



Determinación temprana mediante teledetección del inicio de la etapa de desarrollo para el maíz de segunda cosecha en la Zona Regable de La Violada (Huesca)

E. Pérez-Cardiel¹, J. de la Riva¹, M. Rodrigues¹, MA. Casterad²

¹ Grupo GEOFOREST-IUCA, Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.

² Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza, España.

epcardiel@unizar.es, delariva@unizar.es, rmarcos@unizar.es, acasterad@cita-aragon.es

RESUMEN: La teledetección satelital proporciona observaciones frecuentes de las propiedades de la superficie terrestre que permiten caracterizar parámetros fenológicos a partir de la evolución temporal de índices de vegetación, utilizando generalmente series completas del ciclo del cultivo. En el contexto de la digitalización en la agricultura, resulta fundamental la identificación temprana de la fenología, sin necesidad de utilizar la serie de datos del ciclo completo de los cultivos. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar de forma temprana el inicio de la etapa de desarrollo del maíz de segunda cosecha a partir de series temporales de imágenes multispectrales. La metodología utilizada para determinar el inicio de la etapa de desarrollo se basará en una técnica de detección de punto de cambio en la serie temporal. Las imágenes satelitales tienen el inconveniente de la cobertura de nubes en algunos momentos del ciclo del cultivo que hace que existan vacíos en las series temporales. Por ello, se analizará también la falta de datos (cobrimiento por nubes) y la incorporación de datos de Sequoia a la serie temporal Sentinel 2. Los resultados indican que se puede determinar el inicio de la etapa de desarrollo utilizando la técnica de punto de cambio –prueba de Pettitt– aplicada a series temporales de IV obtenidos con Sentinel 2, la falta de datos en los momentos cercanos del inicio de la etapa de desarrollo puede adelantar su determinación, no en cambio si la falta de datos se produce al inicio del ciclo del cultivo. Además, las series temporales de IV de Sequoia en UAV y de MSI de Sentinel 2 pueden integrarse y usarse de manera efectiva para detectar el IED, siendo el índice NDRre es más adecuado.

Palabras-clave: fenología, UAV, prueba de Pettitt, serie temporal.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco actual de la digitalización en agricultura y la aplicación operativa de las TIG, se abren nuevas posibilidades de aplicación como la identificación temprana de la presencia y el desarrollo de los cultivos. El inicio de la etapa de desarrollo (IED), término adoptado por la FAO 56, comienza cuando el cultivo cubre aproximadamente un 10% del suelo. La fecha de siembra es una entrada fundamental para los modelos de desarrollo de cultivos y los modelos de determinación de sus necesidades hídricas (Bandaru et al., 2020). Pero no siempre se conoce esta fecha, optándose por su determinación a partir del momento del IED (Liu et al., 2018). El IED de los cultivos está determinado tanto por factores ambientales como por las operaciones de manejo de cada agricultor; a veces si se produce una fase prolongada de sequía o una fase de periodos húmedos, los agricultores pueden variar el momento de la siembra.

La teledetección satelital proporciona observaciones periódicas de la superficie terrestre que pueden utilizarse para caracterizar la fenología de los cultivos. Generalmente esta caracterización se realiza a partir de series temporales de imágenes, cuya frecuencia de adquisición varía en función de la plataforma. Actualmente existen satélites como Sentinel 2, con alta resolución temporal y resolución espacial adecuada, que pueden ofrecer esta información. No obstante, al tratarse de un sensor espectral, la frecuente cobertura de nubes en algunos momentos del ciclo del cultivo sigue siendo el principal inconveniente para tener datos con la frecuencia necesaria. Para evitar estas situaciones y completar la serie de datos se pueden incluir imágenes adquiridas con plataformas no tripuladas (UAV). En Pérez-Cardiel (2022) se constata que la combinación de

IV derivados de MSI de Sentinel 2 y de cámara Sequoia (portada en UAV) ofrece medidas consistentes, por lo que la combinación de los datos MSI de Sentinel 2 y Sequoia en series temporales puede ser una buena alternativa para determinar de forma más ajustada la fecha de IED.

Por todo lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar de forma temprana el inicio de la etapa de desarrollo de los cultivos de regadío a partir de series temporales de imágenes multispectrales para segundas cosechas de maíz. Para ello se va a desarrollar y validar una metodología para detección temprana de IED utilizando la serie temporal de Sentinel 2, analizando la falta de datos (cobrimiento por nubes) y la incorporación de datos de Sequoia a la serie temporal Sentinel 2. La metodología de detección de IED se basará en una técnica de detección de punto de cambio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La secuencia de trabajo seguida para el desarrollo de este estudio consta de tres fases: 1) obtención del día juliano con el 10% de FCV de las parcelas mediante fotografías RGB cenitales; 2) determinación del IED en las series de IV por medio de la técnica de detección de punto de cambio; 3) incorporación de imágenes obtenidas por medio de UAV en la serie temporal de datos y su efecto en la determinación de IED.

2.1. Área de estudio

Para este estudio se utilizaron varias parcelas de la Zona Regable de La Violada (ZRV, Huesca) 3 cultivadas en 2018 y 3 en 2019. Corresponden a parcelas con maíz de segunda cosecha sembradas sin laboreo, es decir, mediante siembra directa después de cosechar la cebada. La siembra se realizó a finales de junio, produciéndose la emergencia del cultivo, como promedio, aproximadamente una semana después de la siembra.

2.2. Selección de la ventana óptima para la detección del IED

Tras revisar varios estudios llevados a cabo en la ZRV por parte del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (Malik y Dechmi, 2019), el periodo óptimo para la detección del IED en maíz de doble cosecha mediante series de imágenes multitemporales se sitúa entre la primera y la segunda semana de julio, concretamente entre los días julianos 186 y 192. La técnica de detección del punto de cambio requiere datos durante las primeras etapas de crecimiento, periodo que se muestra en la Figura 1, que abarca desde la siembra hasta V4-V5 para maíz.

Los periodos de cada año en los que se realizaron las salidas de campo (toma de fotografía RGB) abarcan desde la emergencia del cultivo (estadio V1) hasta cuando el tallo comienza el periodo de gran elongación (estadio V6) (Ritchie et al., 1986). Las fechas concretas de captura se pueden consultar en la Tabla 1.

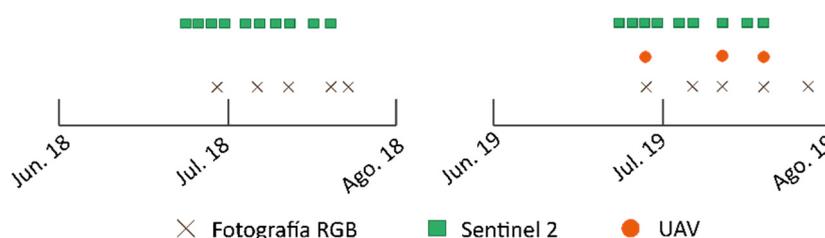


Figura 1. Momentos de realización de las fotografías RGB en campo, obtención de datos de Sentinel 2 y de UAV.

Tabla 1. Fechas de adquisición de fotografías con cámara RGB en cada una de las parcelas en 2018 y 2019

Año	Parcela	28/06/2019	05/07/2019	10/07/2019	15/07/2019	23/07/2019
2018	A	X	X	X	X	X
	B			X	X	X
	C		X	X	X	X
Año	Parcela	28/06/2019	05/07/2019	10/07/2019	18/07/2019	25/07/2019
2019	D		X	X	X	
	E	X	X	X	X	X
	C'	X	X		X	X

2.3. Adquisición y procesamiento de fotografías RGB

Las fotografías se tomaron en 10 jornadas de campo distribuidas en a lo largo del periodo inicial de desarrollo del cultivo, desde finales de junio hasta final de julio, en los dos años de estudio (Tabla 1). En cada parcela se seleccionaron 3 zonas donde se identificó visualmente en el campo que el cultivo era representativo del conjunto de la parcela. Con una cámara Huawei WAS-LX1A se tomó una fotografía RGB sobre una superficie delimitada por un aro de 73 cm de diámetro (correspondiente con la distancia entre filas de cultivo) colocado en las zonas elegidas. La cámara estaba a unos 120 cm del suelo, para asegurar recoger toda la superficie abarcada por el aro, en un plano cenital y enfocando el centro de cada circunferencia. Tanto la velocidad de obturación como la apertura se dejaron automáticas y las imágenes se tomaron sin flash. El tamaño de la imagen fue de 3968×2240 píxeles y se guardaron en formato JPEG.

Se realizó un recorte de las imágenes ajustado a la circunferencia definida por el aro y posteriormente se analizaron las imágenes resultantes con el software de acceso libre BreedPix 0.2 (Casadesús et al., 2005). Este software clasifica los píxeles de la imagen según su tono (Hue, en representación de la imagen HSI) y cuantifica la proporción de píxeles de la imagen que son verdes (GA, *Green Area*) y muy verdes (GGA, *Greener Area*). El GA indica el porcentaje de píxeles de la imagen cuyo tono está entre 60° y 120° de la totalidad, mientras que el GGA muestra el porcentaje de píxeles con tono entre 80° y 120° (Casadesús y Villegas, 2014; Casadesús et al., 2005). La FCV de cada parcela se estimó como el promedio de las tres medidas de GA realizadas en cada parcela, ya que en los primeros estadios del cultivo la GA está estrechamente relacionada con la cobertura del suelo. El resultado del tratamiento de la imagen con BreedPix se puede ver en la Figura 2.

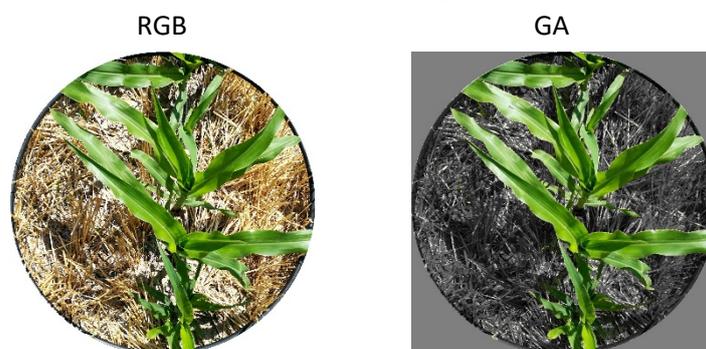


Figura 2. Estimación de la FCV: imagen utilizada (RGB) recortada e imagen de área verde (GA) tratada con BreedPix.

2.4. Recopilación y procesamiento de los datos de detección remota

2.4.1. Imágenes multiespectrales

Se utilizan imágenes de tres vuelos adquiridas con UAV e imágenes Sentinel 2, 10 del año 2018 y 9 del 2019. De los tres vuelos con UAV, el primero se realizó coincidiendo aproximadamente con el día de siembra, el segundo con el momento del IED y el tercero una semana después del IED. Las imágenes se obtuvieron con un UAV de ala fija *SenseFly eBee Classic* al que se le había instalado el sensor *Sequoia*. La planificación y el control del vuelo se llevaron a cabo con el software *eMotion*. Los vuelos se realizaron en condiciones atmosféricas óptimas, días con viento menor de 8 m/s y sin demasiadas nubes visibles. En todo caso, el UAV dispone de un sensor de iluminación "*Sunshine*" que permite calibrar los valores adquiridos. La captura se realizó al mediodía solar, cuando el ángulo solar es más alto, minimizando así las sombras de la vegetación. La altitud del vuelo fue de 100 m aproximadamente, lo que permite obtener una resolución espacial de 8 cm. Las imágenes se adquirieron con un 80% de superposición, tanto lateral como longitudinal. Para la calibración radiométrica se utilizó el objetivo de calibración del sensor *Sequoia* y para la georreferenciación de la imagen se pusieron entre 4 y 8 puntos de control, según la dimensión de cada parcela. Los datos extraídos de las imágenes fueron procesados con el software *Pix4Dmapper*. Las imágenes Sentinel 2 se obtuvieron de los dos satélites, A y B, de la misión Copernicus. El producto que se utilizó fue el nivel 2A que proporciona imágenes de reflectancia corregidas atmosféricamente, es decir, en las que se excluyen los efectos de la atmósfera sobre la luz reflejada por la superficie de la Tierra que llega al sensor. Las imágenes se descargaron del Copernicus [Open Access Hub](#) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

La ZRV y, por tanto, las parcelas de estudio se encuentran en un área de superposición de dos franjas adyacentes de paso del satélite Sentinel 2, lo que permite disponer de mayor frecuencia de imágenes. Durante la temporada de crecimiento de 2018 se adquirieron imágenes cada 2 y 3 días en el mejor de los casos

y cada 5 en el peor. Sin embargo, en la temporada de 2019 hay más situaciones con imagen cada 5 días, cuya repercusión en la detección del IED será objeto de análisis.

2.4.2. Índices de vegetación

Los IV seleccionados para la determinación del IED fueron el NDRre, NDVI y OSAVI. Estos índices, además de estar entre los más utilizados en la literatura, sobre todo NDVI y OSAVI, han sido los que mejor relación mostraron entre los sensores MSI de Sentinel 2 y Sequoia (Pérez-Cardiel, 2022). En la Tabla 2 se muestra el rango espectral utilizado de cada sensor para que en la formulación de los IV (Tabla 3) sean coincidentes los rangos espectrales de Sequoia y MSI de Sentinel 2.

Tabla 2. Rangos espectrales utilizados de cada sensor

RANGO ESPECTRAL	SEQUOIA	MSI DE SENTINEL 2
Reflectividad del rojo (R_{ROJO})	banda roja	banda 4
Reflectividad del borde del rojo (R_{BR})	banda del borde del rojo	banda 6
Reflectividad del infrarrojo cercano (R_{IC})	banda del infrarrojo cercano	banda 7

Tabla 3. NDRre, NDVI y OSAVI derivados de las imágenes de Sequoia y MSI de Sentinel 2

ÍNDICE VEGETACIÓN	FÓRMULA	REFERENCIA
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del Rojo-Borde del rojo (NDRre)	$NDRre = (R_{BR} - R_{ROJO}) / (R_{BR} + R_{ROJO})$	Gitelson et al. (2002)
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	$NDVI = (R_{IC} - R_{ROJO}) / (R_{IC} + R_{ROJO})$	Rouse et al. (1974)
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Optimizado (OSAVI)	$OSAVI = (1 + 0,16)(R_{IC} - R_{ROJO}) / (R_{IC} + R_{ROJO} + 0,16)$	Rondeaux et al. (1996)

2.5. Determinación del Inicio de la Etapa de Desarrollo (IED)

2.5.1. IED a partir de fotografías RGB y la fracción de cobertura vegetal

Con los datos de FCV obtenidos en los muestreos de campo se realizó un primer análisis exploratorio mediante gráficos de dispersión, lo que permitió determinar la relación entre la FCV y los días julianos. Se utilizaron técnicas de regresión lineal para analizar la relación existente entre la escala temporal y la FCV. Para valorar la exactitud de la precisión del modelo se utilizaron el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). El 10% de la FCV será el IED de referencia (Fase 1) con el que evaluará el IED obtenido aplicando la prueba de Pettitt (Fase 2). Para su cálculo se aplicaron las ecuaciones resultantes de la regresión lineal entre FCV y los días julianos.

2.5.2. IED a partir de imágenes Sentinel 2 y la técnica de detección del punto de cambio

La técnica de detección de puntos de cambio tiene como objetivo identificar los momentos en los que cambia la distribución de probabilidad de una serie temporal. Para detectar el IED se aplicó la técnica de punto de cambio de Pettitt. En el contexto de la detección de las etapas fenológicas del ciclo anual de cultivos agrícolas, estas pruebas no han sido previamente utilizadas; aunque son pruebas ampliamente utilizadas para el análisis de series hidrológicas y climáticas. La prueba de Pettitt es un método no paramétrico que se aplica habitualmente para detectar un único punto de cambio con datos continuos (Pettitt, 1979) y permite comprobar si hay un cambio en la tendencia central de una serie temporal. Pone a prueba la hipótesis nula, “ningún cambio”, frente a la alternativa “existe un punto de cambio”. El estadístico no paramétrico en el que se basa la prueba (Ryberg et al., 2020; Verstraeten et al., 2006) se define como (Ecuaciones 1 y 2):

$$\hat{U} = \max |U_k| \quad (1)$$

donde

$$U_k = (2 \sum_{i=1}^k r_i) - k(n+1) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

donde r_i es la clasificación (ranking) en la serie temporal, n es la longitud de la serie temporal.

El punto de cambio probable \hat{U} se encuentra ubicado donde U_k tiene su máximo valor absoluto, siempre que el estadístico sea significativo y la probabilidad de significación de \hat{U} $p \leq 0,05$. Esta probabilidad se calcula según la Ecuación 3:

$$p = 2 \exp((-6\hat{U}^2)/(n^3 + n^2)) \tag{3}$$

En raras ocasiones la prueba de Pettitt devuelve dos puntos de cambio debido a empates en los datos; en estos casos se optó por el primer punto de cambio, de acuerdo con Ryberg et al. (2020).

El test se aplicó a la serie temporal de IV, que se formó con todas las parcelas para cada cultivo a partir de los datos promedio de cada parcela y fecha. Los datos se ordenaron consecutivamente teniendo en cuenta el día de la siembra, dando lugar a una serie temporal a la que se le aplicaron las técnicas de detección de punto de cambio. Previamente a la aplicación de las técnicas de detección de cambio, con el objetivo de eliminar ruido y suavizar los datos de la serie, se aplicó el filtro Savitzky y Golay (1964). Los parámetros utilizados en el filtro Savitzky-Golay (SG) fueron un polinomio de orden 3 y la longitud del filtro de 5 (es un filtro poco marcado, ya que en una exploración inicial se observó que los datos no presentaban grandes picos).

2.5.3. IED a partir de imágenes Sentinel 2 y la prueba de Pettitt simulando datos perdidos.

Se simularon datos perdidos en la serie temporal (falta de imágenes) que podrían haberse generado de forma natural por nubosidad u otras causas. La eliminación de las imágenes no se realizó de forma aleatoria, sino que se eliminaron de forma correlativa una, dos y hasta tres imágenes seguidas durante el periodo establecido en el que se puede producir el IED. Los resultados se evaluaron con el mismo procedimiento que en los apartados anteriores, observando las diferencias con el IED-referencia.

2.5.4. IED a partir de la combinación de imágenes Sentinel 2 y UAV aplicando la prueba de Pettitt

Se comprobó también cómo se vería afectada la predicción de IED cuando se combinan datos de Sentinel 2 y UAV. Para ello, las tres imágenes de Sequoia obtenidas mediante UAV sustituyeron en la serie temporal a las imágenes Sentinel 2 de ese mismo día. La incorporación de imágenes de UAV en la serie de datos de Sentinel 2 da lugar a varios escenarios a analizar, tal y como se puede ver en la Tabla 4. Para evaluar los resultados con la incorporación de las imágenes de Sequoia se realizó el mismo procedimiento anterior, eliminando fechas y comparando los resultados con el IED-Referencia.

Tabla 4. Rangos espectrales utilizados de cada sensor

ESCENARIO	DENOMINACIÓN	IMÁGENES
Escenario 1	E1 S2	Solo imágenes de S2
Escenario 2	E2 S2 + Sequoia (179)	Serie S2 con Sequoia 179
Escenario 3	E3 S2 + Sequoia (191)	Serie S2 con Sequoia 191
Escenario 4	E4 S2 + Sequoia (199)	Serie S2 con Sequoia 199
Escenario 5	E5 S2 + Sequoia (179+191)	Serie S2 con Sequoia 179 y 191
Escenario 6	E6 S2 + Sequoia (179+199)	Serie S2 con Sequoia 179 y 199
Escenario 7	E7 S2 + Sequoia (191+199)	Serie S2 con Sequoia 191 y 199
Escenario 8	E8 S2 + Sequoia (179+191+199)	Serie S2 con Sequoia 179, 191 y 199

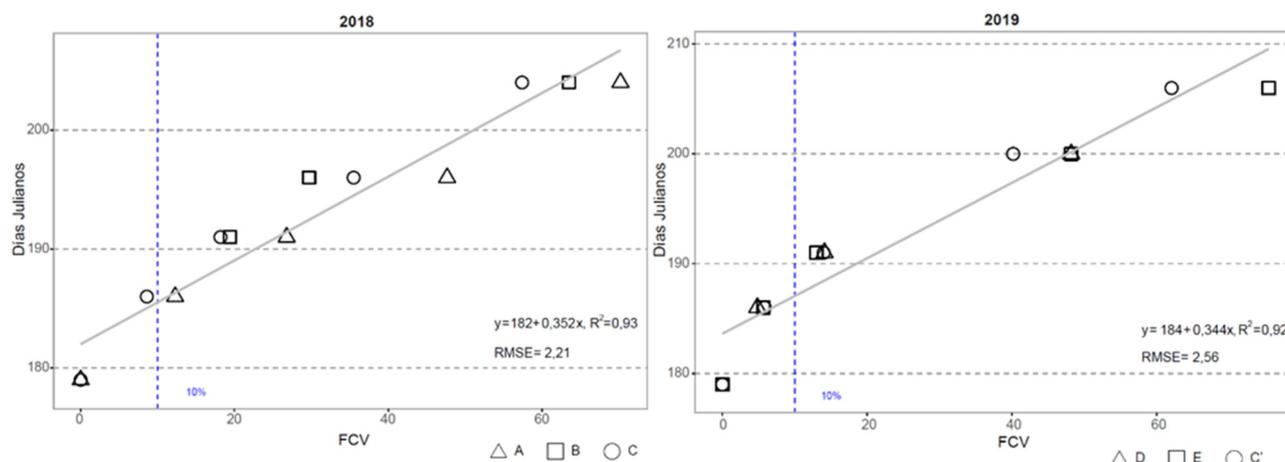


Figura 3. Relación entre el día juliano y la FCV estimada en campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se determinó primero el IED de referencia al 10% de FCV. Se aplicó a las series temporales de los tres IV elegidos la técnica de determinación de punto de cambio (prueba de Pettitt), se evaluaron comprobando la diferencia que existe con el IED-referencia. Además, valoró cómo afectaba a la predicción del IED la falta de imágenes o la introducción de nuevas imágenes de otro sensor. Los resultados obtenidos se describen a continuación.

3.1. Determinación de la FCV e IED de referencia

En la Figura 3 se presentan las relaciones lineales entre la escala temporal y las FCV, el coeficiente de determinación de (R^2) y el error medio cuadrático (RMSE). Se obtienen en los dos años de estudio altos R^2 y bajos RMSE. Las diferencias entre los dos años de estudio y entre cultivos son mínimas y se deben principalmente al manejo de las parcelas y al momento de siembra de los cultivos. En 2018 el IED en la zona de estudio se produce el día juliano 186 y en 2019 el día 187.

3.2. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2

Los resultados del IED determinado con la prueba de Pettitt para las series temporales de los tres IV se presentan en la Tabla 5. En general, el IED obtenido con la prueba de Pettitt se sitúa muy cercano al IED-referencia. El IV OSAVI en 2019 se diferencia de los otros dos empleados al determinar el IED unos días después que ellos, es el que más difiere del IED-referencia. La metodología desarrollada en este capítulo utiliza el filtro SG y una prueba de detección de punto de cambio para encontrar la fecha de transición. Tanto SG como las pruebas de detección de punto de cambio utilizadas no necesitan una serie temporal larga que cubran el ciclo completo del cultivo, pudiéndose utilizar para detectar el IED una serie de datos de únicamente las primeras etapas de crecimiento. Actualmente también se utilizan otras metodologías para detectar la fenología en tiempo casi real como hace Gao et al. (2020), con el enfoque WISE, en este caso determinan el *green-up* de 4 a 5 días después de la emergencia de cultivo, en estadio VE-V1 para maíz y VE-VC para soja. La diferencia con el trabajo que aquí se presenta es que el enfoque WISE lo hace sobre cultivos sin una cobertura anterior; en cambio, en este trabajo se ha aplicado la metodología propuesta en cultivos sobre rastrojo de cebada (cultivo anterior) y los restos de vegetación de cebada repercuten en la observación del nuevo cultivo, detectando el IED en estadio más avanzado, V2-V3.

Tabla 5. Determinación de IED por la prueba de Pettitt e IED-referencia

	MAÍZ 2018			MAÍZ 2019		
	NDRre	NDVI	OSAVI	NDRre	NDVI	OSAVI
Prueba de Pettitt	186	186	186	186	186	191
IDE-referencia	186			187		

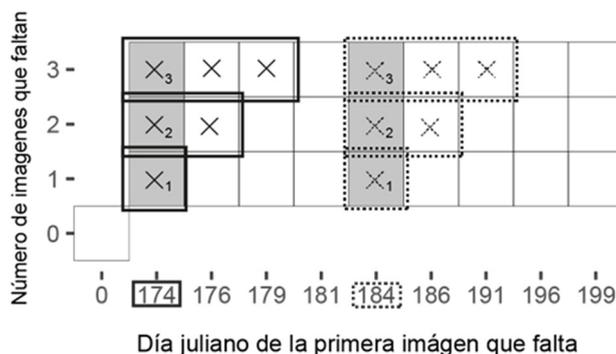


Figura 4. Ejemplo de los resultados obtenidos cuando las primeras imágenes que faltan son las de los días julianos 174 y 184.

3.3. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2 y la prueba de Pettitt simulando datos perdidos

La Figura 4 se muestra como ejemplo para interpretar los resultados del efecto de los datos perdidos en la determinación del IED. Las celdas con sombreado gris son el resultado de la diferencia entre el momento del IED y el momento de IED-referencia cuando se eliminan las imágenes. Se ha puesto el ejemplo cuando los datos perdidos comienzan el día juliano 174 y cuando comienzan el día 184. Así pues, cuando los datos

perdidos comienzan con la falta de imagen del día 174, el resultado se muestra en la celda X_1 ; cuando faltan dos imágenes correlativas -174 y 176- el resultado aparece en la celda X_2 ; por último, cuando se eliminan tres imágenes -174, 176 y 179- el resultado se muestra en la celda X_3 . El mismo proceso se lleva a cabo cuando la falta de imágenes comienza en el día 184, el resultado se muestra en la celda X_1 ; cuando faltan dos imágenes correlativas -184 y 186- el resultado aparece en la celda X_2 ; por último, cuando se eliminan tres imágenes -184, 186 y 191- el resultado se muestra en la celda X_3 . Este mismo proceso se lleva a cabo para todas las imágenes entre los días julianos 174 y 199. La celda 0 corresponde al IED obtenido cuando no se simulan datos perdidos.

En la Figura 5 se observan los resultados al aplicar la prueba de Pettitt en la serie temporal para los dos años de estudio añadiendo datos perdidos. Como ya se ha señalado, las imágenes en la zona de estudio tienen una recurrencia de 2 a 3 días si las condiciones atmosféricas son óptimas (no hay nubes), aunque estas condiciones óptimas pocas veces suceden, por lo que se generan vacíos o huecos temporales de imágenes. En los años de estudio se produjeron, en el peor de los casos, periodos de cinco días sin imágenes. En 2018 un periodo sin imágenes de 5 días sucede tan solo una vez del día juliano 191 al 196; en cambio, en 2019 este periodo de imágenes cada 5 días sucede 2 veces, del día juliano 186 al 191 y del día 191 al 196.

Los resultados muestran que, en 2018, cuando falta una imagen Sentinel 2, el IED obtenido no difiere o varía como máximo en un día respecto al IED de referencia, salvo en el caso de que la imagen eliminada coincida con el IED. Esto se aprecia claramente cuando se elimina la imagen del día juliano 186 en maíz, imagen que corresponde con el día del IED-referencia. El IED se determina entonces con 2 días de adelanto. Cuando el número de días sin datos es mayor, es decir, cuando se eliminan 2 y 3 imágenes consecutivas, los resultados varían en función de cuándo se produce la falta de imágenes. Si está cercana a la siembra, no afecta o afecta poco en la determinación del IED; en cambio, cuando las imágenes eliminadas se localizan cercanas al momento de IED, la fecha determinada se adelanta notablemente respecto a la IED de referencia, hasta 7 días, lo cual supondría que el IED se encontrase en la etapa fenológica del cultivo de emergencia, tan solo 5 días después de la siembra, no respondiendo a la realidad. En estas situaciones, por tanto, el resultado obtenido no es fiable. Cuando las imágenes descartadas son posteriores al IED, los resultados son no significativos, con intervalo de confianza es menor de 95%, por lo que la predicción del IED no es estadísticamente significativa.

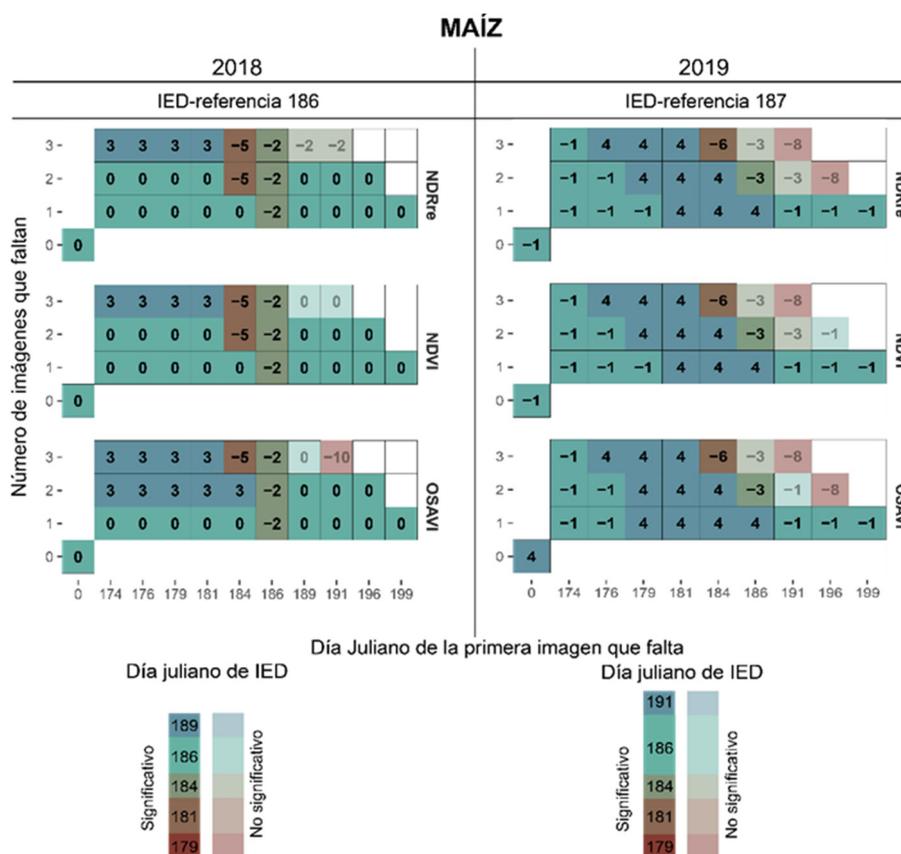


Figura 5. Diferencias del IED determinado para maíz mediante la prueba de Pettitt respecto al IDE-referencia para los tres IV. Nivel de significación $p < 0,05$.

En 2019 la eliminación de imágenes produce los mismos efectos que en 2018. Como ya se ha señalado, en 2019 la periodicidad de las imágenes no siempre es de 2 o 3 días. En el año 2018 se disponía de la imagen 189, en cambio, en 2019 no la hay, siendo la siguiente imagen disponible la del día juliano 191, lo que conlleva una diferencia mayor entre el IED obtenido y el IED-referencia. Las diferencias entre localizar el IED 1 día antes del IED-referencia suponen que el IED se dé cuando el maíz está en estadio V2; si la diferencia con el IED-referencia es de 4 días después el maíz está en estadio V3. Los tres índices considerados se comportan de forma similar, si bien, en el año 2019 OSAVI proporciona resultados ligeramente más distantes del IED-referencia con toda la serie de datos. La carencia de datos en el momento en el que se produce el IED o en momentos posteriores no permite reflejar el momento real del IED, estimándose con anterioridad este momento. Esto mismo ocurre en el trabajo de Pan et al. (2021), donde la falta de imágenes en el punto de inflexión de la serie de tiempo de la combinación de índices NDVI y LSWI hace que no se pueda determinar el momento del crecimiento de los cultivos con exactitud. Por tanto, la metodología propuesta en este capítulo requiere para tener un resultado fiable (más/menos 2 días de error) disponer de imágenes al menos cada 2 o 3 días en el periodo anterior y posterior a producirse el IED.

3.4. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2 - UAV aplicando la prueba de Pettitt

En la Figura 6 se observan los resultados cuando se sustituyen los datos de Sentinel 2 por los de UAV para los tres IV de estudio. Cuando se utiliza el índice NDRre, los IED obtenidos al sustituir los datos de Sentinel 2 por los datos de UAV son muy similares a los obtenidos con la serie Sentinel 2 escenario 1. Únicamente se observa una pequeña diferencia cuando no hay datos perdidos en los escenarios 5 y 8.

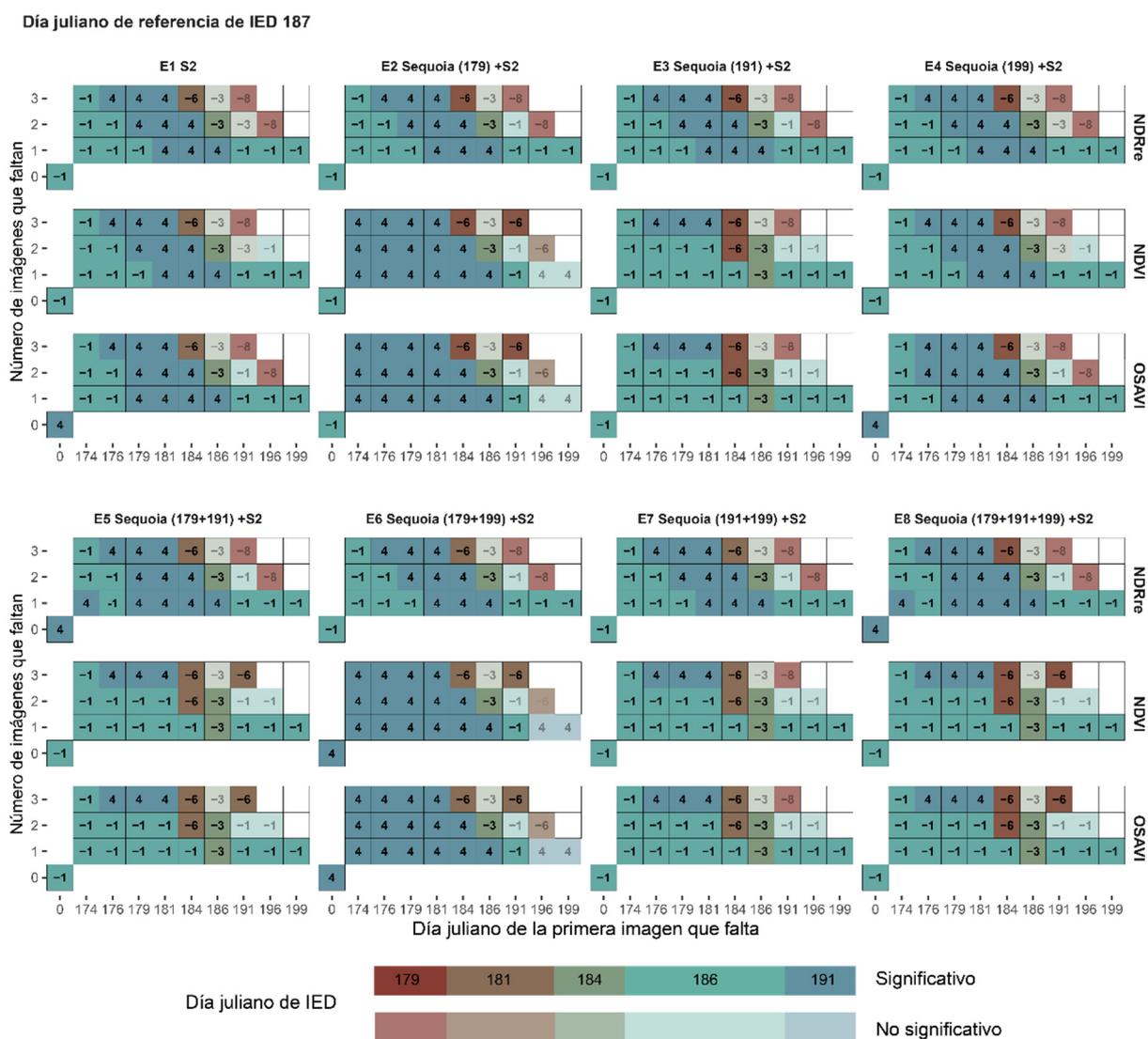


Figura 6. Diferencias del IED determinado para maíz mediante la prueba de Pettitt respecto al IED-referencia para los tres IV derivados de MSI de Sentinel y Sequoia en 2019 (serie temporal en días julianos). Nivel de significación $p < 0,05$.

El IED con la serie temporal NDVI es igual al IED-referencia únicamente para el escenario 4, es decir, cuando se incorpora la imagen de Sequoia del día juliano 199 (final de la serie de datos). En cambio, en el resto de los escenarios se observa alguna diferencia. Los valores de NDVI son sistemáticamente más altos en Sequoia que en MSI de Sentinel 2. Esto hace que, al sustituir la imagen en los momentos del inicio de la serie y antes de que se determine el IED (día juliano 179), el sumatorio de la clasificación de los datos de la serie (Ecuación 2), al comienzo de la serie aumenta y por tanto el IED se produce más tarde en el escenario 2 y escenario 6, escenarios donde se incluyen los datos de UAV, respecto a cuándo se produce en el escenario 1. En el resto de los escenarios cuando la imagen que se sustituye se sitúa después de que se determine el IED sucede lo contrario (imagen del día juliano 191). El sumatorio de la clasificación aumenta en la parte final de la serie de datos de NDVI, haciendo que se determine antes el IED, por lo que el IED aparece antes en los escenarios 3 o 7 que en el 1. El índice OSAVI se comporta de forma similar al NDVI. En el escenario 4 no se observan diferencias, en cambio sí se producen en el resto de los escenarios.

Las series temporales en las que se han sustituido datos del sensor MSI de Sentinel 2 por Sequoia han arrojado resultados confiables, sobre todo cuando se utiliza el índice NDRre. Por lo que es factible completar con un vuelo UAV la serie temporal de datos de Sentinel 2. La limitación que presenta frente a Sentinel 2 es que solo será aplicable a escala de parcela o explotación ya que los vuelos con UAV dependen en gran medida de la duración de la batería.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian la viabilidad de integrar sensores espectrales satelitales y portados en UAV, así como la adecuación de pruebas de detección de puntos de cambio en series temporales. La detección del momento del IED aplicando la prueba de Pettitt con series de IV de MSI de Sentinel 2 resulta prometedora. Sin embargo, se debe confirmar su fiabilidad en regiones donde la recurrencia de imágenes sea inferior a la máxima de 2-3 días.

La prueba de Pettitt aplicada a series temporales de IV obtenidos con Sentinel 2 con un periodo de recurrencia aproximado a 2-3 días, permite determinar el IED de forma temprana. No obstante, existen diferencias en función de los neocanales o índices espectrales utilizados. Las series de NDRre y NDVI permiten determinar el IED antes que las de OSAVI, -1,5 a 1 día respecto al IED-referencia frente a -1 a 4 días. Disponer de una única imagen más en un momento crítico puede hacer que la determinación del IED sea más ajustada.

El impacto de los datos perdidos –que simula la posible falta de disponibilidad de imágenes procedentes de plataforma satelital– en la serie temporal para la determinación del IED varía según la duración del periodo sin imágenes y del momento del ciclo en el que se produce. Si el periodo sin imágenes se produce próximo a la siembra la determinación apenas se ve afectada; en cambio, cuando el periodo sin imágenes está cerca al IED, su determinación se adelanta notablemente. Esta eventualidad puede superarse mediante la integración imágenes de Sequoia en UAV en la serie temporal de MSI de Sentinel 2, pudiendo usarse de manera efectiva para la determinación del IED; siendo el índice NDRre el índice más adecuado en esta situación.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora es beneficiaria de un contrato pre-doctoral MECD (FPU15/04783). Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de Aragón (Geoforest S51_20R), FEDER “Construyendo Europa desde Aragón”. Los autores agradecen su colaboración a la Comunidad de Regantes de Almodóvar y a los propietarios de las parcelas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bandaru, V., Yaramasu, R., PNVR, K., He, J., Fernando, S., Sahajpal, R., Wardlow, B. D., Suyker, A. y Justice, C. (2020). PhenoCrop: An integrated satellite-based framework to estimate physiological growth stages of corn and soybeans. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102188. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2020.102188>
- Casadesús, J., Biel, C. y Savé, R. (2005). Turf color measurement with conventional digital cameras. *EFITA/WCCA Joint Congress in Agriculture*, 804–811
- Casadesús, J. y Villegas, D. (2014). Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(1), 7–14. <https://doi.org/10.1111/JIPB.12117>

- Gao, F., Anderson, M., Daughtry, C., Karnieli, A., Hively, D. y Kustas, W. (2020). A within-season approach for detecting early growth stages in corn and soybean using high temporal and spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111752>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R. y Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Liu, L., Zhang, X., Yu, Y., Gao, F. y Yang, Z. (2018). Real-time monitoring of crop phenology in the Midwestern United States using VIIRS observations. *Remote Sensing*, 10(10), 1540. <https://doi.org/10.3390/rs10101540>
- Malik, W. y Dechmi, F. (2019). DSSAT modelling for best irrigation management practices assessment under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 216, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.017>
- Pan, L., Xia, H., Yang, J., Niu, W., Wang, R., Song, H., Guo, Y. y Qin, Y. (2021). Mapping cropping intensity in Huaihe basin using phenology algorithm, all Sentinel-2 and Landsat images in Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102376. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2021.102376>
- Pérez-Cardiel, E. (2022). *Teledetección multisensor para la identificación temprana consistente de cultivos en los regadíos de Aragón*. Tesis doctoral, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Ritchie, S., Hanway, J. y Benson, G., (1986). *How a Corn Plant Develops*. Iowa State University, Special Report nº 48. <http://publications.iowa.gov/18027/1/How%20a%20corn%20plant%20develops001.pdf>
- Rondeaux, G., Steven, M. y Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, 1(Sect. A), 309-317.
- Ryberg, K. R., Hodgkins, G. A. y Dudley, R. W. (2020). Change points in annual peak streamflows: Method comparisons and historical change points in the United States. *Journal of Hydrology*, 583, 124307. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124307>
- Savitzky, A. y Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), 1627-1639.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G. y Salles, C. (2006). Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22). <https://doi.org/10.1029/2006JD007169>