



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Campus del Baix Llobregat



# ÚS D'IMATGES SENTINEL-2 PER A L'ESTIMACIÓ DEL RENDIMENT DE CULTIUS

---

Treball final de màster  
Màster Ket4food+bio

Autor: Anna Ros i Benet  
Tutor/a: Lidia Serrano Porta  
Gil Gorchs Altarriba  
Juliol 2022

## Resum

Estimar el rendiment del gra de blat pot ser una gran ajuda per agricultors i institucions. Això és especialment rellevant a la Unió Europea, en el marc de la Política Agrària Comuna (PAC). A nivell regional permet identificar els llocs més adequats per al cultiu de blat i analitzar factors espacials que afecten al rendiment del cultiu. A nivell d'explotació ajuda a millorar el maneig agrícola i administrar de manera més oportuna els inputs del cultiu, també ajuda a planificar preus de les collites i gestió d'estocs.

El satèl·lit Sentinel-2 (S2), amb un període de revisita de cinc dies, una alta resolució espacial i una resolució espectral de 13 bandes, possibilita un seguiment més exhaustiu de la fenologia i dels atributs fisiològics al llarg del cicle del cultiu a escala de camp. L'objectiu d'aquest treball és avaluar l'aptitud de diversos índexs de vegetació calculats a partir de dades obtingudes d'imatges Sentinel-2 per a l'estimació del rendiment de blat a nivell de parcel·la. Per això s'ha extret informació d'un conjunt d'imatges obtingudes durant el cicle de cultiu i s'ha determinat el rendiment a final de cultiu per a la campanya agrícola de 2020-2021 en 10 parcel·les de blat situades a Catalunya, a les comarques del Bages, Osona, la Selva i el Moianès. S'han estudiat les relacions entre diversos índexs de vegetació relacionats amb la biomassa, el contingut de clorofil·la i el contingut d'aigua del cultiu i el rendiment. Els resultats mostren que els índexs de vegetació obtinguts a l'estadi fenològic de gra pastós (final del cicle de cultiu) són més aptes per a estimar el rendiment. L'índex de vegetació que proporciona millors estimacions del rendiment és el de contingut d'aigua, amb un coeficient de determinació de 0,78 a l'estadi fenològic de gra pastós.

Paraules clau: Sentinel-2, índexs de vegetació, rendiment, blat, marge roig

## Resumen

Estimar el rendimiento del grano de trigo puede ser una gran ayuda para agricultores e Instituciones. Esto es especialmente relevante en la Unión Europea, en el marco de la Política Agraria Común (PAC). A nivel regional permite identificar los lugares más adecuados para el cultivo de trigo y analizar factores especiales que afectan al rendimiento del cultivo. A nivel de explotación ayuda a mejorar el manejo agrícola y administrar de forma más oportuna los inputs del cultivo, también ayuda a planificar precios de las cosechas y gestión de stocks.

El satélite Sentinel-2 (S2), con un período de revisita de cinco días, una alta resolución espacial y una resolución espectral de 13 bandas, posibilita un seguimiento más exhaustivo de la fenología y de los atributos fisiológicos a lo largo del ciclo del cultivo a escala de campo. El objetivo de este trabajo es evaluar la aptitud de varios índices de vegetación calculados a partir de datos obtenidos de imágenes Sentinel-2 para la estimación del rendimiento de trigo a nivel de parcela. Para eso se ha extraído información de un conjunto de imágenes obtenidas durante el ciclo de cultivo y se ha determinado el rendimiento a final de cultivo para la campaña agrícola de 2020-2021 en 10 parcelas de trigo situadas en Cataluña, en las comarcas del Bages, Osona, la Selva y el Moianès. Se han estudiado las relaciones entre varios índices de vegetación relacionados con la biomasa, el contenido de clorofila y el contenido de agua del cultivo y el rendimiento. Los resultados muestran que los índices de vegetación obtenidos en el estadio fenológico de grano pastoso (final del ciclo de cultivo) son más aptos para estimar el rendimiento. El índice de vegetación que proporciona mejor estimación del rendimiento es el de contenido de agua, con un coeficiente de determinación de 0,78 en el estadio fenológico de grano pastoso

Palabras clave: Sentinel-2, índices de vegetación, rendimiento, trigo, borde rojo.

## Abstract

Estimating the wheat grain yield can be of great help for farmers and institutions. This is especially relevant in the European Union, within the framework of the Common Agricultural Policy (CAP). At regional level, it allows identification of the most suitable places for growing wheat and analysing special factors that affect the yield of the crop. At farm level, it helps to improve agricultural management by managing crop inputs in a more timely manner, also assisting to plan crop prices and stock management.

The Sentinel-2 (S2) satellite, with a five-day revisit period, high spatial resolution and 13-band spectral resolution, enables more exhaustive monitoring of phenology and physiological attributes throughout the crop cycle at field scale. The objective of this work is to evaluate the suitability of several vegetation indices calculated from data obtained from Sentinel-2 images for the estimation of wheat yield at plot level. For this reason, information has been extracted from a set of images obtained during the crop cycle and the yield at the end of the crop for the 2020-2021 agricultural campaign. It has been determined in 10 wheat plots located in the following counties of Catalonia; Bages, Osona, Selva and Moianès. The relation between various vegetation indices related to biomass, chlorophyll content, and crop water content and yield have been studied. The results show that the vegetation indices obtained in the phenological stage of pasty grain (end of the crop cycle) are more suitable for estimating yield. The vegetation index that provides the best estimates of yield is that of water content, with a determination coefficient of 0,78 in the phenological stage of pasty grain.

Key words: Sentinel-2, vegetation indices, yield, wheat, red edge

## Sumari

<b>ÍNDIX DE FIGURES</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDIX DE TAULES</b>	<b>7</b>
<b>SÍMBOLS I ACRÒNIMS</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>10</b>
1.1. Cultiu d'estudi .....	10
1.2. Sentinel-2.....	13
<b>2. OBJECTIUS</b>	<b>18</b>
<b>3. MATERIALS I MÈTODES</b>	<b>19</b>
3.1. Localització de l'estudi .....	19
3.2. Dades del cultiu .....	21
3.3. Obtenció d'imatges i extracció d'informació.....	21
3.4. Anàlisi estadístic .....	25
<b>4. RESULTATS I DISCUSSIÓ</b>	<b>27</b>
4.1. Climatologia.....	27
4.2. Evolució temporal dels índexs de vegetació.....	29
4.3. Relació dels índexs de vegetació amb el rendiment .....	31
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>38</b>
<b>ANNEX</b>	<b>42</b>

## Índex de figures

Figura 1: Volum de producció de blat a Espanya el 2020 per comunitats autònomes _____	10
Figura 2: Producció de blat en tones a Catalunya l'any 2020. Font: Idescat _____	11
Figura 3: Descripció de les fases de desenvolupament del cultiu. Font: FAO _____	12
Figura 4: Cronologia del programa Landsat. Font: NASA _____	14
Figura 5: Constel·lacions Sentinel. Font: ESA _____	15
Figura 6: Vista esquemàtica del satèl·lit de Sentinel-2. Font: ESA _____	16
Figura 7: Bandes de resolució espacial Sentinel-2 de 10m: B2 (490nm), B3 (560nm), B4 (665) i B8 (842nm). Font: ESA _____	16
Figura 8: Bandes de resolució espacial Sentinel-2 de 20m: B5 (705nm), B6 (740nm), B7 (783nm), B8a (865nm), B11 (1610nm) i B12 (2190). Font: ESA _____	16
Figura 9: Mapa de les comarques del Bages, Moianès, Osona i la Selva. Les parcel·les d'estudi estan marcades amb punts vermells. Sistema de referència EPSG 25831, les coordenades son UTM (Universal Transverse Mercator) fus 31N expressades en metres. _____	19
Figura 10: Obtenció d'imatges a través del Copernicus Open Acces Hub. Font: <a href="https://scihub.copernicus.eu/">https://scihub.copernicus.eu/</a> _____	22
Figura 11: Exemple d'una parcel·la del Bages amb buffer de 10m. _____	23
Figura 12: Dades climatològiques del Bages i Osona des del setembre del 2020 fins al juliol del 2021. Precipitació mensual (mm) i temperatura mensual mitjana (°C). _____	27
Figura 13: Corbes d'evolució dels índex de vegetació per 10 parcel·les de blat on DDS: dies després de sembra i índexs de vegetació: Modified Simple Ratio (MSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized	

Difference Vegetation Index (RE NDVI), Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI) i Red Edge Chlorophyll Index (RE CI). \_\_\_\_\_ 30

Figura 14: Rrelació entre índexs de vegetació i rendiment. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) i Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI). \_\_\_\_\_ 33

Figura 15: Coeficient de determinació de la mitjana de valors del Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) en l'estadi fenològic de gra pastós. \_\_\_\_\_ 36

## Índex de taules

Taula 1: Característiques de les parcel·les estudiades: codi SIGPAC (Sistema d'Informació Geogràfica de Parcel·les Agrícoles), codi de la parcel·la, ubicació i superfície (ha). _____	20
Taula 2: Ubicació de les estacions meteorològiques de Osona i Bages. Font: meteo.cat _____	20
Taula 3: Dades dels cultius. Codi de parcel·la, varietat de blat i data de sembra i collita. _____	21
Taula 4: Estadis fenològics del cultiu en les dates d'obtenció de dades. _____	22
Taula 5: Bandes espectrals i resolució espacial del sensor multiespectral MSI del Sentinel-2. ____	24
Taula 6: Fòrmula de càlcul dels índexs de vegetació. Modified Simple Ratio (MSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI), Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI) i Red Edge Chlorophyll Index (RE CI). B fa referència a una banda específica com s'indica a la Taula 5. _____	25
Taula 7: Dades de camp de les parcel·les. Ubicació per comarca, varietat de blat i rendiment (kg/ha). _____	28
Taula 8: Coeficients de correlació de Pearson (R). Relació dels índex de vegetació i el rendiment de blat per a cada dia d'obtenció d'imatges del Sentinel-2. Els acrònims dels índex de vegetació indiquen: MSR (Modified Simple Ration), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index), NDWI (normalized difference water index), RE NDVI (red edge normalized difference vegetation index), NCI RE (red edge normalized chlorophyll index) i CI RE (red edge chlorophyll index). La significació estadística s'indica amb ** i * per a $P < 0.01$ i $P < 0.05$ respectivament. _____	32
Taula 9: Coeficient de determinació ( $R^2$ ) de la mitjana de l'estadi fenològic de gra pastós i del dia 27/05/21 corresponent a l'estadi fenològic de gra pastós per índex de vegetació. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge	



Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) i Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI). \_\_\_\_\_ 35

## Símbols i acrònims

ESA: Agència Espacial Europea

CE: Comissió Europea

MSI: Multi-Spectral Instrument

NIR: Infrarroig proper

SWIR: Short-wave InfraRed

UTM: Universal Transversal Mercator

SIGPAC: Sistema d'Informació Geogràfica de Parcel·les Agrícoles

MSR: Modified Simple Ratio

NDVI: Normalized Difference Vegetation

GNDVI: Green Normalized Difference Vegetation Index

RDVI: Renormalized Difference Vegetation Index

RE NDVI: Red Edge Normalized Difference Vegetation Index

RVI: Ratio Vegetation Index

NDWI: Normalized Difference Water Index

NCI RE: Normalized Chlorophyll Index Red edge

CI RE: Red edge Chlorophyll Index

VI: Índexs de vegetació

# 1. Introducció

## 1.1. Cultiu d'estudi

El blat és, conjuntament amb el blat de moro el cereal de més importància a nivell mundial. Aquests cultius suposen un 35,38% i un 50,94% sobre la producció total de cereals respectivament [1].

La comunitat autònoma que produeix més tones de blat a Espanya és Castilla i Lleó. Catalunya es troba en la sisena posició amb una producció de 400,3 milers de tones el 2020 [2].

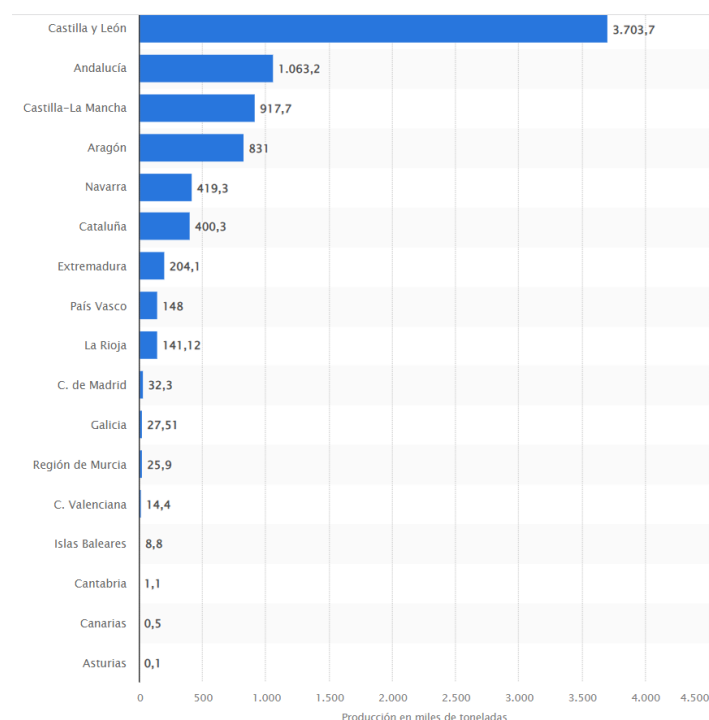


Figura 1: Volum de producció de blat a Espanya el 2020 per comunitats autònomes

A Catalunya la comarca amb més producció d'aquest cereal és Lleida amb una producció de 298.4 tones, seguida de Barcelona, Girona i per últim Tarragona (Figura 2) [3].

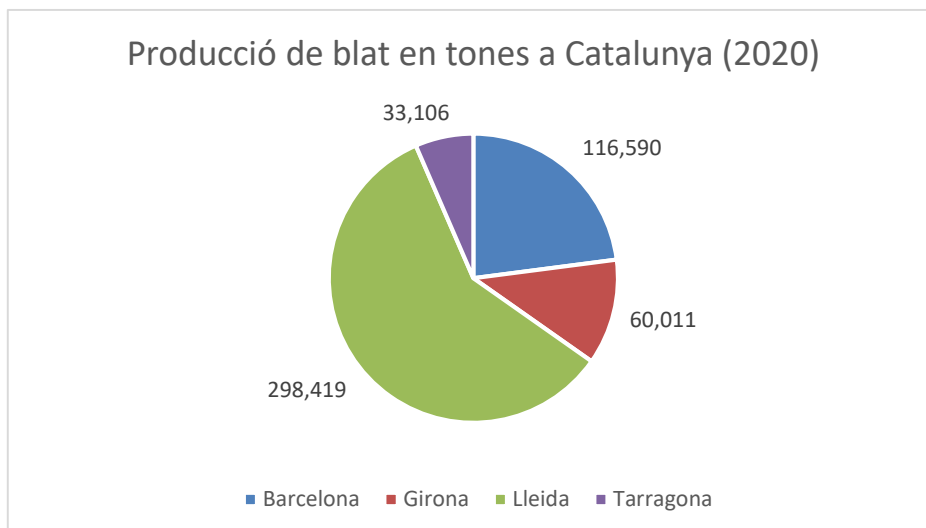


Figura 2: Producció de blat en tones a Catalunya l'any 2020. Font: Idescat

El blat pertany al gènere *Triticum* que pertany a la família *Poideae* dins de la família *Graminea*.

El cicle del desenvolupament d'un cereal es pot descriure seguint diferents escales fenològiques. Una de les escales fenològiques més utilitzades és la de Zadoks que divideix el cicle del cereal en 10 fases principals. La Figura 3 relaciona les fases externes de l'escala Zadoks (en vermell) i els estats interns observables (text vertical), també mostra el moment en que s'inicia, creix i mor la planta (requadres verds) i quan es formen els components del rendiment (barres) [4].

Com més avançat es troba el cultiu es pot observar una visió més integrada dels components del rendiment.

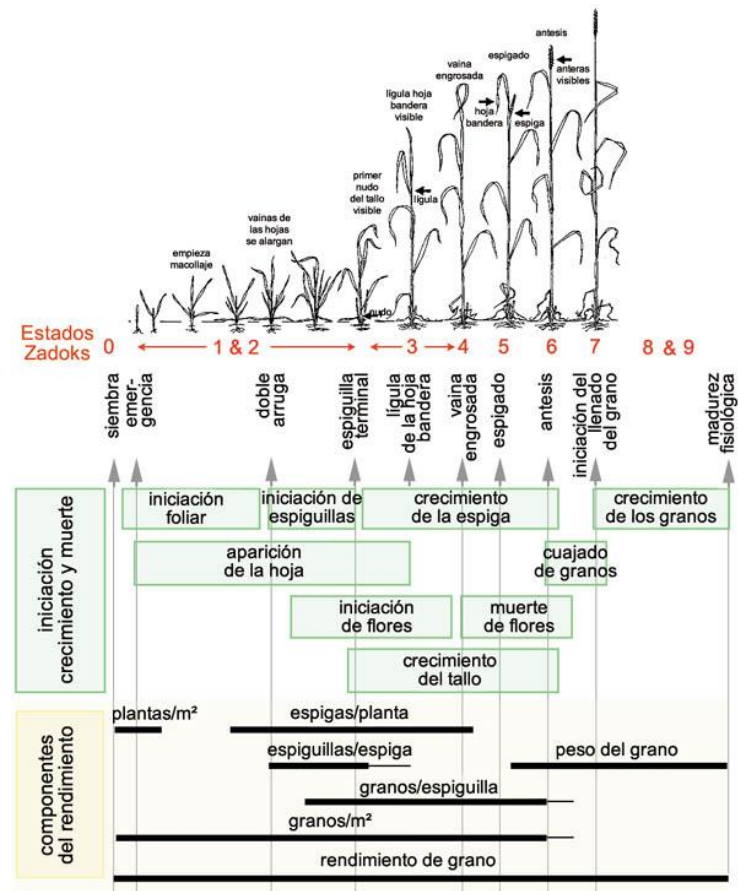


Figura 3: Descripció de les fases de desenvolupament del cultiu. Font: FAO

En l'actualitat, l'agricultura ha d'abastir l'augment de la població mundial, augmentant la seva productivitat, per això és necessari establir sistemes agrícoles innovadors que garanteixin la seguretat i qualitat dels aliments, gestionant-los de manera sostenible i conservant l'entorn i la biodiversitat [5].

Pel que fa al rendiment del cultiu de blat, hi ha dues maneres principals d'estimar-lo. D'una banda hi ha els models empírics i d'altra banda els models de creixement. Els models empírics estan basats en dades reals de camp i índex espectrals de vegetació obtinguts en una sola data o integrats durant tot el cicle de creixement del cultiu i d'altra banda els models de creixement impliquen estimacions de paràmetres fisiològics relacionats, per exemple, amb la producció de biomassa, la fracció de

radiació fotosintèticament activa (fPAR), el coeficient de transpiració ( $K_t$ ) o el coeficient basal de cultiu ( $K_{cb}$ ) [5, 6].

Per les tecnologies basades en la teledetecció és complex estimar rendiments de cultius ja que pot ser un factor limitant la resolució espacial, espectral i temporal. Aquests models també depenen de les característiques topogràfiques de la zona. Per exemple, als Estats Units la mitja d'hectàrees per parcel·la és molt més gran que a Europa, d'unes 447 ha a unes 56 ha respectivament. Atès que la utilització d'imatges espectrals necessita informació a nivell de camp la resolució de la tècnica és important [6].

Estimar el rendiment del gra de blat, cartografiar les terres de cultiu i estudiar les interaccions espacials que afecten al rendiment d'aquest cultiu pot ser de gran ajuda per als agricultors i institucions. Això és especialment rellevant a la Unió Europea, en el marc de la Política Agrària Comuna (PAC). A més, a escala regional, l'estimació del rendiment permet identificar els llocs més adequats per al cultiu de blat i analitzar factors espacials que afecten al rendiment del cultiu. A escala d'explotació comercial, estimar el rendiment del cultiu ajuda a millorar el maneig agrícola i administrar de manera més oportuna els inputs d'aquests. Saber els rendiments també ajuda a planificar els preus de les collites i la gestió d'estocs.

## 1.2. Sentinel-2

La teledetecció té com a finalitat identificar i caracteritzar els materials de la superfície terrestre i els processos que hi ocorren a partir de la radiació electromagnètica procedent de la mateixa, tant la emesa per la mateixa superfície terrestre com per la reflectida de la que arriba del sol, prevalent una sobre l'altre en funció de l'interval espectral considerat [7].

Les sèries temporals de imatges multispectrals de satèl·lit constitueixen una eina valuosa que permet caracteritzar l'evolució del cicle de cultiu. Permeten obtenir mesures de reflectivitat de la coberta vegetal, que poden ser utilitzades per quantificar la biomassa acumulada, rendiment final i les necessitats hídriques i nutricionals dels cultius [5].

L'aplicació de la teledetecció en agricultura va començar l'any 1972 amb el llançament del satèl·lit ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), posteriorment anomenat Landsat 1.

Hi ha diversos estudis que utilitzen Landsat per estimar rendiments com és el cas de Gaso 2015 [8] o d'estudis que parlen de models de predicció de rendiment en blat [9] un altre exemple és de González et al. 2018 [10] que combina imatges de Sentinel-2 amb Landsat per estimar biomassa i rendiments en camps de blat, ordi i blat de moro. Actualment els satèl·lits en òrbita són els Landsat 8 i 9 (Figura 4).

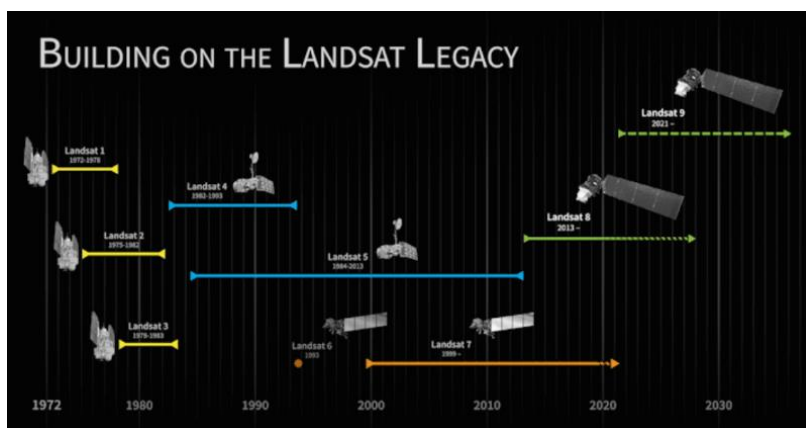


Figura 4: Cronologia del programa Landsat. Font: NASA

La combinació del Landsat 8 i 9 donen una resolució temporal de 8 dies i 8 bandes espectrals. Té una resolució espacial de 30m per les bandes de la regió de l'òptic (400-2400nm) [11].

En aquest estudi s'utilitza Sentinel 2 enlloc de Landsat ja que les parcel·les d'estudi tenen un tamany reduït i el que es busca és millor resolució espacial i temporal. Hi ha estudis com per exemple Gonzalez et al. 2018 que utilitzen imatges tant de Landsat 8 com de Sentinel 2 per estimar biomassa i rendiment en diferents cultius de cereals [10].

L'Agència Espacial Europea (ESA) ha desenvolupat una sèrie de missions d'observació de la Terra d'última generació específicament per les necessitats del programa Copernicus. Copernicus és el programa d'observacions de la Terra més ambiciós fins el moment. Proporciona informació precisa, oportuna i de fàcil accés per millorar la gestió del medi ambient, comprendre i mitigar els efectes

del canvi climàtic i garantir la seguretat ciutadana. Aquesta iniciativa està liderada per la Comissió Europea (CE) en col·laboració amb la ESA.

L'objectiu del programa Sentinel és substituir les missions antigues d'observació de la Terra que s'han retirat, com les missions ERS i Envisat, o que actualment s'apropen al final de la seva vida operativa. Això garantirà la continuïtat de dades per a que no hi hagi buits en els estudis en curs.

Sentinel està constituït per 6 constel·lacions (Figura 5), cada missió Sentinel es basa en una constel·lació de dos satèl·lits i s'enfoca en un aspecte diferent d'observació de la Terra; monitoratge atmosfèric, oceànic i terrestre. Aquestes missions porten una gran varietat de tecnologies, com instruments d'imatges de radar i multiespectral.



Figura 5: Constel·lacions Sentinel. Font: ESA

La missió Copernicus Sentinel-2 està formada per una constel·lació de dos satèl·lits en la mateixa òrbita sincrònica del sol, en fase 180° l'un de l'altre. Té com a objectiu controlar la variabilitat de les condicions de la superfície terrestre, en condicions lliures de núvols i té una freqüència de revisió elevada de 5 dies a l'equador. Cada un dels satèl·lits de la missió Sentinel-2 està equipat amb un instrument multiespectral (MSI) que mostra 13 bandes espectrals: quatre bandes a 10m, sis bandes a 20m i tres bandes a 60m de resolució espacial. L'amplada de la franja orbital és de 290km. El primer satèl·lit Sentinel-2A va ser llançat el 23 de juny del 2015, el segon satèl·lit Sentinel-2B va ser llançat el 7 de març del 2017.

El MSI funciona de manera passiva, recollint la llum solar reflectida a la Terra. S'adquireixen noves dades a l'instrument a mesura que el satèl·lit es mou al llarg de la seva trajectòria orbital. El feix de llum entrant es divideix en un filtre i se centra en dos conjunts de plans focals separats dins de l'instrument; un per a bandes del visibles (VIS) i infraroig proper (NIR) i un altre per a bandes de l'infraroig d'ona curta (SWIR). La separació espectral de cada banda en longituds d'ona individuals s'aconsegueix mitjançant filtres de franges muntats a la part superior dels detectors.





Figura 6: Vista esquemàtica del satèl·lit de Sentinel-2. Font: ESA

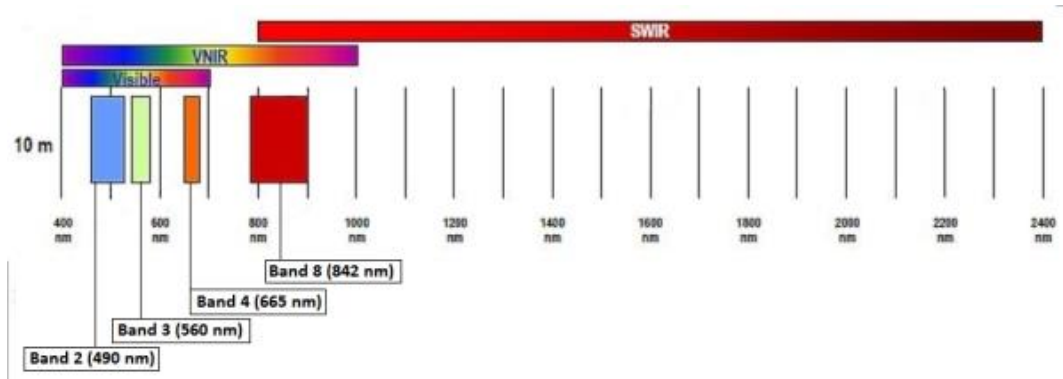


Figura 7: Bandes de resolució espacial Sentinel-2 de 10m: B2 (490nm), B3 (560nm), B4 (665) i B8 (842nm). Font: ESA

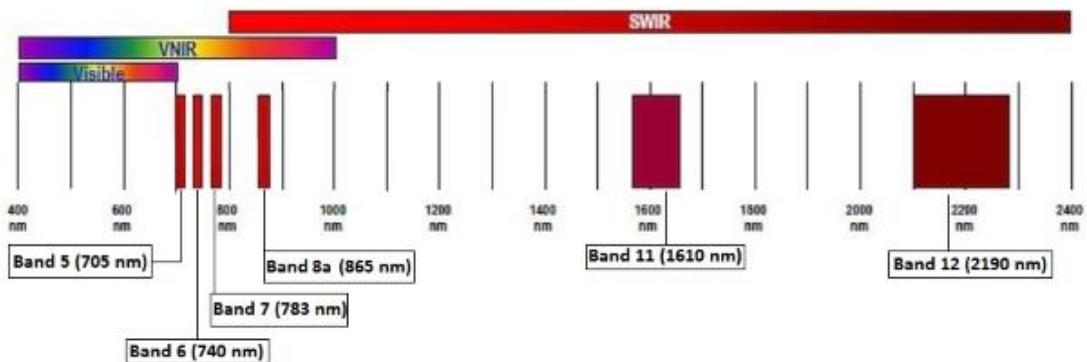


Figura 8: Bandes de resolució espacial Sentinel-2 de 20m: B5 (705nm), B6 (740nm), B7 (783nm), B8a (865nm), B11 (1610nm) i B12 (2190). Font: ESA

Els productes Sentinel-2 disponibles pels usuaris són el Nivell-1C i Nivell-2A. Els grànuls, també anomenats rajoles (“tiles” en anglès) són ortoimatges de 100x100km<sup>2</sup> en projecció UTM (Universal Transverse Mercator). Els sistema UTM divideix la superfície terrestre en 60 zones. En aquest treball

s'ha utilitzat el nivell 2A de processament de les imatges. El nivell 2A proporciona ortoimatges amb valors de reflectivitat de superfície, és a dir, amb correcció geomètrica i atmosfèrica.

Les resolucions de la missió SENTINEL-2 i el seu MSI són tres:

- La resolució temporal d'un satèl·lit en òrbita és la freqüència de revisió del satèl·lit a una ubicació determinada. La freqüència de revisió de cada satèl·lit Sentinel-2 és de 10 dies i el període de revisita combinat de la constel·lació és de 5 dies.
- La resolució espacial d'un instrument és la representació a terra d'un detector individual en una matriu de sensors de satèl·lit. Els detalls sobre la resolució de les bandes espectrals utilitzades en aquest treball es troben definides a les Figures 4 i 5.
- La resolució radiomètrica és la capacitat de l'instrument per distingir diferències d'intensitat o reflectància de la llum. Com més gran sigui la resolució radiomètrica, més precisa serà la imatge detectada [12].

## 2. Objectius

L'objectiu general d'aquest treball és avaluar la idoneïtat de les dades Sentinel-2 per estimar el rendiment en cultius de blat.

Per dur a terme aquest objectiu, s'han definit els següents objectius específics:

- Validar l'aptitud dels índex de vegetació per a l'estimació del rendiment.
- Identificar quins índexs són més adequats per a cada estadi fenològic per a l'estimació de rendiments.

### 3. Materials i mètodes

#### 3.1. Localització de l'estudi

L'estudi es va dur a terme en 10 parcel·les de blat situades a les comarques del Bages, Osona, la Selva i el Moianès.

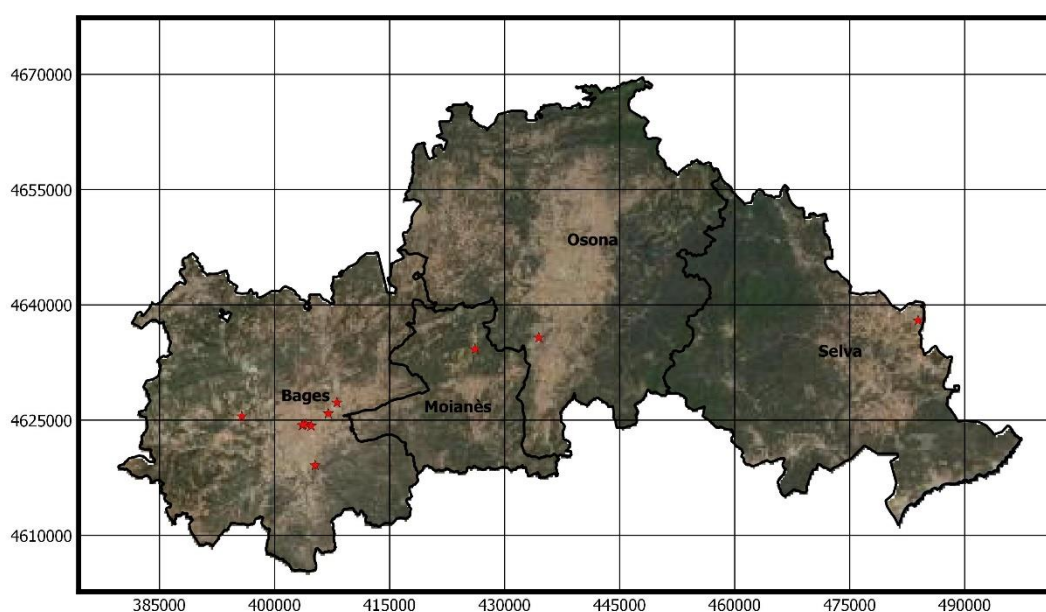


Figura 9: Mapa de les comarques del Bages, Moianès, Osona i la Selva. Les parcel·les d'estudi estan marcades amb punts vermells. Sistema de referència EPSG 25831, les coordenades son UTM (Universal Transverse Mercator) fus 31N expressades en metres.

La comarca del Bages té un clima sub-humit, amb una precipitació mitjana anual de 546mm i una temperatura mitjana de 14°C [13]. La comarca d'Osona es caracteritza per un clima mediterrani continental humit, amb una precipitació mitjana anual de 710mm i una temperatura mitjana de 12°C [14]. El clima de la Selva és mediterrani prelitoral nord, té una precipitació mitjana anual de 736mm i una temperatura mitjana de 14,3°C [15]. Per últim, el Moianès té un clima mediterrani continental subhumit amb una precipitació mitjana anual de 686mm i una temperatura mitjana anual de 11,3°C [16].

A la Taula 1 s'identifiquen les parcel·les que formen part de l'estudi. Es van estudiar un total de set parcel·les situades el Bages, una a La Selva, una al Moianès i una a Osona, formada per 4 recintes.

Taula 1: Característiques de les parcel·les estudiades: codi SIGPAC (Sistema d'Informació Geogràfica de Parcel·les Agrícoles), codi de la parcel·la, ubicació i superfície (ha).

<b>Codi SIGPAC</b>	<b>Codi parcel·la</b>	<b>Ubicació</b>	<b>Superfície (ha)</b>
<b>17159:0:0:5:3</b>	P1	La Selva	2,7237
<b>08212:0:0:1:23:5</b>	P2	Bages	1,1817
<b>08212:0:0:2:68:1</b>	P3	Bages	2,1541
<b>08212:0:0:2:18:4</b>	P4	Bages	6,7147
<b>08190:0:0:4:24:2</b>	P5	Bages	1,9977
<b>08212:0:0:1:22:1</b>	P6	Bages	1,6646
<b>08112:0:0:11:102:5</b>	P7	Bages	2,6781
<b>08212:0:0:6:32:2</b>	P8	Bages	1,8956
<b>08128:0:0:5:54</b>	P9	Osona	8,8564
<b>08137:0:0:1:12:4</b>	P10	Moianès	4,629

Per saber la climatologia durant el període de cultiu es van agafar les dues estacions més properes a la ubicació de les parcel·les. Es van utilitzar les dades de les estacions meteorològiques de Vic (Osona) i Artés (Bages).

Taula 2: Ubicació de les estacions meteorològiques de Osona i Bages. Font: meteo.cat

<b>Comarca</b>	<b>Municipi</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud (m)</b>
<b>Bages</b>	Artés	41.794	1.936	278
<b>Osona</b>	Vic	41.934	2.239	499

Durant el cicle de cultiu la temperatura mitjana mensual màxima va ser de 22,8°C a Osona i de 24,5°C al Bages, les dues dades enregistrades al mes de juliol del 2021.

### 3.2. Dades del cultiu

Taula 3: Dades dels cultius. Codi de parcel·la, varietat de blat i data de sembra i collita.

Codi parcel·la	Varietat de blat	Data de sembra	Data de collita
P1	Botticelli	15/12/2020	24/06/2021
P2	Ippon	25/10/2020	25/06/2021
P3	Nemo	24/10/2020	28/06/2021
P4	Tenor	23/10/2020	27/06/2021
P5	Ippon	22/10/2020	25/06/2021
P6	Ippon	25/10/2020	28/06/2021
P7	Ippon	22/10/2020	28/06/2021
P8	Ippon	22/10/2020	25/06/2021
P9	Chambo	10/11/2020	14/07/2021
P10		19/10/2020	24/07/2021

El blat pertany al gènere *Triticum* que pertany a la família *Poideae* dins de la família *Graminea*.

Per a la realització d'aquest estudi es van seleccionar camps de blat durant la campanya 2020-2021 de la varietat Botticelli, Ippon, Nemo, Tenor i Chambo. Els diferents tipus de blat es poden classificar per dos aspectes fonamentals [17]:

- Dotació genètica: Blat dur (*Triticum durum*) o blat tou (*Triticum aestivum*)
- Cicle de cultiu: blat d'hivern o blat de primavera. El blat d'hivern es sembra a la tardor i es sega, generalment, 8-10 mesos després.

Totes les varietats estudiades són blat tou i d'hivern.

### 3.3. Obtenció d'imatges i extracció d'informació

Les imatges espectrals de Sentinel-2 es van obtenir a través del Copernicus Open Access Hub (anteriorment conegut com a Sentinels Scientific Data Hub) que ofereix accés complet, gratuït i obert als productes d'usuari de Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 i Sentinel-5P. Dins del Copernicus

Open Hub es va delimitar l'àrea d'estudi i el període de detecció, de l'1 de febrer al 31 de maig. Es va triar el nivell L2A, imatges amb correcció geomètrica i atmosfèrica (Figura 10).

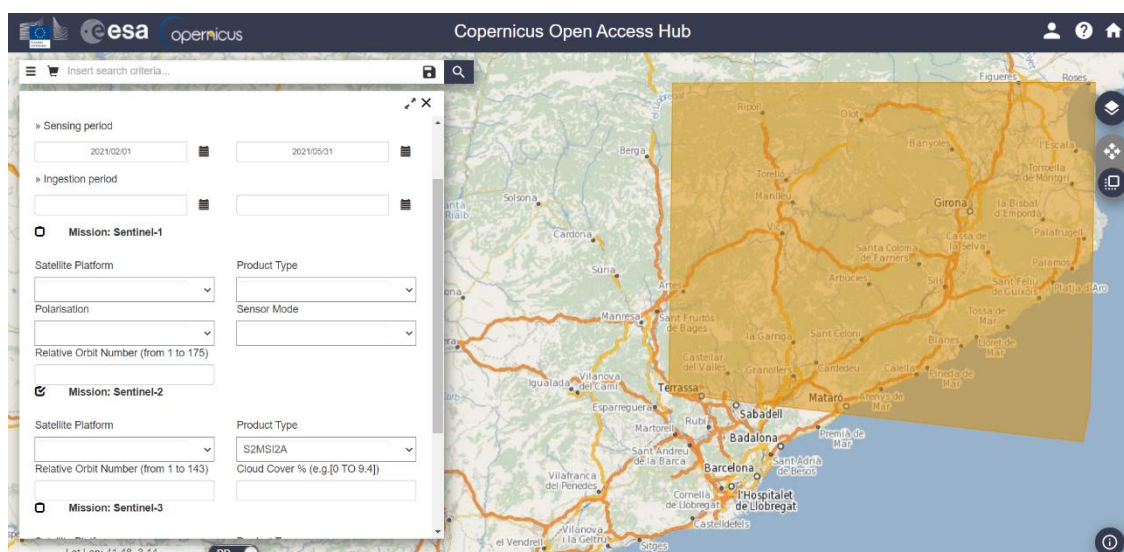


Figura 10: Obtenció d'imatges a través del Copernicus Open Acces Hub. Font: <https://scihub.copernicus.eu/>

Dins el període de detecció seleccionat es van descartar les imatges on es van detectar núvols que podien interferir en el resultat de les dades. Durant aquest període només es van trobar set dies on les imatges estaven lliures de núvols. Aquestes imatges contenen les bandes espectrals detectades pel Sentinel-2. A la Taula 4 s'indica la relació de la data de les imatges amb l'estadi fenològic del cultiu.

Taula 4: Estadis fenològics del cultiu en les dates d'obtenció de dades.

Data dades Sentinel-2	Estadi fenològic
<b>01/02/2021</b>	Filloleig
<b>11/02/2021</b>	Filloleig
<b>18/03/2021</b>	Canoneig
<b>23/03/2021</b>	Canoneig
<b>28/03/2021</b>	Canoneig
<b>12/05/2021</b>	Gra pastós
<b>27/05/2021</b>	Gra pastós

En aquest estudi s'han utilitzat imatges de tres estadis fenològics diferents: filloleig (corresponent a l'estat 2 en l'escala Zadoks), canoneig (corresponent a l'estat 3 en l'escala Zadoks) i gra pastós (corresponent a l'estat 8 i 9 de l'escala Zadoks).

El programari utilitzat per al processament de les imatges és el Quantum GIS 2.18 (abreviat com a QGIS) és un programa de visualització, edició i anàlisi de dades que conforme un sistema d'informació geogràfica (SIG). Es tracta de programari de codi lliure i multiplataforma, és a dir que es pot modificar i descarregar lliurement i es pot utilitzar amb diversos sistemes operatius.

Les dades de les comarques descarregades del SIGPAC van ser introduïdes al QGIS com a capes vectorials. Es van crear capes amb les dades de les parcel·les d'estudi i es va crear un buffer de 10m per evitar interferències amb les vores (Figura 11):

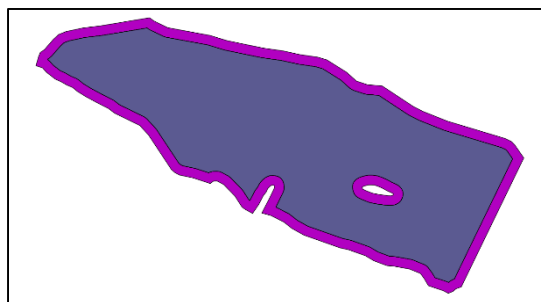


Figura 11: Exemple d'una parcel·la del Bages amb buffer de 10m.

Les imatges que contenen les bandes espectrals es van carregar al QGIS com a capa ràster.

Dins dels sistemes d'informació geogràfica podem trobar dos tipus d'arxius cartogràfics, els vectorials i els ràsters. En els arxius vectorials els elements geogràfics es representen a partir de tres estructures bàsiques: punts, línies i polígons. Els fitxers ràster es caracteritzen per l'existència d'una xarxa formada per cel·les o quadrícules, conegudes com a píxel, en què cada quadrícula o píxel presenta una qualitat o propietat espacial (color, altitud, etc). Mentre que en el model vectorial les línies i punts són els elements principals del sistema, en el model ràster, és la cel·la. La principal diferència respecte a un fitxer vectorial és que el fitxer ràster emmagatzema píxel mentre que el vectorial emmagatzema coordenades dels vèrtexs de cada element geomètric [18].



Les imatges procedents del Sentinel-2 es troben en coordenades diferents però són sistemes equivalents, per a la realització d'aquest treball s'ha utilitzat el sistema de referència espanyol EPSG 25831 (UTM zona 31N).

A la Taula 5 s'indiquen les bandes espectrals i resolucions del sensor MSI a bord del satèl·lit Sentinel-2. Aquest sensor inclou les bandes del blau (B2), verd (B3) i roig (B4), de la regió del visible (VIS) i de les bandes de l'infraroig proper (NIR) (B8) i d'ona curta (SWIR) (B11 i B12), també inclou tres bandes espectrals (B5 a B7) en la regió del marge roig (red edge,RE) i de l'infraroig proper (B8A) amb resolució espacial de 20m.

Taula 5: Bandes espectrals i resolució espacial del sensor multiespectral MSI del Sentinel-2.

MSI Band	Spatial Resolution (m)	Central Wavelength (nm)
B1: Coastal Aerosol	60	443
B2: Blue	10	490
B3: Green	10	560
B4: Red	10	665
B5: Red-Edge	20	705
B6: Red-Edge	20	740
B7: Red-Edge	20	783
B8: NIR	10	842
B8A: Vegetation RE	20	865
B9: Water Vapour	60	945
B10: SWIR Cirrus	60	1375
B11: SWIR	20	1610
B12: SWIR	20	2190

Es calculen els índex espectrals amb el complement d'estadístiques zonals de QGIS. Els índex espectrals són combinacions matemàtiques de les bandes espectrals (Taula 6).

Taula 6: Fòrmula de càlcul dels índexs de vegetació. Modified Simple Ratio (MSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI), Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI) i Red Edge Chlorophyll Index (RE CI). B fa referència a una banda específica com s'indica a la Taula 5.

Índex vegetació	Fórmula	Mesura	Cita
<b>MSR</b>	$(B8 / B4 - 1) / [\sqrt{(B8/B4 + 1)}]$	Biomassa	(Chen et al. 1996) [19]
<b>NDVI</b>	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Biomassa	(Rouse Lr., 1974) [20]
<b>GNDVI</b>	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$	Biomassa	(Louhaichi, 2001) [21]
<b>RDVI</b>	$(B8 - B4) / \sqrt{(B8 + B4)}$	Biomassa	(Roujean, 1995) [21]
<b>RVI</b>	$B8 / B4$	Biomassa	(Jordan, 1969) [22]
<b>NDWI</b>	$(B8 - B11) / (B8 + B11)$	Contingut aigua	(McFeeters et al. 1996) [23]
<b>RE NDVI</b>	$(B8 - B6) / (B8 + B6)$	Contingut clorofil·la	(Gitelson et al. 1995) [24]
<b>NCI RE</b>	$(B7 - B5) / (B7 + B5)$	Contingut clorofil·la	(Gitelson et al. 2005) [25]
<b>CI RE</b>	$(B7 / B5) - 1$	Contingut clorofil·la	(Gitelson et al. 2003) [26]

### 3.4. Anàlisi estadístic

Per determinar si els índexs són idonis per estimar rendiments es fan diagrames de caixa amb el software de fulls de càlcul Microsoft Excel, per identificar valors extrems (outliers) de cada parcel·la estudiada.

Per determinar si existeixen correlacions significatives entre les variables d'índex de vegetació i el rendiment per cada data d'imatge Sentinel-2, s'ha utilitzat el programa estadístic SPSS 22. L'IBM SPSS és una família de programes computacionals d'anàlisi estadístic. Es fa servir el coeficient de correlació de Pearson, una mesura de dependència lineal entre dues variables aleatòries quantitatives. El coeficient de correlació de Pearson oscil·la entre -1 i +1.

Per últim es fa la recta de regressió amb els índexs i estadis fenològics amb millor correlació utilitzant el software de fulls de càlcul Microsoft Excel.

## 4. Resultats i discussió

### 4.1. Climatologia

Les dades climàtiques de la zona estudiada es mostren en la Figura 12, obtingudes de les estacions meteorològiques d'Osona (Vic) i Bages (Artés) [27]:

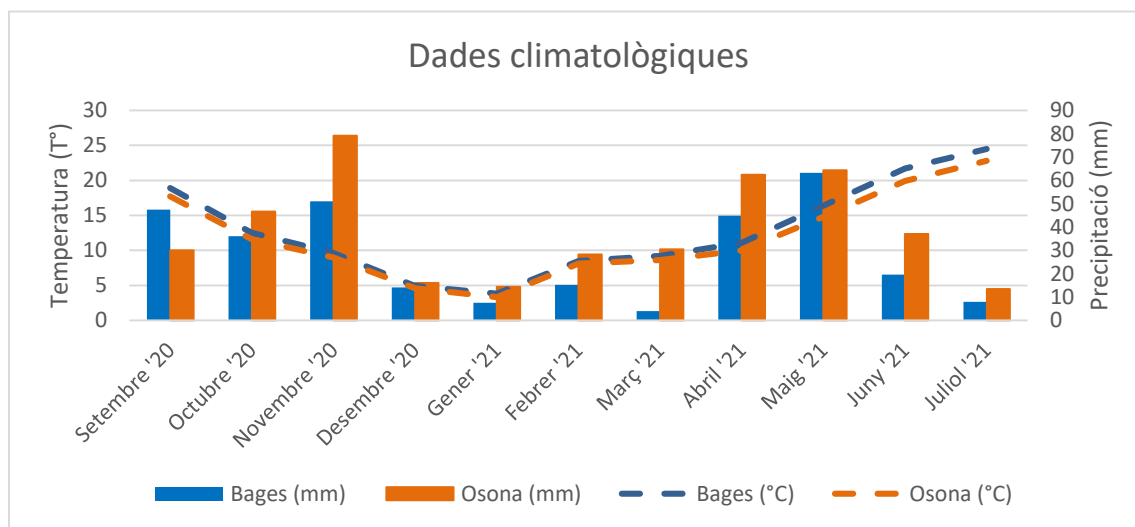


Figura 12: Dades climatològiques del Bages i Osona des del setembre del 2020 fins al juliol del 2021. Precipitació mensual (mm) i temperatura mensual mitjana (°C).

La precipitació mitjana l'any 2020 tant a Osona com al Bages es troba dins els valors habituals. En canvi durant el cicle de cultiu dels camps de blat estudiat es registra una 30% menys de precipitació a Osona i un 40% menys de precipitació al Bages.

Durant el cicle de cultiu la temperatura mitjana a Osona va ser de 11,7°C, un 1,2°C superior a l'habitual, en canvi al Bages va ser l'habitual per aquest mesos, 12,2°C.

Les temperatures més altes durant la campanya de cultiu 2020-21 es donen abans de la collita, entre juny i juliol del 2021. El mes més sec és el març i el juliol del 2021. S'observa que la comarca del Bages té una temperatura superior a la comarca d'Osona a final de cultiu que pot influir en el rendiment del conreu, ja que també té una precipitació inferior durant tots els mesos excepte setembre de 2020. Aquest fet pot explicar que el rendiment de les parcel·les situades al Bages és

inferior a la situada a Osona, tot i que només tenim una representació de la comarca d'Osona que a més a més és un blat d'una varietat diferent que les del Bages.

A la Taula 7 es mostra la varietat de blat per a cada parcel·la així com també el rendiment i ubicació d'aquestes.

Taula 7: Dades de camp de les parcel·les. Ubicació per comarca, varietat de blat i rendiment (kg/ha).

<b>Codi parcel·la</b>	<b>Comarca</b>	<b>Varietat de blat</b>	<b>Rendiment (kg/ha)</b>
<b>P1</b>	La Selva	Botticelli	4990
<b>P2</b>	Bages	Ippon	4635
<b>P3</b>	Bages	Nemo	6320
<b>P4</b>	Bages	Tenor	4340
<b>P5</b>	Bages	Ippon	950
<b>P6</b>	Bages	Ippon	4890
<b>P7</b>	Bages	Ippon	1720
<b>P8</b>	Bages	Ippon	1125
<b>P9</b>	Osona	Chambo	5890
<b>P10</b>	Moianès		7200

S'observa un rendiment més baix de l'esperat en la P5, pot ser degut a un problema d'estrès hídric a final de cultiu.

La comarca amb millor rendiment és el Moianès, seguida d'Osona, La Selva i el Bages.

El rendiment de blat a Osona va ser de 5890 kg/ha, una mica superior a la mitjana del rendiment per aquesta comarca el 2020, que va ser de 5000 kg/ha [28].

La parcel·la situada al Moianès presenta un rendiment molt per sobre de la mitjana de la comarca, que es situa en 3600 kg/ha. La parcel·la situada a la Selva també presenta un rendiment més alt de l'esperat, la mitjana de la comarca al 2020 va ser de 3100 kg/ha.

El rendiment mitjà de les parcel·les situades al Bages és de 3425 kg/ha, inferior a la mitjana de la comarca que se situa amb un valor de 4200 kg/ha, això pot ser degut a que va ser un cicle de cultiu amb unes precipitacions inferiors a la mitjana.

## 4.2. Evolució temporal dels índexs de vegetació

Entre els índexs espectrals de vegetació el NDVI és un dels més adequats per seguir la dinàmica de desenvolupament de la vegetació, ja que mesura la biomassa fotosintèticament activa de les plantes. Tot i així aquest índex és bastant sensible a la lluminositat del sòl i als efectes atmosfèrics. Els valors del NDVI són més precisos a mitjans de la temporada, en la fase de creixement actiu dels cultius [29]. Uns valors de  $NDVI < 0$  corresponen a aigua, núvols i cobertes artificials, uns valors entre  $0 < NDVI < 0,2$  corresponen a sòl nu o vegetació morta, els valors entre  $0,2$  i  $0,4$  corresponen a vegetació abundant i vigorosa i valors per sobre de  $0,6$  corresponen a vegetació molt densa i vigorosa [30].

Els valors del NDWI poden variar entre  $-1$  i  $1$ . Els valors entre  $-1$  i  $0$  indiquen superfícies sense vegetació o aigua. Els valors propers a  $0$  indiquen zones amb baixa cobertura vegetal o alt estrès hídric i els valors entre  $0$  i  $1$  indiquen zones amb cobertura i hidratació creixent. Quan la vegetació es troba en bon estat hídric, presenta una alta reflectància d'ones NIR i baixa SWIR, per tant tindrà valors més alts [31].

Els índexs NDVI red edge i el NCI red edge són índexs de vegetació utilitzats per estimar la salut de la vegetació, sobretot en les etapes mitjanes i tardanes del creixement del cultiu, en que la concentració de clorofil·la és relativament més alta [32] (relacionat amb l'estat nitrogenat), la incidència d'estressos (sequera) i estadi fenològic (degradació de clorofil·la). Aquests índex oscil·len entre el  $-1$  i  $1$ . El rang comú per a la vegetació verda és de  $0,2$  a  $0,9$  [33].

A continuació es mostren els gràfics de l'evolució temporal dels índexs de vegetació.

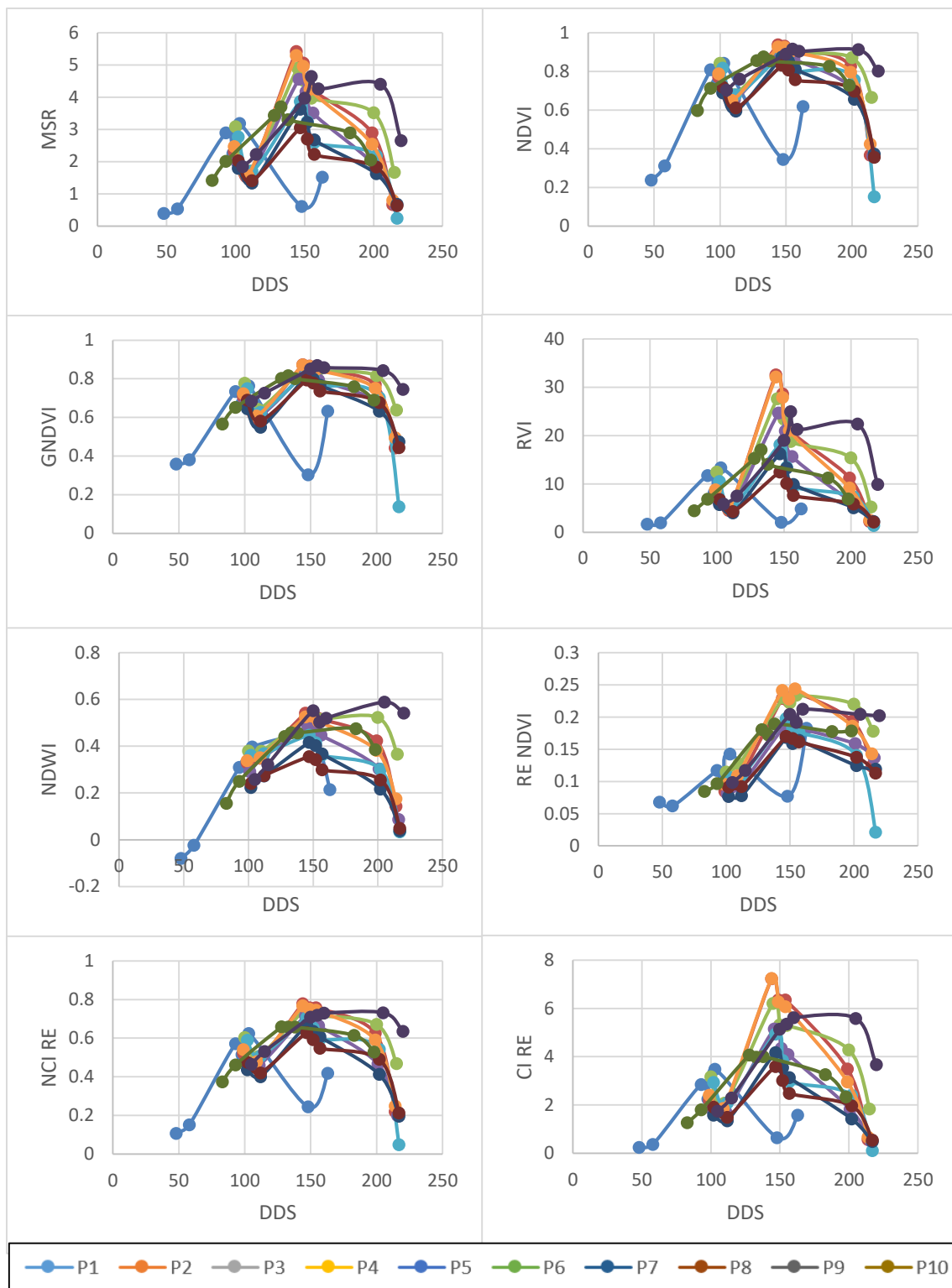


Figura 13: Corbes d'evolució dels índex de vegetació per 10 parcel·les de blat on DDS: dies després de sembra i índexs de vegetació: Modified Simple Ratio (MSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI), Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI) i Red Edge Chlorophyll Index (RE CI).

Tots els índexs segueixen un patró correcte segons l'estadi fenològic del cultiu estudiat. Tot i així s'observen dades no esperades en el primer dia d'obtenció de dades (filloleig), en alguns índexs i parcel·les, el que pot ser degut a interferències climàtiques (presència de núvols) en la imatge o factors ambientals concrets. Es descarta l'índex RDVI per presentar valors molt variables.

Per a cada índex i parcel·la s'han fet diagrames de caixa (Annex) per detectar possibles valors extrems (outliers) o parcel·les amb valors que poden no ser consistents amb la resta. En la parcel·la P5 s'observen outlier en els índex NDVI, GNDVI i NDWI. La parcel·la P8 té un valor extrem en l'índex NDWI.

S'ha pogut observar que la parcel·la P1 dona resultats avançats a la resta, la data de sembra d'aquesta parcel·la és al desembre, comparat amb les altres parcel·les que es sembren a l'octubre o novembre. Les parcel·les situades al Bages donen resultat més similars que les situades al Moianès i Osona, degut a una data de sembra que varia de pocs dies. En la P1 també s'observa un valor molt baix que després torna a pujar en els índex calculats amb les bandes del red edge (i.e., RE NDVI, NCI RE i CI RE) que no és l'esperat, pot ser degut a una imatge amb nuvolositat o que el cultiu hagi patit un estrès important degut a diferents factors.

També s'observa una pujada pronunciada en els índex del red edge produïda segurament per una aplicació de nitrogen (fertilització) amb combinació amb pluges.

### 4.3. Relació dels índexs de vegetació amb el rendiment

L'estimació del rendiment a partir de dades satèl·lit no és trivial perquè depèn principalment del nombre de llavors, del tipus de sòl i per tant de la fertilitat del sòl, del subministrament d'aigua i nutrients i de la insolació durant el cicle de cultiu. El rendiment del gra dels cereals no es mesura directament a partir de dades satèl·lit, per això aquests mètodes es basen en indicadors com ara la biomassa, l'índex foliar (LAI) o el contingut de clorofil·la. Aquests indicadors sovint s'estimen utilitzant índex de vegetació.

Una correlació significativa no és només una qüestió de l'índex de vegetació adequat, sinó també del moment d'adquisició, és a dir, la correlació entre un índex de vegetació i el rendiment del cultiu no és congruent en totes les etapes fenològiques.



A la Taula 8 es mostra la correlació de Pearson entre els índex de vegetació calculats i el rendiment en les dates d'obtenció de les imatges, relacionades amb l'estadi fenològic del cultiu, explicat en la Taula 4.

Taula 8: Coeficients de correlació de Pearson (R). Relació dels índex de vegetació i el rendiment de blat per a cada dia d'obtenció d'imatges del Sentinel-2. Els acrònims dels índex de vegetació indiquen: MSR (Modified Simple Ration), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index), NDWI (normalized difference water index), RE NDVI (red edge normalized difference vegetation index), NCI RE (red edge normalized chlorophyll index) i CI RE (red edge chlorophyll index). La significació estadística s'indica amb \*\* i \* per a  $P < 0.01$  i  $P < 0.05$  respectivament.

Estadi fenològic	Data imatge Sentinel-2	MSR	NDVI	GNDVI	RVI	NDWI	RE NDVI	NCI RE	CI RE
Filloleig	01/02/2021	-0.14	<b>-0.18</b>	-0.18	-0.10	<b>-0.10</b>	0.05	<b>-0.16</b>	-0.13
Filloleig	11/02/2021	0.31	<b>0.16</b>	0.26	0.40	<b>-0.03</b>	0.33	<b>0.10</b>	0.20
Canoneig	18/03/2021	0.43	<b>0.36</b>	0.29	0.43	<b>0.59</b>	0.30	<b>0.33</b>	0.38
Canoneig	23/03/2021	0.61*	<b>0.46</b>	0.34	0.64*	<b>0.65*</b>	0.29	<b>0.45</b>	0.53
Canoneig	28/03/2021	0.86**	<b>0.84**</b>	0.79**	0.85**	<b>0.88**</b>	0.56	<b>0.80**</b>	0.77**
Gra pastós	12/05/2021	0.59	<b>0.31</b>	0.23	0.67*	<b>0.92**</b>	0.57	<b>0.45</b>	0.63*
Gra pastós	27/05/2021	0.82**	<b>0.85**</b>	0.80**	0.78**	<b>0.89**</b>	0.84**	<b>0.84**</b>	0.79**

Les correlacions són més bones durant els estadis fenològics més avançats, en aquest cas canoneig i gra pastós. L'índex de contingut d'aigua és el que presenta millors correlacions en dies més propers a la sembra, tot i que comencen a ser significatius en l'estadi fenològic de canoneig.

Les correlacions resultants entre rendiment i índex de vigor, contingut d'aigua i clorofil·la són similars. S'observa que el dia 12/05/21 no hi ha correlacions significatives en els índex de vigor i clorofil·la, aquest resultat no concorden amb les dates adjacents, que si que presenten correlacions significatives. Això pot ser degut a un error de càlcul o que les imatges obtingudes tinguessin presència de núvols, distorsionant les dades reals.

En aquest estudi les correlacions resultants entre el rendiment i els índex de contingut de biomassa, contingut d'aigua i clorofil·la van ser similars a les obtingudes per Segarra et al. 2020 [6]. Tot i que segons Segarra et al. 2020 l'estadi fenològic més adequat per relacionar índex de vegetació i

rendiment en cultius de blat a Navarra és l'espigueig, aquest estudi proporciona estimacions de rendiment similar per l'estadi fenològic de gra pastós ja que en aquest estudi no s'han pogut obtenir dades de l'estadi fenològic d'espigueig. L'estudi de Zhang et al. 2014 [34] coincideix amb l'estudi de Segarra et al. 2020 aportant que l'etapa del cicle de cultiu de blat més relacionada amb la producció i el rendiment es dona en l'etapa final de l'espigat.

Per avaluar la idoneïtat de les dades obtingudes de Sentinel-2 per estimar rendiments es fa una comparació de cada índex de vegetació amb el rendiment de camp obtingut i es calcula la regressió lineal entre les dues variables. Es faran en les dates amb correlacions més significatives, és a dir les dades del dia 28/03/21, que pertany a l'estadi fenològic de canoneig i 27/05/21 que pertany a l'estadi fenològic de gra pastós.

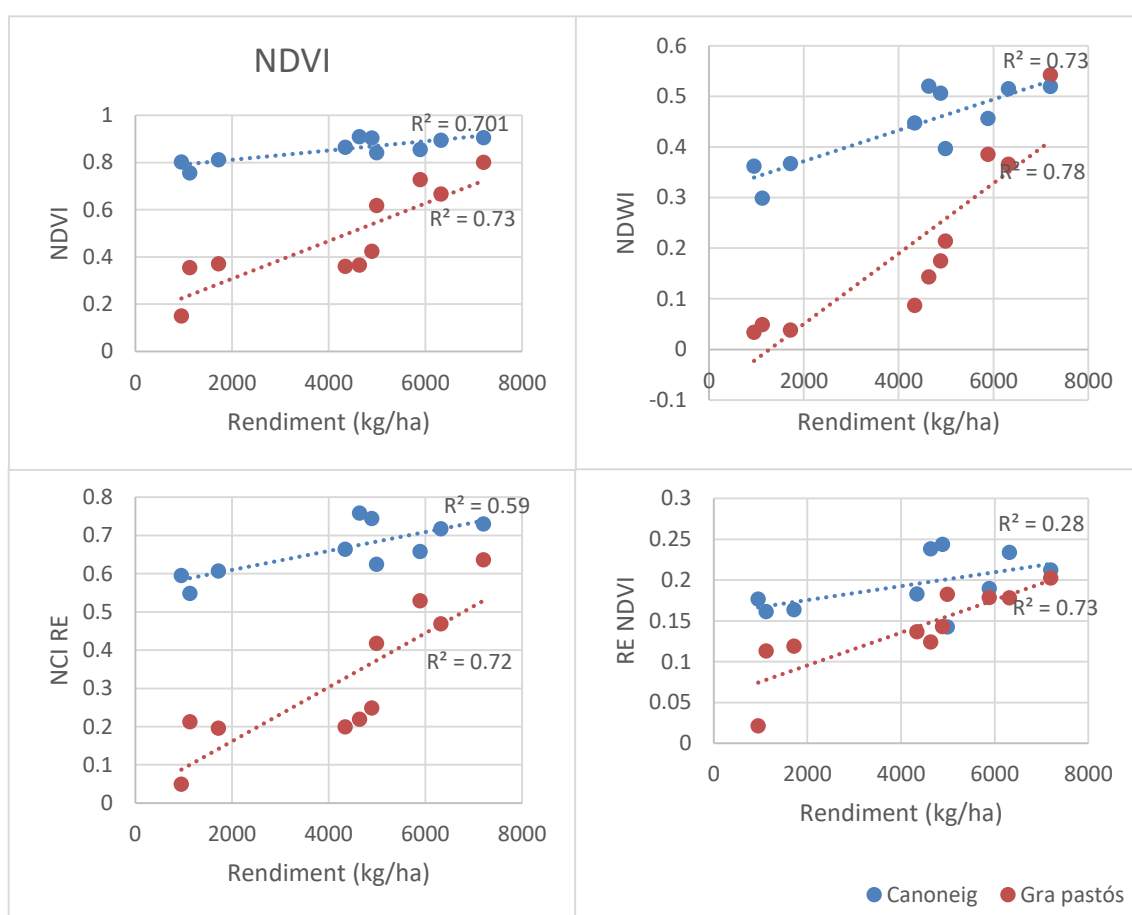


Figura 14: Rrelació entre índexs de vegetació i rendiment. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) i Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI).

S'observen coeficients de determinació similar entre els índexs de vegetació de contingut de biomassa, contingut d'aigua i contingut de clorofil·la per l'estadi fenològic de gra pastós, tot i que destaca lleugerament l'índex de contingut d'aigua tant en l'estadi de gra pastós com en el de canoneig.

Aquests resultats concorden amb els obtinguts per Zhao (2020) [35] on fa un estudi de la predicció del rendiment de camps de blat combinant índex derivats d'imatges de Sentinel-2 amb models de cultiu. Els seus resultats indiquen que els índex de vegetació derivats de Sentinel-2 mostren nivells moderadament alts de predicció del rendiment i expliquen més del 70% de la variabilitat de rendiment, el que és comparable amb els resultats d'aquest estudi. D'altra banda Zhao 2020 destaca la idoneïtat de l'índex de clorofil·la en el red edge per a l'estimació del rendiment.

Tot i que l'estudi només s'ha dut a terme en una campanya agrícola (2020-2021) i 10 parcel·les els resultats són significatius. Ha permès comprovar que la freqüència temporal millorada de Sentinel-2 combinada amb l'alta resolució espectral i espacial és adequada per estimar rendiments en camps de blat.

Els resultat obtinguts en aquest estudi poden ser la base per a futures línies d'investigació com per exemple, analitzar la relació entre rendiment i múltiples índexs de vegetació, estudiant les regressions múltiples per veure si una millor caracterització de l'estat del cultiu millora la predicció de rendiment. En aquest sentit, en l'estudi de Zhao et al. 2020 [35] la combinació de dos índex de vegetació va mostrar una correlació significativa per predir rendiment en blat ( $R^2=0.90$ ). Altres estudis com Segarra et al 2020 [6] també treballen amb regressions múltiples d'índex de vegetació.

Una altre línia podria ser la incorporació d'índex de vegetació amb models de cultiu que consideren factors que poden incidir en el rendiment, com la temperatura i l'estrès hídric. En l'estudi de Zhao et al. 2020 [35] ja inclou la informació dels models de cultiu i demostra que millora les prediccions de rendiment. En aquest estudi dut a terme a Austràlia es mostra que els índex de vegetació combinats amb models d'estrès hídric comporten una millora significativa en la predicció del rendiment ( $R^2=0.91$  vs  $R^2=0.76$  ). Altres estudis com Egea-Cobrero 2018 [36] parlen també de la importància dels models de cultiu ja que permeten caracteritzar la potencialitat productiva de les regions agrícoles i la seva evolució al llarg del temps: la incorporació d'informació derivada dels

índex espectrals en els models de cultiu possibiliten una millora en l'estimació de la producció del cultiu.

Per últim, per millorar l'estimació del rendiment es podrien fer agregacions temporals de dades, això milloraria la representativitat de l'estat i evolució dins el cultiu i podria millorar l'estimació. Així, l'estudi de Segarra et al. 2020 [6] observa que la utilització de dades de diverses dates milloren la capacitat d'estimar el rendiment ja que representen millor la variabilitat al llarg del cicle de cultiu. En l'evolució temporal dels índex (Figura 13) s'observen canvis dins un mateix estadi fenològic, per tant es considera que l'agregació temporal de dades pot comportar una millora en la caracterització de l'estat del cultiu i, per tant, pot comportar una millora per l'estimació del rendiment. En aquest estudi, tot i que només tenim dues dades en l'estadi fenològic de gra pastós, s'ha fet una agregació de dades per estadis fenològics i s'ha vist que millora la predicció del rendiment (Taula 9), particularment en el cas del RE NDVI (Figura 15). Segarra et al. 2020 [6] en el seu estudi obtenen resultats similars i assenyalen que l'exploració de l'evolució de la coberta dels cultius en el temps pot proporcionar una millora en comparació amb les dades d'una única data imatge.

Taula 9: Coeficient de determinació ( $R^2$ ) de la mitjana de l'estadi fenològic de gra pastós i del dia 27/05/21 corresponent a l'estadi fenològic de gra pastós per índex de vegetació. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) i Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI).

Índex de vegetació	$R^2$ mitjana en l'estadi de gra pastós	$R^2$ dia 12/05/21 (gra pastós)	$R^2$ dia 27/05/21 (gra pastós)
<b>NDVI</b>	0,81	0,70	0,73
<b>NDWI</b>	0,83	0,83	0,78
<b>RE NDVI</b>	0,91	0,81	0,73
<b>NCI RE</b>	0,78	0,64	0,72

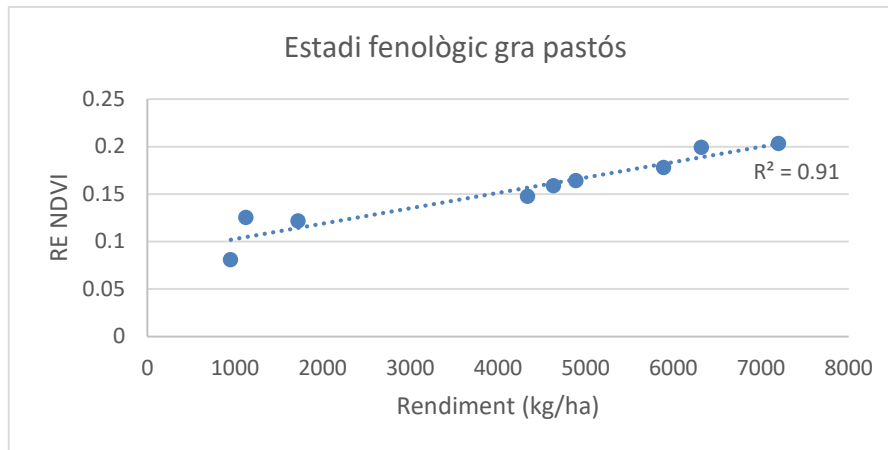


Figura 15: Coeficient de determinació de la mitjana de valors del Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI) en l'estadi fenològic de gra pastós.

Finalment cal mencionar que el període d'estudi ha estat d'una campanya i 10 parcel·les, el qual suposa una limitació pel que fa a la representativitat de les condicions de cultiu. Són necessaris més estudis per corroborar els resultats obtinguts en altres campanyes de cultiu i per a un major nombre de parcel·les i avaluar la idoneïtat de les relacions obtingudes per predir el rendiment del blat.

## Conclusions

1. Els índexs de vegetació relacionats amb el contingut de biomassa, contingut d'aigua i contingut de clorofil·la derivats d'imatges Sentinel-2 s'han mostrat bons predictors del rendiment de blat a nivell de parcel·la.
2. En els estadis fenològics de canoneig i gra pastós s'obtenen relacions significatives entre els índexs de vegetació estudiats i el rendiment mentre que a l'estadi fenològic de filloleig no s'observa cap relació significativa.
3. A l'estadi fenològic de canoneig el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) i el Normalized Difference Water Index (NDWI) presenten relacions significatives amb el rendiment ( $R^2 \sim 0,74$ ).  
A l'estadi fenològic de gra pastós el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) i els índexs Normalized Chlorophyll Index Red Edge (NCI RE) i Red Edge Chlorophyll Index (CI RE) derivats de la regió del marge roig mostren una capacitat predictiva similar ( $R^2 \sim 0,73$ ).
4. L'índex relacionat amb el contingut d'aigua, Normalized Difference Water Index (NDWI), s'ha mostrat el més adequat per a l'estimació del rendiment en l'estadi de gra pastós ( $R^2=0,78$ ).
5. L'agregació de valors del Red Edge Normalized Difference Water Index (RE NDVI) a l'estadi fenològic de gra pastós comporta una millora en l'estimació del rendiment ( $R^2=0,91$ ).

## Bibliografía

- [1] “Cereales.” [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/en/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/cereales/>. [Accessed: 20-Jun-2022].
- [2] “Trigo: producción en España por CC.AA en España 2020 | Statista.” [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/501794/produccion-de-trigo-en-comunidades-autonomas-de-espana/>. [Accessed: 21-Jun-2022].
- [3] “Idescat. Anuari estadístic de Catalunya. Producció agrícola. Per productes. Províncies.” [Online]. Available: <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=446>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [4] “Trigo regado: manejo del cultivo.” [Online]. Available: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016062870>. [Accessed: 30-Jun-2022].
- [5] J. Campoy, “Estimación del rendimiento en cultivos grano bajo estrés hídrico mediante el uso de series temporales de imágenes de satélite. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, Spain,” 2020.
- [6] J. Segarra, J. González-Torralba, Í. Aranjuelo, J. L. Araus, and S. C. Kefauver, “Estimating wheat grain yield using Sentinel-2 imagery and exploring topographic features and rainfall effects on wheat performance in Navarre, Spain,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 14, pp. 1–24, 2020.
- [7] M. A. Gilabert, “Acerca de los índices de vegetación,” no. January, 1997.
- [8] Deborah Viviana GASO MELGAR, “EVALUACIÓN DE DIFERENTES METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO DE TRIGO UTILIZANDO INFORMACIÓN PROVENIENTE DE SENSORAMIENTO REMOTO,” 2015.
- [9] R. Rivas, D. Ocampo, and F. Carmona, “Modelo de predicción de rendimiento de trigo a partir de NDVI: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión.”
- [10] L. Gonzalez, “Tesis Doctoral crop Gómez Laura González,” 2018.

- [11] "Landsat Science." [Online]. Available: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [12] "User Guides - Sentinel-2 MSI - Sentinel Online - Sentinel Online." [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>. [Accessed: 15-Jun-2022].
- [13] S.M.C., "Climatologia. El Bages. 1971-2000." p. 2, 2000.
- [14] C. L. A. Selva, D. Selva, and P. Nord, "Garrotxa i Osona on és PTEH . Al litoral i prelitoral el total anual és escàs , augmentant fins arribar a valors abundants i molt abundants a la zona del Montseny . En relació al règim tèrmic , l ' estiu és calorós amb un anual és moderada a la costa i al," no. 93, pp. 60–61, 2000.
- [15] H. De Balenyà, "l ' est ( Montseny , Guillerics i Collsacabra ) la precipitació és abundant o molt abundant i la temperatura és més baixa . La precipitació cau de manera regular durant tot l ' any , però l ' hivern és l ' estació més seca . Pel la comarca , amb inversió ," no. 93, pp. 60–62, 1990.
- [16] C. E. L. Moianès, "Climatologia. el moianès. 1961-1990," no. 93, pp. 60–62, 1990.
- [17] "Cereals d'hivern," Sep-2011. [Online]. Available: <https://ruralcat.gencat.cat/documents/20181/4636078/DT52.+Cereals+d%27Hivern/99ff53d5-a803-46a7-bc08-0873cf853cdf>. [Accessed: 16-Jun-2022].
- [18] "Modelo vectorial y ráster: ventajas y desventajas - Geoinnova." [Online]. Available: <https://geoinnova.org/blog-territorio/modelo-vectorial-y-modelo-raster/>. [Accessed: 18-Jun-2022].
- [19] J. M. Chen, "Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications," <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>, vol. 22, no. 3, pp. 229–242, 2014.
- [20] J. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS - NASA Technical Reports Server (NTRS)," 1974. [Online].



- Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. [Accessed: 30-Jun-2022].
- [21] M. Louhaichi, M. M. Borman, and D. E. Johnson, "Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat," <http://dx.doi.org/10.1080/10106040108542184>, vol. 16, no. 1, pp. 65–70, 2008.
- [22] C. F. Jordan, "Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor," *Ecology*, vol. 50, no. 4, pp. 663–666, Jul. 1969.
- [23] S. K. McFeeters, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features," <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, 2007.
- [24] A. Gitelson and M. N. Merzlyak, "Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation," *J. Plant Physiol.*, vol. 143, no. 3, pp. 286–292, Mar. 1994.
- [25] A. A. Gitelson, A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist, and T. J. Arkebauer, "Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops," 2005.
- [26] A. A. Gitelson, A. Vina, T. J. Arkebauer, D. C. Rundquist, G. Keydan, and B. Leavitt, "Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 5, p. 1248, Mar. 2003.
- [27] "Resum de dades d'estacions meteorològiques automàtiques de Catalunya | Meteocat." [Online]. Available: <https://m.meteo.cat/resum-dades>. [Accessed: 19-Jun-2022].
- [28] "SUPERFÍCIES, RENDIMENTS I PRODUCCIONS COMARCALS DELS CONREUS AGRÍCOLES. ANY 2020 NOTA METODOLÒGICA."
- [29] "Índices De Vegetación Y Su Aplicación En La Agricultura Digital." [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/#ndvi>. [Accessed: 19-Jun-2022].
- [30] "NDVI. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya." [Online]. Available: <https://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Descarregues/Imatges-aeries-i-de-satel->

- lit/NDVI. [Accessed: 19-Jun-2022].
- [31] “NDWI: Índice Diferencial de Agua Normalizado - Brioagro.” [Online]. Available: <https://brioagro.es/ndwi-indice-diferencial-de-agua-normalizado/>. [Accessed: 19-Jun-2022].
- [32] “NDVire—ArcGIS Pro | Documentación.” [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/arcpy/image-analyst/ndvire.htm>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [33] “Geospatial Solutions, Data & Imagery | Remote Sensing Technologies | L3Harris Geospatial.” [Online]. Available: <https://www.l3harrisgeospatial.com/>. [Accessed: 26-Jun-2022].
- [34] S. Zhang and L. Liu, “The potential of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index for crop yield prediction,” <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2014.963734>, vol. 5, no. 8, pp. 733–742, Aug. 2014.
- [35] Y. Zhao, A. B. Potgieter, M. Zhang, B. Wu, and G. L. Hammer, “Predicting wheat yield at the field scale by combining high-resolution Sentinel-2 satellite imagery and crop modelling,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 6, 2020.
- [36] V. Egea-Cobrero, V. Rodriguez-Galiano, E. Sánchez-Rodríguez, and M. A. García-Pérez, “Estimación de la cosecha de trigo en Andalucía usando series temporales de MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI),” *Rev. Teledetección*, no. 51, p. 99, 2018.

## Annex

Diagrames de caixa dels índex de vegetació per cada parcel·les de blat. Modified Simple Ratio (MSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RE NDVI), Red Edge Normalized Chlorophyll Index (RE NCI) i Red Edge Chlorophyll Index (RE CI).

