


Application of NDVI to the phenological monitoring of grapevine (*Vitis vinifera* var. Torrontés Riojano) in three farms in the Antinaco-Los Colorados Valley (La Rioja, Argentina).

Recalde, Darío Jesús^{1,2} , Dávila Cruz, Gustavo Carlos^{1,2} ,
González Ribot, Joaquín Víctor^{1,2} 

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Estación Experimental Agropecuaria Chilecito. recalde.dario@inta.gob.ar. Ruta de La Producción Km 7, CP 5360, Chilecito, La Rioja.

² Universidad Nacional de Chilecito, 9 de Julio Nro. 22, Chilecito, La Rioja, Argentina

Abstract. Monitoring phenological stages is essential for efficient agricultural management, as it allows production decisions to be adjusted to the actual developmental status of plants. In grapevines (*Vitis vinifera* L.), these stages reflect physiological and morphological changes influenced by climatic, water, and management factors; thus, objective and spatial indicators are key for precision viticulture. Within this context, vegetation indices derived from satellite imagery, particularly the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), provide accurate, non-invasive tools to monitor plant growth throughout the phenological cycle. This study aimed to analyze the relationship between NDVI and phenological stages of the Torrontés Riojano grapevine in three representative vineyards of the Antinaco–Los Colorados Valley (La Rioja, Argentina), and to evaluate the potential of NDVI as an indicator of phenological status and crop vigor. A total of 57 PlanetScope images (3 m resolution) from the 2024/2025 growing season were atmospherically and radiometrically corrected and matched with field phenological observations following the Baggiolini scale. Statistical analyses included normality tests (Shapiro–Wilk), Spearman correlations, a Generalized Additive Model (GAM) with a smoothed term for phenological stage and fixed vineyard effects, and Kruskal–Wallis and Dunn tests. Results showed significant positive correlations between NDVI and phenological stage ($\rho = 0.65\text{--}0.84$) and a highly explanatory GAM (adjusted $R^2 = 0.922$), describing a sigmoidal NDVI trajectory with low values in early stages, rapid increase during intermediate phases, and stabilization in advanced stages. Significant NDVI differences were found among vineyards and between early and late phases. Findings confirm that NDVI is a sensitive indicator of phenological status and vineyard vigor under arid conditions, offering a robust basis for phenological monitoring, site-specific management, and decision support in precision viticulture.

Keywords: Antinaco Los Colorados, Phenology, NDVI, Grapevine, Torrontés Riojano

Received May 2026; Accepted June 2026; Published July 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

Aplicación del NDVI al seguimiento fenológico de vid (*Vitis vinifera* var. Torrontés Riojano) en tres fincas del Valle Antinaco–Los Colorados (La Rioja, Argentina).

Resumen: El seguimiento de las fases fenológicas es esencial para un manejo agrícola eficiente, ya que permite ajustar las decisiones productivas al estado real de las plantas. En la vid (*Vitis vinifera* L.), estas fases reflejan transformaciones fisiológicas y morfológicas influenciadas por factores climáticos, hídricos y de manejo, por lo que disponer de indicadores objetivos y espaciales resulta clave para la vitivinicultura de precisión. En este contexto, los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales, particularmente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ofrecen herramientas no invasivas para monitorear el crecimiento vegetal a lo largo del ciclo fenológico. El objetivo de este estudio fue analizar la relación entre el NDVI y las fases fenológicas de la variedad Torrontés Riojano en tres fincas del Valle Antinaco–Los Colorados (La Rioja, Argentina), y evaluar el potencial del índice como indicador del estado fenológico y del vigor del cultivo. Se utilizaron 57 imágenes PlanetScope (3 m) correspondientes a la campaña 2024/2025, corregidas atmosférica y radiométricamente y coincidentes con observaciones fenológicas de campo según la escala de Baggiolini. El análisis estadístico incluyó pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk), correlaciones de Spearman, un Modelo Aditivo Generalizado (GAM) con término suavizado para la fase y efectos fijos de finca, y pruebas de Kruskal–Wallis y Dunn. Se observaron correlaciones positivas y significativas entre NDVI y fase fenológica ($\rho = 0,65\text{--}0,84$) y un GAM altamente explicativo (R^2 ajustado = 0,922) con trayectoria sigmoideal: valores bajos en fases iniciales, incremento rápido en fases medias y estabilización en etapas avanzadas. Los resultados confirman que el NDVI es un indicador sensible del estado fenológico y del vigor de la vid en ambientes áridos, aportando una base sólida para el monitoreo fenológico y la gestión sitio-específica en vitivinicultura de precisión.

Palabras claves: Antinaco Los Colorados, Fenología, NDVI, Vid, Torrontés Riojano.

1 Introducción y Marco Teórico

La fenología agrícola, entendida como el estudio sistemático de los estados de desarrollo de las plantas en relación con variables ambientales, constituye una disciplina central dentro del manejo agronómico moderno y de la agricultura de precisión. Su relevancia radica en la capacidad de anticipar momentos críticos del ciclo biológico de los cultivos y ajustar de manera óptima las prácticas de manejo, tales como la poda, la fertilización, el riego y el control sanitario, en función de los requerimientos fisiológicos de cada etapa (Keller, 2015). En especies perennes de alto valor comercial como la vid (*Vitis vinifera* L.), estas decisiones tienen un impacto directo sobre la estabilidad productiva, la calidad enológica de la uva y la sustentabilidad económica del viñedo a largo plazo, por lo cual el conocimiento detallado del calendario fenológico se vuelve un insumo estratégico para productores, técnicos y planificadores (Baggiolini, 1952; Rodríguez et al., 2000). Dentro de este contexto, las fases fenológicas bien definidas, brotación, floración, cuaje, envero y maduración, constituyen hitos fisiológicos que orientan la programación de labores culturales, la asignación de recursos y el diseño de tácticas de mitigación frente a riesgos climáticos y fitosanitarios (Keller, 2015).

En regiones áridas y semiáridas, como el Valle Antinaco – Los Colorados en la provincia de La Rioja, Argentina, el seguimiento fenológico adquiere una complejidad particular debido a la fuerte dependencia del cultivo respecto de condiciones ambientales altamente restrictivas. Se trata de un territorio caracterizado por una elevada radiación solar, marcada amplitud térmica diaria y estacional, precipitaciones escasas y concentradas, y una disponibilidad hídrica limitada que condiciona fuertemente la actividad agrícola (Abraham et al., 2009; Morello, 1958; Cabrera, 1976; Le Houérou, 1999). En este escenario ecológico de alta fragilidad y notable variabilidad interanual, la variedad Torrontés Riojano se ha posicionado como emblema para la vitivinicultura regional, tanto por su adaptabilidad relativa a condiciones de estrés hídrico y térmico como por su rol en la consolidación del perfil productivo y exportador de La Rioja. No obstante, la exposición recurrente a eventos extremos, olas de calor, sequías intensas, granizadas y heladas tardías, imponen desafíos permanentes para la obtención de rendimientos estables y frutos de calidad superior, incrementando la necesidad de contar con herramientas objetivas y oportunas para el monitoreo del ciclo fenológico y la detección temprana de situaciones de estrés.

En este sentido, el estudio fenológico contribuye a la selección de genotipos con mayor plasticidad adaptativa, favorece la identificación de ambientes productivos más idóneos y guía la implementación de prácticas de manejo diferenciado dentro de un mismo viñedo (INIA, 2020; Reyes y Arribillaga, 2019). Entre las variables ambientales que influyen sobre el desarrollo fenológico de la vid, la temperatura ocupa un lugar preponderante, ya que regula procesos clave como la brotación, la expansión foliar, la floración y la maduración. Por ello, la acumulación térmica o “grados-día” se utiliza ampliamente para modelar y predecir la ocurrencia de eventos fenológicos relevantes, optimizando la gestión de recursos, el diseño de calendarios de cosecha y la planificación logística en bodegas y plantas elaboradoras (INIA, 2020).

La expresión fenológica del viñedo está igualmente modulada por el régimen hídrico (disponibilidad y oportunidad del riego o de las precipitaciones), la radiación solar incidente, la latitud, la altitud y el microclima específico de cada parcela, factores que interactúan de manera compleja con las características del suelo y el material genético implantado. A estos condicionantes biofísicos se suman las

prácticas de manejo agronómico, tipo de sistema de conducción, densidad de plantación, intensidad y modalidad de poda, uso de coberturas vegetales, aplicación de insumos, que pueden acelerar, retrasar o modificar la expresión de ciertas fases fenológicas. La interacción edáfico-genética, a su vez, determina el comportamiento particular de cada cultivar ante la variabilidad ambiental, expresándose en diferencias en la duración de las fases, el vigor del dosel vegetal, la carga de racimos y la calidad final de la uva.

Históricamente, la observación de campo ha constituido la metodología de referencia para registrar el avance fenológico, describir estadios vegetativos y establecer calendarios de manejo. Esta aproximación, basada en inspecciones visuales periódicas, permite una caracterización cualitativa y cuantitativa muy detallada del cultivo, pero presenta limitaciones cuando se pretende escalar el monitoreo a superficies extensas o a múltiples unidades productivas. La implementación de relevamientos sistemáticos en grandes áreas requiere recursos humanos capacitados, tiempos de desplazamiento y costos operativos que, en muchos casos, exceden las capacidades de productores y organismos técnicos, en especial en regiones dispersas y con infraestructura limitada. Ante este escenario, la teledetección se consolida como una alternativa tecnológica y metodológica capaz de complementar y, en parte, sustituir las observaciones tradicionales, ya que permite observar la vegetación de manera frecuente, masiva y no invasiva, abarcando desde la escala de parcela hasta la escala regional (Chuvieco, 2015; Delbart y Picard, 2007).

En este contexto, los índices espectrales derivados de imágenes satelitales, y en particular el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), han revolucionado la capacidad de monitoreo fenológico y productivo. El NDVI se basa en la diferencia normalizada entre la reflectancia en el rojo y en el infrarrojo cercano, bandas fuertemente asociadas a la absorción de radiación por los pigmentos fotosintéticos y a la estructura interna de las hojas y el dosel vegetal. Su comportamiento se vincula estrechamente con la densidad de cobertura verde, el vigor de la vegetación y el estado fisiológico del cultivo, lo que admite utilizarlo como un indicador de variables agronómicas relevantes. Numerosos estudios han demostrado la alta correlación entre NDVI y biomasa foliar, actividad fotosintética, índice de área foliar y productividad en una amplia gama de sistemas agrícolas y forestales, validando su utilidad para el seguimiento de la vegetación a lo largo del tiempo (Huete et al., 2002; Johnson et al., 2003; Gomes et al., 2021). Esta relación hace posible vincular la dinámica espectral observada desde el espacio con procesos ecofisiológicos que ocurren a nivel de planta y parcela.

En este ámbito, la aplicación del NDVI en vitivinicultura, ha sido documentada extensamente a nivel internacional, especialmente en regiones productoras de alta tecnificación. Investigaciones desarrolladas en Portugal, Australia y California evidencian que el NDVI permite diferenciar fases fenológicas principales de la vid, detectar heterogeneidades espaciales de vigor dentro de un mismo viñedo, identificar zonas de manejo diferenciado y anticipar necesidades de intervención agronómica, como ajustes en riego, fertilización o labores de poda en verde (Cunha et al., 2010; Fawcett et al., 2021). La incorporación de este índice en esquemas de vitivinicultura de precisión ha permitido mejorar la eficiencia en el uso de insumos, optimizar la calidad de la uva mediante un manejo más fino del dosel y contribuir a la sostenibilidad ambiental del sistema productivo. El creciente acceso a plataformas satelitales de alta resolución espacial y temporal, como la constelación PlanetScope, que proporciona imágenes diarias con resolución del orden de 3 metros, ha potenciado estas aplicaciones al posibilitar la detección de variaciones intraparciales de fenología y vigor, incluso en fincas de tamaño moderado (Fitts et al., 2025).

La literatura reciente enfatiza, además, la importancia de integrar la información espectral proveniente de satélites con relevamientos de campo detallados, tanto fenológicos como productivos, con el fin de mejorar la calibración de modelos y afinar la interpretación agronómica de los índices (Zarco-Tejada et al., 2005; Von Bennewitz Alvarez et al., 2018). La combinación del NDVI con otros índices de vegetación, tales como EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) o NDWI (Normalized Difference Water Index), amplía el rango de procesos que pueden monitorearse, al incorporar sensibilidad diferencial a la estructura del dosel, al efecto del suelo o al contenido hídrico de la vegetación. Este enfoque multiespectral favorece la identificación de fenómenos específicos, como estrés hídrico moderado o severo, presencia de enfermedades foliares, desbalances nutricionales o daños localizados por granizo, ofreciendo un diagnóstico más integral del estado del viñedo.

Desde el punto de vista metodológico, el desarrollo de técnicas analíticas avanzadas ha permitido extraer un mayor valor informativo de las series temporales de NDVI. El análisis de trayectorias temporales del índice, combinado con el ajuste de modelos no lineales, entre ellos, los Modelos Aditivos Generalizados (GAM), han permitido identificar puntos de inflexión en la curva estacional del índice, asociables a fases críticas del desarrollo. Este abordaje ha tenido aplicaciones significativas en cultivos de arroz, trigo, maíz y vid, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, predicción de rendimientos y toma de decisiones en tiempo real (Sakamoto et al., 2005; Zhang et al., 2003, 2009). En el caso de la vitivinicultura, dichos modelos permiten relacionar de manera objetiva patrones espectrales con etapas precisas del ciclo productivo, mejorando la planificación de cosecha y la gestión de la calidad.

En el marco del cambio climático global, la intensificación de eventos extremos, el aumento de la frecuencia de olas de calor y sequías, así como el incremento de la variabilidad interanual de temperatura y precipitación, hacen cada vez más necesaria la integración de herramientas de monitoreo espectral en los sistemas productivos. La fenología, evaluada mediante NDVI y otros sensores remotos, se convierte en un indicador clave para detectar cambios en la duración de las fases de crecimiento, desplazamientos en las fechas de eventos críticos y modificaciones en la respuesta del cultivo a nuevas condiciones ambientales (Fawcett et al., 2021; Keller, 2015).

En este contexto, el presente estudio se propone analizar en detalle la relación entre el NDVI, obtenido a partir de imágenes satelitales PlanetScope, y las fases fenológicas del cultivo de vid Torrontés Riojano en tres fincas ubicadas en el Valle Antinaco – Los Colorados. El énfasis se coloca en la validación de la capacidad del índice para identificar de forma remota eventos clave del ciclo fenológico y en la evaluación del potencial de los sistemas de monitoreo espectral para su integración en esquemas de vitivinicultura de precisión y en la gestión sostenible del territorio. Se busca, asimismo, aportar evidencia empírica específica para ambientes áridos y semiáridos del Noroeste Argentino, donde la disponibilidad de estudios locales aún es limitada en comparación con otras regiones vitivinícolas del mundo.

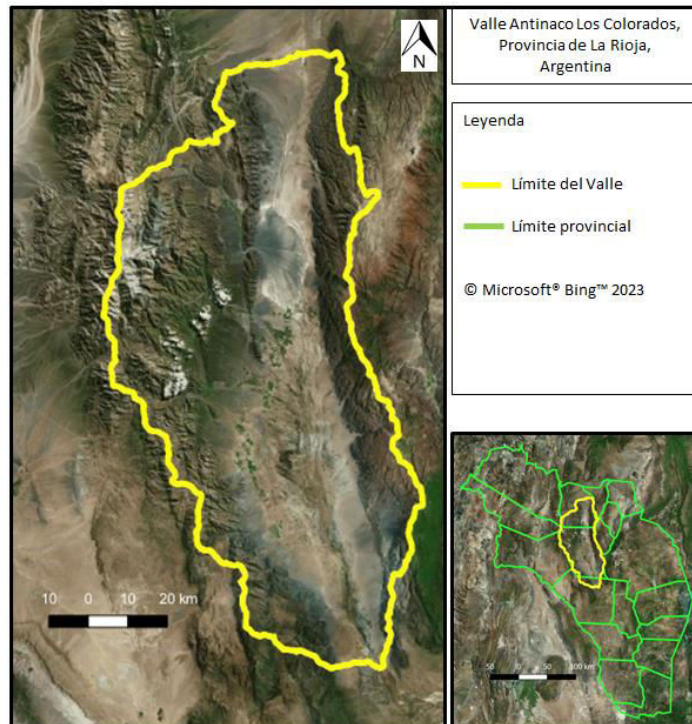
2 Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en el Valle Antinaco–Los Colorados, localizado en el sector occidental de la provincia de La Rioja, en el Noroeste Argentino. Este valle abarca aproximadamente 7.500 km² y se extiende a lo largo de unos 150 km en sentido norte–sur y alrededor de 65 km en dirección este–oeste (Figura 1), constituyendo una depresión alargada y bien definida dentro del paisaje regional. El

sistema orográfico que lo encuadra está conformado por dos cordones montañosos de orientación predominante norte-sur: la Sierra del Velasco, al este, que alcanza altitudes cercanas a los 4.100 msnm, y la Sierra del Famatina, al oeste, cuya cumbre máxima se aproxima a los 6.100 msnm, generando fuertes gradientes altitudinales, climáticos e hidrológicos que condicionan el uso del territorio.

Figura 1

Ubicación del Valle Antinaco Los Colorados en la Provincia de La Rioja



Nota. Fuente: Recalde et al. 2023

Desde el punto de vista fitogeográfico, el valle se inserta en la región del Monte, una vasta unidad ecológica que cubre alrededor de 460.000 km² y constituye uno de los grandes biomas áridos de la Argentina (Morello, 1958; Cabrera, 1976). Esta región se sitúa dentro de la zona árida templada del país, distribuyéndose entre los 24° 35' y 44° 2' de latitud sur y los 62° 54' y 69° 5' de longitud oeste, con continuidad territorial desde la provincia de Salta, en el extremo norte, hasta el sur de la provincia de Buenos Aires, e incluyendo sectores de las provincias de Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro, Chubut y el sudoeste de San Luis (Roig et al., 2009). Dentro de este amplio contexto biogeográfico, el Valle Antinaco–Los Colorados representa un enclave productivo intensamente transformado, donde los oasis de riego contrastan con la matriz natural árida circundante.

El clima de la región del Monte se caracteriza por su marcada aridez, escasas precipitaciones anuales y un balance hídrico fuertemente deficitario, acompañado de una relativamente baja variación térmica en sentido latitudinal a escala regional. La vegetación natural predominante corresponde a una estepa arbustiva xerófila y, en sectores con mayor salinidad, a formaciones halófilas, en las que dominan matorrales

adaptados a condiciones de déficit hídrico y suelos pobres. Entre las especies más representativas se destacan diversas jarillas (*Larrea* spp.) y retamos (*Bulnesia* spp.), a las que se suman bosques o parches de algarrobo (*Neltuma* spp.) en áreas donde la napa freática se encuentra más próxima a la superficie, lo que permite un mayor desarrollo de la biomasa leñosa.

De acuerdo con Le Houérou (1999) y Abraham et al. (2009), el sector occidental de la provincia de La Rioja se clasifica como zona árida, en la que el desarrollo agrícola y otras actividades socioeconómicas dependen de manera crítica del aporte nivoglacial de los ríos provenientes de las sierras aledañas. Estos cursos de agua, alimentados por la fusión de nieves y glaciares en altura, así como la acumulación progresiva de agua subterránea derivada del mismo origen, sostienen los oasis de riego donde se concentran los cultivos intensivos y las principales infraestructuras agroindustriales. En este marco hidrológico restringido, la gestión del recurso hídrico y la planificación del riego resultan factores decisivos para la sostenibilidad de los sistemas productivos y explican en gran medida la localización de los viñedos y olivares en el valle.

En el ámbito regional, el valle que integran los departamentos de Chilecito, Famatina e Independencia, se ha consolidado como uno de los principales polos agroindustriales del Noroeste Argentino (NOA). Este área presenta un clima semiárido cálido, con precipitaciones medias anuales generalmente inferiores a los 200 mm, más de 300 días de alta radiación solar al año y amplitudes térmicas diarias que suelen superar los 15 °C durante el verano, condiciones que favorecen la concentración de azúcares y la síntesis de compuestos fenólicos en los frutos, mejorando su calidad organoléptica y su potencial agroindustrial. La combinación de elevada insolación, noches frescas y baja humedad relativa contribuye a la obtención de perfiles aromáticos y enológicos diferenciales, particularmente valorados en la vitivinicultura de uvas blancas como el Torrontés Riojano.

En lo que respecta específicamente a la vitivinicultura, el Valle Antinaco–Los Colorados concentra más del 80% de las 7.210 hectáreas de vid implantadas en la provincia de La Rioja, lo que evidencia su rol central en la estructura productiva vitícola provincial. Entre las variedades más difundidas se encuentran Torrontés Riojano, Bonarda, Malbec y diversas cultivares apirenas como Fiesta y Flame Seedless, estas últimas orientadas principalmente a la elaboración de pasas y otros productos de valor agregado. La localidad de Chilecito se destaca como núcleo vitivinícola, liderando la producción de vinos con indicación geográfica “Valle de Famatina” y reforzando la identidad enológica de la región a nivel nacional e internacional (INV, 2024).

El valle también ocupa un lugar preponderante en la olivicultura, ya que alberga alrededor del 70% de las aproximadamente 29.000 hectáreas de olivo implantadas en la provincia de La Rioja. En estos olivares se cultivan tanto variedades tradicionales como Arauco, muy arraigada en la identidad productiva local, como cultivares internacionales de alta difusión, entre ellos Arbequina, Picual y Coratina, que se desarrollan bajo sistemas de conducción tradicionales y en esquemas superintensivos en seto, reflejando un proceso de modernización tecnológica y reconversión productiva del sector (INTA, 2010; Matías et al., 2010). Esta diversidad varietal y de sistemas de cultivo ha permitido diversificar la oferta de aceites de oliva y productos derivados, incrementando la competitividad regional.

El complejo agroindustrial radicado en el valle es amplio y heterogéneo, y comprende más de 900 viñedos y establecimientos elaboradores, entre bodegas y plantas de procesamiento, con una notable participación de cooperativas, pequeñas y medianas empresas exportadoras, así como compañías de capital mixto (INV, 2024;

Gobierno de La Rioja, 2024). A esta matriz productiva se suma, en los últimos años, la expansión del cultivo de nogal (*Juglans regia*), que supera actualmente las 1.000 hectáreas implantadas y posiciona a la provincia de La Rioja como el tercer productor nacional de nuez, luego de Catamarca y Mendoza (Gobierno de La Rioja, 2024). La coexistencia de viñedos, olivares y nogales configura un mosaico agroecológico complejo, en el que cohabitan diferentes demandas hídricas y calendarios fenológicos, lo cual plantea desafíos adicionales de planificación del riego y de manejo integrado del territorio.

En este ámbito, las particulares condiciones agroecológicas del Valle Antinaco–Los Colorados, aridez estructural, fuerte dependencia del riego, alta radiación, amplitud térmica y presencia de suelos aptos para cultivos perennes, sumadas a la consolidación de tecnologías de riego presurizado y a una estructura agroindustrial diversificada, posicionan a esta región como un territorio estratégico para el desarrollo de cadenas de valor agroalimentarias de alta diferenciación. Bajo estas condiciones, la vitivinicultura basada en variedades como Torrontés Riojano encuentra un entorno propicio para alcanzar altos estándares de calidad, y la incorporación de herramientas de monitoreo espectral, como el NDVI, adquiere especial relevancia para gestionar de manera eficiente y sostenible los recursos naturales y productivos del valle.

3 Metodología

El estudio se estructuró en dos componentes principales y complementarios, el relevamiento fenológico detallado a campo y el análisis de imágenes satelitales PlanetScope para la obtención y procesamiento del NDVI, integrando ambos conjuntos de información mediante herramientas estadísticas.

Relevamiento fenológico a campo:

El relevamiento fenológico se desarrolló durante la campaña 2024/2025 en fincas conducidas en parral, con riego por goteo y manejo orgánico, lo que asegura un contexto agronómico relativamente homogéneo en cuanto a sistema de conducción y provisión hídrica. Se seleccionaron tres cuadros de entre 2 y 3 hectáreas en tres fincas, cada una ubicada en los principales distritos productivos del Valle Antinaco–Los Colorados: Malligasta, Nonogasta y Vichigasta, representando un gradiente de condiciones agroecológicas dentro del valle y permitiendo evaluar el comportamiento fenológico de la vid bajo ambientes contrastantes pero comparables. En cada cuadro del cultivo se eligieron tres plantas consideradas representativas en términos de vigor y desarrollo, procurando su ubicación equidistante dentro de la fila con el fin de capturar la variabilidad intra-parcela sin introducir sesgos asociados a bordes o sectores atípicos.

En cada una de estas plantas se marcaron cuatro brazos, orientados hacia los puntos cardinales (norte, sur, este y oeste), lo que permitió registrar posibles asimetrías en el desarrollo de la canopia asociadas a exposición solar, vientos dominantes u otros factores microclimáticos. Antes del inicio del ciclo vegetativo se contabilizó el número de yemas remanentes tras la poda, obteniéndose en promedio 15 yemas por brazo, es decir, alrededor de 60 yemas por planta y un total aproximado de 180 yemas monitoreadas por finca, constituyendo así una base muestral robusta para el seguimiento temporal.

El seguimiento fenológico comenzó con el inicio del ciclo vegetativo, realizándose registros semanales de la evolución de cada una de las yemas seleccionadas. Para la identificación de las distintas fases de desarrollo, se empleó la escala fenológica

propuesta por Baggiolini (1952) (Tabla 1), ampliamente utilizada en estudios vitícolas para la descripción del crecimiento y desarrollo de la vid (Sánchez y Moreno, 2018). Este sistema permitió caracterizar de manera precisa el avance del ciclo fenológico y su relación con las condiciones climáticas de cada localidad estudiada.

Análisis de imágenes:

En paralelo al relevamiento a campo, se implementó un componente de teledetección basado en el uso de imágenes satelitales PlanetScope, producto de una constelación de más de 180 CubeSats operados por Planet Labs Inc. Estos satélites proporcionan imágenes de alta resolución espacial (3 m) y un periodo de revisita diaria en el nadir, lo que los convierte en una herramienta particularmente adecuada para el seguimiento de cultivos intensivos a escala de parcela. Las imágenes utilizadas en este estudio corresponden a productos de reflectancia superficial de Nivel 3B, con cuatro bandas espectrales: azul (455–515 nm), verde (500–590 nm), rojo (590–670 nm) e infrarrojo cercano (NIR, 780–860 nm) (Planet Labs Inc., 2023), las cuales permiten el cálculo de índices de vegetación sensibles al estado de la canopia.

Tabla 1

Fases Fenológicas

Fase fenológica	Codificación	Fase fenológica	Codificación
Yema de invierno	1	Floración	9
Yema de algodón	2	Cuajado	10
Punta verde	3	Grano arveja	11
Hojas incipientes	4	Racimo cernido	12
Hojas extendidas	5	Envero	13
Racimos visibles	6	Maduración	14
Racimos separados	7	Agostamiento	15
Botones florales separados	8	Caída de hojas	16

Nota. Fuente: Adaptado de Baggiolini 1952

Se obtuvo un total de 57 escenas PlanetScope correspondientes a la campaña 2024/2025, todas con menos del 1% de cobertura nubosa y previamente recortadas a las parcelas de interés. Estas imágenes, ya corregidas atmosférica y radiométricamente, fueron descargadas desde la plataforma Planet Explore, asegurando la consistencia en el procesamiento básico y la comparabilidad temporal entre fechas. Cada imagen fue seleccionada de manera tal que coincidiera con el día de muestreo fenológico a campo en cada parcela, lo que permitió establecer una

correspondencia directa entre las observaciones de estado fenológico y los valores de NDVI derivados de la teledetección para esas mismas fechas.

La variable considerada fue el índice de vegetación normalizado (NDVI) promedio por parcela y por finca en cada una de las fechas de muestreo fenológico. Para el análisis de las imágenes y obtención del NDVI se usó el software QGIS 3.32.0 Lima. Los índices de vegetación son transformaciones espectrales de al menos dos bandas espectrales, seleccionadas específicamente para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación a la reflectancia superficial. Se ha reportado ampliamente la trayectoria fenológica o los cambios estacionales e interanuales en el crecimiento y la actividad de la vegetación (Jensen, 2007).

El NDVI se calculó con la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - Rojo) / (NIR + Rojo)$$

Donde:

NIR (Infrarrojo Cercano): Banda de 780–860 nm

Rojo: Banda de 590–670 nm

Para cada escena se generaron capas raster de NDVI y, a continuación, se aplicó la herramienta de estadísticas zonales de QGIS sobre los polígonos que delimitaron las parcelas de estudio. Este procedimiento permitió obtener, para cada fecha y finca, indicadores estadísticos como el valor medio, la mediana, la desviación estándar y los valores mínimo y máximo de NDVI dentro de cada área de interés, aportando una caracterización cuantitativa de la heterogeneidad espacial del vigor vegetativo. Con el fin de garantizar la calidad de la información espectral, se implementaron controles visuales y numéricos destinados a identificar y descartar píxeles afectados por nubes residuales, sombras, errores de georreferenciación u otras imperfecciones frecuentes en productos satelitales.

En los casos en que se detectaron anomalías localizadas, pero no dominantes en la escena, se recurrió a técnicas de interpolación espacial y temporal para reemplazar píxeles problemáticos, siguiendo criterios metodológicos alineados con las recomendaciones de Jensen (2007) para el análisis de trayectorias fenológicas mediante datos de teledetección. Este tratamiento permitió conservar la continuidad de las series temporales sin introducir distorsiones significativas en las tendencias generales. Una vez depuradas, las series de NDVI por finca y fecha se integraron con los registros fenológicos de campo mediante la construcción de bases de datos consolidadas que vincularon, para cada observación, la fase fenológica dominante con el valor espectral promedio correspondiente.

La transformación espectral del NDVI y la validación de su dinámica a lo largo de la campaña se complementaron con análisis descriptivos y estadísticos realizados en el entorno RStudio. En esta etapa se elaboraron gráficos temporales de NDVI, boxplots para explorar la distribución del índice por fase fenológica y finca, y mapas de calor para visualizar patrones de variación conjunta en el tiempo y el espacio. Además, se ajustaron Modelos Aditivos Generalizados (GAM) para describir la relación no lineal entre NDVI y fase fenológica, incorporando, cuando correspondió, efectos fijos o aleatorios asociados a finca, con el objetivo de evaluar la consistencia del comportamiento espectral frente a diferentes condiciones de manejo y ambiente.

La integración de los datos satelitales con los relevamientos agronómicos permitió asociar de manera objetiva la evolución del NDVI con cada fase fenológica, construyendo así un marco analítico robusto para el estudio ecofisiológico del viñedo. Finalmente, los resultados fueron sometidos a procedimientos de control de calidad adicionales, que incluyeron la comparación interanual en aquellos casos donde existían antecedentes históricos y la validación cruzada entre fechas satelitales y mediciones presenciales.

4 Resultados

Para el análisis de la relación entre el NDVI y las fases fenológicas del cultivo de vid se aplicó una serie de procedimientos estadísticos orientados a caracterizar tanto la distribución de los datos como la naturaleza y la intensidad de su asociación. En una primera etapa se empleó la prueba de Shapiro–Wilk para verificar el supuesto de normalidad en la distribución de los valores de NDVI en cada una de las fincas analizadas. En todos los casos se observó el incumplimiento de este supuesto ($p < 0,05$), lo que indicó que los datos no seguían una distribución normal y justificó el uso de enfoques no paramétricos en las etapas subsiguientes del análisis. Esta comprobación fue fundamental para evitar sesgos en la inferencia estadística y asegurar que las conclusiones derivadas de las pruebas de correlación y de comparación de grupos se basaran en procedimientos acordes con la naturaleza real de los datos.

Con el propósito de explorar en detalle la asociación entre el NDVI y la fase fenológica, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman de manera independiente para cada finca, considerando como variable explicativa la fase codificada según la escala de Baggiolini y como variable respuesta los valores de NDVI promedio por fecha y unidad de análisis (Tabla 2). Esta aproximación permitió evaluar la fuerza y el sentido de la relación monotónica entre el avance del ciclo fenológico y la dinámica del índice espectral, sin requerir el cumplimiento de supuestos estrictos de normalidad o linealidad.

Tabla 2

Coefficientes de Correlación de Spearman entre NDVI y Fases Fenológicas en Tres Fincas de Vid

Finca	Coefficiente ρ	Valor-p	Interpretación
1	0.65	0.0028	Correlación positiva significativa
2	0.65	0.0024	Correlación positiva significativa
3	0.84	<0.00001	Correlación positiva fuerte y altamente significativa

En los tres casos se observaron asociaciones positivas, estadísticamente significativas y de magnitud moderada a alta, lo que indica que el NDVI tiende a aumentar en la medida en que avanza el ciclo fenológico en todas las fincas evaluadas. La consistencia de los coeficientes en Finca 1 y Finca 2 ($\rho = 0,65$ en ambos casos) refleja un patrón similar de respuesta espectral frente a la progresión de las fases, mientras que el valor notablemente superior registrado en Finca 3 ($\rho = 0,84$) señala una relación especialmente estrecha entre el índice y el desarrollo fenológico

en esa unidad. Esta mayor fuerza de asociación podría estar vinculada a condiciones agronómicas más favorables, mejores características edáficas, un manejo hídrico más eficiente o la presencia de un microclima local que favorece la expresión plena del vigor vegetativo y, por ende, una respuesta más clara del NDVI.

Más allá de los valores numéricos, estos resultados confirman que el NDVI captura de manera consistente los cambios estructurales y funcionales del dosel a lo largo del ciclo fenológico. En las fases iniciales, cuando la brotación es incipiente y la superficie foliar aún es reducida, los valores del índice permanecen relativamente bajos; a medida que se produce la expansión foliar y se incrementa la biomasa verde, el NDVI aumenta siguiendo una trayectoria ascendente; finalmente, en las etapas cercanas al envero y la maduración, tiende a estabilizarse, reflejando una canopia ya consolidada. La correlación de Spearman resume este comportamiento en un único coeficiente, pero al considerar su magnitud y significancia en las tres fincas permite afirmar que la relación NDVI–fenología es robusta y reproducible en distintos contextos de manejo dentro del valle.

Con el fin de describir de forma más flexible y detallada la relación entre NDVI y fase fenológica, se ajustó un Modelo Aditivo Generalizado (GAM), incorporando un término suavizado para la fase (s(Fase)) y efectos fijos de finca. Esta estrategia permitió capturar patrones no lineales en la trayectoria del índice a lo largo del ciclo y, al mismo tiempo, contemplar las diferencias sistemáticas entre unidades productivas. En lugar de imponer una relación estrictamente lineal, el GAM permite que la forma de la curva NDVI–fase emerja de los datos, representando con mayor fidelidad la dinámica progresiva de la fenología.

Los resultados del modelo, presentados en la Tabla 3, mostraron que el término suavizado fue altamente significativo ($p < 2e-16$), lo cual indica que la fase fenológica tiene un efecto no lineal pero claramente discernible sobre el NDVI. El coeficiente de determinación ajustado alcanzó un valor de 0,922, señalando que aproximadamente el 92,2% de la variabilidad observada en el NDVI quedó explicada por el modelo. Este nivel de ajuste refuerza la pertinencia del uso de GAM en estudios fenológicos basados en índices de vegetación, ya que captura adecuadamente la trayectoria sigmoideal típica del desarrollo del dosel en cultivos perennes como la vid.

Tabla 3

Resultados del Ajuste del Modelo Aditivo Generalizado (Gam) para Ndvi en Función de Fase Fenológica y Finca

Elemento del modelo	Resultado
Término suavizado s(Fase)	$p < 2e-16$
R ² ajustado	0.922
Comparación entre Fincas	Finca 3 > Finca 1 ($p = 0.0025$)
Finca 2 vs otras fincas	No diferencias significativas

Además de describir la forma de la relación NDVI–fase, el GAM permitió comparar niveles medios de NDVI entre fincas, controlando el efecto de la fenología. En este sentido, se observó que la Finca 3 presentó valores de NDVI significativamente superiores a los de la Finca 1 ($p = 0,0025$), mientras que la Finca 2

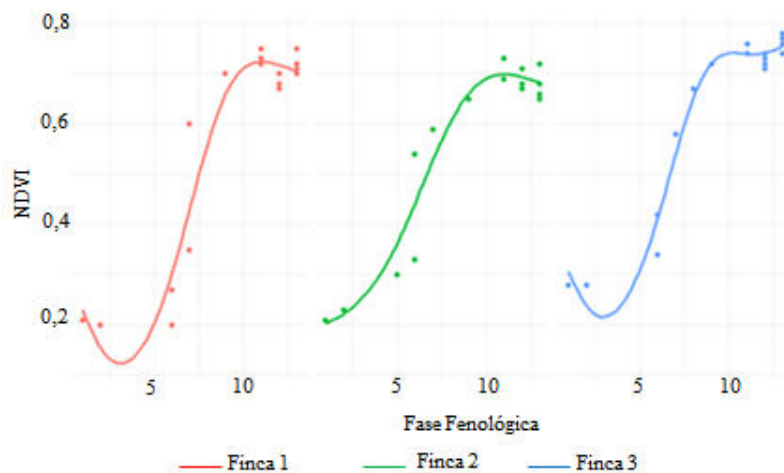
no difirió de manera significativa de las restantes. Este resultado es coherente con la correlación de Spearman más alta obtenida en Finca 3 y sugiere que, en dicha unidad, el cultivo mantuvo un vigor vegetativo superior a lo largo del ciclo, posiblemente como resultado de mejores condiciones de suelo, disponibilidad hídrica o prácticas de manejo más ajustadas a las demandas del viñedo.

Las curvas suavizadas generadas para cada finca (Figura 2) reflejan con claridad una evolución fenológica gradual del cultivo, caracterizada por un incremento progresivo del NDVI a medida que avanzan las fases, seguido de una tendencia a la estabilización en las etapas finales del ciclo. Este patrón se ajusta al modelo conceptual de desarrollo de la vid: un crecimiento inicial relativamente lento tras la brotación, una fase de expansión foliar acelerada conforme se ingresa en etapas reproductivas y, finalmente, una meseta asociada a la maduración, en la que el dosel alcanza su máxima expresión.

En este marco, el NDVI se interpreta como indicador del vigor del dosel y del estado de desarrollo de la vid, al reflejar la combinación de área foliar activa, contenido de clorofila y estructura de la canopia. Las diferencias en el nivel máximo alcanzado entre fincas refuerzan la idea de que factores locales de manejo (por ejemplo, lámina de riego aplicada, fertilización, control de malezas) y condiciones ambientales específicas (microrelieve, exposición, textura del suelo) modulan la respuesta espectral del viñedo.

Figura 2

Ajuste del GAM para NDVI vs Fase Fenológica por Finca



A fin de profundizar en la comprensión de las diferencias asociadas a las fases específicas del ciclo, se aplicó la prueba de Kruskal–Wallis para evaluar la existencia de variaciones significativas en los valores de NDVI tanto entre fincas como entre fases fenológicas, seguida por la prueba de comparaciones múltiples de Dunn con corrección de Bonferroni. Este enfoque permitió no solo detectar si había diferencias globales, sino también identificar entre qué pares de fases se concentraban las discrepancias más marcadas.

Los resultados de Kruskal–Wallis indicaron, en primer lugar, que existían diferencias estadísticamente significativas en el NDVI entre fincas ($\chi^2 = 7,35$; $p =$

0,025), lo que coincide con las evidencias proporcionadas por el GAM respecto de los niveles superiores de NDVI en Finca 3. En segundo lugar, al considerar el NDVI en función de las fases fenológicas, el test arrojó un valor de $\chi^2 = 39,82$ ($p = 8,2e-06$), confirmando que el desarrollo fenológico influye de manera marcada en la variación del índice y que las fases no son equivalentes desde el punto de vista espectral.

Tabla 4

Comparaciones Estadísticas No Paramétricas de NDVI Entre Fincas y Entre Fases Fenológicas

Prueba / Comparación	Resultado
Kruskal-Wallis (NDVI entre fincas)	$\chi^2 = 7.35$, $p = 0.025$
Kruskal-Wallis (NDVI entre fases)	$\chi^2 = 39.82$, $p = 8.2e-06$
Fase 1 vs Fase 11	$p_{adj} = 0.0187$
Fase 1 vs Fase 13	$p_{adj} = 0.0481$
Fase 2 vs Fase 11	$p_{adj} = 0.0176$
Fase 2 vs Fase 13	$p_{adj} = 0.0455$
Otras comparaciones	No significativas tras corrección

La aplicación de la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni permitió precisar que las diferencias significativas se concentraron entre las fases iniciales (1 y 2, correspondientes a yema de invierno y etapas muy tempranas del desarrollo) y las fases 11 y 13 (grano arveja y envero). Estos resultados indican un incremento significativo del NDVI al pasar de las etapas de escasa actividad foliar y baja cobertura verde a fases más avanzadas en las que el dosel se encuentra densamente desarrollado y el cultivo transita por etapas intensas de actividad fisiológica. Esta transición es coherente con el aumento de biomasa foliar y la consolidación de la canopia durante el crecimiento vegetativo y reproductivo de la vid. El hecho de que no se hayan encontrado diferencias significativas entre muchas de las fases intermedias sugiere que, una vez superadas las etapas iniciales, el NDVI se mantiene dentro de rangos relativamente homogéneos durante buena parte del ciclo, describiendo una meseta de vigor donde el dosel ya ha alcanzado un desarrollo cercano a su máximo potencial.

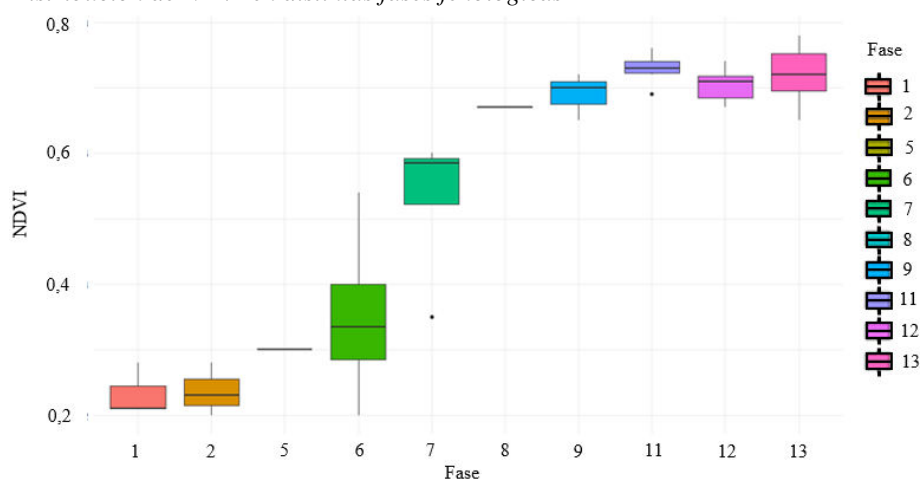
El análisis gráfico mediante boxplots (Figura 3) brindó una representación visual complementaria de la distribución del NDVI a lo largo de las distintas fases fenológicas. En estos gráficos se observa un incremento general de los valores del índice conforme se avanza en las fases, con niveles bajos en las etapas iniciales (1, 2 y 5), indicativos de una limitada cobertura vegetal y de una canopia aún poco desarrollada. A partir de fases intermedias y avanzadas, como 9, 11, 12 y 13, los boxplots muestran valores medios a altos de NDVI, asociados al máximo desarrollo vegetativo y a etapas reproductivas en las que el viñedo presenta un dosel denso y activo. Este comportamiento concuerda con lo esperable en cultivos sanos, donde el NDVI se relaciona positivamente con la biomasa verde, el índice de área foliar y la

actividad fotosintética, y constituye una validación independiente de los resultados obtenidos mediante los análisis estadísticos.

La dispersión de los datos dentro de cada fase, reflejada en la altura de las cajas y en la presencia de valores atípicos, sugiere la existencia de variabilidad intra-fase atribuible a diferencias entre parcelas, microambientes o prácticas de manejo específicas. En particular, la fase 6 presenta una mayor amplitud intercuartílica, lo que puede interpretarse como una etapa de transición crítica en la que coexisten plantas o sectores del viñedo en distintos momentos del desarrollo, generando una heterogeneidad espectral más marcada. En contraste, fases como la 8 y la 11 exhiben cajas más compactas y menor dispersión, lo que podría indicar una mayor sincronía fenológica entre plantas y una respuesta más uniforme del dosel vegetal a las condiciones ambientales y de manejo en esas etapas.

Figura 3

Distribución de NDVI en distintas fases fenológicas



5 Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman de manera contundente el potencial del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como herramienta esencial para el monitoreo fenológico de la vid, específicamente de la variedad Torrontés Riojano, en ambientes áridos y semiáridos como el Valle Antinaco–Los Colorados. La correlación positiva entre los valores de NDVI y las fases del desarrollo vegetal, evidenciada por el incremento sostenido del índice durante las fases medias y avanzadas y su posterior estabilización en las etapas finales, permite validar tanto el marco teórico de partida como la evidencia reportada en estudios internacionales que vinculan índices de vegetación con biomasa, vigor y productividad de cultivos agrícolas y forestales (Huete et al., 2002; Gomes et al., 2021). En este contexto, el NDVI se consolida como un indicador indirecto confiable del vigor vegetativo, del índice de área foliar y de la biomasa activa, proporcionando una medida cuantitativa y objetiva de la dinámica fisiológica del cultivo a lo largo del ciclo fenológico.

El comportamiento del NDVI observado en las tres fincas, caracterizado por una trayectoria de tipo sigmoïdal, resulta especialmente ilustrativo del vínculo entre la seña espectral y los procesos ecofisiológicos que estructuran el desarrollo de la vid. En las fases iniciales, dominadas por la brotación y la aparición de hojas incipientes, el índice se mantiene en valores relativamente bajos, reflejando una canopia todavía poco desarrollada y con limitada superficie fotosintéticamente activa. A medida que el cultivo transita hacia etapas de floración y cuaje, se registra una rápida expansión foliar y un aumento marcado del NDVI, hasta alcanzar valores elevados y relativamente estables en fases como grano arveja, racimo cernido y envero, cuando el dosel ha alcanzado su máxima expresión estructural. Este patrón coincide con el reportado en viñedos de regiones líderes como California, Portugal y Australia, donde se ha documentado una dinámica similar del NDVI a lo largo del ciclo de la vid, tanto en variedades blancas como tintas (Cunha et al., 2010; Fawcett et al., 2021). La coincidencia entre lo observado en el Valle Antinaco–Los Colorados y estos antecedentes internacionales aporta evidencia sobre la universalidad de la respuesta espectral de la vid frente a su desarrollo fenológico bajo contextos climáticos diversos.

Desde el punto de vista metodológico, el análisis avanzado de los datos pone de manifiesto la complejidad estadística propia de los entornos agroclimáticos reales. La presencia de distribuciones asimétricas, valores atípicos y niveles de variabilidad significativos entre fincas y fases fenológicas justificó el uso de métodos robustos y no paramétricos, como las pruebas de Spearman y Kruskal–Wallis, en combinación con Modelos Aditivos Generalizados (GAM). La prueba de Shapiro–Wilk mostró claramente que los valores de NDVI no seguían una distribución normal, lo que hubiera cuestionado el uso de métodos paramétricos clásicos y potencialmente hubiera introducido sesgos en las conclusiones. En cambio, la correlación de Spearman permitió capturar de manera adecuada la asociación monotónica entre NDVI y fase fenológica, y los resultados del GAM, con un R^2 ajustado de 0,922, evidenciaron la capacidad de este tipo de modelos para representar la relación no lineal entre ambos factores, respetando la dinámica propia del crecimiento de la vid

La alta capacidad explicativa del GAM y la significancia del término suavizado de fase confirman que el NDVI responde de forma consistente al avance fenológico, lo que abre la puerta a aplicaciones concretas en agricultura de precisión. En particular, las curvas suavizadas por finca permiten visualizar con claridad las ventanas críticas de cambio en el índice, que pueden asociarse a momentos clave para la toma de decisiones agronómicas, tales como la definición de estrategias de riego, fertilización, manejo de canopia o programación de intervenciones fitosanitarias. La identificación de tramos del ciclo en los que el NDVI aumenta con mayor pendiente sugiere fases de rápida acumulación de biomasa, en las que el cultivo puede ser más sensible a estrés hídrico o nutricional, mientras que los tramos de meseta pueden asociarse a etapas en las que la prioridad de manejo se desplaza hacia la calidad del fruto más que hacia el incremento del vigor.

Por otra parte, el análisis agronómico de las diferencias entre parcelas y fincas subraya la relevancia del NDVI como herramienta de microzonificación y segmentación productiva. La persistencia de valores superiores de NDVI en Finca 3 a lo largo de todo el ciclo fenológico sugiere la presencia de condiciones edáficas favorables, una provisión hídrica más estable o prácticas de manejo más ajustadas a los requerimientos del cultivo, que se traducen en un dosel más vigoroso. En contraste, los niveles relativamente inferiores observados en Finca 1, y la ausencia de diferencias significativas en ciertos contrastes con Finca 2, muestran que el NDVI es sensible a las particularidades de manejo agronómico, al tipo de suelo, a la

profundidad efectiva del perfil y a la variabilidad microclimática (González y Pérez, 2020; Reyes y Arribillaga, 2019). Esta sensibilidad abre la posibilidad de utilizar el índice no solo como descriptor temporal de la fenología, sino también como base para la delimitación de unidades de manejo diferenciado dentro de las fincas, orientando el uso más eficiente de agua, fertilizantes y labores sanitarias.

La combinación de las pruebas de Kruskal–Wallis y Dunn refuerza estas interpretaciones al mostrar diferencias significativas tanto entre fincas como entre fases específicas del ciclo fenológico. La existencia de contrastes significativos entre las fases iniciales (1 y 2) y las fases 11 y 13 indica un salto claro en los niveles de NDVI al pasar de situaciones de baja cobertura vegetal a estadios de dosel plenamente desarrollado, en coherencia con el aumento de biomasa verde y el cierre progresivo de la canopia. El hecho de que muchas comparaciones entre fases intermedias no resulten significativas luego de la corrección por comparaciones múltiples sugiere que, una vez superado el periodo inicial de crecimiento, el cultivo ingresa en una fase de relativo equilibrio espectral donde el NDVI oscila dentro de rangos acotados. Esta meseta, que coincide con el periodo de máximo vigor, tiene implicancias prácticas: las variaciones residuales del índice pueden estar más asociadas a diferencias locales de manejo o microambiente que a cambios bruscos en la fenología.

El análisis mediante boxplots aporta, además, una lectura útil sobre la variabilidad interna de cada fase. La mayor dispersión observada en la fase 6 puede interpretarse como señal de una etapa de transición en la que coexisten plantas o sectores del viñedo en distintos momentos del desarrollo, lo que incrementa la heterogeneidad espectral dentro de una misma categoría fenológica. Por el contrario, las fases 8 y 11, con distribuciones más compactas, sugieren estados del cultivo más sincronizados, en los cuales el viñedo presenta un comportamiento más homogéneo, posiblemente porque las condiciones ambientales y de manejo han permitido una expresión fenológica más uniforme. Estas observaciones son relevantes para el diseño de estrategias de monitoreo: las fases con mayor dispersión podrían requerir un seguimiento más intensivo o una mayor densidad de muestreo, tanto espectral como de campo, para capturar adecuadamente la variabilidad existente.

A pesar de las fortalezas evidenciadas, la utilidad del NDVI y de la teledetección operativa está condicionada por ciertos límites metodológicos que deben ser cuidadosamente considerados. Entre ellos, se destacan la saturación del NDVI en coberturas muy densas, que puede limitar su sensibilidad en fases donde la canopia ya es muy cerrada, y la influencia de elementos no vegetales, como suelos desnudos, coberturas herbáceas o malezas, que pueden afectar la señal en bordes de parcelas o en sectores con menor densidad de plantas. Además, la resolución temporal de las imágenes, aunque alta en el caso de PlanetScope, puede resultar insuficiente para registrar eventos súbitos de estrés, como golpes de calor, heladas o daños por granizo, cuya huella espectral puede ser transitoria. Para mitigar estos límites, resulta crucial la correcta corrección atmosférica y radiométrica de las imágenes, la precisa delimitación de las parcelas de interés y la sincronización temporal entre la adquisición satelital y los relevamientos fenológicos a campo.

En este marco, las futuras líneas metodológicas deberían orientarse a la integración del NDVI con otros índices espectrales complementarios, tales como EVI, SAVI o NDWI, que añadan sensibilidad a aspectos específicos de la estructura del dosel, del efecto del suelo o del contenido hídrico de la vegetación (Huete et al., 2002; Zarco-Tejada et al., 2005). La incorporación de sensores proximales, como cámaras multiespectrales embarcadas en drones, y de redes de sensores terrestres de humedad, temperatura y radiación, permitiría enriquecer la interpretación de las series temporales de NDVI y mejorar la calibración de modelos fenológicos. Junto con ello,

el uso de algoritmos avanzados de análisis de series temporales y de aprendizaje automático podría contribuir a detectar patrones sutiles, anticipar cambios fenológicos y construir sistemas de alerta temprana orientados a la gestión de riesgos agronómicos.

La interacción con la experiencia acumulada en otras regiones vitivinícolas resulta central para contextualizar estos hallazgos. En Estados Unidos y Europa, la aplicación del NDVI para modular el riego, ajustar la fertilización y orientar la gestión sanitaria se ha consolidado como una práctica habitual dentro de la vitivinicultura de precisión, permitiendo una asignación más eficiente de insumos y una mejora sustantiva en la sostenibilidad del viñedo (Johnson et al., 2003; Fawcett et al., 2021). En el caso de Argentina, y en particular del Valle Antinaco–Los Colorados, la incorporación sistemática de este tipo de herramientas abre la posibilidad de diseñar esquemas de monitoreo continuo, de diferenciar espacialmente el vigor y de desarrollar modelos predictivos de calidad y rendimiento, así como de establecer sistemas locales de alerta frente a eventos extremos.

En conjunto, el presente trabajo sienta bases sólidas para que futuras investigaciones integren series temporales multianuales de NDVI, algoritmos de inteligencia artificial y enfoques de manejo adaptativo frente al cambio climático. El NDVI, complementado con información meteorológica, edáfica y de gestión agraria, se perfila como una variable clave para la construcción de modelos multiescala y sistemas de información geográfica capaces de optimizar la toma de decisiones desde la escala de planta y parcela hasta el ámbito territorial.

Por último, los resultados obtenidos muestran que el NDVI es mucho más que un simple índice espectral: constituye el eje de una estrategia moderna de monitoreo, predicción y gestión inteligente del viñedo. Su capacidad para reflejar con precisión el estado fenológico y el vigor del cultivo, combinada con su naturaleza no invasiva y su aplicabilidad a gran escala, lo convierten en un componente central de los sistemas de apoyo a la decisión en vitivinicultura de precisión. De este modo, el NDVI aporta no solo valor académico y técnico, sino también un soporte concreto para el diseño de prácticas agrícolas más sustentables y competitivas, alineadas con los retos del cambio climático y con la creciente demanda de vinos de alta calidad producidos bajo estándares internacionales de eficiencia, trazabilidad y cuidado ambiental.

6 Conclusiones

El NDVI calculado a partir de imágenes satelitales PlanetScope mostró una correlación positiva y estadísticamente significativa con las fases fenológicas del cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.), variedad Torrontés Riojano, lo que respalda su utilización como indicador indirecto del desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo. Esta relación confirma que el índice es sensible a los cambios estructurales y funcionales del dosel a lo largo del ciclo, y que puede emplearse operativamente para seguir la progresión fenológica en sistemas vitícolas de zonas áridas y semiáridas.

La evolución temporal del NDVI a lo largo del ciclo fenológico describió una trayectoria de tipo sigmoideal, con valores bajos en las fases iniciales, un incremento acelerado en las fases medias y una estabilización en las fases avanzadas, patrón que resulta coherente con la fisiología de la vid y con la dinámica de acumulación de biomasa foliar. Este comportamiento fue capturado de manera adecuada mediante el ajuste de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM), cuyo R^2 ajustado de 0,922 evidencia una alta capacidad explicativa y confirma la idoneidad de este enfoque para modelar relaciones no lineales entre índices espectrales y fenología.

Las diferencias significativas de NDVI detectadas entre fincas y entre fases fenológicas, a través de análisis no paramétricos (correlaciones de Spearman, pruebas de Kruskal–Wallis y comparaciones múltiples de Dunn), ponen de manifiesto tanto la sensibilidad del índice a las distintas etapas del desarrollo como su capacidad para reflejar condiciones locales de manejo y ambiente. En particular, los valores más altos registrados en una de las fincas sugieren la influencia de factores edáficos, hídricos y de manejo agronómico sobre el vigor del dosel, lo que refuerza el potencial del NDVI como herramienta para la microzonificación y la segmentación productiva dentro del viñedo.

El empleo del NDVI en vitivinicultura se presenta, por lo tanto, como una alternativa estratégica para el monitoreo continuo, no destructivo y a escala parcelaria del estado fenológico y del vigor del cultivo, facilitando la toma de decisiones agronómicas asociadas al riego, la fertilización, el manejo de canopia y la sanidad. La integración de este tipo de información en esquemas de vitivinicultura de precisión permitiría optimizar el uso de recursos, mejorar la planificación de labores y contribuir a la sustentabilidad económica y ambiental de los sistemas productivos.

Finalmente, la plataforma satelital evaluada (PlanetScope) demostró disponer de una combinación adecuada de alta resolución espacial y frecuencia temporal para el seguimiento fenológico de la vid en contextos donde las variaciones microclimáticas y las diferencias estructurales del dosel vegetal requieren observaciones de detalle. Estas características posicionan a PlanetScope como una herramienta idónea para futuras aplicaciones de monitoreo espectral en vitivinicultura, tanto en el Valle Antinaco–Los Colorados como en otras regiones productoras con condiciones agroecológicas similares.

7 Referencias

- Abraham, E., Del Valle, H., Roig, F., Torres, L., Ares, J., Coronat, F. y Godagnone, R. (2009). Overview of the geography of the Monte Desert biome (Argentina). *Journal of Arid Environments*, 73(2), 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.10.005>
- Baggiolini, M. (1952). Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue Romande d'Agriculture et d'Arboriculture*, 8, 4-6.
- Cabrera, A. L. (1976). *Regiones fitogeográficas argentinas*. Editorial Acme.
- Chuvieco, E. (2015). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio* (3ª ed.). Ariel Ciencia.
- Cunha, M., Marçal, A. y Ferreira, A. (2010). Retrieval of vine canopy biophysical parameters using high spatial resolution satellite images. *European Journal of Agronomy*, 33(1), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.03.004>
- Delbart, N. y Picard, G. (2007). Modeling the date of leaf appearance in low-arctic tundra. *Global Change Biology*, 13, 2551–2562. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01466.x>
- Fawcett, D., Bennie, J. y Anderson, K. (2021). Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 227–244. <https://doi.org/10.1002/rse2.184>
- Fitts, Y., Tucker, C., Hiernaux, P., Auda, Y. y Kergoat, L. (2025). Using PlanetScope NDVI time series to detect the phenology of individual trees in the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 321, 114650. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114650>
- Gobierno de La Rioja. (2024). *Ficha provincial agroindustrial: La Rioja*. Ministerio de Economía y Producción.
- Gomes, M., Roman, R., Rua, A., Alves, E. y McKee, M. (2021). Comparação do NDVI obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. *Irriga*, 26(3), 605–619. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619>

- González, L. y Pérez, J. (2020). Influencia del manejo agronómico en la fenología de la vid. *Revista de Viticultura y Enología*, 35(2), 45–60.
- Gouveia, C., Trigo, R. M. y DaCamara, C. (2011). Drought and vegetation stress monitoring in Portugal using satellite data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 333–341. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-333-2011>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X. y Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2020). *Elementos del clima y su influencia en la producción vitivinícola*. Ministerio de Agricultura de Chile.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2010). *Producción olivícola en Argentina: situación y perspectivas*. INTA EEA Catamarca.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2024). Anuario estadístico de la vitivinicultura argentina.
- Jensen, J. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective*. (2ª ed.). Pearson Prentice Hall.
- Johnson, L. F., Roczen, D. E., Youkhana, S., Nemani, R. y Bosch, D. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38(1), 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00109-3)
- Keller, M. (2015). *The science of grapevines: Anatomy and physiology*. (2ª ed.). Academic Press.
- Le Houérou, H. N. (1999). *Estudios e investigaciones de las zonas áridas y semiáridas de Argentina*. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA).
- Matías, A., Rodríguez, J. y Escobar, G. (2010). *Evaluación de sistemas de cultivo superintensivo en olivo: Experiencias en La Rioja y Catamarca*. INTA Publicaciones Técnicas.
- Morello, J. (1958). *La Provincia Fitogeográfica del Monte*. Opera Lilloana.
- Recalde, D., Zerda, H., Maldonado, F. y Winschel, C. (2023). Dinámica del uso del suelo en el Valle Antinaco Los Colorados en el período 1976–2018. *Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa*, 9(4), 8–19.
- Reyes, M. y Arribillaga, D. (2019). Grados día y fenología en vides. *Boletín Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, (415).
- Rodríguez, J., De la Iglesia, F. y Ocvirk, M. (2000). Fenología de cultivares de vid (*Vitis vinifera* L.) en Luján de Cuyo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 32(2), 15–20.
- Roig, F., Roig, S. y Corbalán, V. (2009). Biogeography of the Monte Desert. *Journal of Arid Environments*, 73, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.016>
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. y Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3–4), 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>
- Von Bennwitz Alvarez, E., Cazanga-Solar, R. y Carrasco-Benavides, M. (2018). Studying phenological stages of cherry (*Prunus avium* L.) using field observations and satellite-derived vegetation indexes. *Idesia (Arica)*, 36(1), 65–71. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018000100065>
- Zarco-Tejada, P., Ustin, S. y Whiting, M. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641–653. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0304>
- Zhang, X., Friedl, M. y Schaaf, C. (2009). Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 1098–1107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.005>
- Zhang, X., Friedl, M., Schaaf, C. y Strahler, A. (2003). Monitoring the timing of vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)