

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Cuantificación del estrés de la vegetación a partir del  
comportamiento espectral R-NIR-SWIR-TIR**

Directores: Dr. Raúl E. Rivas y Dr. Mauro E. Holzman

Tesista: Sabrina Beninato



Bahía Blanca,

Argentina

2022

# Agradecimientos

*Al Departamento de Física de la UNS, a la UNCPBA y principalmente al IHLLA que abrió sus puertas y me permitió ser parte de sus proyectos. Al proyecto IHREDA por facilitar el instrumental de la estación de monitoreo (EB+).*

*Al Dr. Raúl Rivas por recibirme tan predispuesto desde un primer instante. Al Dr. Mauro Holzman por todo el seguimiento en esta última etapa y con quien voy a tener el placer de compartir mi futuro académico. Gracias al Dr. Alfredo Juan por permitirme conocer una nueva rama de la ciencia, de la cual me quedé maravillada.*

*A mis compañeros y compañeras de la carrera que hicieron que esta etapa fuera hermosa, en especial a aquellas compañeras que se convirtieron en grandes amigas de la vida.*

*A Ima, por su compañía incondicional.*

*Y a mi familia por todo el apoyo, eternamente agradecida.*

# Resumen

La agricultura es uno de los principales ingresos económicos para la región pampeana y el país. A lo largo de los años, los cultivos se ven afectados en su rendimiento debido a varias causas, siendo la más general el déficit de agua en suelo, produciendo ciertos niveles de estrés hídrico a éstos. La detección del contenido de agua en suelo, y la manera en que el comportamiento de éste afecta al desarrollo del cultivo, son de suma importancia para la mejora en los usos de recursos que se requieren para llevar a cabo la actividad. El desarrollo de métodos para generar alertas de comportamientos previos al estrés de la vegetación, por medio de la teledetección, está en un constante y continuo avance, debido a la accesibilidad, tanto económica como regional, que presenta la toma de datos de manera remota.

El objetivo general del trabajo fue poder definir las condiciones biofísicas y estructurales de un cultivo de cebada, durante el segundo semestre del año 2020, ubicado en la región pampeana. La información utilizada para los 140 días del ciclo del cultivo fueron puntuales (estación de balance de energía con registro continuo y datos puntuales con espectroradiómetro de mano) y espaciales (con datos captados por la misión europea SENTINEL-2).

A partir de los datos tomados por la estación de medición, instalada sobre la parcela sembrada de cebada, se pudo hallar la relación existente entre la temperatura radiativa de superficie y el contenido volumétrico de agua en suelo a los 0.4 m con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.66. Además, se observó que las condiciones meteorológicas fueron adecuadas para el desarrollo del cultivo.

Las reflectancias obtenidas a partir de las imágenes satelitales se utilizaron para el cálculo de índices de vegetación durante los meses entre la siembra y la cosecha del cultivo. Los índices NDVI, MSI y NDWI evidenciaron una alta consistencia entre sí y permitieron detectar las variaciones de las condiciones de la cebada para cada una de sus etapas de desarrollo. Además, se pudieron determinar las diferentes condiciones hídricas en el sistema suelo-planta debido a la presencia de una leve pendiente topográfica en la parcela de estudio.

El estudio del índice de vegetación MSI (a escala puntual y espacial con datos SENTINEL-2) indicó que el cultivo no pasó por niveles de estrés hídrico, lo cual es concordante con las condiciones meteorológicas de la zona, en donde las precipitaciones fueron óptimas para todo el segundo semestre del año 2020.

A lo largo de este análisis, se relacionaron las humedades de suelo con combinaciones de respuestas espectrales de las regiones R (620-750 nm), NIR (750-1400 nm) y SWIR (1400-2500 nm) del espectro electromagnético, a través de diferentes modelos lineales generalizados, con el fin de poder cuantificar niveles de estrés hídrico. Sin embargo, dadas las condiciones óptimas en la que se

desarrolló el cultivo, éste contó con una disponibilidad de agua adecuada, por lo que evaluar precisiones de los niveles de estrés no fue posible. Sin embargo, la sensibilidad de los sectores espectrales analizados muestra aptitud para ser usados como indicadores de estrés.

# Índice General

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	9
1.2. Hipótesis y objetivos del trabajo . . . . .	10
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Misión SENTINEL-2 . . . . .	11
2.1.1. Resoluciones . . . . .	11
2.1.2. Bandas espectrales . . . . .	13
2.1.3. Tipos de productos . . . . .	15
2.2. Índices de vegetación . . . . .	15
2.2.1. NDVI . . . . .	17
2.2.2. MSI . . . . .	18
2.2.3. NDWI . . . . .	19
<b>3. Metodología</b>	<b>20</b>
3.1. Área de estudio . . . . .	20
3.2. Datos de terreno . . . . .	24
3.2.1. Sensor CNR4 . . . . .	27
3.2.2. Sensores CS655 y SoilVUE . . . . .	28
3.2.3. Sensor SNR-NDVI . . . . .	28
3.2.4. Sensor SI-111 . . . . .	29
3.3. Datos de satélites . . . . .	29
<b>4. Resultados</b>	<b>31</b>
4.1. Datos de terreno . . . . .	31
4.2. Datos Satelitales . . . . .	38
4.3. Índices de vegetación . . . . .	41
4.3.1. NDVI . . . . .	41
4.3.2. MSI . . . . .	49
4.3.3. NDWI . . . . .	52
<b>5. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>A. Correlaciones de la humedad de suelo</b>	<b>58</b>
<b>B. Radiación relativa</b>	<b>61</b>
<b>C. Corrección de temperatura radiativa por emisividad</b>	<b>63</b>

# Índice de figuras

2.1. Bandas espectrales del satélite SENTINEL-2, resoluciones espaciales y espectrales. . . . .	12
2.2. Sector <i>Red Edge Vegetation</i> del espectro electromagnético . . . . .	14
2.3. Índices estructurales y fisiológicos . . . . .	16
2.4. Reflectancias involucradas en el cálculo del índice NDVI en los sectores R y NIR para cultivos verdes y maduros. . . . .	17
2.5. Reflectancias involucradas en el cálculo del índice MSI en los sectores NIR y SWIR para cultivos verdes y maduros. . . . .	18
2.6. Reflectancias involucradas en el cálculo del índice NDWI en los sectores R y NIR para cultivos verdes y maduros . . . . .	19
3.1. Zona de estudio ubicada en el partido de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina	20
3.2. Datos meteorológicos promedios entre 1981-2010 de la zona de estudio. . . . .	21
3.3. Evolución del cultivo de la cebada <i>Andreia</i> para la zona de Tandil tomada de los modelos CRONOS (Modelos CRONOS, 2021) . . . . .	22
3.4. Perfil representativo de la parcela implantada con cebada. . . . .	24
3.5. Estación de Balance de Energía (EB+) utilizada, instalada en el cultivo de cebada.	24
3.6. Radiación de onda corta entrante a la superficie terrestre según la cobertura nubosa.	28
3.7. Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes satelitales y las fechas correspondientes. . . . .	30
4.1. Contenido volumétrico de agua en suelo (VWC) a diferentes profundidades y precipitaciones sobre la parcela implantada. . . . .	32
4.2. Valores de radiación solar entrante para días despejados, medidos por el sensor CNR4.	33
4.3. Temperatura radiativa de superficie promedio medida por el sensor SI-111. . . . .	34
4.4. Valores de temperatura radiativa de superficie y temperatura del aire, para días cercanos a precipitación máxima. . . . .	34
4.5. Variación de la temperatura radiativa emitida por la superficie (NDVI>0.3), según el contenido volumétrico de agua en suelo para diferentes profundidades. . . . .	35
4.6. Firmas espectrales adquiridas por el espectraloradiómetro SVC HR-1024i. . . . .	37
4.7. Valores de reflectancias obtenidos de las imágenes satelitales. . . . .	40
4.8. Evolución temporal y dispersión de las reflectividades R y NIR adquiridas del sensor SNR . . . . .	42
4.9. Índice NDVI calculado con datos del sensor SNR. . . . .	43
4.10. Valores de reflectancias promediados, utilizando las firmas hiperespectrales adquiridas <i>in situ</i> , para los sectores R y NIR. . . . .	44
4.11. Índice NDVI a partir de relectancias R y NIR promediadas. . . . .	46
4.12. Reflectancias obtenidas de las imágenes satelitales de la plataforma SENTINEL-2 para las bandas B4 (R), B5, B6, B7 y B8 (NIR). . . . .	46

4.13. Reflectancias de las bandas B4, B5, B6, B7 Y B8 obtenidas de las imágenes satelitales de la plataforma SENTINEL-2. . . . .	47
4.14. Reflectancias de las bandas B4 y B8, y evolución temporal del NDVI a partir de las imágenes satelitales de la plataforma SENTINEL-2. . . . .	48
4.15. Mapas de NDVI a partir de las imágenes satelitales. . . . .	49
4.16. Valores de reflectancias promediados, para las regiones NIR y SWIR . . . . .	50
4.17. Valores de reflectancias de las bandas B8 (NIR), B11 y B12 (SWIR) obtenidas de las imágenes satelitales. . . . .	50
4.18. Dispersión de la reflectancia de las bandas B8 y B11. Evolución temporal del índice MSI. . . . .	51
4.19. Mapas de MSI a partir de las imágenes satelitales de la plataforma SENTINEL-2. . . . .	52
4.20. Reflectancias correspondientes a las bandas B8A y B12 adquiridas por el sensor MSI abordo de la plataforma SENTINEL-2. . . . .	53
4.21. Valores de reflectancias de las bandas B8A y B12 adquiridas de las imágenes satelitales. Evolución temporal del índice NDWI. . . . .	53
4.22. Mapas de NDWI a partir de las imágenes satelitales. . . . .	54
A.1. Sensores SoilVUE y CS655 en el perfil de suelo. . . . .	59
A.2. Correlaciones de contenido volumétrico de agua en suelo, entre sensores CS655 y SoilVUE. . . . .	60

# Capítulo 1

## Introducción

La teledetección consiste en la medición de la energía electromagnética que emite una superficie de un objeto, sin tener un contacto directo con el mismo. Para esto se utilizan instrumentos como satélites o sensores, existiendo una gran variedad en éstos con métodos de adquisición específicos para cada circunstancia (Sobrino et al., 2000). Las áreas dentro del ámbito científico, político y económico en las que se aplica el estudio remoto de superficies son diversas, como ejemplos se pueden mencionar a la arqueología (Kucukkaya, 2004; Parcak, 2009), la geología (Drury, 1987; X. Chen y Campagna, 2009), la minería (Sabins, 1999), la pesca (Solanki et al., 2005), la distribución poblacional (Elvidge et al., 1997; Yang et al., 2013; Karume et al., 2017) y la agricultura (Piccolo et al., 2013; Sahoo et al., 2015; Holzman et al., 2021b), entre otras. Debido a la creciente demanda de alimentos como consecuencia del aumento poblacional a nivel mundial (Maddison, 2009), a la mejora en las producciones agrícolas para la optimización de costos y a un manejo sustentable de las áreas que abarca dicha actividad, el mundo científico ha generado nuevas tecnologías y metodologías de estudio para satisfacer estas necesidades sin tener como obstáculos, por ejemplo, regiones geográficas. Es por esta razón que la teledetección en el área de la producción agrícola se encuentra en constante desarrollo durante las últimas décadas.

En Argentina, la profundización en las mejoras de las técnicas agrícolas para un mayor rendimiento de cultivos se debe principalmente a la expansión de los usos de los cereales oleaginosos (ej. soja, girasol, maní) para la producción de biocombustibles (SAGPyA y IICA, 2006) y de la economía de exportación ganadera y agrícola. La zona de estudio que se describe a lo largo de este trabajo se encuentra en la región pampeana (Olivera Rodriguez et al., 2020), con más del 80 % de la producción de granos del país (Magrin et al., 2006), por lo que el avance en técnicas de producción y mejoras en los rendimientos de los cultivos, y estudios continuos de las problemáticas locales y regionales es de suma importancia para la economía del país.

La baja disponibilidad de agua en suelo para la producción de cultivos bajo secano, a pequeña y gran escala, es actualmente una de las principales problemáticas con las que se encuentra el sector agrícola a nivel mundial, en donde la región pampeana no es exenta (Steduto et al., 2012). El contenido de agua almacenado en suelo, producto de las precipitaciones, pasa a ser el agua disponible para el desarrollo del cultivo, siendo fundamental para el aprovechamiento de nutrientes y la generación de condiciones óptimas (identificable a partir de la clorofila) para un rendimiento final que sea económicamente rentable (Ceccato et al., 2001; Lusi et al., 2015).

En regiones que se encuentran en cercanías a diques, represas, ríos, arroyos, aguas subterráneas, entre otros cuerpos de agua habilitados para riego artificial de cultivos, es de utilidad contar

con monitoreos de riego y de contenido de agua en suelo que presentan estas áreas. La región pampeana es una zona en donde se puede acceder al riego artificial, pero hacer un manejo rentable y sustentable va a depender del seguimiento que se le haga a las condiciones hídricas del cultivo y de los rendimientos finales. Por otro lado, el área bajo riego en la región pampeana (alrededor del 10 %) es significativamente menor, comparado con el área de secano. Poder realizar estos seguimientos de manera remota y a escala espacial adecuada es de gran interés, ya que se podrían acceder a monitoreos de zonas con poca disponibilidad de datos y no sería necesario la posesión de instrumentos de mano como sensores de humedad, de reflectancia, de temperatura, entre otros. Por lo tanto, brindar el panorama hídrico de un cultivo a partir de información registrada por medio de sensores a bordo de plataformas satelitales es la clave para predecir y manipular el desarrollo del mismo.

## 1.1. Antecedentes

Las técnicas de teledetección aplicadas a la vegetación y, en especial a la actividad agrícola, son diversas y están en un constante estudio desde las últimas décadas. Estas técnicas abarcan métodos de estudios hiperespectrales y de banda ancha, aplicados con las consideraciones requeridas según el tipo de vegetación que se esté estudiando (Thenkabail et al., 2019). Los datos hiperespectrales son de gran utilidad ya que su resolución espectral es alta (Thenkabail, 2015; Ishida et al., 2018), por lo que las combinaciones entre estos datos permite la generación de índices hiperespectrales de vegetación. Estos índices son utilizados para determinar características bioquímicas, biofísicas, estrés y contenido de agua en el sistema suelo-planta, entre otras, de la vegetación estudiada. Algunos ejemplos de estos índices relacionados a la detección del estrés hídrico en las plantas son los índices de vegetación de diferencia normalizada "NDVI" (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1974), de agua de diferencia normalizada "NDWI" (*Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996), de estrés hídrico "MSI" (*Moisture Stress Index*) (Hunt y Rock, 1989; Ceccato et al., 2001), y de estrés de la vegetación de borde rojo "RVSI" (*Red-Edge Vegetation Stress Index*) (Merton y Huntington, 1999), entre otros índices que utilizan los valores de reflectancias en determinadas longitudes de onda.

Para el estudio de las características de la vegetación, en este trabajo, se utilizaron índices de vegetación derivados de datos espectrales de banda ancha. Con los avances de las tecnologías de adquisición a nivel espacial y la necesidad de eliminar los efectos de la atmósfera y el suelo, el ámbito científico comenzó a analizar las respuestas de índices hiperespectrales conocidos, para hallar sus equivalentes utilizando bandas anchas (Pearson y Miller, 1972; Rouse et al., 1974; Huete, 1988; Gitelson et al., 2002). Sin embargo, se debe considerar que estos índices presentan ciertas limitaciones (Baret y Guyot, 1991; Li y Wang, 2011) ya que su eficiencia depende de la calidad, en cuanto a resoluciones y cantidad, de los datos con los que se cuenta para el análisis de los mismos en un determinado tipo de vegetación (le Maire et al., 2008; Wang y Li, 2012).

Las propuestas para la cuantificación del estrés hídrico en la vegetación son diversas, dependiendo del tipo, la zona en la que esta se encuentra, el tipo de datos con el que se cuenta, entre demás consideraciones (Govender et al., 2009). Para la zona de estudio en donde se desarrolla este trabajo, correspondiente a la región pampeana, se cuenta con una numerosa cantidad de estudios previos relacionados, no sólo del estrés hídrico, sino que a la observación de demás características tanto relacionados a los comportamientos espectrales de ciertos cultivos típicos como a las relaciones complejas de los sistemas suelo y atmósfera. El contenido de agua utilizado y la carga de contami-

nación en la región debido a cultivos de cebada y soja (Olivera Rodriguez et al., 2020, 2021), y la caracterización del uso del suelo con estos cultivos (Guevara Ochoa et al., 2018), interacciones entre aguas subterráneas y superficiales (Guevara Ochoa et al., 2019), los niveles freáticos y sus caudales de la región (Zeme, 2015), determinación de contenidos de clorofila por medio de datos multiespectrales en cultivos de maíz (Carmona et al., 2015), medición de evapotranspiración por medio de diferentes métodos (Degano et al., 2020; Carmona et al., 2018), son algunos de los estudios zonales.

La detección de las condiciones hídricas de los cultivos permite tener un panorama del estrés que atraviesan los mismos. En la región pampeana estas condiciones han sido determinadas a partir de temperaturas radiativas, tomando las respuestas electromagnéticas del cultivo en la parte del infrarrojo térmico (TIR) durante su desarrollo (Houspanossian et al., 2008; Holzman et al., 2012). Las relaciones entre las temperaturas radiativas emitidas por la cubierta vegetal en la superficie con ciertos índices de vegetación como NDVI y el índice de vegetación de diferencia de temperatura "TDVI" (*Temperature Difference Vegetation Index*), y valores de contenido en agua en hoja obtenidos por estudios en laboratorios (Mallick et al., 2009; Holzman et al., 2021a), brindan resultados útiles para la estimación del estrés hídrico en cultivos. Por medio de la utilización de estas temperaturas captadas en las longitudes de onda del TIR, además, se han podido determinar contenidos de agua disponibles en diferentes horizontes de suelo (Holzman et al., 2021b).

## 1.2. Hipótesis y objetivos del trabajo

La hipótesis que se planteó para llevar a cabo este proyecto final de licenciatura está relacionada a que la información brindada por sensores remotos pasivos en el espectro solar y térmico, da indicios de ciertas variables asociadas a la condición hídrica del cultivo. Por lo que, el objetivo general de este trabajo consiste en definir las condiciones biofísicas y estructurales de superficie de un cultivo de cebada, a partir de la relación Visible e Infrarrojo cercano (VNIR), medio (SWIR) y TIR.

Este objetivo se pudo llevar a cabo a partir de objetivos más específicos como:

- La aplicación de diferentes índices de vegetación como el NDVI, MSI y NDWI con información de terreno y de satélite.
- La evaluación de las respuestas espectrales de la superficie con diferentes contenidos de agua y en las distintas etapas de desarrollo del cultivo. A su vez, la complementación de esta información con datos del Infrarrojo Térmico.
- La generación de modelos de regresión con datos de terreno que determinen, por ejemplo, el contenido de agua en suelo, y la aplicación de éstos a la información captada por el sensor *Multi Spectral Instrument* (MSI) a bordo de las plataformas SENTINEL-2 A y B.
- La determinación de capacidad de las bandas espectrales del sensor MSI para diferencias características morfológicas en la zona de estudio.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Misión SENTINEL-2

La misión SENTINEL-2 surge de la colaboración entre la ESA (*European Space Agency*), la Comisión Europea y diferentes agentes e industrias del sector aeroespacial. Esta misión comprende dos satélites idénticos denominados A y B lanzados al espacio en 2015 y 2017 respectivamente, con una vida útil estimada de 7.25 años. Ambos operan simultáneamente en una misma órbita polar sincrónica con el sol para garantizar que el ángulo de la luz solar sobre la superficie de la Tierra se mantenga constante, separados por una fase de  $180^\circ$  a una altitud media de 786 km con un ancho de *swath* de 290 km. El objetivo de la misión es realizar un seguimiento y supervisión de la variabilidad de las condiciones de la superficie terrestre, islas y aguas costeras con una cobertura que abarca una banda de latitud entre  $56^\circ\text{S}$  (Cabo de Hornos, América del Sur) y  $83^\circ\text{N}$  (Groenlandia) (European Space Agency, 2018).

Cada uno de estos satélites que comprenden la misión tienen a bordo un instrumento óptico multiespectral MSI, el cual funciona de forma pasiva cuantificando la energía electromagnética del sol reflejada por la superficie, capturando información en un total de 13 bandas espectrales. A continuación se describen las resoluciones (temporales, espaciales, espectrales y radiométricas) y los tipos de productos obtenidos a partir de la misión SENTINEL-2 <sup>1</sup>.

#### 2.1.1. Resoluciones

La resolución temporal indica el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un mismo punto. Ambos satélites de la misión SENTINEL-2 proporcionan mediciones con una frecuencia de visita de 10 días cada uno y con una visita combinada de 5 días.

Con lo que respecta a las resoluciones espaciales, es decir al tamaño del píxel de las imágenes, el satélite tiene resoluciones de 10 m, 20 m o 60 m.

La resolución espectral es el ancho de las bandas en las que el sensor a bordo del satélite capta la radiación electromagnética. SENTINEL-2 A y B, como se mencionó con anterioridad, presentan un total de 13 bandas en el espectro electromagnético distribuidas en el VIS-NIR-SWIR. La Figura

---

<sup>1</sup>La información descripta se encuentra disponible de forma libre en el manual de usuario del satélite, el cual se lo puede encontrar en la página de (European Space Agency, 2018)

2.1 muestra esta distribución junto con las resoluciones espaciales del sensor MSI.

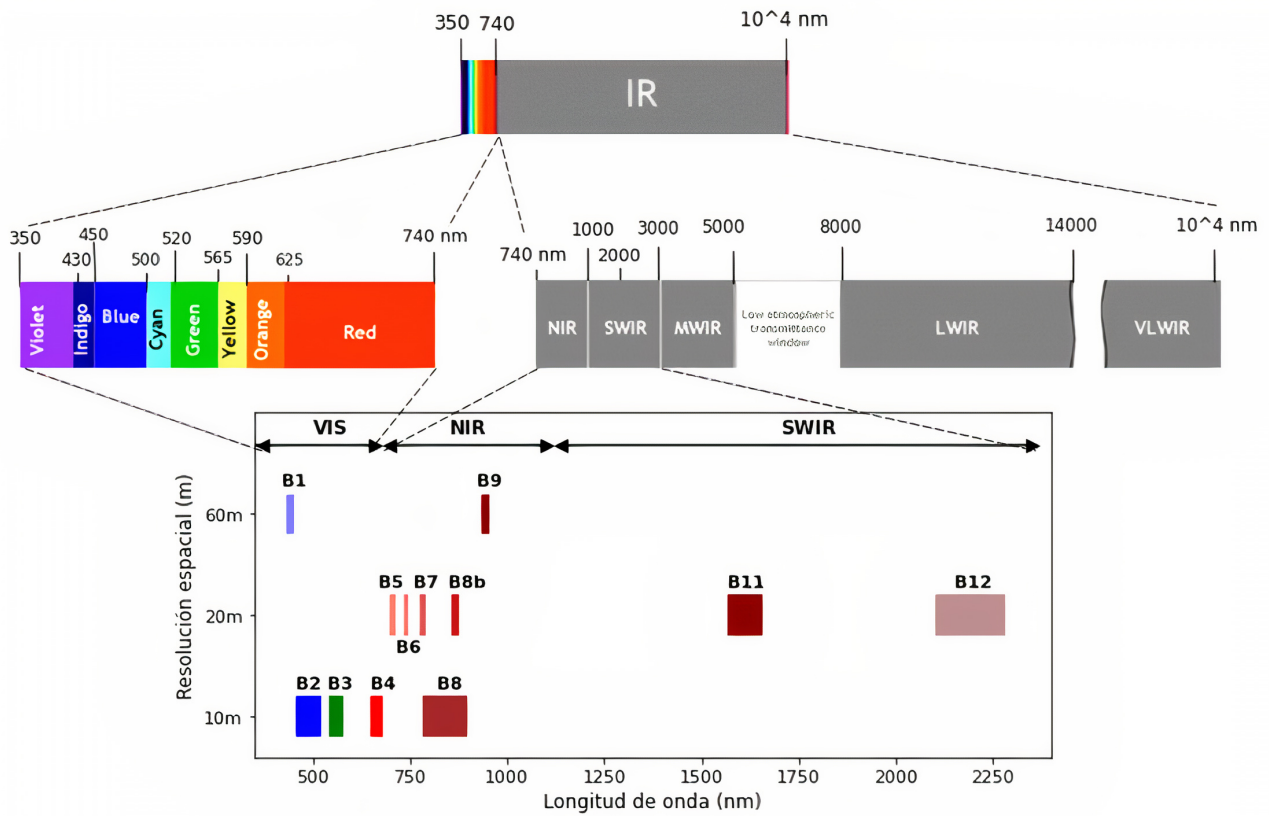


Figura 2.1: Bandas espectrales del satélite SENTINEL-2 ubicadas en sus respectivas longitudes de onda y resoluciones espaciales, junto a la parte del espectro electromagnético en que opera. Fuente: European Space Agency (2018)

En la Tabla 2.1 se describen de manera simplificada los números, anchos y longitudes de onda media para cada una de las bandas.

Tabla 2.1: Descripción de las bandas de SENTINEL-2, con sus respectivas longitudes de onda media y ancho de banda.

Banda	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda media (nm)
B1	20	443
B2	65	490
B3	35	560
B4	30	665
B5	15	705
B6	15	740
B7	20	783
B8	115	842
B8A	20	865
B9	20	945
B10	30	1375
B11	90	1610
B12	180	2190

La resolución radiométrica indica la sensibilidad del sensor que captura la radiación reflejada, es decir, la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones de ésta. Por lo tanto, a mayor resolución mayor número de detalles capturados en la imagen. Para el instrumento MSI a bordo de ambos satélites esta resolución es de 12 bits, lo que permite adquirir la imagen con 4095 niveles de energía. Comparando, a modo de ejemplo, la misión SENTINEL-2 presenta una mayor resolución radiométrica que la misión Landsat 5 y 7, la cual tiene una resolución de 8 bits (256 niveles de energía).

### 2.1.2. Bandas espectrales

La misión SENTINEL-2 cuenta con una variedad de bandas espectrales ubicadas en las regiones del VIS-NIR-SWIR para lograr una cobertura de reflectancias de vegetación amplia. A continuación se describen, de manera genérica, las bandas presentes en cada una de las secciones del espectro electromagnético y la utilidad de cada una con respecto a análisis de vegetación.

En la región del VIS, el sensor MSI cuenta con las bandas espectrales B1, B2, B3 y B4. La energía absorbida en esta región del espectro es utilizada por las plantas para sintetizar los compuestos orgánicos que necesitan para su mantenimiento y crecimiento, por lo que el VIS se caracteriza por tener bajas reflectancias por las mayores absorciones de los pigmentos de la vegetación como por ejemplo la clorofila, la cual absorbe la luz azul y roja para la fotosíntesis pero no absorbe a la luz verde, por lo que la mayoría de las plantas presentan este color (Belward, 1991).

SENTINEL-2 cuenta con las bandas adicionales B5, B6 y B7 denominadas de borde rojo (*Red Edge Vegetation*), las cuales no son frecuentes en otras misiones satelitales. Estas bandas captan la energía reflejada en la transición significativa que existe entre la alta absorción por la clorofila en las longitudes de onda del VIS, lo que provoca una baja reflectancia, y la alta reflectancia en el NIR como consecuencia de la estructura celular de las hojas (Horler et al., 1983). En la Figura 2.2 se indica cuál es la región descrita y las longitudes de onda en que se encuentran dichas bandas.

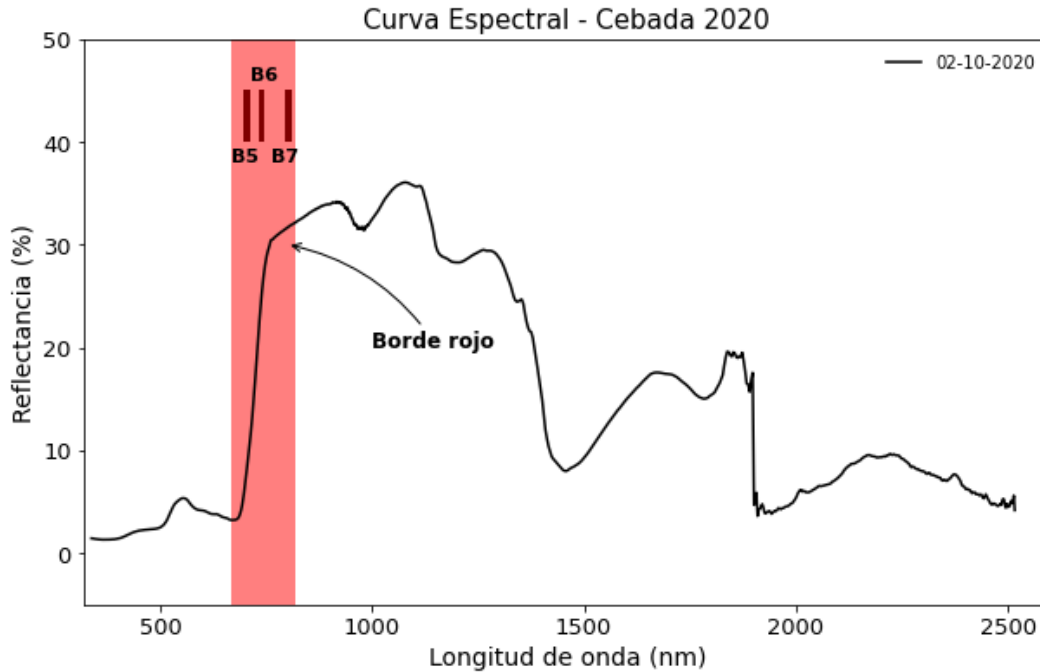


Figura 2.2: Curva hiperespectral tomada por el espectroradiómetro de mano SVC HR-1024i (ver más detalles en Sección 3.2) durante la campaña del día 2 de octubre del año 2020 sobre el cultivo de cebada en estudio. Se remarca la sección del borde rojo (*Red Edge Vegetation*) y se indican las posiciones de las bandas B5, B6 y B7 del sensor MSI de SENTINEL-2.

El punto de inflexión que se genera en el pasaje de VIS-NIR, es decir el punto de máxima pendiente en la curva generada entre estas longitudes de onda dentro de la región coloreada en rojo de la Figura 2.2, es correlacionable con el contenido de clorofila y de agua en las hojas de las plantas. Este punto de inflexión del borde rojo se desplaza a longitudes de onda mayores a medida que aumentan las concentraciones de clorofila (Guyot et al., 1992).

La vegetación frecuentemente presenta una alta reflectancia y transmitancia en la región del NIR, ya que los niveles de energía no son lo suficientemente altos para las reacciones fotoquímicas y por lo tanto no son absorbidos por los cloroplastos y otros pigmentos (Guyot et al., 1992). La proporción de transmitancia y reflectancia de energía dependerá de la distribución, tamaño y forma de las células de las hojas de las plantas, lo que afecta directamente al contenido de agua que albergan las mismas, generando menores reflectancias a mayor contenido de agua. Además, las reflectancias en esta región también se ven afectadas por el área de cobertura del dosel de la vegetación, debido al suelo de fondo (Belward, 1991). Para esta sección del espectro electromagnético SENTINEL-2 cuenta con las bandas B8, B8A y B9.

Finalmente, SENTINEL-2 cuenta con las bandas espectrales B11 y B12 ubicadas en la región SWIR del espectro electromagnético. Esta región presenta una sensibilidad al contenido de agua

en las hojas de la planta, cuanto menor sea el contenido de agua mayor será la reflectancia en el SWIR. El contenido de agua de una planta depende del porcentaje del contenido de humedad y del grosor de las hojas. Por lo tanto, como los efectos de la absorción de agua son tan significativos, los cambios en la reflectancia de esta sección del espectro electromagnético son más detectables cuando el contenido de agua es muy bajo (Belward, 1991; Guyot et al., 1992).

### 2.1.3. Tipos de productos

Los productos generados por SENTINEL-2 presentan 5 niveles de procesamiento, los cuales son descritos en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Descripción de los niveles de procesamiento de los productos de SENTINEL-2.

Nivel de producto	Descripción
Nivel-0	Datos de imagen sin procesar, comprimidos, que contienen toda la información requerida para generar los niveles de procesamiento del producto de Nivel 1 y superiores.
Nivel-1A	Se obtiene descomprimiendo los datos de la imagen sin procesar del Nivel 0. Contiene un modelo geométrico que permite ubicar cualquier píxel de la imagen, cuya coordenada se refiere al centro de cada uno.
Nivel-1B	Imágenes con correcciones radiométricas a valores de radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA, Top Of Atmosphere radiance) y en la geometría del sensor. La coordenada del píxel también está referida al centro del mismo.
Nivel-1C	Imágenes ortorectificadas corregidas geométrica y radiométricamente. Proporcionan las reflectancias de la parte superior de la atmósfera (TOA). Estos productos incluyen datos de tierra/agua, máscaras de nubes y ECMWF (columna total de ozono, columna total de vapor de agua y presión media al nivel del mar). Las coordenadas de píxeles se refieren a la esquina izquierda superior del mismo.
Nivel-2A	Se aplican correcciones atmosféricas a los productos del Nivel-1C para proporcionarle a la imagen valores de reflectancias por debajo de la atmósfera (BOA, <i>Bottom-Of-Atmosphere reflectances</i> ), es decir, reflectancias correspondientes a la superficie observada. Contiene mapas de espesor óptico de aerosol (AOT), un mapa de vapor de agua (WV) y un mapa de clasificación de escenas (SCM).

De los productos generados por la misión de SENTINEL-2 sólo dos se encuentran disponibles para los usuarios: Nivel-1C y Nivel-2A. Para llevar a cabo este estudio se utilizaron imágenes del Nivel-2A ya que no requiere de un procesamiento de corrección por parte del usuario.

## 2.2. Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas que determinan las principales propiedades estructurales, bioquímicas y fisiológicas de la vegetación. Estos índices suelen ser una combinación

de las bandas espectrales ubicadas en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

La propiedad estructural que se mide con frecuencia es el índice de área foliar (LAI) (Jordan, 1969). La mayoría de los índices que describen a estas propiedades se formularon para sistemas de banda ancha (como las mediciones obtenidas de satélites) y tienen equivalentes hiperespectrales de banda estrecha. Las propiedades bioquímicas incluyen agua, pigmentos (clorofila, carotenoides, antocianinas) (Curran, 1989; Gamon y Surfus, 1999) y compuestos ricos en nitrógeno (Ustin et al., 2009).

Los índices fisiológicos y de estrés miden los cambios inducidos por el contenido de clorofila (Horler et al., 1983) y el contenido de agua en las hojas<sup>2</sup>, entre otros (Hunt y Rock, 1989; Holzman et al., 2021a). A diferencia de los índices estructurales, los índices bioquímicos y fisiológicos son estrictamente hiperespectrales por lo que requieren bandas estrechas con un ancho menor o igual a 10 nm y centros de bandas específicos que no son muestreados por sistemas de banda ancha (Thenkabail et al., 2019).

Para comprender los conceptos de estos índices, en la Figura 2.3 se representan de manera esquemática los índices estructurales y fisiológicos, observando un cultivo de cebada en etapa de crecimiento (Figura 2.3a) y en etapa de espigazón (Figura 2.3b, ver Sección 3.1). Como se mencionó con anterioridad, los índices estructurales representan características superficiales del cultivo. Los fisiológicos corresponden a la caracterización de los cambios provocados debido a las variaciones en la organización interna de las plantas como por ejemplo los cambios de coloración debido al contenido de clorofila, sujeto a alteraciones en la planta por el estado de desarrollo, el manejo de fertilizantes y estrés ambiental entre otros factores.

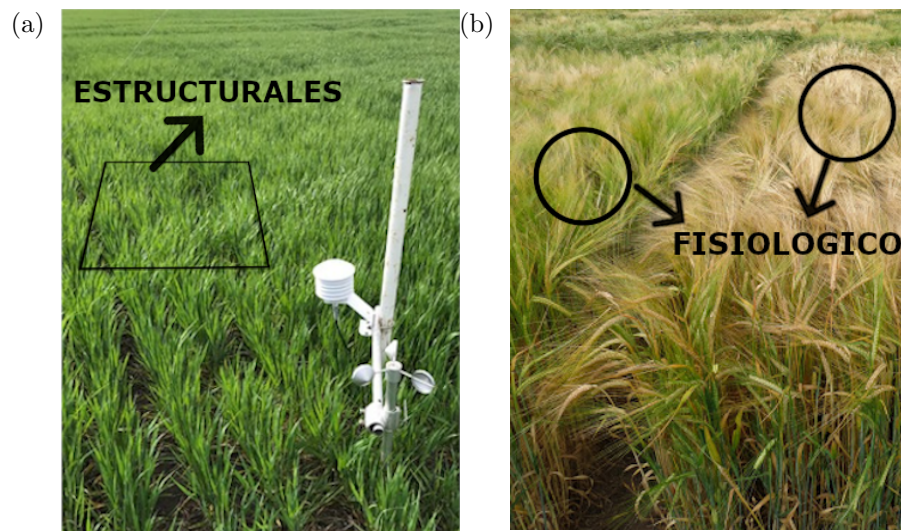


Figura 2.3: a) Representación cualitativa de un índice estructural como el área foliar. b) Los índices fisiológicos determinan el estado de las plantas basandose en su condición.

A continuación se describirán los índices de vegetación de banda ancha analizados en este proyecto. Para comprender las diferencias de cada uno de los índices aplicados en cada etapa del cultivo se utilizarán firmas espectrales para una fecha en la que el mismo se encuentra en etapa de

<sup>2</sup>Cantidad de agua contenida medida sobre la base de análisis volumétricos o gravimétricos.

máximo desarrollo (02-10-2020) y para una fecha previa a la cosecha (02-12-2020), con un estado madurativo óptimo de la planta en donde se presenta bajo contenido de agua en hoja.

### 2.2.1. NDVI

Uno de los índices de vegetación de banda ancha más comunes, estudiados y modificados es el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (Rouse et al., 1973). Este índice está relacionado con el grado de cobertura de vegetación y su estado fitosanitario. La clorofila se utiliza como un indicador de estado, así cuando una planta se deshidrata (consecuencia de una enfermedad o por maduración) se refleja más energía en las longitudes de onda del Rojo (R), en lugar de absorberla, y se genera una absorción mayor en las regiones del Infrarrojo cercano (NIR), ya que presenta sensibilidad a la variación del contenido de materia seca (Ghulam et al., 2008).

En la Figura 2.4 se puede observar de manera ejemplificada lo descrito anteriormente con dos curvas espectrales correspondientes al cultivo de cebada de la campaña del año 2020, las cuales corresponden a los meses de octubre y diciembre. En dichos meses, el contenido de agua y clorofila es mayor y menor respectivamente así también como su contenido en otros nutrientes (se explican estos cambios en el desarrollo del cultivo en la Sección 3.1).

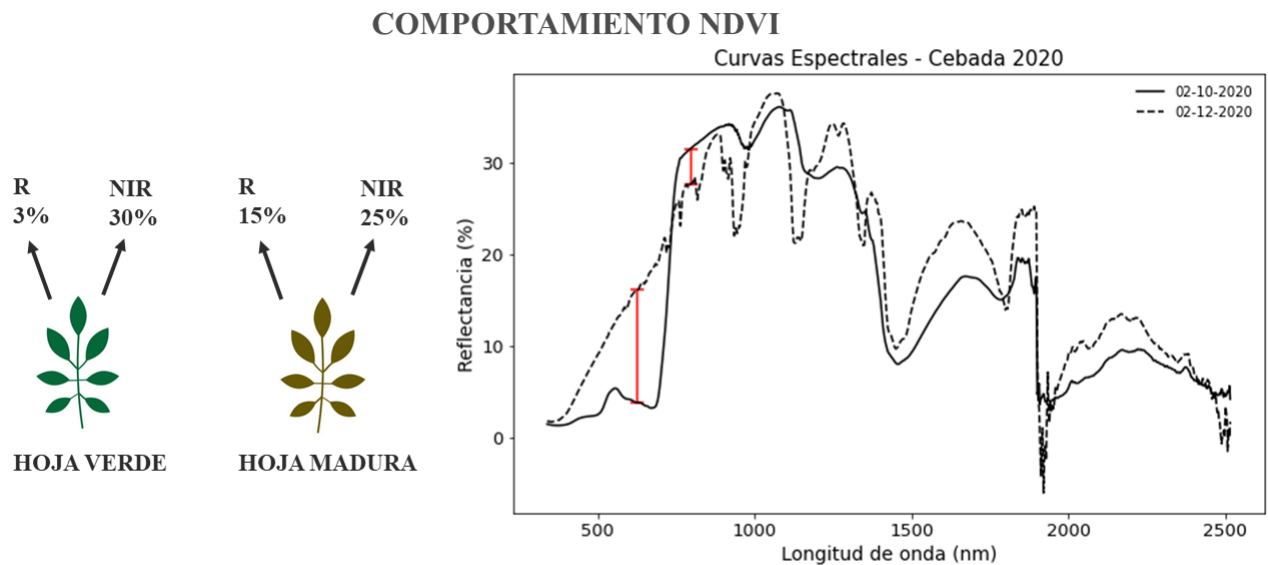


Figura 2.4: Ilustración explicativa sobre la energía reflejada según el estado de la planta junto con dos curvas espectrales correspondientes al cultivo de cebada estudiado aún verde (HOJA VERDE,02-10-2020) y maduro (HOJA MADURA,02-12-2020). Además, se indican entre ambas curvas las diferencias entre el R y NIR a lo largo del espectro electromagnético.

Por lo que, considerando lo mencionado con anterioridad, este índice utiliza la siguiente relación entre las reflectividades de superficie de las bandas espectrales del R y del NIR como se describe a continuación.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{2.1}$$

Los valores de NDVI varían entre -1 y 1. Valores cercanos a 1 corresponden a áreas con una vegetación más densa y verde. Considerando cultivos en etapa de desarrollo máxima, los valores que

presentan bajas de NDVI indican vegetaciones con problemas por enfermedad o estrés. Mientras que los valores de NDVI decrecientes durante la etapa de maduración del cultivo, especialmente en los de cebada, se corresponden a la pérdida de humedad de la planta hasta que el grano tenga el grado de maduración suficiente para ser cosechado. Valores próximos a 0 dan indicios de suelos desnudos y finalmente, cuando se trata de valores negativos cercanos a -1, indican cuerpos de agua.

### 2.2.2. MSI

El índice de estrés hídrico MSI es utilizado para medir el contenido de agua y estrés de las plantas, es decir, el estado en el cual la planta no realiza sus funciones fisiológicas de manera normal deteniendo su crecimiento y desarrollo debido a factores externos. Este índice se calcula como la relación entre una banda espectral ubicada en el NIR y otra en el infrarrojo medio (SWIR) como se observa en la Ecuación 2.2, ubicadas en las longitudes de onda de 820 nm y 1600 nm respectivamente para datos hiperespectrales (Hunt y Rock, 1989; Ceccato et al., 2001).

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR} \quad (2.2)$$

Para poder comprender este índice, en la Figura 2.5 se detallan nuevamente las dos curvas espectrales de las hojas de cebada de la campaña del año 2020 junto con las reflectancias en las partes del espectro electromagnético involucradas para el análisis de este índice.

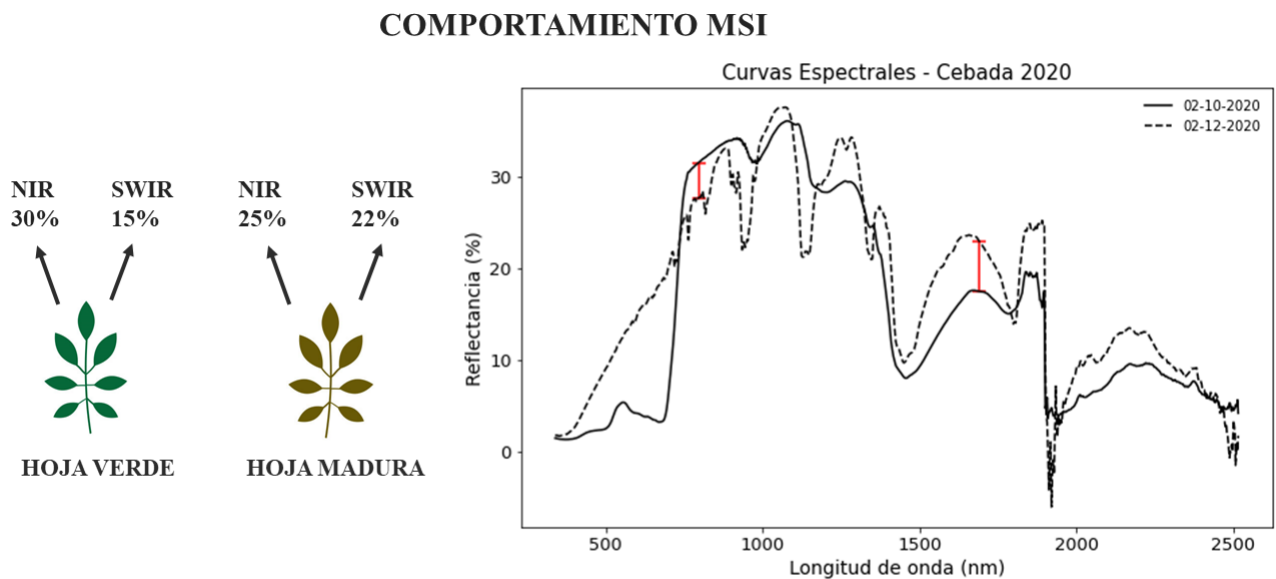


Figura 2.5: Ilustración y curvas espectrales para la comprensión del MSI según el estado fitosanitario de la planta. Para cada curva, se marcan las diferencias entre las partes del espectro electromagnético involucradas en el cálculo de este índice: NIR y SWIR.

Una planta inmadura (HOJA VERDE) que se encuentre en buen estado de salud, contiene un alto contenido de agua por lo que refleja más energía en el NIR y una cantidad menor en el SWIR. De manera contraria sucede en una planta con contenido de agua mínimo, ya sea porque se encuentra en un estado maduro (HOJA MADURA) o, en el caso en que la planta se encuentre en desarrollo, en un estado de estrés o enfermedad. Por lo que valores de MSI más altos indican un mayor estrés hídrico de las plantas y una cierta relación con menores contenidos de agua en el suelo.

### 2.2.3. NDWI

El índice de agua de diferencia normalizada NDWI (*Normalized Difference Water Index*) es utilizado para la detección de cambios en el contenido de agua de las hojas de la vegetación, siendo menos sensible a los efectos atmosféricos que el índice NDVI (Gao, 1996). El NDWI utiliza las reflectancias de superficie en las longitudes de onda del NIR (860 nm) y SWIR (1240 nm o 2130 nm), en donde la elección de dos posibles canales en la sección del SWIR se debe a que ambos son sensibles a los contenidos de agua en el sistema suelo-plantas (D. Chen et al., 2005). En la Ecuación 2.3 se muestra la expresión para el cálculo de dicho índice.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2.3)$$

Los valores de NDWI pueden variar entre -1 a 1, siendo los valores entre -1 y 0 los que indican superficies sin vegetación o agua en ella. Los valores cercanos a 0 evidencian zonas con baja cobertura vegetal o con alto estrés hídrico. Y por último los valores que rondan alrededor de 1 apuntan a zonas con cobertura vegetal y alto contenido de agua (Stimson et al., 2005). Este comportamiento del índice se puede observar de manera ilustrativa en la Figura 2.6, en donde nuevamente se detallan dos firmas hiperespectrales de reflectancias para las fechas del 2 de octubre y del 2 de diciembre. Aquí se puede observar que, cuando la vegetación analizada se encuentra en buen estado hídrico (HOJA VERDE), presenta una alta reflectancia en las longitudes de onda del NIR y una baja en las del SWIR, por lo tanto, el índice tendrá valores más altos. En la situación contraria (HOJA MADURA), el índice tendrá valores menores debido a que las reflectancias en el SWIR aumentan con respecto a las del NIR, como consecuencia del menor contenido de agua.

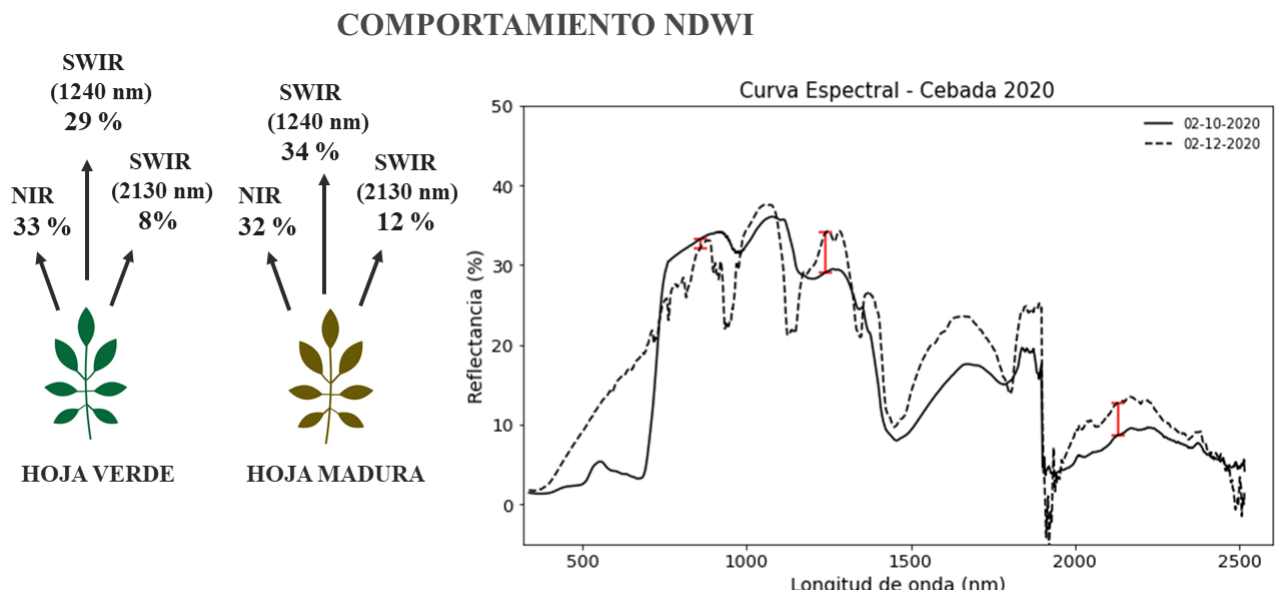


Figura 2.6: Ilustración y firmas hiperespectrales para la comprensión del índice NDWI según el estado de la planta. Para cada curva, se marcan las diferencias entre las partes del espectro electromagnético involucradas en el cálculo de este índice: 860 nm (NIR), 1240 nm y 2130 nm (SWIR).

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Área de estudio

El área de estudio en la que se desarrolla este trabajo se ubica en la zona del partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 3.1).

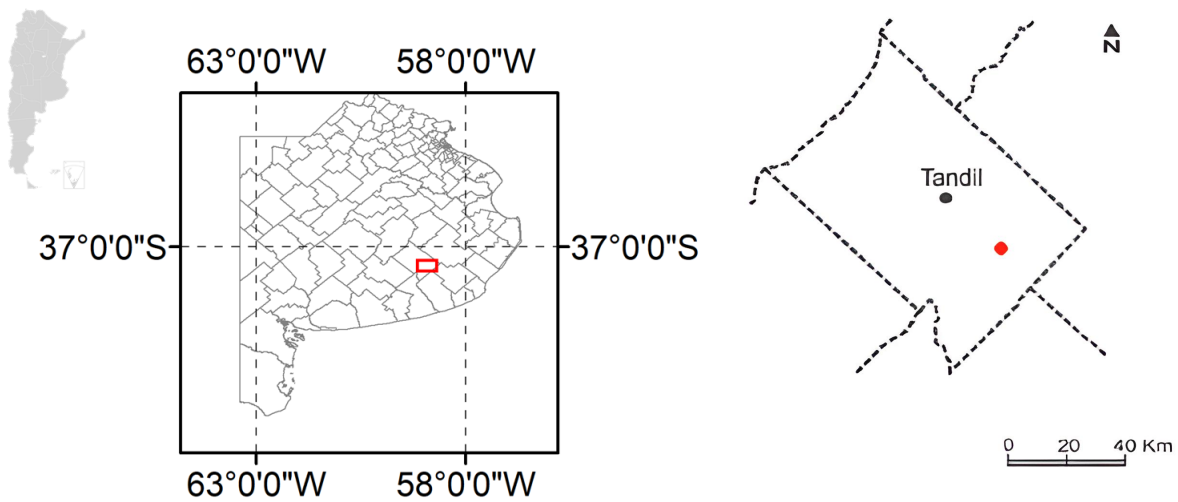


Figura 3.1: Zona de estudio ubicada en el partido de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina. El punto rojo indica la ubicación de la estancia "La Alcira" en la que se llevó a cabo el trabajo.

En la Figura 3.2 se detallan los registros medios mensuales de los datos meteorológicos recopilados entre los años 1981-2010 por el Servicio Meteorológico Nacional (SNM) en el aeropuerto de Tandil (Datos Abiertos Servicio Meteorológico Nacional, 2020). Se caracteriza por un clima subhúmedo a húmedo con precipitaciones medias anuales de 880 mm. La temperatura del aire promedio anual es de 16 °C y la humedad relativa del 70 % (Olivera Rodriguez et al., 2020).

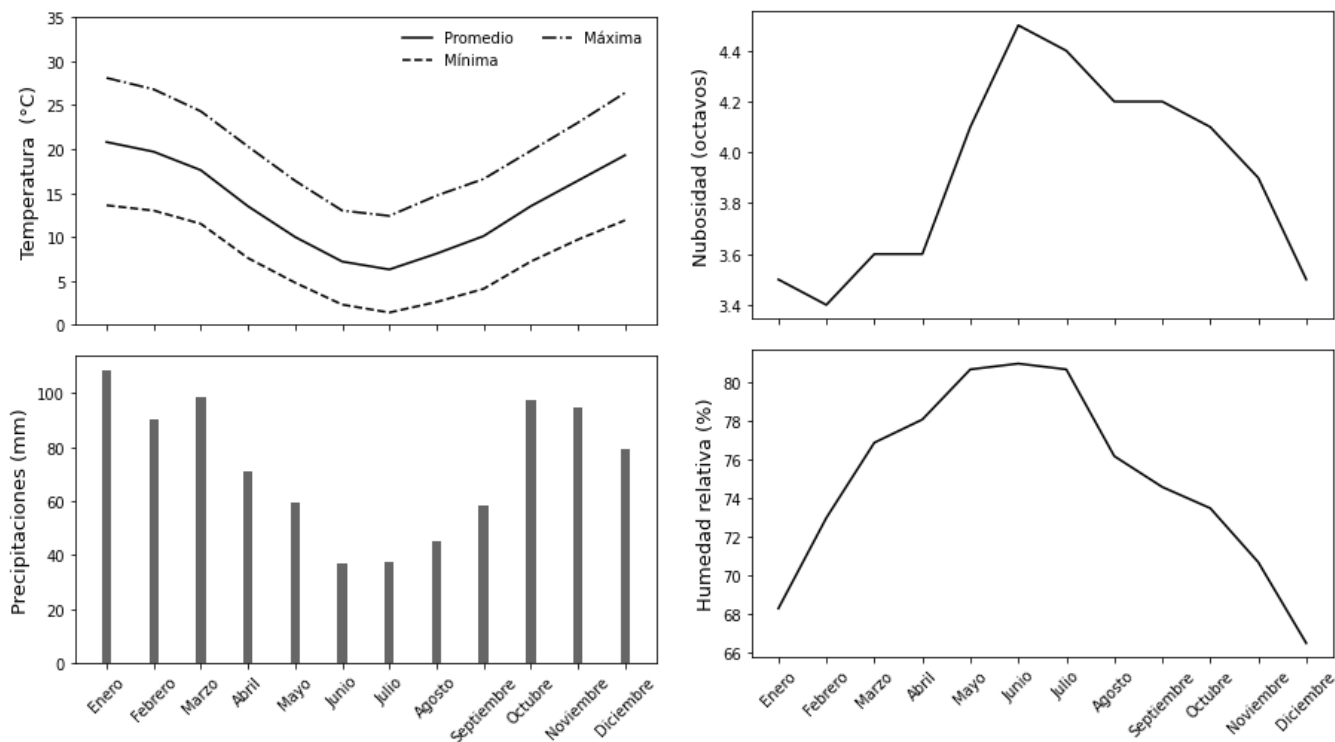


Figura 3.2: Datos meteorológicos promedios de precipitaciones, temperatura y humedad relativa del aire y nubosidad correspondientes a la estación ubicada en el aeropuerto de Tandil ( $37^{\circ}14'04''S$ ,  $59^{\circ}13'43''O$ , 175 m.s.n.m) entre 1981-2010. Fuente: SMN

El tipo de suelo característico de esta región se denomina Molisol, es de régimen údico y presenta un horizonte superficial fértil denominado mólico con alta capacidad de retención de agua (aproximadamente 170-220 mm para un espesor de suelo de 0.8 m) (INTA, 2020).

La estación de medición y el cultivo de estudio se encuentran ubicados en la estancia "La Alcira" ( $37^{\circ}29'57,03''S$ ,  $58^{\circ}54'32,99''O$ , 186 m.s.n.m.). Aquí se sembró una parcela de 15 ha con cebada cervcera de tipo Andreia el día 14 de julio 2020 con fecha de cosecha el 9 de diciembre. En la Figura 3.3 se detallan las etapas de desarrollo de dicho cultivo, calculadas a partir de la fecha de siembra. Para esto se utilizó el modelo perteneciente a la sección argentina de la serie CRONOS (Modelos CRONOS, 2021). Estos softwares sencillos basados en modelos termo-fotoperiódicos permiten predecir las etapas fenológicas en los cultivos. Los días estimados para cada etapa se basan en condiciones locales promedios pero están sujetos a cambios según el estado actual de precipitaciones, temperaturas y fertilizantes entre otros.

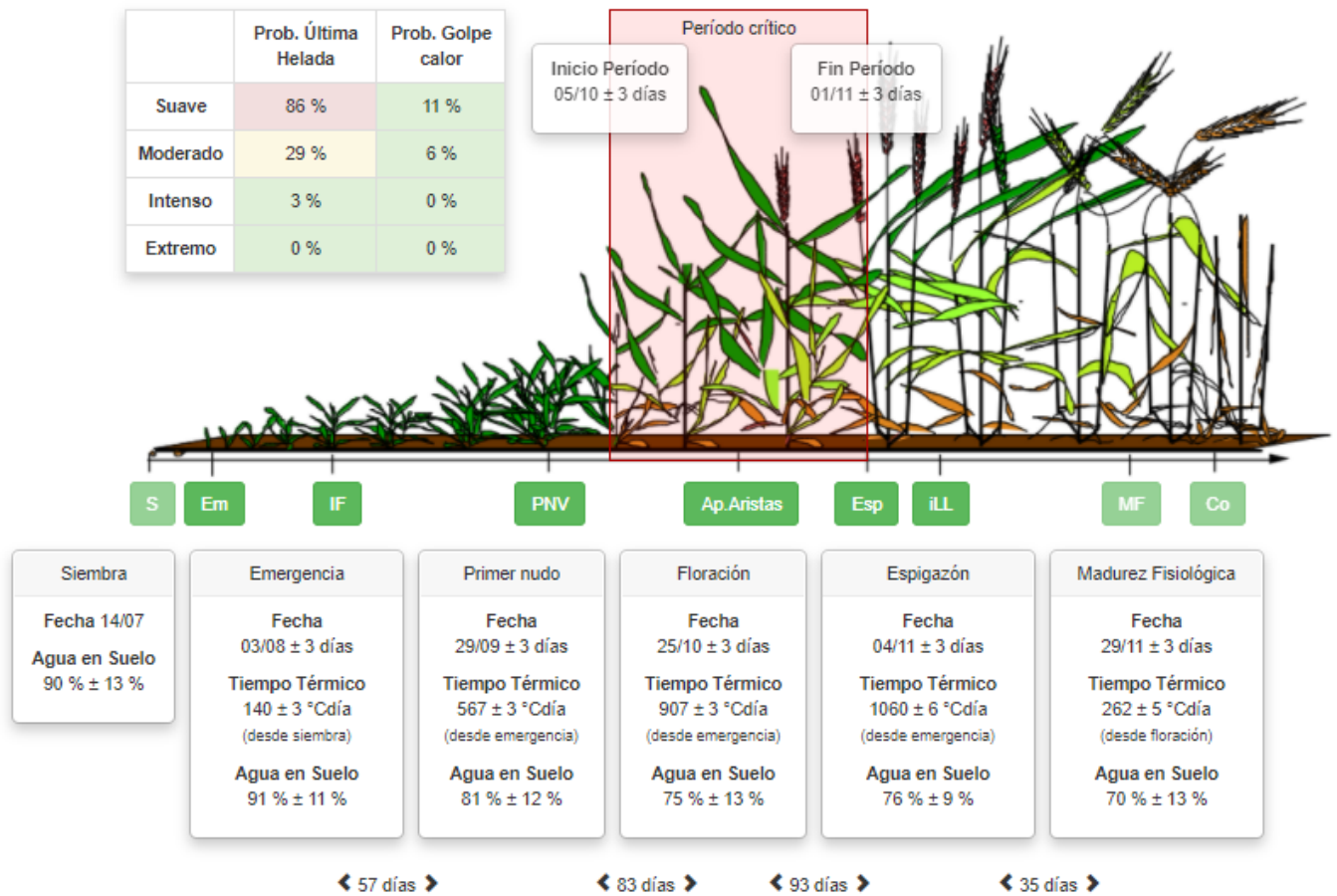


Figura 3.3: Evolución del cultivo de la cebada Andreia para la zona de Tandil tomada de los modelos CRONOS (Modelos CRONOS, 2021). S: Siembra. Em: Emergencia. IF: Iniciación Floral. PNV: Máximo Número de Primordios. Ap Aristas: Aparición de Aristas (Floración). Esp: Espigazón. iLL: Llenado de granos. MF: Madurez Fisiológica. Co: Cosecha

En la Tabla 3.1 se encuentra cada una de las etapas del cultivo con sus características. El ciclo total dura alrededor de 140 días y consume entre 1400-1500 °Cdía. Se debe tener en cuenta que la duración de cada una de las etapas del cultivo es estimada como se explicó con anterioridad.

Tabla 3.1: Desarrollo de cada etapa de evolución del cultivo.

Etapa	Tiempo térmico (°Cdía)	Altura planta (cm)	Descripción
Emergencia	100-150	5	Ocurre a los 20 días de la siembra. Se requieren temperaturas bajas y un porcentaje de agua útil en suelo menor al 30 %. La cobertura del dosel no supera el 10 %
Macollaje	400-500	18	Abarca las etapas de IF y PNV. El primer macollo comienza después del crecimiento de 3 o 4 hojas. A mayor número de macollos mayor será el área foliar alcanzada. La etapa finaliza con una cobertura del suelo del 90 %.
Encañazón	700-800	32	Comienza el período crítico en donde se empieza a elongar los tallos de la planta y a desarrollar la espiga. Corresponde a la etapa final del PNV. Bajo condiciones libres de estrés el cultivo debe interceptar más del 98 % de radiación incidente.
Espigazón	900-1100		Etapa de floración. Desarrollo completo de la espiga. Aproximadamente después de los 100 días de la siembra.
Llenado de granos		70	Comienza aproximadamente a los 120 días de la siembra. Acumulación de agua en los granos hasta que alcancen la maduración fisiológica.
Madurez fisiológica			La planta deja de consumir agua y nutrientes y el grano pierde humedad hasta contener sólo un 14-16 % del total, esta humedad es óptima para la cosecha.

Dentro de este área de estudio implantada con cebada se pueden distinguir tres zonas: loma, media loma y bajo. En la Figura 3.4 se indica cada una de estas zonas. La estación móvil de medición de balance de energía descrita en la siguiente sección se encuentra ubicada en la zona de media loma. En cada una de estas zonas las características difieren relativamente debido a su topografía, principalmente en la concentración de humedad en el suelo, lo que incide en el rendimiento del cultivo. La zona de mayor cota (1) conserva menor humedad que la zona de menor cota (3), dando como resultado un mayor rendimiento del grano de cebada en esta última zona.

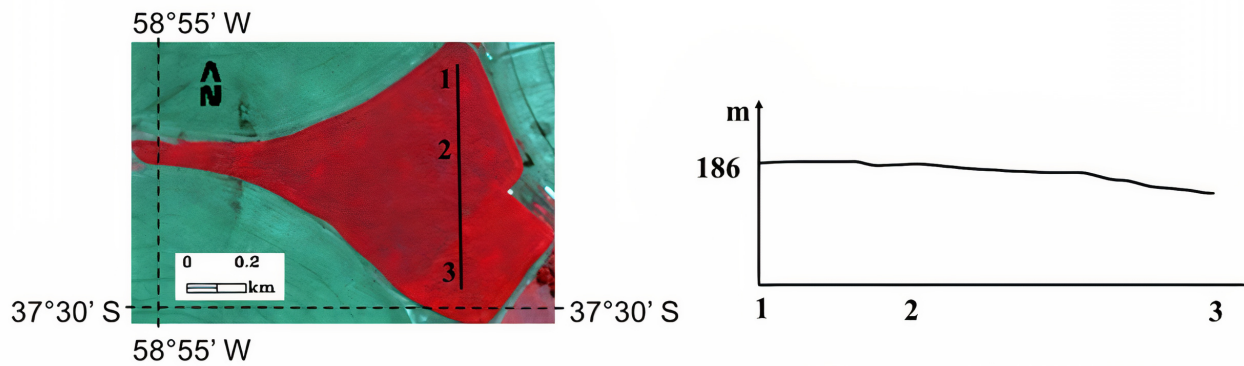


Figura 3.4: Imagen de SENTINEL-2, en composición falso color, del área de estudio junto con un perfil representativo indicando loma (1), media loma (2) y bajo (3).

### 3.2. Datos de terreno

En la zona de estudio descrita anteriormente se encuentra instalada una Estación de Balance de Energía (EB+) como se muestra en la Figura 3.5. Los sensores instalados en esta estación móvil pertenecen al grupo de teledetección del Instituto de Hidrología de Llanuras y al CAPP IHREDA (Estaciones móviles, 2020).



Figura 3.5: Estación de Balance de Energía (EB+) instalada en el cultivo de cebada en la estancia La Alcira, Tandil. La disposición de los sensores (en el plano de flujo cero=altura de la vegetación) de vegetación se reubican a medida que el cultivo se va desarrollando y los restantes se mantienen a altura fija.

Esta EB+ cuenta con sensores de terreno que obtienen información biofísica y meteorológica con una frecuencia de toma de datos configurada cada 10 minutos registrados en un *datalogger*

Campbell Scientific Inc modelo CR1000 (Carmona et al., 2011; Faramiñán et al., 2020). En la Tabla 3.2 se describen las variables registradas por la estación y se encuentran destacadas aquellas que fueron utilizadas en este trabajo para el seguimiento del desarrollo del cultivo.

Tabla 3.2: Descripción de las variables de la estación de medición junto con los accesos a los manuales de cada sensor. Adaptada de Faramiñán et al. (2020).

Sensor	Variable	Unidad	Error	Link Manual
<b>CNR4</b>	<b>Radiación neta de onda corta (SW) y larga (LW)</b>	W/m <sup>2</sup>	< 3 W/m <sup>2</sup> (Piranómetro)	<a href="https://www.campbellsci.com/cnr4">https://www.campbellsci.com/cnr4</a>
			±4 W/m <sup>2</sup> (Pirgeómetro)	
<b>CS215</b>	<b>Temperatura del aire</b>	°C	±0.3 °C a 25 °C	<a href="https://www.campbellsci.com/cs215-1">https://www.campbellsci.com/cs215-1</a>
			±0.4 °C desde 5 a 40 °C	
	Humedad del aire	%	±0.9 °C desde -40 a 70 °C	
			a 25 °C: ±2% desde 10 a 90%	
			±4% desde 0 a 100%	
<b>CS655</b>	<b>Contenido volumétrico de agua de suelo (VWC)</b>	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	±1% para EC <3 dS/m	<a href="https://www.campbellsci.com/cs655">https://www.campbellsci.com/cs655</a>
			±3% para EC <10 dS/m	
	<b>Temperatura de suelo</b>	°C	± 0.1°C entre 0° y +40°C 0.5°C rango de T completo	

	Conductividad eléctrica (EC)	dS/m	$\pm 5\%$ en lecturas superiores a 0.05 dS/m	
	Permitividad dieléctrica relativa		$\pm 3\%$ en lecturas superiores a 0.8 de 1 a 40 para $EC \leq 8$ dS/m	
			$\pm 2$ de 40 a 81 para $EC \leq 2.8$ dS/m)	
HFP01	Flujo de calor en el suelo	W/m <sup>2</sup>	-15 % a +5 %	<a href="https://www.campbellsci.com/hfp01">https://www.campbellsci.com/hfp01</a>
SI-111	<b>Temperatura radiativa</b>	°C	$\pm 0.2$ ° (-10°C a + 65 °C)	<a href="https://www.campbellsci.com/si-111">https://www.campbellsci.com/si-111</a>
			$\pm 0.5$ °C (-40 °C a + 70 °C)	
SNR-NDVI	<b>Reflectancia espectral R y NIR</b>	%	10 %	<a href="https://www.metergroup.com/environment/products/spectral-reflectance-sensor/">https://www.metergroup.com/environment/products/spectral-reflectance-sensor/</a>
SoilVUE10	<b>Contenido volumétrico de agua de suelo (VWC)</b>	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	$\pm 1.5$ suelos típicos	<a href="https://www.campbellsci.com/soilvue10">https://www.campbellsci.com/soilvue10</a>
	<b>Temperatura de suelo</b>	°C	$\pm 0.15$ °C entre -30° y +40°C	
	Conductividad eléctrica (EC)	dS/m	$\pm 2\%$ de 0 a 2.5 dS/m	
			$\pm 5\%$ para todo el rango	
	Permitividad dieléctrica relativa		$\pm 1$	

<b>TE525MM</b>	<b>Precipitación (PP)</b>	mm	$\pm 1\%$	<a href="https://www.campbellsci.com/te525mm-1">https://www.campbellsci.com/te525mm-1</a>
Wind Sonic 2D	Velocidad del viento	m/s	$\pm 2\% @ 12 \text{ m s}^{-1}$	<a href="https://www.campbellsci.com/windsonic-1">https://www.campbellsci.com/windsonic-1</a>
	Dirección del viento	°	$\pm 3^\circ$	

---

Las variables que miden condiciones físicas en los perfiles del suelo como humedad, conductividad, permitividad y temperatura, presentan valores medidos para espesores de suelo (en profundidad) de 0.05m, 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m y 0.6 m. A lo largo de este proyecto se analizarán las relaciones de dichas variables con las propiedades biofísicas de las plantas y las respuestas espectrales de las mismas en toda la etapa evolutiva del cultivo de cebada estudiado.

En conjunto con estos datos de terreno adquiridos por la EB+, se cuenta con medidas de reflectancias hiperespectrales tomadas por un espectroradiómetro de mano SVC HR-1024i (Spectra Vista Corporation, USA). Este instrumento tiene un rango espectral de 350 nm a 2500 nm, cuenta con tres sensores que adquieren reflectancias a lo largo del espectro electromagnético con un intervalo de muestreo de  $\pm 3.3 \text{ nm}$ , 7000 nm;  $\pm 9.5 \text{ nm}$ , 1500 nm;  $\pm 6.5 \text{ nm}$ , 2100 nm. Las mediciones de reflectancias espectrales se realizaron en una orientación a nadir a diferentes alturas del dosel del cultivo para minimizar los posibles efectos de la sombra de las hojas, con una lente de  $14^\circ$  (Holzman et al., 2021a). Estas campañas de medición, que abarcan las distintas etapas de desarrollo de la cebada, fueron realizadas por el profesional de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires e integrante del IHLLA, M. Bayala.

Para el análisis de este proyecto se observaron las curvas espectrales generadas a 2 m de altura entre el espectroradiómetro de mano y el dosel, en donde las imágenes adquiridas cubren aproximadamente una superficie con 0.49 m de diámetro. Dicha elección se tomó con el criterio de comparar estos valores de reflectancias con los datos satelitales ya que las resoluciones espaciales se tornan comparables.

### 3.2.1. Sensor CNR4

La radiación de onda corta es el flujo radiante que resulta directamente de la radiación solar entrante, concentrándose en el rango 100 a 4000 nm del espectro electromagnético. En cambio, la radiación de onda larga es resultante de la emisión de los gases de la atmósfera y de la superficie terrestre en un rango espectral de 4000 a 100000 nm. Ambas radiaciones, tanto entrante como saliente, son medidas por el radiómetro CNR4, ubicado en la estación de medición.

El sensor CNR4 consta de un piranómetro y un pirgeómetro que miden la radiación infrarroja promedio ( $\text{W m}^{-2}$ ) de onda corta y onda larga, respectivamente, tanto la entrante como la saliente a la superficie. Los rangos espectrales en que toman estas mediciones son de 305 hasta 2800 nm para el primero y de 4500 hasta 42000 nm para el segundo. Dicho instrumento fue instalado a 2

m de distancia del mástil principal, para no tener obstrucciones en la lectura, y a 2 m de altura (Estaciones móviles, 2020).

A partir de las medidas de la radiación de onda corta entrante a la superficie terrestre se puede determinar el estado de nubosidad de los días (Figura 3.6). Poder determinar este estado es de utilidad para realizar varios estudios como los análisis de los índices de vegetación ya que se necesitan tomar días en que la radiación entrante sea completa y la elección de días para la obtención de las imágenes satelitales.

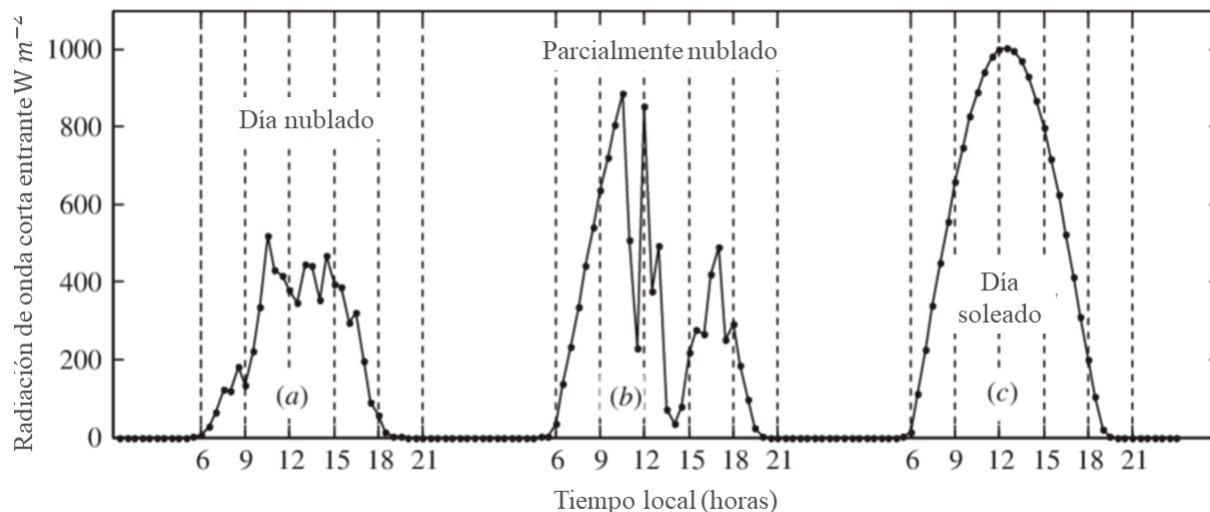


Figura 3.6: Radiación de onda corta entrante a la superficie terrestre en  $W m^{-2}$  para un día nublado (a), un día parcialmente nublado (b) y un día sin cobertura de nubes (c). Imagen adaptada de Zhou et al. (2013)

### 3.2.2. Sensores CS655 y SoilVUE

El CS655 es un sensor utilizado para medir el contenido volumétrico de agua en suelo ( $m^3/m^3$ ) y la conductividad eléctrica general (dS/m) a partir del tiempo de propagación y atenuación de la señal, y la temperatura ( $^{\circ}C$ ). Este sensor contiene dos varillas de acero inoxidable para realizar la medición, las cuales están colocadas de manera horizontal a nivel de superficie, a 0.3 y 0.6 m de profundidad (Estaciones móviles, 2020).

El sensor SoilVUE presenta una estructura diferente al anterior, en donde su forma helicoidal (de tornillo) permite una mejora en el contacto con el suelo minimizando el error de medición debido a la reducción de los espacios de aire entre estos. Su instalación es de bajo impacto para el suelo por lo que la estabilización del mismo es aproximadamente instantánea. A partir de la generación de un pulso electromagnético se calcula la permitividad dieléctrica del medio circundante y se determina el contenido volumétrico de agua del suelo ( $m^3/m^3$ ). Este sensor también mide las variables de temperatura de suelo ( $^{\circ}C$ ) y conductividad eléctrica (dS/m) a niveles de 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.5 m de profundidad (Estaciones móviles, 2020).

### 3.2.3. Sensor SNR-NDVI

La radiación incidente y reflejada (%) en el R y NIR son medidas en la EB+ por un sensor de reflectancia espectral (SNR). Este radiómetro multibanda tiene las bandas centradas en el R(650

nm) y NIR (810 nm) con un ancho de 50 nm y 40 nm, respectivamente.

El SNR-NDVI cuenta con dos instrumentos colocados a más de 0.4 m del mástil principal y a 90° con respecto al nivel del suelo, la única diferencia entre ellos es que uno está enfocado hacia arriba para medir la radiación incidente y el otro se encuentra hacia abajo para tomar mediciones de la radiación reflejada. A partir de estas mediciones se puede monitorear continuamente el índice NDVI del cultivo (Estaciones móviles, 2020).

### 3.2.4. Sensor SI-111

La temperatura radiativa de superficie es definida como la energía térmica de onda larga emitida desde la superficie terrestre. Cuando se trata de la temperatura del dosel de una vegetación, esta depende de ciertos factores como la radiación incidente, el grado de cobertura de la misma, la evapotranspiración, el tipo de superficie, mecanismos fisiológicos de la planta y la humedad del suelo, entre otros (Houspanossian et al., 2007).

En la zona de estudio, esta variable es medida por el sensor SI-111 en un rango de longitud de onda de  $8 \cdot 10^3$  nm a  $14 \cdot 10^3$  nm, lo que se corresponde a una ventana atmosférica. El sensor cuenta con una termopila para la medición y se ubica a 2 m sobre el nivel de superficie. El campo de visión de este es un círculo, el cual detecta el 98 % de la radiación emitida por la superficie.

## 3.3. Datos de satélites

Los productos de SENTINEL-2 que se utilizaron para llevar a cabo este estudio pertenecen al Nivel-2A (ver Sección 2.1.3). Estas imágenes de acceso libre se obtuvieron desde la página oficial de la misión Copernicus <sup>1</sup>. Las imágenes analizadas fueron elegidas teniendo en cuenta las fechas de desarrollo del cultivo, períodos en donde las humedades del suelo variaron debido a las condiciones climáticas y finalmente considerando una cobertura de nubes de la zona baja.

Como se mencionó en las Secciones 2.1.1 y 2.1.3, los productos brindados para el Nivel-2A por el sensor MSI a bordo de este satélite, para una misma fecha, se encuentran descomprimidos por banda espectral y por resolución espacial. Para crear una imagen a partir de la superposición de las bandas espectrales y poder realizar un posterior análisis multiespectral se debe llevar a cabo una serie de pasos, los cuales están descritos en la Figura 3.7. Para ejecutar este flujo de trabajo en el que se configuraron las bandas espectrales a una misma resolución espacial y luego se las apiló para formar una sola imagen se utilizó el software ENVI versión 5.3 (ENVI, 2004).

---

<sup>1</sup>Página oficial de descarga de productos: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

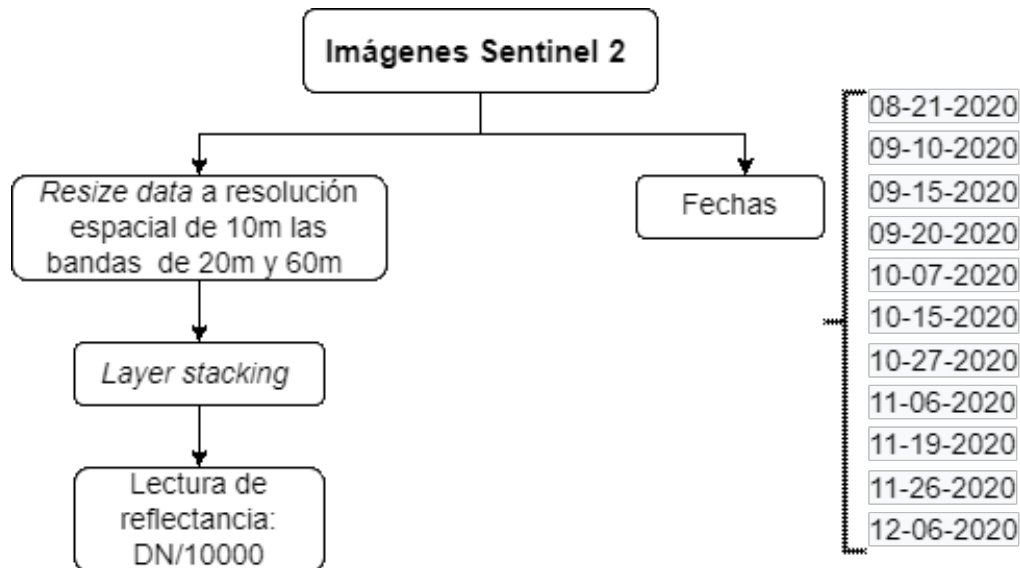


Figura 3.7: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes y las fechas correspondientes. *Resize data*: remuestrear los valores espaciales de los píxeles. *Layer Stacking*: formar una imagen apilando las bandas espectrales en orden. DN: valores de cuenta digital y al dividir se logra en valor en magnitud física de superficie, es decir reflectividad de banda.

Para realizar lecturas y análisis sobre la imagen satelital de la zona de estudio, se seleccionaron regiones de interés (ROI, *Region Of Interest*) sobre distintas áreas del cultivo. A partir de estas ROI, que contienen los valores de reflectancias de cada píxel seleccionado, se extrajeron estadísticos como máximos, mínimos, promedios y frecuencias, entre otros (ENVI, 2004). Sobre las áreas de loma, media loma y bajo descritas en la Sección 3.1 se seleccionaron ROI de un tamaño de 2 píxeles de ancho por 2 píxeles de largo. La elección de la menor cantidad de píxeles se debe a que se busca lograr una homogeneidad del área, evitando tomar zonas no pertenecientes a las mismas.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Datos de terreno

Para la realización de este estudio se cuenta con un conjunto diverso de variables medidas, como se mencionó en la Sección 3.2. El comportamiento de cada una de estas son indicadores de las variaciones de cultivo (ej. reflectividades, humedad de suelo), de las condiciones meteorológicas (ej. precipitaciones, velocidad del viento, temperatura) y de la época del año (ej. radiación incidente). Aunque hacer esta división es a modo explicativo, ya que muchas de estas variables están relacionadas entre sí. A modo de ejemplo, la humedad de suelo depende de varios factores como las precipitaciones, la temperatura y la etapa de crecimiento del cultivo, ya que en alguna de ellas se utiliza más humedad del suelo que en otras; esta variable se relaciona de manera directa con la conductividad, la cual a la vez depende del tipo de suelo; la radiación incidente a la superficie varía según la elevación solar que depende de la época del año, y de la cobertura nubosa del día. Y así se podría seguir enumerando ciertas dependencias. Por lo tanto, para comenzar con este análisis se presentan las mediciones de algunas de estas variables <sup>1</sup> tomadas por la EB+ a lo largo de los meses correspondientes al ciclo del cultivo.

La humedad del suelo o contenido volumétrico de agua (VWC), como se mencionó, puede cambiar por diversos factores. En la Figura 4.1 se puede observar la variación diaria de dicha variable para las profundidades de superficie, 0.3 y 0.6 m tomada por el sensor CS655 y para las profundidades de 0.1, 0.3 y 0.5 m adquiridas por el sensor SoilVUE. Para poder interpretar de una manera integrada estas variaciones del contenido de agua en suelo, se presentan también las precipitaciones diarias medidas con el pluviómetro TE525MM (ver Tabla 3.2). Dado que hubo fechas en las que la estación no registró datos, en la Figura 4.1 se presentan datos estimados a partir de la correlación entre la estación y las estaciones El Parque ( $37^{\circ}26'2,19''\text{S}$ ,  $59^{\circ}6'41,22''\text{O}$ , 290 m.s.n.m.) y La Lucila ( $37^{\circ}17'12''\text{S}$ ,  $58^{\circ}57'30''\text{O}$ , 155 m.s.n.m.), las cuales se detallan en el Anexo A.

---

<sup>1</sup>Las mediciones presentan una faltante de días entre el 10 de octubre y el 29 del mismo mes, debido a un problema técnico con el instrumento de toma de datos.

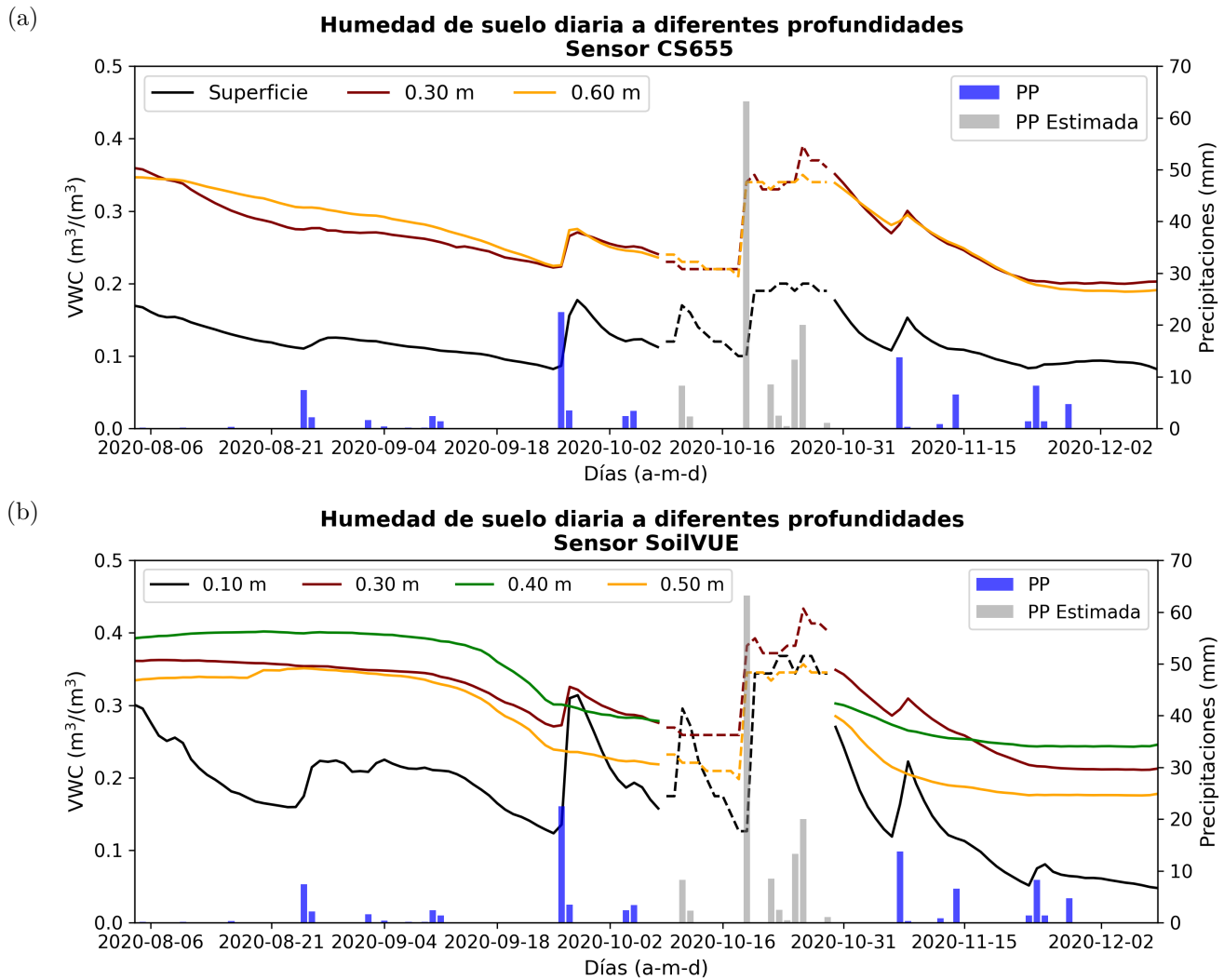


Figura 4.1: VWC a diferentes profundidades y las precipitaciones diarias a lo largo de todo el ciclo de cebada, junto con las estimaciones a partir de las correlaciones con una estación cercana (líneas punteadas). (a) Mediciones tomadas por el sensor CS655. (b) Mediciones tomadas por el sensor SoilVUE.

Con lo que respecta a los perfiles de humedad (Figura 4.1), los que se encuentran ubicados a mayor profundidad (0.3, 0.5 y 0.6 m), considerando ambos sensores, conservan la mayor cantidad de agua. Además, el perfil más superficial presenta menor humedad debido a que está más en contacto con las condiciones atmosféricas, siendo la radiación solar y el viento los principales factores que modifican su contenido. Se puede verificar que los sensores presentan sensibilidad a los cambios del contenido de agua, al comparar los valores previos y posteriores a las precipitaciones significativas, aunque hay una variación entre las mediciones de ambos debido a la diferente estructura de medición que presenta cada uno, descrita con anterioridad.

En el periodo crítico de la cebada, la planta necesita mayor disponibilidad de agua del suelo en poco tiempo y al finalizar este periodo, la planta deja de hacerlo. Claramente se puede observar este fenómeno a partir de del 13 de septiembre, en donde el contenido de agua en suelo empieza a disminuir hasta que deja de tener fluctuaciones aproximadamente el 6 de Noviembre (ver dichas fechas en los perfiles de la Figura 4.1). Estas fluctuaciones se deben a que por las precipitaciones, la humedad en suelo aumenta pero como la planta se encuentra en período crítico, el requerimiento

de agua para el proceso de transpiración es mayor en cuanto a cantidad y tiempo.

Una variable también destacada para este análisis es la radiación solar de onda corta entrante medida por el sensor CNR4, descrita en la Sección 3.2.1. Determinar el comportamiento de esta variable es de suma importancia para la detección de días despejados para analizar ciertos índices espectrales como el NDVI, y demás variables como la temperatura radiativa. A partir de la determinación de la radiación relativa, la cual expresa la nubosidad de la atmósfera relacionando la radiación solar entrante y la radiación solar de cielo despejado (Allen et al., 1998), se filtraron los días con cobertura nubosa. En la Figura 4.2, estos datos se pueden observar como dispersión de puntos. Estos valores de radiación solar entrante fueron tomados entre las 10:50 y 11:00 am de cada día, rango horario coincidente con el paso de SENTINEL-2 por la zona de estudio. El desarrollo del cálculo de la radiación relativa se encuentra en el Anexo B. Claramente se observa cómo el valor de radiación aumenta a medida que las fechas se aproximan al verano, lo cual se debe al ángulo de incidencia del sol por el cambio de estación.

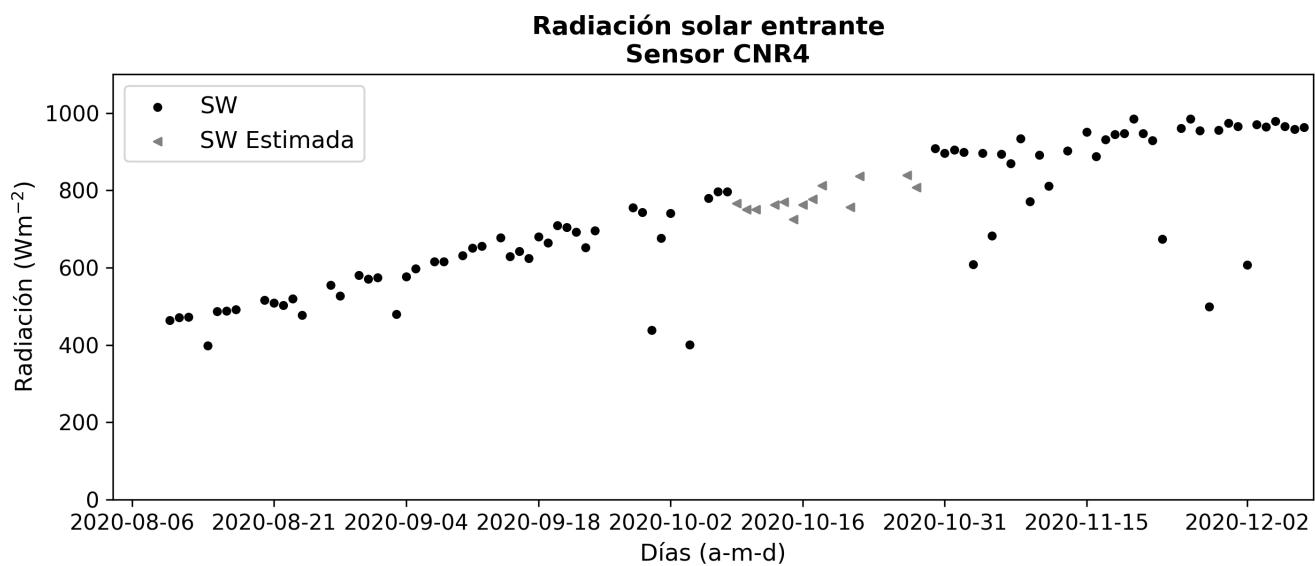


Figura 4.2: Valores de radiación solar entrante para días despejados, medidos por el sensor CNR4.

El sensor SI-111 instalado en la estación de medición mide diariamente, con un tiempo de muestreo de 10 minutos, la temperatura radiativa de la superficie. Como se mencionó en la Sección 3.2.4, la temperatura radiativa emitida por la superficie depende de diversos factores meteorológico y fisiológicos de la vegetación y el suelo. En la Figura 4.3 se observan los valores de temperatura radiativa del suelo promedio, corregidos por emisividad (ver Anexo C), durante los horarios de alta radiación solar, dado que esta varía a lo largo del día, y siendo el horario coincidente con el paso de SENTINEL-2. Los valores de temperatura radiativa que se utilizaron para posteriores análisis son aquellos en los que la cobertura nubosa sobre el área de estudio no fuera superior a un 37% (Houspanossian et al., 2007), para lo cual se utilizó la selección de días despejados utilizando la radiación solar entrante, descrita anteriormente.

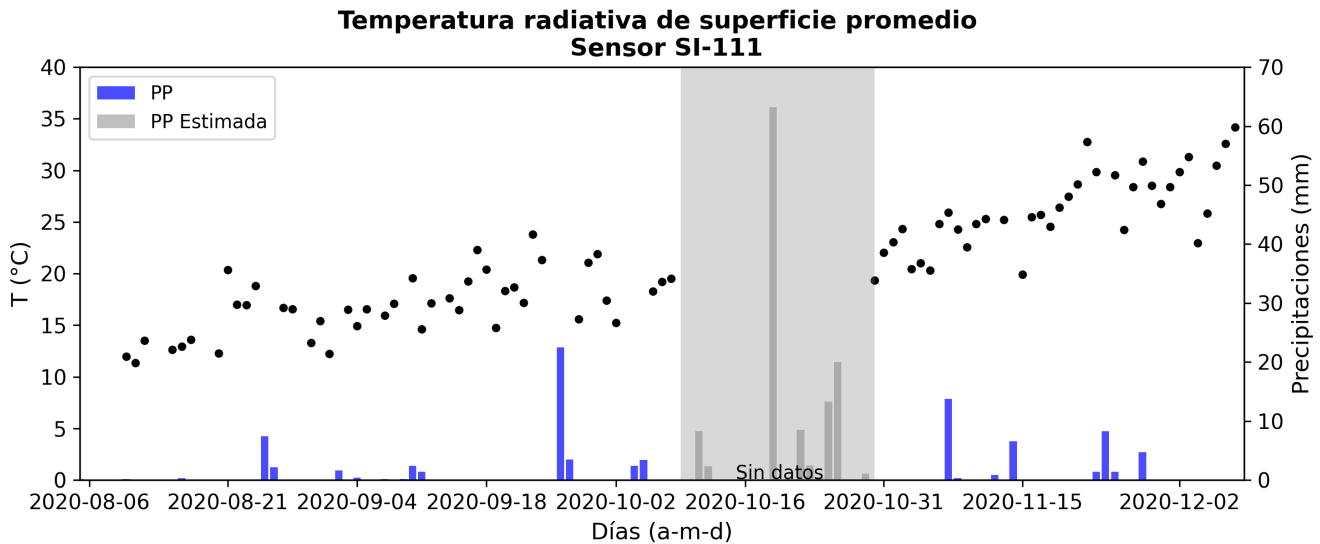


Figura 4.3: Temperatura radiativa de superficie promedio medida por el sensor SI-111 instalado en la EB+. Se muestran además las precipitaciones de la zona de estudio (en color gris se muestran las estimadas).

En la Figura 4.3 se puede apreciar el aumento en la temperatura radiativa de la superficie a medida que las fechas se van acercando a la estación de verano. Para una interpretación completa del comportamiento de la temperatura radiativa, en la Figura 4.4 se muestran los valores de la misma junto con la temperatura del aire para días previos, durante y posteriores a una de las mayores precipitaciones que hubo en la zona de estudio, con una frecuencia de tiempo de una hora. Claramente se observa como ambas temperaturas disminuyen su valor en horas de la noche y lo aumentan durante el día.

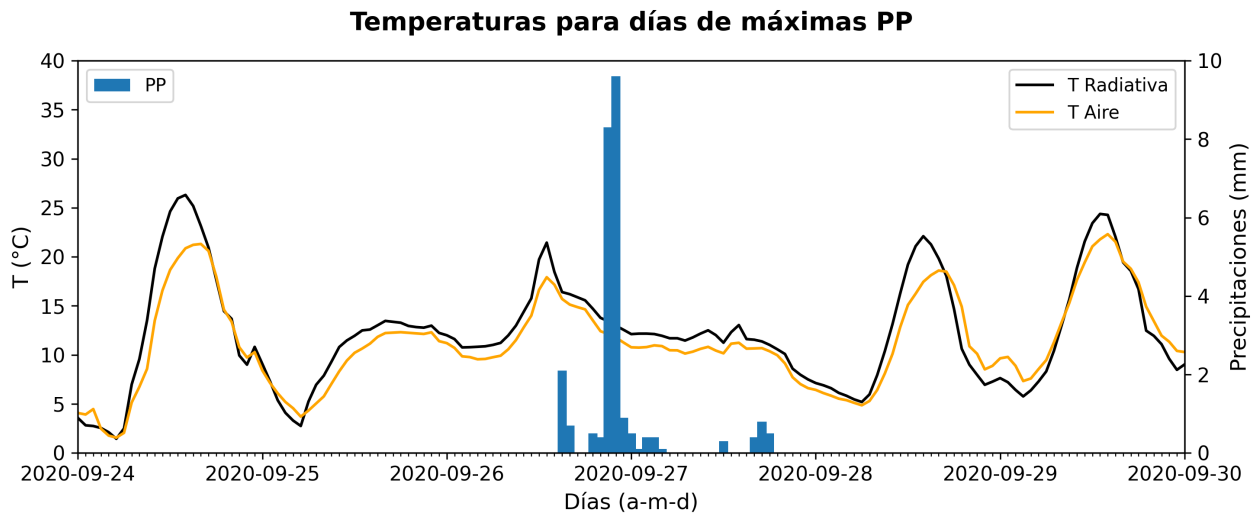


Figura 4.4: Valores por hora de temperatura radiativa de superficie y temperatura del aire, adquiridas por la EB+, para días cercanos a la precipitación máxima en la zona entre el día 26 y 27 de septiembre.

A partir de las variables graficadas en la Figura 4.4 se puede comprobar el descenso de la temperatura radiativa de la superficie en respuesta a las precipitaciones ocurridas. Esta variable

presenta variaciones considerables debido a la cobertura nubosa que conlleva a las precipitaciones, como consecuencia de una disminución en la radiación solar entrante, y por una baja en la temperatura del aire, la cual tiene un comportamiento similar a la temperatura radiativa de la superficie. Posteriormente a las precipitaciones, el valor de la temperatura disminuye debido a que queda cierto nivel de humedad en suelo, lo que hace que la temperatura radiativa sea menor y similar a la del aire. Luego de aproximadamente 48 horas, los valores de temperatura radiativa vuelven a ser estables, por este motivo para posteriores análisis, se descartaron días previos y posteriores a precipitaciones significativas.

Los datos presentados anteriormente de temperatura radiativa emitida por la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), para días con escasa cobertura nubosa y no cercanos a precipitaciones, se pueden relacionar con las humedades de suelo presentes en los diferentes horizontes. La temperatura que emite la cobertura vegetal, en las longitudes de onda larga, se relaciona directamente con el estado hídrico y fisiológico que presenta, lo que depende de la disponibilidad de agua en suelo. La Figura 4.5 muestra esta relación del contenido volumétrico de agua en suelo (VWC) junto con los valores de la temperatura radiativa, siendo ambas variables medidas por la EB+ en la zona de estudio.

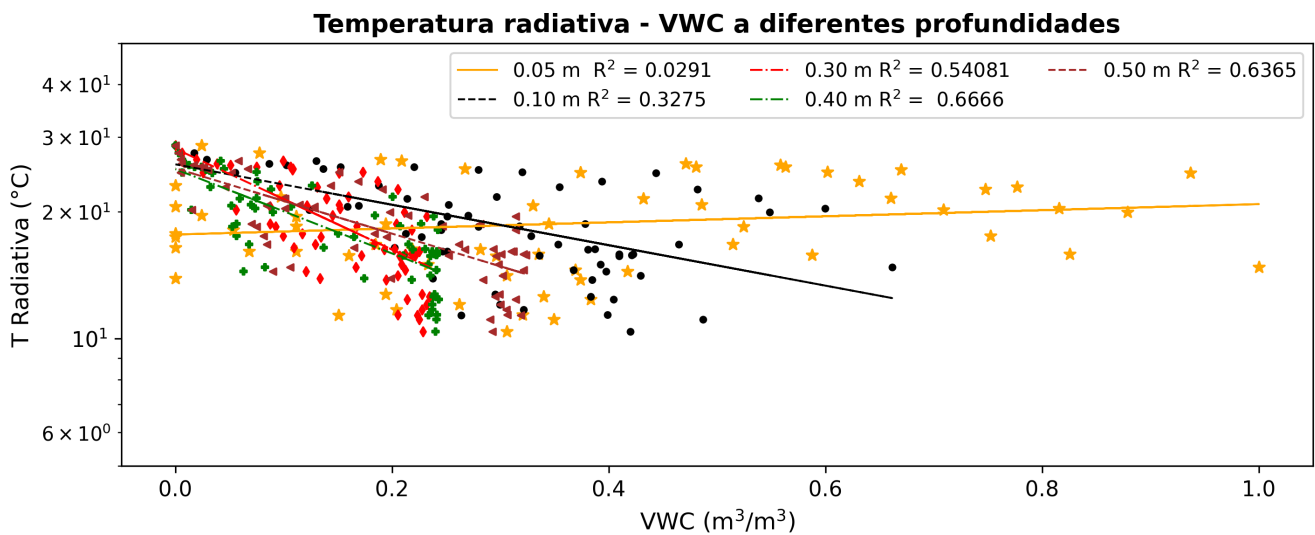


Figura 4.5: Variación de la temperatura radiativa emitida por la superficie, en las horas de máxima radiación para días con baja cobertura nubosa y alta cobertura de vegetación ( $\text{NDVI} > 0.3$ ), según el contenido volumétrico de agua en suelo para diferentes profundidades.

La relación entre estas dos variables no es lineal, por lo que se le realizó un ajuste exponencial como se observa en la Ecuación 4.1, siendo a y b los parámetros de ajuste.

$$T \text{ Radiativa} = a \exp(b \text{ VWC}) \tag{4.1}$$

La leyenda de la gráfica de la Figura 4.5 muestra los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de cada ajuste realizado, con la Ecuación 4.1, para cada una de las profundidades en las que se cuentan con datos de VWC <sup>2</sup>. Así, se puede observar cómo las humedades de suelo a 0.4 m de profundidad presentan una correlación mayor con la variación de la temperatura radiativa, con un

<sup>2</sup>Se debe destacar, antes de analizar la bondad de los modelos, que se filtraron todos aquellos datos en los que el valor del índice NDVI era menor a 0.3, para evitar así ruidos debido al suelo en las lecturas de temperatura radiativa

$R^2 = 0.66$  y los coeficientes a y b de 25.198 y -2.297, respectivamente. Este comportamiento se debe a que en estos horizontes, se concentra una alta proporción de raíces de la cebada y es de donde extrae el agua durante el proceso de transpiración de la planta.

Junto con las variables medidas por la EB+ instalada en el área de estudio, se cuenta para la realización de este trabajo con datos de firmas espectrales tomadas con un espectroradiómetro, como se describió en la Sección 3.2. En la Figura 4.6 se encuentran las curvas espectrales tomadas para cada una de las zonas diferenciadas en el área de estudio.

### Curvas espectrales por zona GFOV = 2m

— 2020-08-21    - - - 2020-09-18    - · - · 2020-10-02    · · · · 2020-10-27    — 2020-12-02

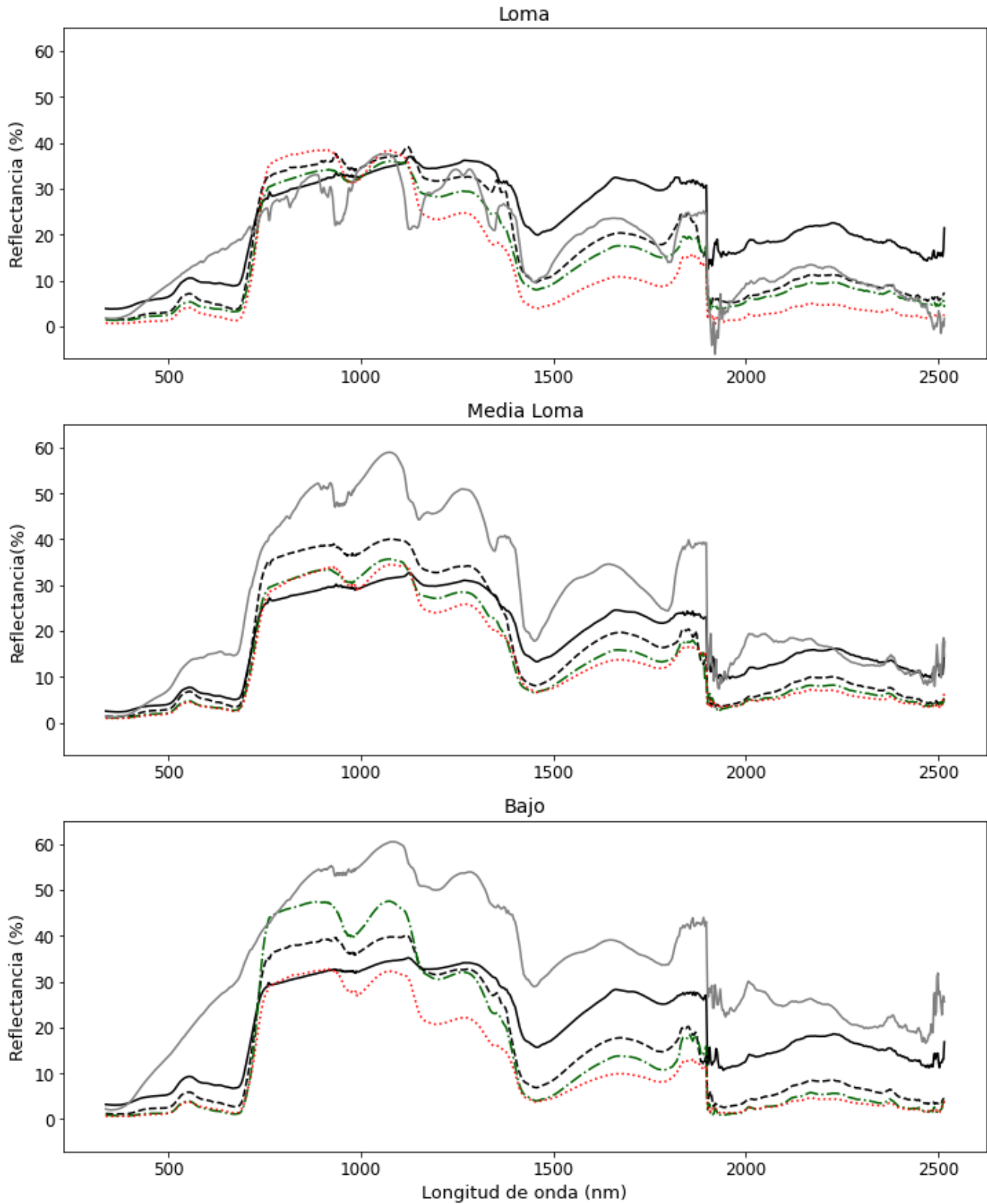


Figura 4.6: Firmas espectrales adquiridas por el espectroradiómetro SVC HR-1024i en diferentes fechas durante el desarrollo del cultivo.

Estas curvas a lo largo del espectro electromagnético muestran cómo el color de las hojas y el contenido de agua y nutrientes en la vegetación afecta el porcentaje de reflectancia. A medida que el cultivo se acerca al período crítico, el contenido de agua y clorofila en la planta aumenta generando una coloración verde en sus hojas. Una vez que la planta sale de este período, comienza a perder humedad hasta tener un contenido óptimo para la cosecha (ej.: firma del 2020-12-02). Esta pérdida de humedad afecta el contenido de clorofila y por ende, la coloración cambia. Debido a este cambio en la coloración a medida que la planta va madurando, sus hojas se van tornando de un color verde a uno con tonalidades marrones típicas de las hojas secas. Por esta razón, los valores de reflectancias en la región VIS del espectro electromagnético son mayores en la firma espectral de la fecha 2 de diciembre, en donde la planta ya se encuentra madura con bajo contenido de agua (seca) y próxima a la cosecha. Para las regiones del NIR-SWIR, las cuales son más sensibles al contenido de agua, los valores de reflectancias son menores y mayores, respectivamente, si se los compara con reflectancias de la planta en etapas de pleno desarrollo, con alto contenido de agua en hoja y en buen estado de salud. Una situación contraria se observa en la firma espectral de la fecha del 27 de octubre, en donde el cultivo se encuentra en una etapa con alto contenido de agua en hoja (inmaduro) y una humedad de suelo mayor debido a los abundantes eventos de precipitaciones ocurridos.

## 4.2. Datos Satelitales

Las primeras observaciones de los datos satelitales brindados por SENTINEL-2 fueron los comportamientos de los valores de reflectancias de la zona de estudio en las longitudes de onda del VIS-NIR-SWIR y sus variaciones según las fechas del ciclo del cultivo. Poder realizar una indagación en los comportamientos de las firmas espectrales, previo a cualquier otro análisis, es de suma importancia para poder comprender cuál es la sensibilidad a la toma de datos en la zona según las diferentes etapas del cultivo y según las variaciones de la geografía local. La Figura 4.7 muestra las reflectancias (%) para las zonas de loma, media loma y bajo ubicadas dentro de la parcela sembrada con cebada. Las reflectancias de estas zonas fueron obtenidas a través de los estadísticos de los valores de los píxeles seleccionados en las imágenes por medio de las ROI (ver Sección 3.3).

Se pueden apreciar los cambios que presentan las reflectancias de la Figura 4.7 en cada una de las áreas de la zona de estudio según la fecha de la etapa del cultivo en la que se encuentra la imagen adquirida. Al igual que las firmas hiperespectrales tomadas con el espectroradiómetro de mano, las reflectancias en la región VIS del espectro electromagnético para fechas en donde la planta de cebada se encontraba madura son altas comparadas con fechas en la que el cultivo aún estaba inmaduro; así también como los valores en las regiones del SWIR son mayores para fechas cercanas a la cosecha del cultivo debido a la pérdida de agua que presentan las plantas. Una observación particular que se le debe hacer a estos datos satelitales es la respuesta del sensor MSI a bordo de SENTINEL-2 a los cambios de color que detecta en el sector del VIS del espectro electromagnético: para fechas en que la planta se encuentra en desarrollo, los picos en las longitudes de onda del G están bien diferenciados. Esto es consecuencia de los anchos de banda estrechos que presentan las bandas espectrales del sensor, lo que permite una mayor precisión a la hora de adquirir los datos. También se debe destacar que debido a estos anchos estrechos en la región de transición del VIS-NIR se pueden determinar condiciones con mayor exactitud de la vegetación en cuanto a sus contenidos de agua y clorofila, por este motivo SENTINEL-2 en esta sección específica cuenta con las bandas B5, B6 y B7. Además de los cambios en el rango espectral del VIS, las reflectancias de superficie captadas en la región del NIR, para las mismas fechas, aumentan su valor de las zonas de

loma a bajo, principalmente en las fechas en la que el cultivo se encuentra en etapas de desarrollo, como consecuencia de la mayor preservación de humedad en suelo, lo que provoca un aumento en nutrientes y clorofila en hoja.

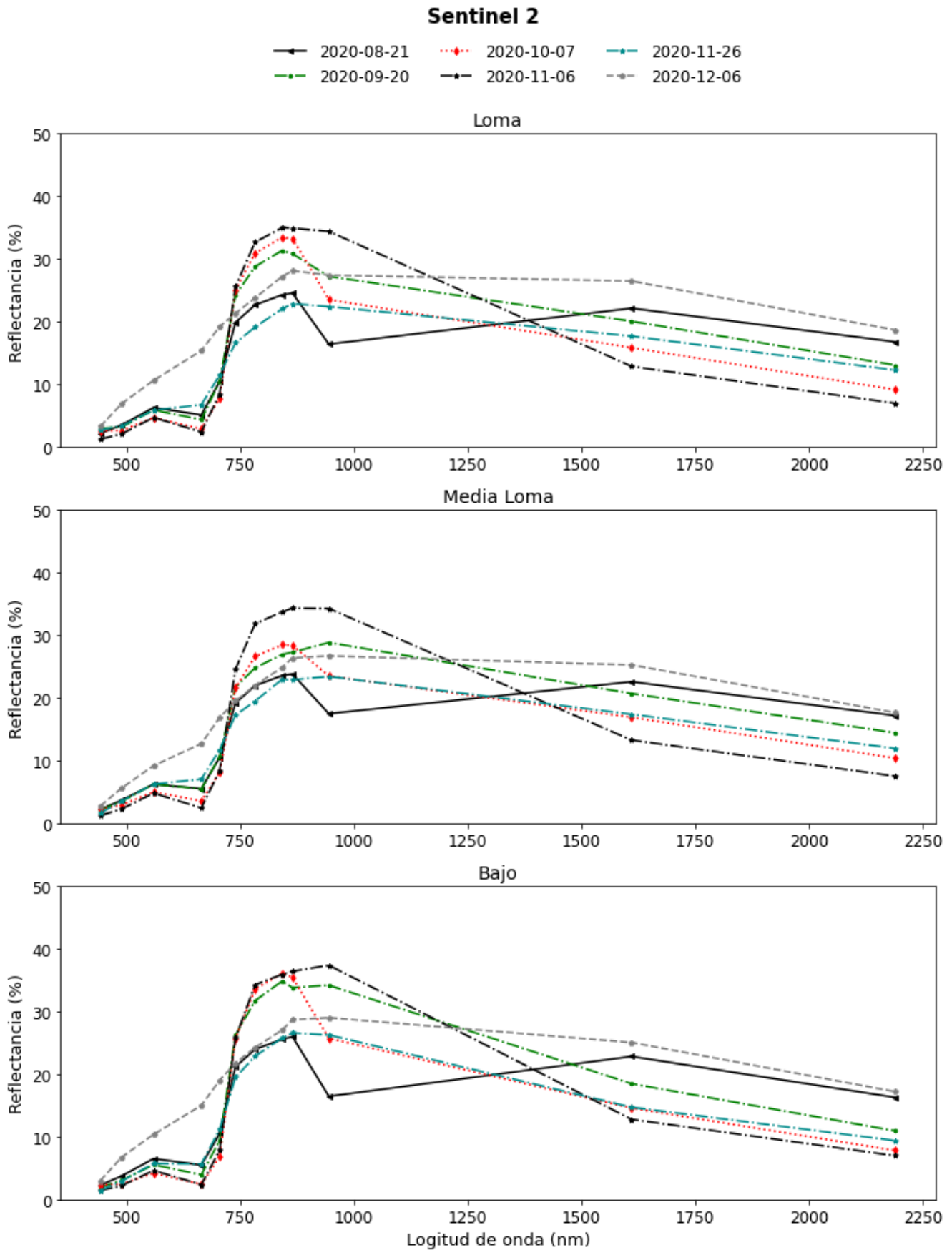


Figura 4.7: Valores de reflectancias obtenidos a partir de las bandas espectrales que comprenden las imágenes adquiridas por la plataforma SENTINEL-2 para diferentes fechas del segundo semestre 2020 para las áreas de loma, media loma y bajo ubicadas dentro de la zona de estudio.

## 4.3. Índices de vegetación

Para realizar el análisis de los índices de vegetación se debe considerar que se cuenta con datos *in situ*, como los de la estación EB+ y del espectroradiómetro de mano, y con aquellos brindados por las imágenes satelitales. Así, se pueden considerar evoluciones temporales de los índices obtenidos por distintos medios, la sensibilidad de cada uno de los métodos de medición y la comparación entre ellos para predicciones.

Como primera observación al comportamiento de los índices espectrales, se analiza el índice NDVI (ver Sección 2.2.1), para el cual se cuenta con datos proporcionados por la estación de medición instalada sobre el cultivo, por el espectroradiómetro de mano y SENTINEL-2; el índice MSI (ver Sección 2.2.2) y finalizamos esta primera observación con el índice NDWI (ver Sección 2.2.3), en donde las reflectancias se corresponden a las mediciones por el espectroradiómetro de mano y a las imágenes capturadas por SENTINEL-2.

### 4.3.1. NDVI

Los valores de reflectancias utilizados de la EB+ para el cálculo de NDVI se tomaron del sensor SNR (ver Sección 3.2.3) entre las 10:40 y 11:10 am (h) <sup>3</sup> de cada día despejado de nubes, cuya elección se realizó por medio del análisis de los datos presentados en la Figura 4.2. Para evaluar este índice se tuvo en cuenta las energías reflejadas (NR) e incidentes (NI) en la parte del espectro electromagnético del R y del NIR, obtenidas por los dos sensores que comprenden al SNR. Se procedió a realizar el cálculo de las reflectancias y finalmente del índice NDVI como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

con

$$\text{R} = \frac{\text{R}_{\text{NR}}}{\text{R}_{\text{NI}}} \quad \text{y} \quad \text{NIR} = \frac{\text{NIR}_{\text{NR}}}{\text{NIR}_{\text{NI}}} \quad (4.2)$$

La Figura 4.8 muestra la evolución temporal de los valores de reflectancias de la región del R y NIR para el ciclo del cultivo durante los días despejados de nubes, abarcando desde el 9 de agosto al 8 de diciembre 2020 (izquierda), y la dispersión R-NIR de los mismos valores (derecha).

---

<sup>3</sup>Hora de paso del satélite SENTINEL-2 B.

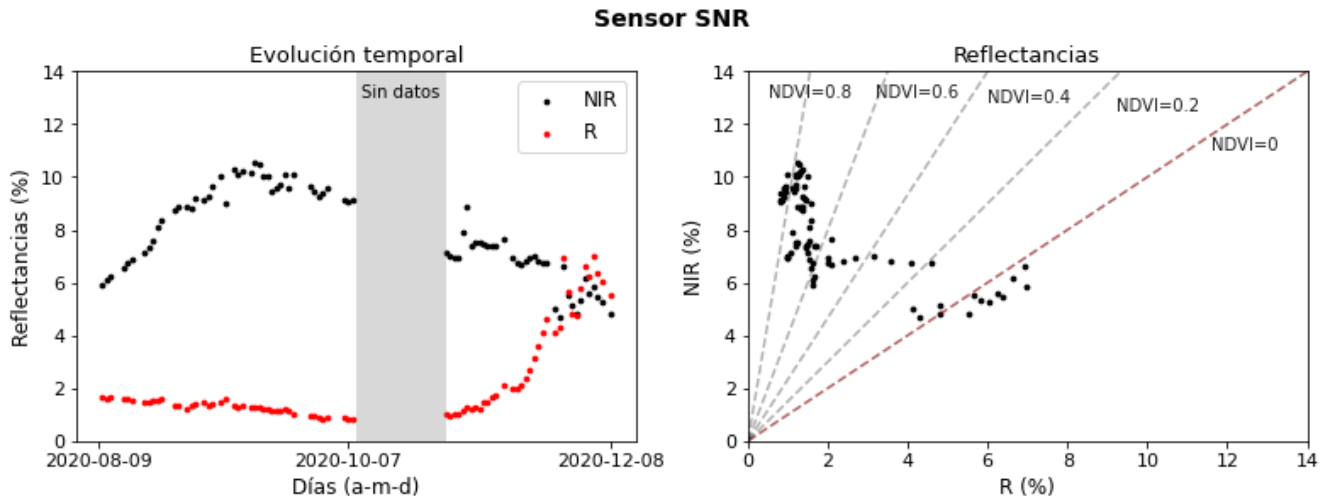


Figura 4.8: Valores de reflectancias captados por el sensor SNR en las longitudes de onda del R y NIR. Evolución temporal (izquierda): valores de R bajos a comienzos del ciclo y altos al finalizar debido a los cambios en la coloración de la planta; valores de reflectancias en la sección NIR van aumentando hacia mediados del ciclo debido al mayor contenido clorofila y capacidad fotosintética, y disminuyendo hacia fechas previas a la cosecha. Dispersión R-NIR, junto con rectas de valores de NDVI (derecha) indicando con color marrón (estilo punteado) la línea de suelo.

La evolución temporal de las reflectancias del R y NIR de la Figura 4.8 indican los cambios de las etapas del cultivo. A medida que la cebada se aproxima a la etapa de desarrollo máximo (período crítico en el mes de octubre), en donde la planta presenta un contenido de clorofila mayor que en las demás etapas y una cobertura de suelo también mayor, por lo que las reflectancias en el R disminuyen debido a este pigmento, ya que absorbe la mayor parte de la energía, y en la sección del NIR aumenta como consecuencia de la sensibilidad de esta longitud de onda a ese pigmento. Por lo que la diferencia entre las reflectancias del R-NIR son mayores en períodos de desarrollo máximo y menores en etapas de maduración, como se observa para las fechas próximas a la cosecha. Esta transición entre las reflectancias en dichas longitudes de onda se denomina borde rojo de vegetación (VRE, *Vegetation Red Edge*) (Horler et al., 1983) y se relaciona directamente al NDVI. Se debe destacar que una disponibilidad adecuada de agua en suelo deriva a un mejor desarrollo de cultivo, modificando el contenido de clorofila y demás nutrientes que se verán reflejados en las reflectancias de estas longitudes de onda.

La dispersión de las reflectancias R-NIR de la Figura 4.8 (derecha), medidas por la EB+, muestra la relación entre ambas secciones del espectro electromagnético. Reflectancias altas de NIR y bajas de R se corresponden a valores de NDVI cercanos a 0.8, indicando vegetaciones verdes y con alta cobertura. Valores medios de NIR y R se corresponden a valores de NDVI próximos a 0, indicando coberturas vegetales escasas o vegetaciones maduras de tonalidades de color marrón.

Introducidas las relaciones entre las reflectancias en las regiones R y NIR del espectro electromagnético y sus evoluciones temporales, se procedió al cálculo del índice NDVI por medio de la Ecuación 4.2 y a su posterior análisis. La Figura 4.9 muestra los valores de NDVI a lo largo de todo el ciclo del cultivo de cebada estudiado.

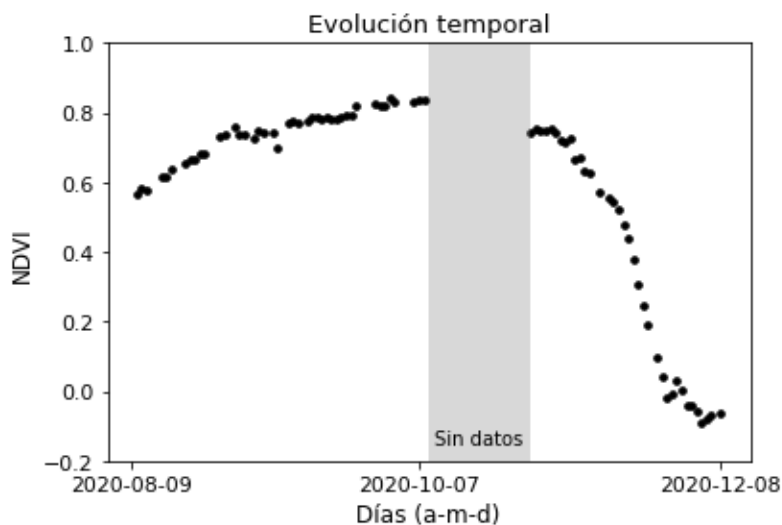


Figura 4.9: Evolución temporal del índice NDVI durante el ciclo del cultivo de cebada estudiado. Los valores de reflectancias para el cálculo del índice fueron tomados de las mediciones del sensor SNR instalado en la EB+. Los valores de NDVI varían según la cobertura de vegetación presente en la superficie y el contenido de nutrientes.

Para fechas correspondientes a las etapas de emergencia de la cebada (mes de agosto), en donde el cultivo no supera una cobertura del suelo del 10%, los valores de NDVI mostrados en la Figura 4.9 rondan entre los 0.6 y 0.7. Para fechas en donde el cultivo presentó una cobertura vegetal superior al 90% (mes de octubre), coincidente con la etapa en la que la cebada entra en período crítico y requiere una alta disponibilidad hídrica, los valores de NDVI se aproximan a 0.8 debido a las bajas reflectividades en la sección de las longitudes de onda del R y a las altas en la parte del NIR, consecuencia del alto contenido de nutrientes, clorofila y agua disponible para el cultivo. Finalmente, los valores de NDVI comienzan a decaer hasta encontrarse en cifras cercanas a 0 producto de la pérdida de clorofila, al entrar la planta en la etapa de madurez fisiológica, y comenzando así a cambiar la coloración pasando de verde a tonalidades marrones, disminuyendo la señal en el NIR y presentando un aumento en el R.

Además, de los datos tomados diariamente por el sensor SNR ubicado en la EB+, se cuenta con datos de reflectancias de las firmas espectrales generadas en campo por el espectroradiómetro de mano. Estas campañas espectrales se distribuyen durante los meses de duración del ciclo del cultivo, en donde algunas de éstas para determinadas fechas se pueden observar en la Figura 4.6, y presentan valores de reflectancias casi continuos entre las longitudes de onda 330 nm a 2520 nm. Para poder realizar una comparación entre estos datos y de reflectancias registrados en la EB+ y las imágenes satelitales, en primer lugar se calcularon los promedios de reflectancias sobre los datos hiperespectrales en los anchos de banda correspondientes a las secciones R y NIR del sensor SNR y del sensor MSI abordo de la plataforma SENTINEL-2. La Figura 4.10 representa las reflectancias en dichas regiones del espectro electromagnético promediadas en un ancho de banda correspondiente a la del sensor SNR (R\_SNR y NIR\_SNR con longitudes medias de onda y ancho de banda de 650 nm y 50 nm, y 810 nm y 40 nm respectivamente) y al sensor MSI (R\_SEN y NIR\_SEN con longitudes medias de onda y ancho de banda de 665 nm y 30 nm, y 842 nm y 115 nm, respectivamente).

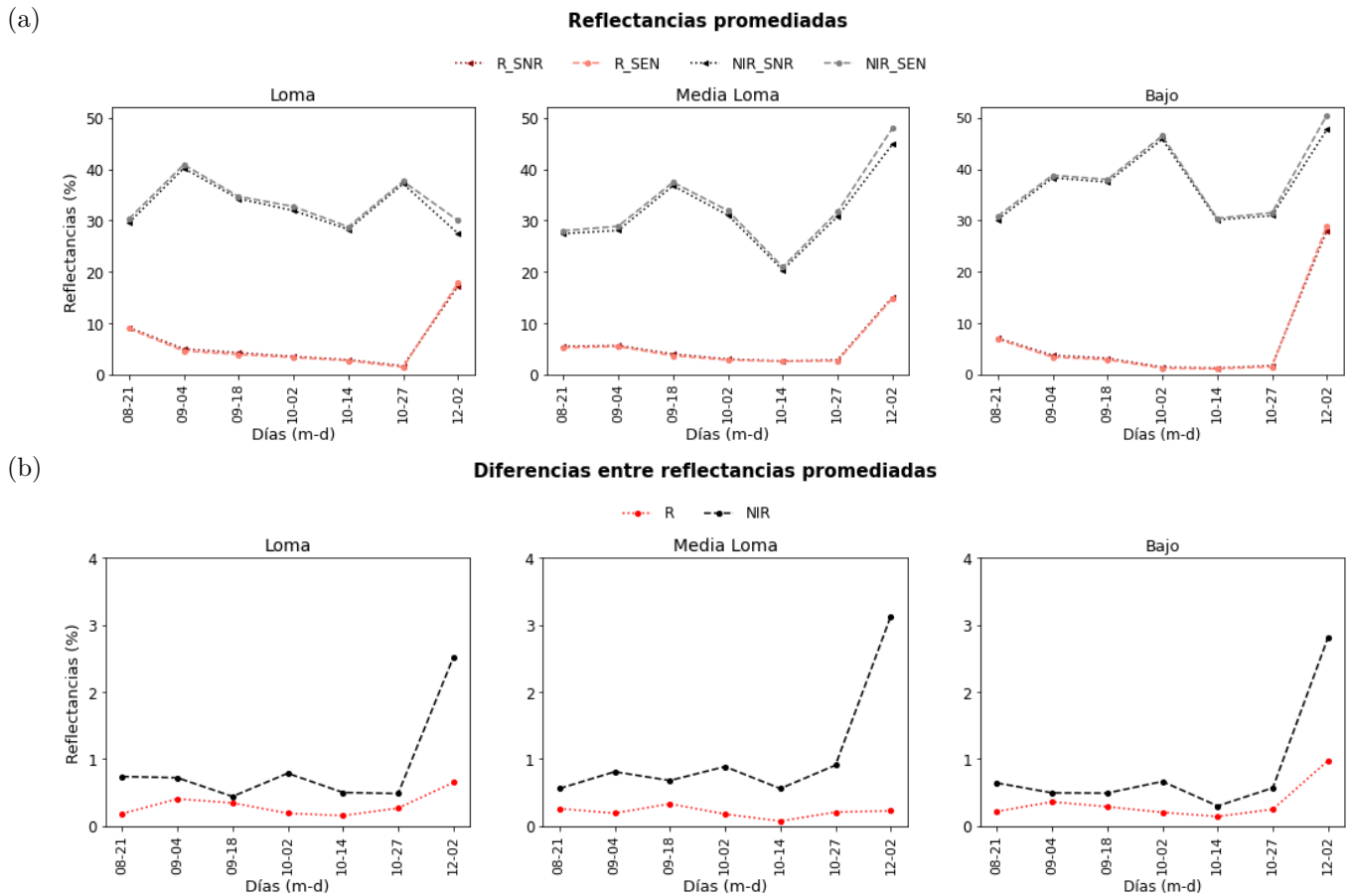


Figura 4.10: a) Valores de reflectancias, promediados en los anchos de banda correspondientes a los del sensor SNR instalado en la EB+ y al sensor MSI a bordo de SENTINEL-2, capturados por el espectroradiómetro SVC HR-1024i a una altura del dosel del cultivo de 2 m. b) Diferencia entre las reflectancias calculadas en la región R y NIR por el sensor SNR y MSI.

En la Figura 4.10a se puede observar la variación, a lo largo de los meses, de las reflectancias en las longitudes de onda de la parte visible (VIS) del R en donde para períodos en que el cultivo está en etapas de emergencia y tiene una cobertura de superficie menor a otras etapas posteriores (ver Sección 3.1), las reflectancias en este sector rondan alrededor del 10% y son consecuencia de la presencia de suelo descubierto con la incipiente vegetación. A medida que la cebada va creciendo, la cobertura de vegetación es mayor y los colores de las hojas se tornan verdes, por lo que las reflectancias van disminuyendo ya que el alto contenido de clorofila provoca una mayor absorción de energía en la región del R. Mientras que para etapas de maduración del cultivo, la región del VIS en cuestión deja de absorber energía debido a la coloración de tonalidades marrones por la ausencia de clorofila, produciendo una mayor reflectancia en el R. Con lo que respecta al sector correspondiente a las longitudes de onda del NIR, el cual es más sensible a los contenido de nutrientes y agua que al color, las reflectancias para inicios del cultivo se encuentran próximas al 30%, mientras que para fechas próximas a la cosecha, el comportamiento de los valores de reflectancia promedio difieren en cuanto a las regiones de loma, media loma y bajo. Esto es debido a que las condiciones en las últimas dos zonas hace que se mantenga la humedad del suelo más que en la zona de loma, afectando directamente al contenido de clorofila y nutrientes en el cultivo. Al finalizar esta sección, se detalla esta situación visualizando mapas de NDVI correspondientes a toda la parcela de cebada

Las diferencias entre los valores de reflectancias obtenidos según los anchos de banda del sensor

SNR y del sensor MSI, graficadas en la Figura 4.9b, son mayores en las bandas del NIR ya que para el primer sensor el ancho de banda correspondiente es de 40 nm y para el segundo es de 115 nm, presentando un rango de diferencias entre un 0.5 % y 3.2 % aproximadamente. Con lo que respecta a las bandas del R de ambos sensores, estos anchos son similares por lo que los valores promedio de reflectancias entre esas longitudes de onda no van a diferir significativamente, siendo el rango de diferencias entre 0 % y 0.8 %. A la vez estas diferencias, entre ambos sensores, en las regiones R y NIR son mayores para fechas cercanas a la cosecha, cuyo comportamiento se puede atribuir a que para fechas en donde el cultivo se encuentra maduro, las variaciones hiperespectrales de reflectancias son más notorias por lo que hacer un promedio de estas, utilizando anchos de banda distintos, provoca una diferencia en su valor.

Vistas las reflectancias en la parte R y NIR del espectro electromagnético y sus respectivas diferencias según el ancho de banda utilizado para realizar el promedio sobre los datos hiperespectrales de las firmas espectrales de campo, se procedió a realizar el cálculo de los valores de NDVI, para el ancho de las bandas según el sensor SNR y el MSI y la respectiva diferencia entre el valor de ambos índices. La Figura 4.11 muestra los valores de NDVI obtenidos a partir del promedio de las reflectancias de las firmas espectrales tomadas por el espectroradiómetro de mano en longitudes de onda correspondientes a los anchos de banda de ambos sensores. El comportamiento del índice NDVI para cada zona dentro del área de estudio a lo largo de los meses del ciclo del cultivo, observado en la Figura 4.11, es igual al comportamiento del NDVI calculado diariamente por el sensor SNR presentado en la Figura 4.9. Para fechas del mes de agosto, en donde el cultivo se está iniciando, los valores de NDVI rondan alrededor del 0.6 para las tres zonas. A medida que el cultivo va creciendo, el NDVI incrementa su valor, lo que se corresponde a fechas entre los meses de septiembre y noviembre. Finalmente, el valor del índice decae para el mes de diciembre, en donde el cultivo ya se encuentra maduro apto para la cosecha, sus hojas presentan tonalidades marrones y su contenido de agua es menor. Los valores del índice para la misma fecha difieren entre cada zona como consecuencia de las diferencias con respecto al contenido de agua, nutrientes y clorofila que va adquiriendo el cultivo según las características del suelo en cada sector, las cuales pueden variar según la topografía del área y la aplicación de fertilizantes que se le pueda realizar o la respuesta a estos a la zona cultivada. Por lo que se puede apreciar en la zona del bajo (Figura 4.11) existen máximos más alto que en loma y media loma, como los valores de NDVI en los meses en el que el cultivo se encuentra en desarrollo máximo, son mayores, debido a que el cultivo presenta una mayor reflectancia en las longitudes de onda del NIR y una menor en las del R, producto de un mayor contenido de agua y clorofila lo que se podría explicar por mejores condiciones de suelo, aporte de nutrientes o mayor contenido de agua en el suelo.

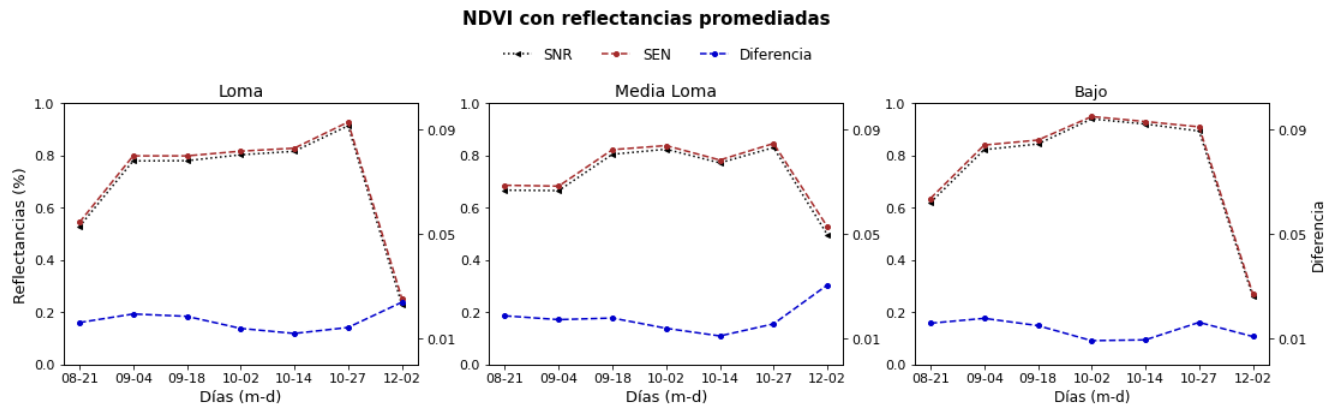


Figura 4.11: Valores del índice NDVI calculados a partir de las reflectancias en R y NIR, cuyos valores son el promedio de las reflectancias de las firmas espectrales de campo tomado entre las longitudes de onda correspondientes a los anchos de banda de los sensores SNR (negro) y MSI abordo de la plataforma SENTINEL-2 (rojo). Además se indica la diferencia entre ambos valores de índices (azul).

Hasta esta instancia del análisis del comportamiento del índice NDVI, hemos observado las reflectancias brindadas por el sensor SNR instalado en la estación de medición sobre el cultivo de cebada de manera diaria durante todo el ciclo de cultivo y las reflectancias de las firmas espectrales, promediadas en dos anchos de banda correspondientes al R y al NIR para determinadas fechas. Finalmente, para completar este análisis, resta por observar el comportamiento de este índice considerando las reflectancias otorgadas por las imágenes satelitales<sup>4</sup>. La Figura 4.12 presenta las reflectancias, para las fechas indicadas de las imágenes disponibles, captadas en las bandas espectrales B4, B5, B6, B7 y B8 para cada una de las regiones de estudio dentro de la parcela de cebada (ver Sección 2.1.2).

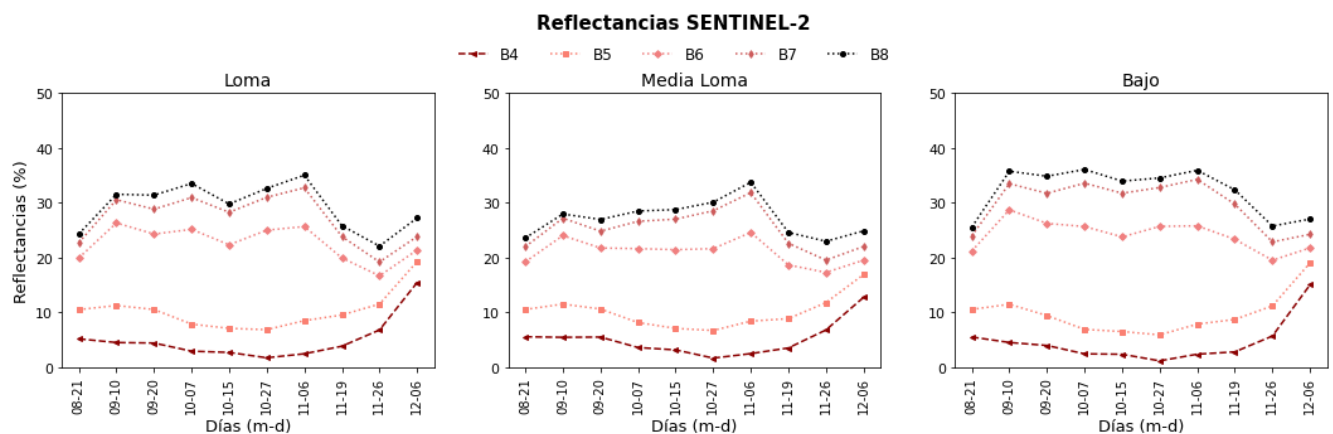


Figura 4.12: Reflectancias obtenidas de las imágenes satelitales de SENTINEL-2 para las bandas B4 (R), B5, B6, B7 y B8 (NIR) para diferentes fechas a lo largo del segundo semestre del año 2020. Se consideraron los valores de los píxeles para las regiones de loma, media loma y bajo.

La evolución temporal de los valores de reflectancia, para las tres regiones de la Figura 4.12, muestra un comportamiento similar al de las reflectancias para las mismas secciones del espectro

<sup>4</sup>Las reflectancias para las diferentes bandas espectrales que conforman al sensor MSI de SENTINEL-2, ubicadas en las regiones VIS-NIR-SWIR del espectro electromagnético, se pueden observar en la Figura 4.7

electromagnético capturadas por los métodos *in situ* descritos anteriormente. Las bandas intermedias correspondientes al VRE (B5, B6 y B7) tienen un comportamiento similar a la sección del R o NIR, dependiendo de la cercanía que tengan sus longitudes de onda media a estas secciones del espectro electromagnético.

Para apreciar de una forma más clara el comportamiento de las reflectancias de las bandas B5, B6 y B7, se decidió graficarlas en la Figura 4.13 en función de la longitud de onda para cada una de las fechas de las imágenes satelitales exceptuando la fecha del 2 de diciembre, ya que para esta fecha el cultivo presenta alta reflectancia en el R y baja en el NIR. En la Figura 4.13 se pueden observar los cambios del punto de inflexión de las reflectancias en la sección de transición del espectro electromagnético entre las longitudes de onda del R y del NIR, el cual se va desplazando hacia las longitudes de ondas mayores a medida que aumenta la cantidad de clorofila. Así, para la etapa de un desarrollo máximo de la cebada, en la fecha correspondiente al mes de octubre, el punto de inflexión se encuentra alrededor de los 725 nm mientras que para fechas en que el cultivo está desarrollando en un período de emergencia, como en el mes de agosto, este punto se encuentra sobre los 700 nm indicando un contenido de clorofila más bajo.

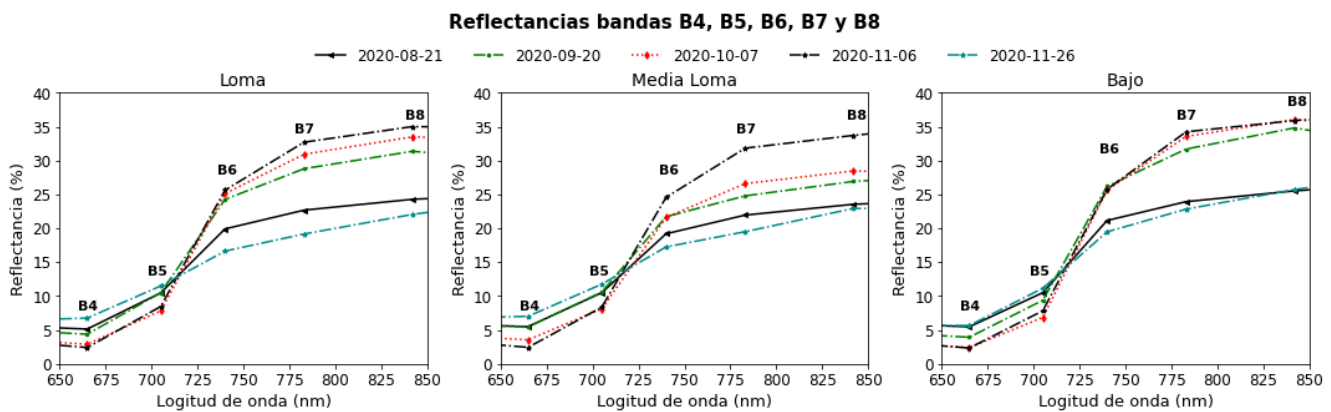


Figura 4.13: Reflectancias de las bandas B4, B5, B6, B7 Y B8 de SENTINEL-2 para las imágenes satelitales utilizadas para el seguimiento del cultivo de cebada.

Introducido el comportamiento de las reflectancias en las bandas espectrales de SENTINEL-2, se procedió a analizar la evolución temporal para cada zona, como se observa en la Figura 4.14, del índice NDVI (derecha) y además, la dispersión de las reflectancias R-NIR (izquierda).

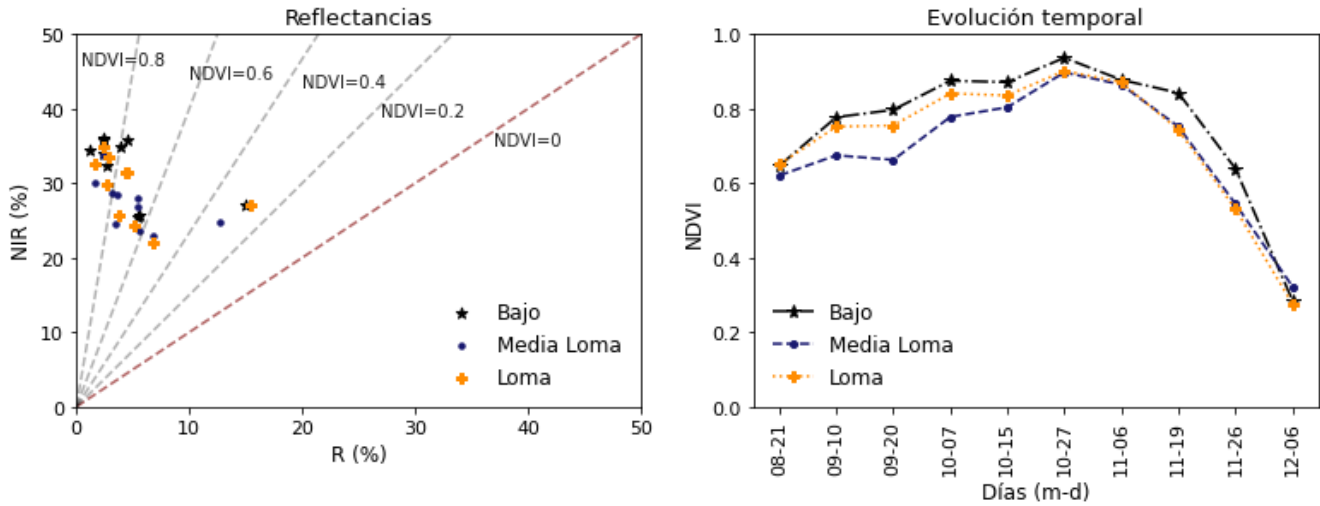


Figura 4.14: Reflectancias B4 (R) y B8 (NIR) adquiridas a partir de las imágenes satelitales para las tres zonas de estudio (izquierda). Evolución temporal del índice NDVI calculado a partir de las reflectancias mostradas en el gráfico de dispersión de la izquierda, captadas por la plataforma SENTINEL-2, para las zonas de estudio (derecha).

La evolución del NDVI tiene un comportamiento similar para las tres zonas de estudio, como se puede observar en la Figura 4.14. Para la zona del bajo los valores de NDVI son mayores para determinadas fechas, como las de septiembre y octubre en donde el cultivo se encuentra en etapas de desarrollo, dando indicios de que el cultivo en esta zona presentaba una mayor cobertura. Para obtener una visualización más completa de este índice en toda la parcela de estudio, en la Figura 4.15 se muestran cuatro mapas, generados a partir de las imágenes satelitales, de NDVI de la cebada, abarcando desde agosto a noviembre. La variación espacial del índice, de modo indirecto, distingue a la topografía de la parcela. Además se denotan los efectos de bordes de la misma.

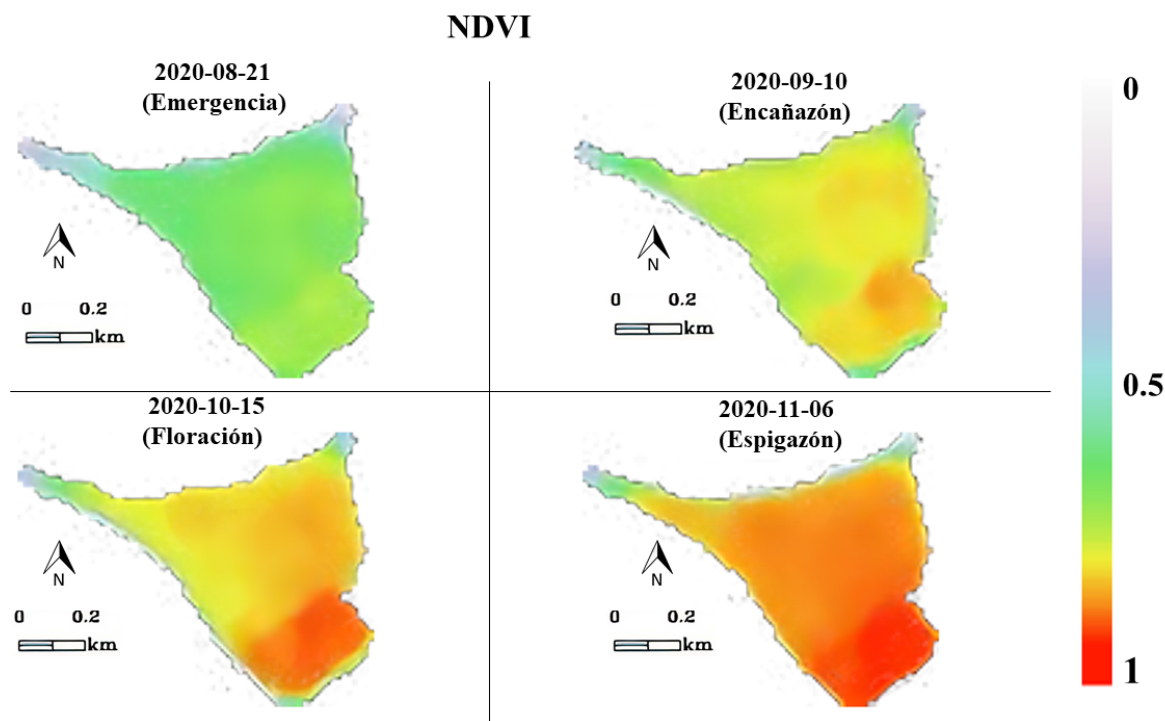


Figura 4.15: Mapas del índice de vegetación NDVI obtenido a partir de las imágenes satelitales para el área de estudio, cultivada con cebada, para fechas en que las condiciones de la misma son diferentes en cuanto a etapa de desarrollo, contenido de agua en suelo y cantidad de nutrientes y clorofila en hoja.

La Figura 4.15 muestra, además, indicios de la humedad del suelo y del estado en que se encuentra la vegetación según la fecha y la zona, al igual que como se mencionó en análisis previos. Para etapas en que el cultivo no presenta una cobertura total de suelo, como es en el mes de agosto, los valores de NDVI se mantienen similares. A medida que la vegetación presenta una cubierta vegetal mayor, como para los meses de septiembre, agosto y noviembre, los valores de NDVI comienzan a ser mayores en las zonas con baja cota topográfica (bajo, sur), disminuyendo hacia las cotas más altas de la parcela (loma, norte). Cabe destacar que el aumento en NDVI en la zona que denominamos bajo, se debe no sólo a que se conserva más la humedad en suelo porque la zona presenta una leve pendiente, sino que en esta sección de la parcela habría un manejo de suelo con anterioridad diferente al de las demás secciones. Claramente se puede apreciar por el contraste de valores de NDVI, visualizado con facilidad a partir de la fecha del 9 de septiembre (asegura un posible aporte excepcional de nutrientes de la campaña previa)..

#### 4.3.2. MSI

El índice MSI, como se describió en la Sección 2.2.2, es un indicador del estrés de las plantas y utiliza bandas espectrales ubicadas en las regiones del NIR y SWIR del espectro electromagnético. Para el seguimiento de este índice se contó con reflectancias en dichas regiones obtenidas del espectroradiómetro de mano y de las imágenes satelitales. El análisis de estas reflectancias se comienza con la observación de las mismas, captadas por el espectroradiómetro, entre las longitudes de onda correspondientes a las bandas de SENTINEL-2. En la Figura 4.16 se pueden observar dichos valores de reflectancia, promediados en los anchos de banda B8, B11 y B12 (ver Tabla 2.1).

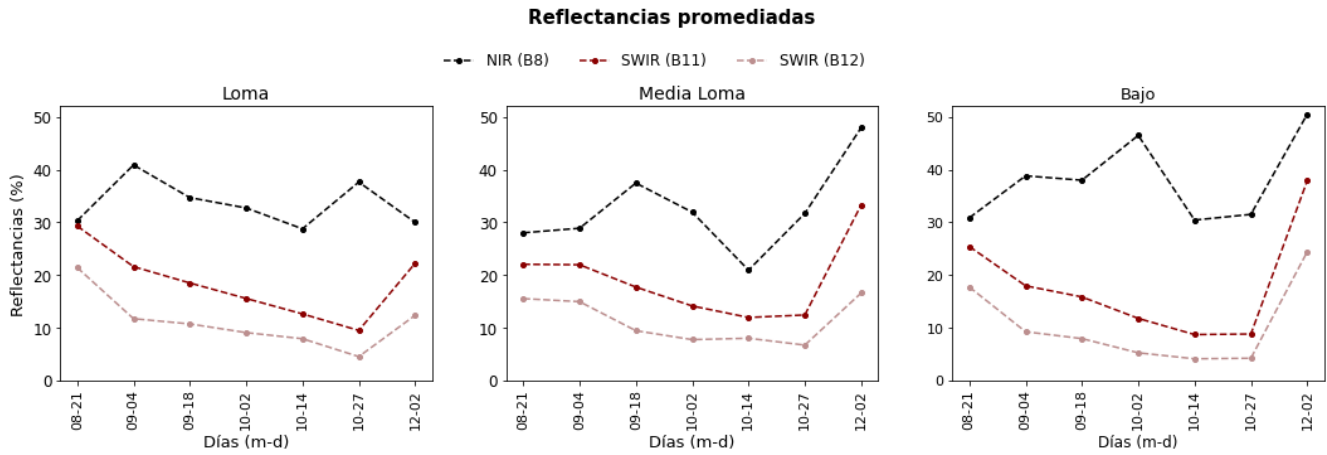


Figura 4.16: Valores de reflectancia obtenidos de las firmas hiperespectrales registradas por el espectroradiómetro de mano, promediadas en los anchos de banda B8 (NIR), B11 Y B12 (SWIR), correspondientes a la plataforma SENTINEL-2.

La Figura 4.16 muestra cómo las bandas B11 y B12, ambas ubicadas en el SWIR, presentan comportamientos similares. Aquí, los valores de reflectancias de las bandas B11 y B12 no difieren en comparación con los valores de las mismas para fechas en que el cultivo ya se encuentra maduro, con un contenido de agua en hoja significativamente menor a la etapa anterior. Además de las reflectancias mostradas, se pueden observar las reflectancias obtenidas de las imágenes satelitales, mostradas en la Figura 4.17, con una mayor frecuencia de días. Esta evolución temporal de reflectancias es similar a las tomadas *in situ*, siendo los valores de estas últimas mayor debido a la resolución espacial del espectroradiómetro.

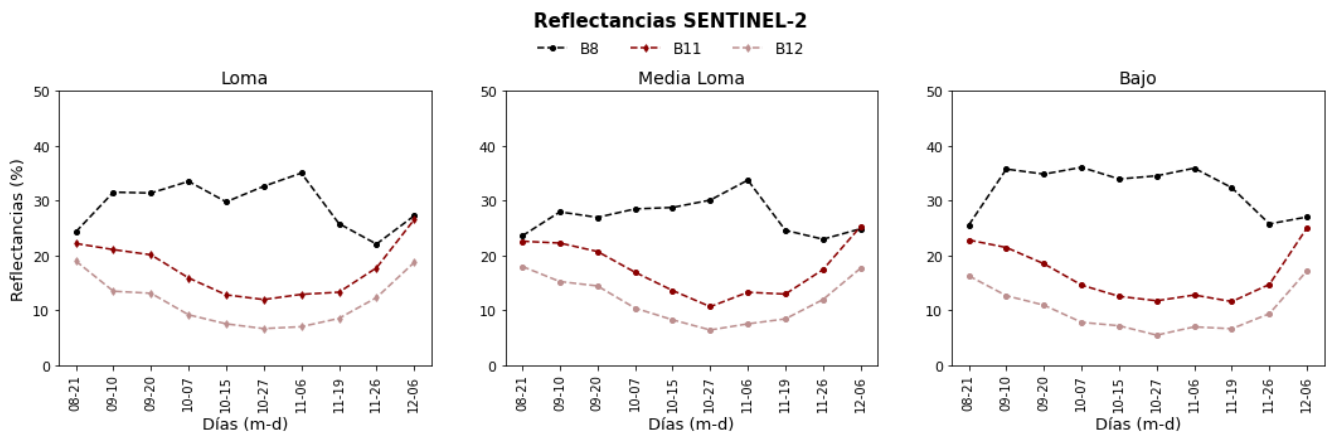


Figura 4.17: Valores de reflectancias de las bandas B8 (NIR), B11 y B12 (SWIR) obtenidas de las imágenes satelitales.

Visualizados los valores de reflectancias en las regiones del NIR y SWIR para las diferentes fechas que abarcó el desarrollo del cultivo, se observó el comportamiento del índice MSI con los valores obtenidos de las imágenes satelitales, utilizando las reflectancias de la banda B11, para cada una de las zonas diferenciadas dentro de la parcela de estudio, mostrado en la Figura 4.18.

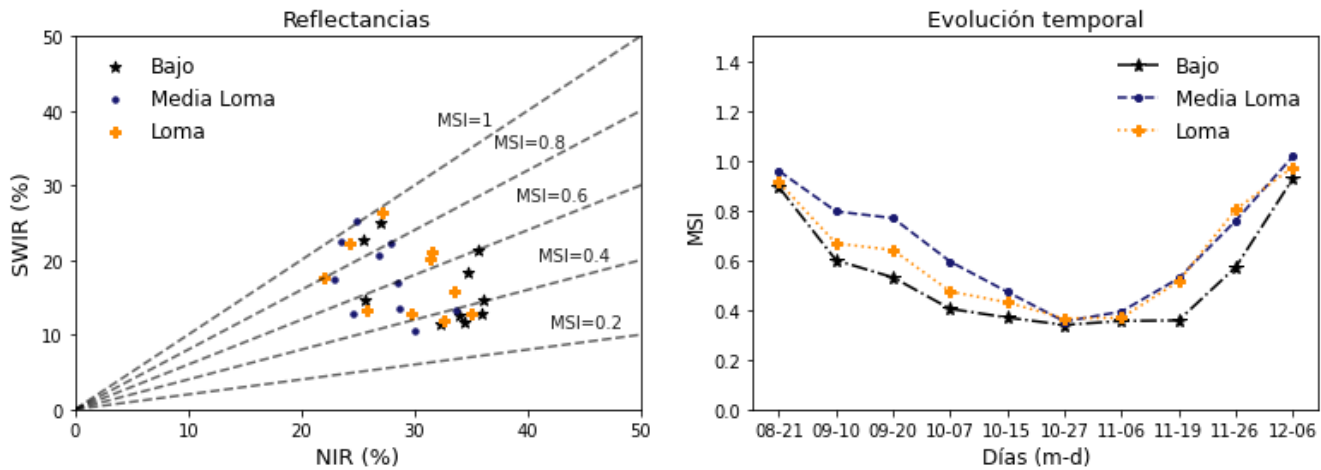


Figura 4.18: Reflectancias B8 (NIR) y B11 (SWIR) adquiridas de las imágenes satelitales para las tres zonas de estudio: bajo, media loma y loma (izquierda). Evolución temporal del índice MSI calculado con los valores de reflectancias mencionados (derecha).

Los valores de reflectancias para las regiones en las longitudes de onda del NIR varían entre 20 % y 40 %, mientras que para el SWIR lo hacen entre 10 % y 30 %. A partir de estos comportamientos, observados en la Figura 4.18 (izquierda), valores de alta reflectancia en el SWIR y baja en el NIR se corresponden a valores de índice cercanos a 1, indicando bajo contenido de humedad en la planta, debido a estados de maduración en la vegetación o estrés hídrico. En caso contrario, para reflectancias mayores en la región NIR, los valores de MSI son menores debido a que el contenido de agua presente en la misma es mayor. La evolución temporal del índice para cada una de las zonas de estudio, graficada en la Figura 4.18 (derecha), da indicios de cómo los valores de MSI para fechas en que el cultivo se encontraba en desarrollo (entre los meses de octubre y noviembre) son menores que para fechas en que el cultivo aún no tenía una cobertura total de suelo (agosto y septiembre) o se encontraba maduro (diciembre). Además, se puede notar que los valores de MSI para la zona del bajo son menores que para los de la zona de loma y media loma, como consecuencia de la mayor conservación de humedad en el suelo en esta zona que se encuentra levemente a una menor cota que las demás, lo que afecta directamente al contenido de nutrientes y clorofila en la vegetación.

Nuevamente, como se realizó para el índice NDVI, en la Figura 4.19 se presentan mapas del índice MSI para diferentes fechas de la parcela cultivada. El principal objetivo de lo mostrado en dicha figura es poder realizar una visualización y comprensión de las respuestas espectrales, y por ende las relaciones entre ellas, a partir de fechas claves en el desarrollo del cultivo.

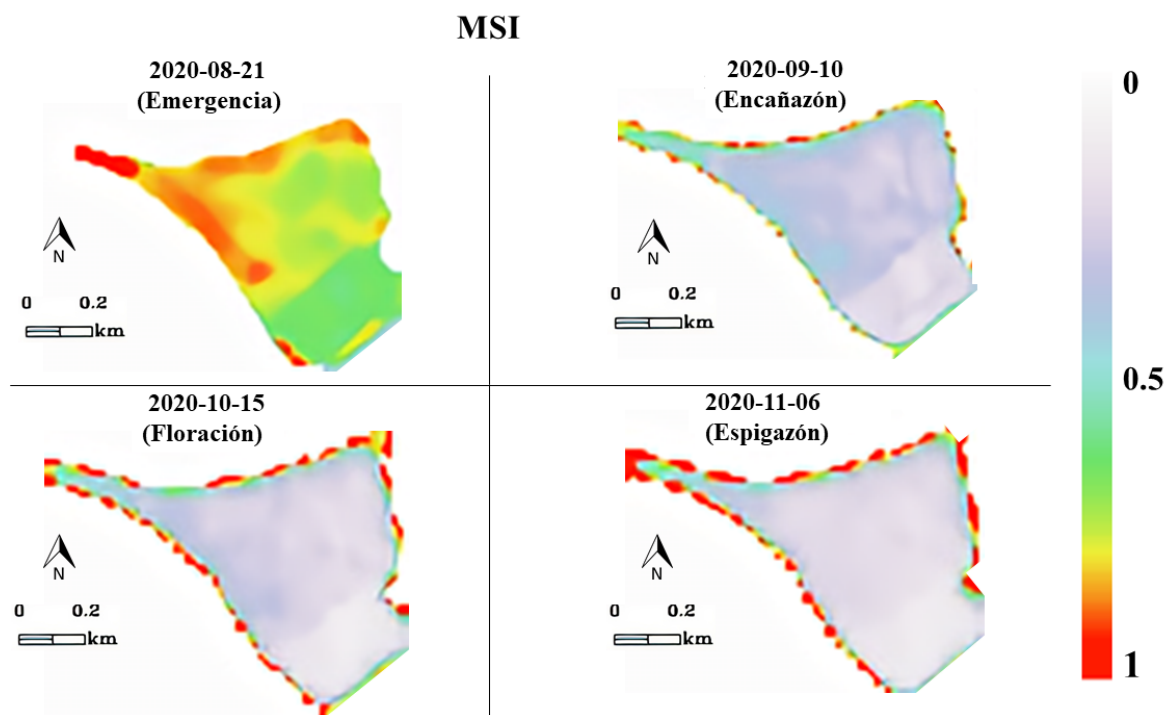


Figura 4.19: Mapas del índice de vegetación MSI obtenido a partir de las imágenes satelitales para el área de estudio, para fechas en que las condiciones de la vegetación difieren debido a la etapa de desarrollo en la que se encuentra.

A partir de los mapas de la Figura 4.19 se puede apreciar cómo los valores del índice MSI, independientemente de la fecha, para las zonas con cotas menores (bajo) son inferiores a los valores del mismo a medida que nos desplazamos a las zonas de mayor cota topográfica hacia el norte de la parcela (loma), en donde el MSI presenta un aumento. Recordando, valores altos de MSI representan estrés hídrico en etapas de desarrollo máximo del cultivo, por lo que al observar el mapa correspondiente a la fecha del 6 de noviembre de la Figura 4.19, los valores de MSI son menores a las demás fechas y la variación zonal no es significativa, dando como indicio que el cultivo presentó una disponibilidad adecuada de agua en suelo y de nutrientes.

### 4.3.3. NDWI

El índice NDWI es calculado a partir de las reflectancias correspondientes a las longitudes de onda del NIR y SWIR. Para el análisis a fines prácticos de este índice, se utilizaron las reflectancias de las bandas B8A y B12 pertenecientes a SENTINEL-2, las cuales se muestran en la Figura 4.20<sup>56</sup>.

<sup>5</sup>Los valores de reflectancias correspondientes a la banda B12 son los mismos que los mostrados para la Figura 4.17.

<sup>6</sup>Los valores de reflectancias promediados, obtenidos de los datos del espectroradiómetro de mano se muestran a lo largo de la descripciones anteriores. Por esta razón, se decidió no volver a mostrar dichas gráficas

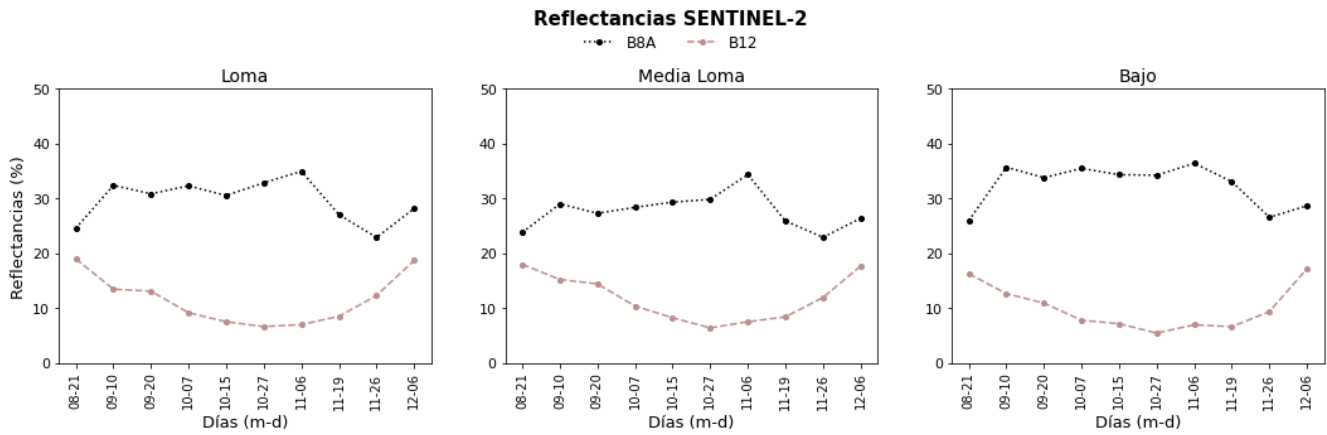


Figura 4.20: Reflectancias correspondientes a las bandas B8A y B12 adquiridas por el sensor MSI a bordo de la plataforma SENTINEL-2.

En la Sección 2.2.3 se mencionó cómo es el comportamiento de las reflectancias en las longitudes de onda involucradas. La Figura 4.20 muestra cómo es dicho comportamiento, en donde las reflectancias del NIR presentan sensibilidad principalmente a la materia seca, mientras que el SWIR al contenido de agua en hoja. Es por esto que para las fechas entre los meses de septiembre y octubre, en donde el cultivo se encuentra en etapa de desarrollo con un contenido de agua mayor (por la disponibilidad de agua en el perfil de suelo evidenciada en la EB+), las reflectividades en el NIR y SWIR son mayores y menores, respectivamente. Observadas las evoluciones de las reflectancias, en la Figura 4.21 se presenta la evolución temporal del índice estudiado.

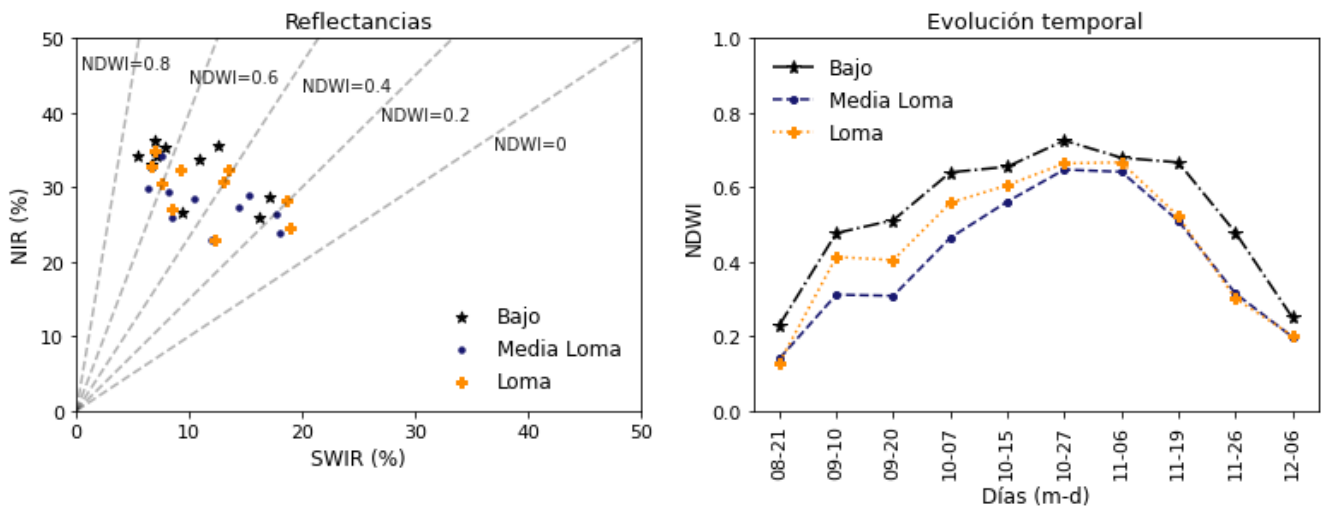


Figura 4.21: Valores de reflectancias correspondientes a las bandas B8A (NIR) y B12 (SWIR) adquiridas de las imágenes satelitales para las tres zonas de estudio (izquierda). Evolución temporal del índice NDWI (derecha).

La Figura 4.21 permite observar cómo valores mayores en NIR y menores en SWIR se corresponden a valores de NDWI entre 0.6 y 0.8, indicando coberturas vegetales máximas y altos contenidos de agua. Para fechas en donde el cultivo aún presentaba una cobertura vegetal baja, como en la imagen del mes de agosto, el valor de NDWI se encuentra entre 0.1 y 0.2 debido al suelo con baja proporción de vegetación captado. Para finalizar con el análisis de este índice, en la Figura 4.22 se muestran mapas de NDWI.

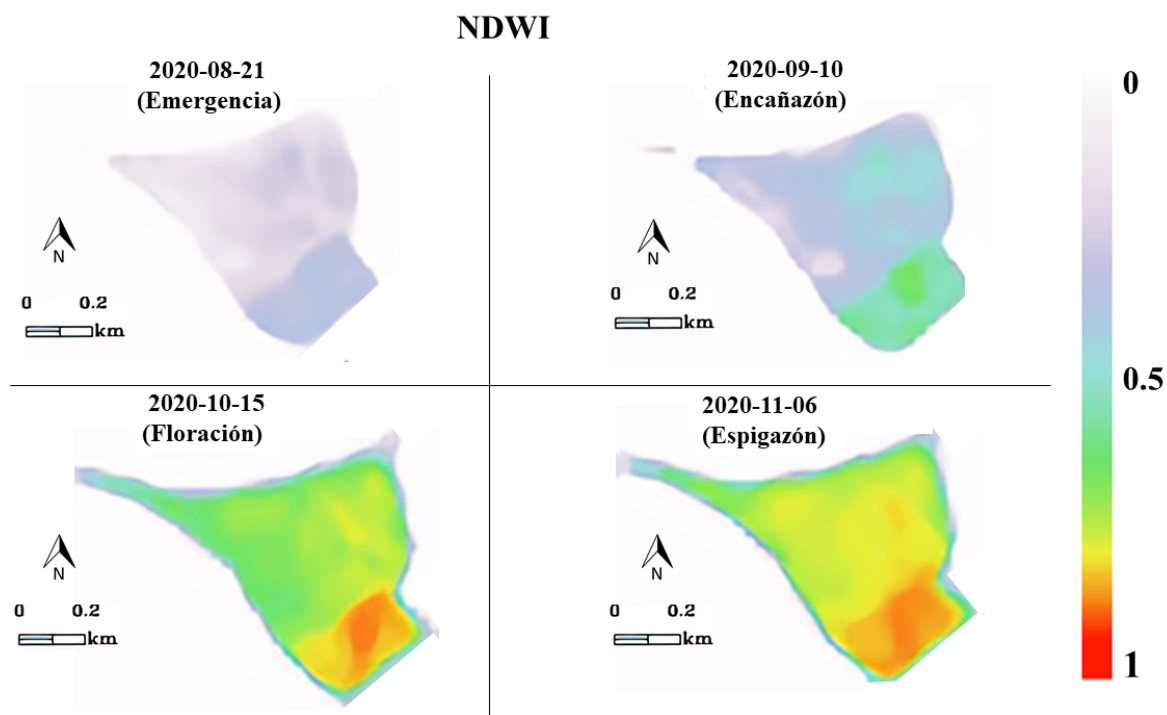


Figura 4.22: Mapas del índice NDWI a partir de las imágenes satelitales de la zona en que se encontraba la siembra de cebada.

La evolución zonal y temporal del NDWI, Figura 4.22, muestra un patrón similar al del índice MSI debido a que para el cálculo de ambos se utilizaron las bandas espectrales ubicadas en las regiones NIR y SWIR. Valores bajos de éste indican, en etapas de desarrollo máximo del cultivo, estrés hídrico. Para la fecha 6 de noviembre el índice no presentó valores bajos, lo que da indicios de un buen estado del cultivo. Para el mapa de esta misma fecha, al igual que para los mapas de las Figuras 4.15 y 4.19, se pueden observar los contrastes de valores entre las zonas que se encuentran alejadas de los bordes y éstos, dejando evidencia de suelo sin cobertura vegetal que rodeaba al cultivo.

# Capítulo 5

## Conclusiones

A lo largo de este trabajo se evaluaron los comportamientos de las variables medidas por la Estación de Balance de Energía (EB+), para realizar una introducción a la relación de cada una de ellas con los comportamientos del cultivo de cebada estudiado, en cada una de sus etapas de desarrollo. Una de las variables de más interés es el contenido volumétrico de agua en suelo (VWC), por lo que comenzando con el análisis de ésta se pudo observar cómo los perfiles de suelo ubicados a profundidades mayores a 0.1 m presentan un mayor valor y éstos no varían significativamente, excepto para lluvias considerables. De esta manera se visualizó un panorama general del comportamiento del suelo en el que se encuentra implantado el cultivo. Además, se detectó una baja en el valor de la variable, y en sus fluctuaciones, a profundidades entre 0.3 m y 0.5 m al comenzar el período crítico de la cebada, a partir de los primeros días del mes de octubre.

La estimación de esta variable fue uno de los objetivos al comienzo de este trabajo, por lo que se utilizaron diferentes modelos de regresión para observar el comportamiento del VWC con respecto a otras variables relacionadas a la energía electromagnética emitida por la vegetación. Una de las primeras variables con la que se comenzó dicho análisis fue con la temperatura radiativa emitida por el dosel de la vegetación. Debido a que la relación entre los VWC en los diferentes horizontes de suelo y la temperatura radiativa no es lineal, se prosiguió a realizar un modelo de ajuste exponencial, obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.66 para profundidades de suelo de 0.4 m. La hipótesis a este comportamiento es que en el horizonte de los 0.4 m, durante las etapas de desarrollo del cultivo (a partir de aproximadamente el primer nudo), se concentra la mayor proporción de raíces. Poder estimar mapas de humedad de suelo a diferentes profundidades, a partir de la temperatura radiativa es un método en continuo estudio, pero realizar un modelo en donde esta variable es medida a partir de una estación de medición *in situ* no es de utilidad. No obstante, este análisis permite comprender las emitancias de la vegetación según los contenidos de agua disponibles en suelo.

Para poder estudiar las respuestas espectrales en las regiones VIS, NIR y SWIR del espectro electromagnético, se contó con datos de reflectancias hiperespectrales tomadas en campo (EB+ y espectraloradiómetro) y con datos satelitales. Estos tres conjuntos de datos presentan resoluciones temporales, espaciales y espectrales diferentes, por lo que hacer una comparación entre estos tres no fue de utilidad. Por este motivo se optó por observar los valores de reflectancias, para cada uno de los métodos de medición, por separado. Sin embargo, se analizó si las tendencias de los comportamientos de las reflectancias eran similares usando los diferentes instrumentos. Claramente los comportamientos fueron concordantes, exceptuando fechas cercanas a la siembra y cosecha, en donde la cobertura vegetal de la superficie no era máxima, y por ende los ruidos de fondo causados

por el suelo desnudo afectan de diferente manera según la resolución espacial. Continuando con el objetivo de la estimación del contenido volumétrico de agua en suelo, las reflectancias mencionadas de las regiones del R, NIR y SWIR, no se correlacionaron con los contenidos de agua en suelo. Una de las razones se debe a que, para encontrar una relación representativa, se debe contar con datos a lo largo de diferentes campañas de siembra para poder así tener variedades de situaciones (ej. estrés hídrico, daños por condiciones externas al cultivo, condiciones climatológicas extremas, entre otras).

Con los valores de reflectancias se realizaron cálculos de índices de vegetación para observar, de forma complementaria, el estado de la cebada durante su ciclo, y su evolución. Para fechas posteriormente cercanas a la siembra, en donde el dosel de la vegetación apenas cubre un 30 % del suelo, el índice NDVI presentó valores próximos a 0 al igual que el índice NDWI, mientras que el índice MSI tuvo valores cercanos a 1, debido a que las medidas de reflectancias estuvieron influenciadas por el suelo. A partir de mediados del mes de septiembre, etapa en que el cultivo comienza su desarrollo pleno y entra en período crítico (presentando una máxima cobertura vegetal en la superficie), los valores de NDVI y NDWI fueron mayores, consecuencia de la mayor cobertura vegetal de la superficie y el aumento del contenido en hoja de clorofila y agua, presentando mayor sensibilidad a éstos las regiones del NIR y SWIR. Para esta misma etapa, el índice MSI presentó valores mínimos, indicando que el cultivo no pasó por situaciones de estrés hídrico y, complementando este comportamiento al de los demás índices, se puede ver como el cultivo de cebada tuvo una disponibilidad de agua adecuada en suelo para poder tener un buen desarrollo. Finalmente, para las fechas cercanas a la cosecha en donde el cultivo se encuentra maduro, los índices NDVI y NDWI presentan valores bajos si se los compara con la etapa de máximo desarrollo, como consecuencia del aumento de la materia seca en la vegetación. Mientras que el índice MSI presenta altos valores, pero no indicando estrés hídrico, sino que está mostrando la etapa final del cultivo en donde el contenido de clorofila y agua disminuyen notoriamente.

La parcela de estudio presenta una leve pendiente topográfica, indicándose como bajo la zona de menor cota, media loma la zona intermedia y loma la de mayor cota. A partir de las reflectancias obtenidas de las imágenes satelitales, se pudieron detectar variaciones de los valores en los índices de vegetación analizados, para cada una de estas regiones. Como hipótesis se planteó que en la zona del bajo la humedad en suelo se conserva más debido a la distribución de la topografía, lo cuál afecta de manera directa al desarrollo y posterior rendimiento del cultivo. Se corroboró dicha hipótesis a partir de los comportamientos de los índices de vegetación. Los valores de NDVI y NDWI presentaron valores en aumento hacia la zona del bajo, ubicada al sur-este de la parcela de cebada, mientras que los valores de MSI fueron disminuyendo, para cada una de las fechas analizadas. Además de la condición topográfica del bajo, se detectó un posible manejo previo de suelo diferente a las demás zonas, por la geometría con la que se distribuyen los valores de los índices en los mapas mostrados en la Sección 4.3.

Se puede concluir, a partir de los comportamientos de los índices de vegetación descriptos anteriormente, que la cuantificación del estrés hídrico en este cultivo de cebada no se pudo observar debido a que las condiciones climatológicas conllevaron a abundantes precipitaciones en la región. Para poder llevar a cabo dicha cuantificación y, luego, estimaciones a partir de variables que se puedan medir con sensores remotos, accesibles y rentables económicamente, se debe analizar una base de datos que abarque varios semestres de siembra-cosecha para el mismo tipo de cebada. Así, se podría analizar la creación de una generación de alertas a nivel zonal para la región pampeana de detección de ciertos comportamientos previos del cultivo, antes de sufrir estrés hídrico. Obtener

estos indicios previos permite manejar de manera adecuada los nutrientes y el agua, por medio de riego artificial, adicionados al suelo en aquellas zonas en que el recurso de agua en cantidad y calidad se encuentre disponible.

Finalmente, se debe destacar la sensibilidad que presenta el sensor MSI a bordo de la plataforma SENTINEL-2. Dentro de la parcela de estudio, se lograron identificar diferencias considerables con respecto a valores de reflectancias, de una misma banda y para una misma fecha, con una resolución espacial de 10 m. Tener disponibilidad de imágenes satelitales, como las que brinda la misión SENTINEL-2, es una gran herramienta para estimar condiciones fisiológicas de la vegetación a nivel local. Aunque en este trabajo no se hayan analizado en profundidad, se debe destacar que el sensor MSI presenta un conjunto de bandas en la región de transición del R al NIR, las cuales no son comunes en otras misiones satelitales, y brindan una información valiosa con respecto a las condiciones en las que se encuentra el cultivo.

# Anexo A

## Correlaciones de la humedad de suelo

Las estaciones de monitoreo automático, instaladas a campo abierto, suelen sufrir desperfectos técnicos debido a que están expuestas a ciertos factores extremos climatológicos. Para este caso de estudio, la estación móvil de medición EB+ instalada en la estancia La Alcira, no registró datos por 21 días de 127 que duró el ciclo de la cebada durante el segundo semestre del año 2020. Ciertas variables como la humedad de suelo, la radiación solar entrante, la temperatura y humedad del aire, entre otras, no presentan variaciones significativas de una estación móvil de medición a otra, instaladas sobre el partido de Tandil, debido a que la condición geográfica de la zona es uniforme. Debido a esto se puede realizar un completado de datos a partir de otras estaciones (Mancino y Rivas, 2021).

El completado de datos se le realizó a la variable de humedad de suelo (contenido volumétrico de agua en suelo, VWC), ya que conocer el valor de esta fue fundamental para el entendimiento del comportamiento del cultivo y demás. La variable VWC medida por el sensor CS655 se correlacionó a las profundidades de superficie y 0.6 m con el sensor ubicado en la estación de La Lucila y a la profundidad de 0.3 m con la estación El Parque, siendo los errores medios cuadráticos ( $R^2$ ) de 0.94, 0.94 y 0.91 respectivamente (Mancino y Rivas, 2021).

Con lo que respecta al completado de datos de la variable VWC medida por el sensor SoilVUE, se correlacionaron las mediciones de este sensor con las del sensor CS655, ubicados en la misma parcela de estudio. Ambos sensores determinan a la variable VWC a través de la permitividad dieléctrica de suelo, difiriendo entre ellos la estructura y el método de colocación como se observa en la Figura A.1.

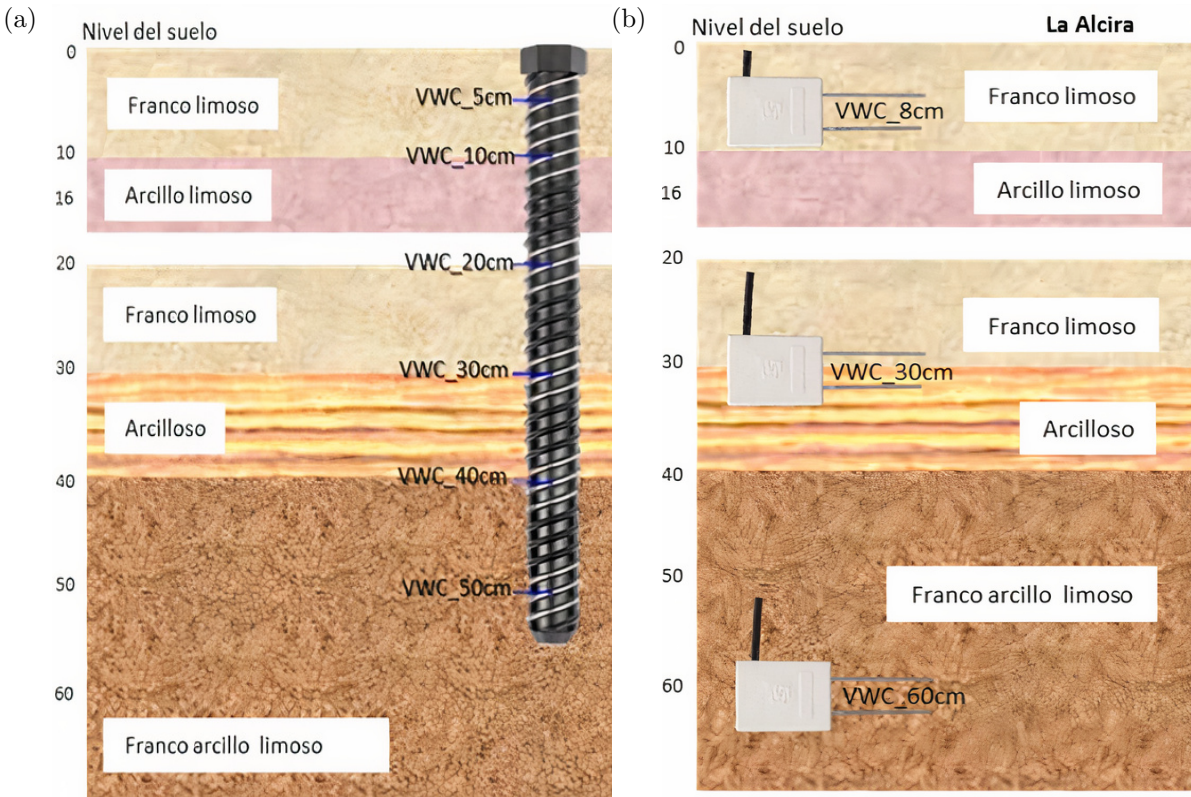


Figura A.1: Perfil de suelo de la zona de estudio con los horizontes característicos y disposición del sensor SoilVUE (a) y CS655 (b). Imágenes tomadas y adaptadas de Beninato et al. (2021) y Mancino y Rivas (2021), respectivamente.

La Figura A.2 muestra las correlaciones de los valores diarios de la variable VWC, entre las mediciones del sensor CS655 y el sensor SoilVUE, para los días del segundo semestre del año 2020. Se puede apreciar que la relación entre los datos se corresponde mejor a partir de los 0.08 m a los 0.6 m de profundidad, disminuyendo respectivamente su error medio cuadrático ( $R^2$ ), indicados en los subgráficos. Además, se puede apreciar que el rango de variación de la humedad de suelo en cada sensor para cada profundidad difieren. Para el horizonte de suelo ubicado a 0.08 m, el sensor CS655 registró contenido de agua entre 0.1 y 0.2  $m^3/m^3$ , mientras que el sensor SoilVUE registró intervalos entre 0 y 0.1  $m^3/m^3$  y 0 y 0.3  $m^3/m^3$  para horizontes de 0.05 m y 0.10 m, respectivamente. Esta variación notoria se debe al flujo preferencial provocado en la instalación del sensor CS655, lo que genera un centrado de agua alrededor del sensor.

**Correlación entre los sensores  
CS655 y SoilVUE**

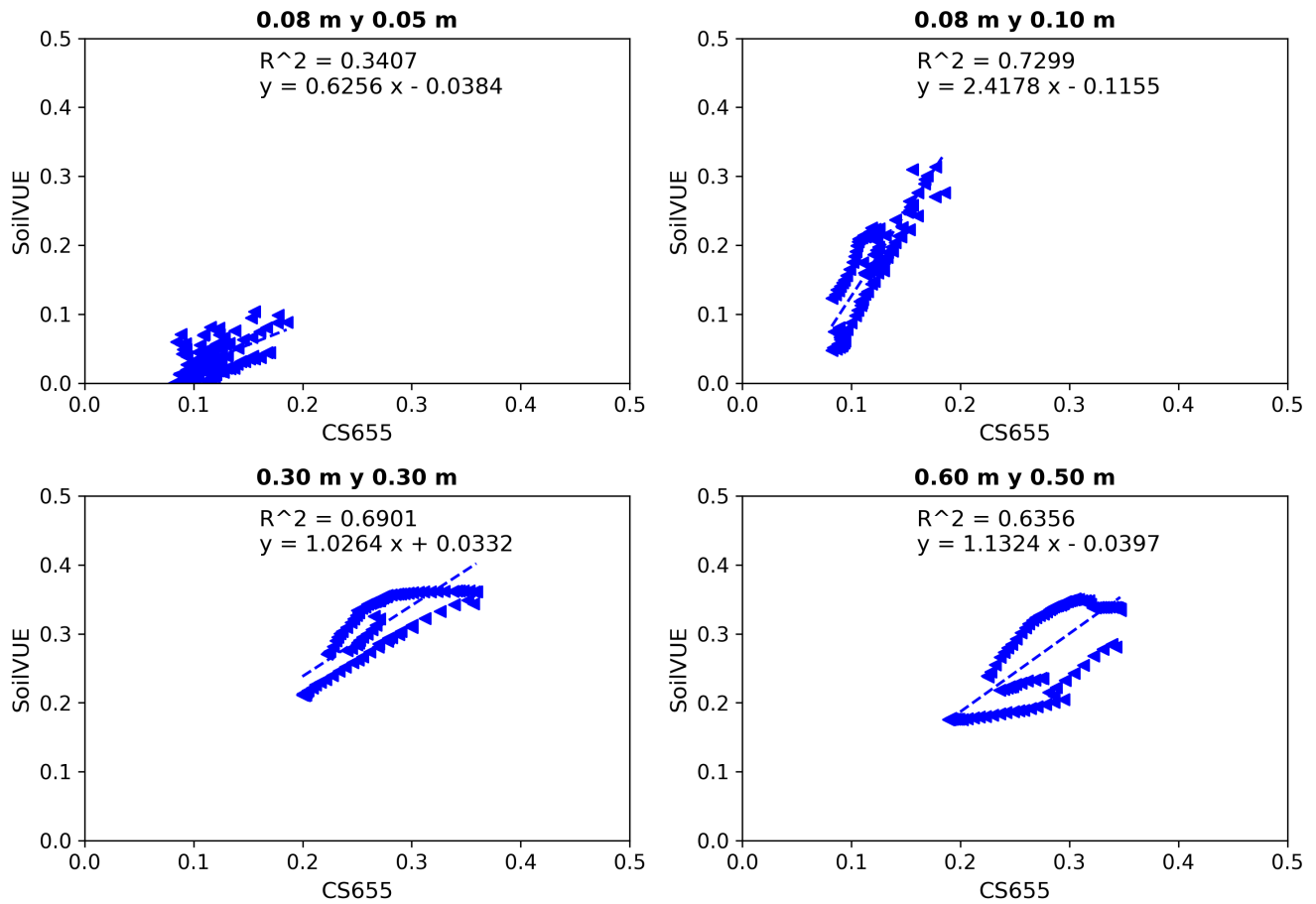


Figura A.2: Correlaciones entre el contenidos volumétrico de agua en suelo del sensor CS655 y SoilVUE, para el completado de datos de los días faltantes para el sensor SoilVUE.

# Anexo B

## Radiación relativa

La radiación relativa ( $R_r$ ) de onda corta (Ecuación B.1) es la relación entre la radiación solar incidente en la superficie ( $R_s$ ) y la radiación solar de cielo despejado ( $R_{so}$ ) (Allen et al., 1998).

$$R_r = \frac{R_s}{R_{so}} \quad (\text{B.1})$$

A partir de esta relación se puede determinar la cobertura nubosa que presenta la atmósfera, ya sea diaria o por períodos cortos de tiempo. Para poder calcular dicha radiación, antes se debe determinar la radiación solar de cielo despejado (Ecuación B.2).

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5})R_a \quad (\text{B.2})$$

En donde  $R_a$  [ $\text{MJm}^{-2}\text{hora}^{-1}$ ] es la radiación extraterrestre, es decir, la que incide en la parte superior de la atmósfera terrestre. Esta radiación depende del ángulo de declinación solar ( $\delta$ )<sup>1</sup> según el momento del día, de la latitud ( $\phi$ ) y de la estación del año. Para este estudio se utilizó el caso de  $R_a$  por hora (Ecuación B.3)

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(w_2 - w_1) \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) (\sin(w_2) - \sin(w_1))] \quad (\text{B.3})$$

Siendo:

$G_{sc}$  la constante solar  $0.0820$  [ $\text{MJm}^{-2}\text{min}^{-1}$ ],

$d_r$  la distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ecuación B.4),

$\delta$  la declinación solar en radianes (Ecuación B.5),

$\phi$  la latitud de la zona en radianes,

$w_1$  el ángulo de tiempo solar al comienzo del período en radianes (Ecuación B.6),

$w_2$  el ángulo de tiempo solar al final del período en radianes (Ecuación B.7).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left[ \frac{2\pi J}{365} \right] \quad (\text{B.4})$$

$$\delta = 0,409 \sin \left[ \frac{2\pi J}{365} - 1,39 \right] \quad (\text{B.5})$$

Donde  $J$  es el día juliano tomando como valor 1 el primer día del año (1 de Enero) y 365 o 366 el último día del mismo (31 de Diciembre).

---

<sup>1</sup>Ángulo entre la dirección de los rayos del sol y la normal a la superficie de la atmósfera.

Los ángulos de tiempo solar al comienzo y al final del período se obtienen a partir de

$$w_1 = w - \frac{\pi t_1}{24} \quad (\text{B.6})$$

$$w_2 = w + \frac{\pi t_1}{24} \quad (\text{B.7})$$

con  $t_1$  como la longitud del período de cálculo en hora, para este caso particular de estudio el período horario varía entre las 10:40 am y las 11:10 am; por lo tanto para una longitud de 30 min,  $t_1 = 0,5$ . Y  $w$  es el ángulo de tiempo solar en el punto medio del período (Ecuación B.8).

$$w = \frac{\pi}{12} [(t + 0,06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (\text{B.8})$$

Aquí:

$t$  es la hora local en el punto medio del período (unidad hora). Para este caso particular  $t = 10,92$ ,  $L_z$  la longitud del centro de la zona horaria local en grados al oeste de Greenwich. Para este caso se utilizó  $60^\circ$  (zona horaria de Buenos Aires UTC-3),

$L_m$  es la longitud del sitio de medición, también en grados al oeste de Greenwich. Se consideró para este análisis la longitud de la Estancia La Alcira  $L_m = 58,91^\circ$ ,

y finalmente  $S_c$  es la corrección estacional para el tiempo solar en hora (Ecuación B.9).

$$S_c = 0,1645 \sin(2b) - 0,1255 \cos(b) - 0,025 \sin(b) \quad (\text{B.9})$$

Siendo

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (\text{B.10})$$

Es necesario aplicar un cambio de unidades a la radiación solar de cielo despejado (Ecuación B.2) pasando de  $\text{MJm}^{-2}\text{hora}^{-1}$  a  $\text{Wm}^{-2}$  ya que los valores de radiación solar incidente  $R_s$  obtenidos de la estación de medición (ver Sección 3.2) están en dicha unidad.

Finalmente a partir de la Ecuación B.1 se consideró que los valores cuya relación era de 0,8 o mayor correspondían a los días sin cubierta de nubes.

## Anexo C

# Corrección de temperatura radiativa por emisividad

La temperatura radiativa captada por el sensor S1-111 no se corresponde solamente a la emitida por la cobertura vegetal, sino que su valor está influenciado por efectos de la emisividad del suelo y de la atmósfera (Kerdiles et al., 1996). Por esta razón, se prosiguió a realizar la corrección por emisividad a los datos adquiridos desde la estación móvil de medición EB+.

Para poder obtener el valor de temperatura radiativa corregida por emisividad se debe calcular en primera instancia la proporción de cobertura de vegetación ( $P_v$ ) captada por el sensor. Para la determinación de esta proporción se utiliza comunmente el índice de vegetación NDVI, como se muestra en la Ecuación C.1 (Valor, 1996).

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad (C.1)$$

Donde los valores de NDVI mínimos ( $NDVI_{\min}$ ) y máximos ( $NDVI_{\max}$ ) se corresponden a los captados por el sensor SNR (ver Sección 3.2.3) instalado en la misma estación de medición. A partir de esta proporción de cobertura de vegetación, se puede obtener la emisividad de superficie ( $\epsilon_{sup}$ ), utilizando la Ecuación C.2.

$$\epsilon_{sup} = \epsilon_v P_v + \epsilon_s (1 - P_v) \quad (C.2)$$

Siendo  $\epsilon_v$  emisividad de vegetación y  $\epsilon_s$  emisividad de suelo, cuyos valores respectivamente son 0.985 y 0.960 (Rubio, 1997).

Finalmente, los valores de la temperatura radiativa corregidos por emisividad ( $T_{sup(IR)}$ ) se calculan a partir de la Ecuación C.3

$$T_{sup(IR)} = \left[ \frac{\sigma T_{IR}^4 - (1 - \epsilon_{sup} R_{le})}{\epsilon_{sup} \sigma} \right]^{1/4} \quad (C.3)$$

Donde

$\sigma = 5,6710^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  es la constante de Stefan Boltzmann,

$T_{IR}$  es la temperatura radiativa medida por el sensor en K,

$\epsilon_{sup}$  es la emisividad de superficie calculada en la Ecuación C.2

y  $R_{le}$  es la radiación de onda larga entrante a la superficie en  $Wm^{-2}$ .

# Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Chapter 3*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Baret, F., y Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2), 161–173.
- Belward, A. (1991). Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. En A. Belward y C. Valenzuela (Eds.), *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*. Kluwer, Netherland: Kluwer Academic Publishers.
- Beninato, S., Oteiza, C., Mancino, C., Holzman, M., y Rivas, R. (2021). *Estimación de perfiles de humedad del suelo a partir del comportamiento espectral en las bandas del rojo e infrarrojo cercano*.
- Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., Degano, M., Kruse, E., y Bayala, M. (2018). Evaluation of two models using CERES data for reference evapotranspiration estimation. *Rev. de Teledet.*, 51, 87–98. doi: 10.4995/raet.2018.9259
- Carmona, F., Rivas, R., y Fonnegra, D. C. (2015). Vegetation index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *European Journal of Remote Sensing*, 48(1), 319-326. doi: 10.5721/EuJRS20154818
- Carmona, F., Rivas, R., Ocampo, D., Schirmbeck, J., y Holzman, M. (2011). Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua-LAC*, 3 - N°1, 26-36.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantol, S., Jacquemoud, S., y Grégoire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77, 22-33. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00191-2
- Chen, D., Huang, J., y Jackson, T. J. (2005). Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from modis near- and short-wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 98, 225 – 236. doi: 10.1016/j.rse.2005.07.008
- Chen, X., y Campagna, D. J. (2009). The SAGE handbook of remote sensing. En (cap. Remote Sensing of Geology).
- Curran, P. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278. doi: 10.1016/0034-4257(89)90069-2

- Datos Abiertos Servicio Meteorológico Nacional. (2020). <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>, 2 de Junio de 2021.
- Degano, M. F., Rivas, R., y Carmona, F. e. a. (2020). Evaluation of the mod16a2 evapotranspiration product in an agricultural area of argentina, the pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. doi: 10.1016/j.ejrs.2020.08.004
- Drury, S. A. (1987). Image interpretation in geology. *Geocarto International*, 2(2), 48-48. doi: 10.1080/10106048709354098
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., Kroehl, H. W., Davis, E. R., y Davis, C. W. (1997). Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1373-1379. doi: 10.1080/014311697218485
- ENVI. (2004). ENVI User's Guide [Manual de software informático].
- Estaciones móviles. (2020). <https://estaciones-moviles.webnode.es/l/cebada-ciclo-invierno-2020/>, 2 de Junio de 2021.
- European Space Agency. (2018). Sentinel-2 user handbook [Manual de software informático].
- Faramiñán, A., Carmona, F., Rivas, R., Silicani, M., Rodríguez, P. O., y Degano, M. (2020). Estación móvil de balance de energía para el monitoreo integral de cultivo: caso de estudio en cebada. *XVIII Reunión Argentina y IX Latinoamericana de Agrometeorología*.
- Gamon, J., y Surfus, J. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143, 105-117. doi: 10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x
- Gao, B. (1996). NdwI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Ghulam, A., Li, Z., Qin, Q., Yimit, H., y Wang, J. (2008). Estimating crop water stress with ETM+ NIR and SWIR data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1679–1695. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.05.020
- 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, 76 – 87.
- Govender, M., Dye, P., Weiersbye, I., ETF Witkowski, E., y Ahmed, F. (2009). Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress. *Water SA*, 35 No. 5.
- Guevara Ochoa, C., Lara, B. D., Vives, L. S., Zimmermann, E. D., y Gandini, M. L. (2018). Una metodología para la caracterización del uso del suelo mediante imágenes de media resolución espacial. *Universidad Autónoma Chapingo; Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24; 2, 207-218.
- Guevara Ochoa, C., Medina Sierra, A., Vives, L., Zimmermann, E., y Bailey, R. (2019). Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. *Hydrological Processes*, 34(6), 1371-1392. doi: doi.org/10.1002/hyp.13615

- Guyot, G., Baret, F., y Jacquemoud, S. (1992). Imaging spectroscopy for vegetation studies. En F. Toselli y J. Bodechtel (Eds.), *Imaging spectroscopy: Fundamentals and prospective applications* (Vol. 2, p. 145-165). Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Holzman, M., Rivas, R., y Bayala, M. (2021b). Relationship between TIR and NIR-SWIR as Indicator of Vegetation Water Availability. *Remote Sensing*, 13(17). doi: 10.3390/rs13173371
- Holzman, M., Rivas, R., Bayala, M., y Pasapera, J. (2021a). Measuring land surface temperature, near-infrared and short-wave infrared reflectance for estimation of water availability in vegetation. *MethodsX*, 8, 101172. doi: 10.1016/j.mex.2020.101172
- Holzman, M., Rivas, R. E., y Piccolo, M. C. (2012). Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente*, 28, 25-33.
- Horler, D., Dockray, M., y Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273-288. doi: 10.1080/01431168308948546
- Houspanossian, J., Rivas, R., y Vazquez, P. (2008). La Humedad del Suelo Cultivado con Maíz y la Relación con la Temperatura Radiativa de su Cubierta Vegetal. *Ciencia*, 3, No 7, 65.
- Houspanossian, J., Schirmbeck, J., Rivas, R., y Vazquez, P. (2007). Relación entre la temperatura radiativa de la vegetación y el contenido de agua en suelo. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Hunt, E., y Rock, B. (1989). Detection of changes in leaf-water content using nearinfrared and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-45. doi: 10.1016/0034-4257(89)90046-1
- INTA. (2020). GeoINTA. Cartas de suelos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. (Acceso 24 de Abril 2021 FALTA WEB)
- Ishida, T., Kurihara, J., Viray, F. A., Namuco, S. B., Paringit, E. C., Perez, G. J., ... Marciano, J. J. (2018). A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 80-85. doi: 10.1016/j.compag.2017.11.027
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666. doi: 10.2307/1936256
- Karume, K., Schmidt, C., Kundert, K., Bagula, M. E., Safina, B. F., Schomacker, R., ... Mushagalusa, G. N. (2017). Use of Remote Sensing for Population Number Determination. *The Open Access Journal of Science and Technology*, 5, 9. doi: 10.11131/2017/101227
- Kerdiles, H., Grondona, M., Rodriguez, R., y Seguin, B. (1996). Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79(3), 157-182. doi: 10.1016/0168-1923(95)02253-8
- Kucukkaya, A. G. (2004). Photogrammetry and remote sensing in archeology. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 88(1), 83-88. (Photopolarimetry in remote sensing) doi: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.030

- le Maire, G., Francois, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J.-Y., Breda, N., ... Dufrene, E. (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3846–3864.
- Li, P. H., y Wang, Q. (2011). Retrieval of leaf biochemical parameters using PROSPECT inversion: A new approach for alleviating ill-posed problems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(7), 2499–2506.
- Lusi, A., Holzman, M., Bayala, M., Stadler, C., Rivas, R., y Carmona, F. (2015). Estimación de rendimiento de cultivo con datos de satélite. II Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental - II Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología.
- Maddison, A. (2009). Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP. , 1-2006 AD.
- Magrin, G., Travasso, M., López, G., Rodríguez, G., y Lloveras, A. (2006). Vulnerabilidad de la Producción Agrícola en la Región Pampeana Argentina. , 86.
- Mallick, K., Battacharya, B., y Patel, N. (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and ndvi. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1327-1342.
- Mancino, C., y Rivas, R. (2021). Completado de datos medidos por sensores de humedad de suelo: Caso de estudio en estaciones de monitoreo automática (EMA) de la Red IHREDA. E-ICES 16.
- Merton, R., y Huntington, J. (1999). Early simulation of the ARIES-1 satellite sensor for multi-temporal vegetation research derived from AVIRIS. *JPL Airborne Earth Science Workshop*, 8, 299–307.
- Modelos CRONOS. (2021). <http://cronocebada.agro.uba.ar/index.php/>, 26 de Mayo de 2021.
- Olivera Rodriguez, P., Holzman, M., y Degano, M. F. (2020). Spatial variability of the green water footprint using a medium-resolution remote sensing technique: The case of soybean production in the Southeast Argentine Pampas. *Science of the Total Environment*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142963
- Olivera Rodriguez, P., Holzman, M. E., Mujica, C. R., Rivas, R. E., y Aldaya, M. M. (2021). Different Approaches to Assessing Pollution Load: The Case of Nitrogen-Related Grey Water Footprint of Barley and Soybean in Argentina. *Water*, 13(24). doi: 10.3390/w13243558
- Parcak, S. (2009). *Satellite remote sensing for archaeology*. doi: 10.4324/9780203881460
- Pearson, R. L., y Miller, L. D. (1972). “remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, VIII.
- Piccolo, M., Holzman, M., y Rivas, R. (2013). Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índice de vegetación. *Revista Universitaria de Geografía*, 22, 171.

- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., y Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, Vol. 1*, pp. 309–317.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., y Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. *NASA/GSFC, Type III, Final Report*.
- Rubio, E. (1997). Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14,  $\mu\text{m}$  Wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 490–521. doi: 10.1016/s0034-4257(96)00123-x
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3), 157–183. doi: 10.1016/S0169-1368(99)00007-4
- SAGPyA, y IICA. (2006). *Perspectivas de los biocombustibles en la Argentina y en Brasil* (1. ed.). Buenos Aires, Argentina.
- Sahoo, R. N., Ray, S. S., y Manjunath, K. R. (2015). Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science*, 108(5), 848–859.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olioso, A., Lopez-García, M. J., El Kharraz, M. H., ... Dempere, L. (2000). *Teledetección* (J. A. Sobrino, Ed.). Valencia, España: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Solanki, H., Mankodi, P., Nayak, S., y Somvanshi, V. (2005). Evaluation of remote-sensing-based potential fishing zones (PFZs) forecast methodology. *Continental Shelf Research*, 25(18), 2163–2173. doi: 10.1016/j.csr.2005.08.025
- Steduto, P., Hsiao, E., T. and Fereres, Raes, D., y Division, L. . W. (2012). *Crop Yield Response to Water*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Stimson, H. C., Breshears, D. D., Ustin, S. L., y Kefauver, S. C. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *Remote Sensing of Environment*, 96, 108 – 118. doi: 10.1016/j.rse.2004.12.007
- Thenkabail, P. (2015). Remote Sensing Handbook: Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing. En P. Thenkabail (Ed.), (Vol. II, cap. Hyperspectral remote sensing for terrestrial applications). Taylor and Francis Group, LLC.
- Thenkabail, P., Lyon, J. G., y Huete, A. (2019). *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Second Edition volume II. Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation*. New York, NY: Taylor and Francis Group, LLC.
- Ustin, S., Gitelson, A., S., J., Schaepman, M., Asner, G., J.A., G., y Zarco-Tejada, P. (2009). Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113, S67–S77. doi: 10.1016/j.rse.2008.10.019
- Valor, E. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167–184. doi: 10.1016/0034-4257(96)00039-9

- Wang, Q., y Li, P. (2012). Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water content using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. *Hydrological Processes*, 26(8), 1230–1241.
- Yang, X., Yue, W., y Gao, D. (2013). Spatial improvement of human population distribution based on multi-sensor remote-sensing data: an input for exposure assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15), 5569-5583. doi: 10.1080/01431161.2013.792970
- Zeme, M., S. y Varni. (2015). Nivel freático, recarga y caudal básico en la cuenca del arroyo del azul. *Revista Estudios Ambientales*, 3 No. 2, 14-29.
- Zhou, X.-M., Tang, B., Wu, H., y Li, Z.-L. (2013). Estimating net surface longwave radiation from net surface shortwave radiation for cloudy skies. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 8104-8117. doi: 10.1080/01431161.2013.832002

# Glosario

**swath** Ancho de la imagen o de la franja orbital en la superficie captada por el sensor.. 11

**clorofila** Pigmentos de color verde que se encuentran en las cianobacterias y en aquellos organismos que contienen cloroplastos en sus células (plantas y diversas algas). Cumple un rol fundamental en la fotosíntesis ya que es un proceso que permite a las plantas y algas producir energía a partir de la luz solar.. 16

**fitosanitario** Estado de enfermedades de las plantas y todo lo relacionado a ellas.. 17

**fotoperiódicos** Conjunto de procesos de las especies vegetales mediante los cuales regulan sus funciones biológicas usando como parámetros el tiempo de exposición que tienen a la luz solar y a la temperatura.. 21

**macollo** Brotes secundarios, conjunto de tallos, flores o espigas que nacen del mismo pie de una planta. 23

**nadir** Punto de la superficie terrestre perpendicular al plano focal.. 27

**ortorectificadas** Imágenes en las que se elimina la distorsión de la imagen debido a las variaciones espaciales ocurridas en el proceso de captura de la información e inherentes al movimiento del sensor.. 15

**termopila** Dispositivo electrónico que convierte energía térmica en energía eléctrica.. 29

**tiempo térmico** Suma de la temperatura media diaria por sobre una temperatura base (en donde el desarrollo del cultivo es nulo), entre el día  $i$  en el que se inicia la etapa y el día  $n$  en el que finaliza la misma. La unidad con la que se lee este tiempo térmico es °Cdía.. 23

**transmitancia** Magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo por unidad de tiempo.. 14