
HORTICULTURA

Analysis of biophysical variables in onion crops (*Allium cepa*) with nitrogen fertilization by remote sensing

Análisis de variables biofísicas en cultivo de cebolla (*Allium cepa*) con fertilización nitrogenada mediante teledetección



Bellacomo, C.^{1*}; Orden, L.^{1,2}; Pezzola, A.¹; Winschel, C.¹; Casella, A.³

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA. Estación Experimental Agropecuaria Ascasubi - EEA Ascasubi, Ruta 3 Km 794, 8142, Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina.

²Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur -UNS, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA Castelar. Instituto Clima y Agua, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

* Autor de correspondencia, correo electrónico: bellacomo.carolina@inta.gob.ar

Recibido: 26/08/2020

Aceptado: 16/11/2020

ABSTRACT

Bellacomo, C.; Orden, L.; Pezzola, A.; Winschel, C. ; Casella, A. 2020. Analysis of biophysical variables in onion crops (*Allium cepa*) with nitrogen fertilization by remote sensing. Horticultura Argentina 39 (100): 7-24.

The production of onion bulbs (*Allium cepa*) requires a high amount of nitrogen. According to the demand of sustainable agriculture, the development of information and communication technologies, allows to improve the efficiency of nitrogen fertilization. In the south of the province of Buenos Aires, Argentina, between 8,000 and 10,000 hectares are cultivated per year in the districts of Villarino and Patagones. The aim of this work was to analyze the relationship of biophysical variables: leaf area index (LAI), chlorophyll content in canopy (CCC) and canopy cover factor (fCOVER) with nitrogen fertilization of

intermediate cycle onion crop and its effects on yield. A trial with different doses of granulated urea and granulated urea with urease inhibitor was carried out, where biophysical characteristics were evaluated in the field and in Sentinel-2 satellite images. All variables were correlated and yield was calculated. In the field/satellite data correlation, an R^2 of 0.87, 0.96 and 0.79 for leaf area index, coverage factor and chlorophyll content respectively was obtained, showing a good relationship in the three variables. The application of nitrogen in all its sources and doses produced significantly higher yields than the control. The LAI and CCC variables had a positive correlation with the yield in the months of November and December.

Additional keywords: Vegetation index, LAI, nitrogen, chlorophyll, Sentinel-2.

RESUMEN

Bellacomo, C.; Orden, L.; Pezzola, A.; Winschel, C. ; Casella, A. 2020. Análisis de variables biofísicas en cultivo de cebolla (*Allium cepa*) con fertilización nitrogenada mediante teledetección. Horticultura Argentina 39 (100): 7-24.

La producción de bulbos cebolla (*Allium cepa*) requiere elevada cantidad de nitrógeno. Acorde a la demanda de la agricultura sustentable, el desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación, permite mejorar la eficiencia en la fertilización nitrogenada. En el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se cultivan entre 8.000 y 10.000 hectáreas por año entre los distritos de Villarino y Patagones. El objetivo de este trabajo fue analizar la relación de las variables biofísicas: índice de área foliar (IAF), contenido de clorofila en el canopeo (CCC) y factor de cobertura de canopeo (fCOVER)

en un cultivo de cebolla de ciclo intermedio con fertilización nitrogenada y su efecto en el rendimiento. Se realizó un ensayo con diferentes dosis de urea granulada y urea granulada con inhibidor de ureasa, donde se evaluaron las características biofísicas a campo y en imágenes del satélite Sentinel-2. Se relacionaron todas las variables y se calculó el rendimiento. En la correlación datos de campo/satélite se obtuvo un R^2 de 0,87, 0,96 y 0,79 para índice de área foliar, factor de cobertura y contenido de clorofila respectivamente. La aplicación de nitrógeno en todas sus fuentes y dosis produjo rendimientos significativamente mayores que el testigo. Las variables IAF y CCC tuvieron correlación positiva con el rendimiento en los meses de noviembre y diciembre.

Palabras claves adicionales: Índices de vegetación, IAF, nitrógeno, clorofila, Sentinel-2.

1. Introducción

En la actualidad el desafío es adaptar los sistemas de producción para lograr una agricultura sustentable. En este marco, optimizar el uso de fertilizantes y disminuir contaminantes tanto en el suelo como en el aire (FAO, 2011), favorece una disminución de los costos económicos y ambientales a largo plazo (FAO, 2015). En la agricultura, el principal gas de efecto invernadero es el dióxido de nitrógeno (NO_2^-). La proporción de las emisiones de NO_2^- provenientes directamente de áreas cultivadas, inducida por la fertilización, son estimadas en aproximadamente un 23% a nivel mundial (Leyva Chinchay, 2015). Dentro de los principios científicos de las buenas prácticas agrícolas se encuentra el manejo de fertilizantes inorgánicos (FAO, 2002). La base para un buen manejo se basa en los siguientes principios: la fuente adecuada, en la dosis correcta, en el momento preciso, y con la localización correcta (Roberts, 2007). El desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación, aplicadas a la agricultura, ha permitido el estudio cada vez más preciso de la fertilización nitrogenada de cultivos intensivos y extensivos (Bragachini, 2014).

Dentro de los cultivos intensivos con altos requerimientos de fertilizantes se encuentra la cebolla (*Allium cepa*) (Caracotche, 2019). Esta especie es la segunda hortaliza más producida a nivel mundial donde Argentina se destaca entre los exportadores de cebolla fresca y deshidratada de América Latina (FAO, 2020). En el Valle del Río Colorado situado en el sur de Buenos Aires, en los distritos de Villarino y Patagones, (Casella *et al.*, 2017), se siembran

entre 8.000 y 10.000 ha de cebolla cada año, con un rendimiento promedio de 45 t ha⁻¹ (Lucanera *et al.*, 2018).

En el cultivo de cebolla, el contenido de nitrógeno es determinante en el inicio de la formación del bulbo, su tamaño y madurez (Lancaster, 1996). El nitrógeno (N) debe ser incorporado al suelo a modo de fertilizante para mejorar el crecimiento de la biomasa vegetal y proporcionar mayor contenido de clorofila (Cardoso Prieto, 2017). El vigor inicial y la homogeneidad de la emergencia se incrementan con los fertilizantes combinados de N y fósforo (P) y debe ser incorporado a la siembra. En cambio, la fertilización nitrogenada debe iniciarse a partir de la tercera hoja verdadera, en dos o tres aplicaciones fraccionadas. La última debe realizarse cuando comienza el proceso de “bulbificación” (cuando el diámetro del bulbo es el doble del diámetro del cuello) (Gaviola, 1996).

En relación con el desarrollo vegetativo, el índice de área foliar (IAF) se define como el área total de hojas por unidad de área de suelo (Daughtry *et al.*, 1992) y está asociado con procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos. Es por ello que hay un gran interés en la estimación frecuente de este parámetro debido a que proporciona información del crecimiento y salud de los cultivos, optimizando los procesos de riego y fertilización (Houlès *et al.*, 2007; Kucharik *et al.*, 1998). La medida del IAF puede realizarse por métodos destructivos (tomando el dato del peso y escaneado de las hojas en un área conocida) o por medidas con instrumentos desarrollados para ello (LI-COR, 2012), ceptómetros o cámaras hemisféricas, que miden a partir de la radiación interceptada por la vegetación. El manejo preciso de la fertilización nitrogenada (Siliquini, 2015), ha llevado a desarrollar sistemas de diagnóstico y estimación basados en el uso de aplicaciones (app) para celulares inteligentes (smartphones) tal como el PocketLai®, para la medición del IAF, que permite hacer una estimación de forma sencilla y económica (Confalonieri *et al.*, 2013).

El contenido de clorofila en el canopeo o dosel (CCC por sus siglas en inglés) se presenta como un método indirecto de evaluación del contenido de N (Delloye *et al.*, 2018; Baret *et al.*, 2007; Houlès *et al.*, 2007). La medida de CCC es importante por su función indicadora del estado de salud de la planta, siendo considerada la propiedad vegetal más relevante para la estimación de la productividad (Gitelson *et al.*, 2006). Para su medición se han desarrollado instrumentos, como el SPAD (Minolta®), que proporciona una medida correlacionada con la cantidad de clorofila (Chl) en hoja.

Un parámetro relacionado con el IAF es el cálculo de la fracción de la cubierta verde de la vegetación (fCOVER). Su monitoreo en los campos agrícolas da una indicación de la tasa de desarrollo y vigor del cultivo (Li *et al.*, 2015). La app de acceso libre Canopeo® es una herramienta rápida y precisa para el cálculo de esta variable. Dicha aplicación cuantifica el porcentaje de cubierta vegetal verde viva, de cualquier cultivo agrícola, a partir de fotografías o vídeos obtenidos con el móvil (Patrignani & Ochsner, 2015).

No obstante, a pesar de la sencillez de estas herramientas, el análisis solo puede realizarse en una porción de las parcelas de cultivo. Es por ello que la teledetección en el dominio solar proporciona mediciones de estas variables en toda la porción de territorio (Sylvain *et al.*, 2017). Estos parámetros pueden ser estimados de manera eficiente, a partir de las imágenes de los satélites Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés).

Los satélites Sentinel-2 poseen un total de trece bandas donde cuatro son multiespectrales con 10 m de resolución espacial, adecuada para el estudio de los cultivos intensivos (Mulla, 2013), seis bandas de 20 metros y tres bandas para corrección atmosférica de 60 m y una resolución temporal de cinco días (Copernicus ESA, 2014). Las bandas en el borde rojo (705 nm, 740 nm y 783 nm) permiten determinar una serie de indicadores relacionados con el N y el contenido

de Chl dado que en estas longitudes de onda la energía es absorbida por pigmentos como la Chl y los carotenoides (Gitelson *et al.*, 2006; Delegido *et al.*, 2013; Delloye *et al.*, 2019).

La incorporación, dentro del software libre SNAP de la ESA, de algoritmos basados en redes neuronales (ANN), permite calcular las variables biofísicas IAF, CCC y fCOVER en imágenes Sentinel-2 (Li *et al.*, 2015). Estas variables fueron validadas en la zona de estudio sobre varios cultivos con una resolución espacial de 20 m tamaño de píxel dando buenas correlaciones (Pasqualotto *et al.* 2019).

Para desarrollar un método adecuado capaz de proporcionar las variables biofísicas de forma sistemática, es necesario calibrar y validar esos índices en el cultivo con una resolución espacial más precisa y medidas a lo largo del periodo vegetativo, próximo al pasaje del satélite (Verrelst, 2015). La medición se debe realizar en diferentes condiciones de aporte de N porque esto permite calibrar y validar índices que nos posibiliten obtener mapas de Chl a partir de las imágenes satelitales (Pasqualotto *et al.*, 2019).

El objetivo de este trabajo fue analizar la relación entre las variables biofísicas mediante teledetección y la fertilización nitrogenada del cultivo de cebolla de ciclo intermedio y sus efectos en el rendimiento.

2. Materiales y Métodos

El sitio de ensayo se ubicó en la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA Ascasubi), provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). Para la temporada 2019/20 se sembró cebolla de día intermedio en un lote de 2,2 ha. Los cultivos que precedieron fueron girasol (2018/19) y maíz (2017/18). El tipo de suelos es Hapludol Éntico de textura franco arenosa, perteneciente a la serie La Merced (Cappannini, 1966; Codagnone, 1991; Rodríguez *et al.*, 2018) y sus características físico-químicas mostraron valores en el muestreo inicial de: pH 7,8, C.E. 0,70 dS m⁻¹, M.O. 1,35 %, N 0,35%, P 13 mg kg⁻¹ (Laboratorio de Suelos y Aguas EEA INTA Ascasubi).

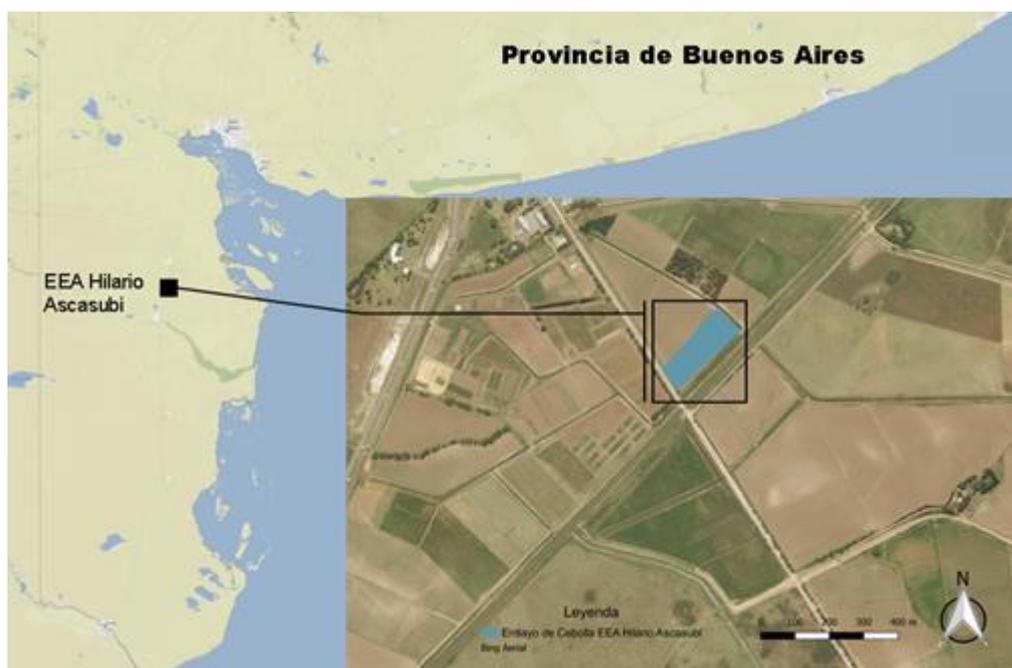


Figure 1. Experimental trial site 2019, design on a high resolution image (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

Figura 1. Ubicación del ensayo experimental, sobre imagen de alta resolución (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

El lugar de estudio fue considerado edafo- climáticamente representativo del Valle bonaerense del río Colorado (VBRC) (Sánchez *et. al.*, 1998). La temperatura media anual es de 15 °C y la precipitación media anual de 483,5 mm (1966 a 2019) (Área de Meteorología EEA INTA Ascasubi).

Se hicieron labores previas a la siembra en el lote durante el mes de marzo y abril de 2019 con el objeto de controlar las malezas y acondicionar el suelo. Se conformaron los bordos para delimitar los diferentes tratamientos experimentales y facilitar el riego por gravedad.

La siembra se realizó el 3/05/2019 de forma mecanizada con una sembradora para hortalizas de dosificación mecánica, rodillo cilíndrico de eje horizontal y capacidad variable, en doce líneas sobre tablones de 1,2 m de ancho en plano. La máquina estaba provista de una tolva fertilizadora con dosificadores tipo chevrón para la incorporación de fertilizantes granulados en línea y una tolva para la aplicación de insecticidas granulados de distribución junto a la semilla. Se utilizó semilla del cultivar Torrentina de ciclo intermedio, con un poder germinativo de 86% y un peso de 1000 semillas de 3,7g (Laboratorio de Semillas EEA INTA Ascasubi). La densidad de siembra fue de 5 kg ha⁻¹, junto con la semilla se incorporó insecticida clorpirifós granulado en una dosis de 7,8 kg ha⁻¹ y se incorporó fosfato diamónico en una dosis de 160 kg ha⁻¹.

Se realizaron riegos por gravedad en cinco momentos durante el ciclo del cultivo, distribuyéndose desde fines de agosto hasta diciembre. La calidad promedio del agua de riego del río Colorado, en esta campaña, fue de: pH 8,23, C.E. 1,37 dS m⁻¹, RAS 3,52 (Laboratorio de Suelos y Aguas EEA INTA Ascasubi).

Se utilizaron herbicidas para el control de malezas de hoja ancha y gramíneas en dos momentos durante el desarrollo vegetativo (Tabla 1). También se realizó desmalezado manual de las plantas más resistentes. Las condiciones climáticas fueron favorables para la aparición de enfermedades de hojas. Para su prevención y cura se aplicaron fungicidas de acción sistémica y de contacto (Tabla 1). Las prácticas de manejo del cultivo fueron representativas del manejo convencional de lotes de cebolla productivos en el VBRC (Caracotche, 2019) (Tabla 1).

Para este estudio se emplearon distintas dosis de urea y de urea con inhibidor ureasa (75% Triamida N-(n-butyl)-tiofosfórica y 25% Triamida N-(n-propil)-tiofosfórica): U250: urea 250 kg ha⁻¹, U500: urea 500 kg ha⁻¹, U750: urea 750 kg ha⁻¹, E500: urea con inhibidor ureasa 500 kg ha⁻¹, E750: urea con inhibidor ureasa 750 kg ha⁻¹. La aplicación se realizó en tres oportunidades (26/08/2019, 24/09/2019 y 25/10/2019) a partir de las tres hojas verdaderas hasta “bulbificación”, en forma fraccionada. Esto se recomienda para que no haya pérdidas hacia la capa freática por lixiviación, de este modo la planta de cebolla, que cuenta con escaso desarrollo radicular, puede absorber el N de forma paulatina (Ibáñez, 2010).

Table 1. Management practices during the onion growing cycle (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).**Tabla 1.** Prácticas de manejo durante el ciclo productivo (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

Momento	Actividad	Labor	Implemento	Unidad	Dosis
Pre siembra	Barbecho	Acondicionamiento del suelo	Cinzel	N° pasadas	2
			Rastra de discos		1
			Rastra de dientes		1
			Bordos		1
	Riegos	Sifones por gravedad	Lámina	mm	200
Siembra	Siembra	Semilla	cv. Torrentina	kg ha ⁻¹	5
		Fertilizante	PDA (18-46-0)		160
		Insecticida	Clorpirifós		7,8
Pre emergencia	Herbicida	Pulverización	Pendimetalin	l ha ⁻¹	3
Vegetativo 6-8 hojas 30-sept-2019			Fluroxipyr	cm ³ ha ⁻¹	700
			Oxifluorfen		300
Vegetativo 8-10 hojas 05-nov-2019			Fluroxipir	l ha ⁻¹	1
			Aclonifen	cm ³ ha ⁻¹	700
			Insecticida	Tiametoxam + lambdacialotrina	cm ³ ha ⁻¹
Bulbificación 22-nov-2019			Funguicida	Mancozeb + metalaxil	kg ha ⁻¹
Maduración 12-ene-2019	Cosecha tratamientos		Descalce manual	Bolsas monofilamento	

El diseño experimental utilizado fue en bloques completamente aleatorizados, compuesto de cinco tratamientos con tres repeticiones y una parcela control (T). La superficie de cada uno de

los tratamientos fue de 360 m² (diez tablones de 1,20 m de ancho por 30 m de longitud). Las unidades experimentales estuvieron separadas mediante bordos para evitar la deriva del fertilizante nitrogenado. La aplicación de los distintos tratamientos se realizó en forma manual sin incorporar, luego de un riego o previo a una lluvia.

La toma de datos a campo se planificó en función de: momento de fertilización, fechas de pasaje del satélite (efemérides) Sentinel 2 y estado del cultivo (Tabla 2). Se realizaron cinco mediciones tomándose tres puntos de muestreo por cada unidad experimental (n= 54).

Para la medición de IAF se empleó la app para celulares inteligentes PocketLai® (Confalonieri *et al.*, 2013). La aplicación utiliza la cámara y el clinómetro del dispositivo para adquirir automáticamente imágenes a 57.5 ° debajo del dosel.

Para la estimación de clorofila, se utilizó el instrumental SPAD 502 (Minolta®). Se tomaron muestras de forma destructiva del área foliar, de cinco plantas de cada parcela. Se identificó individualmente cada una, realizándose un corte longitudinal del área foliar de la lámina de mayor desarrollo, para poder obtener el registro con el instrumental SPAD de seis puntos de muestreo referenciados (n=540), desde la base al ápice de la misma (Gamiely, 1991). Esta medición no se realizó en el mes de noviembre debido a la falta de disponibilidad del instrumental de campo en el momento del pasaje del satélite.

El fCOVER se midió con la app, de acceso libre, para celulares inteligentes “Canopeo”. Esta aplicación fue desarrollada por Patrignani y Ochsner (2015) utilizando Matlab y se basa en relaciones de color de rojo a verde (R/G) y azul a verde (B/G) y un índice de exceso de verde (2G–R–B). En el ensayo se tomaron fotografías y videos a una altura de 1 m del suelo para todas las parcelas experimentales. En cada parcela se tomó al azar una fotografía y se obtuvo un video con el resultado del porcentaje de cobertura que arrojó la secuencia de 20 fotografías. La aplicación presenta la imagen original y la imagen procesada en blanco y negro.

Table 2. Sampling of biophysical variables in onions and ephemerides from Sentinel 2 images. (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).**Tabla 2.** Muestreo de variables biofísicas en cebolla y efemérides de imágenes Sentinel 2 (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

Muestreo	Fecha		Ciclo del Cultivo	
	Campo	Satélite		
1	25-sept-19	24-sept-19	Vegetativo hojas	4-6 hojas
2	24-oct-19	24-oct-19		6-8 hojas
3	15-nov-19	18-nov-19		8-10 hojas
4	06-dic-19	08-dic-19	Bulbificación	
5	06-ene-20	02-ene-20	Pre-cosecha	

La estimación de las variables por teledetección, se realizó sobre imágenes del satélite Sentinel-2 (Copernicus, ESA, 2014) de todo el ciclo fenológico, libres de nubes, en las fechas próximas a la toma de datos (Tabla 2). Las imágenes fueron descargadas del servidor (<https://scihub.copernicus.eu/>) de la Agencia Espacial Europea en nivel 1C, corregidas geoméricamente. Se corrigieron atmosféricamente mediante el complemento Sen2cor integrado en el programa de acceso libre, SNAP 7.0 (Sentinel Application Platform) de la misma agencia. Este método transforma la reflectividad en el techo de la atmósfera (top-of-atmosphere-TOA) a valores de reflectividad al nivel de la cubierta (top-of-canopy -TOC). Luego fueron remuestreadas para obtener píxeles de 10 m en todas las bandas (Casella, *et al*, 2018). Se tomó el valor radiométrico del punto central de cada unidad de muestreo (UM) en cada banda. Mediante la caja de herramientas, *BiophysicalOp Operator*, se obtuvieron los productos de IAF, fCOVER y CCC para cada UM, escogiendo tan solo aquellos en los que el indicador de calidad era óptimo. Este algoritmo, calibra una red neuronal particular (ANNS2) para cada variable biofísica. Cada red neuronal se compone de una capa de entrada compuesta de 11 datos normalizados: B3, B4, B5, B6, B7, B8a, B11, B12, cos(vista cenital), cos(cenit solar), cos(ángulo azimutal relativo); una capa oculta con 5 neuronas con funciones de transferencia de sigmoides tangentes y una capa de salida con una función de transferencia lineal (Weiss et al, 2016).

Finalmente, se relacionaron los datos de las variables biofísicas obtenidas sobre las imágenes S2 con los datos obtenidos a campo. Se ajustaron los modelos de regresión utilizando los datos de septiembre a diciembre, correspondientes a los estadios de mayor desarrollo de biomasa

aérea del cultivo, entre el período vegetativo y la bulbificación. La cantidad de puntos tomados fue para IAF y fCOVER (N= 60) y para CCC (N= 43) (Fig. 2 a, b y c).

Para analizar qué tipo de relación hay entre las variables obtenidas y el rendimiento, el día 12/01/2019 se cosechó 1 m lineal del tablón central de cada parcela (n=18). Los bulbos muestreados se colocaron en bolsas de red plástica monofilamento, en un sitio con adecuada ventilación natural, para asegurar el secado de las capas externas del bulbo, cuello y raíces (curado). Una vez cumplido este proceso se realizó la limpieza extrayendo hojas secas y raíces (descolado). Los bulbos se clasificaron de acuerdo al calibre según norma del MERCOSUR (Resolución IASCAV N° 88/95). El rendimiento obtenido se extrapola para cada tratamiento a $t\ ha^{-1}$.

Para todas las variables muestreadas se realizó la comparación de medias utilizando el test de DMS de Fischer, mediante el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2016). Se ajustaron modelos de regresión entre las variables de campo y las de satélite utilizando software Curve Expert Professional v.2.4.0 (Hyams, 2016).

3. Resultados y Discusión

Como muestra la Tabla 3, en la correlación de datos de campo *vs.* ANNS2 (SNAP 7.0) se obtuvo como resultado un coeficiente de determinación para IAF $R^2= 0,87$, Fcover $R^2= 0,96$ y CCC $R^2= 0,79$.

Table 3. Statistics of the adjusted regressions of LAI, fCOVER and CCC. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina.

Tabla 3. Estadísticos de las regresiones ajustadas de IAF, fCOVER y CCC. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina.

Variable	N	R ²	p-valor	EMC	Modelo
IAF	60	0,87	<0,0001	0,04	$y= 0,12 + 0,64 x$
fCOVER	60	0,96	<0,0001	10,87	$y= 5,32 + 0,68 x$
CCC	43	0,79	<0,0001	149,40	$y= -5,77 + 1,43 x$

IAF: índice de área foliar, fCOVER: factor de cobertura de la vegetación, CCC: contenido de clorofila del canopeo. N: número de muestras. R² y EMC (error medio cuadrático) estadísticos que relacionan entre lo observado y las variables predichas.

La resolución espectral del satélite Sentinel-2, incorporando bandas del borde rojo (705 y 740 nm), permitió el estudio de variables como el CCC en un cultivo de arquitectura erecta, así como se realizó en un conjunto de cultivos (Pasquallotto *et al.*, 2019b) o en cultivos individuales (Haboudane *et al.*, 2002; Vincini *et al.*, 2007). Por otro lado, la resolución espacial (10 m) de la imagen, produjo resultados (Tabla 3) que mejoró los obtenidos en un conjunto de cultivos, en la misma zona, por Pasquallotto *et al.* (2019) con el mismo algoritmo (ANNS2) medidos a 20 m, que obtuvo para LAI un $R^2=0.702$ y CCC un $R^2= 0.745$.

La Figura 2 muestra la correlación lineal positiva de las tres variables biofísicas entre la distribución de los puntos de datos *in situ* y los obtenidos por el algoritmo ANNS2. Se observa que el comportamiento de los valores de IAF (Fig 2a) es semejante a los valores de CCC (Fig

2c). En valores bajos, los puntos están más concentrados alrededor de la recta 1:1. El fCOVER (Fig 2b) concentra todos los puntos alrededor de la recta 1:1, lo que indica la correlación más significativa ($R^2=0.96$) entre los datos de campo y los obtenidos con ANNS2.

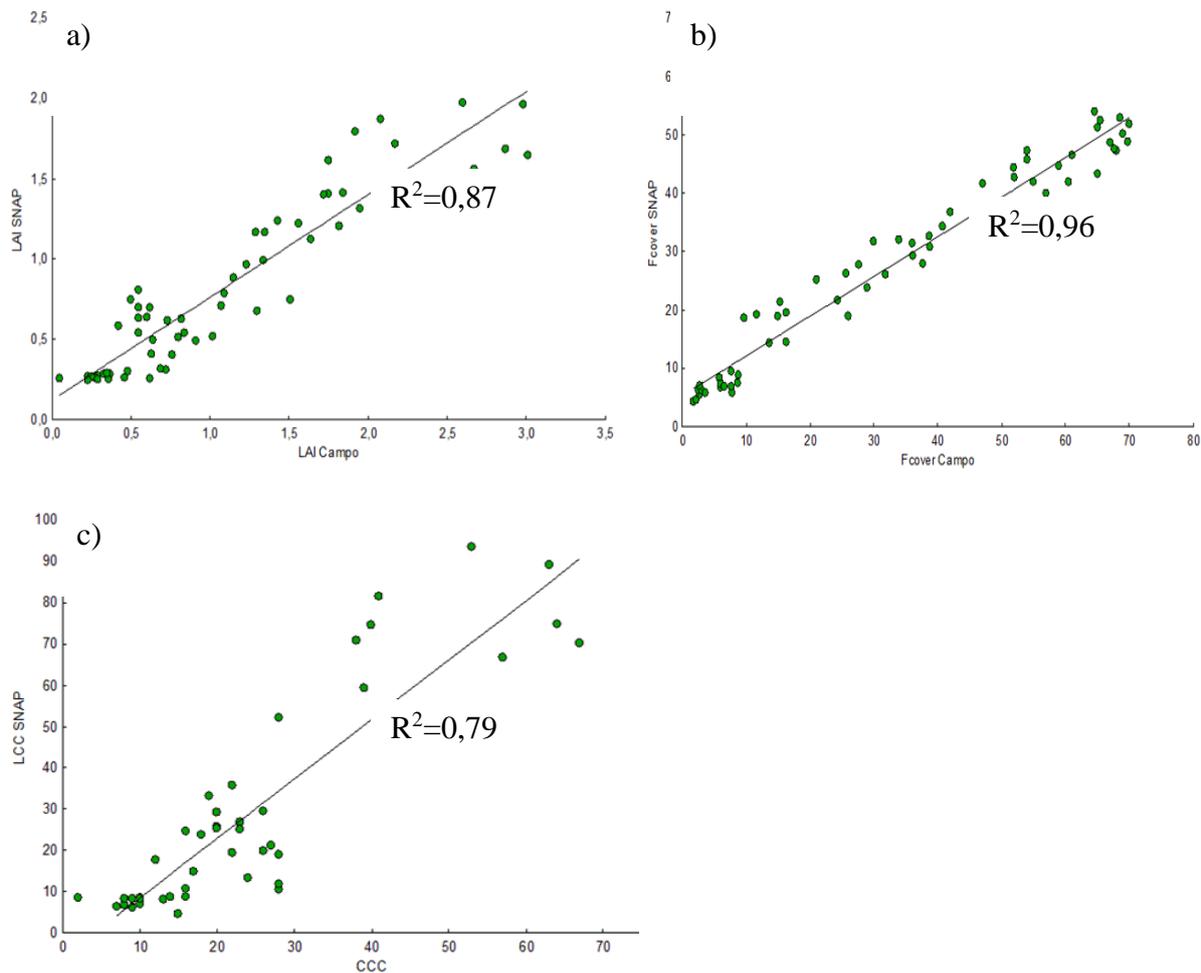


Figure 2. Linear regression model adjusted for the variables analyzed: a) leaf area indices (LAI) b) fraction vegetation cover (fCOVER) y c) Canopy Chlorophyll Content (CCC). (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

Figura 2. Modelos de regresión lineal, ajustados para las variables analizadas: a) índice de área foliar (IAF), b) factor de cobertura de la vegetación (fCOVER) y c) contenido de clorofila del canopy o dosel (CCC). (Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019).

Como resultado del procesamiento de las imágenes se obtuvieron los mapas correspondientes a cada variable: IAF, fCOVER y CCC en las cinco fechas de muestreo, además se adicionó la imagen de inicio del ciclo del cultivo (12/05/2019) como referencia de suelo desnudo (Fig. 3, 4 y 5).

En la Figura 3, en el mapa de la imagen del día 12/05/2019, a pocos días de la siembra, el IAF muestra la falta de masa vegetal verde. Se puede apreciar que el valor de IAF, en el mes de septiembre es <0.4 , aumenta hasta los primeros días de diciembre, con valores cercanos a 2,00 (08/12/2019) en lotes con tratamientos U750 y E750 y desciende en los primeros días de enero (02/01/2020) a valores <1.3 .

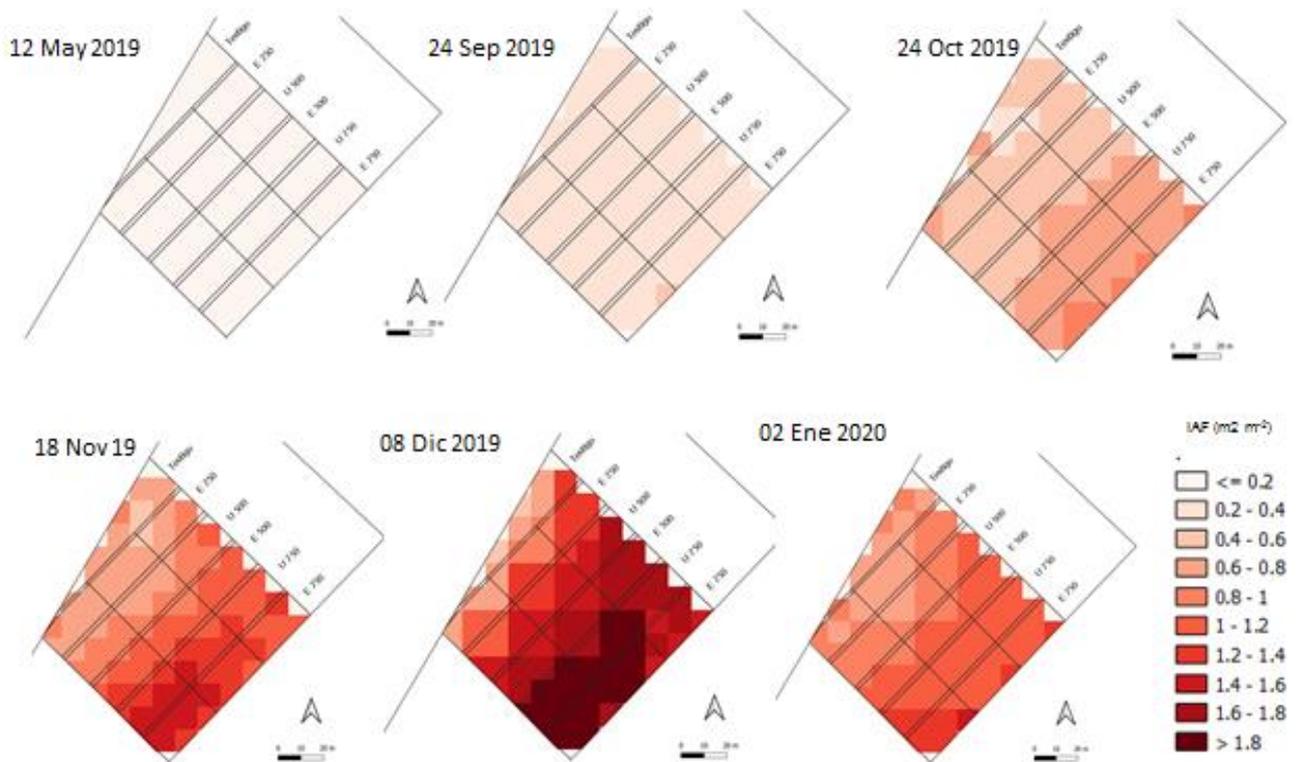


Figure 3. Time series of leaf area indices (LAI) ($m^2 m^{-2}$) images during the onion growing cycle. Maps obtained with S2 and SNAP 7.0 software. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Figura 3. Serie temporal de imágenes índice de área foliar (IAF) ($m^2 m^{-2}$) durante el ciclo del cultivo de cebolla. Mapas obtenidos con S2 y el software SNAP 7.0. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

El mayor porcentaje de fCOVER (Fig 4) se encuentra en las parcelas con mayores dosis de N pero la cobertura es más pareja en tratamientos con dosis de 500 y 750 kg. Los valores no exceden en ningún caso el 72%, y en general no excede el 64%, solo una pequeña porción en dos lotes de U750 y E750, que tiene valores en ese rango, mostraron mayor cobertura. Esto puede deberse a un mayor número de plantas en ese sector, pero no a la dosis de fertilizante.

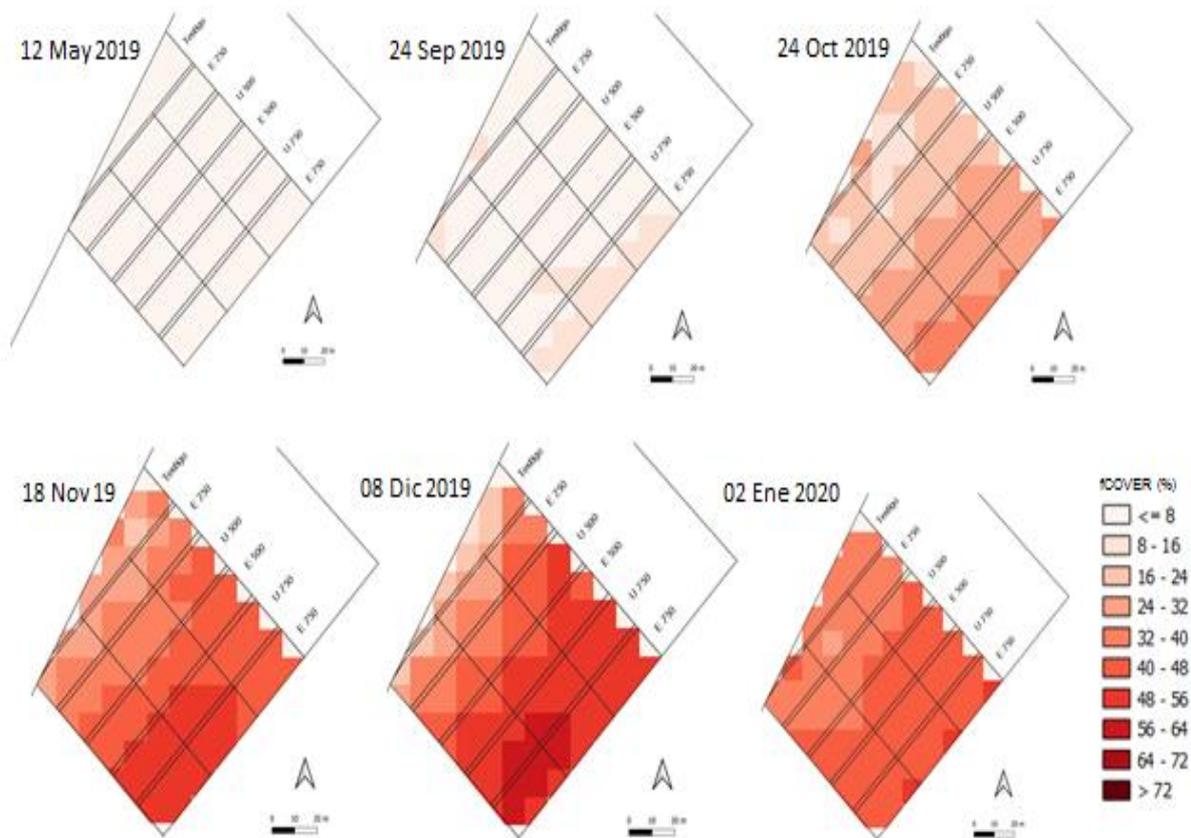


Figure 4. Time series of fraction vegetation cover (fCOVER) (%) during the onion growing cycle. Maps obtained with S2 and SNAP 7.0 software. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Figura 4. Serie temporal de imágenes de factor de cobertura de la vegetación (fCOVER) (%) durante el ciclo del cultivo de cebolla. Mapas obtenidos con S2 y el software SNAP 7.0. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

En cuanto al CCC (Fig. 5), el progreso es coherente según el aumento del IAF en relación con la dosis de N aplicada, superando los 0.66 gr m^{-2} en lotes con tratamiento U500; E500; U750 y E750, y mayor a 0.85 gr m^{-2} en solo una porción de las parcelas con dosis de 750 kg.

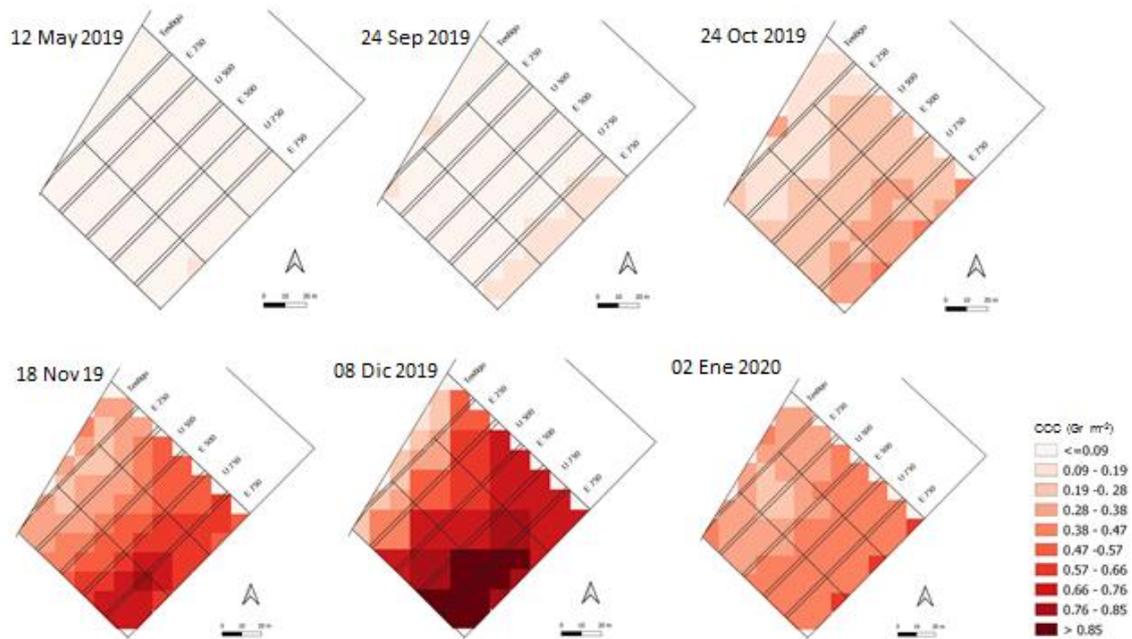


Figure 5. Time series of Canopy Chlorophyll Content (CCC) (during the onion growing cycle). Maps obtained with S2 and SNAP 7.0 software. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Figura 5. Serie temporal de imágenes contenido de clorofila de canopeo o dosel (CCC) durante el ciclo del cultivo de cebolla. Mapas obtenidos con S2 y el software SNAP 7.0. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Al analizar los componentes de rendimiento (N° de bulbos y peso), de los calibres comerciales de bulbos de cebolla de cada una de las parcelas (N= 18), no se encontraron diferencias significativas entre número de bulbos y los tratamientos aplicados (Tabla 4). El número de bulbos no se relaciona con el aporte de N aplicado en forma fraccionada a partir de tres hojas verdaderas, en cambio si lo hace con la aplicación de fosfato diamónico incorporado a la siembra (Caracotche, 2019).

Table 4. Number of bulbs harvested in the different treatments. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.**Tabla 4.** Cantidad de bulbos cosechados en los diferentes tratamientos. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Tratamiento			N° bulbos totales/	
Dosis		Fuente	metro tablón	
T			109	a
U250		Urea granulada	117	a
U500		Urea granulada	119	a
U750		Urea granulada	126	a
E500		Urea granulada + Inhibidor de ureasa	133	a
E750		Urea granulada + Inhibidor de ureasa	134	a

Se muestran valores medios. Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El rendimiento del tratamiento T (18 t ha^{-1}) es significativamente inferior al promedio productivo zonal (45 t ha^{-1}) (Lucanera, 2018), y se diferencia estadísticamente de los tratamientos fertilizados con N (Tabla 5). Esto demuestra que el N influye directamente en el rendimiento de la cebolla con un efecto directo en el desarrollo y calidad de los bulbos (Cardoso Prieto, 2017). Se observa una diferencia importante entre U250 (47 t ha^{-1}) y los demás tratamientos (59 a 70 t ha^{-1}). A igual dosis de N, se obtuvo un rendimiento mayor con urea con inhibidor de ureasa sin llegar a ser significativos. Esto podría haber ocurrido porque el inhibidor de la ureasa evitó pérdidas de N en superficie por volatilización. El mayor rendimiento se alcanzó con el tratamiento E750 (70 t ha^{-1}) que coincide con los valores obtenidos en lotes de cebolla de productores con alta adopción de tecnología (Galmarini *et al.*, 2011; Orden *et al.*, 2013).

Table 5. Average onion yield ($t\ ha^{-1}$) for the different treatments. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.**Tabla 5.** Rendimiento promedio de cebolla ($t\ ha^{-1}$) para los diferentes tratamientos. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Tratamiento			Rendimiento	
Dosis		Fuente	$t\ ha^{-1}$	
T			$18,00 \pm 6,00$	a
U250		Urea granulada	$46,67 \pm 9,29$	b
U500		Urea granulada	$59,33 \pm 11,24$	bc
U750		Urea granulada	$62,67 \pm 14,74$	bc
E500		Urea granulada + Inhibidor de ureasa	$61,33 \pm 0,58$	bc
E750		Urea granulada + Inhibidor de ureasa	$70,33 \pm 22,50$	c

Se muestran valores medios \pm DE. Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Finalmente, se relacionaron el IAF y CCC con el rendimiento en cada una de las fechas de estudio (Tabla 6). Allí se observó que en ambas variables biofísicas los valores del ANNS2 mejoraron la información en comparación con los datos de campo. Con respecto al IAF, la correlación aumenta hacia los meses de noviembre y diciembre ($R^2=0.39$ y $R^2=0.43$ respectivamente), luego disminuye cercano a cosecha, en enero ($R^2=0.31$). Algo similar ocurre con el CCC que muestra un $R^2=0.41$ en diciembre, pero en enero la disminución es mayor ($R^2=0.21$) que en el IAF. Esto tiene sentido fisiológico, ya que, a pesar de contar con masa vegetal aérea, el proceso fotosintético disminuye cercano a la cosecha.

Table 6. Relationship between LAI and CCC variables from in-situ data and obtained with ANN S2 algorithm with onion yields ($t\ ha^{-1}$). Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.**Tabla 6.** Relación de las variables IAF y CCC de datos in situ y obtenidas con el algoritmo ANN S2 con rendimientos de cebolla ($t\ ha^{-1}$). Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

	set-19		oct-19		nov-19		dic-19		ene-20	
	R^2	<i>p</i> -valor								
IAF_campo	0,002	0,879	0,009	0,730	0,126	0,176	0,1689	0,113	0,1367	0,158
IAF_ANNS2	0,039	0,464	0,129	0,172	0,393	0,009	0,4346	0,005	0,3082	0,025
CCC_campo	0,018	0,616	0,0678	0,329			0,0536	0,388	0,0131	0,672
CCC_ANNS2	0,0621	0,351	0,1964	0,085			0,4136	0,007	0,2071	0,076

La Figura 6 muestra la tendencia en la relación de IAF y CCC en el mes de diciembre que es el más significativo. Se puede observar que en ambos casos en valores bajos de rendimiento (respecto a recta 1:1) hay una leve sobreestimación y subestima en los valores más altos, siendo los rendimientos entre 50 y 70 t ha⁻¹ los más cercanos a la recta.

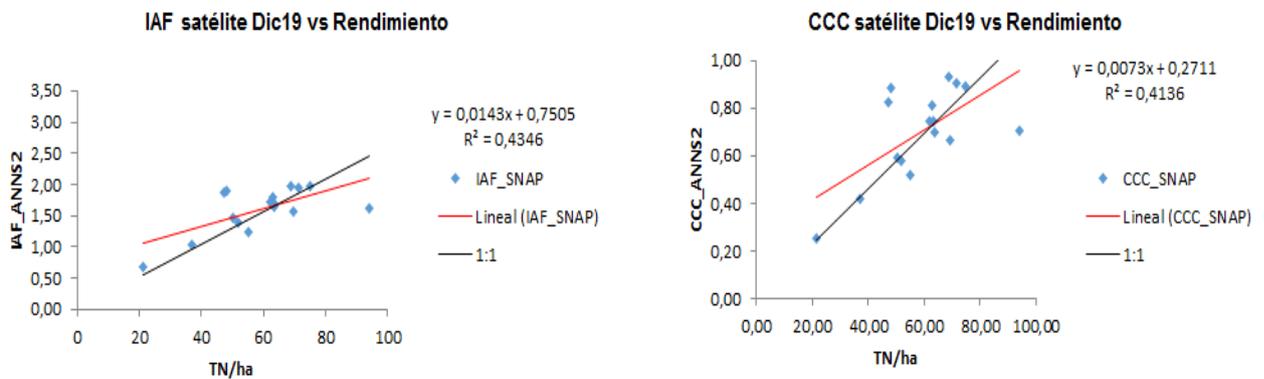


Figure 6. Linear regression model adjusted between LAI and CCC biophysical variables and yield in December 2019. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Figura 6. Modelos de Regresión lineal ajustados entre las variables biofísicas IAF y CCC y rendimiento en el mes de diciembre de 2019. Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina 2019.

Si bien una sola campaña no es suficiente, se encontró un ajuste lineal significativo para cada una de las variables analizadas (Tabla 3), lo que demuestra que con las imágenes del satélite Sentinel-2 y los productos del paquete SNAP se puede obtener información de CCC del cultivo como indicador indirecto del contenido de N del canopeo o dosel en plantas de cebolla, así como fue demostrado para otras especies (Clevers & Gitelson, 2013; Delloye *et al.*, 2018). Por otro lado, el IAF junto con el contenido de clorofila podría aportar información a los productores, en cuanto a su variabilidad espacial (Figura 5), para programar la distribución de la fertilización nitrogenada (Houlès *et al.*, 2007; Delegido *et al.*, 2011).

4. Conclusiones

En el primer año de ensayo, los resultados preliminares, demostraron que las variables biofísicas obtenidas del satélite S2 tienen potencial para determinar la evolución y sanidad de un cultivo intensivo como la cebolla.

La aplicación de N en todas sus fuentes y dosis produjo rendimientos mayores que el testigo. En cuanto a la cantidad de bulbos se confirmó que la fertilización nitrogenada a partir de la tercera hoja no influyó en el número de bulbos.

Este trabajo permitió evaluar la metodología aplicada empleando apps de medición no destructiva y variables biofísicas de cálculo sencillo con imágenes satelitales y software de acceso libre. Los resultados alcanzados son promisorios para la evaluación indirecta del contenido de N. Completar, en el futuro, el estudio con análisis en laboratorio de N y Chl en hoja, podría mejorar los resultados al lograr un modelo de calibración más ajustado respecto a los datos que ofrece la imagen satelital (Gitelson *et al.*, 2006; Houlès *et al.*, 2007; Sylvain *et al.*, 2017).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Asoc. Coop. de la EEA INTA Ascasubi y a la empresa Profertil S.A. que financiaron la realización de este ensayo de investigación. Agradecemos a Gustavo Urrutia, Paulo Mamani y César Lamas por su colaboración en las tareas de campo, a los colegas de la EEA INTA Ascasubi Verónica Caracotche, Soledad García y Agustín Montenegro por colaborar en los muestreos de campo.

5. Bibliografía

- Baret F., V. Houles V., Guerif M. 2007. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58, No. 4, pp. 869–880, 2007 Imaging Stress Responses in Plants Special Issue
- Bragachini, M. 2014. Rol de las TICs y de la Agricultura y Ganadería de Precisión en el desarrollo del Sector Agroalimentario y Agroindustrial de Argentina. INTA EEA Manfredi. <https://inta.gob.ar/documentos/rol-de-las-tics-y-de-la-agricultura-y-ganaderia-de-precision-en-el-desarrollo-del-sector-agroalimentario-y-agroindustrial-de-argentina>.
- Cappannini, D. A.; Lores, R. R. 1966. Los suelos del valle inferior del río Colorado (Provincia de Buenos Aires); Buenos Aires, Argentina. Ed. INTA. Pp. 127.
- Caracotche, V. 2019. Recomendaciones técnicas para el cultivo de cebolla. Ed. INTA
- Cardoso Prieto, C.E. 2017. Evaluación de abonos orgánicos en el cultivo biológico de la cebolla (*Allium cepa* L.) en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis (Doc) UNS 196 p.
- Casella, A. A.; Barrionuevo, N.J.; Pezzola, N.A. y Winschel, C.I. 2018. Pre-Procesamiento de Imágenes Satelitales del Sensor Sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6.0. Tutorial. https://inta.gob.ar/sites/default/files/tutorial_snap_preproc_acasella_et_al_2018_inta.pdf.
- Casella A.; Pezzola A.; Horlent M.; Winschel C.; Ibañez G.; Silva S.; Loyra I. 2017. Segmentación de imágenes spot a partir de índices de vegetación para la cuantificación de cultivo de cebolla bajo riego en el Valle Inferior del Río Colorado”- SELPER 2016: XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. 1a ed. EdUnLu, Luján, Buenos Aires. Libro digital, PDF. ISBN: 978-987-3941-14-6. Pp.. 387 (Sione, W. ed)
- Clevers, J.G.; Gitelson A.A. 2013. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23:344–351.
- Codagnone, R. 1991. Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi, Provincia de Buenos Aires. Escala 1:10000. Instituto de Suelos - CIRN - INTA Castelar.
- Confalonieri R. 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueeness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96: 67-74.
- Copernicus. ESA. 2014. En <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>

- Daughtry, C.S.T., Gallo, K.P., Goward, S.N., Prince, S.D., Kustas, W.P., 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, 39(2): 141-152.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors* 11:7063–7081.
- Delegido, J.; Verrelst, C. M.; Meza, J. P.; Rivera, L. & Moreno, A. J. 2013. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of Green LAI over agroecosystems. *European journal of Agronomy* 46: 42-52.
- Delloye, C.; Weiss, M. & Defourny, P. 2018. Retrieval of the canopy chlorophyll content from Sentinel-2 spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems. *Remote Sensing of Environment*, Volume 216, 2018, Pages 245-261, ISSN 0034-4257.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2010. InfoStat versión (2016). Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- FAO. 2002 Marco para las buenas prácticas agrícolas. Segunda versión 2002. FAO <http://www.fao.org/ag/esp/revista/faogapes.pdf>
- FAO. 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk. Publicado por FAO y Earthscan, 2011. ISBN FAO: 978-92-
- FAO. 2015. La FAO y la agenda Post 2015 y objetivos de desarrollo Sostenible. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/post-2015/14_themes_Issue_Papers/SP/Full_set_Spanish.pdf
- FAO. 2020. FAOSTAT. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Galmarini, C. 2011. Manual del cultivo de cebolla. Ed. INTA
- Gamiely, S.; Randle, W. M.; Mills, H.A.; Smittle D.A. 1991. Rapid and non-destructive method for estimating leaf area of onions. *Hortscience*, 26:2.
- Gaviola, Silvia. 1996. Influencia de la fertilización y el riego sobre aspectos cuali-cuantitativos de la reproducción de cebolla (*Allium cepa* L.) para la industria del deshidratado. Tesis (M Sc.). Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo.
- Gitelson, A.A.; Keydan, G. P.; Merzlyak, M. N. 2006. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters*. 33: L11402.
- Haboudane, D.; Miller, J.R.; Tremblay, N.; Zarco-Tejada, P.J.; Dextraze, L, 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 2002, 81, 416–426.
- Houlès, V.; Guerif, M.; Mary, B. 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. *European Journal of Agronomy*, 27(1):1-11.
- Hyams, D.G. 2016. CurveExpert software. <http://www.curveexpert.net>
- Ibáñez J. 2010. Fertilizantes Nitrogenados, Óxido Nitroso, Contaminación y Cambio Climático. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/02/23/135447>
- Kucharik, C. J.; Norman, J. M.; Gower, S. T. 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index to indirect measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, pp. 69-88.
- Lancaster J. E.; Triggs C. M.; De Ruiter J. M; Gandar P. W. 1996. Bulbing in

- Onions: Photoperiod and Temperature Requirements and Prediction of Bulb Size and Maturity, *Annals of Botany*, 78:4. Pp. 423–430.
- Leyva Chinchay, L. S. 2015. Buenas Prácticas Agrícolas: uso de los fertilizantes nitrogenados agropecuario Regional. Campaña 2018.
- Mulla, D.J., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remain la minimización de la emisión de gases de efecto invernadero. *Revista científica Ingetecno*. 4:1. Perú.
- Li, W.; Weiss, M.; Waldner, F.; Defourny, P.; Demarez, V.; Morin, D.; Hagolle, O.; Baret, F. 2015. A Generic Algorithm to Estimate LAI, FAPAR and FCOVER Variables from SPOT4_HRVIR and Landsat Sensors: Evaluation of the Consistency and Comparison with Ground Measurements. *Remote Sensing* 7, 11: 15494-15516.
- LI-COR. 2012. Licor 2200 instruction manual, System.
- Lozano, J., Budde C., 2017. Boletín de Frutas y Hortalizas del Convenio INTA- CMCBA N°64.
- Lucanera, G.M., Castellano, A.S. y Barbero, A. 2018. Banco de datos socioeconómicos de la zona de CORFO - Río Colorado, Estimación del P.B.I. Aning knowledge gaps. *Biosystems engineering*, 114(4). p 358-371.
- Orden L.,Bellacomo C.; Caracotche, V.; Mairosser, A.; García D., Dunel L.; Toribio, M. 2013. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviado: consecuencias en el rendimiento del cultivo de cebolla en el Valle Bonaerense del río Colorado. XXXVI Congreso Argentino de Horticultura 24 al 26 de septiembre de 2013. Tucumán, Argentina.
- Pasqualotto, N.; D'Urso, G.; Bolognesi, S. F.; Belfiore, O.R.; Van Wittenberghe, S.; Delegido, J.; Pezzola, A.; Winschel, C.; Moreno, J. 2019. Retrieval of Evapotranspiration from Sentinel-2: Comparison of Vegetation Indices, Semi-Empirical Models and SNAP Biophysical Processor Approach. *Agronomy*, 9: 663.
- Pasqualotto, N.; Delegido, J.; Van Wittenberghe, S.; Rinaldi, M.; Moreno, J. 2019b Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors* 19: 904.
- Patrignani, A. y Ochsner, T. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107: 2312-2320.
- Roberts, T.,L. 2007. Right product, right rate, right time and right place...the foundation of best management practices for fertilizer. pp 29-32. *Fertilizer Best Management Practices. General Principles, Strategy for Their Adoption, and Voluntary Initiatives and Regulations. Proc. of IFA International Workshop 7-9 March 2007. Brussels, Belgium. International Fertilizer Industry Association. Paris, France*
- Rodríguez, D., Schulz, G., Moretti, L. 2018. Carta de suelos de la República Argentina: partido de Villarino: provincia de Buenos Aires. Ediciones INTA, 2018. Libro digital, PDF https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-carta_de_suelos_villarino.pdf
- Sánchez, R.; Pezzola, N. y J. Cepeda. 1998. Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA EEA Hilario Ascasubi. Partidos de Villarino y Patagones. Provincia de Buenos Aires. Hilario Ascasubi: INTA, 1998. - 60 p.
- Siliquini, O. 2015. Evolución de algunos parámetros fisiológicos y productivos en cebolla (*Allium Cepa* L.) sembrada en forma directa a dos densidades y dosis de nitrógeno. Tesis (M.Sc.), Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

- Sylvain J., F. Maupas, R. Bendoula, N. Gorretta. 2017. Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. *Field Crops Research*, Elsevier, 2017, 210:33-46. HAL Id: hal-01730271.
- Verrelst, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Marí, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Clevers, J.G., Moreno, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties—A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, pp. 273-290.
- Vincini, M.; Frazzi, E.; D'Alessio, P. 2007. Comparison of narrow-band and broad-band vegetation indices for canopy chlorophyll density estimation in sugar beet. In *Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture*, Skiathos, Greece; pp. 189–196.
- Weiss, M., Baret, F. 2016. S2 Toolbox Level 2 Product algorithms Version 1. INRA.
http://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_L2B_V1.1.pdf

Horticultura Argentina es licenciado bajo Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 2.5 Argentina.