

Geometric back-projection of agricultural ground observations using mobile phones for integration with satellite imagery

Martín Oviedo^{1,5} , Ulises Bussi¹ , Santiago A. Ibañez^{2,5} , Santiago Poggio^{3,5} , Juan I. Giribet^{4,5} , and Damián Oliva^{1,5} 

¹ Universidad Nacional de Quilmes, Departamento de Ciencia y Tecnología Roque Sáenz Peña 352, Bernal Buenos Aires, Argentina (B1876BXD)

² Universidad Nacional de Río Negro, Centro Interdisciplinario de Telecomunicaciones, Electrónica, Computación y Ciencia Aplicada

³ IFEVA, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía, Cátedra de Producción Vegetal. Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina (C1417DSE)

⁴ Universidad de San Andrés

⁵ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET), Argentina

`doliva@unq.edu.ar`

Abstract. This work presents a practical methodology for the georeferencing of field observations using oblique images acquired with mobile phones during agronomic surveys. Under real conditions, these images are captured with variable pitch angles and without strict geometric control, which makes the spatial localization of the observed elements difficult.

The proposed approach enables the estimation of the location of regions of interest by combining ground images with minimal device information, such as GPS position and viewing direction. To this end, a geometric model based on the pinhole camera is employed, allowing observations to be back-projected onto a locally planar ground surface, incorporating simple constraints such as the horizon line and a depth reference point.

The method is evaluated in a real case of weed patch identification. The results show that, despite uncertainties in the parameters and acquisition conditions, the projected regions are consistent with patterns observed in NDVI satellite imagery. The approach constitutes a low-cost and operational tool for contextualizing field observations and facilitating multi-scale agronomic analysis.

Keywords: Georeferencing, Sentinel-2 imagery, Weeds, Precision agriculture, Smartphones

Retroproyección geométrica de observaciones del suelo agrícola con teléfonos móviles para su integración con imágenes satelitales

Resumen. Este trabajo presenta una metodología práctica para la georreferenciación de observaciones de campo utilizando imágenes oblicuas adquiridas con teléfonos móviles durante recorridos agronómicos. En condiciones reales, estas imágenes se capturan con ángulos de pitch variables y sin control geométrico estricto, lo que dificulta la localización espacial de los elementos observados. El enfoque propuesto permite estimar la ubicación de regiones de interés combinando imágenes terrestres con información mínima del dispositivo, como la posición GPS y la dirección de observación. Para ello, se emplea un modelo geométrico basado en la cámara pinhole que permite retroproyectar observaciones sobre un plano de terreno localmente plano, incorporando restricciones simples como la línea de horizonte y un punto de referencia de profundidad. El método se evalúa en un caso real de identificación de parches de maleza. Los resultados muestran que, a pesar de las incertidumbres en los parámetros y en las condiciones de adquisición, las regiones proyectadas son consistentes con patrones observados en imágenes satelitales de NDVI. El enfoque constituye una herramienta de bajo costo y aplicación operativa para contextualizar observaciones de campo y facilitar el análisis agronómico multi-escala.

Palabras clave: Georreferenciación, Imágenes de Sentinel-2, Malezas, Agricultura de precisión, Teléfonos inteligentes

1 Introducción

La agricultura de precisión requiere información espacial explícita para caracterizar la variabilidad intra-lote y apoyar decisiones de manejo. Si bien las imágenes satelitales brindan cobertura amplia, no siempre permiten interpretar el origen agronómico de los patrones observados, por lo que es necesario complementarlas con observaciones de campo que discriminen entre distintas causas (malezas, fallas de implantación o condiciones de humedad).

En este marco, se han explorado imágenes terrestres adquiridas con dispositivos móviles como complemento de la información satelital, mediante enfoques de crowd-sourcing (Laso Bayas et al., 2020), adquisición desde vehículos (Pilger et al., 2020) y técnicas de visión por computadora (d'Andrimont et al., 2018; Wu et al., 2021). Aunque estos métodos muestran potencial, persisten limitaciones en precisión espacial e incertidumbre de los datos (Foody & Boyd, 2024).

Un problema central en este contexto es la georreferenciación de observaciones obtenidas mediante imágenes oblicuas. En una fotografía tomada con un teléfono móvil

durante una recorrida de campo, el contenido relevante no coincide con la posición del sensor, sino que depende de la orientación de la cámara y de la profundidad de la escena. En consecuencia, el posicionamiento basado únicamente en GPS resulta insuficiente para ubicar con precisión los elementos observados (Alsubaie et al., 2017). Diversos trabajos han abordado este problema utilizando información geométrica adicional, como la detección del horizonte (Grelsson et al., 2020) o modelos digitales de elevación (Pritt, 2012).

En este trabajo se considera un caso frecuente en la práctica agronómica, donde la cámara presenta un eje óptico inclinado respecto a un terreno aproximadamente plano. Esta configuración, lejos de ser una limitación, puede ser explotada mediante modelos geométricos de proyección para estimar la ubicación en el suelo de las regiones observadas en la imagen.

El foco se coloca en la detección y delimitación de parches de maleza, un problema relevante en sistemas agrícolas extensivos de Argentina, donde estas infestaciones pueden ocupar superficies significativas dentro de un lote. La correcta localización de estos parches es un paso clave para estrategias de manejo localizado, como la aplicación selectiva de herbicidas.

La hipótesis central del trabajo es que, mediante la retroproyección geométrica de imágenes terrestres adquiridas con cámaras inclinadas, es posible mapear regiones de interés sobre el dominio geográfico del lote e integrarlas con información satelital. Este enfoque permite vincular la riqueza semántica de las observaciones en campo con la cobertura espacial de los sensores remotos.

A partir de esta idea, se propone un procedimiento práctico basado en un modelo de cámara *pinhole*, una estimación simplificada de la pose de la cámara y una corrección geométrica basada en profundidad. El objetivo no es desarrollar un sistema de georreferenciación de alta precisión, sino demostrar que, con información mínima disponible en una recorrida de campo, es posible obtener una correspondencia espacial consistente entre observaciones terrestres y satelitales.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta el modelo geométrico y el método de retroproyección. La Sección 3 describe el caso de estudio y el flujo de trabajo aplicado. La Sección 4 presenta los resultados. Finalmente, las Secciones 5 y 6 discuten los alcances del enfoque y presentan las conclusiones.

2 Metodología

El desarrollo del método propuesto se fundamenta en la inversión geométrica del proceso de formación de la imagen para recuperar la información espacial de las observaciones terrestres. El flujo general de este procedimiento se resume en la Fig. 1, donde se ilustra la transición desde la adquisición de imágenes oblicuas hasta la generación de información agronómica georreferenciada mediante su integración con productos satelitales.

Bajo esta premisa, la formalización matemática del problema utiliza la correspondencia entre los píxeles de interés y sus respectivos rayos visuales para determinar la posición de los parches de maleza sobre el dominio geográfico del lote. Este esquema permite integrar la orientación estimada de la cámara con las restricciones espaciales

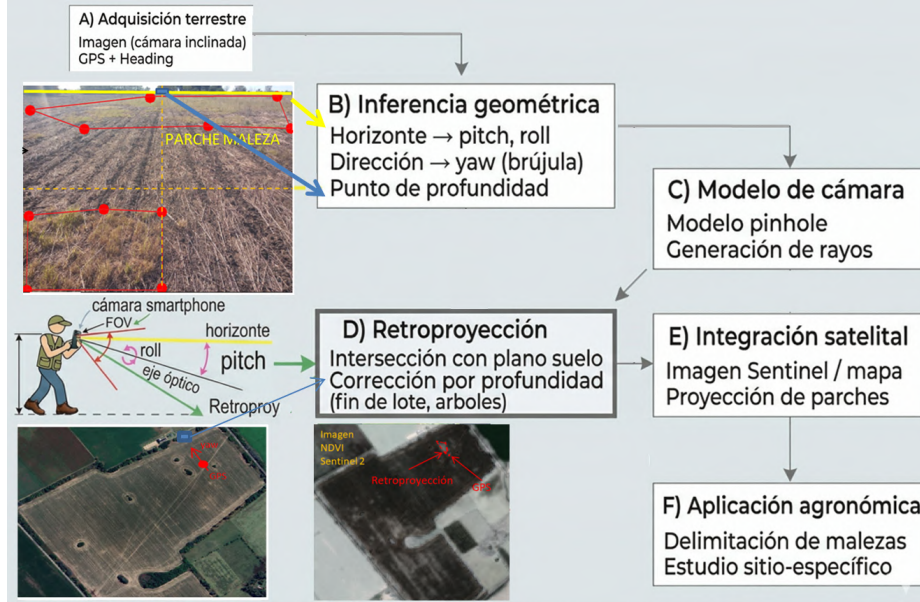


Fig. 1. Pipeline del método propuesto para integrar imágenes terrestres y satelitales. A partir de imágenes oblicuas adquiridas en campo (A), se estima la pose de la cámara mediante el horizonte, la dirección y un punto de profundidad (B), se modela la proyección mediante un modelo *pinhole* (C) y se retroproyectan los píxeles sobre el plano del terreno con una corrección geométrica (D). Las regiones de interés se proyectan sobre imágenes satelitales (E) para delimitar parches de maleza y apoyar el manejo sitio-específico (F).

del terreno, lo que facilita una correspondencia consistente entre la riqueza semántica de las fotografías de campo y la cobertura de los sensores remotos.

2.1 Datos de entrada y objetivo del método

Para la implementación del método, se utiliza la aplicación Open Camera (Harman, 2025) en la adquisición de las imágenes RGB, lo que permite registrar de forma nativa los metadatos de los sensores internos (acelerómetro y magnetómetro) en la cabecera del archivo. Esta herramienta facilita el acceso a los parámetros de orientación del dispositivo (*pitch*, *roll* y *yaw*) sin requerir software externo, una estrategia que guarda consistencia con antecedentes locales en el uso de sensores móviles para el mapeo de malezas (Sauczuk et al., 2025).

Bajo esta modalidad, se asume disponible la imagen original, una estimación de la posición de la cámara (GPS), la matriz intrínseca $\mathbf{K}$ o la información necesaria para estimarla y una imagen satelital georreferenciada del lote.

A lo largo del trabajo, suponemos que el terreno es localmente plano, modelado como $z_W = 0$, y se asume que el operador toma las fotografías desde una altura aproximadamente constante. Esto permite formular el problema como la intersección entre los rayos y un plano, simplificando el análisis geométrico.

2.2 Modelo geométrico de retroproyección

Cada píxel de la imagen define una dirección de observación en el espacio respecto al eje óptico de la cámara. El problema de georreferenciación consiste entonces en reconstruir el rayo visual asociado a dicho píxel y calcular su intersección con el plano del suelo. Para ello se consideran tres sistemas de referencia: el sistema mundo $\{W\}$, asociado al terreno; el sistema cámara $\{C\}$; y el sistema imagen, definido en coordenadas de píxel (u, v) . La cámara se ubica a una altura conocida h respecto del suelo, por lo que su posición en el sistema mundo puede escribirse como ${}^W\mathbf{C} = [X_C \ Y_C \ h]^T$. Nótese que los sistemas de referencia se denotan utilizando un índice superior izquierdo (Fig. 2).

La formación de la imagen se modela mediante una cámara *pinhole* cuyos parámetros son el centro de la imagen (c_x, c_y) y la distancia focal (f). Dado un punto en coordenadas cámara ${}^C\mathbf{X} = [x_C \ y_C \ z_C]^T$, su proyección es:

$$z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Invirtiéndose esta relación, cada píxel $\mathbf{x} = [u \ v \ 1]^T$ define un rayo visual cuya dirección en coordenadas cámara está dada por ${}^C\mathbf{d} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}$. En coordenadas normalizadas, esta dirección puede escribirse como ${}^C\mathbf{d} = [x_n \ y_n \ 1]^T$, donde $x_n = (u - c_x)/f$ e $y_n = (v - c_y)/f$, lo que permite interpretar directamente la geometría del problema.

Para determinar la posición en el terreno, el rayo se expresa en el sistema mundo mediante ${}^W\mathbf{d} = \mathbf{R}_{CW} {}^C\mathbf{d} = [d_x \ d_y \ d_z]^T$, donde $\mathbf{R}_{CW}$ describe la orientación de la cámara respecto al mundo. La recta de visión queda entonces definida como ${}^W\mathbf{X}(\lambda) = {}^W\mathbf{C} + \lambda {}^W\mathbf{d}$. La intersección con el plano del suelo se obtiene imponiendo la condición $z_W = 0$, lo que conduce a $\lambda = -h/d_z$ y, finalmente, a la expresión de retroproyección ${}^W\mathbf{X} = {}^W\mathbf{C} - \frac{h}{d_z} {}^W\mathbf{d}$ (Fig. 2A).

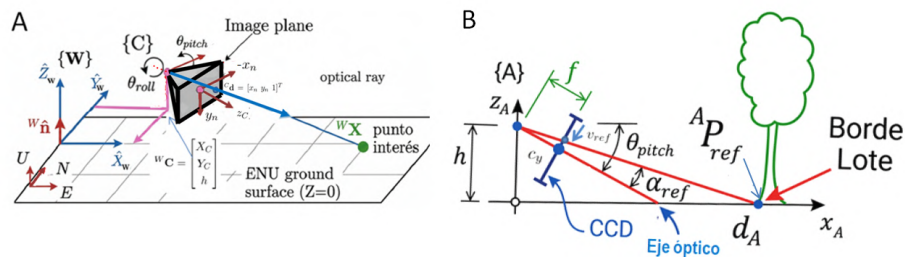


Fig. 2. (A) Geometría del problema en 3D. (B) Geometría del problema simplificado en 2D.

2.3 Sensibilidad geométrica cerca del horizonte

La formulación anterior permite analizar una propiedad fundamental del problema: la retroproyección se vuelve altamente sensible cuando el rayo visual es casi paralelo al plano del suelo, es decir, cerca del horizonte.

En este régimen, el parámetro de intersección $\frac{h}{d_z} {}^W \mathbf{d}$ aumenta fuertemente en magnitud. Lo que significa que pequeñas perturbaciones en la dirección del rayo —debidas a ruido en la imagen o a errores en la estimación de la orientación— producen grandes errores en la posición estimada.

En consecuencia, la estimación basada en píxeles cercanos al horizonte resulta inherentemente mal condicionada, lo que motiva la incorporación de restricciones geométricas adicionales.

2.4 Información geométrica del horizonte

A pesar de la limitación anterior, la línea de horizonte constituye una fuente valiosa de información sobre la orientación de la cámara. El plano del suelo posee una normal bien definida en el sistema mundo, ${}^W \mathbf{n} = [0 \ 0 \ 1]^T$, cuya expresión en el sistema cámara está dada por ${}^C \mathbf{n} = \mathbf{R}_{CW}^T {}^W \mathbf{n}$.

La línea de horizonte está formada por aquellos rayos que son paralelos al plano del suelo, es decir, aquellos que satisfacen la condición de ortogonalidad $({}^C \mathbf{n})^T {}^C \mathbf{d} = 0$. Esta relación define una recta en la imagen cuyos parámetros dependen de la orientación de la cámara. En particular, la inclinación de dicha recta se asocia al ángulo de *roll*, mientras que su posición vertical está gobernada por el *pitch*, lo que permite estimar la orientación relativa de la cámara independientemente de su posición.

2.5 Reducción del problema a un problema 2D en condiciones de campo

Asumimos que en condiciones típicas de adquisición, la cámara presenta un ángulo de *roll* pequeño, mientras que el *yaw* puede estimarse a partir de datos como GPS, el magnetómetro del teléfono y/o teniendo en cuenta que las trayectorias del recorrido se realizan de modo tal que puntos de interés suelen encontrarse aproximadamente en la dirección de avance (Fig. 2B).

Bajo estas hipótesis, el problema puede reducirse a un análisis en el plano vertical que contiene al eje óptico de la cámara. Para ello se introduce un sistema auxiliar $\{A\}$ (Fig. 2B), cuyo eje x_A coincide con la dirección de avance y el eje z_A es vertical, ubicando la cámara en la posición $(0, 0, h)$. Así, la incertidumbre dominante en la orientación se concentra en el ángulo *pitch*.

2.6 Estimación del pitch y profundidad mediante un punto de referencia en el borde del lote

Para estimar el *pitch*, se recurre a un punto lejano observable en la escena (por ejemplo, el fin del lote, Fig. 2B), cuya distancia horizontal aproximada d_A puede determinarse a partir de información externa (por ejemplo, arboledas o alguna otra clave visual que pueda asociarse a una imagen satelital). Si dicho punto se proyecta en la imagen con

coordenada v_{ref} , se define la coordenada normalizada $y_{n,ref} = (v_{ref} - c_y)/f$, a partir de la cual puede interpretarse un ángulo visual $\alpha_{ref} = \arctan(y_{n,ref})$. La geometría en el plano vertical (x_A, z_A) conduce entonces a la relación $d_A = h \cot(\theta + \alpha_{ref})$, de donde se obtiene la expresión

$$\theta_{pitch} = \arctan\left(\frac{h}{d_A}\right) - \arctan\left(\frac{v_{ref} - c_y}{f}\right). \quad (2)$$

Esta formulación permite estimar el *pitch* de manera robusta al incorporar información de profundidad, lo que atenúa la inestabilidad asociada a los rayos cercanos al horizonte. En conjunto, la metodología integra la información del horizonte con una restricción de profundidad, logrando estimaciones de posición más robustas, particularmente en escenarios de alta sensibilidad geométrica. Un ejemplo detallado del procedimiento puede consultarse en el material suplementario (Oviedo, 2026).

3 Resultados

3.1 Caso de estudio: lote agrícola en Pilar.

La metodología se aplicó a un lote agrícola ubicado en el partido de Pilar, provincia de Buenos Aires (Fig. 3A-B). El interés agronómico radica en la presencia de parches de maleza identificados en campo, consistentes con patrones diferenciales observados en la información satelital.

La Fig. 3A-B muestra la imagen satelital RGB y el correspondiente mapa de NDVI, donde se evidencian variaciones espaciales que reflejan heterogeneidad en el vigor de la vegetación. En particular, las regiones más oscuras indican sectores con control efectivo de herbicidas, mientras que los tonos grises corresponden a parches de maleza remanente.

La evidencia en campo (Fig. 3C-D) resulta consistente con las observaciones previas: los parches pueden identificarse visualmente luego de la aplicación de herbicidas y su impacto persiste durante los primeros estadios del cultivo. Esto refuerza la interpretación de que las señales espectrales captadas en el NDVI están asociadas a la dinámica real de las malezas.

El análisis se complementa con información topográfica derivada del Modelo Digital de Elevación (DEM) de 5 m del Instituto Geográfico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2023) y el mapa de pendiente (Fig. 3E-F). En la región de estudio delimitada, la pendiente del terreno es inferior al 1%, lo que justifica la aproximación de terreno plano ($z_W = 0$) adoptada en la sección ‘Metodología’, sin introducir errores geométricos significativos en la retroproyección.

3.2 Adquisición de datos

El relevamiento del lote se realizó mediante recorridas de campo, durante las cuales se adquirieron imágenes RGB con un *smartphone*, registrando simultáneamente la posición GPS y una estimación de la orientación del dispositivo (Fig. 4A).

De forma complementaria, se descargaron imágenes satelitales georreferenciadas (RGB y NDVI) correspondientes a la fecha más próxima a la adquisición en campo,

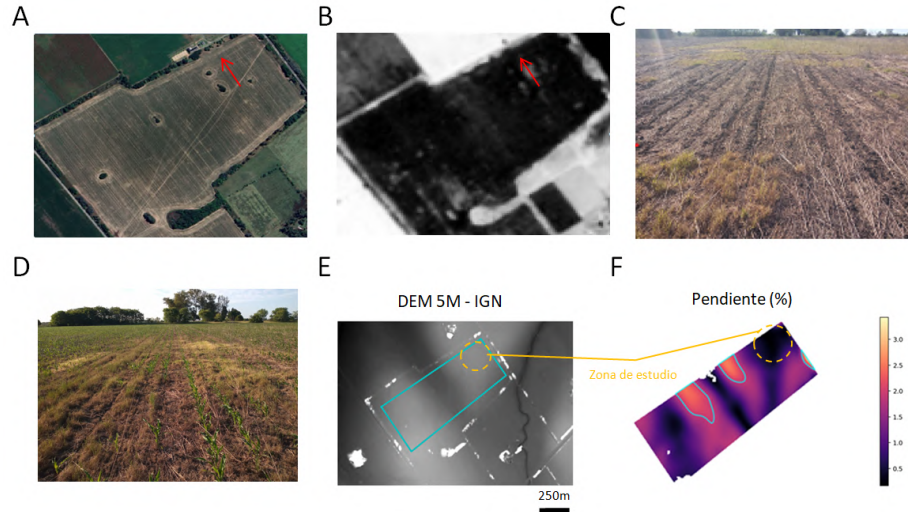


Fig.3. Imágenes satelitales y terrestres del parche de malezas analizado y su contexto agronómico. (A) Imagen satelital RGB del lote, donde se identifica la trayectoria analizada. (B) Mapa NDVI correspondiente, en el cual las zonas más claras dentro del lote indican áreas con mayor vigor de malezas, asociadas a parches que sobrevivieron a la aplicación de herbicida. (C) Imagen terrestre en el lote, donde se observan directamente parches de maleza. (D) Imagen en una etapa posterior luego de la siembra, donde se evidencia el impacto persistente del parche sobre el desarrollo del cultivo. (E) Modelo Digital de Elevación (DEM) de 5 m del IGN, donde se analiza la zona delimitada (región punteada). (F) Mapa de pendiente derivado del DEM en la misma región. En la región analizada, la pendiente del terreno es menor al 1%.

desde *Copernicus Data Space Ecosystem* (Kovács et al., 2026), junto con una imagen satelital de alta resolución visualizada en QGIS mediante QuickMapServices.

Como parte del proceso de vinculación geométrica, se seleccionó un punto de referencia de profundidad visible en la escena, asociado a la arboleda ubicada en el límite del lote ($^A\mathbf{P}_{ref}$), identificable tanto en la imagen terrestre como en la satelital (Fig. 4C-D) de Copernicus y QGIS. Este punto introduce una restricción geométrica adicional que contribuye a estabilizar la solución de retroproyección. El flujo completo aplicado al caso de estudio se resume en la Fig. 4.

3.3 Marcado de la imagen de campo

Sobre la imagen terrestre seleccionada se realizaron tres tipos de marcado manual con fines geométricos y agronómicos. Primero, se marcó un punto de referencia de profundidad en la región central, correspondiente al límite del lote. En segundo lugar, se trazó la línea de horizonte para estimar los ángulos de *pitch* y *roll*, así como para delimitar la región válida de retroproyección. En tercer lugar, se delinearon mediante polígonos los parches de maleza visibles en la escena (Fig. 4C).

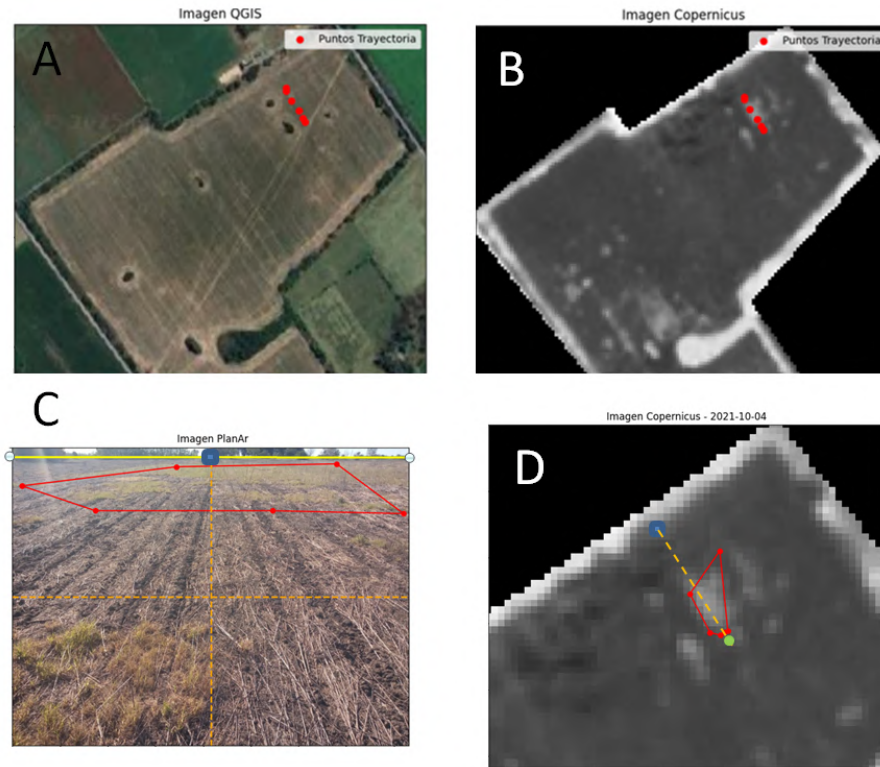


Fig. 4. Geolocalización de observaciones terrestres y retroproyección de parches de maleza. (A) Imagen satelital RGB del lote con la trayectoria de adquisición (puntos rojos). (B) Imagen NDVI correspondiente, donde se identifican patrones espaciales asociados a la presencia de malezas. (C) Imagen terrestre con anotaciones manuales: línea de horizonte (amarillo), punto de referencia de profundidad asociado al fin del lote (recuadro azul) y polígonos de maleza (rojo). Las líneas punteadas naranjas indican los ejes centrales de la imagen. (D) Resultado de la retroproyección de los polígonos de maleza sobre la imagen de NDVI. El punto verde indica la posición del *smartphone*, la línea punteada naranja la dirección de observación (*heading*) y el punto azul la proyección del punto de referencia de profundidad. La figura ilustra el flujo de integración entre observaciones terrestres y datos satelitales mediante el modelo geométrico propuesto.

Desde el punto de vista metodológico, este marcado transforma la imagen en un insumo geométrico estructurado, lo que permite representar tanto la configuración de la cámara como los objetos de interés a proyectar sobre el terreno.

3.4 Análisis de sensibilidad de la retroproyección

En una formulación extendida del problema, el *pipeline* incorpora incertidumbres en parámetros clave como la distancia focal, la altura de la cámara, la localización UTM, la posición del punto de referencia de profundidad, la orientación del horizonte y el

ángulo de *yaw*. Para el caso de Pilar, se reportan incertidumbres típicas del orden de 10 píxeles en parámetros de imagen, 0,1 m en la altura de la cámara, 3 m en la posición UTM y 2° en la orientación.

En este trabajo, el procesamiento principal utiliza una versión determinista del modelo con valores nominales. Complementariamente, se evaluó su sensibilidad mediante muestreo de Monte Carlo, generando realizaciones con parámetros perturbados y retroproyectando los polígonos de maleza en cada caso. A partir de estas proyecciones, se construyeron envolventes espaciales para distintos niveles de dispersión (cuartiles 25%, 50%, 75% y 100%).

La Fig. 5 ilustra el procedimiento. En la imagen izquierda se muestra el polígono de maleza utilizado como entrada del modelo, mientras que en la imagen derecha se presentan las regiones obtenidas por retroproyección bajo incertidumbre. Cada contorno corresponde a la envolvente de las proyecciones hasta un determinado cuartil. El punto rojo indica la posición de la cámara y las envolventes reflejan la dispersión asociada a la incertidumbre en los parámetros.

Los resultados evidencian que, pese a la dispersión en la localización, las proyecciones se concentran en un sector acotado y resultan coherentes con la imagen satelital, lo que sugiere que el método preserva la capacidad de asociación espacial bajo incertidumbres realistas. Este análisis es de carácter exploratorio, quedando un tratamiento probabilístico más completo para trabajos futuros.

3.5 Evidencia agronómica

El análisis de la serie temporal de imágenes NDVI (Fig. 6) muestra que los parches de maleza identificados presentan un efecto persistente sobre el vigor del cultivo, manteniendo el contraste espectral a lo largo del ciclo productivo, incluso luego de intervenciones con herbicidas.

Este comportamiento sugiere que los parches corresponden a infestaciones suficientemente densas como para impactar en la dinámica del cultivo, lo que refuerza la relevancia agronómica de su identificación y localización espacial.

4 Discusión

4.1 Vinculación geométrica y consistencia multi-escala

La aplicación del método permitió estimar la localización de parches de maleza observados en campo sobre la imagen satelital (Fig. 4C-D). Más que la precisión puntual de la retroproyección, el resultado principal es establecer una correspondencia geométrica consistente entre observaciones terrestres oblicuas y estructuras visibles en imágenes satelitales.

El enfoque no busca alta precisión georreferencial, sino contextualizar espacialmente observaciones de campo con información mínima. La correspondencia con el NDVI sugiere que el modelo captura la geometría dominante y permite vincular ambas fuentes. Esta integración es especialmente relevante en *scouting*, donde la información visual suele carecer de referencia espacial explícita.

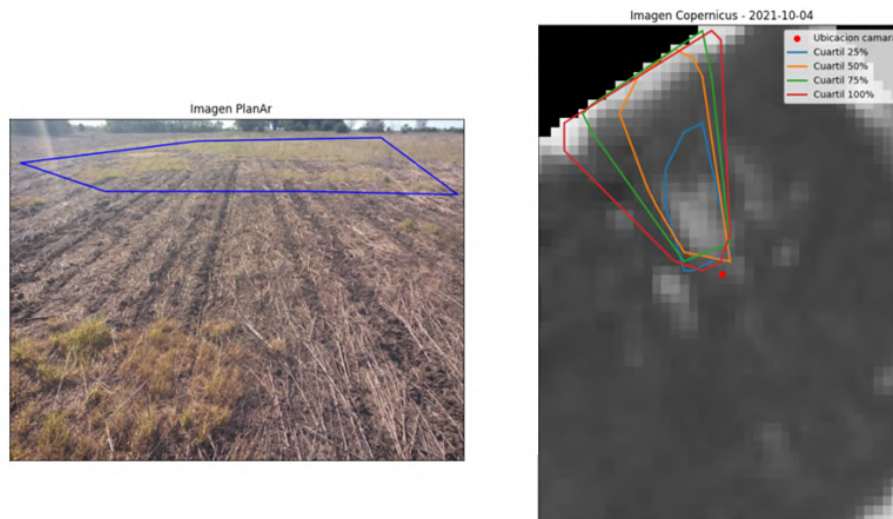


Fig. 5. Análisis de sensibilidad de la retroproyección de un parche de maleza bajo incertidumbre paramétrica. (A) Imagen terrestre utilizada como entrada del modelo, donde se indica el polígono de maleza delineado manualmente (azul). (B) Resultado de la retroproyección sobre la imagen satelital NDVI considerando múltiples realizaciones obtenidas mediante muestreo de Monte Carlo. El punto rojo indica la posición de la cámara. Los contornos representan envolventes espaciales correspondientes a distintos cuartiles (25%, 50%, 75% y 100%) de las proyecciones acumuladas, reflejando la dispersión inducida por la incertidumbre en los parámetros del modelo.

4.2 Robustez frente a incertidumbre

El análisis de sensibilidad basado en Monte Carlo mostró que, si bien la retroproyección presenta dispersión frente a perturbaciones en los parámetros del modelo, las soluciones permanecen en regiones acotadas del lote (Fig. 5).

Este comportamiento es consistente con el problema: la incertidumbre en parámetros como la orientación, la distancia focal o el punto de referencia genera variaciones en la dirección de los rayos proyectados que se amplifican con la distancia. Aun así, las proyecciones mantienen coherencia con la imagen satelital. En este marco, el método se interpreta como una herramienta de estimación espacial bajo incertidumbre, capaz de generar regiones plausibles para vincular observaciones de campo con patrones del lote.

4.3 Ventajas operativas del enfoque

Una fortaleza del método es su bajo requerimiento instrumental: puede implementarse con un teléfono móvil, información básica de posicionamiento y una imagen satelital georreferenciada, sin equipamiento especializado.

Además, es un enfoque interpretable, ya que cada componente tiene un significado geométrico claro (horizonte: orientación; punto de referencia: escala; polígonos: re-

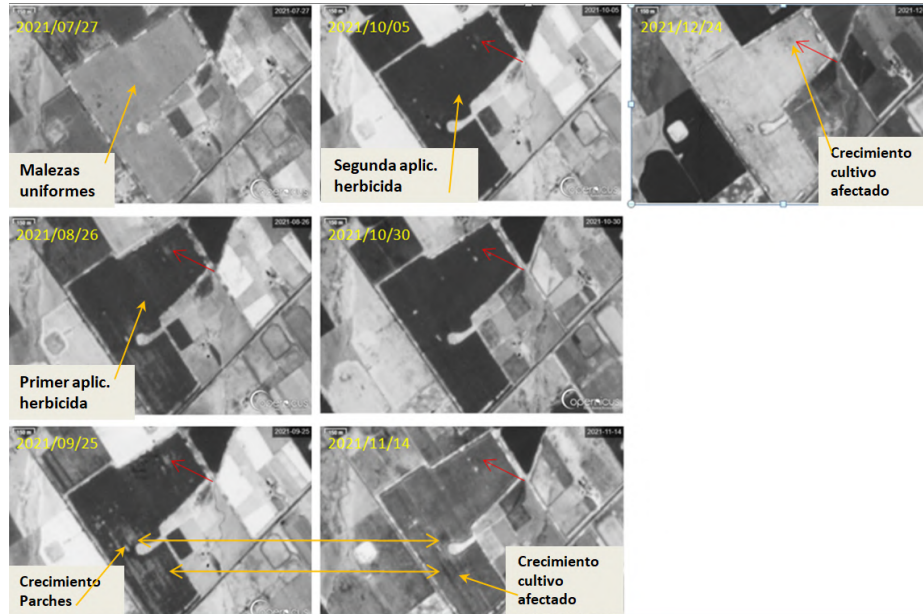


Fig. 6. (A) Evolución temporal de la respuesta del cultivo y persistencia de parches de maleza observados en la serie de NDVI. Se muestran imágenes satelitales en distintas fechas durante la campaña (julio–diciembre). Las flechas rojas indican el parche principal analizado en este trabajo, mientras que las flechas naranjas señalan regiones adicionales con comportamiento similar dentro del lote. En julio se observa una distribución de malezas uniformes que crecieron durante el período de barbecho. En agosto (posterior a una primera aplicación de herbicida) algunos parches persisten, evidenciando supervivencia de malezas. En septiembre, en ausencia de una nueva intervención, estos parches se expanden y aumentan su contraste espectral. En octubre, tras una segunda aplicación de herbicida, se observa una reducción parcial de dichas anomalías. Sin embargo, en noviembre y diciembre, durante el desarrollo del cultivo, las zonas previamente afectadas muestran un menor vigor relativo, evidenciando un impacto persistente sobre el crecimiento del cultivo.

giones de interés). Esto facilita su validación en campo y su uso como herramienta exploratoria para generar evidencia espacial y orientar decisiones de manejo.

4.4 Limitaciones

El método presenta limitaciones que deben ser consideradas. La hipótesis de terreno plano puede introducir errores en presencia de relieve significativo, donde la intersección de los rayos no se ajusta a un único plano. Además, el marcado manual en la imagen terrestre introduce subjetividad y limita la escalabilidad; errores en la identificación del horizonte o del punto de referencia afectan la estimación de la pose y la precisión depende de la calidad de la información disponible (orientación, GPS y calibración de la cámara), lo que refleja las restricciones propias de sensores de bajo costo en campo.

4.5 Líneas de trabajo futuro

El trabajo abre diversas líneas de desarrollo. Una de ellas es la incorporación de un modelo probabilístico completo que permita integrar explícitamente las distintas fuentes de incertidumbre, utilizando, por ejemplo, enfoques bayesianos para estimar la distribución posterior de la posición proyectada.

Otra línea relevante consiste en la automatización de etapas del proceso, como la detección de la línea de horizonte o la segmentación de parches de maleza, mediante técnicas de *deep learning*.

Finalmente, la extensión del método a escenarios con topografía variable mediante el uso de modelos digitales de elevación permitiría ampliar su aplicabilidad a una mayor diversidad de condiciones agronómicas.

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó un método geométrico para georreferenciar observaciones de malezas a partir de imágenes oblicuas de teléfonos móviles en campo.

Basado en un modelo *pinhole*, una estimación práctica de la pose y restricciones geométricas simples (línea de horizonte y punto de referencia), el método permite retro-proyectar regiones de interés y vincularlas con información satelital, logrando una correspondencia consistente con estructuras observadas en NDVI.

El aporte principal es demostrar la factibilidad de esta integración en condiciones operativas reales, incluso con ángulos de *pitch* variables y sin requerir equipamiento especializado, abordando así el uso de imágenes oblicuas como fuente de información espacial en agronomía.

Si bien el método no apunta a una georreferenciación de alta precisión, los resultados indican que permite generar información espacial útil para contextualizar observaciones de campo y reducir la ambigüedad en la interpretación de datos satelitales.

En conjunto, el trabajo sugiere que es posible establecer un vínculo operativo entre el *scouting* visual y el análisis satelital mediante modelos geométricos simples, habilitando nuevas formas de integración multi-escala basadas en herramientas disponibles en la práctica cotidiana.

References

- Alsubaie, N. M., Youssef, A. A., & El-Sheimy, N. (2017). Improving the accuracy of direct geo-referencing of smartphone-based mobile mapping systems using relative orientation and scene geometric constraints. *Sensors*, 17(10), 2237.
- d'Andrimont, R., Yordanov, V., Lemoine, G., Yoong, J., Nikel, K., & Van der Velde, M. (2018). Crowdsourced street-level imagery as a potential source of in-situ data for crop monitoring. *Remote Sensing*, 7(4), 127.
- Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2024). Assessing uncertainty in volunteered geographic information for land cover mapping. *Remote Sensing of Environment*.
- Grelsson, B., Robinson, A., Felsberg, M., & Khan, F. (2020). Gps-level accurate camera localization with horizonnet. *Journal of Field Robotics*, 37(6), 951–971.

- Harman, M. (2025). Open Camera [Versión 1.54.1. Android app]. <https://opencamera.org.uk/>
- Instituto Geográfico Nacional. (2023). *Atlas nacional interactivo de argentina (anida)* [Consultado el 17 de abril de 2026]. <https://anida.ign.gob.ar>
- Kovács, D. D., Musial, J., Bojanowski, J., Clarijs, D., de la Mar, J., & Zlinszky, A. (2026). Copernicus data space ecosystem establishes public cloud processing for earth observation data. *Scientific Data*, 13(1), 537.
- Laso Bayas, J. C., See, L., & Fritz, S. (2020). Crowdsourcing lucas: Citizens generating reference land cover and land use data with a mobile app. *Remote Sensing*, 9(11), 446.
- Oviedo, M. E. (2026). Apéndice A: Ejemplo de implementación. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21019149>
- Pilger, N., Berg, A., & Joosse, P. (2020). Semi-automated roadside image data collection for characterization of agricultural land management practices. *Remote Sensing*, 12(14), 2342.
- Pritt, S. W. (2012). Geolocation of photographs by horizon matching with digital elevation models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Sauczuk, M., Oviedo, M., Poggio, S., Ibañez, S. A., & Oliva, D. (2025). Vinculación satelital-terrestre para monitoreo agronómico mediante la aplicación plantar. *JAIIO, Jornadas Argentinas de Informática*, 11(3), 57–70.
- Wu, B., Li, Q., & Zhang, M. (2021). Identification of crop type in crowdsourced road view photos with deep convolutional neural network. *Sensors*, 21(4), 1165.