

Vinculación satelital-terrestre para monitoreo agronómico mediante la aplicación PlantAR

Martín Sauczuk¹[10000-0003-4772-6880], Martín Oviedo^{1,4}[0000-0002-0884-2267]
Santiago Poggio^{2,3}[0000-0001-9949-9240], Santiago A. Ibañez^{3,4}, Damián Oliva^{1,4}[0000-0001-9714-4112]

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

² IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET. Facultad de Agronomía, Cátedra de Producción Vegetal. Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina (C1417DSE)

³ Universidad Nacional de Río Negro

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET), Argentina

doliva@unq.edu.ar

Resumen. Se presenta PlantAR, una aplicación experimental de código abierto para smartphones diseñada para apoyar el monitoreo agronómico georreferenciado mediante la adquisición automatizada de imágenes terrestres vinculadas a puntos de interés detectados por imágenes satelitales. La aplicación permite capturas manuales o automáticas, acompañadas de metadatos temporales, geográficos y de sensores del dispositivo (acelerómetro y magnetómetro). Incluye un mapa en tiempo real y emite alertas sonoras que activan la captura automática al ingresar en un radio predefinido. Como prueba inicial, el trabajo se centró en automatizar la adquisición de imágenes georreferenciadas en zonas cercanas a rutas, vinculadas a series temporales NDVI obtenidas de imágenes satelitales. Las rutas fueron guiadas por coordenadas y áreas de interés cargadas en formato GeoJSON. Las imágenes terrestres fueron recolectadas y comparadas con la curva temporal de NDVI. Los resultados muestran una clara correspondencia temporal entre los estadios de crecimiento del cultivo y la evolución de la señal NDVI, respaldada por una correlación estadística con índices RGB calculados a partir de las imágenes terrestres, destacándose el índice cromático verde (GCC). PlantAR demostró ser una herramienta práctica y adaptable, con flexibilidad para capturar imágenes desde la ruta o en proximidad al cultivo. La aplicación constituye una solución escalable para el monitoreo visual de campos y establece una base sólida para futuros desarrollos en integración de datos satelitales y terrestres.

Palabras clave: Georreferenciación, Integración satelital-terrestre, NDVI, Monitoreo visual, Índices RGB.

Satellite-Ground Linking for Agronomic Monitoring Using the PlantAR Application

Abstract. PlantAR is an open-source smartphone application designed to support georeferenced agronomic monitoring through the acquisition of ground-level images linked to points of interest detected via satellite imagery. The application allows manual or automated image capture, supported by temporal, geographic, and sensor metadata (accelerometer and magnetometer). It provides real-time mapping and audio alerts that trigger automatic image capture when entering a predefined radius. As an initial validation, the study focused on automating the acquisition of georeferenced ground-level images near roads, linked to satellite-based NDVI time series. PlantAR guided the acquisition based on coordinates and areas of interest loaded in GeoJSON format. Ground-level images were collected along designated routes and compared to the satellite-derived NDVI curve. The results show a strong temporal correspondence between the evolution of crop growth stages and the NDVI signal, supported by a statistical correlation with RGB indices (notably the Green Chromatic Coordinate, GCC) calculated from the terrestrial images. PlantAR proved to be practical and adaptable, offering flexibility to capture images from the road or in closer proximity to the crop. The application provides a scalable solution for visual field monitoring and serves as a foundation for future developments in satellite-ground data integration. .

Keywords: Georeferencing, Satellite-ground integration, NDVI, Visual monitoring, RGB indices.

1 Introducción

La integración de observaciones satelitales con registros tomados en el terreno se ha consolidado como una estrategia clave para mejorar el monitoreo agrícola a gran escala. El uso de imágenes multiespectrales obtenidas desde plataformas satelitales ha permitido estimar variables relevantes como la biomasa y el rendimiento de los cultivos a nivel regional (Ferencz et al., 2004). Sin embargo, estas estimaciones requieren ser validadas con información recolectada directamente en el campo, lo que suele representar un cuello de botella operativo debido a los costos altos y la cobertura espacial limitada.

Diversos estudios han destacado la necesidad de contar con observaciones terrestres georreferenciadas que permitan mejorar la precisión en la clasificación de cultivos, detectar estados fenológicos y apoyar la calibración y evaluación de modelos de predicción basados en aprendizaje automático (Yao et al., 2022; Murugantham et al., 2022). Por ejemplo, la identificación del nivel de crecimiento y los estados de desarrollo del cultivo, como la floración, mediante imágenes en tierra puede proporcionar evidencia visual complementaria a los índices derivados de satélites (Darwin et al., 2021). Asimismo, la disponibilidad de imágenes geolocalizadas facilita la generación de conjuntos de datos etiquetados, esenciales para el entrenamiento y

validación de modelos de aprendizaje profundo aplicados al reconocimiento de cultivos y a la predicción de rendimiento.

En este contexto, surgieron soluciones basadas en imágenes terrestres geo-referenciadas de bajo costo, como los phenocams móviles. Hufkens et al. (2019) desarrollaron un protocolo donde agricultores tomaban, tres veces por semana, imágenes geo-referenciadas del dosel de trigo usando sus teléfonos, extrayendo el coeficiente cromático verde (GCC) para detectar estadios fenológicos (macollaje, emergencia de espigas) con alta fidelidad temporal. Sin embargo, este enfoque depende de despliegues estáticos en cada parcela y de la programación manual de las ventanas de captura, lo que limita su cobertura espacial.

Para ampliar la escala de muestreo, surgieron también los sistemas de Street-Level Imagery (SLI), que montan cámaras en vehículos y emplean técnicas de visión por computadora. d'Andrimont et al. (2021) recolectaron imágenes geo-etiquetadas a lo largo de rutas fijas (~200 km mensuales) y aplicaron transferencia de aprendizaje con MobileNetV2 para clasificar tipo de cultivo y estadio fenológico, alcanzando un F1 cercano al 87 % a nivel de parcela. Aunque estos sistemas son escalables en distancia recorrida, requieren equipamiento dedicado (cámaras de acción, réflex) y campañas predefinidas.

En este marco, se desarrolló PlantAR, una aplicación experimental de código abierto para dispositivos Android. El objetivo del diseño es facilitar la adquisición automatizada de imágenes terrestres georreferenciadas. La herramienta permite vincular imágenes con datos de ubicación, fecha, hora y sensores del teléfono (como acelerómetro y magnetómetro) y cuenta con un sistema de captura automática guiada por proximidad a puntos de interés predefinidos, seleccionados a partir del análisis de imágenes satelitales recientes. Esta funcionalidad permite organizar recorridos flexibles en campo, aprovechar información satelital previa y reducir la necesidad de equipamiento especializado.

Este trabajo presenta una prueba de concepto de PlantAR, integrando imágenes satelitales (NDVI) y herramientas SIG para definir puntos de interés cercanos a rutas, y validando en campo la correspondencia entre la evolución satelital y las imágenes tomadas automáticamente desde dispositivos móviles. El enfoque propuesto se orienta a mejorar el proceso de obtención de verdades de campo y a sentar las bases para la futura implementación de sistemas híbridos de observación donde datos satelitales y terrestres se complementen de forma eficiente.

2 Metodología

2.1 Flujo de trabajo

El flujo de trabajo propuesto se estructuró en cinco etapas principales, integrando el análisis de imágenes satelitales, herramientas SIG y la adquisición de datos terrestres mediante la aplicación móvil PlantAR.

A. Análisis de imágenes satelitales (Sentinel-2). Se utilizaron imágenes multispectrales provistas por el satélite Sentinel-2, accedidas a través de la plataforma Copernicus Open Access Hub (*Copernicus Browser*). Se seleccionaron

escenas correspondientes a áreas agrícolas próximas a rutas y caminos rurales en fechas clave del calendario agrícola, con el fin de detectar cambios asociados con operaciones agrícolas y estados fenológicos del cultivo. Estas imágenes fueron guardadas en formato TIFF georeferenciado, para ser importadas de QGIS. Ver Figura 1.

B. Análisis geoespacial en QGIS. Las imágenes satelitales fueron procesadas en QGIS para realizar un análisis georreferenciado. Se emplearon tanto las bandas RGB como índices de vegetación, particularmente el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), con el objetivo de identificar signos de preparación del suelo y actividad agrícola incipiente en campos linderos a rutas. Se delimitaron manualmente las áreas de interés sobre la base de esta información.

C. Carga y exportación de coordenadas de interés. Los puntos correspondientes a los campos identificados como relevantes fueron cargados en una nueva capa vectorial de QGIS. Esta capa fue posteriormente exportada en formato GeoJSON.

D. Importación en PlantAR y adquisición de imágenes. El archivo GeoJSON fue importado en la aplicación *PlantAR*, donde se configuró el modo de captura automatizada por proximidad. Se recorrieron las rutas establecidas con un vehículo. La aplicación tomó imágenes automáticamente al ingresar dentro del radio geográfico definido alrededor de cada punto objetivo.

Todas las imágenes capturadas, junto con sus metadatos (coordenadas, fecha, hora, sensores del dispositivo), fueron almacenadas localmente y luego cargadas a la nube en la plataforma *Cloudinary*.

E. Descarga y procesamiento de imágenes terrestres. Finalmente, se descargaron las imágenes y sus metadatos desde *Cloudinary* para su análisis. Esta descarga se realizó con un script programado en Python filtrando las imágenes dentro de un radio y un rango de fechas de interés. Esta información fue utilizada para comparar visualmente las condiciones observadas en campo con los resultados del análisis satelital, evaluando la correspondencia entre ambas fuentes de información.

Es importante destacar que las imágenes fueron captadas desde un vehículo, apuntando sistemáticamente hacia uno u otro costado de la ruta, es decir, en direcciones aproximadamente perpendiculares al sentido de avance. Durante los recorridos, la orientación de la cámara se mantuvo fija hacia un lado específico del vehículo en cada trayecto y verificada posteriormente a través de una comparación visual con imágenes de Google Street View. Este procedimiento simple permitió establecer la dirección de la toma sin necesidad de procesar los registros del acelerómetro ni del magnetómetro. La aplicación *PlantAR* registra metadatos de sensores disponibles en el teléfono, como el acelerómetro y el magnetómetro, que permiten estimar la inclinación (pitch y roll) y el rumbo (heading) del dispositivo. Sin embargo, en esta implementación no se utilizaron estos sensores para determinar la orientación de la cámara ni para realizar retroproyecciones geométricas. La incorporación de métodos de retroproyección más complejos, que aprovechen los

sensores inerciales y estimaciones de incertidumbre, se plantea como línea futura de trabajo.

2.2 Estimación aproximada del campo visual horizontal asociado a las mediciones

Se realizó una estimación empírica del campo visual horizontal (FOV) mediante un procedimiento práctico de triangulación. Para ello, se capturó una fotografía de una cinta métrica colocada de manera que ocupara todo el ancho del encuadre a una distancia conocida, verificando que un metro de longitud coincidiera con los extremos de la imagen. Además, se registró la altura desde la cual se tomó la fotografía. Este procedimiento permitió estimar el FOV de la cámara mediante relaciones trigonométricas simples.

En este trabajo no se realizó una retroproyección matemática explícita de la región observada sobre el suelo. Sin embargo, confiamos en que la región visualizada puede aproximarse con un nivel de precisión suficiente para los objetivos planteados, considerando que: a) La coordenada GPS corresponde al punto donde se realiza la captura. b) La dirección del eje óptico de la cámara se mantiene aproximadamente perpendicular al sentido de avance del vehículo. c) El campo visual (FOV) es conocido, constante para cada dispositivo, y se calibró previamente. d) La superficie del lote se puede considerar plana y horizontal en la escala de análisis utilizada.

Este conjunto de supuestos, junto con la verificación visual mediante imágenes de Google Street View y la uniformidad espacial de los lotes agrícolas monitoreados, proporciona confianza en la alineación aproximada entre las imágenes terrestres y las regiones observadas satelitalmente.

Cabe destacar que las imágenes capturadas con PlantAR siempre se obtienen a máxima resolución y con una configuración fija, por lo que el FOV horizontal permanece constante para cada modelo de teléfono y solo requiere calibración una vez. La formalización matemática detallada de la retroproyección se considera una línea futura de trabajo que permitirá mejorar la precisión espacial en escenarios más complejos.



Fig. 1. (A) Adquisición de imágenes satelitales (Sentinel-2). (B) Puntos de interés seleccionados sobre imágenes de NDVI en QGIS y región analizada en este trabajo (elipse punteada).

3 Resultados

3.1 La aplicación PlantAR

PlantAR App funciona en modo offline, es decir, no requiere conexión a Internet ni a redes móviles para capturar datos.

La aplicación fue desarrollada íntegramente en *Flutter* utilizando el lenguaje de programación *Dart*. Es de código abierto y su código fuente está disponible en un repositorio público de *GitHub*. Para las funcionalidades basadas en mapas, se emplea el SDK de *Mapbox* bajo una licencia de desarrollador. Actualmente, la aplicación se encuentra en producción y puede descargarse directamente desde *Google Play Store*. Los puntos de interés utilizados para la captura automática de imágenes están disponibles en un repositorio adicional, también público, denominado *plantar-geojson* (Sauckzuk, 2025).

La pantalla principal muestra una lista de todas las imágenes capturadas. Cada imagen incluye metadatos, los que contienen las coordenadas geográficas y los valores de sensores registrados al momento de la captura. Las imágenes se almacenan localmente en el dispositivo. El usuario puede subirlas a la nube cuando lo desee, por ejemplo, al disponer de acceso a una red Wi-Fi.

La Figura 2A muestra una vista de las imágenes almacenadas localmente. La app ofrece filtros para visualizar:

- imágenes ya almacenadas,
- imágenes pendientes para subir a la nube,
- imágenes con error de subida (por ejemplo, por fallas de red).

El usuario también puede eliminar imágenes no deseadas o capturadas por error.

Los modos de captura disponibles son:

- **Captura simple:** Permite tomar una imagen en cualquier momento y lugar de forma manual.

- **Captura temporizada:** Captura imágenes automáticamente a intervalos regulares de tiempo.

- **Captura guiada por ruta (modo automatizado):** En este modo, PlantAR descarga una lista de puntos objetivos definidos por el usuario a través de un archivo Geojson importado desde la nube (Figura 2B). Luego, mientras el usuario recorre la zona (por ejemplo, en un vehículo), la app toma imágenes automáticamente al acercarse a estos puntos, dentro de un radio de proximidad configurable. La Figura 2C muestra un punto objetivo dentro del área de captura automática. El radio de interés se define desde la app.

Las imágenes capturadas pueden subirse al servidor de imágenes *Cloudinary*, desde donde pueden descargarse o eliminarse. También es posible acceder a ellas mediante una API REST provista por el servicio. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de una imagen subida junto con su metadata visualizada en la plataforma

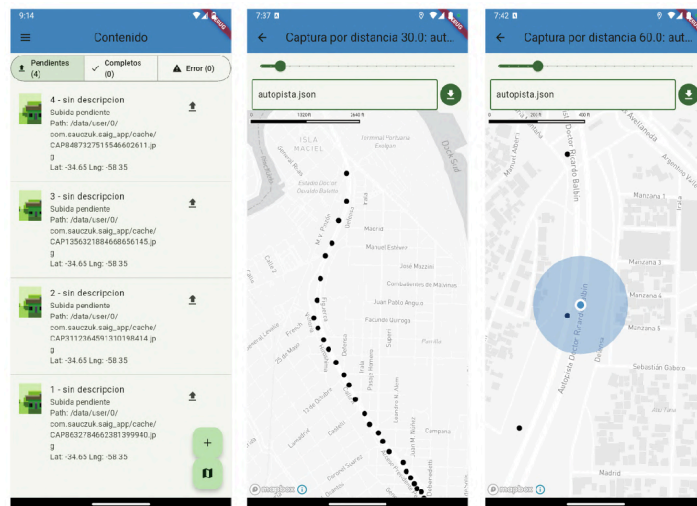


Fig. 2. (A) Vista principal de PlantAR mostrando las imágenes almacenadas localmente en el dispositivo. La aplicación permite aplicar filtros para distinguir entre imágenes ya subidas a la nube, pendientes de subida o con errores de carga. (B) Interfaz de configuración del modo de captura automatizada por ruta. El usuario puede crear una lista de puntos objetivo, que serán utilizados para activar la captura automática de imágenes al pasar cerca de ellos. (C) Representación de un punto objetivo dentro del radio de proximidad geográfica definido. En este momento, la aplicación activa automáticamente la toma de una imagen.

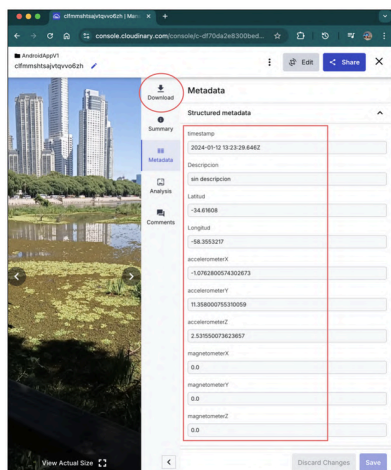


Fig. 3. Ejemplo de una imagen capturada con PlantAR y visualizada en la plataforma Cloudinary, incluyendo los metadatos asociados (coordenadas y datos de sensores).

3.2 Análisis conjunto de imágenes satelitales y terrestres

Se recorrió un sector de la Ruta 11 y caminos adyacentes en el partido de Magdalena. Se tomaron imágenes con la aplicación en ambos sentidos en el periodo entre octubre de 2024 y abril de 2025.

En la Fig.4A, se presentan cinco mapas NDVI, correspondientes a fechas clave entre octubre de 2024 y marzo de 2025. El área desde la cual se realizaron las capturas terrestres está resaltada en cada imagen (círculos punteados de color rosa en la Fig. 4), lo que facilita la interpretación espacial y temporal.

La Fig.4B muestra la curva temporal del NDVI obtenida a partir de imágenes Sentinel-2. Se observa un patrón típico de máxima cobertura y posterior senescencia, con un pico máximo hacia fines de diciembre, seguido por una disminución progresiva asociada a la senescencia del cultivo. Las fechas de captura terrestre están indicadas sobre la curva, lo que permite asociar cada imagen con una fase del desarrollo.

La Fig.4C presenta las imágenes terrestres capturadas automáticamente desde un vehículo mediante la aplicación, en fechas cercanas a la de los mapas y la curva NDVI. El punto de referencia visual (marcado con un recuadro magenta) facilita la comparación entre las escenas y ayuda a confirmar la orientación de la cámara durante la captura.

Este ejemplo demuestra la utilidad de PlantAR como herramienta para registrar evidencia visual georreferenciada que permita validar, contextualizar o complementar la información espectral obtenida por sensores remotos. Además, resalta la importancia de una adecuada sincronización entre las adquisiciones terrestres y satelitales para mejorar la interpretación agronómica de los índices espectrales.

3.3 Relación entre índices RGB y el NDVI satelital

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente la relación entre las imágenes terrestres adquiridas y las observaciones satelitales, se analizó la correspondencia entre distintos índices RGB calculados a partir de las imágenes de costado y el NDVI satelital correspondiente a las mismas fechas. Este enfoque sigue la línea propuesta por Hufkens et al. (2019), quienes desarrollaron un protocolo basado en imágenes RGB obtenidas por agricultores con teléfonos móviles para describir con alta fidelidad temporal los cambios fenológicos en cultivos de trigo.

En este trabajo, se calcularon tres índices RGB de uso frecuente: el índice cromático verde (GCC), el índice visible atmosféricamente resistente (VARI) y el índice normalizado verde-rojo (NGRDI), cuyos valores fueron estimados sobre las imágenes terrestres correspondientes a las cinco fechas analizadas (Fig. 4C). Las imágenes terrestres se obtuvieron con vistas laterales desde la ruta, y en cada imagen se seleccionaron tres regiones de interés (ROIs) independientes (rectángulos verdes en el ejemplo en la Fig. 5A), calculando en cada ROI el valor medio del índice correspondiente, con subregiones internas del campo cuidadosamente elegidas manualmente para asociarlas al cultivo.

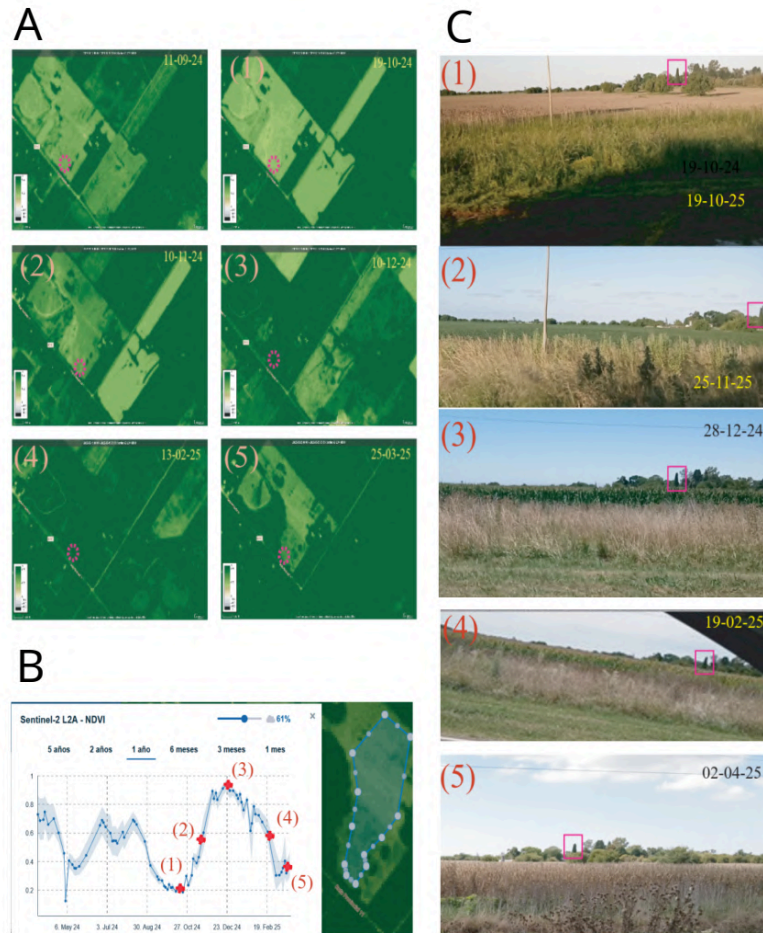


Fig. 4. Relación entre mapas satelitales, índice NDVI e imágenes terrestres. (A) Mapas NDVI derivados de imágenes Sentinel-2, correspondientes a cinco fechas a lo largo del ciclo del cultivo. El área desde la cual se realizaron las capturas terrestres se encuentra destacada en cada imagen. (B) Curva temporal de NDVI derivada de Sentinel-2 (calculada con Copernicus Browser), con marcadores numerados que indican los momentos en que se capturaron las imágenes terrestres. A la derecha, contorno del lote monitoreado. (C) Fotografías tomadas automáticamente desde un vehículo utilizando la aplicación PlantAR, en las mismas fechas que los mapas NDVI y la curva temporal.

Cada punto en los gráficos de la Fig. 5B incluye doble barra de error: la barra horizontal representa la incertidumbre en la estimación del NDVI satelital, mientras que la barra vertical representa la variabilidad del índice RGB terrestre para cada fecha. Los números entre paréntesis identifican la imagen correspondiente dentro de la serie temporal.

El análisis mostró una buena correlación positiva entre los índices RGB calculados y el NDVI satelital, siendo especialmente destacado el caso del GCC ($r \approx 0.92$). Esto sugiere que el GCC, incluso en vistas de costado, puede ser utilizado como un indicador indirecto y local del NDVI satelital, especialmente en condiciones de iluminación uniforme como las presentes en este trabajo. Los resultados obtenidos con los índices VARI y NGRDI también mostraron correlaciones satisfactorias ($r > 0.89$), lo que refuerza la solidez y consistencia del enfoque y abre la posibilidad de considerar estos índices como herramientas complementarias o alternativas para el seguimiento fenológico mediante imágenes RGB adquiridas desde rutas o caminos.

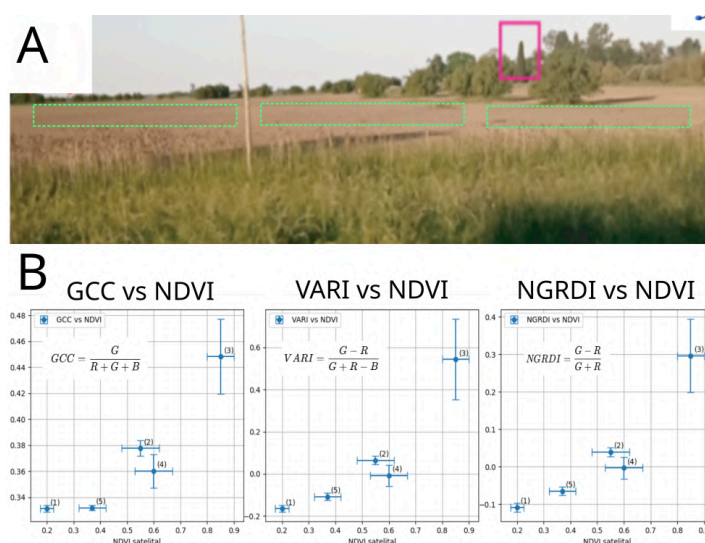


Fig. 5. Relación entre índices RGB y NDVI satelital. (A) Imagen terrestre capturada con la aplicación PlantAR, mostrando un ejemplo de las regiones de interés (rectángulos verdes). **(B)** Relación entre NDVI satelital e índices RGB (GCC, VARI, NGRDI) calculados sobre las imágenes terrestres. Cada punto incluye doble barra de error (NDVI e índice RGB) y está etiquetado según la imagen correspondiente. Las fórmulas de cada índice se muestran en la parte superior de los gráficos.

3.4 Otros cultivos observados

En la Figura 6 se presentan imágenes capturadas durante un recorrido por el partido de Magdalena (provincia de Buenos Aires) en el mes de abril de 2025, en las que se observan tres cultivos en diferentes estados fenológicos. Las imágenes fueron tomadas desde la ruta, bajo condiciones de cielo parcialmente despejado y buena visibilidad. La iluminación solar directa permitió obtener una calidad aceptable en términos de contraste y reconocimiento de las estructuras vegetales, aunque en algunas escenas se advierten sombras suaves y variación en la exposición por la orientación de la toma.

En la Figura 6A, se observa un lote sembrado con soja (*Glycine max*). El cultivo presenta una textura densa y uniforme, con tonalidades verde medio a oscuro, típico de plantas sanas con buen estado nutricional. La cobertura es prácticamente total, lo que sugiere un cultivo en condiciones normales de crecimiento. El cielo despejado y la intensidad lumínica generan una buena diferenciación entre el cultivo y la vegetación de la banquina.

En la Figura 6B, el cultivo es maíz (*Zea mays*), claramente identificable por su altura mayor que la soja y las hojas alargadas. Aunque parcialmente oculto por la vegetación espontánea de la banquina, pueden distinguirse filas del cultivo detrás de los arbustos. La iluminación directa pero algo difusa por presencia de nubes genera una leve pérdida de contraste, aunque las estructuras del maíz siguen siendo distinguibles.

La Figura 6C muestra un lote cultivado con sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) en madurez fisiológica. El color rojizo característico de la panoja terminal cargada de granos, distribuido homogéneamente en el lote, es indicativo del final del ciclo del cultivo. Las panojas no se distinguen claramente en la imagen, aunque la coloración del follaje permite inferir su presencia. La escena presenta buena visibilidad y color realista, gracias a la iluminación solar lateral y la escasa nubosidad.

En conjunto, las condiciones atmosféricas fueron favorables para la adquisición de imágenes desde campo. Durante las horas centrales del día (aproximadamente entre las 10:00 y las 15:00), cuando la elevación solar es máxima y las sombras son reducidas se obtuvieron los mejores resultados. La disponibilidad de luz natural y cielos mayormente despejados favorecen la toma de registros útiles para reconocimiento de cultivos, incluso sin utilizar sensores especializados o cámaras profesionales.

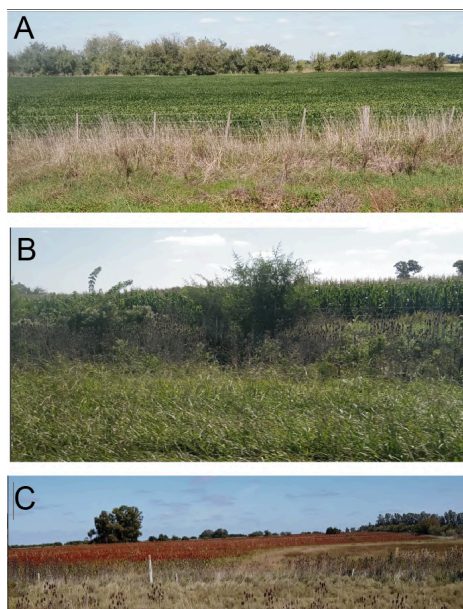


Fig. 6. Imágenes de cultivos observados en campo en el partido de Magdalena (Buenos Aires, Argentina) durante el mes de abril de 2025. (A) Cultivo de soja. (B) Cultivo de maíz. (C) Cultivo de sorgo granífero.

4 Discusión

Los resultados obtenidos en esta primera etapa de validación de la aplicación PlantAR demuestran su potencial como herramienta práctica, escalable y flexible para apoyar el monitoreo visual y fenológico de cultivos mediante la integración de imágenes satelitales y terrestres.

La aplicación permitió generar registros visuales georreferenciados de manera automatizada, sincronizados espacial y temporalmente con series NDVI satelitales, lo que facilita la comparación y el seguimiento fenológico a lo largo del tiempo. Además, se incorporó un análisis cuantitativo basado en la correlación entre el índice cromático verde (GCC) calculado sobre imágenes terrestres y la evolución del NDVI satelital. Este enfoque, inspirado en el protocolo de Hufkens et al. (2019), mostró una alta coherencia temporal entre ambas fuentes ($r \approx 0.92$), fortaleciendo la utilidad de las imágenes terrestres como complemento local para interpretar la dinámica observada desde el satélite.

Es importante aclarar que el trabajo no busca realizar una fusión estructural ni volumétrica en sentido estricto. La vinculación presentada representa un paso inicial hacia la integración eficiente de datos multifuente. Este enfoque permite ampliar la frecuencia y el contexto de las observaciones, especialmente en escenarios donde el acceso directo al cultivo es limitado.

Uno de los aspectos más destacados de la aplicación PlantAR fue su utilidad en campo gracias al sistema de señalización y guiado basado en coordenadas cargadas previamente. Durante los recorridos, especialmente en zonas desconocidas para el operador, la visualización en tiempo real de los puntos de interés y las alertas por proximidad facilitaron notablemente la cobertura sistemática de las áreas seleccionadas, optimizando el proceso de adquisición. Además, la aplicación demostró ser altamente versátil, ya que permite capturas tanto desde rutas como acercándose al cultivo cuando las condiciones del camino lo permiten y cuando las imágenes satelitales indican puntos de especial interés. En estos casos, el operador puede detener el vehículo, cambiar fácilmente al modo de captura manual y registrar imágenes adicionales desde posiciones más cercanas. Incluso es posible tomar fotografías elevadas (modo de captura temporizada) mediante el uso de un poste o soporte extensible, lo que proporciona perspectivas complementarias del cultivo.

En cuanto al valor práctico de las imágenes adquiridas, se verificó que en ciertos estadios avanzados del cultivo (por ejemplo, cuando las plantas alcanzan alturas considerables), es posible identificar visualmente el tipo de cultivo de manera confiable incluso desde la ruta y utilizando un smartphone. Esta capacidad de reconocimiento visual directo aporta información relevante para clasificar cultivos y seguir su evolución fenológica de forma sencilla y accesible.

Sin embargo, también se identificaron limitaciones técnicas que deberán abordarse en futuras implementaciones. La resolución de las imágenes terrestres es un factor crítico: en condiciones de iluminación desfavorables, o cuando se utilizan teléfonos de gama media, la calidad puede no ser suficiente para tareas de reconocimiento fino,

especialmente en estadios iniciales de crecimiento. En este sentido, se recomienda considerar el uso de dispositivos con cámaras de alta resolución, como smartphones equipados con teleobjetivos ópticos que permitan capturas más detalladas a distancia. La incorporación de sensores complementarios como el acelerómetro y el magnetómetro proporciona metadatos valiosos para mejorar la caracterización de la región de captura. Si bien en esta implementación no se utilizaron para estimaciones geométricas, su disponibilidad abre la puerta a futuras mejoras que podrían incluir la retroproyección espacial georeferenciada de las mediciones (Arroyo et al., 2021). En conjunto, los resultados presentados validan el potencial de PlantAR como una herramienta accesible y escalable para la adquisición automatizada de imágenes terrestres vinculadas a información satelital.

5 Conclusión

Este trabajo presentó la aplicación PlantAR como una herramienta efectiva y escalable para la adquisición automatizada de imágenes terrestres georreferenciadas, vinculadas espacial y temporalmente a series NDVI satelitales. La propuesta demostró ser operativa en condiciones reales de campo, brindando soporte visual para el monitoreo fenológico y la interpretación de la dinámica espectral observada desde el satélite.

El análisis cuantitativo realizado mostró una alta correlación entre el índice GCC calculado en las imágenes terrestres y el NDVI satelital, lo que confirma la capacidad del enfoque para generar vínculos estadísticos que enriquecen la interpretación remota. Esta estrategia ofrece una solución escalable y replicable para mejorar la resolución temporal y espacial de las observaciones, especialmente en zonas de difícil acceso.

PlantAR aporta flexibilidad operativa, asistiendo al operador humano en la adquisición de imágenes tanto desde rutas como desde posiciones más cercanas al cultivo, lo que facilita su aplicación en campañas de monitoreo diversas. Además, la plataforma es de código abierto y adaptable. Este desarrollo constituye un paso relevante hacia esquemas de observación híbrida (satelital-terrestre), accesibles y escalables.

Referencias

- Arroyo, S., Garcia, L., Safar, F., & Oliva, D. (2021). Urban dual mode video detection system based on fisheye and PTZ cameras. *IEEE Latin America Transactions*, 19(9), 1537-1545.
- Darwin, B.; Dharmaraj, P.; Prince, S.; Popescu, D.E.; Hemanth, D.J. (2021). Recognition of Bloom/Yield in Crop Images Using Deep Learning Models for Smart Agriculture: A Review. *Agronomy*, 11, 646.
- d'Andrimont, R., Verhegghen, A., Lemoine, G., Kempeneers, P., Meroni, M., & Van Der Velde, M. (2021). From parcel to continental scale—A first European crop type map based on Sentinel-1 and LUCAS Copernicus in-situ observations. *Remote sensing of environment*, 266, 112708.
- Ferencz, C.; Bognár, P.; Lichtenberger, J.; et al. (2004). Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), 4113–4149.

- Hufkens, K., Melaas, E. K., Mann, M. L., Foster, T., Ceballos, F., Robles, M., & Kramer, B. (2019). Monitoring crop phenology using a smartphone based near-surface remote sensing approach. *Agricultural and forest meteorology*, 265, 327-337.
- Muruganantham, P.; Wibowo, S.; Grandhi, S.; Samrat, N.H.; Islam, N. (2022). A Systematic Literature Review on Crop Yield Prediction with Deep Learning and Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14, 1990.
- Sauczuk, M. (2025). <https://github.com/martinsauczuk/plantar-geojson>
- Yao, J.; Wu, J.; Xiao, C.; Zhang, Z.; Li, J. (2022). The Classification Method Study of Crops Remote Sensing with Deep Learning, Machine Learning, and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14, 2758.