

MAPEO DE LA INTENSIFICACIÓN AGRÍCOLA EN CÓRDOBA MEDIANTE SERIES TEMPORALES DE NDVI

Nolasco M.^{1,2*}, Ovando G.¹, Sayago S.¹ y Bocco M.¹

¹Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Matemática. Córdoba. Argentina.

²Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Instituto Mario Gulich. Córdoba. Argentina.

mnolasco@agro.unc.edu.ar

RESUMEN

En la actualidad los agricultores deben tomar decisiones respecto a la elección de variedades, sistemas de rotación, de manejo y si sembrar uno o más cultivos en un mismo año. En Córdoba los cultivos predominantes son trigo, soja y maíz, sembrados en secuencias de un único cultivo anual (SC) o doble (DC), como trigo-soja o trigo-maíz. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y evaluar un nuevo método: la Envolvente de Clasificación (EC) para identificar presencia de SC o DC, utilizando series temporales NDVI - MODIS. La calibración y validación se realizó utilizando datos de campo adquiridos entre 2015 y 2018. Se determinó la pertenencia a cada clase cuando al menos el 50% de los valores de la firma de NDVI se encontraban dentro de los perfiles temporales de SC o DC, con una diferencia positiva entre las clases. Los resultados mostraron una exactitud global entre 96% y 98% y coeficientes Kappa de 91% a 97%. Al aplicar la EC, la detección de superficies con DC varió de 18.3% a 28.7%, mientras que las de SC disminuyó de 64% a 49.5% durante el periodo analizado. EC es un método simple y altamente preciso para detectar la intensidad del uso de la tierra.

Palabras clave: simple/doble cultivo, soja, trigo, maíz, NDVI-MODIS.

INTRODUCCIÓN

Implementar secuencias de cultivos planificadas en el tiempo permite lograr una mayor productividad en los cultivos y un uso más eficiente de las precipitaciones anuales, siempre basados en conceptos de intensificación sostenible (Cassman y Grassini, 2020). Además, en muchos casos la alternancia de cultivos podría restaurar el ecosistema (Videla-Mensegue et al., 2021).

Como expresan Andrade et al. (2017) los agricultores han implementado en gran medida el doble cultivo en muchas regiones del mundo, no solo para aumentar la productividad anual de la tierra, sino también porque los rendimientos del doble cultivo suelen ser más estables que los de un solo cultivo. Una de las secuencias de cultivo en un año calendario más extendida en las regiones agrícolas templadas es la compuesta por trigo (*Triticum aestivum* L.), como cultivo de invierno, y soja (*Glycine max* (L.) Merr.) o maíz (*Zea mays* L.), como cultivo de verano. En particular, en comparación con los sistemas de monocultivo de soja, las rotaciones de cultivos no solo aumentaron el rendimiento del grano, sino que también mejoraron las características del suelo, como porosidad, conductividad hidráulica, actividad microbiana, contenido de nitrógeno y carbono orgánico (Piccinetti et al., 2021).

En la zona agrícola de Córdoba, los cultivos predominantes son trigo, soja y maíz realizados una única vez en la campaña anual, o bien integrados en

secuencias de cultivos (trigo-soja o trigo-maíz) con diferentes grados de intensificación y diversidad (Videla-Mensegue et al., 2021). Córdoba posee uno de los mayores potenciales de producción agrícola nacional, en esta provincia los cultivos de soja, maíz y trigo representan el 27, 31 y 21% respectivamente, del área total sembrada por el respectivo cultivo en el país (MAGyP, 2021).

A partir de los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) proporcionados por MODIS se puede obtener información sobre los tipos y rotación de cultivos. Un algoritmo desarrollado por Pan et al. (2021) basado en las imágenes de la serie temporal Landsat 7/8 y Sentinel-2A/B para la cuenca de Huaihe (China), utilizando solo un año de datos (2018), fue empleado para identificar cultivos simples, dobles y triples. Para América del Norte, Yang et al. (2020) consideraron una curva temporal de valores de EVI para detectar patrones espaciotemporales en la intensidad del uso del suelo agrícola, durante 2000–2016. Analizaron los datos de los informes de cultivos y descubrieron que los intervalos entre dos fechas de inicio de cultivo en el sistema de doble cultivo eran de más de 80 días.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar y evaluar un nuevo método: la envolvente de clasificación (EC) a fin de identificar la presencia de simple o doble cultivo en una campaña agrícola anual usando series temporales de NDVI. La calibración y validación se realizó en la zona

agrícola de Córdoba donde la soja, el maíz y el trigo son los cultivos predominantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio abarca cinco departamentos de la región agrícola de Córdoba: General Roca, Marcos Juárez, Pte. Roque Sáenz Peña, Río Segundo y Unión (Figura 1). Las condiciones ambientales de esta región

contribuyen al desarrollo de la agricultura. Los suelos mayoritarios son Haplustol y Argiudol, en general son suelos profundos y bien drenados con una textura franco arenosa fina. El clima se clasifica como templado, la temperatura media en verano es de unos 23,5°C y la temperatura media en invierno es de unos 8°C. La precipitación media anual es de unos 800 mm, concentrada en primavera y verano (Aliaga et al., 2017; Ovando et al., 2021).

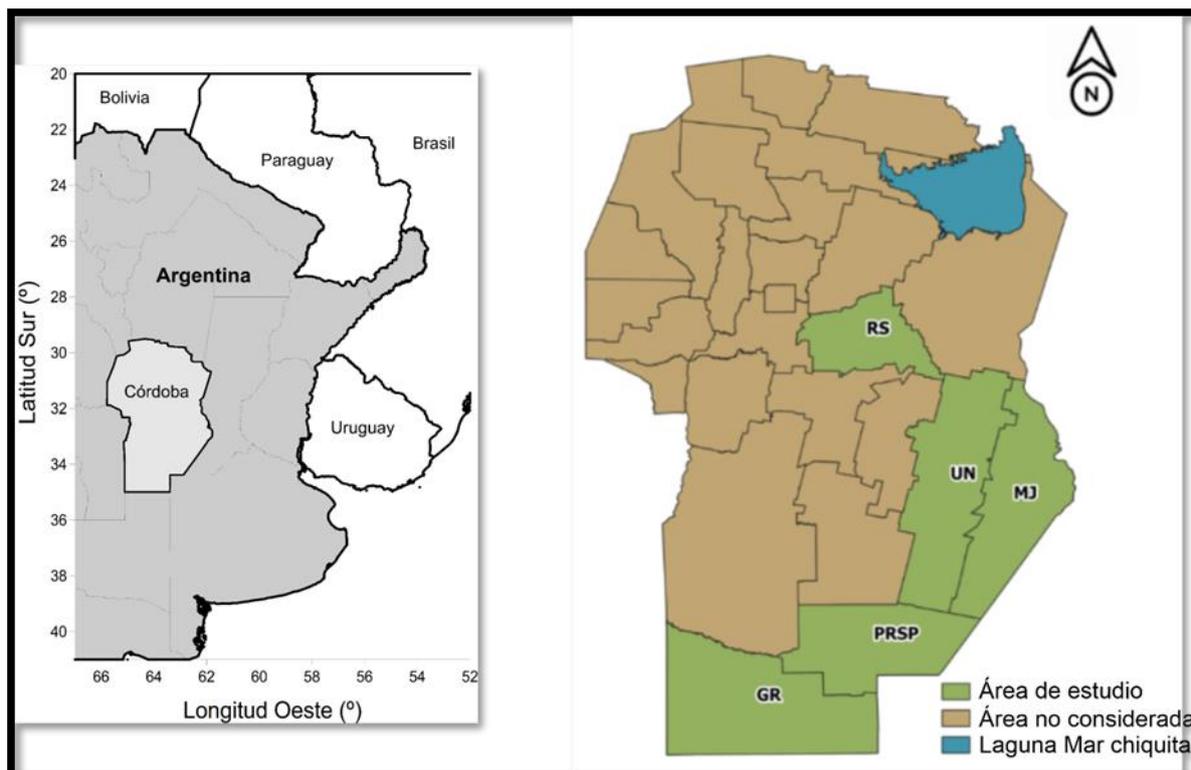


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en Córdoba. Departamentos: Río Segundo (RS), Unión (UN), Marcos Juárez (MJ), Pte. Roque Sáenz Peña (PRSP) y General Roca (GR).

Datos de cultivos y satelitales

La agricultura en el área de estudio generalmente se basa en sistemas de labranza cero, una práctica reconocida para la conservación del suelo y el agua. Las condiciones edafo/climáticas y particularmente la distribución de las lluvias, permite realizar soja y maíz como cultivos de verano y trigo como cereal de invierno. Si se cultiva soja o maíz como simples cultivos (SC), la siembra se suele realizar en los meses de octubre-noviembre y la cosecha en abril-mayo del próximo año (Nolasco et al., 2021). Por otro lado, si se integra trigo con soja o maíz en las secuencias de cultivo, la fecha de siembra de soja o maíz puede retrasarse hasta diciembre. En este caso, la cobertura máxima del cultivo estival se alcanzará en enero/febrero del próximo año.

Según datos del MAGyP (2021), para la campaña 2017/2018, la superficie sembrada con trigo, soja y maíz, en el área de estudio, representa aproximadamente el 45%, 42% y 37% del total provincial, respectivamente (Tabla 1).

Los datos de campo se adquirieron del 01/05/2015 al 30/04/2018. Solo se consideraron lotes con tamaño mayor a 50 ha (para ajustarse a la resolución del sensor MODIS), el tamaño promedio de los mismos fue de 105 ha. Para cada fecha de muestreo y lote, se recolectaron datos del tipo de cultivo de invierno y/o verano. En la Tabla 2 se muestra el número de lotes con cultivo simple y doble, registrados para cada departamento y campaña agrícola.

Tabla 1. Área cultivada (ha * 1000) por departamento y tipo de cultivo, para campañas agrícolas desde 2015/2016 a 2017/2018.

Cultivo	Id	Departamentos	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Trigo	1	Gral. Roca	72	105	47
	2	Marcos Juárez	103	140	162
	3	Pte. R. Sáenz Peña	97	77	47
	4	Río Segundo	98	129	106
	5	Unión	113	192	194
	Total	Provincia de Córdoba	1071	1580	1236
Soja	1	Gral. Roca	420	335	350
	2	Marcos Juárez	487	359	359
	3	Pte. R. Sáenz Peña	283	215	240
	4	Río Segundo	237	168	179
	5	Unión	428	289	302
	Total	Provincia de Córdoba	4720	3757	3524
Maíz	1	Gral. Roca	247	334	298
	2	Marcos Juárez	108	184	183
	3	Pte. R. Sáenz Peña	117	164	186
	4	Río Segundo	80	120	130
	5	Unión	143	238	246
	Total	Provincia de Córdoba	1936	2615	2805

Tabla 2. Número de lotes registrados con simple y doble cultivo, para campañas entre 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018.

Departamentos	2015/2016		2016/2017		2017/2018	
	Simple	Doble	Simple	Doble	Simple	Doble
Gral. Roca	2	12	72	19	54	14
Marcos Juárez	72	39	1	36	51	53
Pte. R. Sáenz Peña	1	53	83	24	28	22
Río Segundo	84	17	83	112	59	26
Unión	38	47	1	19	29	26

En este trabajo, las campañas se consideran desde el 1 de mayo del primer año hasta el 30 de abril del segundo año. Si el trigo se integra con la soja o el maíz en una campaña, se consideró como clase de doble cultivo (DC); por otro lado, si la secuencia es barbecho/soja o maíz, se designa como clase de simple cultivo (SC).

El sensor MODIS, a bordo de los satélites Aqua y Terra, tiene un tiempo de revisita de un día, brindando imágenes casi continuas en toda la Tierra desde 2000. En este trabajo, usamos el producto MOD13Q1 V6 (MODIS/TERRA Índices de vegetación L3), de 2015 a 2018. Este producto tiene datos NDVI (libres de nubes) de 16 días con 250 metros de resolución espacial.

Para cada lote y campaña, se obtuvieron por medio de la plataforma web Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) un total de 23 valores de NDVI (desde junio de un año a mayo del siguiente), día del año y confiabilidad del píxel (Confiabilidad de la calidad del píxel de índice de vegetación) para el píxel central de cada lote.

Modelo de clasificación

Los lotes de cada campaña se clasificaron como simple o doble cultivo utilizando una nueva metodología propuesta: la Envolvente de Clasificación (EC).

La EC, que se construyó como un método de clasificación supervisado, utiliza límites superiores e inferiores

obtenidos de firmas temporales de NDVI para asignar la serie de NDVI de cada lote a una de las dos clases SC o DC. En la etapa de entrenamiento (50% de los datos), se elaboraron las firmas temporales utilizando las 23 imágenes correspondientes. Los límites de la región inferior y superior se calcularon utilizando los percentiles 10 y 90. De esta forma, se definieron dos regiones temporales del NDVI, una para la clase SC y otra para DC.

En la etapa de clasificación y validación, las firmas de NDVI de cada lote se compararon con los perfiles temporales de NDVI para SC y DC y se determinó la pertenencia a la clase cuando al menos el 50 % de los valores caen dentro de un perfil y la diferencia con la otra clase era positiva (**Figura 2**). De lo contrario, este lote se identificó como no clasificado (NC).

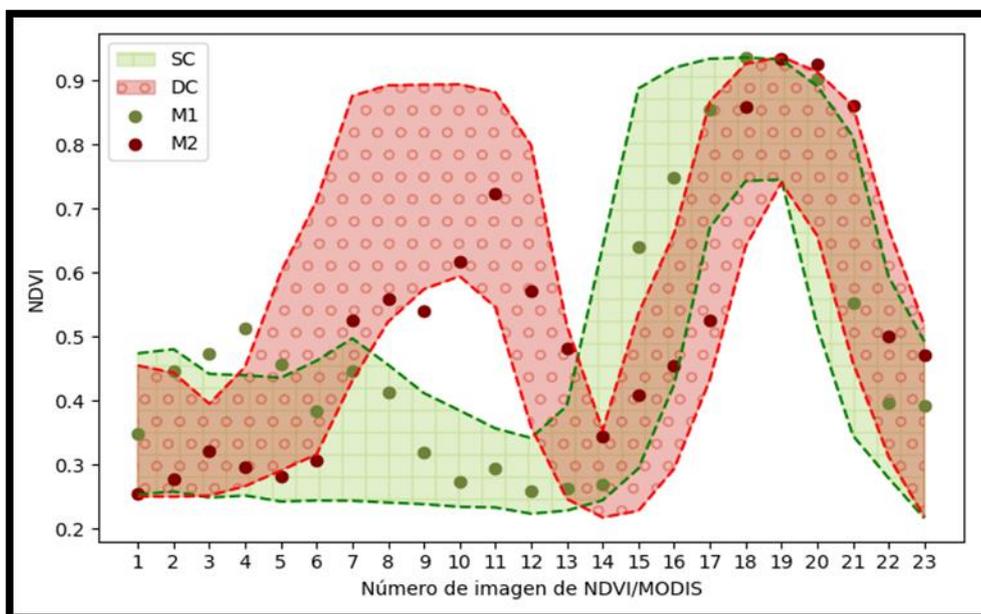


Figura 2. Envoltorios de clasificación para simple y doble cultivo (clases SC y DC), correspondientes a todos los valores de NDVI en la etapa de entrenamiento. M1 y M2 son ejemplos de dos lotes correspondientes a las clases SC y DC, respectivamente.

Análisis Estadístico

Para evaluar los resultados de aplicar EC, a partir de la matriz de confusión se consideraron dos medidas como indicadores en la clasificación: exactitud y coeficiente Kappa. Estas estadísticas se obtuvieron utilizando los datos independientes del conjunto de validación. El coeficiente Kappa es una medida de concordancia, que permite medir que parte de las coincidencias son atribuibles al azar. La escala Kappa utilizada en este trabajo fue: valores menores a 0% son muy pobres; 1-20% pobre; 21-40% razonable; 41-60 % bueno; 61-80 % muy bueno y más del 80 % casi perfecto (He et al., 2022).

Antes de hacer un análisis considerando la campaña y los distintos departamentos, se identificaron píxeles sin vegetación (áreas urbanas, cuerpos de agua, caminos, etc.). Estos píxeles, como se indica en García et al. (2018), se excluyen de cualquier procesamiento para que no influyan en los resultados del análisis y se muestran en los mapas como píxeles enmascarados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para clasificar si en cada lote se sembró simple o doble cultivo, se aplicó el modelo propuesto EC, utilizando un total de 23 valores de NDVI para cada ciclo. La **Figura 2** muestra los valores de NDVI para un lote con un único cultivo anual (soja) registrado y otro lote en el que se realizó un doble cultivo (secuencia trigo/soja).

El registro M1 corresponde a un lote de General Roca en la campaña 2015/2016, presentando 17 puntos NDVI correspondientes a SC y 12 a DC, por lo que se clasificó como simple cultivo. El registro M2, que corresponde a un lote del mismo departamento y período, presenta 18 valores dentro de la envoltorio correspondiente a DC y 12 para SC, por lo que este lote se clasificó como doble cultivo.

Los valores de exactitud obtenidos para la clasificación al aplicar el modelo EC (etapa de validación), por departamentos en cada campaña entre 2015/2016 y 2017/2018 se presentan en la **Tabla 3**, y para el área de estudio superaron el 96%.

Los valores de Kappa obtenidos utilizando los datos de validación fueron de 91%, 93% y 97% para cada una de

las tres campañas consideradas, desde 2015/2016 a 2017/2018, respectivamente; los mismos y según lo informado por He et al. (2022), permiten afirmar que

esta metodología alcanza una muy buena performance para la clasificación de simple o doble cultivo.

Tabla 3. Valores de exactitud para la clasificación obtenidos al aplicar el modelo EC (etapa de validación), para las campañas y departamentos considerados.

Departamentos	Exactitud (%) para EC		
	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Gral. Roca	100	91	94
Marcos Juárez	100	100	100
Pte. R. Sáenz Peña	89	94	100
Río Segundo	94	99	98
Unión	95	100	100
Área de Estudio	96	96	98

Utilizando únicamente datos de 2018, Pan et al. (2021) para la cuenca de Huaihe (China) con NDVI y Land Surface Water Index (imágenes Landsat y Sentinel) informaron en su conclusión valores de exactitud y Kappa de 89% y 78%, respectivamente. Para China Guo et al. (2022) clasificaron doble cultivo en el período 2001–2020 utilizando datos de series temporales de imágenes MODIS y un algoritmo basado en fenología. La exactitud y el coeficiente Kappa fueron 96% y 91%, respectivamente. Al detectar cultivos simples y dobles en seis regiones de los Estados Unidos, utilizando datos del año 2016, Yang et al. (2020) encontraron exactitudes

entre el 67% y el 89% y valores del coeficiente Kappa entre el 29% y el 73%.

Los resultados de aplicar EC a los cinco departamentos considerados en el área de estudio en cada campaña se muestran en la **Figura 3**. Se pueden observar diferentes distribuciones de clases, predominando DC en 2016/2017. Siempre hay píxeles "no puros" en cualquier región y estos píxeles se informaron con la etiqueta no clasificados (NC), como sugieren en De Castro et al. (2018).

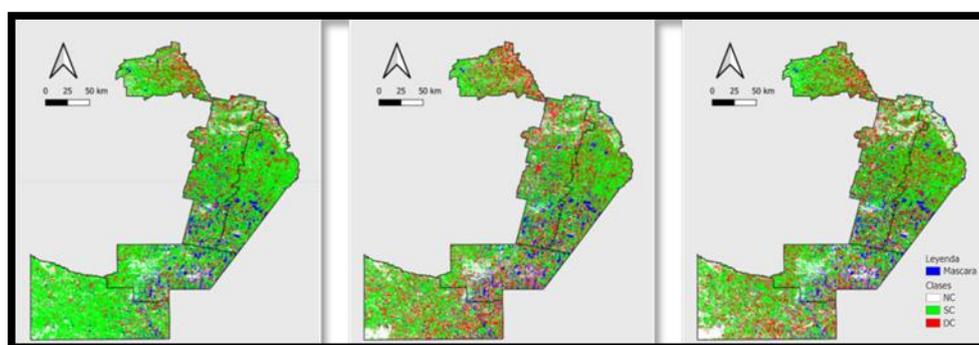


Figura 3. Mapas de clasificación obtenidos al aplicar la EC para el área de estudio, considerando 2015/2016 (izquierda), 2016/2017 (centro) y 2017/2018 (derecha). (NC, SC y DC corresponden a píxeles no clasificados, simple y doble cultivo, respectivamente)

En promedio para el área de estudio, cuando se aplicó el modelo EC, el porcentaje de superficie donde se realizó doble cultivo, estuvo entre 18,3% y 28,7%, para los tres períodos considerados. La superficie ocupada con un único cultivo anual disminuyó a lo largo del período de estudio, representando un 64,0% en 2015/2016 y un 49,5% en el último período. En 2017/2018 se observaron pequeños incrementos en el área con DC en los departamentos de Marcos Juárez y Unión. Los porcentajes presentados en la **Tabla 4** se calcularon sin considerar los píxeles enmascarados.

La distribución del porcentaje de la superficie dedicada al doble cultivo por departamento muestra una mayor intensidad de uso de suelo en el departamento de Río Segundo (**Tabla 4**). El denominado “cinturón sojero cordobés” (Marcos Juárez y Unión), beneficiado por el tipo de suelo y precipitación pluvial, mostró un aumento de área con DC en los dos últimos períodos, lo que coincide con lo observado en Chialvo et al. (2021).

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se implementó exitosamente la Envolvente de Clasificación, la cual se construyó a partir de firmas temporales NDVI, con el propósito de identificar la presencia de cultivos simples o dobles en la provincia de Córdoba, Argentina. Este método de

clasificación, de simple aplicación, demostró una excelente precisión en la etapa de validación, con una tasa de acierto global superior al 96% y coeficientes Kappa que oscilaron entre el 91% y el 97%. Esto se logró al aplicar la metodología a tres años consecutivos de datos, abarcando tanto cultivos individuales de soja o maíz como secuencias de soja/maíz junto con trigo.

Tabla 4. Porcentaje del área de estudio con simple cultivo (SC), doble cultivo (DC) y no clasificados (NC) para las campañas y departamentos considerados.

Departamentos	2015/2016			2016/2017			2017/2018		
	SC	DC	NC	SC	DC	NC	SC	DC	NC
Gral. Roca	70,3	10,1	19,6	45,2	27,4	27,4	43,7	24,9	31,4
Marcos Juárez	68,9	20,4	10,7	58,5	27,7	13,8	57,1	27,9	15,0
Pte. R. Sáenz Peña	58,7	17,6	23,7	42,2	28,5	29,3	46,6	24,3	29,1
Río Segundo	55,8	26,6	17,6	45,2	34,5	20,3	55,8	29,0	15,1
Unión	60,5	23,2	16,3	49,6	28,4	22,0	49,4	29,2	21,3
Área de Estudio	64,1	18,3	17,6	48,3	28,7	23,0	49,5	26,9	23,6

Los resultados obtenidos respaldan la idoneidad y confiabilidad de esta metodología para la detección de la intensificación de cultivos en esta región. Además, se destaca que la Envolvente de Clasificación de cultivos propuesta podría extenderse a investigaciones relacionadas con procesos ecológicos, como el ciclo del nitrógeno o la dinámica de la materia orgánica del suelo. Esto podría proporcionar información valiosa para la modelización de los efectos del cambio en el uso de la tierra, especialmente en el contexto de diferentes escenarios de cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aliaga V.S., Ferrelli F. y Piccolo M.C. 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *Int J Climatol* 37: 1237–1247.

Andrade, J.F., Poggio S.L., Ermacora M., y Satorre E.H. 2017. "Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use". *European Journal of Agronomy* 82: 1–10. doi:10.1016/j.eja.2016.09.013.

Cassman, K.G., y Grassini P. 2020. "A global perspective on sustainable intensification research". *Nature Sustainability* 3 (4): 262–268. doi:10.1038/s41893-020-0507-8

Chialvo E., Herrero R.M., Mir L.R., Pronotti M.S., Mansilla, G.J. 2021. Productividad y calidad de la soja en la zona núcleo-sojera. Campaña 2020/21. Ediciones INTA. Disponible en: <https://inta.gov.ar/documentos/revista-idea-21-0>

De Castro A.I., Six J, Plant R.E. y Peña J.M. 2018. Mapping crop calendar events and phenology-related metrics at the parcel level by object-based image analysis (OBIA) of MODIS-NDVI time-series: a case study in central California. *Remote Sensing* 10 (11): 1745.

García C.L., Piumetto M, Teich I, Morales H, Kindgard A, Fuentes M.L. y Ravelo A. 2018. Mapas de cobertura del suelo de la Provincia de Córdoba 2017/2018–Niveles 1 a 3. Infraestructura de Datos Espaciales de Córdoba (IDECOR). Disponible en: https://www.idecor.gov.ar/wp-content/uploads/2019/04/Informe-tecnico_Mapa_Cobertura_del_Suelo.pdf

Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D. y Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202: 18–27.

Guo Y., Xia H., Pan L., Zhao X. y Li R. 2022. Mapping the northern limit of double cropping using a phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sensing* 14 (4): 1004.

He S., Peng P., Chen Y. y Wang X. 2022. Multi-Crop Classification Using Feature Selection-Coupled Machine Learning Classifiers Based on Spectral, Textural and Environmental Features". *Remote Sensing*: 14(13), 3153.

MAGyP. Presidencia de la Nación 2021. "Estimaciones Agrícolas." Disponible en: <https://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.

Nolasco M.M., Ovando G., Sayago S., Magario I. y Bocco M. 2021. Estimating soybean yield using time series

- of anomalies in vegetation indices from MODIS. *Int J Rem Sens* 42: 405–421.
- Ovando G., Sayago S., Bellini Y., Belmonte M.L. y Bocco M. 2021. Precipitation estimations based on remote sensing compared with data from weather stations over agricultural region of Argentina pampas. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 23: 100589.
- Pan L., Xia H., Yang J., Niu W., Wang R., Song H., Guo Y. y Qin Y. 2021. Mapping cropping intensity in Huaihe basin using phenology algorithm, all Sentinel-2 and Landsat images in Google Earth Engine. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 102: 102376.
- Piccinetti, C.F., S. Bacigaluppo, C.A. Di Ciocco, J.M. De Tellería y Salvagiotti F. 2021. “Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas region”. *Geoderma* 402: 115192. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115192.
- Videla-Mensegue, H, Caviglia O.P., Degioanni A., Marcos J. y Bonadeo E. 2021. “Modelling water productivity for ecological intensification of crop sequences in the Inner Argentinean Pampas”. *Field Crops Research*. 271: 108246. doi:10.1016/j.fcr.2021.108246.
- Yang Y., Ren W., Tao B., Ji L., Liang L., Ruane A.C., Fisher J., Liu J., Sama M., Li Z. y Tian Q. 2020. Characterizing spatiotemporal patterns of crop phenology across North America during 2000–2016 using satellite imagery and agricultural survey data. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 170: 156–17.