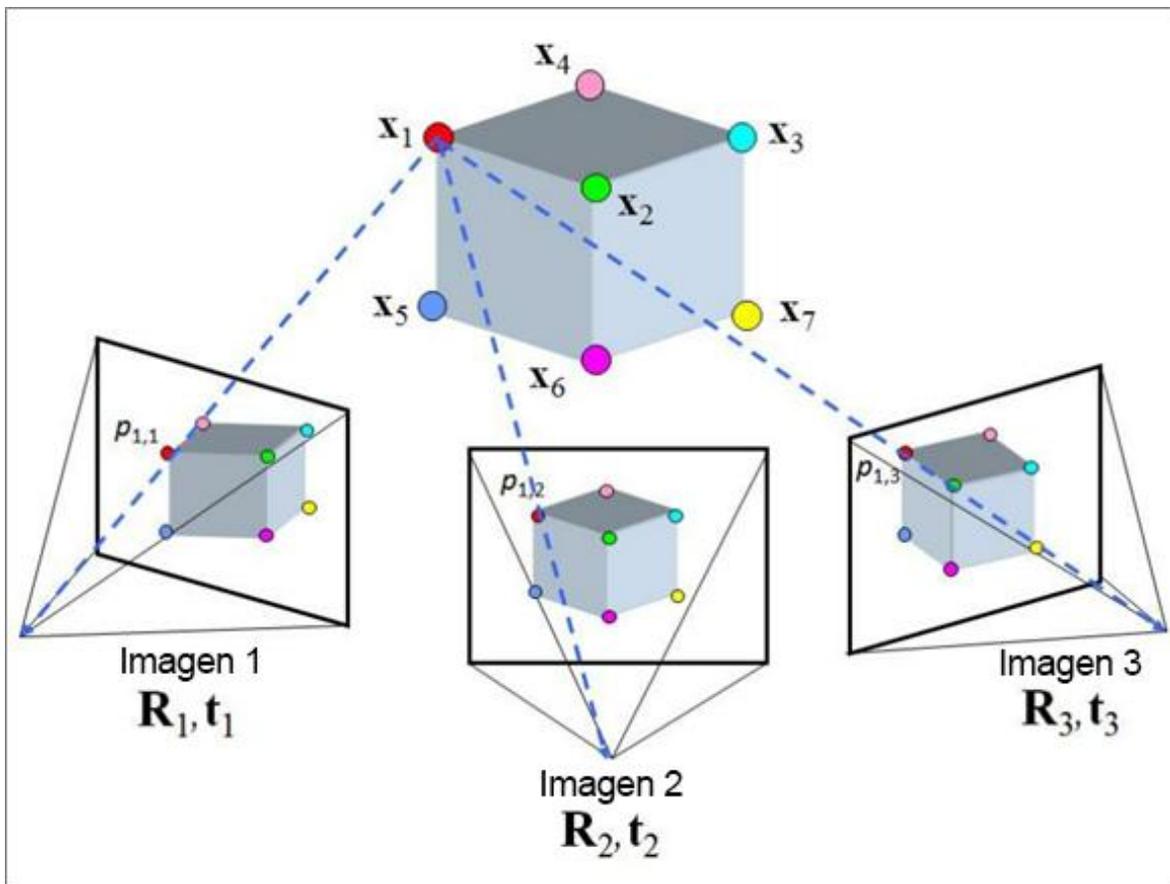


Figura 7: Funcionamiento de la fotogrametría SfM. Modificado de Gómez et al. (2023).

En la Fig. 7 se tiene:

- (R_x, t_x) , que representan, respectivamente, la matriz de rotación y el vector de traslación asociados a la cámara en la imagen x , donde $x \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$. Estas definen la ubicación de la cámara en el espacio tridimensional.

- x_i denota la posición de un punto i en el espacio 3D.
- $p_{i,x}$ es la proyección del punto 3D x_i sobre la imagen x , es decir, su posición equivalente en coordenadas 2D para esa imagen.

Estas relaciones permiten al algoritmo reconstruir la posición de los puntos 3D mediante triangulación, estimando al mismo tiempo la geometría de la escena y la trayectoria de la cámara (Gómez et al., 2023).

A partir de estas coincidencias, SfM calcula la posición de los puntos en 3D, generando una nube de puntos inicial y estimando el movimiento de la cámara. Para corregir errores acumulados, se aplica un ajuste de parámetros conocido como *bundle adjustment*, mejorando la precisión del modelo. Posteriormente, se densifica la nube de puntos mediante mapas de disparidad, obteniendo mayor detalle en la geometría de la escena (Fig. 8). Finalmente, el modelo se texturiza con las imágenes originales, logrando un resultado fotorrealista útil para estudios de alta precisión.

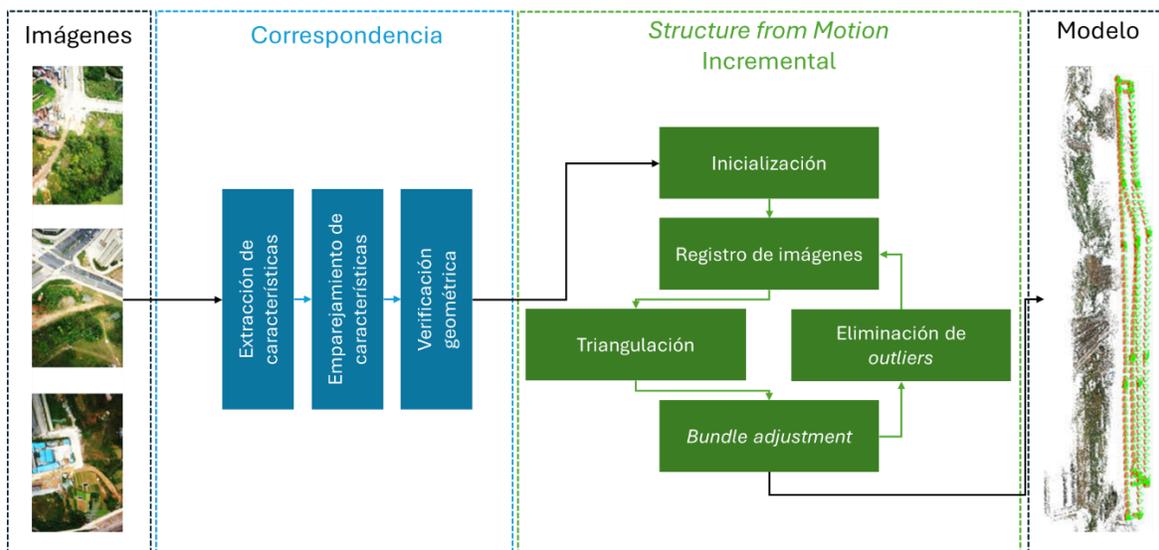


Figura 8: Diagrama de flujo de la fotogrametría SfM. Modificado de Jiang et al. (2020).

2.3.2. Neural Radiance Fields (NeRF)

Los campos de radiación neuronal (*Neural Radiance Fields*, NeRF) son un método basado en *deep learning* (aprendizaje profundo, DL) que permite realizar reconstrucciones tridimensionales fotorrealistas a partir de imágenes 2D. Este método fue introducido en 2021 por Mildenhall et al., por lo que se trata de una técnica relativamente nueva que aún está en constante mejora y desarrollo. A diferencia de técnicas de fotogrametría como SfM, que genera nubes de puntos o mallas 3D explícitas, NeRF representa una escena como un campo de radiación neuronal, lo que permite una representación continua y con un nivel de detalle considerablemente superior.

NeRF representa una escena como una función continua, transformando valores de coordenadas 3D (x, y, z) y direcciones de visión (θ, ϕ) en valores de densidad (σ) y color (r, g, b) (ver Fig. 9). La función continua en NeRF se define como:

$$F: (x, y, z, \theta, \phi) \rightarrow (\sigma, r, g, b) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- (x, y, z) : Coordenadas 3D de un punto en el espacio.
- (θ, ϕ) : Dirección de visión, representada por ángulos que indican desde dónde se está mirando el punto.
- σ : Densidad del punto en el espacio 3D.
- (r, g, b) : Color del punto en la dirección de visión dada.

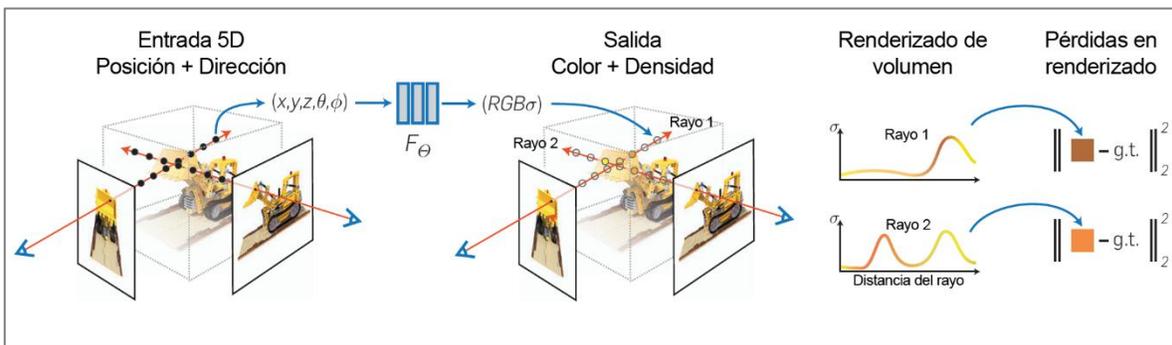


Figura 9: Parámetros de entrada y salida. Modificado de Mildenhall et al. (2021).

La densidad σ indica si un punto en el espacio 3D pertenece a un objeto (σ alto) o al fondo (σ bajo), mientras que el color (r, g, b) representa la apariencia visual del punto en la dirección de visión dada. De esta forma, la distribución de los colores que corresponden a cada punto es dinámica en función desde el punto donde se observe (Fig. 10).

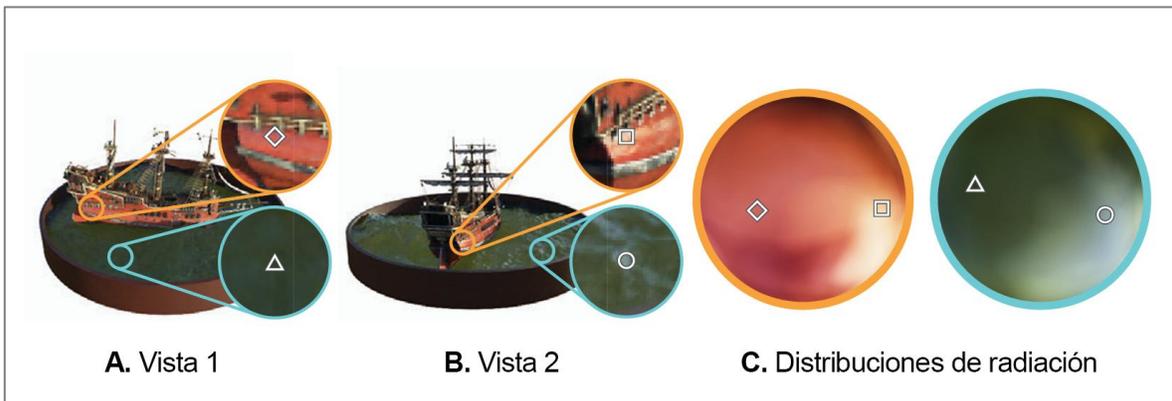


Figura 10: Variación de color en dos mismos puntos en función del punto de vista del observador. Modificado de Mildenhall et al. (2021).

El proceso de NeRF comienza con la captura de una secuencia de imágenes 2D tomadas desde distintas perspectivas en torno a un objeto o escena. Estas imágenes, junto con las

posiciones y orientaciones de la cámara, se utilizan para entrenar una red neuronal profunda (*deep neural network*, DNN). Durante el entrenamiento, la red neuronal aprende a predecir la densidad y el color de cada punto en el espacio 3D, optimizando la representación de la escena mediante un proceso de renderizado volumétrico. Este proceso traza rayos desde la cámara, muestrea puntos a lo largo de cada rayo, y acumula los valores de σ y (r, g, b) para generar imágenes 2D fotorrealistas (Fig. 11) (Mildenhall et al., 2021).

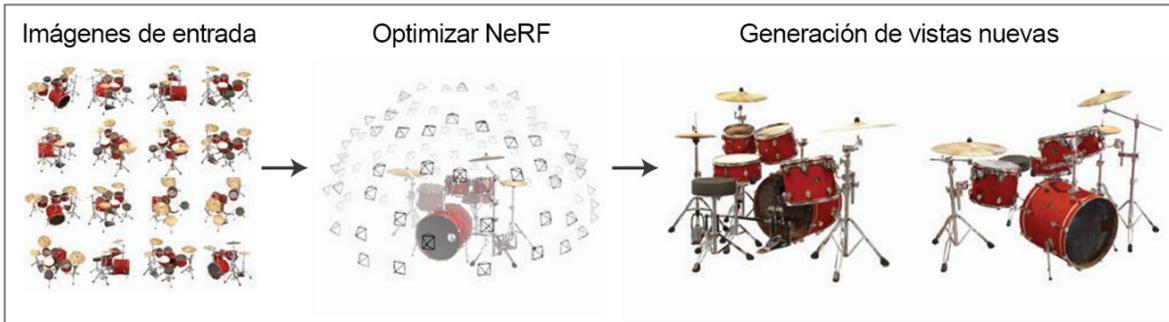


Figura 11: Vistas generadas a partir del solapamiento de una serie de imágenes 2D. Modificado de Mildenhall et al. (2021).

Una de las ventajas clave de NeRF es su capacidad para generar modelos 3D de alta calidad a partir de imágenes 2D sin necesidad de cámaras especializadas. Sin embargo, es necesario conocer las posiciones y orientaciones de la cámara para cada toma, lo que permite a la red neuronal reconstruir la geometría y la apariencia de la escena con precisión. Si bien lo anterior puede suponer un problema, existen soluciones como *COLMAP*, un software de licencia abierta que permite obtener una aproximación de los valores necesarios solo con las imágenes tomadas (Wang et al., 2021).

2.3.3. 3D Gaussian Splatting (3D-GS)

En el contexto de la reconstrucción y síntesis de vistas 3D, la técnica de *3D Gaussian Splatting* (3D-GS) surge como una propuesta innovadora que se distingue por su representación explícita de escenas mediante el ajuste de millones de funciones gaussianas. A diferencia de los métodos basados en representaciones implícitas, 3D-GS permite describir la distribución del campo luminoso en el espacio de forma directa, lo que facilita tanto la optimización de parámetros como la edición interactiva de la escena (Chen & Wang, 2024; Wu et al., 2024).

En 3D-GS, una escena se representa mediante un conjunto de primitivas volumétricas definidas por funciones gaussianas. Cada gaussiana se describe matemáticamente por la siguiente fórmula:

$$G(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}((X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2)\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- (x, y, z) : Coordenadas del punto clave o píxel.
- (X, Y, Z) : Coordenadas en el espacio 3D.
- σ : Desviación estándar que controla la dispersión del gaussiano.

El primer factor corresponde a la amplitud, que determina el valor máximo de la gaussiana, y el segundo, el decrecimiento exponencial que muestra como el gaussiano disminuye a medida que se aleja del centro (x, y, z) (Pant, 2024).

La suma de estos gaussianos entrega como resultado una superficie 3D continua y suavizada que se aproxima a la forma definida por los n puntos clave:

$$F(X, Y, Z) = \sum_{i=1}^n G_i(X, Y, Z) \quad (\text{Ec. 3})$$

Esta propiedad diferenciable es clave, ya que posibilita el uso de algoritmos de optimización basados en gradiente (por ejemplo, descenso de gradiente) para ajustar los parámetros de manera iterativa. El objetivo es minimizar una función de pérdida, típicamente definida como el error entre las imágenes renderizadas y las imágenes reales, lo que asegura que el modelo se adapte de forma precisa a los datos de entrada (Wu et al., 2024).

La Figura 12 compara el proceso de renderizado entre NeRF y 3D-GS. El primero (Fig. 12a) utiliza un enfoque de “mapeo inverso”, donde se trazan rayos desde la cámara y se muestrean puntos a lo largo de ellos. Cada punto es evaluado de forma secuencial por una red neuronal (*multilayer perceptron*, MLP) para estimar su color (c) y opacidad (α). En cambio, 3D-GS (Fig. 12b) emplea un enfoque de mapeo directo, proyectando todas las gaussianas 3D directamente sobre la imagen (*splatting*). La contribución de cada gaussiana se calcula según su influencia sobre cada píxel, evaluando la función gaussiana en las coordenadas proyectadas. Este método permite una rasterización paralela y diferenciable, lo que reduce significativamente los tiempos de entrenamiento y habilita actualizaciones en tiempo real. En contraste con el enfoque iterativo y dependiente de red neuronal de NeRF, 3D-GS ofrece una alternativa más eficiente y escalable.

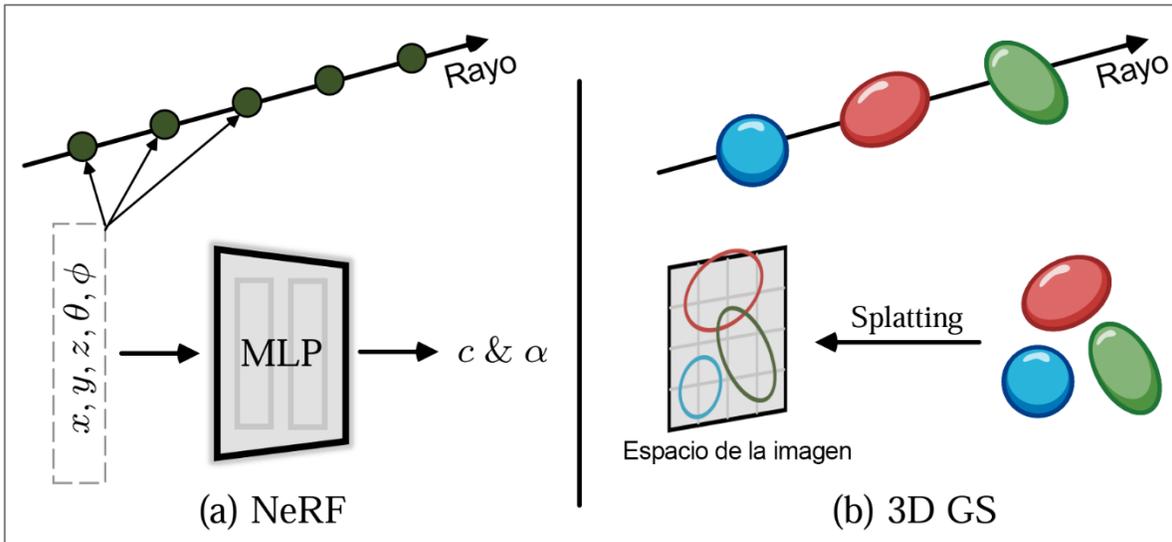


Figura 12: Comparativa de procesamiento de datos entre NeRF(a) y 3D-GS (b). Modificado de Chen & Wang (2024).

Además, la parametrización explícita con gaussianas facilita la incorporación de restricciones o regularizaciones, como limitar la dispersión de cada función para evitar artefactos, y asegurar la continuidad en la representación de la escena. Cada parámetro tiene una interpretación física, lo que permite ajustes directos e intuitivos en el modelo.

Entre las principales ventajas de 3D-GS destaca la rapidez en el renderizado, lo cual es esencial para aplicaciones interactivas y de tiempo real. La representación explícita y diferenciable facilita la edición directa de la escena, permitiendo ajustes puntuales sin la necesidad de reentrenar modelos completos. Además, la optimización de parámetros basada en métodos de gradiente contribuye a una integración eficiente de la información visual, lo que se traduce en una solución operativa de menor complejidad en comparación con técnicas que requieren infraestructura computacional intensiva.

A pesar de sus ventajas operativas, 3D-GS presenta ciertas limitaciones inherentes a su modelo de parametrización. En particular, la aproximación mediante gaussianas puede resultar insuficiente para capturar los detalles finos de escenas complejas, lo que se traduce en una fidelidad visual inferior cuando se compara con técnicas de mayor resolución. La calidad final del modelo depende en gran medida de la parametrización inicial y de la eficacia del proceso de optimización, lo cual puede ser sensible a condiciones de iluminación y variaciones geométricas extremas.

La evolución en la reconstrucción 3D ha dado lugar a múltiples enfoques, entre los que se destacan métodos como SfM y NeRF. Mientras que SfM se basa en la triangulación geométrica a partir de múltiples imágenes para generar nubes de puntos, y NeRF utiliza redes neuronales para obtener representaciones implícitas de alta fidelidad, 3D-GS prioriza la eficiencia y la posibilidad de edición. Cada uno de estos métodos presenta fortalezas y debilidades: SfM es robusto en condiciones de buena cobertura visual, NeRF permite

capturar sutiles variaciones de la escena pero con altos requerimientos computacionales, y 3D-GS ofrece un punto medio entre ambas, suponiendo una opción operativa más ágil a costa de una menor resolución en ciertos contextos (ver Tabla 4).

Tabla 4: Tabla comparativa entre SfM, NeRF y 3D-GS.

Característica	Structure from Motion (SfM)	Neural Radiance Fields (NeRF)	3D Gaussian Splatting (3D-GS)
Principio de Funcionamiento	Usa la triangulación de imágenes múltiples para calcular la estructura 3D y la posición de la cámara.	Utiliza redes neuronales para aprender la representación volumétrica de una escena a partir de imágenes 2D.	Representa escenas como una nube de puntos con gaussianas 3D optimizadas, permitiendo renderizado eficiente.
Requisitos de Entrada	Múltiples imágenes con solapamiento y parámetros conocidos de la cámara.	Imágenes 2D sin necesidad de conocer los parámetros exactos de la cámara.	Imágenes 2D, similar a NeRF, pero con menor dependencia de procesamiento intensivo.
Proceso de Reconstrucción	Extrae puntos clave, encuentra coincidencias entre imágenes, triangula y optimiza con <i>bundle adjustment</i> .	Aprende una función implícita que mapea coordenadas espaciales a color y densidad.	Representa la escena con gaussianas que se optimizan en función de la visualización y la posición de la cámara.
Representación Final	Nube de puntos dispersa o densa, malla 3D con texturas.	Volumen continuo aprendido por la red neuronal.	Nube de gaussianas distribuidas en el espacio 3D, permitiendo renderizado directo.
Precisión Geométrica	Alta, pero depende de la calidad de las imágenes y de la calibración de la cámara.	Alta fidelidad visual, pero con menor precisión geométrica que SfM.	Alta precisión visual y geométrica, con balance entre ambas.
Tiempo de Procesamiento	Moderado a alto (horas a días dependiendo del <i>dataset</i>).	Muy alto (días de entrenamiento en GPUs).	Significativamente más rápido que NeRF (minutos a horas).
Capacidad de Renderizado	Requiere conversión a mallas para visualización rápida.	Lento, necesita múltiples muestreos de la red neuronal para cada píxel.	En tiempo real, ya que las gaussianas pueden renderizarse directamente.
Ventajas clave	<ul style="list-style-type: none"> • Compatible con software CAD/GIS. • No requiere entrenamiento de IA. • Mayor control sobre la geometría de salida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran realismo en iluminación y texturas. • Puede generar vistas sintéticas de ángulos no vistos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Renderizado en tiempo real. • Balance entre precisión geométrica y visual. • Más eficiente en almacenamiento y procesamiento que NeRF.
Desventajas clave	<ul style="list-style-type: none"> • Puede tener errores acumulados. • Sensible a mala calibración de la cámara. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrenamiento lento y costoso. • No genera mallas 3D directamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es tan ampliamente adoptado aún. • Mayor consumo de memoria que SfM.

Característica	Structure from Motion (SfM)	Neural Radiance Fields (NeRF)	3D Gaussian Splatting (3D-GS)
	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil en superficies sin texturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere renderizado mediante la red neuronal. 	<ul style="list-style-type: none"> • No siempre supera a NeRF en calidad visual.

2.4. Ciencia ciudadana

La ciencia ciudadana se entiende como la participación activa de personas no especializadas en procesos destinados a la producción de conocimiento científico. Esta puede adoptar múltiples formas, desde actividades presenciales de recolección de datos realizadas por miembros de la comunidad, hasta metodologías basadas en plataformas digitales que permiten el aporte colaborativo de información mediante procesos de *crowdsourcing* (Dickinson et al., 2012). En cualquiera de sus variantes, implica una apertura del quehacer científico hacia la ciudadanía, permitiendo que actores externos al mundo académico contribuyan directamente a la generación de datos e incluso, en algunos casos, a la formulación de preguntas de investigación (Buytaert et al., 2014).

En el contexto ambiental, ha emergido como una herramienta poderosa, especialmente en regiones donde la escasez de datos y las limitaciones de recursos obstaculizan los esfuerzos científicos tradicionales. Los IRES son particularmente difíciles de monitorear debido a su naturaleza dinámica y temporal (Stubbington et al., 2018a). En climas mediterráneos, semiáridos y áridos, como los presentes en Chile, estos sistemas hídricos resultan esenciales tanto para los ecosistemas como para las comunidades humanas, pero siguen siendo poco estudiados.

Los proyectos de ciencia ciudadana, en su mayoría, se basan en evaluaciones visuales de las condiciones de los arroyos, las que pueden ser realizadas por comunidades locales mediante el uso de smartphones. A partir de las brechas de información detectadas por grupos de investigación universitarios, se han desarrollado aplicaciones móviles como *CrowdWater* (Suiza), *RiuNet* (España) y *En Quête d'Eau* (Francia), pensadas para facilitar la recolección de datos sobre presencia de agua, flujo y condiciones del cauce. Estas aplicaciones permiten a los ciudadanos reportar observaciones que luego se utilizan para mapear la extensión y ocurrencia de IRES (Truchy et al., 2023; Scheller et al., 2024), involucrando activamente a la comunidad en estudios hidrológicos. Esta interacción no solo acerca la ciencia a la ciudadanía, sino que también permite visibilizar la importancia de conservar los EAC, al mismo tiempo que se generan insumos valiosos para el estudio hidrológico.

A partir de estos casos, han surgido iniciativas a escalas nacionales, como *StreamTracker* en Estados Unidos y *DRYRivERS* en Europa. Esta última ha sido utilizada con éxito en 19 países, donde se han recopilado más de 3.600 observaciones, demostrando la escalabilidad de estos enfoques (Truchy et al., 2023). En ambos casos, los voluntarios capturan imágenes de caudales utilizando smartphones, generando así series temporales sobre los estados de flujo (Truchy et al., 2023).

El volumen de información generada por la ciudadanía resulta especialmente útil para el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial enfocados en análisis hidrológicos. Tal es el caso de *RiverSnap*, en Hannover (Alemania), donde una base de datos recopila fotografías de ríos enviadas por ciudadanos con el objetivo de entrenar un algoritmo capaz de estimar el área ocupada por agua superficial, a partir de dichas imágenes. El modelo se calibra combinando fotogrametría SfM con sensores LiDAR para su georreferenciación (Moghimi & Welzel, 2024).

Además de las evaluaciones visuales, los proyectos de ciencia ciudadana han incorporado mediciones *in situ* y técnicas de *crowd-sensing*. Por ejemplo, en la cuenca del Mar Menor (España), se implementó un sistema que combina monitoreo in situ del flujo con recolección móvil de datos, permitiendo medir caudales en arroyos efímeros (Cecilia et al., 2023). Este enfoque ha sido especialmente útil en regiones propensas a inundaciones repentinas, donde la obtención de datos en tiempo real resulta crucial para la gestión de los recursos hídricos.

En paralelo, la estructuración jerárquica de redes de arroyos temporales se ha explorado como método para reconstruir patrones de humedecimiento y secado de los cauces. A través del análisis de datos generados por la ciudadanía, investigadores han podido identificar el orden en que se activan los distintos segmentos del arroyo durante la expansión de la red. Este enfoque fue aplicado en Suiza, utilizando datos recolectados mediante la aplicación *CrowdWater*, y analizado con métodos basados en grafos (Scheller et al., 2024).

La tecnología desempeña un papel central: además de las aplicaciones móviles, se han desplegado sensores microfluídicos de bajo costo para medir parámetros como fosfatos y nitratos, incluso en Chile (Yévenes et al., 2022). La gamificación también ha emergido como una estrategia eficaz para mejorar la calidad de los datos. Por ejemplo, *CrowdWater* incorpora elementos lúdicos para incentivar la participación, mientras que algoritmos de aprendizaje automático analizan las fotografías subidas por los usuarios, reduciendo así los márgenes de error.

Proyectos implementados en México, donde se capacitó a grupos locales para monitorear la calidad del agua mediante insectos acuáticos (Rodríguez-Contreras et al., 2024), o en la cuenca del Río Itata (Región del Ñuble, Chile), donde comunidades colaboraron activamente en programas de monitoreo de indicadores fisicoquímicos, destacan cómo la ciencia ciudadana no solo entrega datos valiosos, sino que además fomenta la apropiación ambiental (Yévenes et al., 2022).

Es importante tener en consideración que el éxito de las iniciativas que incorporan ciencia ciudadana en su metodología depende de una participación comunitaria efectiva y sostenida en el tiempo. La precisión de los datos generados por ciudadanos puede verse afectada por interpretaciones subjetivas u observaciones esporádicas, como ocurrió en una

experiencia documentada en Suiza (Scheller et al., 2023). La interacción directa con las comunidades también se vuelve clave al momento de incorporar tecnologías como parte del método, tal como lo evidenció un proyecto de monitoreo en Perú: aquellos miembros de la comunidad que no tuvieron contacto directo con los organizadores no mostraron interés en participar (Rangecroft et al., 2022).

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

3.1.1. Metodología del objetivo específico 1

Se estableció una campaña de muestreo con el objetivo de explorar aplicaciones de Tecnologías de la Industria 4.0 para la caracterización y monitoreo de ríos intermitentes en zonas de clima mediterráneo en Chile, con un bajo costo de implementación y operación. Con el asesoramiento del personal del Laboratorio de Industria 4.0 de la Universidad San Sebastián (UNLI), se definieron las herramientas necesarias para llevar a cabo el estudio: un UAV, el uso de algoritmos de inteligencia artificial (IA) para reconstrucciones tridimensionales y software de procesamiento y modelado 3D.

Para escoger el área de estudio, se definieron los siguientes criterios: (1) la hidrología del río a estudiar debe ser intermitente, (2) la climatología de la cuenca del río debe corresponder a un clima mediterráneo, (3) preferentemente, el río debe contar con estudios o investigaciones previas, (4) se priorizó la cercanía geográfica de la zona de estudio con respecto al campus de la Universidad San Sebastián sede Tres Pascualas (Concepción, Chile).

A partir de los criterios establecidos, el área de estudio que cumplía con los requisitos corresponde a la cuenca del Río Lonquén, ubicada en la comuna de Trehuaco, Región del Ñuble, Chile (Fig. 13). La cuenca tiene una superficie de 1.075 km² y una longitud de 60 km. La cabecera del Lonquén se encuentra en la Cordillera de la Costa y termina confluyendo en el Río Itata.

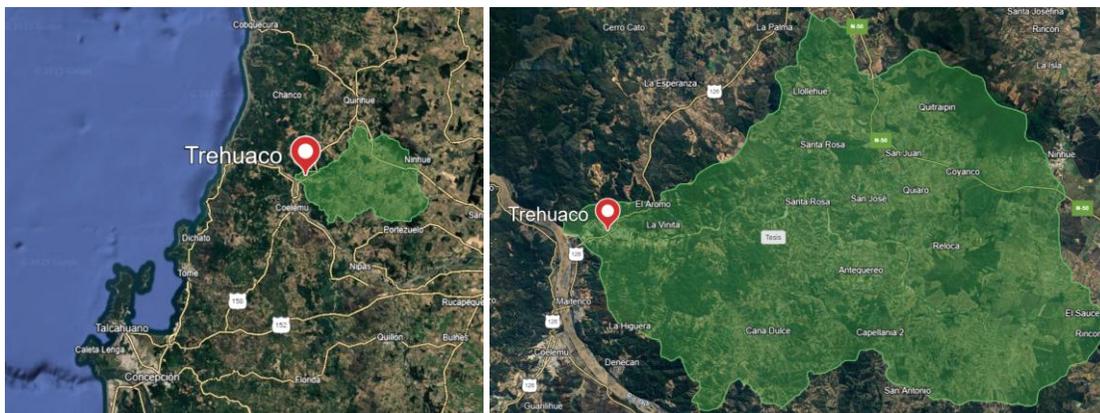


Figura 13: Ubicación de cuenca del Río Lonquén entre Estero Corontas y Río Itata. (Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de SIMBIO, 2024).

La subcuenca del Río Lonquén presenta un clima templado costero húmedo, caracterizado por temperaturas medias anuales de aproximadamente 13 °C (ver Fig. 14) y precipitaciones promedio entre 1.000 y 1.200 mm anuales. Estas precipitaciones tienen una distribución estacional marcada, con un período seco de alrededor de cuatro meses (CIREN, 2019). Este

régimen influye directamente en el flujo del río y las condiciones hídricas de la subcuenca, convirtiéndola en un área de interés para estudios relacionados con ríos intermitentes.

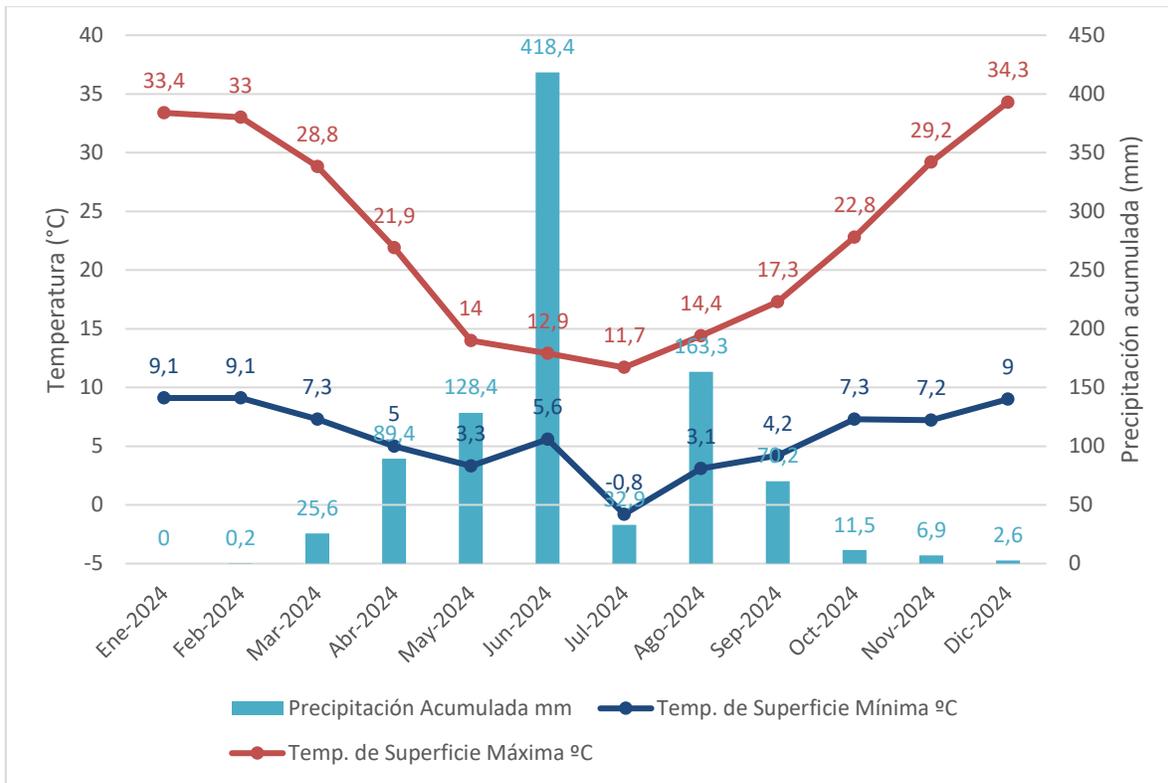


Figura 14: Gráfico de temperaturas máximas y medias promedio mensuales en 2024 de Trehuaco. Elaborado a partir de datos de la Red de Agrometeorología del INIA (2025).

Según el Censo Nacional Agropecuario de 2007, en Trehuaco existen 789 explotaciones silvoagropecuarias productivas, que abarcan 271 km² en total. La mayoría de estas explotaciones corresponden al sector agropecuario (92,4%), aunque solo ocupan el 42,17% de la superficie total. En contraste, el sector forestal, que representa el 7,6% de las explotaciones, utiliza el 57,83% de la superficie silvoagropecuaria en la comuna (ver Fig. 15) (CIREN, 2019).

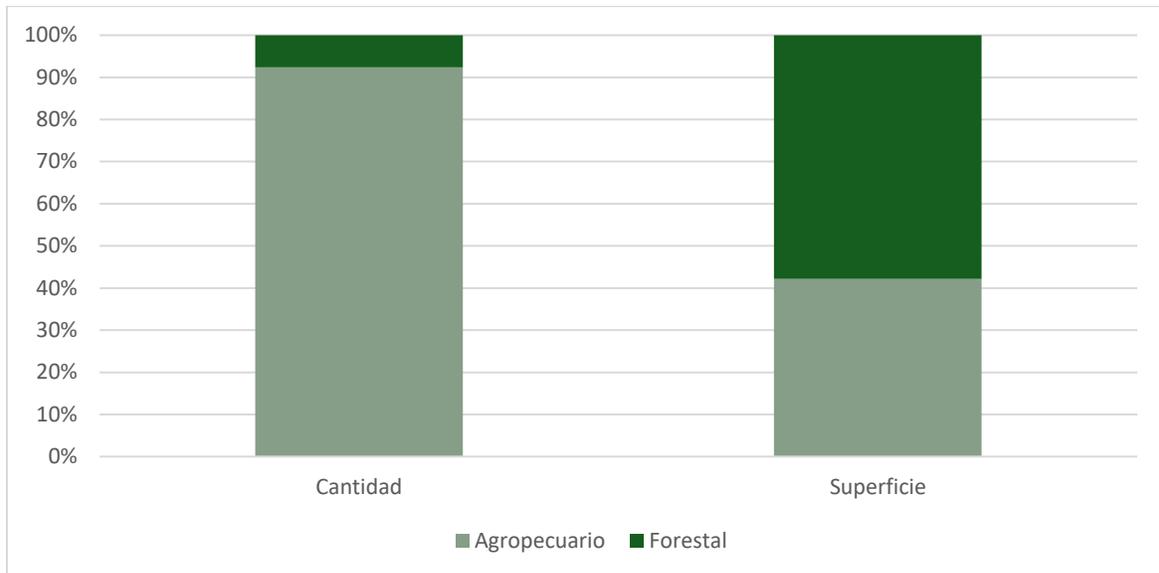


Figura 15: Gráfico 'Cantidad vs Superficie utilizada' de explotaciones silvoagropecuarias en Trehuaco, Región del Ñuble, a partir de datos de CIREN (2019).

En cuanto a las características del suelo, se observan variaciones significativas dependiendo de la localización: en el sector litoral predominan los suelos de praderas costeras desarrollados sobre terrazas marinas, mientras que en la Cordillera de la Costa destacan los suelos pardo-forestales, formados sobre rocas graníticas y pizarras metamórficas (CIREN, 2023).

Previo a la realización de la campaña en terreno, se consultaron los pronósticos meteorológicos correspondientes, procurando evitar su realización en un día con precipitaciones, altas velocidades de viento y presencia de niebla. También se planificó la logística necesaria, enfocada en el transporte de personas y las herramientas necesarias.

Lo último en la etapa de planificación fue la definición del modelo de UAV que se utilizaría para realizar la adquisición de imágenes aéreas, lo cual estuvo sujeto a la disponibilidad de esta herramienta por parte del UNLI, quienes pusieron a disposición del estudio un dron *DJI Mini 3* (ver Fig. 16 y Tabla 5), haciéndose cargo de su operación para los fines de la investigación.



Figura 16: UAV modelo DJI Mini 3, utilizado en la presente investigación.

Tabla 5: Especificaciones técnicas del UAV DJI Mini 3. Fuente: Sitio web de DJI. (<https://www.dji.com/>).

Atributo	Valor
Peso	249 g
Dimensiones (largo × ancho × alto)	Plegado: 48,0×90,0×62,0 mm Desplegado: 251×362×72,0 mm
Velocidad máxima ascendente	5,0 m/s (\cong 18,0 km/h)
Velocidad máxima descendente	3,5 m/s (\cong 12,6 km/h)
Velocidad máxima horizontal	16,0 m/s (\cong 57,6 km/h)
Tiempo máximo de vuelo	38 minutos
Radio de operación	\approx 18,0 km
Máxima velocidad de viento soportada	10,7 m/s (\cong 38,5 km/h)
Rango de temperatura soportado	-10 °C a 40 °C

Una vez definido lo anterior, se debe establecer la configuración de los parámetros de vuelo como altura, solapamiento entre imágenes deseado y velocidad del UAV.

Finalmente, se llevó a cabo la campaña de muestreo en el área de interés, con el objetivo de tomar imágenes aéreas de alta calidad de comparar la variabilidad morfológica del río entre los distintos tramos en una fase hidrológica.

3.1.2. Metodología del objetivo específico 2

Los archivos de video correspondientes a cada toma aérea fueron cargados a la plataforma *Luma AI*, la cual mediante el algoritmo 3D-GS genera modelos tridimensionales para cada uno. Cada escenario renderizado puede ser exportado en archivos de extensión *PLY*, correspondientes a nubes de puntos. Posteriormente, cada nube de puntos debe ser georreferenciada y redimensionada, lo cual fue realizado con el software *CloudCompare*. Una vez terminada la edición, la nube de puntos fue exportada como un archivo de

extensión E57, para ser visualizado en *ReCap*, software que permite realizar mediciones geomáticas en un entorno virtual (ver Fig. 17).

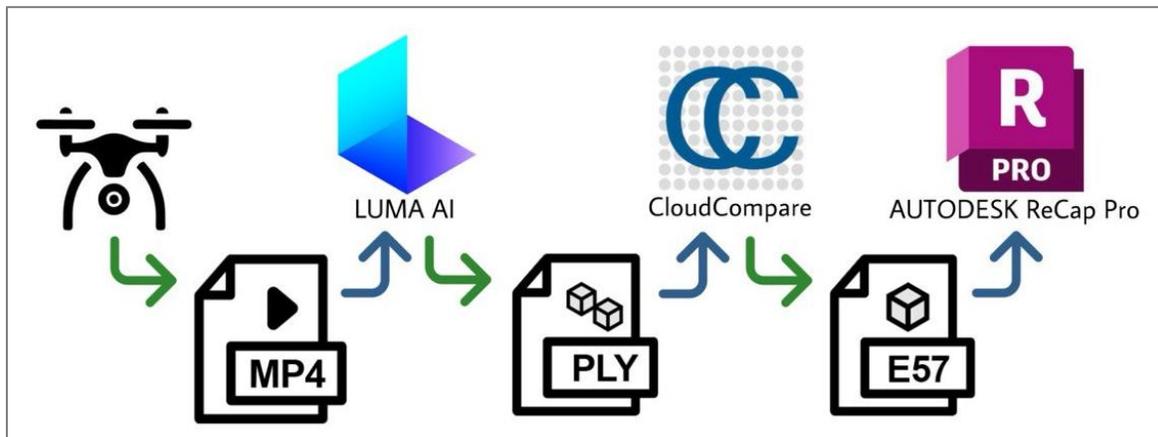


Figura 17: Diagrama de flujo desde captura de imágenes con UAV hasta su importación a ReCap.

Dado que en la campaña no se emplearon GCP, ni se contó con el sistema de GPS del UAV, se necesitó establecer una escala métrica aproximada. Para esto, se utilizó como referencia la longitud del Puente Lonquén, ubicado en el km. 69 de la Ruta Los Conquistadores, mismo lugar desde donde se realizaron las tomas N°1 y N°2. La longitud del puente fue medida en *Google Earth*, arrojando un valor estimado de 80 m como referencia. En *CloudCompare*, estas mismas distancias se marcaron sobre el modelo 3D usando la herramienta *Point Pair Picking* (ver Fig. 18), y posteriormente se aplicó un escalado global para ajustar las dimensiones del modelo a la realidad. Este proceso garantizó que las mediciones posteriores (como áreas, longitudes y volúmenes) en el modelo renderizado fueran consistentes con las dimensiones reales del terreno.

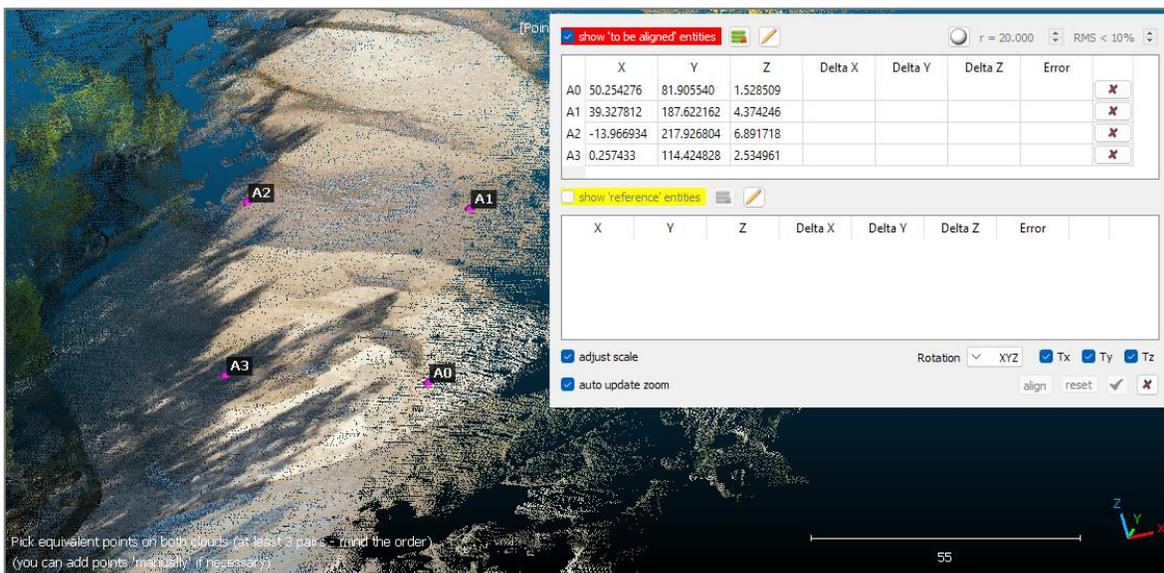


Figura 18: Georreferenciación con CloudCompare.

Realizados los ajustes, el modelo fue exportado a *ReCap*, donde se eliminaron aquellos puntos que generan distorsiones en la visualización o que no sean relevantes. Con tales correcciones, y haciendo uso de las herramientas que el software provee, es posible llevar a cabo mediciones de longitud, área, profundidad, morfología de la superficie y análisis visuales del entorno.

3.1.3. Metodología del objetivo específico 3

Se realizó una revisión bibliográfica sistemática para identificar las variables utilizadas en la caracterización hidrológica de ríos intermitentes. Para ello, se seleccionaron publicaciones científicas y estudios técnicos publicados entre, priorizando aquellos que abordaran métricas específicas para su monitoreo. La búsqueda incluyó fuentes internacionales con dos enfoques predominantes: estudios hidrológicos y diagnósticos provenientes de la Unión Europea y Estados Unidos, y desarrollos tecnológicos aplicados al monitoreo de ríos, principalmente investigados en China.

Se recopilaron y analizaron distintos métodos empleados en la recolección de datos, integrando tanto enfoques tradicionales como innovadores. Entre estos, se consideraron mediciones directas en campo, modelado hidrológico y el uso de sensores remotos, destacando la aplicación de UAVs para la captura de patrones espaciales de intermitencia y la técnica de *3D Gaussian Splatting* para la visualización de la variabilidad hidrológica. Asimismo, se incorporaron iniciativas de ciencia ciudadana que, mediante aplicaciones móviles, permitieron complementar los datos con información georreferenciada reportada por usuarios.

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados objetivo específico 1

La planificación de la campaña de muestreo en terreno comenzó con una revisión de las condiciones meteorológicas en las fechas cercanas al inicio del proyecto, cuyos criterios principales fueron la ausencia de precipitaciones, velocidades de vientos bajo los 25 km/h y una alta visibilidad. En paralelo con lo anterior, la logística necesaria para la visita constó de un vehículo para el transporte de cinco personas y un UAV (y sus complementos). Siguiendo lo previamente descrito, el día planificado para la adquisición de imágenes aéreas fue el miércoles 11 de septiembre de 2024, considerando la disponibilidad horaria del personal, la previsión de condiciones climáticas favorables y los factores ambientales relevantes.

Los puntos geográficos en las que se establecieron las Estaciones de Control en Tierra (ECT) tuvieron en consideración la accesibilidad para el vehículo de transporte, la densidad de vegetación que permitiera un despegue, vuelo y aterrizaje seguro del UAV, y por último, la cercanía respecto a lugares donde se realizaron estudios previamente, en particular los de Brintrup et al. (2017) y Banegas-Medina et al. (2021), con el fin de mantener una continuidad y complementar la información disponible. De esta manera, los tramos definidos para la toma de imágenes aéreas tuvieron lugar en la cuenca del tributario Río Lonquén, en las inmediaciones de la comuna de Trehuaco, constando de cuatro ECT detalladas a continuación (ver Tabla 6 y Figs. 19 y 20).

Tabla 6: Estaciones de control en tierra (ECT) definidos para la campaña.

Tramo	Cuerpo de agua	Sector referencial	Coordenadas (GMS)
A	Río Lonquén	Vega de Los Reyes.	36°25'38.7"S 72°39'50.9"W
B	Río Lonquén	Desembocadura del Estero Leuquén.	36°25'55.2"S 72°37'12.1"W
C	Estero Goropeumo	-	36°26'39.8"S 72°39'22.8"W
D	Estero Los Robles	Goropelimo.	36°27'04.4"S 72°38'13.1"W

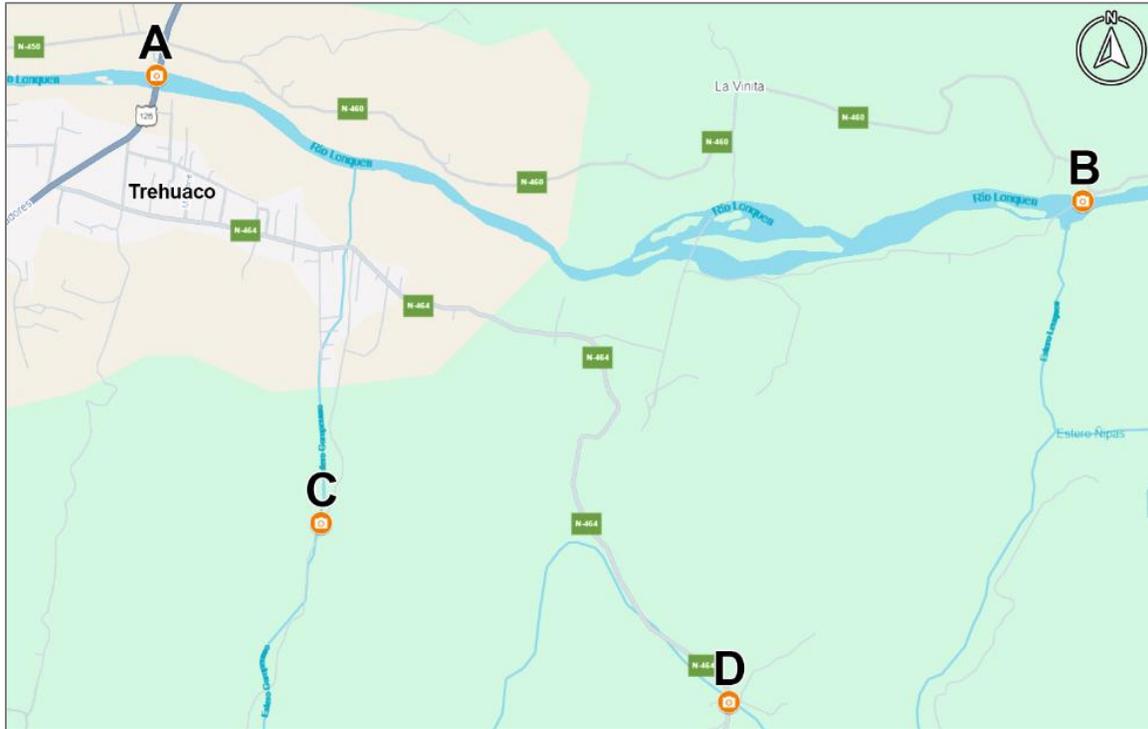


Figura 19: Mapa de estaciones de control en tierra (ECT) de campaña de muestreo.

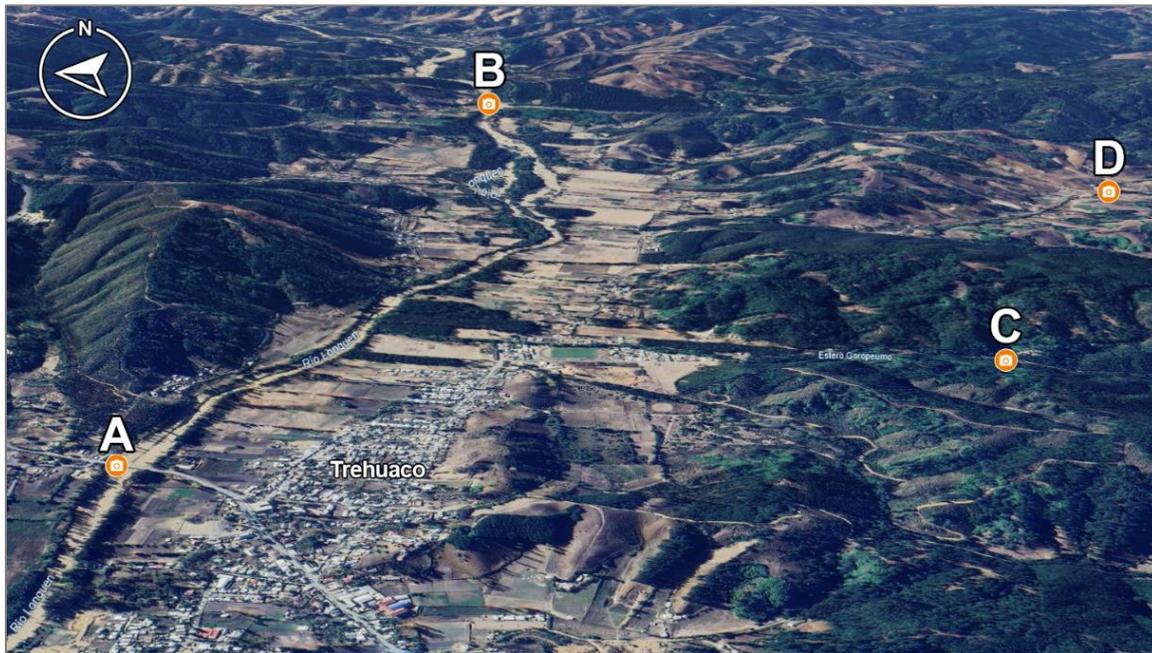


Figura 20: Imagen satelital de estaciones de control en tierra (ECT) de campaña de muestreo.

Las rutas aéreas fueron planificadas para garantizar la cobertura adecuada de los puntos seleccionados, y las capturas fueron georreferenciadas utilizando las coordenadas proporcionadas por el UAV. La campaña se llevó a cabo bajo condiciones climáticas

favorables (bajo viento y sin precipitaciones), y se consideró la autonomía de vuelo del UAV, estimada en 30 minutos, con el apoyo de cargadores portátiles de batería (conocidos como *power banks*) para extender el tiempo de operación.

En la campaña, se obtuvieron 8 videos en formato MP4 con resolución *Full HD* (1920x1080 pixeles) a una tasa de fotogramas de 29,97 FPS. La duración de cada toma se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7: Duración de vuelos en el Río Lonquén.

Toma (N°)	Tramo de muestreo	Lugar	Duración (mm:ss)
1	A	Río Lonquén	03:07
2	A	Río Lonquén	02:15
3	B	Río Lonquén	02:08
4	C	Estero Goropeumo	00:31
5	C	Estero Goropeumo	01:18
6	D	Estero Los Robles	02:02
7	D	Estero Los Robles	01:21
8	D	Estero Los Robles	01:24

4.1.2. Resultados objetivo específico 2

Los 8 archivos de video en formato *MP4* obtenidos con el UAV fueron cargados a la plataforma *Luma AI* (ver Fig. 21), donde tras cerca de 30 minutos, se tuvo a disposición los modelos 3D de cada escenario.

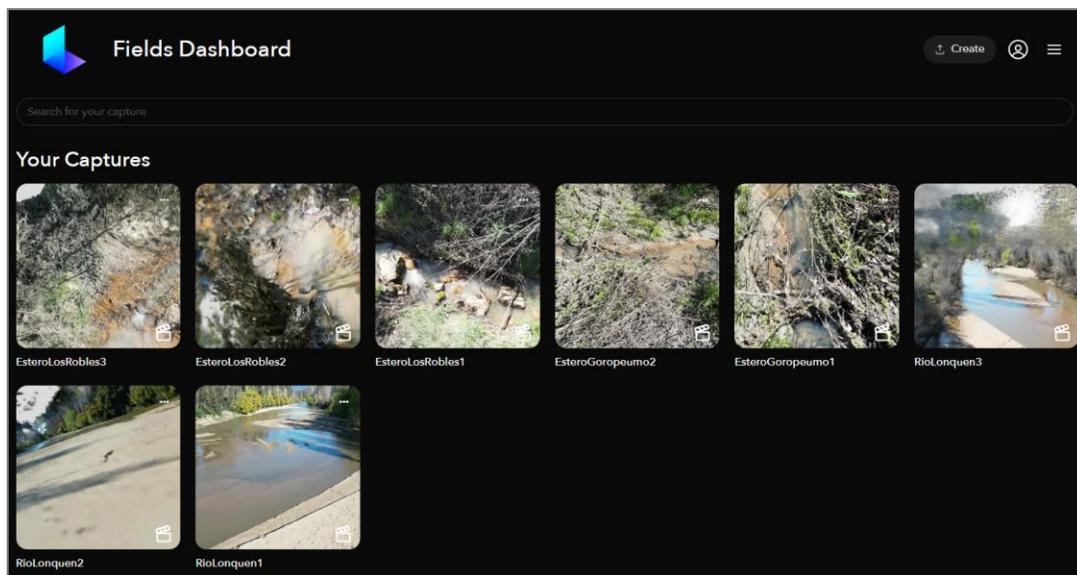


Figura 21: Panel de modelos 3D generados en Luma AI.

Las nubes de puntos generadas por *Luma AI* fueron óptimas en 6 de los 8 archivos, siendo posible distinguir el escenario a simple vista y sin distorsiones significativas (Figs. 22, 24, 25, 26, 27 y 29). Tales distorsiones se generaron principalmente en áreas con alta densidad de vegetación, con presencia de reflejos en el agua (ver Fig. 23 y 28).



Figura 22: Renderizado óptimo de toma N°1 (Tramo A; Río Lonquén) en Luma AI.



Figura 23: Renderizado con distorsiones de toma N°2 (Tramo A, Río Lonquén) en Luma AI.



Figura 24: Plano cenital del renderizado óptimo de toma N°3 (Tramo B, Río Lonquén) en Luma AI.



Figura 25: Plano cenital del renderizado óptimo de toma N°4 (Tramo C, Estero Goropeumo) en Luma AI.



Figura 26: Plano cenital del renderizado óptimo de toma N°5 (Tramo C, Estero Goropeumo) en Luma AI.



Figura 27: Plano cenital del renderizado óptimo de toma N°6 (Tramo D, Estero Los Robles) en Luma AI.



Figura 28: Renderizado distorsionado de toma N°7 (Tramo D, Estero Los Robles) en Luma AI.



Figura 29: Renderizado óptimo de toma N°8 (Tramo D, Estero Los Robles) en Luma AI.

En los modelos generados se visualizan objetos como ramas (Fig. 30), árboles, arbustos y desechos plásticos (Fig. 31), tanto en el lecho como en el borde ribereño.



Figura 30: Vegetación y ramas en Estero Los Robles (Renderizado N°8).



Figura 31: Residuo plástico en Estero Goropeumo (Renderizado N°4).

Tras la exportación en formato PLY de los escenarios, estos fueron trabajados con el software *CloudCompare* para llevar a cabo los ajustes de orientación, escalado y depuración de puntos mal generados (Fig. 32).

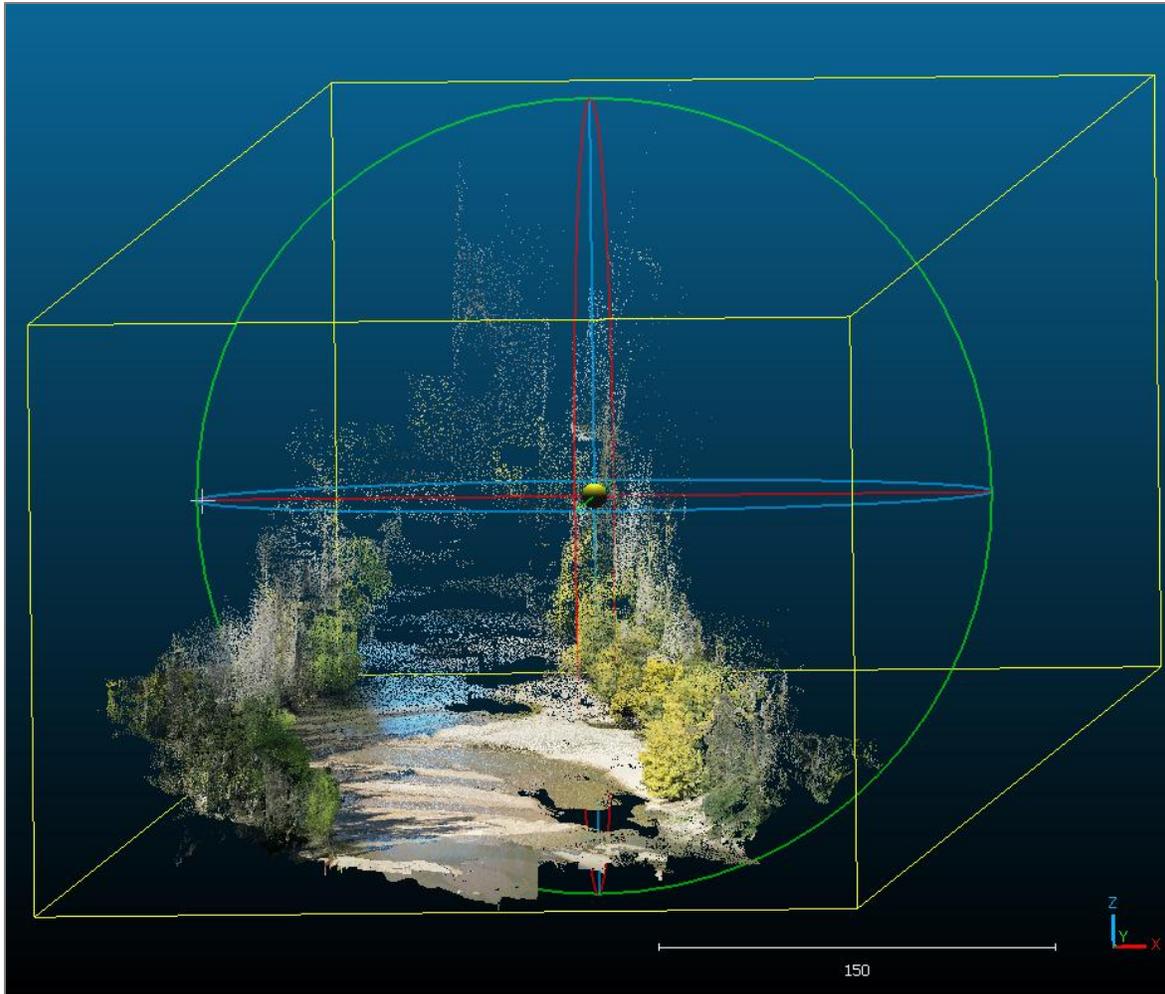


Figura 32: Visualización de nube de puntos de la toma N°1 en *CloudCompare*.

Posteriormente, tras exportar la nube de puntos desde *CloudCompare* en formato E57, mediante el software *Autodesk ReCap*, se llevó a cabo un análisis de las funcionalidades que este ofrece aplicado al modelo tridimensional generado a partir de tomas aéreas con UAV, donde se identificó que es posible extraer las siguientes variables hidromorfológicas:

- Áreas de agua superficial: Es posible delimitar manualmente las zonas de agua utilizando el contraste visual presente en el modelo, diferenciando las áreas de agua de los sedimentos circundantes.
- Geometría del cauce: Se pueden obtener mediciones relacionadas con el ancho del cauce y la profundidad relativa en determinadas secciones, lo que permite inferir la morfología del sistema fluvial.

- Fragmentación del flujo: La herramienta permite identificar la distribución de pozas o remansos dentro del cauce, así como medir la distancia entre ellas, facilitando la caracterización de la continuidad o segmentación del flujo.
- Métricas derivadas: A partir del procesamiento del modelo 3D, se vislumbra la posibilidad de calcular indicadores como la fracción intermitente del flujo, el volumen de almacenamiento en pozas y la pendiente media del cauce a lo largo del perfil longitudinal.

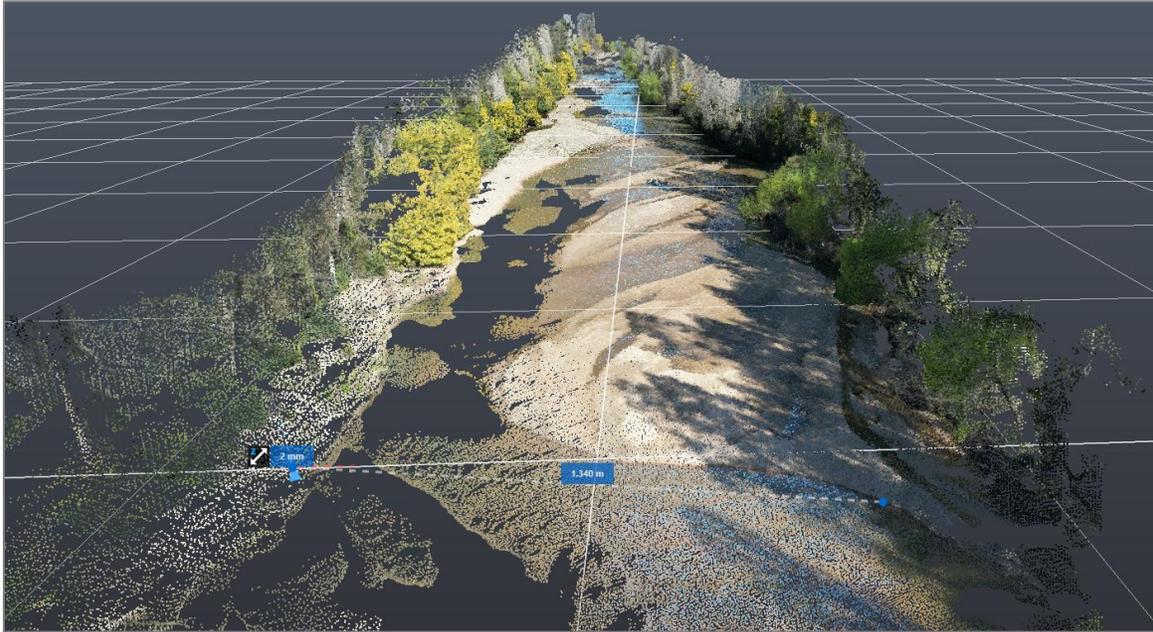


Figura 33: Herramienta de medición de longitud de ReCap para el modelo N°1 (Tramo A, Río Lonquén).

A partir de la revisión bibliográfica, se identificaron las principales métricas utilizadas para caracterizar el comportamiento hidrológico, morfológico y ecológico de los ríos intermitentes. Dichas métricas permiten evaluar la dinámica de flujo, las interacciones con la cuenca y los efectos sobre los ecosistemas, y se pueden agrupar en tres categorías principales:

i. Métricas hidrológicas

Estas métricas permiten describir la variabilidad del flujo y la disponibilidad hídrica en ríos intermitentes:

- Intermittencia y duración del flujo: Se evalúa mediante el número de días sin flujo, la duración de episodios de caudal y la frecuencia de interrupciones en el flujo (Oueslati et al., 2015).

- Variabilidad del flujo: Se utilizan índices como el coeficiente de variación del caudal, la intensidad de las crecidas y la previsibilidad de eventos de flujo para evaluar la estabilidad del régimen hidrológico (Fortesa et al., 2020).
 - Coeficiente de escorrentía e índice de flujo base: Estos indicadores cuantifican la proporción de precipitación convertida en escorrentía y el flujo sostenido durante periodos secos (Mengistie et al., 2023; Mengistie et al., 2024).
 - Comportamiento de histéresis: Se analizan las relaciones entre caudal y carga de sedimentos para entender los ciclos de erosión y deposición en los ríos intermitentes (Fortesa et al., 2020).
- ii. Métricas morfológicas y de uso de suelo

Estas métricas evalúan la interacción entre el río y su entorno, determinando la influencia de factores físicos en la dinámica hidrológica:

- Área y nivel de la superficie del agua: Se emplean imágenes satelitales, UAVs y algoritmos de inteligencia artificial para estimar cambios en la extensión del agua y en los niveles de caudal a lo largo del tiempo (Moghimi & Welzel, 2024).
- Uso del suelo y características de la cuenca: Se consideran la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la morfología de la cuenca para determinar su efecto en la duración e intensidad de los periodos de flujo y sequía (Leone et al., 2024).

iii. Métricas de calidad del agua y estado ecológico

Estas métricas permiten evaluar el impacto de la variabilidad hidrológica sobre la calidad del agua y los ecosistemas asociados:

- Nutrientes y sedimentos: Se monitorean las concentraciones de nitratos, fosfatos y sedimentos en suspensión para evaluar la calidad del agua y la salud del ecosistema (Von Gönner et al., 2024).
- Métricas ecológicas: Se emplean comunidades de macroinvertebrados y poblaciones de peces como bioindicadores del estado ecológico del río, reflejando alteraciones en la conectividad y disponibilidad de hábitats (Skoulikidis et al., 2011).

4.1.3. Resultados objetivo específico 3

La propuesta metodológica que se desarrolló a partir de la revisión bibliográfica se detalla a continuación:

- (1) Planificación de adquisición de datos

Todo estudio debe empezar delimitando el área de estudio, el cual debe considerar factores como el tipo de régimen fluvial, climatología, extensión longitudinal del río, accesibilidad y fase hidrológica en la que se encuentra. Junto con lo anterior, es necesario establecer la frecuencia con la que las campañas de adquisición de imágenes se llevarán a cabo, para lo cual debe considerarse qué tan alta es la variabilidad de permanencia de caudal. Esta información puede ser obtenida a través del diálogo directo con habitantes de comunidades cercanas, o consultando fuentes oficiales, catastros o investigaciones previas realizadas en el río, en el caso de que estén disponibles. La frecuencia mínima sugerida para el monitoreo de los ríos intermitentes de clima mediterráneo en Chile es realizar a lo menos una campaña en terreno cada 30 días.

Una vez realizado lo anterior, debe decidirse el tipo de UAV que más se ajuste a las necesidades del estudio, considerando factores como la maniobrabilidad, autonomía de vuelo, capacidad de carga, velocidad máxima, radio de operación, costos económicos, entre otros elementos. También es imprescindible establecer qué elementos serán parte del *payload* del UAV a partir del tipo de datos que se busca obtener, considerando siempre la capacidad de carga de la aeronave. Los UAV de múltiples hélices son especialmente recomendados para el monitoreo de ríos intermitentes debido a la versatilidad, maniobrabilidad, costo económico y dificultad de operación respecto a su contraparte.

(2) Ejecución de adquisición de datos

Previo al despliegue del UAV, es necesario estimar parámetros como la altura, velocidad y distancia que el dron recorrerá. Tales parámetros estarán estrechamente relacionados a las características tanto del UAV como de los elementos que conforman el *payload* de este. Por ejemplo, en un UAV equipado con sensores RGB (*Red, Green & Blue*) para un muestreo que busca capturar todo el ancho del lecho, la altura óptima variará dependiendo del angular que la cámara tenga, teniendo que volar más alto para captar más superficie si el campo de visión es menor (ver Fig. 34). Una aproximación para establecer la altura ideal para operar, asumiendo una cámara con un campo de visión de 90°, puede venir dada dividiendo a la mitad el valor de la longitud transversal del lecho, es decir, si el ancho del río es de 50 m, la altura ideal para captar imágenes sería de 25 m.



Figura 34: Representación ilustrativa de un campo de visión de una cámara de UAV.

Considerado lo anterior, el siguiente paso es el establecimiento de los GCP, que son puntos físicos ubicados en el terreno, cuyas coordenadas geográficas se deben conocer con precisión, permitiendo georreferenciar las imágenes capturadas (ver Fig. 35). Los puntos deben distribuirse de manera uniforme en el área de estudio y cada uno debe estar señalizado con un objeto visible desde el aire (p. ej. un cuadrado, cruz o un artefacto de dimensiones conocidas). Idealmente, se deben colocar 4 GCPs para generar un dimensionado adecuado a partir de la distancia entre cada uno de los puntos escogidos.



Figura 35: Implementación de GCPs para tomas aéreas con UAV. Extraído desde Cromwell et al. (2021).

Con los anteriores pasos realizados, se procede con la captura de imágenes aéreas. El UAV sigue la ruta establecida, obteniendo las imágenes con la cámara o sensor instalado. Algunos drones cuentan con sistemas de georreferenciación integrados, que asignan coordenadas aproximadas a cada imagen durante el vuelo, pudiendo prescindir del uso de GCPs, aunque lo recomendable es mantenerlos. La secuencia de imágenes puede ser conformada a partir de múltiples fotografías o de la filmación de videos. Es imprescindible que la calidad de las imágenes sean lo suficientemente adecuadas para captar el nivel de detalle que el estudio requiere, siendo una resolución *Full HD* (1920x1080 pixeles) y 30 FPS (*frames per second*, cuadros por segundo) un mínimo aceptable para el caso de los videos.

(3) Procesamiento de imágenes

Una vez obtenidas las imágenes, deben ser cargadas a la plataforma *Luma AI*, lo cual puede ser realizado tanto en la web como en las aplicaciones móviles disponibles para *Android* e *iOS*. La IA, aplicando un algoritmo 3D-GS encontrará puntos en común en las secuencias de imágenes entregadas, y renderizará un modelo tridimensional para cada uno de los archivos de video que sean cargados. El tiempo de procesamiento que la IA emplea suele bordear los 10 minutos, pudiendo variar en función de la demanda de los usuarios de la plataforma y del tamaño de los archivos cargados. Al finalizar la generación del modelo 3D, éste debe ser exportado en formato *PLY*.

Tras la obtención del modelo tridimensional se procede a su georreferenciación en el software *CloudCompare* para garantizar su correcta alineación y referencia espacial. El archivo en formato *PLY* se importa al software, donde el primer paso es corregir la orientación, asegurando que el modelo mantenga coherencia geométrica con el sistema de referencia cartográfico. Para esto, se recomienda alinear el eje Z con la vertical, tomando como referencia la distribución esperada del terreno según el contexto topográfico del área de estudio.

En un escenario ideal, la precisión geoespacial se logra cuando el UAV cuenta con un sistema de posicionamiento satelital de alta precisión, como RTK (*Real-Time Kinematic*) o PPK (*Post-Processed Kinematic*) (ver Fig. 36). Esto permite que cada imagen capturada se etiquete automáticamente con coordenadas exactas, reduciendo la necesidad de ajustes manuales y facilitando la reconstrucción 3D con precisión (Zeybek et al., 2023).

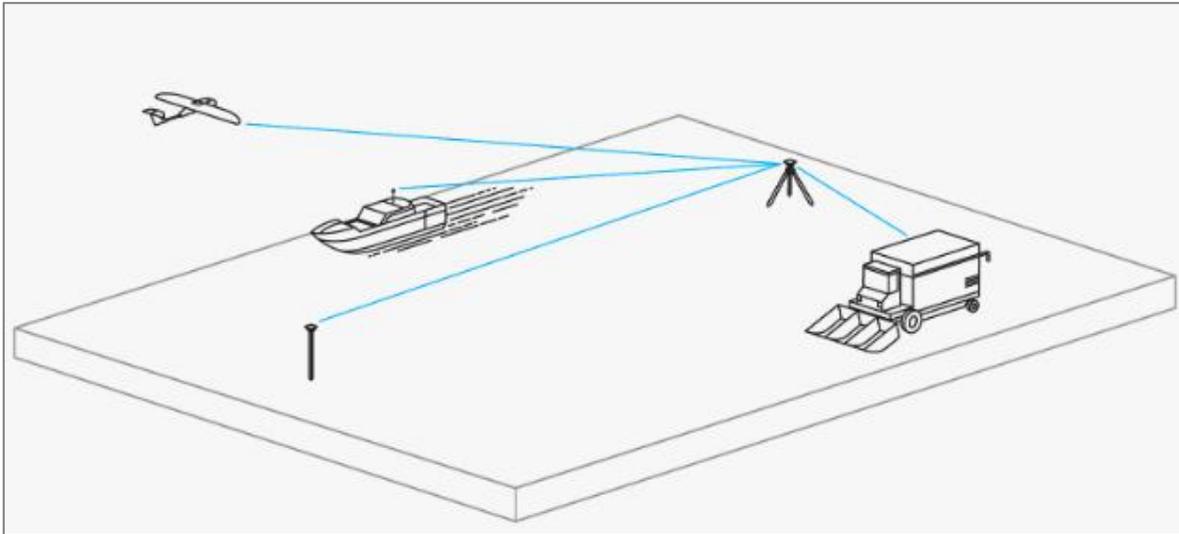


Figura 36: Ilustración de la interacción entre un dispositivo RTK y distintos vehículos. Extraído desde sitio web de [Emlid \(2025\)](#).

Si el dron solo dispone de un GPS convencional, o si el uso de GPS de alta precisión está restringido por normativa o condiciones operativas, la georreferenciación debe realizarse mediante GCP. Estos puntos, medidos con equipos de precisión, se emplean en *CloudCompare* para asignar manualmente coordenadas reales a puntos clave del modelo, ajustando su escala y posición en el sistema de referencia.

Cuando no se dispone de GCPs ni de un sistema GPS de alta precisión en el UAV, se debe optar por una referenciación alternativa. Una estrategia viable es establecer un sistema de coordenadas local, donde se definen puntos de referencia arbitrarios dentro del modelo para alinearlos y compararlos en futuras campañas de monitoreo. En estos casos, se recomienda utilizar elementos estables y fácilmente identificables en el entorno, como estructuras rocosas o infraestructura existente, para minimizar errores en la superposición de modelos en análisis temporales.

El modelo 3D con los ajustes debe ser exportado en formato *E57*, debido a que *Autodesk ReCap* no posee soporte para archivos de extensión *PLY*.

En *Autodesk ReCap* se visualiza y se manipula el modelo 3D previamente exportado en formato *E57* desde *CloudCompare*. El software permite medir distancias entre puntos, calcular áreas de superficies delimitadas y estimar volúmenes en zonas específicas del modelo. Por ejemplo, se pueden determinar la longitud del cauce, el área del lecho y visualizar la presencia de sedimentos o de agua en una sección determinada. La segmentación del modelo posibilita delimitar regiones específicas, como áreas con o sin presencia de agua, y extraer comparativamente parámetros espaciales en distintas campañas de monitoreo. Este análisis es fundamental en estudios hidrológicos y

geomorfológicos, ya que permite identificar variaciones en la morfología del río, detectar cambios en la extensión del caudal y relacionarlos con procesos de erosión o deposición.

Una vez cargado el archivo *E57* georreferenciado, *Autodesk ReCap* permite realizar evaluaciones cuantitativas y cualitativas orientadas al estudio de ríos intermitentes. A partir del modelo 3D, que integra información espacial y visual (en valores RGB), se pueden extraer métricas clave para caracterizar la dinámica del cauce en distintas fases hidrológicas.

i. Delimitación y cuantificación de áreas

ReCap ofrece herramientas para medir superficies específicas directamente sobre el modelo 3D. Por ejemplo:

Fracción Intermitente (FI): Calculada como el porcentaje del cauce ocupado por agua en un momento dado, esta métrica refleja cambios estacionales o eventos extremos (sequías, crecidas) (Sefton et al., 2019; Suman et al., 2020). Su obtención implica delimitar manualmente zonas húmedas y secas con *Measure Area*, aprovechando el contraste visual entre agua y sedimento.

$$FI = \frac{A_{agua}}{A_{total}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- A_{agua} : Área del lecho con presencia de agua.
- A_{total} : Área total del lecho del cauce.

ii. Evaluación de la fragmentación del flujo

La discontinuidad del caudal, típica en ríos intermitentes, se cuantifica mediante el Índice de Fragmentación (IFC). Este se define como el número de pozas aisladas por unidad de longitud del cauce muestreado, y se obtiene combinando conteo visual de cuerpos de agua con mediciones de longitud mediante *Polyline Measurement*. Un IFC elevado indica flujo interrumpido, útil para priorizar acciones de conservación en tramos críticos (Gallart et al., 2017; Sefton et al., 2019).

$$IFC = \frac{N_{fragmentos}}{L_{total}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

- $N_{fragmentos}$: Número de segmentos aislados con presencia de agua.
- L_{total} : Longitud lineal del total del cauce muestreado.

iii. Análisis morfológicos y volumétricos

ReCap permite estudiar la geometría del lecho mediante:

- Perfiles transversales: Generados con *Section Box*, revelan el ancho del cauce y la profundidad relativa del agua, parámetros clave para modelar la capacidad de transporte de sedimentos.
- Estimación de volúmenes: Con *Measure Volume*, se calcula la capacidad de almacenamiento de pozas aisladas, vinculada a la resiliencia hídrica en épocas secas.

iv. Integración con herramientas externas

Los resultados no se limitan a la interfaz de *ReCap*. Las mediciones pueden exportarse como:

- Datos tabulares (CSV): Para análisis estadísticos o integración con modelos hidrológicos.
- Imágenes 3D anotadas: Ideales para comunicar hallazgos a actores no técnicos (p. ej. comunidades locales), mostrando áreas de interés, fragmentación o cambios morfológicos.

(4) Ciencia ciudadana

La incorporación de la ciencia ciudadana en el sistema de monitoreo propuesto apunta a la obtención robusta de datos, con alta resolución de calidad y temporalidad, fomentar el involucramiento comunitario, y difundir el conocimiento en torno a la figura de ríos intermitentes y arroyos efímeros en Chile. Desde una perspectiva de ingeniería aplicada al desarrollo sostenible, se plantea un modelo colaborativo que combine la eficiencia tecnológica con la participación activa de las comunidades locales, haciendo énfasis en la educación ambiental, la validación cruzada de información y la generación de conocimiento de una forma proactiva.

El modelo tiene como objetivos generar un repositorio de información hidrológica centrada en caudales intermitentes, ampliar la cobertura espacial y temporal del monitoreo mediante la incorporación de observaciones ciudadanas georreferenciadas, validar y enriquecer los datos obtenidos mediante registros locales, y fomentar la participación activa y el conocimiento comunitario en la gestión de recursos hídricos. Para lograr esto, y mantener la propuesta democratizada, es necesario involucrar a actores de distintas esferas, por ejemplo, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) encabezando la administración a nivel nacional, universidades cercanas a las áreas de estudio, ONG ambientales, la inclusión de alumnos del sistema educativo por medio del Ministerio de Educación, municipalidades que fomenten la difusión, y por sobre todo, a personas con interés de participar.

La implementación del modelo contempla el uso de una plataforma digital integrada, accesible a través de web y dispositivos móviles, en la que los ciudadanos puedan reportar

eventos hidrológicos, cargar imágenes y completar un formulario estandarizado, basado en la aplicación de ciencia ciudadana *CrowdWater*, desarrollada en Suiza para el monitoreo de distintos parámetros (ver Fig. 37). Este sistema busca facilitar la recolección de datos, al mismo tiempo que ofrece contenido educativo sobre ríos intermitentes. Se propone la formación de participantes mediante actividades comunitarias e inmersivas, orientadas a generar implicación en la comunidad y acercar conceptos medioambientales de forma orgánica, inspirándose en modelos exitosos como el de *Futaleufú Riverkeeper* en el sur de Chile. Estas actividades se diseñarán para promover la identificación de indicadores visuales y la correcta utilización de la aplicación, a la vez que se fomenta el intercambio y la verificación colaborativa de las observaciones, utilizando un sistema de reputación que incentive la precisión y la continuidad en la participación.

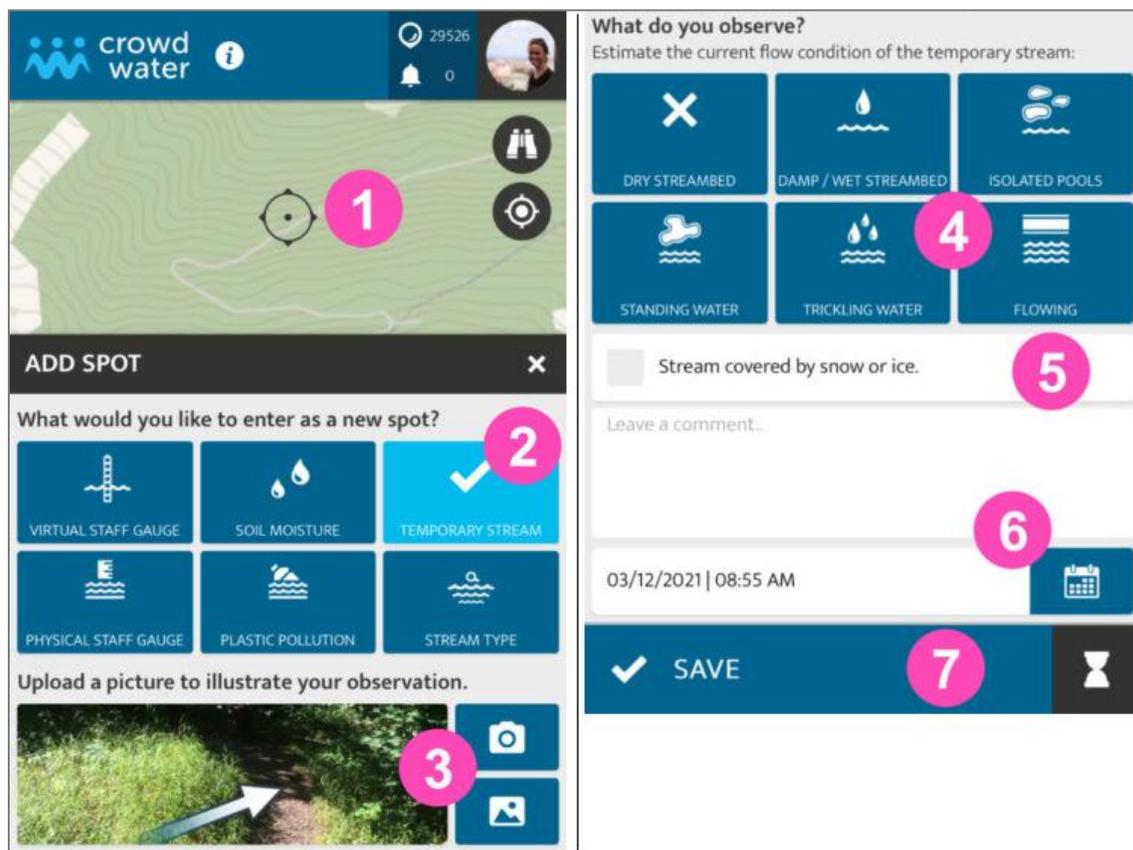


Figura 37: Secuencia para realizar un reporte en la aplicación móvil *CrowdWater*. (1) Georreferenciación del reporte. (2) Tipo de reporte. (3) Carga de fotografía del lugar. (4) Tipo de flujo observado. (5) Presencia de nieve o hielo. (6) Comentarios adicionales. (7) Envío del reporte. Fuente: Sitio web de *CrowdWater* (<https://crowdwater.ch/>).

El modelo contempla la realización de a lo menos una campaña en terreno mensual con UAV, liderada por grupos de científicos, extendiendo invitaciones a estudiantes de establecimientos educacionales locales y agrupaciones civiles. El objetivo de esto es acercar el uso de Tecnologías de Industria 4.0 a la ciudadanía, así como la metodología aplicada en un estudio científico, lo cual supone una contribución a la formación integral de jóvenes

estudiantes. Asimismo, se promoverá un mapeo participativo inicial para identificar de manera conjunta los puntos críticos de observación y la instalación de señaléticas en zonas estratégicas del cauce, junto con eventos anuales de devolución de resultados que permitan discutir y analizar los hallazgos con el apoyo de actores académicos y comunitarios.

La validación de las observaciones ciudadanas se llevará a cabo mediante la triangulación de datos: la coincidencia de múltiples reportes sobre el mismo evento incrementará la fiabilidad. También se contempla que parte de los reportes seleccionados sean revisados por monitores, contrastando la información con las observaciones realizadas en las campañas en terreno. Este proceso apuesta por la participación activa de universidades, con el respaldo de académicos, otorgando la oportunidad a las instituciones de educación superior para actuar como nodos de validación científica. La propuesta se concibe como un modelo escalable y replicable, en el que la gobernanza se comparta entre actores públicos, académicos y comunitarios. Se prevé un piloto regional que sirva de base para la extensión a otras cuencas, siendo necesario recurrir al financiamiento de fondos públicos y alianzas estratégicas. De este modo, se busca no solo mejorar la calidad y frecuencia de los datos, sino también promover una educación ambiental activa y fortalecer el sentido de pertenencia y corresponsabilidad en la gestión de los recursos hídricos.

Se presenta un resumen visual de la metodología propuesta en la Figura 38.

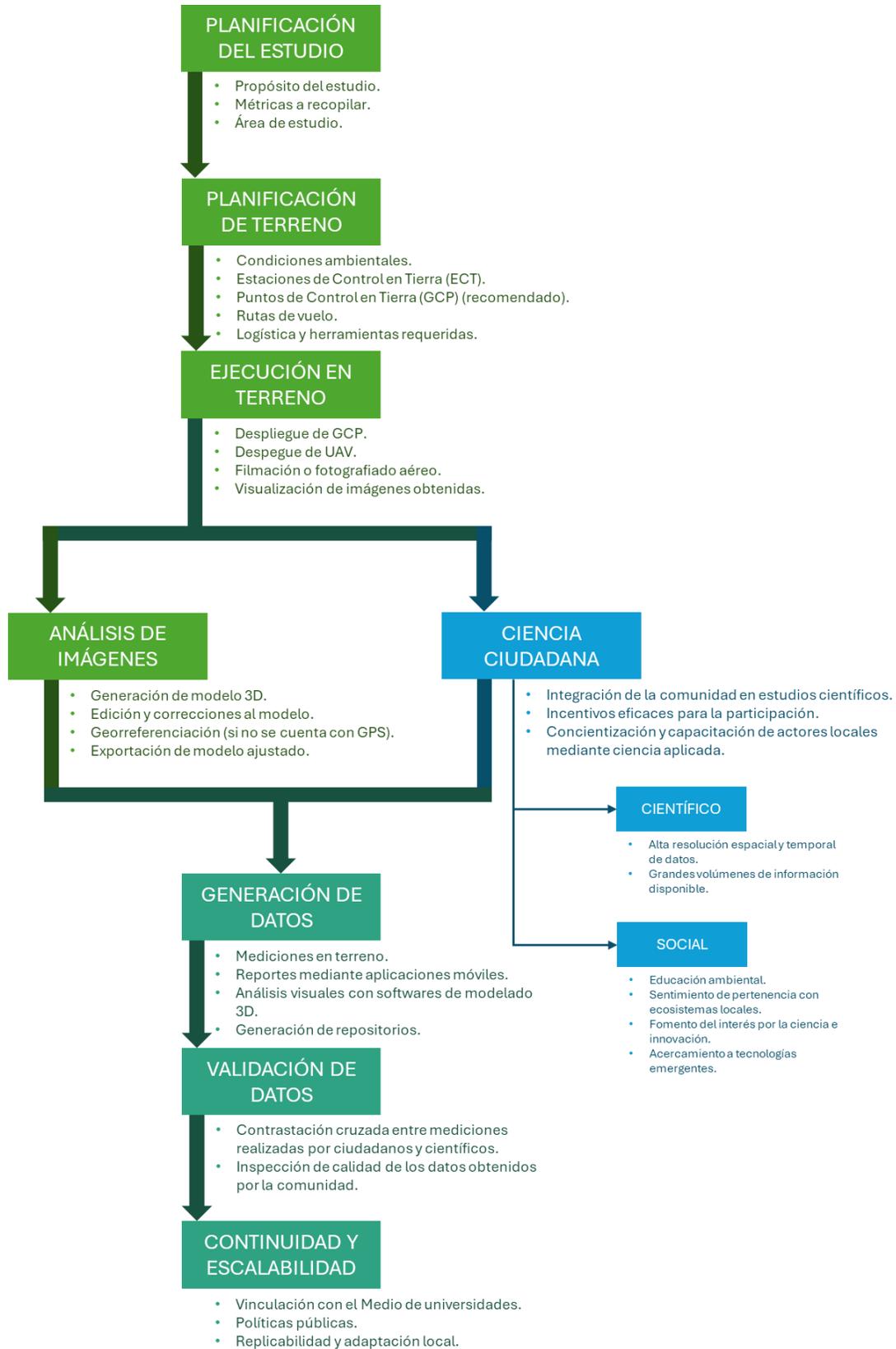


Figura 38: Diagrama de flujo de propuesta metodológica.

4.2. Discusión

4.2.1. Importancia de una planificación adecuada

La campaña de muestreo realizada en septiembre de 2024 constituyó un hito fundamental dentro del desarrollo de esta investigación. Fue ejecutada en una etapa temprana del estudio, lo que permitió, sobre la marcha, identificar con claridad tanto aciertos como deficiencias que abren un espacio para el aprendizaje y la mejora continua.

La planificación de la salida consideró de forma intencionada la elección de un día con condiciones climáticas óptimas para el vuelo de un UAV. La jornada fue escogida cuidadosamente en base a pronósticos favorables, priorizando ausencia de viento y nubosidad, lo cual permitió aprovechar al máximo la luz solar directa, indispensable para la captura de imágenes nítidas. El trabajo de campo se realizó durante la mañana, precisamente para garantizar las mejores condiciones lumínicas y meteorológicas, aspecto que tuvo un impacto positivo en la calidad general de los datos obtenidos. Este enfoque, en línea con lo realizado por Spence & Mengistu (2015) para estudios en zonas de alta variabilidad hídrica, representa un acierto en la metodología.

No obstante, una de las limitaciones técnicas más críticas se presentó al momento de operar el dron. Debido a restricciones normativas establecidas por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), no fue posible hacer uso del sistema integrado de GPS del UAV, ya que para ello se requiere de una autorización especial que no se gestionó previamente. Como alternativa, se optó por desactivar la funcionalidad GPS para sortear esta restricción, lo cual trajo consigo importantes repercusiones operativas y posteriores a la captura de datos. No contar con el sistema GPS impidió la georreferenciación automática de las imágenes, complicando tanto la elaboración de modelos tridimensionales como la posibilidad de replicar con exactitud las posiciones de vuelo (Cromwell et al., 2021). También sería pertinente iniciar una discusión respecto a la posibilidad de flexibilizar las restricciones para operar UAV en contextos científicos y académicos, o bien, agilizar el otorgamiento de permisos necesarios bajo estrictas justificaciones.

Otro aspecto crítico fue la omisión de puntos de control terrestre (GCP) para la georreferenciación de las imágenes. A la fecha en que se realizó la salida a terreno, se desconocía la relevancia de estos puntos dentro del proceso de fotogrametría y modelado 3D. En retrospectiva, la ausencia de GCPs significó una limitación significativa, al comprometer la precisión métrica de los productos generados (Elkhrachy, 2021). Esta situación evidencia tanto la necesidad de una preparación más exhaustiva en los aspectos técnicos del uso de UAVs como también la importancia de la interdisciplinariedad en este tipo de estudios. La utilización de herramientas de vanguardia como los drones exige conocimientos básicos en cartografía, sistemas de referencia espacial y fotogrametría,

ámbitos que tradicionalmente escapan al currículo de Ingeniería Civil Industrial, pero que se vuelven indispensables en contextos de investigación ambiental.

En lo que respecta a la selección de las Estaciones de Control en Tierra (ECT) sobre la marcha, cabe señalar que, si bien el primer punto fue planificado con antelación, los siguientes fueron definidos en terreno, en función de la accesibilidad requerida por el vehículo de transporte. Esta decisión responde a criterios logísticos prácticos y a la dificultad inherente de planificar con precisión en un entorno poco conocido. No obstante, ello contradice parcialmente lo descrito en el diseño metodológico inicial. Esta práctica, si bien responde a la dinámica propia de un estudio exploratorio, evidencia la necesidad de una mayor sistematización en la selección de puntos, algo que otros estudios sugieren para garantizar consistencia en la recolección de datos (Stubbington et al., 2018a).

En ciertos puntos de muestreo, la cobertura obtenida fue parcial o deficiente, lo cual derivó en distorsiones al momento de generar modelos 3D. Esto revela la necesidad de considerar con antelación factores como movimientos cautelosos de cámara, altura de vuelo, ancho del cauce, ángulo del sol y el campo de visión de la cámara utilizada.

Esta primera aproximación no pretende reemplazar metodologías tradicionales utilizadas en hidrología o geociencias, sino más bien complementarlas. Su aporte reside en abrir la puerta al uso de UAVs como herramienta transversal, adaptable a múltiples disciplinas. Esta investigación busca, en efecto, tender puentes entre áreas tradicionalmente separadas, proporcionando una herramienta tecnológica de bajo costo relativo y fácil acceso que pueda ser utilizada por especialistas de distintas ramas: desde la geología y la biología, hasta la antropología o la sociología ambiental (Stubbington et al., 2018b).

4.2.2. Oportunidades que brinda la reconstrucción 3D

En seis de los ocho archivos se lograron modelos óptimos, lo que indica que, en condiciones favorables. Este hallazgo se alinea con estudios previos que han utilizado técnicas de reconstrucción 3D para el análisis de sistemas fluviales (por ejemplo, Moghimi & Welzel, 2024), donde se destaca la capacidad de estas herramientas para complementar la caracterización convencional.

No obstante, las distorsiones observadas en ciertos modelos, particularmente en áreas de alta densidad vegetacional o con reflejos en la superficie del agua, ponen de manifiesto limitaciones asociadas a la variabilidad del entorno y a la sensibilidad de los algoritmos de procesamiento de imagen. Esta observación es consistente con lo descrito en la literatura, donde se señala que la precisión de la fotogrametría digital puede verse comprometida en condiciones heterogéneas o complejas (Fortesa et al., 2020). La necesidad de ajustar parámetros en el procesamiento, así como la posterior corrección del modelo mediante *CloudCompare* y su importación en *Autodesk ReCap*, subraya la importancia de contar con

un protocolo robusto que minimice estos errores, especialmente cuando se busca la extracción de métricas derivadas.

En cuanto a la extracción de variables, se identificó que *Autodesk ReCap* permite delimitar manualmente áreas de agua superficial, medir la geometría del cauce y evaluar la fragmentación del flujo; todo ello es coherente con las métricas comúnmente utilizadas en estudios hidrológicos (Oueslati et al., 2015; Mengistie et al., 2023). Sin embargo, la calidad final de estas métricas depende en gran medida de la calidad del modelo 3D inicial. Por ello, la existencia de modelos con distorsiones en ciertas tomas resalta la necesidad de definir criterios de validación y potencial integración de protocolos de ajuste automático, como el desarrollo de inteligencias artificiales para el perfeccionamiento de estos, es algo que podría explorarse en estudios futuros, como plantean Moghimi & Welzel, (2024).

4.2.3. Sinergia científico-ciudadana

Se propuso desarrollar una metodología en torno al uso de herramientas tecnológicas de Industria 4.0 como UAVs, inteligencia artificial y reconstrucción tridimensional para iniciar un levantamiento de datos en ríos intermitentes en zonas de clima mediterráneo chileno. Se logró establecer una caracterización general de un río intermitente de la Región de Ñuble, Chile. En el transcurso de la investigación, se constató una escasa presencia de estudios enfocados en su monitoreo en Chile, donde existe un abrumante desconocimiento sobre la existencia de este tipo de ecosistemas.

En primer lugar, la planificación de la adquisición de datos se fundamenta en criterios técnicos y contextuales que permiten delimitar el área de estudio considerando la variabilidad del régimen fluvial, la climatología, la extensión y la accesibilidad del cauce. La estrategia de realizar campañas mensuales, basada en la alta variabilidad del caudal en ríos intermitentes de clima mediterráneo en Chile, se alinea con las sugerencias postuladas por Datry et al. (2011), y garantiza una frecuencia adecuada para capturar tanto eventos extremos como la dinámica estacional. Si bien esta planificación se inspiró en el diálogo con habitantes locales y en el uso de antecedentes previos, es evidente que la concreción de los criterios de elección, como la selección de GCPs, adquiere mayor relevancia en fases posteriores del estudio, tal como señalan investigaciones previas (Elkhrachy, 2021). La necesidad de contar con GCP para una georreferenciación precisa fue una lección crítica.

La fase de ejecución de la campaña de UAV, tal como se evidenció en los resultados, mostró que la selección de los parámetros de vuelo (altura, velocidad y ruta) es esencial para garantizar una cobertura adecuada. En este sentido, el planteamiento de calcular la altura óptima de vuelo en función del campo de visión de la cámara resulta innovador y adaptable a distintos anchos de cauce, permitiendo maximizar la resolución espacial de las imágenes capturadas. Sin embargo, se enfrentaron desafíos relevantes: por ejemplo, la imposibilidad de contar con la funcionalidad de GPS en el dron debido a restricciones normativas impuestas por la DGAC, lo cual obligó a desplegar estrategias alternativas, como la definición

de un sistema de coordenadas local o la dependencia de puntos manuales de control. Estas dificultades resaltan un problema común en el empleo de tecnologías emergentes en entornos regulados, y apuntan a la necesidad de promover flexibilizaciones o protocolos especiales para fines de investigación en monitoreo ambiental.

El procesamiento de imágenes mediante plataformas como *Luma AI* y *CloudCompare* permitió generar modelos 3D de los escenarios captados, revelando que en la mayoría de los casos (6 de 8 archivos) se obtuvo una representación óptima del entorno. La posterior manipulación del modelo en *Autodesk ReCap* facilitó la extracción de variables hidromorfológicas, tales como áreas de agua superficial, geometría del cauce y fragmentación del flujo, además del cálculo de métricas derivadas. La capacidad de delimitar manualmente zonas de agua aprovechando el contraste visual y la identificación de pozas o remansos es coherente con los métodos utilizados en estudios anteriores. No obstante, las distorsiones en áreas con alta densidad de vegetación o reflejos evidencian que, aunque la técnica es viable, existe margen de mejora en cuanto al procesamiento y ajuste automático de los modelos. Esto sugiere que futuros desarrollos podrían incorporar algoritmos de corrección de errores que optimicen la fidelidad de la reconstrucción 3D, especialmente en escenarios complejos.

La integración de la ciencia ciudadana es uno de los componentes más innovadores de la propuesta. Un ejemplo representativo de su implementación en Chile es el desarrollado por la ONG *Futaleufú Riverkeeper*. Con más de una década de trabajo en la protección de la cuenca del Río Futaleufú, región de Los Lagos, la organización ha logrado articular a la comunidad local mediante iniciativas como el monitoreo comunitario de la calidad del agua, el uso de UAV para el fotomonitoreo de riberas y programas de educación ambiental integrados a actividades recreativas (*Futaleufú Riverkeeper*, 2023). Estos esfuerzos han permitido no solo la recolección sistemática de datos sobre parámetros fisicoquímicos y cambios en el paisaje, sino también la consolidación de una red de participación que involucra a voluntarios, instituciones académicas y actores locales. Si bien el modelo de *Riverkeeper* demuestra un notable potencial en términos de movilización y empoderamiento ciudadano, también se evidencian desafíos en cuanto a la estandarización metodológica y la validación científica de los datos recopilados, aspectos esenciales para la robustez en la toma de decisiones ambientales.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Esta investigación, de naturaleza exploratoria, demostró la viabilidad de utilizar tecnologías emergentes para el monitoreo de ríos intermitentes y arroyos efímeros en Chile, a partir de la adquisición de datos visuales con drones y el procesamiento de modelos 3D mediante técnicas de fotogrametría digital.

La campaña realizada en septiembre de 2024 confirmó que, pese a limitaciones técnicas como la imposibilidad de usar la funcionalidad del GPS y la falta de puntos de control en terreno (GCP), es posible capturar información de alta calidad en zonas de alta variabilidad temporal y espacial. No contar con el sistema GPS impidió la georreferenciación automática de las imágenes, complicando tanto la elaboración de modelos tridimensionales como la posibilidad de replicar con exactitud las posiciones de vuelo (Cromwell et al., 2021). Esta situación pone de manifiesto un obstáculo que probablemente será recurrente en futuras investigaciones similares, como lo es realizar estudios científicos-técnicos bajo los marcos regulatorios vigentes.

Asimismo, el desarrollo de una propuesta metodológica que integra desde la planificación de vuelo hasta el análisis en software especializado constituye un importante precedente para la aplicación de métodos replicables y escalables.

Se plantea un modelo colaborativo en el que, a través de una plataforma digital accesible por web y dispositivos móviles, la comunidad local pueda reportar eventos hidrológicos, subir imágenes georreferenciadas y completar formularios estandarizados. Esta dimensión va más allá del enfoque tradicional de recolección de datos, pues busca fomentar un compromiso activo y orgánico, en el que la participación ciudadana se convierta en el eje para ampliar la cobertura del monitoreo.

En conjunto, estos aportes sitúan este estudio como un primer acercamiento innovador desde la ingeniería civil industrial a la problemática del monitoreo de ríos intermitentes, abriendo la puerta a futuras investigaciones que puedan perfeccionar y ampliar estos enfoques en contextos de alta variabilidad climática y escasa infraestructura.

REFERENCIAS

1. Acharya, B. S., Bhandari, M., Bandini, F., Pizarro, A., Perks, M., Joshi, D. R., Wang, S., Dogwiler, T., Ray, R. L., Kharel, G., & Sharma, S. (2021). Unmanned Aerial Vehicles in Hydrology and Water Management: Applications, Challenges, and Perspectives. *Water Resources Research* (Vol. 57, Issue 11). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2021wr029925>
2. Acuña, V., Datry, T., Marshall, J., Barceló, D., Dahm, C. N., Ginebreda, A., McGregor, G., Sabater, S., Tockner, K., & Palmer, M. A. (2014). Why Should We Care About Temporary Waterways? *Science* (Vol. 343, Issue 6175, pp. 1080-1081). American Association for the Advancement of Science (AAAS). <https://doi.org/10.1126/science.1246666>
3. Allen, D. C., Kopp, D. A., Costigan, K. H., Datry, T., Hugueny, B., Turner, D. S., Bodner, G. S., & Flood, T. J. (2019). Citizen scientists document long-term streamflow declines in intermittent rivers of the desert southwest, USA. *Freshwater Science* (Vol. 38, Issue 2, pp. 244-256). University of Chicago Press. <https://doi.org/10.1086/701483>
4. Allen, D. C., Datry, T., Boersma, K. S., Bogan, M. T., Boulton, A. J., Bruno, D., Busch, M. H., Costigan, K. H., Dodds, W. K., Fritz, K. M., Godsey, S. E., Jones, J. B., Kaletova, T., Kampf, S. K., Mims, M. C., Neeson, T. M., Olden, J. D., Pastor, A. V., Poff, N. L., ... Zimmer, M. (2020). River ecosystem conceptual models and non-perennial rivers: A critical review. *WIREs Water* (Vol. 7, Issue 5). Wiley. <https://doi.org/10.1002/wat2.1473>
5. Andreoli, A., Mao, L., Iroumé, A., Arumí, J. L., Nardini, A., Pizarro, R., Caamaño, D., Meier, C., & Link, O. (2012). The need for a hydromorphological approach to Chilean river management. *Revista Chilena de Historia Natural*, 85(3), 339-343.
6. Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics* (Vol. 54, Issues 9-10, pp. 4309-4330). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
7. Banegas-Medina, A., Montes, I.-Y., Tzoraki, O., Brendonck, L., Pinceel, T., Diaz, G., Arriagada, P., Arumi, J.-L., Pedreros, P., & Figueroa, R. (2021). Hydrological, Environmental and Taxonomical Heterogeneity during the Transition from Drying to Flowing Conditions in a Mediterranean Intermittent River. *Biology* (Vol. 10, Issue 4, p. 316). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biology10040316>
8. Boccoardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F., & Lingua, A. (2015). UAV Deployment Exercise for Mapping Purposes: Evaluation of Emergency Response Applications. *Sensors* (Vol. 15, Issue 7, pp. 15717-15737). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s150715717>
9. Borg Galea, A., Sadler, J. P., Hannah, D. M., Datry, T., & Dugdale, S. J. (2019). Mediterranean intermittent rivers and ephemeral streams: Challenges in monitoring complexity. *Ecohydrology*, 12(8), e2149. <https://doi.org/10.1002/eco.2149>

10. Brintrup, K., Amigo, C., Fernández, J., Hernández, A., Pérez, F., Félez-Bernal, J., Butturini, A., Saez-Carrillo, K., Yevenes, M. A., & Figueroa, R. (2019). Comparison of organic matter in intermittent and perennial rivers of Mediterranean Chile with the support of citizen science. *Revista Chilena de Historia Natural*, 92(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40693-019-0083-3>
11. Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., ... Zhumanova, M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>
12. Cecilia, J. M., Hernández, D., Arratia, B., Peña-Haro, S., & Senent-Aparicio, J. (2023). In Situ and Crowd-Sensing Techniques for Monitoring Flows in Ephemeral Streams. *IEEE Network*, 37(2), 310–317. <https://doi.org/10.1109/MNET.005.2200545>
13. Chen, G., & Wang, W. (2024). *A Survey on 3D Gaussian Splatting* (Versión 6). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2401.03890>
14. CIREN. (2019). Informe de Recursos Naturales de la Comuna de Trehuaco.
15. CIREN. (2023). Informe de Recursos Naturales de la Comuna de Trehuaco.
16. Cromwell, C., Giampaolo, J., Hupy, J., Miller, Z., & Chandrasekaran, A. (2021). A Systematic Review of Best Practices for UAS Data Collection in Forestry-Related Applications. *Forests* (Vol. 12, Issue 7, p. 957). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/f12070957>
17. Datry, T., Arscott, D. B., & Sabater, S. (2011). Recent perspectives on temporary river ecology. *Aquatic Sciences* (Vol. 73, Issue 4, pp. 453-457). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0236-1>
18. Datry, T., Larned, S. T., & Tockner, K. (2014). Intermittent Rivers: A Challenge for Freshwater Ecology. *BioScience* (Vol. 64, Issue 3, pp. 229-235). Oxford University Press (OUP). <https://doi.org/10.1093/biosci/bit027>
19. Datry, T., Bonada, N., & Boulton, A. J. (2017a). Conclusions: Recent Advances and Future Prospects in the Ecology and Management of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. *Intermittent Rivers and Ephemeral Streams* (pp. 563-584). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803835-2.00031-0>
20. Datry, T., Singer, G., Sauquet, E., Jorda-Capdevila, D., Von Schiller, D., Stubbington, R., Magand, C., Pařil, P., Miliřa, M., Acuña, V., Alves, M. H., Augeard, B., Brunke, M., Cid, N., Csabai, Z., England, J., Froebrich, J., Koundouri, P., Lamouroux, N., ... Zoppini, A. (2017b). Science and Management of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams (SMIRES). *Research Ideas and Outcomes* (Vol. 3, p. e21774). Pensoft Publishers. <https://doi.org/10.3897/rio.3.e21774>
21. Datry, T., Boulton, A. J., Bonada, N., Fritz, K., Leigh, C., Sauquet, E., Tockner, K., Hugueny, B., & Dahm, C. N. (2018). Flow intermittence and ecosystem services in rivers of the

- Anthropocene. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 353–364. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12941>
22. Dirección General de Aguas [DGA]. (2004). Diagnóstico y clasificación de cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Itata.
 23. Dickinson, J. L., Shirk, J., Bonter, D., Bonney, R., Crain, R. L., Martin, J., Phillips, T., & Purcell, K. (2012). The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 10, Issue 6, pp. 291-297). Wiley. <https://doi.org/10.1890/110236>
 24. Elkharchy, I. (2021). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5579–5590. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.011>
 25. Emlid. (2025). <https://docs.emlid.com/reach/tutorials/basics/rtk-introduction/>. Consultado en marzo de 2025.
 26. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2020). Water and climate change. De <https://hdl.handle.net/20.500.12870/7402>
 27. Fei, B., Xu, J., Zhang, R., Zhou, Q., Yang, W., & He, Y. (2024). 3D Gaussian Splatting as New Era: A Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1–20. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3397828>
 28. Fiz, J. I., Martín, P. M., Cuesta, R., Subías, E., Codina, D., & Cartes, A. (2022). Examples and Results of Aerial Photogrammetry in Archeology with UAV: Geometric Documentation, High Resolution Multispectral Analysis, Models and 3D Printing. *Drones* (Vol. 6, Issue 3, p. 59). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/drones6030059>
 29. Fortesa, J., Ricci, G. F., García-Comendador, J., Gentile, F., Estrany, J., Sauquet, E., Datry, T., & De Girolamo, A. M. (2021). Analysing hydrological and sediment transport regime in two Mediterranean intermittent rivers. *CATENA*, 196, 104865. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104865>
 30. Fortuño, P.; Acosta R.; Soria, M.; Cañedo-Argüelles, M.; Cambra, J.; Cid, N.; Fernández, J.; Múrria, C.; Prat, N.; Quevedo, G.; Rodríguez, N.; Verkaik, I.; Vinyoles, D.; Bonada, N. (2021). Efectes del Canvi Ambiental en les comunitats d'organismes dels Rius MEDiterranis (CARIMED). Informe 2020. Diputació de Barcelona. Àrea d'Infraestructures i Espais Naturals (Estudis de la Qualitat Ecològica dels Rius; 29). 66 pp.
 31. Futaleufú Riverkeeper. (2023). Reporte Anual 2023. <https://futaleufuriverkeeper.org/informe/reportes-anual-2023/>. Consultado en abril de 2025.
 32. Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

33. Gómez, C., Zamarreño Suárez, M., Pérez Moreno, F., & Delgado-Aguilera Jurado, R. (2024). Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Complex Environments. *Drones* (Vol. 8, Issue 7, p. 288). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/drones8070288>
34. Gobierno Regional [GORE] del Biobío. (2015). Informe Ambiental proceso de Evaluación Ambiental Estratégico: Zonificación costera comunal Trehuaco.
35. Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports* (Vol. 5, Issue 3, pp. 155-168). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
36. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIA]. Red de Agrometeorología. <https://agrometeorologia.cl/>. Consultado en abril de 2025.
37. James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., Noble, T., Robson, S., & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
38. Jiang, S., Jiang, C., & Jiang, W. (2020). Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 167, pp. 230-251). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
39. Jumani, S., Deitch, M. J., Kaplan, D., Anderson, E. P., Krishnaswamy, J., Lecours, V., & Whiles, M. R. (2020). River fragmentation and flow alteration metrics: A review of methods and directions for future research. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcb37>
40. Larned, S. T., Datry, T., Arscott, D. B., & Tockner, K. (2010). Emerging concepts in temporary-river ecology. *Freshwater Biology* (Vol. 55, Issue 4, pp. 717-738). Wiley. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02322.x>
41. Leigh, C., Boulton, A. J., Courtwright, J. L., Fritz, K., May, C. L., Walker, R. H., & Datry, T. (2015). Ecological research and management of intermittent rivers: an historical review and future directions. *Freshwater Biology* (Vol. 61, Issue 8, pp. 1181-1199). Wiley. <https://doi.org/10.1111/fwb.12646>
42. Leone, M., Gentile, F., Lo Porto, A., Ricci, G. F., Schürz, C., Strauch, M., Volk, M., & De Girolamo, A. M. (2024). Setting an environmental flow regime under climate change in a data-limited Mediterranean basin with temporary river. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (Vol. 52, p. 101698). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101698>
43. Mengistie, G. K., Demissie Wondimagegnehu, K., Walker, D. W., & Tamiru Haile, A. (2024). Value of quality controlled citizen science data for rainfall-runoff characterization in a rapidly urbanizing catchment. *Journal of Hydrology* (Vol. 629, p. 130639). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130639>

44. Mengistie, G. K., Haile, A. T., O'Donnell, G., Negash, E. D., Bekele, T. W., & Tedla, H. Z. (2024). Citizen science data to improve rainfall-runoff model performance in urbanizing Akaki catchment, Awash Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101822>
45. Messenger, M. L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., Tockner, K., Trautmann, T., Watt, C., & Datry, T. (2021). Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, 594(7863), 391–397. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>
46. Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2021). NeRF. *Communications of the ACM* (Vol. 65, Issue 1, pp. 99-106). Association for Computing Machinery (ACM). <https://doi.org/10.1145/3503250>
47. Moghimi, A., & Welzel, M. (2025). RiverSnap: A citizen science project to monitor and Analyse riverine hydrological parameters from close-range remote sensing images. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-16082>
48. Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., Chávez, R. O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., & LeQuesne, C. (2020). Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management. *Water* (Vol. 12, Issue 3, p. 648). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w12030648>
49. Nex, F., & Remondino, F. (2013). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1-15). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
50. Oueslati, O., De Girolamo, A. M., Abouabdillah, A., Kjeldsen, T. R., & Lo Porto, A. (2015). Classifying the flow regimes of Mediterranean streams using multivariate analysis: CLASSIFYING THE FLOW REGIMES IN MEDITERRANEAN STREAMS. *Hydrological Processes*, 29(22), 4666–4682. <https://doi.org/10.1002/hyp.10530>
51. Poff, N., Brinson, M. & Day, John. (2002). Aquatic Ecosystems & Global Climate Change – Potential Impacts on Inland Freshwater and Coastal Wetland Ecosystems in the United States. Pew Center for Global Change.
52. Qi, S., Wang, F., & Jing, L. (2018). Unmanned Aircraft System Pilot/Operator Qualification Requirements and Training Study. *MATEC Web of Conferences*, 179, 03006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817903006>
53. Rangecroft, S., Dextre, R. M., Richter, I., Kelly, C., Turin, C., Fuentealba, B., Grados Bueno, C. V., Camacho Hernández, M., Morera, S., Martin, J., Guy, A., & Clason, C. (2022, marzo 27). *Citizen-led water quality data collection: Experiences from the Santa River basin, Peru*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5628>
54. Rodríguez-Contreras, F. E., Martínez Rivera, L. M., & Flores-Silva, A. (2024). Procesos participativos para el biomonitorio ambiental comunitario en las cuencas Cuitzmala y

- Purificación, México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 12(26), 1–19. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.87051>
55. Scheller, M., Durigetto, N., van Meerveld, I., Seibert, J., & Botter, G. (2025). Combining citizen science data and the hierarchical structuring of temporary streams to reconstruct the patterns of channel wetting and drying. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-15302>
56. Sefton, C. E. M., Parry, S., England, J., & Angell, G. (2019). Visualising and quantifying the variability of hydrological state in intermittent rivers. *Fundamental and Applied Limnology* (Vol. 193, Issue 1, pp. 21-38). Schweizerbart. <https://doi.org/10.1127/fal/2019/1149>
57. Skoulikidis, N. T., Vardakas, L., Karaouzas, I., Economou, A. N., Dimitriou, E., & Zogaris, S. (2011). Assessing water stress in Mediterranean lotic systems: insights from an artificially intermittent river in Greece. *Aquatic Sciences* (Vol. 73, Issue 4, pp. 581-597). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0228-1>
58. Skoulikidis, N. T., Sabater, S., Datry, T., Morais, M. M., Buffagni, A., Dörflinger, G., Zogaris, S., Del Mar Sánchez-Montoya, M., Bonada, N., Kalogianni, E., Rosado, J., Vardakas, L., De Girolamo, A. M., & Tockner, K. (2017). Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: Status, pressures, and challenges for research and management. *Science of The Total Environment*, 577, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.147>
59. Snelder, T. H., Datry, T., Lamouroux, N., Larned, S. T., Sauquet, E., Pella, H., & Catalogne, C. (2013). Regionalization of patterns of flow intermittence from gauging station records. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2685–2699. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2685-2013>
60. Spence, C., & Mengistu, S. (2016). Deployment of an unmanned aerial system to assist in mapping an intermittent stream. *Hydrological Processes*, 30(3), 493–500. <https://doi.org/10.1002/hyp.10597>
61. Steward, A. L., Von Schiller, D., Tockner, K., Marshall, J. C., & Bunn, S. E. (2012). When the river runs dry: Human and ecological values of dry riverbeds. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(4), 202–209. <https://doi.org/10.1890/110136>
62. Stubbington, R., Chadd, R., Cid, N., Csabai, Z., Miliša, M., Morais, M., Munné, A., Pařil, P., Peřić, V., Tziortzis, I., Verdonschot, R. C. M., & Datry, T. (2018a). Biomonitoring of intermittent rivers and ephemeral streams in Europe: Current practice and priorities to enhance ecological status assessments. En *Science of The Total Environment* (Vol. 618, pp. 1096-1113). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.137>
63. Stubbington, R., England, J., Acreman, M., Wood, P.J., Westwood, C., Boon, P., Mainstone, C., Macadam, C., Bates, A., House, A, Jorda-Capdevila, D. (2018b) The Natural Capital of Temporary Rivers: Characterising the value of dynamic aquatic-terrestrial habitats. *Valuing Nature Natural Capital Synthesis Report VNP12*. <https://valuing-nature.net/TemporaryRiverNC>

64. Taylor, A. (2023). *A Digital Forensics Case Study of the DJI Mini 3 Pro and DJI RC* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2309.10487>
65. Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L. (2016). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 38, Issues 8-10, pp. 2427-2447). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
66. Truchy, A., Csabai, Z., Mimeau, L., Künne, A., Pernecker, B., Bertin, W., Pellizzaro, F., & Datry, T. (2023). Citizen scientists can help advance the science and management of intermittent rivers and ephemeral streams. *BioScience* (Vol. 73, Issue 7, pp. 513-521). Oxford University Press (OUP). <https://doi.org/10.1093/biosci/biad045>
67. Vander V., R., Sarremejane, R., & Datry, T. (2020). Intermittent Rivers and Ephemeral Streams: A Unique Biome With Important Contributions to Biodiversity and Ecosystem Services. En *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 419–429). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12054-8>
68. Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R. K., Naseer, S., Shafiq, M., & Choi, J.-G. (2021). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges. *Energies*, 15(1), 217. <https://doi.org/10.3390/en15010217>
69. Von Gönner, J., Gröning, J., Grescho, V., Neuer, L., Gottfried, B., Hänsch, V. G., Molsberger-Lange, E., Wilharm, E., Liess, M., & Bonn, A. (2024). Citizen science shows that small agricultural streams in Germany are in a poor ecological status. *Science of The Total Environment*, 922, 171183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171183>
70. Wang, Z., Wu, S., Xie, W., Chen, M., & Prisacariu, V. A. (2021). *NeRF--: Neural Radiance Fields Without Known Camera Parameters* (Versión 4). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2102.07064>
71. Wei, Y., Kang, L., Yang, B., & Wu, L. (2013). Applications of structure from motion: a survey. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C* (Vol. 14, Issue 7, pp. 486-494). Zhejiang University Press. <https://doi.org/10.1631/jzus.cide1302>
72. Wu, T., Yuan, Y.-J., Zhang, L.-X., Yang, J., Cao, Y.-P., Yan, L.-Q., & Gao, L. (2024). Recent advances in 3D Gaussian splatting. *Computational Visual Media* (Vol. 10, Issue 4, pp. 613-642). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s41095-024-0436-y>
73. Yévenes, M. A., Pereira, H., & Bermudez, R. (2022). Citizen Science as a Co-Creative Measure to Water Quality: Chemical Data and Local Participation in a Rural Territory. *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.940778>