

## Expansión del riego: Tipo de suelo, pendiente y calidad de agua en el sudeste de la provincia de Buenos Aires

### Expansion of irrigation, soil type, slope and water quality in the southeast of the province of Buenos Aires

#### Hernán Pablo Angelini \*

Grupo de Recursos Naturales y Gestión Ambiental, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Unidad Integrada Balcarce, Argentina

#### José Luis Costa

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Balcarce (retirado). Profesional independiente, Argentina

#### Virginia Carolina Aparicio

Grupo de Recursos Naturales y Gestión Ambiental, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Unidad Integrada Balcarce. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

#### Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Semestral

Vol. 121, núm. 1, 2022

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 14/04/2021

Aprobación: 06/07/2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/23/233043010/>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e088>

\* Autor de correspondencia: [angelini.hernan@inta.gob.ar](mailto:angelini.hernan@inta.gob.ar)



## Resumen

El objetivo de este trabajo es caracterizar el área agrícola bajo riego complementario en el Sudeste Bonaerense (SB) en cuanto al incremento del área ocupada, tipo de suelo, pendiente y calidad de agua. Mediante un proceso de digitalización visual sobre imágenes satelitales se identificaron áreas de riego con pivote central en seis partidos del sudeste bonaerense para el período 2017-2019. De la superficie total, 82.659 ha, Lobería y Balcarce registran el 60% y, junto con Tandil, registran el área de mayor expansión. El 94% de los círculos es menor a 100 ha. Las series de suelos "Mar del Plata" y "Tandil", del tipo Argiudol típico, son las de mayor presencia del área estudiada, con 34,7% y 17,2% respectivamente. El 12,6% del área presenta algún sector con pendientes mayores a 5%. En relación con la aptitud agrícola del agua de riego, se observó una tendencia de aumento en los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Relación de Adsorción de Sodio (RAS) a medida que se aproximan a la costa del mar. El 18% del área se encuentra en zonas identificadas con alta CE (>1,3) y un 15% del área en zonas altas de RAS (>a 13). La expansión del riego con aguas con baja aptitud para la producción agropecuaria y en zonas con pendiente puede afectar la estructura del suelo, reducir la infiltración y acentuar los procesos de erosión hídrica.

**Palabras clave:** agua subterránea, conductividad eléctrica, relación de adsorción de sodio, erosión hídrica, pivote central

## Abstract

The objective of this work is to characterize the agricultural area under complementary irrigation in the Southeast of Buenos Aires (SB) in terms of the increase of the occupied area, type of soil, slope and water quality. Through a process of visual digitization on satellite images, the irrigation circles with a central pivot were identified in six districts of the southeast of Buenos Aires for the period 2017-2019. Of the total area, 82,659 ha, Lobería and Balcarce register 60% and together with Tandil they register the area of greatest expansion. 94% of the circles is less than 100 ha. The "Mar del Plata" and "Tandil" series of soils, Typic argiudoll are the ones with the highest presence, with 34.7% and 17.2% respectively of the identified area. 12.6% of the area has a sector with slopes greater than 5%. In relation to the agricultural suitability of irrigation water, an increasing trend was observed in the values of Electrical Conductivity (EC) and Sodium Adsorption Ratio (SAR) as they approach the coast. 18% of the area is in areas identified with high EC (>1.3) and 15% of the area in high areas of RAS (>to 13). The expansion of irrigation with waters with low agricultural aptitude and in sloping areas can affect the structure of the soil, reduce infiltration and accentuate water erosion processes.

**Keywords:** groundwater, electrical conductivity, sodium adsorption ratio, water erosion, center pivot

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es un factor que condiciona el desarrollo de los cultivos (Andrade et al., 2017). En el sudeste bonaerense (SB) el régimen climático es húmedo a moderadamente húmedo con una precipitación media entre 750 y 1100 mm al año (Aliaga et al., 2017). El régimen pluviométrico presenta tres estaciones: lluviosa desde octubre a marzo, moderadamente lluviosa en abril, mayo y septiembre y poco lluviosa desde junio a agosto (Aliaga et al., 2017). En el contexto actual de cambio climático, se observan modificaciones en los patrones de lluvias y temperaturas que condicionan la productividad de los sistemas agropecuarios (Cambareri, 2017; Esperbent, 2017).

El riego es una práctica de manejo utilizada para suministrar agua a los cultivos cuando la humedad del suelo se aleja del rango óptimo (Génova, 2011; Torres Duggan et al., 2017). En el SB el riego de cultivos extensivos (papa, cereales y oleaginosas) como complemento de las precipitaciones se realiza con agua subterránea (Costa, 2000; Suero et al., 2001). El sistema de riego más utilizado es por aspersión y dentro de éste el pivote central es el más extendido en la región. Un relevamiento de círculos de riego en toda la provincia de Buenos Aires, reportó una tendencia de crecimiento exponencial del área bajo riego, alcanzando en 2015 las 104.770 ha (Barrionuevo et al., 2016). Argentina tiene potencial para triplicar el área irrigada aunque debe integrar la política hídrica a las políticas sociales, económicas y ambientales (FAO, 2015).

En el SB, la producción de papa para industria se realiza en su totalidad bajo riego (Huarte & Capezio, 2013). Los productores de papa comenzaron a buscar lotes sin historia de riego, dado que las condiciones fisicoquímicas de estos suelos podrían afectar la forma de los tubérculos y la producción de papa para industria. En general, esos lotes se encuentran en zonas con pendientes más pronunciadas y junto al efecto de la aplicación de aguas bicarbonatadas sódicas se aumenta el riesgo de erosión hídrica (Costa & Aparicio, 2015). La dinámica de esta producción junto con la de semilla certificada de maíz, que también requiere el uso intensivo del riego, se asocia con altos valores de arrendamiento en campos con riego disponible. Esta situación y la tendencia de crecimiento del área bajo riego demandan un mayor detalle en el conocimiento de los recursos naturales que intervienen en la producción agrícola bajo riego.

En el área de estudio predominan los subgrupos de suelos del tipo Argiudol típico y Argiudol petrocálcico (SAGPYA e INTA, 1990) en un paisaje donde los rasgos dominantes corresponden a los afloramientos serranos del sistema de Tandilia con sierras y serranías separadas por amplios valles, cubiertos por depósitos eólicos (Tomas et al., 2005). Los pedemontes serranos están formados por loess de un espesor promedio que oscila entre uno y dos metros, depositado sobre una costra calcárea que suele aflorar en las lomas, los suelos profundos son más comunes en sectores relativamente bajos, pero bien drenados. Son suelos aptos para la agricultura con limitaciones por profundidad y con riesgo de erosión hídrica en las ondulaciones (SAGPYA e INTA, 1990). Sin embargo, no se conoce con exactitud el tipo de suelo predominante en las áreas regadas del SB, ni las principales limitantes de los mismos.

La fuente de agua subterránea se caracteriza por el contenido de bicarbonato de sodio (Costa, 2000; Génova, 2011) con valores en la relación de adsorción de sodio (RAS) de 6 a 20 (Costa et al., 2016). El riego con este recurso puede aumentar la conductividad eléctrica (CE), pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI), lo cual produciría un incremento en la densidad aparente del suelo reduciendo su porosidad global (Aparicio et al., 2014; Costa & Aparicio, 2015). La conductividad hidráulica del suelo (K) se vería afectada por la dispersión de las arcillas y una disminución de la macroporosidad, que sería evidente cuando los valores de RAS del suelo son mayores a 3,5 (Costa & Aparicio, 2015).

El uso del riego complementario sin la evaluación de la aptitud agrícola del agua y las condiciones fisicoquímicas del suelo podría afectar la productividad por una disminución de la infiltración y aumento del encostramiento superficial y de la compactación del suelo por tránsito (Costa, 2000; Suero et al., 2001; FAO, 2015; Torres Duggan et al., 2017). Efectos que, a su vez, provocan un aumento en el escurrimiento superficial del agua y, bajo determinadas condiciones producen erosión, aun en pendientes menores al 1% cuando éstas son mayores a 500m de longitud (SAGyP & CFA, 1995). Es importante destacar también, que la variabilidad intrínseca de los suelos ha sido estudiada en el SB. En un trabajo realizado en campo de productores regantes se diferenció estadísticamente el contenido de Na<sup>+</sup> entre las diferentes zonas de conductividad eléctrica aparente (CE<sub>a</sub>) mapeadas con VERIS 3100 en cada lote (Bosch Mayol et al., 2012). Los sensores de medición directa de CE<sub>a</sub> son herramientas eficaces para la estimación espacial del contenido de sodio del suelo (Bosch Mayol et al., 2012) que constituye un aspecto a considerar para el manejo de suelos y el ajuste de láminas de riego.

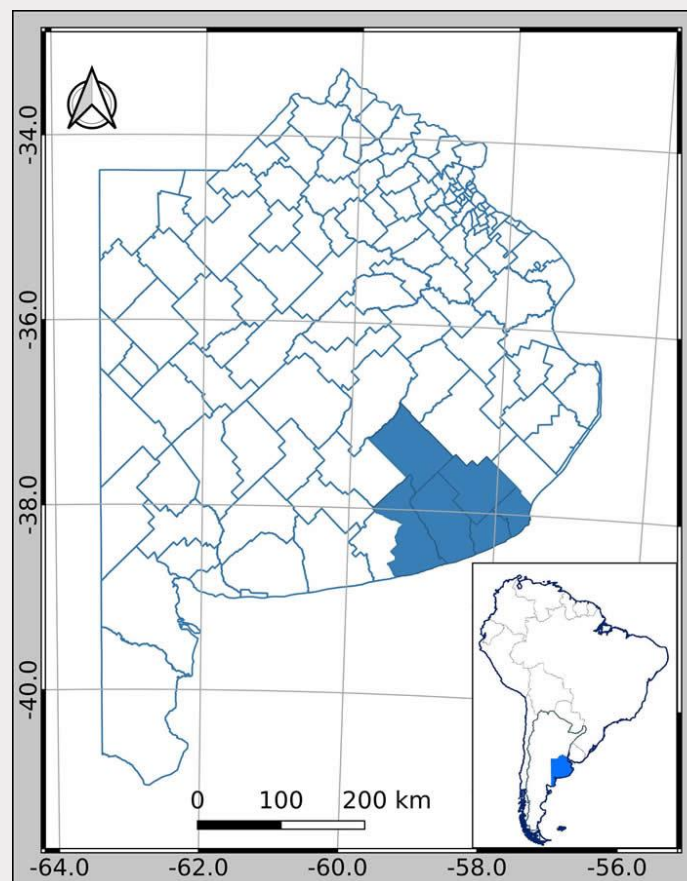
La teledetección es una técnica ampliamente utilizada en el monitoreo de la cobertura del suelo. La identificación visual de círculos de riego es un método simple y preciso para cartografiar la cobertura terrestre (Ozdogan et al., 2010) y aún vigente en la identificación de características cartográficas como los círculos de riego por pivote central (Williams et al., 2017; da Silva et al., 2019)

El objetivo de este trabajo es caracterizar el área agrícola bajo riego complementario en el SB para lo cual se estudiarán los siguientes aspectos i) determinar el incremento de la superficie bajo riego por pivote central en 2017 y 2019, ii) identificar las series de suelo más utilizadas para riego complementario, iii) cuantificar la pendiente de los suelos bajo riego y iv) identificar la calidad de agua de riego que predomina en el SB.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El SB es una región de 2.130 km<sup>2</sup>, ubicada al sudeste de la provincia de Buenos Aires. Administrativamente delimitada por los partidos de Tandil, Balcarce, Gral. Pueyrredón, Gral. Alvarado, Lobería y Necochea (Figura 1). El 67% del área tiene aptitud agrícola de acuerdo con la capacidad de uso de los suelos (INTA, 1972 a 1988).



**Figura 1**  
Área de estudio en el Sudeste Bonaerense SB

### **SUPERFICIE BAJO RIEGO**

El procedimiento de identificación de los círculos de riego se realizó utilizando el programa informático QGIS (QGIS, 2019), capas de datos vectoriales e imágenes satelitales obtenidas por el instrumento “Operational Land Imager (OLI)” a bordo del satélite “Landsat 8” (Tabla 1). La capa vectorial “grilla 1:50.000” presenta una grilla sobre las imágenes satelitales del área de estudio. Mediante una interpretación visual se digitalizó un punto en el centro de cada círculo de riego identificado y se registró la distancia al borde del círculo en cada celda de la grilla. Luego se utilizó el procedimiento informático “Buffer de distancia variable”, que genera los polígonos de cada círculo de riego y permite calcular la superficie total en el área de estudio.

### **EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA SUPERFICIE REGADA CON PIVOTE**

En el análisis temporal de la expansión del riego en el SB se tomó como base la información publicada por Barrionuevo et al. (2016) que identificó sitios bajo riego por pivote central para la provincia de Buenos Aires durante el período 1995-2015. Dado que se detalla la superficie por partido, se extrajo la superficie bajo riego con pivote central para el SB para el año 2015. El registro para 2017 y 2019 se obtuvo del proceso de digitalización descrito en el ítem “superficie bajo riego” que, en intersección con la capa de partidos, permitió obtener la superficie por partido.

**Tabla 1**  
*Capas vectoriales y raster de información cartográfica.*

<b>Nombres del recurso cartográfico</b>		<b>Origen del recurso cartográfico</b>
Capas vectoriales:	Límites políticos-administrativos de provincias y departamentos, red vial, grilla escala 1:50.000, centros poblados.	Base de Datos Geográfica. Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2020).
	Cartas de suelo de la provincia de Buenos Aires escala 1:50.000, Puntos de círculos de riego.	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1972 a 1988).
	Puntos de Calidad de Agua para uso agropecuario.	INTA, Asociación de Riego Pampeano y Laboratorio de suelos Fertilab.
Capas raster:	SRTM90m (altura sobre el nivel del mar), Pendientes (%).	SRTM 90m Digital Elevation Database v4. (Jarvis, 2008).
	Imágenes satelitales Landsat 8 Año 2017 (path-row y fecha de adquisición) 224-086 19-02-2017, 224-087 19-02-2017, 225-086 10-02-2017, 225-087 10-02-2017.	Archivos Landsat de “United States Geological Survey - Earth Resources Observation and Science” (USGS-EROS) a través de EarthExplorer.
	Imágenes satelitales Landsat 8 Año 2019 (path-row y fecha de adquisición) 224-086 09-02-2019, 224-087 09-02-2019, 225-086 16-02-2019, 225-087 16-02-2019.	

## **SUELOS**

Para identificar las series de suelo con riego se utilizó la información de las “Cartas de Suelo de la Provincia de Buenos Aires a escala 1:50.000” (INTA, 1972 a 1988). La intersección de los círculos de riego con los polígonos de las unidades cartográficas de la capa vectorial de suelos generó una nueva capa con los límites de los círculos de riego y la información de las unidades cartográficas. A partir de esta nueva capa se generó el listado de series principales de las unidades cartográficas (en una unidad cartográfica compuesta por una o más series de suelo, solo es considerada la de mayor porcentaje de participación de la unidad cartográfica) y se sumó el área dentro de los círculos de riego, agrupada por serie principal. El gráfico descriptivo de los perfiles típicos de suelo se realizó con el paquete de R “Algorithms for Quantitative Pedology (AQP)” (Beaudette et al., 2013) a partir de los datos disponibles de los horizontes en las cartas de suelo (INTA, 1972 a 1988).

## **PENDIENTES**

Para estudiar la relación entre los círculos de riego identificados y la pendiente del terreno, se utilizó la capa de información “SRTM 90m Digital Elevation Database v4” (Jarvis, 2008), que contiene los valores de altura (metros sobre nivel del mar). Mediante el proceso “r.slope” (Shapiro & Waupotitsch, 2008), en el programa QGIS (QGIS, 2019), se calculó la pendiente entre un pixel y sus vecinos, generando una nueva capa con los valores de pendiente en porcentaje para cada pixel de 90 metros de resolución espacial.

La intersección de la capa de círculos de riego con la de pendiente permite observar un conjunto de valores de pendiente dentro de cada círculo de riego. Con el proceso “Estadística de Zona” del programa QGIS, se registró pendiente promedio y pendiente máxima para cada polígono de círculos de riego.

## **CALIDAD DE AGUA**

A partir de la información disponible en el Laboratorio de Salinidad de INTA Balcarce, de la Asociación de Riego Pampeano y del Laboratorio de Suelos Fertilab, se construyó una capa vectorial con 524 puntos georreferenciados de muestras de agua de riego con valores de Conductividad Eléctrica (CE) y valores de relación de adsorción de sodio (RAS). Los valores de CE y RAS se clasificaron en bajos, medios y altos de acuerdo con los límites que se muestran en la Tabla 2.

Las clases de CE y RAS se definieron arbitrariamente con el objetivo de cubrir la dispersión de posibles valores presente en el SB. La clase de valores medios reúne el 33% central de las muestras para CE y 50% central de las muestras para RAS.

Una manera de representar los valores puntuales en zonas homogéneas es mediante un proceso de interpolación. Como la distribución de puntos no es uniforme en el área de estudio, se generó una nueva área para la interpolación considerando 10 km alrededor de dos o más puntos de la capa vectorial de calidad de agua. Utilizando el método de interpolación kriging (Oliver & Webster, 2014), se generaron tres zonas continuas para las clases de CE y RAS.

**Tabla 2**  
*Clases de conductividad eléctrica (CE) y relación de adsorción de sodio (RAS).*

<b>Clase</b>	<b>Valores de CE (dS/m)</b>	<b>Valores de RAS</b>
Bajos	<1	<7
Medios	1 a 1,3	7 a 13
Altos	>1,3	>13



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

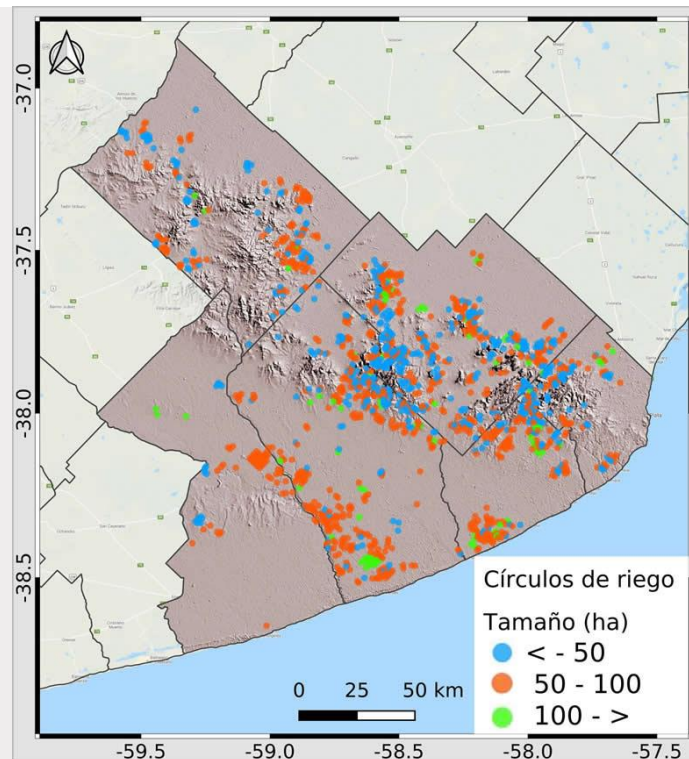
### **EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE BAJO RIEGO POR PIVOTE CENTRAL**

En el año 2019, en el SB se identificó una superficie bajo riego por pivote central de 82.659 ha correspondiente a 1494 círculos de riego (Figura 2), lo que significa un aumento de 35.300 ha aproximadamente respecto a lo reportado por Barrionuevo en 2015 en el sudeste bonaerense.

En relación con el tamaño de los círculos de riego se identificó que: un 36% corresponden a círculos menores a 50 ha, un 58% se ubican en un rango entre 50 y 100 ha y un 6% de círculos de riego son mayores a 100 ha. En cuanto a su distribución administrativa, los partidos de Lobería y Balcarce representan el 60% de los círculos identificados.

Los registros en el SB muestran un crecimiento del 76,7% del área bajo riego por pivote central en el período 2015 a 2019. El aumento registrado en el período 2015 a 2017 es de 19.208 ha y en el período 2017 a 2019 es de 16.117 ha. En un análisis lineal por partido (Figura 3) se observan zonas de mayor expansión como Lobería y Balcarce con crecimientos de 3004 ha y 2691 ha por año respectivamente, mientras Necochea y General Pueyrredón son zonas más estables, con 564 ha y 298 ha por año respectivamente.

La dinámica de producción del cultivo de papa, involucra en el SB alrededor de 31.500 ha (Rebella, 2019) y puede influir en la expansión del área identificada bajo riego por pivote central. La papa se realiza preferentemente en lotes donde no se ha realizado este cultivo en los últimos años. Otra influencia de esta actividad sobre el área bajo riego es el cambio de tecnologías de riego, siendo reemplazadas otras de menor eficiencia por la tecnología de riego por pivote central y en este caso son identificadas como un crecimiento cuando corresponden a zonas que ya se encuentran bajo riego.



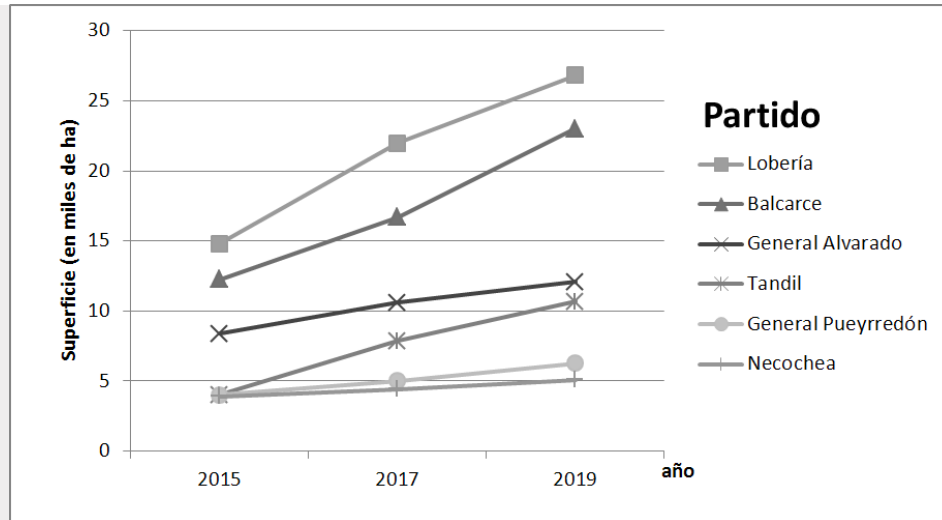
**Figura 2**

*Distribución y tamaño de los círculos de riego por pivote central en el SB en 2019.*

**SERIES DE SUELOS IDENTIFICADAS**

El listado de series principales (Tabla 3) identifica las series principales de las unidades cartográficas presentes en los círculos de riego y la superficie total que representa esa serie. Incluye el área bajo riego en hectáreas y porcentaje relativo en los círculos de riego. Adicionalmente se indica la superficie total de la serie en el SB junto con el porcentaje relativo al total del área en el SB y el porcentaje de la superficie regada de la serie.

Las seis series principales con mayor presencia en el área bajo riego acumulan un 86,4% de la superficie total. Se generó un gráfico descriptivo de los horizontes de los perfiles típicos de estas series de suelo (Figura 4), las cuales corresponden a series con más de un metro de profundidad, excepto las series Balcarce y Azul, que presentan un horizonte petrocálcico dentro del metro de profundidad.



**Figura 3**  
Evolución temporal del área bajo riego por pivote central

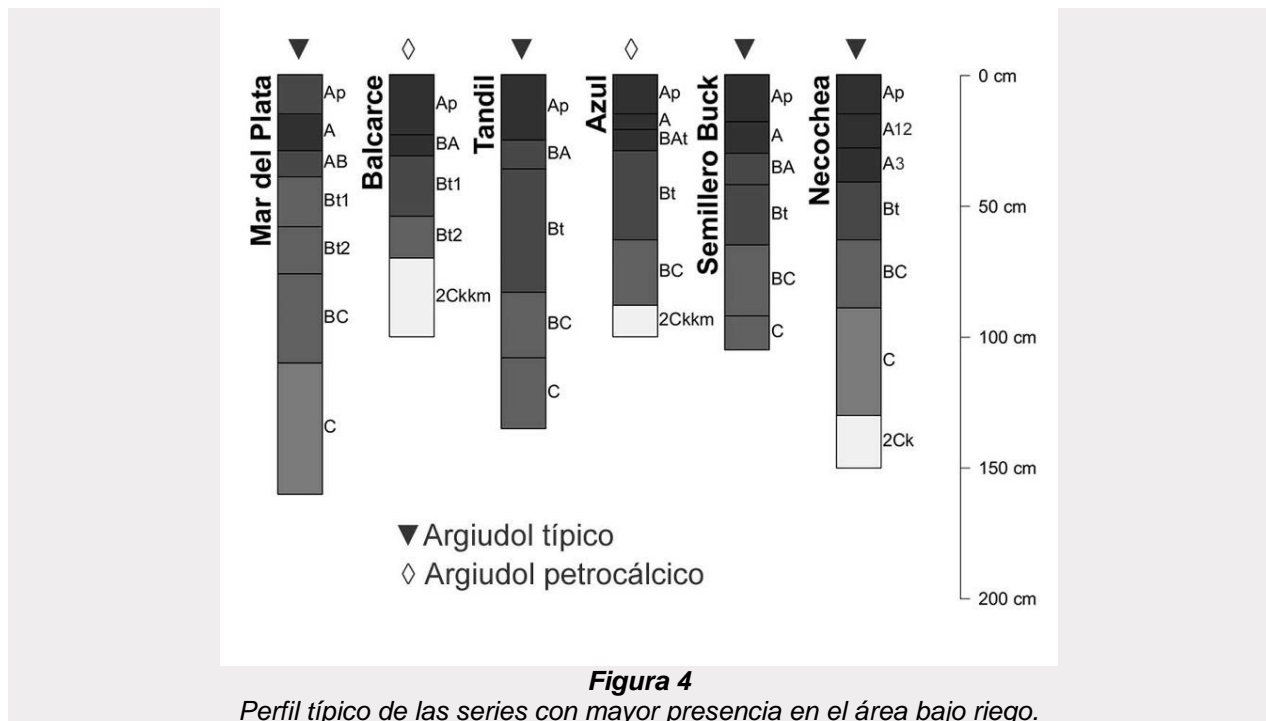
**Tabla 3**

Listado de series principales en las unidades cartográficas en intersección con los círculos de riego. También incluye superficie (ha) y su valor relativo al SB y porcentaje de la serie bajo riego.

Serie principal en la Unidad Cartográfica	Superficie bajo riego (ha)	% bajo riego	Superficie en el SB (ha)	% de la serie en el SB	% de la serie bajo riego
MAR DEL PLATA	28.668	35%	225.022	11%	13%
TANDIL	14.192	17%	355.894	17%	4%
SEMILLERO BUCK	8.365	10%	145.801	7%	6%
NECOCHEA	7.599	9%	152.132	7%	5%
BALCARCE	6.440	8%	74.922	4%	9%
AZUL	6.200	7%	245.284	12%	3%
Otras series principales	11.195	14%	228.045	11%	5%

**SB** Sudeste Bonaerense.





El 71% del área bajo riego corresponde a suelos clasificados como Argiudoles típicos (series Mar del Plata, Tandil, Semillero Buck y Necochea) y un 15% como Argiudoles petrocálcicos (Azul y Balcarce). Esta clasificación concuerda con los tipos de suelos reportados por Suero et al. (2001), y sobre los cuales ahora es posible conocer su ubicación y superficie bajo riego (Figura 5). El 14% restante corresponde a otras 35 series que, por la escasa superficie identificada en los círculos de riego, no han sido consideradas en este análisis.

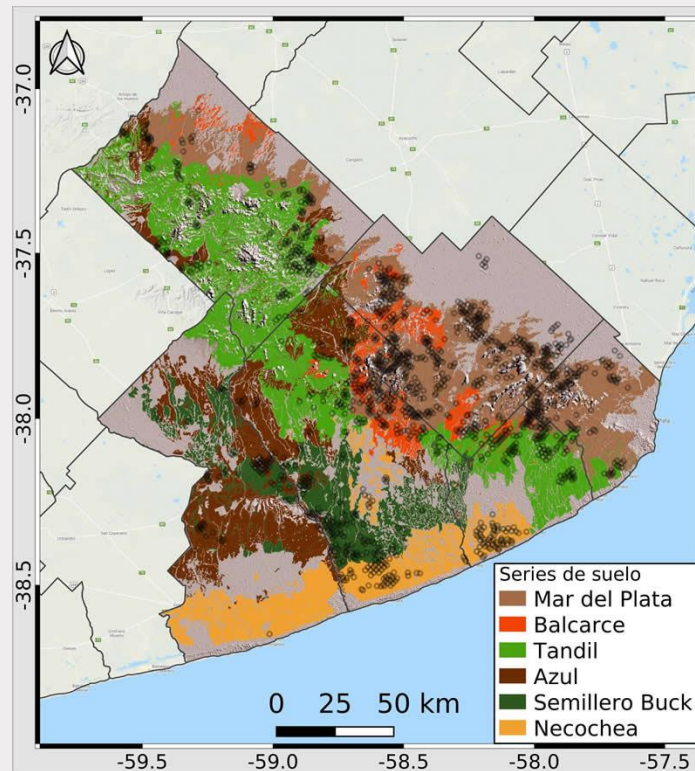
Según las cartas de suelo a escala 1:50.000, las series Mar del Plata y Balcarce, presentan textura franca en el horizonte A y franco arcilloso en el Bt. Las series se diferencian por la presencia de un horizonte petrocálcico a 70 cm de profundidad de acuerdo con la descripción típica del perfil en la serie Balcarce.

Las series Tandil y Azul, son franco-arcilloso en el horizonte A y arcilloso el Bt. En el caso de Azul, también presenta un horizonte petrocálcico a los 88 cm de profundidad.

La serie Semillero Buck, franco el horizonte A y arcilloso el horizonte Bt. La serie Necochea, ubicada principalmente en la zona costera, presenta horizontes A y Bt de textura franco arcillo arenoso.

En general, estas series corresponden a suelos bien drenados, con escurrimiento medio y permeabilidad moderada. Las limitaciones de uso se asocian con la susceptibilidad a la erosión hídrica. La serie Mar del Plata, siendo la de mayor presencia en el área bajo riego, también asocia la pendiente del terreno como limitación de uso. Además, al incorporar el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, puede producir una dispersión de la matriz del suelo y reducir la capacidad de infiltración (Peinemann et al., 1998; Suero et al., 2001; Costa & Aparicio, 2015; Sánchez et al., 2015) generando escorrentía y erosión de la capa superficial del suelo.

Estas series de suelos con textura media-fina proporcionan un medio óptimo en la retención y capacidad de almacenamiento de agua útil disponible para los cultivos en el perfil del suelo. De acuerdo con los resultados disponibles en la base de datos del Laboratorio de Física de Suelos de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce, los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente de estas series presentan un rango de 0,33 a 0,41 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) y 0,18 a 0,20 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) respectivamente. Estos valores indican que el agua útil disponible para los cultivos presenta un rango de 150 a 210 mm considerando un metro de profundidad. Sin embargo los años de agricultura continua, el sistema de labranza, el uso del riego y demás factores naturales y antrópicos que ocurren a escala de lote pueden afectar las propiedades hidrológicas del perfil del suelo. Conocer el tipo de suelo bajo riego junto con el monitoreo y la evaluación de las propiedades físico-químicas brinda un soporte para mejorar las decisiones del sistema de producción.



**Figura 5**

*Serie de suelo principal de la unidad cartográfica y círculos de riego identificados.*

### **PENDIENTES**

Se clasificaron los círculos de riego por el parámetro "Pendiente Promedio". Se encontró que el 80,3% de los círculos de riego se encuentran con pendientes promedio menores a 2% y el resto con pendientes promedio entre 2% y 5,2%. También se clasificaron los círculos de riego por el parámetro "Pendiente Máxima" registrada dentro de cada círculo de riego. Se identificó que el 12,6% de los círculos de riego se encuentran en zonas donde algún sector registra pendientes mayores al 5%.

### **CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO**

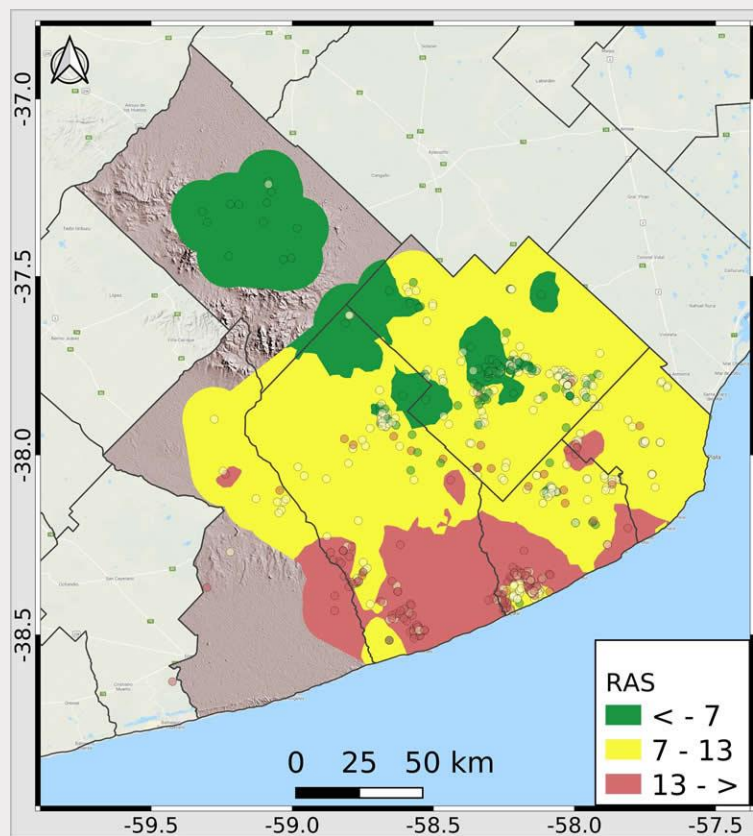
Se observó un patrón de incremento de los valores de CE a medida que se aproxima a la costa del mar. El 30% de los círculos de riego se encuentra en zonas con valores de CE bajos (<1), el 43% en zonas con valores medios (entre 1 y 1,3), el 18% en zonas con valores altos (>1,3) y un 9% fuera del área de análisis por falta de registros.

La otra variable considerada en la construcción de la capa de calidad de agua es la relación de adsorción de sodio (RAS). Se observó un patrón similar, reportando un aumento en el valor del RAS a medida que se acerca a la costa del mar.

Luego del proceso de interpolación se generó la zonificación en áreas homogéneas de acuerdo con las clases de RAS (Figura 6). En esta figura se observan también las ubicaciones de las muestras de agua. La zonificación de valores medios de RAS (rango: entre 7 y 13) representa los valores predominantes de la clase, sin embargo se pueden observar dentro de la clase, la presencia de valores puntuales altos y bajos producto de la variabilidad de los datos en el área de estudio, lo que muestra la importancia de realizar análisis de cada perforación.

Se pudo estimar que el 14% de los círculos de riego se encuentra en zonas con valores de RAS bajos (rango: menor a 7), el 62% en zonas con valores medios (rango: entre 7 y 13), el 15% en zonas con valores altos (rango: mayor a 13) y un 9% fuera del área interpolada por falta de registros.

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es un indicador del riesgo de sodificación del suelo. Cuando se utiliza agua de riego con altos valores de RAS, a igualdad de otros factores, se produce un incremento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) del suelo a expensas del desplazamiento del calcio o magnesio intercambiables adsorbidos en el complejo de cambio del suelo (Torres Duggan et al., 2017). Existe una relación directa e inversa entre la tasa de infiltración y el PSI de un suelo. Del mismo modo sucede con la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), que es el parámetro que caracteriza la permeabilidad o velocidad con que se mueve el agua a través del suelo (Taboada & Lavado, 2008). En un trabajo sobre suelos Argiudoles presentes en el área en estudio se indujo el aumento del porcentaje de sodio de intercambio ( $PSI=5$ ) y se midió la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) con agua libre de solutos en condiciones de laboratorio. La  $K_s$  se redujo hasta 20% correspondiendo la menor reducción a los suelos con menos arcilla y más materia orgánica (Costa & Aparicio, 2000).



**Figura 6**  
*Relación de Adsorción de Sodio (RAS). Zonas altas, medias y bajas.*

## CONCLUSIONES

El 71% (58.688 ha) del área bajo riego corresponde a suelos clasificados como Argiudoles típicos (series Mar de Plata, Tandil, Semillero Buck y Necochea) y un 15% (12.399 ha) como Argiudoles Petrocálcicos (Azul y Balcarce), de acuerdo con la descripción de los perfiles típicos de las cartas de suelo, escala 1:50.000.

El 12,6% del área (10.415 ha) bajo riego presenta algún sector del riego con pendientes mayores al 5% y el 15% (12.399 ha) de los círculos de riego se encuentra en zonas con valores altos en la relación de adsorción de sodio. Los resultados de este estudio muestran la importancia de monitorear los indicadores de salud del suelo y calidad de agua, para tomar decisiones con base objetiva y mejorar la sustentabilidad del sistema de producción agropecuario.

Si bien el área bajo riego se expande, en relación con el área agrícola del sudeste bonaerense, estimada en el 67% del total, el riego aún es marginal. Sin embargo, se encuentra sobre los suelos de mayor productividad agrícola. La situación productiva actual y la expansión del riego con aguas con baja aptitud agrícola y en zonas con pendiente pueden acentuar los procesos de erosión del suelo si no se toma una actitud proactiva en establecer las condiciones que integren los procesos de producción con medidas de conservación de suelos.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de los estudios de posgrado en la “Maestría en manejo y conservación de recursos naturales para la agricultura” de la Facultad de Ciencias Agrarias (Balcarce, Ruta 226, km 73,5) de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Se agradece a la Asociación de Riego Pampeano y al Laboratorio Fertilab por el aporte de datos sobre análisis de muestras de agua. También deseamos agradecer a la Sra. Natalia Gulle y al Sr. Luis Alonso por su dedicación en el análisis de muestras en el Laboratorio de Salinidad de la EEA INTA Balcarce.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga, V.S.; F. Ferrelli & M.C. Piccolo. (2017).** Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International journal of climatology* 37: 1237-1247.
- Andrade, F.; M. Taboada; D. Lema; N. Maceira; H. Echeverría; G. Posse; D. Prieto; E. Sánchez; D. Ducasse; M. Bogliani; J.C. Gamundi; E. Trumper; J. Frana; E. Perotti; F. Fava & M. Mastrangelo. (2017).** Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA. 120 pp.
- Aparicio, V.C.; A. Barbacone & J.L. Costa. (2014).** Efecto de la calidad de agua para riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. *Ciencia del suelo* 32(1): 95-104.
- Barrionuevo, N.; L.A. German & C. Waldman. (2016).** Análisis espacio temporal del riego por pivote central en la provincia de Buenos Aires en el período 1995-2015. 3° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. IFRH 2016. 6 y 7 de octubre. INA, Ezeiza, Buenos Aires.
- Beaudette D.E.; P. Roudier & A.T. O'Geen. (2013).** Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists. *Computers & Geosciences* 52: 258-268.
- Bosch Mayol, M.; J.L. Costa; F.N. Cabria & V.C. Aparicio. (2012).** Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del suelo* 30(2): 95-105.
- Cambareri, G.S. (2017).** Environmental Challenges to Adopt Climate-Smart Agriculture for Cereals Cultivated in the South Eastern Pampas of Argentina. *MOJ Ecology & Environmental Sciences* 2(7).
- Costa, J.L. (2000).** Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the southern humid pampas of Argentina. *Journal of Crop Production* 2(2): 85-99.
- Costa J.L. & V.C. Aparicio. (2000).** Efecto del sodio en la degradación de suelos del sudeste de la Provincia de Bs. As. Argentina. XI Conferencia de la Organización Internacional para la Conservación del Suelo ISCO 2000. Buenos Aires, Argentina.

- Costa, J.L. & V.C. Aparicio. (2015).** Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agricultural Water Management* 159: 299-306.
- Costa, J.L.; V.C. Aparicio; L.F. Salleses & F.D. Frolla. (2016).** Effect of tillage and application of gypsum In a No-Till field under supplementary irrigation with sodium bicarbonate waters. *Agricultural Water Management* 177: 291-297.
- da Silva, W.F.; H.F.E. de Oliveira; M.H.R. de Oliveira; E.A. da Silva Ávila; E.A. dos Santos; R.M. da Silva; R.S. de Oliveira; A.E.C. Sousa; G.H.M. Brito; L.S. Pereira; E.M. Costa & M.V.A. Ventura. (2019).** Identification of Areas Irrigated by Central Pivot in the State of Goiás, Brazil. *Journal of Agricultural Science* 11(11).
- Esperbent, C. (2017).** El cambio del clima deja su huella en la agricultura. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 43(2): 108-112.
- Génova, L.J. (2011).** Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía* 110(2): 63-81.
- Huarte, M.A. & S.B. Capezio. (2013).** Cultivo de papa. En: *Agricultura y ganadería pampeana*. M. Cahuepé & F. Gutheim. (Eds.). EUDEM, Mar del Plata. pp. 172-202.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2020).** Capas SIG. Repositorio de datos online. Disponible en: <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG> Último acceso: mayo de 2020
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA. (1972 a 1988).** Cartas de Suelo de la República Argentina Escala 1:50.000.
- Jarvis, A.; H.I. Reuter; A. Nelson & E. Guevara. (2008).** Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>. Último acceso: marzo de 2019
- Oliver, M.A. & R. Webster. (2014).** A tutorial guide to geostatistic: Computing and modeling variograms and kriging. *Catena* 113: 56-59.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. (2015).** Estudio del potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017. Desarrollo Institucional para la Inversión. UCAR-PROSAP. Roma, Italia. 121 pp.
- Ozdogan, M.; Y. Yang; G. Allez & C. Cervantes. (2010).** Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote Sensing* 2: 2274-2304.
- Peinemann, N.; M. Díaz Zorita; M.B. Villamil; H. Lusarreta & D. Grunewald. (1998).** Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. *Ciencia del suelo* 16(1): 39-42.
- QGIS Development Team. (2019).** QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponible en: <https://qgis.org>. Último acceso: marzo de 2019.
- Rebella, C. (2019).** Informe Técnico: Relevamiento de área sembrada con papa en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Disponible en: <http://www.fenapp.org.ar/Informes/>. Último acceso: agosto de 2019.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Consejo Federal Agropecuario. SAGyP & CFA. (1995).** El deterioro de las tierras de la República Argentina. Buenos Aires. 287 pp.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. SAGPyA e INTA. (1990).** Centro de Investigaciones en Recursos Naturales. Proyecto PNUD Argentina 85/019. Atlas de Suelos de la República Argentina. Tomo I. 677 pp.
- Sánchez, R.M.; L.D. Guerra & M. Scherger. (2015).** Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. Ediciones INTA. 65 pp.
- Shapiro, M. & O. Waupotitsch. (2008).** GRASS GIS manual: r.slope.aspect. Disponible en: <http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.slope.aspect.html>. Último acceso: marzo de 2019.
- Suero, E.E.; J.N. Santa Cruz; A. Silva Busso; A.I. Della Maggiora; A.I. Irigoyen; J.L. Costa & J.M. Gardiol. (2001).** Caracterización de los recursos naturales en sistemas bajo riego del sudeste bonaerense. Bases para propuestas de aplicación sustentable del riego. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 30(1): 71-89.
- Taboada, M.A. & R.S. Lavado. (2008).** Funcionamiento de los suelos salinos y sódicos. Actas XVI. Congreso AAPRESID, 12 al 15 de agosto. Rosario, Argentina. pp. 339-348.
- Tomas, M.; M. Farenga; M.V. Bernasconi; G. Martínez; H. Massone; F. Cabria; M. Calandroni; G. Dillon; D. Mazzanti; E. Pastoriza; T. Pilcic; A. Espinosa; M.E. Lanari; M.T. López; J. López & P.**

- Salgado. (2005).** Atlas digital del Partido de Balcarce Provincia de Buenos Aires, República Argentina. Revista Cartográfica (80-81): 91-102.
- Torres Duggan, M.; C.R. Álvarez & H. Rimski-Korsakov. (2017).** Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 25: 17-23.
- Williams, M.D.; C. Hawley; M. Madden & J.M. Shepherd. (2017).** Mapping the spatio-temporal evolution of irrigation in the Coastal Plain of Georgia, USA. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 83(1): 57-67.