

Efecto del riego complementario sobre las propiedades edáficas y el ambiente en el Sudoeste Bonaerense

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo.

Russell Hilario Poma Chamana

Ingeniero Agrónomo
Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - 2013

Lugar de trabajo: Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes - Facultad de Agronomía
(UBA)

COMITÉ CONSEJERO

Directora de tesis

Dra. Carina Rosa Álvarez

Co-directora de Tesis

Dra. Helena Rimski-Korsakov

Consejero de Estudios

M.Sc. Haydée Sara Steinbach.

JURADO DE TESIS

JURADO

Dr. Mario Guillermo Castiglioni

JURADO

Dra. Claudia Mabel Sainato

JURADO

Dr. Marcelo Germán Wilson

Fecha de defensa de la tesis: 16 de SEPTIEMBRE de 2024

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza en cada paso de este camino.

Mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y por siempre creer en mí.
Su aliento ha sido fundamental en cada momento de este proceso.

Mis amigos, por su apoyo, compañía, motivación y por estar a mi lado en los momentos más desafiantes.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se llevó a cabo gracias al apoyo de muchas personas e instituciones, por lo que deseo expresar mi más profundo agradecimiento a:

Carina Rosa Álvarez, Helena Rimski-Korsakov y Haydée Sara Steinbach por su apoyo incondicional y su guía a lo largo de este proceso. Su experiencia, paciencia y valiosos consejos me han permitido abordar este trabajo con confianza y claridad. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para lograr este objetivo; sin su orientación, este proyecto no habría sido posible.

Celio Chagas por su apoyo incondicional y su confianza al aceptarme en la maestría.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) del Perú quien hizo posible la realización de mi proceso formativo.

A la Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires por la invaluable riqueza de conocimientos brindados por su destacado cuerpo docente. Su excelente formación y dedicación han sido fundamentales para mi crecimiento académico y profesional.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Russell Hilario Poma Chamana

ÍNDICE

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I: Introducción general	1
1.1 El Riego Complementario.....	1
1.2 Objetivos:	8
1.3 Desarrollo de la Tesis.....	8
CAPÍTULO II: Efecto del riego complementario sobre las propiedades químicas del suelo y el carbono orgánico.....	9
2.1 Introducción	9
2.2 Materiales y métodos	12
2.2.1 Localización del área de trabajo.....	12
2.2.2 Muestreo y determinación de las propiedades químicas edáficas.....	15
2.2.3 Análisis químico del agua de riego.	16
2.2.4 Análisis estadístico.....	16
2.3 Resultados y discusiones.....	16
2.4 Conclusiones del capítulo	22
CAPÍTULO III: Efecto del riego complementario sobre las propiedades físicas del suelo	23
3.1 Introducción	23
3.2 Materiales y métodos	27
3.2.1 Localización del área de trabajo.....	27
3.2.2 Evaluación química del suelo	28
3.2.3 Evaluación física del suelo.....	28
3.2.4 Análisis del agua de riego.	29
3.2.5 Análisis estadístico.....	29
3.3 Resultados y discusiones.....	30
3.4 Conclusiones del capítulo	40
CAPÍTULO IV: El efecto del riego complementario sobre la emisión de óxido nitroso del suelo	41
4.1 Introducción	41
4.2 Materiales y métodos	44
4.2.1 Evaluación de emisión de óxido nitroso	45
4.2.2 Evaluación de la temperatura, concentración de nitratos y humedad	46

4.2.3 Análisis estadístico.....	47
4.3 Resultados y discusiones.....	47
4.4 Conclusiones del capítulo	56
CAPÍTULO V: Síntesis final	57
BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

<p>Tabla 1 Promedio, mínimo y máximo de pH, conductividad eléctrica (CE), relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CRS), cationes y bicarbonatos en muestras de agua de riego obtenidas en la región pampeana.....</p>	9
<p>Tabla 2 Valores promedio, mínimo y máximo de la caracterización del agua (n=14), correspondientes a los partidos de Coronel Suarez, Coronel Pringles y Tornquist.</p>	17
<p>Tabla 3 Valores promedio, mínimo y máximo de pH, conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y carbono orgánico (COS) del suelo para los tratamientos: Secano y Riego, en los estratos de suelo 0 – 10 cm (n=30) y 10 – 20 cm (n=30).....</p>	18
<p>Tabla 4 Clasificación de la calidad del agua para riego de acuerdo al problema potencial de infiltración según la FAO (Ayers y Westcot, 1985).....</p>	25
<p>Tabla 5 Valores Promedio, mínimo, máximo y error estándar (E.E.) de pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en muestras de suelo de los tratamientos: Secano y Riego, obtenidos a partir de los tres lotes evaluados. En las profundidades 0 a 10 cm y 10 a 20 cm</p>	30
<p>Tabla 6 Valores del análisis de muestras de agua de riego obtenidas de los pozos de los tres lotes evaluados.....</p>	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Precipitación media anual (mm) para el periodo 1947-1976 (izquierda) y 1977-2006 (derecha) (Forte Lay et al., 2008).	3
Figura 2 Anomalías de las precipitaciones medias anuales, variación respecto de la media (805 mm), en el Sudoeste Bonaerense (1960-2010) (Aliaga, 2020).	4
Figura 3	7
Efectos de la irrigación en el contenido de carbono orgánico del suelo y emisión de óxido nitroso (incremento ↑, disminución ↓) Tomado de Trost et al. (2013).	7
Figura 4	14
Ubicación de los partidos involucrados en la investigación de este capítulo (Coronel Suárez, Coronel Pringles, Laprida, Guamini y Tornquist). En gris claro se indica los partidos del Sudoeste Bonaerense y dentro de la misma en gris oscuro los partidos en estudio.	14
Figura 5 Ubicación de los tratamientos dentro de cada lote de estudio.	15
Figura 6 Ubicación del lugar de estudio (Coronel Pringles, provincia de Buenos Aires).	27
Figura 7 Medición de la tasa de infiltración con permeámetro de disco.	29
Figura 8 Densidad aparente para los tratamientos (Secano y Riego), (n=3).	32
Figura 9 Resistencia a la penetración (a) y humedad gravimétrica (b) para los tratamientos (Secano y Riego).	35
Figura 10 Densidad aparente versus resistencia a la penetración para los tratamientos (Secano y Riego).	37
Figura 11 Tasa de infiltración para los tratamientos (Secano y Riego).	38
Figura 12 Toma de muestra de óxido nitroso en lote bajo Secano (derecha) y bajo riego complementario (izquierda).	47
Figura 13 Flujos de N-N ₂ O en diferentes fechas de muestreo en diferentes condiciones.	48
Figura 14 Flujos de C-CO ₂ en diferentes fechas de muestreo en diferentes condiciones.	49
Figura 15 Temperatura del suelo a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada	50
Figura 16 Contenido de nitrato del suelo a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada	51

Figura 17 Espacio poroso lleno de agua del suelo (EPLLA) a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada51

Figura 18 Emisión acumulada de N-N₂O del suelo para el periodo de 59 días para cada tratamiento.52

RESUMEN

En las últimas décadas, la adopción del riego complementario ha tenido un aumento significativo en el Sudoeste Bonaerense. Si bien esta práctica brinda beneficios para el productor, también existe la posibilidad que genere problemas edáficos y ambientales debido al uso de aguas bicarbonatadas sódicas y al mayor tránsito de maquinaria en los lotes. Por ello, los objetivos de esta tesis fueron evaluar el efecto del riego complementario sobre: 1) las propiedades químicas y concentración de carbono orgánico del suelo, 2) la calidad física del suelo y 3) el impacto sobre las emisiones de óxido nitroso en lotes destinados a cultivos de producción de grano y de semillas, como maíz, trigo, cebada, sorgo y girasol. Para ello se contó con dos tratamientos: 1) “Riego”, que abarcó la parte regada por el pivote central y 2) “Secano”, que comprendió las esquinas (corners) de cada lote. La historia de riego de los lotes varió entre 2 a 20 años. El riego complementario tuvo efectos significativos en algunas propiedades evaluadas. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) presentó un marcado incremento variando de 1,73% a 4,10 % (0-10 cm) y de 1,94% a 4,49% (10-20 cm) para Secano y Riego, respectivamente. El pH y la conductividad eléctrica (CE) presentaron aumentos menores. Además, no se observaron efectos significativos sobre la concentración de carbono orgánico del suelo (COS). Por otro lado, el riego complementario no mostró efectos negativos sobre las propiedades físicas edáficas como densidad aparente, resistencia a la penetración y tasa de infiltración. Las emisiones de óxido nitroso en el cultivo de maíz tampoco difirieron significativamente entre ambos tratamientos. Este trabajo contribuye a la evaluación del impacto sobre el suelo y el ambiente del riego complementario. No obstante, cabe destacar que es necesario el monitoreo continuo para analizar la tendencia creciente del PSI y posible impacto negativo sobre las propiedades físicas del suelo y la productividad de estos sistemas.

Palabras clave: riego complementario, secano, propiedades físicas y químicas del suelo, emisión de óxido nitroso.

ABSTRACT

In the last decades, the adoption of complementary irrigation has had a significant increase in the Southwest of Buenos Aires province. Although this practice provides benefits for the farmer, there is also the possibility that it generates soil and environmental problems due to the use of sodium bicarbonate water and the increased traffic of machinery in the lots. Therefore, the objectives of the work were to determine the effect of complementary irrigation on the physical and chemical quality of the soil, as well as to evaluate its effect on the concentration of organic carbon in the soil and the emissions of nitrous oxide in lots devoted to crops of grain and seed production, such as corn, wheat, barley, sorghum and sunflower. There were two treatments: the "Irrigated" treatment, which included the part irrigated by the central pivot, and the "Rainfed" treatment, which included the corners of each lot. The irrigation history of the plots varied between 2 and 20 years. Supplementary irrigation had significant effects on some of the properties evaluated. The percentage of exchangeable sodium (PES) had a marked increase ranging from 1.73% to 4.10% (0-10 cm) and from 1.94% to 4.49% (10-20 cm) for Dry and Irrigated, respectively. In contrast, pH and electrical conductivity (EC) presented minor increases. In addition, no effects were observed on the concentration of soil organic carbon (SOC). On the other hand, complementary irrigation did not have negative effects on the soil physical properties (bulk density, resistance to penetration and infiltration rate) and the emission of nitrous oxide in the corn crop. This work contributes to the evaluation of the impact on the soil and the environment of complementary irrigation as a product of its adoption. However, it should be noted that long-term evaluations are needed to detect possible changes that may arise in the future.

Keywords: complementary irrigation, dry land, physical and chemical properties of the soil, nitrous oxide emission.

CAPÍTULO I: Introducción general

1.1 El Riego Complementario

En el mundo, alrededor del 77,7% del área cultivada es en secano (FAO, 2022). Del mismo modo, en Argentina alrededor de 93 % de superficie cultivada se realiza en secano (FAO, 2022). Bajo este sistema de producción el rendimiento de los cultivos, depende de la variabilidad de las precipitaciones. En las últimas décadas la variabilidad climática en el mundo se ha acentuado. Por ejemplo, la frecuencia como la intensidad de las lluvias son cada vez más variables en el tiempo y espacio y consecuentemente ponen en riesgo la seguridad alimentaria (FAO, 2018). Además, el continuo crecimiento poblacional mundial demanda, no solo mayores cantidades de alimentos, sino también alimentos de calidad (FAO, 2017). Por lo tanto, para hacer frente a esta demanda y al riesgo productivo causado por las limitaciones hídricas en cultivos de secano, el riego complementario se presenta como una buena alternativa (Oweis y Hachum, 2012). Además, esta práctica tiene un buen potencial para ser implementada en muchas regiones del mundo.

El riego complementario puede ser definido como el agua que se adiciona en los cultivos en secano cuando las lluvias no son suficientes para cubrir los requerimientos hídricos en los momentos críticos para su normal crecimiento; todo ello con el fin de incrementar y estabilizar los rendimientos (Oweis y Hachum, 2012) y asegurar la calidad de los productos (FAO, 2015). El uso adecuado del riego mejora la eficiencia de uso y la productividad del agua (Oweis y Hachum, 2012; Zhang et al., 2019). En cuanto al manejo, esta tecnología facilita la programación de siembras tempranas sin necesidad de esperar el inicio de la estación de lluvias y también permite aplicar fertilizantes solubles a través del sistema de riego (Oweis y Hachum, 2012). Por lo mencionado anteriormente, se

deduce que el riego complementario permite incrementar los rendimientos y estabilizarlos, reduciendo el riesgo productivo y económico.

En la provincia de Buenos Aires el riego complementario tuvo incrementos importantes en las últimas décadas. Así, el porcentaje de crecimiento de la superficie irrigada bajo este sistema de riego fue de 2460 % entre los años 1995 - 2000, de 125 % entre los años 2000 - 2005, de 332 % entre los años 2005 - 2010, de 280 % entre los años 2010 - 2015 y para el año 2020 descendió en 3% con respecto al 2015. La superficie alcanzada en el 2015 fue de 147197,36 ha mientras en el 2020 disminuyó a 142734 ha (Barrionuevo et al., 2023). En el Sudoeste Bonaerense, lugar donde se desarrolló la investigación, el riego complementario se ha quintuplicado entre los años 2006 – 2023. Así, en la campaña 2006/2007 se contabilizaron 9543 ha, en la campaña 2013/2014 aumentó a 26936 ha y finalmente en la campaña 2022/2023 alcanzó las 54009 ha. La mayor superficie regada en esta región se concentra en los partidos de Coronel Suárez y Coronel Pringles (Marini, 2023). La adopción de esta tecnología en el Sudoeste Bonaerense, además del incremento y estabilización de los rendimientos, se sustenta en la variabilidad de la precipitación, tanto temporal como espacial. A pesar de que en el periodo 1977-2006 la precipitación media anual había aumentado en 100 mm con respecto al periodo 1947-1976 (Figura 1), la pluviometría fue fluctuante (Forte Lay et al., 2008). Por ejemplo, para esta región durante el periodo 1960 - 2010 las precipitaciones fueron variables respecto a la media anual (805 mm; Figura 2) (Aliaga, 2020). Por consiguiente, se puede observar que en el 52 % de los años del periodo 1960 – 2010 las precipitaciones estuvieron por debajo de la media anual, con marcadas anomalías negativas (sequías) en los años 1962, 1988, 1995, 2005, 2008 y 2009.

El sistema de riego utilizado en esta región del país es generalmente de pivote central, el cual tiene un desplazamiento circular anclado a un extremo fijo. Por esta razón,

en lotes rectangulares quedan zonas sin regar denominadas córneres (esquinas). Este sistema de riego requiere suministro de energía para movilizar tanto el agua del subsuelo como a las estructuras de acero. Por consiguiente, la adopción del sistema de riego tiene un alto costo y debe ser utilizado en situaciones especiales (Marinissen, 2008). En la Región Pampeana generalmente se concentra en la producción de semillas debido a su alta rentabilidad (Torres Duggan et al., 2017).

El riego se ajusta según la evapotranspiración del cultivo, de modo que en épocas húmedas se realiza con menor frecuencia que en temporadas secas. En esta región, la cantidad promedio de riego aplicada es de aproximadamente 200 mm por año⁻¹.

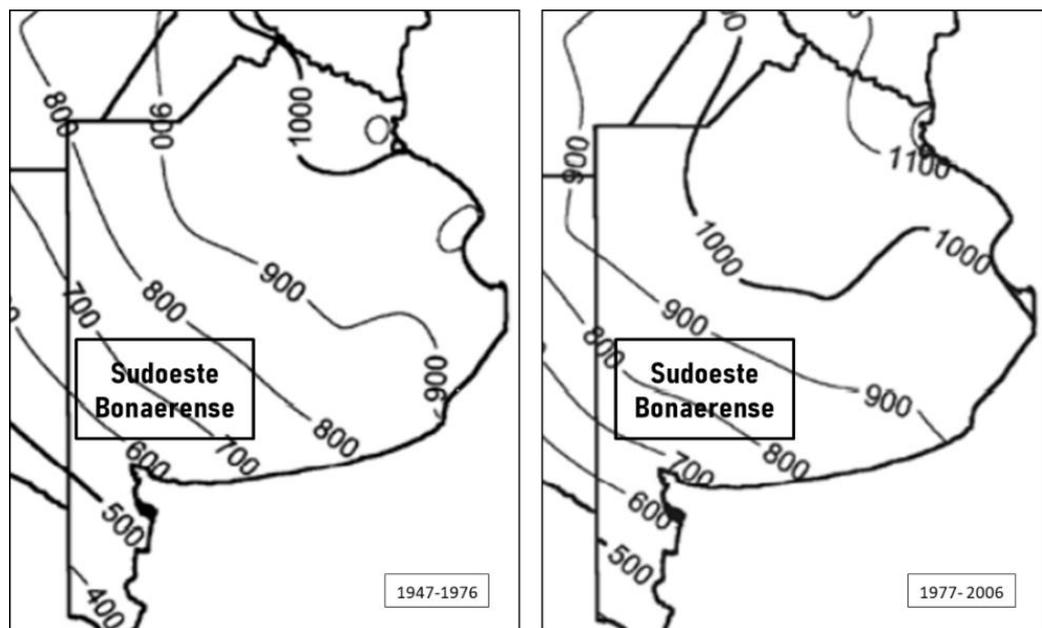


Figura 1

Precipitación media anual (mm) para el periodo 1947-1976 (izquierda) y 1977-2006 (derecha) (Forte Lay et al., 2008).

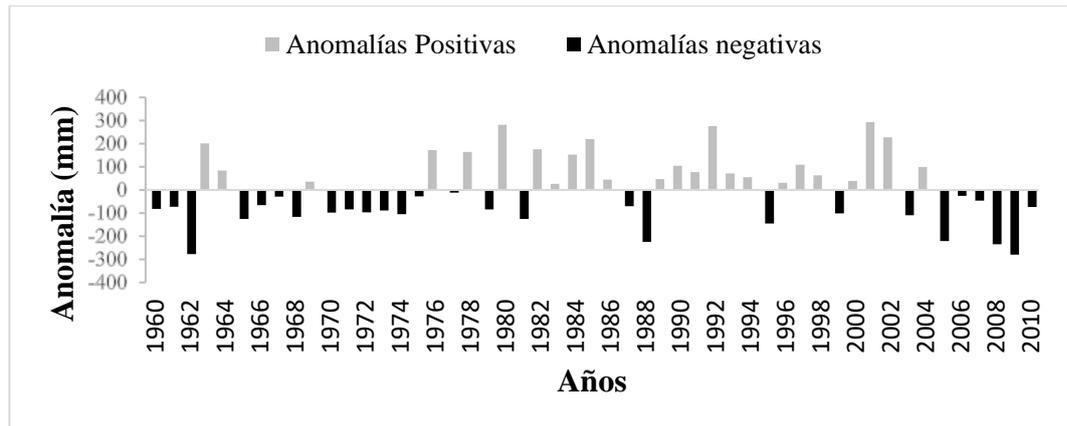


Figura 2

Anomalías de las precipitaciones medias anuales, variación respecto de la media (805 mm), en el Sudoeste Bonaerense (1960-2010) (Aliaga, 2020).

Si bien es cierto que el riego complementario trae beneficios productivos, económicos y sociales, existen riesgos asociados a posibles efectos negativos sobre las propiedades físico-químicas del suelo y el ambiente.

El riego complementario puede afectar las propiedades químicas y físicas del suelo. Estos efectos negativos principalmente están asociados a la calidad y al manejo del agua de riego. Por consiguiente, conocer la calidad del agua nos permitirá diagnosticar el riesgo de salinización o sodificación del suelo. El sistema de clasificación de aptitud del agua debe ser específica para cada región de acuerdo con sus condiciones climáticas y edáficas (Torres Duggan et al., 2017). El Sudoeste Bonaerense está conformado por distintos ambientes hidrogeológicos, los cuales pueden hacer variar la calidad del agua de los acuíferos. El ambiente hidrogeológico dominante en esta región es el Interserrano-pedemontano (Auge, 2004) y, es en este dónde se concentra la mayor cantidad de pozos para el riego complementario. Las aguas de riego de algunos partidos de esta región (Coronel Suárez, Coronel Pringles, Adolfo Alsina, Coronel Dorrego, Guamini y Tornquist) provienen del acuífero Pampeano, las cuales se encuentran en un rango de 3 – 12 de relación de adsorción de sodio (RAS) (Sánchez et al., 2016). Con estos valores de

RAS y una baja conductividad eléctrica del agua pueden afectar la tasa de infiltración ligera o severamente (Ayers y Westcot, 1985). Según muchos estudios el uso de aguas de dudosa o riesgosa aptitud pueden afectar las propiedades edáficas del suelo. Por ejemplo, algunas propiedades químicas como la conductividad eléctrica (CE), pH y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) pueden incrementarse como resultado del uso de estas aguas (Alvarez et al., 2020a). El incremento de PSI puede repercutir en las propiedades físicas del suelo, tal como la degradación estructural del mismo. Esto último, puede ser reflejado principalmente en el encostramiento superficial, la disminución de la infiltración, incremento de la densidad aparente y un aumento de la resistencia a la penetración del suelo (Costa y Aparicio, 2015; Sánchez et al., 2016; Torres Duggan et al., 2017). Estos posibles efectos negativos en las propiedades del suelo como consecuencia del incremento de sodio en el suelo pueden afectar el normal crecimiento y rendimiento de los cultivos en el largo plazo (Qadir y Schubert, 2002; Torres Duggan et al., 2017).

En segundo lugar, el riego complementario puede afectar el contenido de carbono orgánico del suelo y las emisiones de óxido nitroso tal como se esquematiza en la Figura 3. El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) es el resultado del balance entre el carbono orgánico incorporado al suelo (rastros y raíces) y las salidas de carbono orgánico asociados a la respiración heterotrófica (descomposición y mineralización). El principal factor que regula la producción de biomasa en cultivos de secano es la lluvia (Alvarez et al., 2015), así, la producción de biomasa es mayor en años húmedos que en años secos. Por consiguiente, en lugares donde se adopta el riego complementario, la cantidad de residuos vegetales que se incorporan al suelo tendería a incrementarse. Sin embargo, el contenido de COS no necesariamente aumenta, debido a que hay muchos factores que regulan la descomposición de residuos y mineralización de materia orgánica

recalcitrante. Según Trost et al. (2013) en regiones irrigadas la concentración de COS depende fuertemente de las condiciones climáticas y el contenido inicial de COS.

La emisión de óxido nitroso (N_2O) al ambiente es resultado de la nitrificación y desnitrificación (Linn y Doran, 1984). En suelos irrigados la emisión de N_2O se incrementa cuando hay formas de nitrógeno disponible en el suelo (Trost et al., 2013). Asimismo, en cultivos fertilizados con nitrógeno, la magnitud de emisión de este gas puede variar de acuerdo a la forma de aplicación, la cantidad y al tipo de fertilizante usado (Ghimire et al., 2020). Por consiguiente, en suelos irrigados el balance de COS y la emisión de N_2O serán afectados por factores ambientales y medidas de manejo que interactúan con el riego (Trost et al., 2013).

El CO_2 y N_2O liberados al ambiente son gases de efecto invernadero que contribuyen con el calentamiento global y pueden desatar cambios en los patrones climáticos (Saini y Bhatt, 2020). Por lo tanto, su estudio es de mucha importancia para hacer un manejo sustentable en campos de cultivo bajo riego complementario.

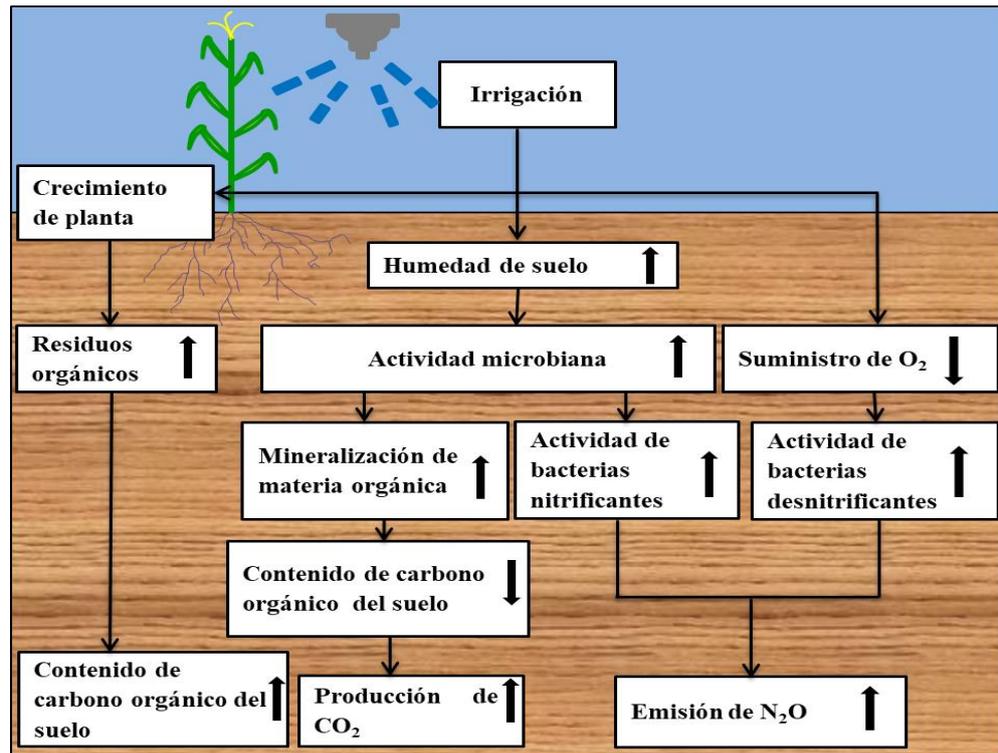


Figura 3

Efectos de la irrigación en el contenido de carbono orgánico del suelo y emisión de óxido nitroso (incremento ↑, disminución ↓) Tomado de Trost et al. (2013).

A partir de lo desarrollado anteriormente, surgieron los siguientes interrogantes relacionados con el impacto de sistemas agrícolas extensivos bajo riego complementario sustentable en el Sudoeste Bonaerense:

1) ¿Cuál es el efecto del riego complementario sobre la calidad física y química de los suelos de la región? y 2) ¿Cuál es el efecto ambiental del riego complementario en sistemas que integran la producción de semillas evaluado a través de la concentración de carbono orgánico del suelo y las emisiones de óxido nitroso?

1.2 Objetivos:

Determinar el efecto del riego complementario sobre la calidad física y química del suelo en lotes que integran cultivos de producción de grano y de producción de semillas.

Cuantificar el efecto ambiental del riego complementario en situaciones que integran cultivos de producción de grano y producción de semillas a partir de la evaluación de la concentración de carbono orgánico del suelo y las emisiones de óxido nitroso.

1.3 Desarrollo de la Tesis

La tesis abarca tres ejes: 1) el efecto del riego complementario sobre las propiedades químicas del suelo y el carbono orgánico (capítulo II), 2) el efecto del riego complementario sobre las propiedades físicas del suelo (capítulo III) y 3) el efecto del riego complementario sobre la emisión de óxido nitroso (capítulo IV).

CAPÍTULO II: Efecto del riego complementario sobre las propiedades químicas del suelo y el carbono orgánico

2.1 Introducción

En la Región Pampeana el riego complementario hace uso de aguas subterráneas. Estas no suelen presentar problemas de salinidad (CE), pero sí, en algunos casos, elevados valores de la relación de adsorción de sodio (RAS), contenido de bicarbonatos y contenido de carbonato de sodio residual (CSR) (Tabla 1) (Álvarez et al., 2020a). En este contexto, estas aguas de riego de la región pampeana pueden causar incrementos del PSI del suelo.

Tabla 1

Promedio, mínimo y máximo de pH, conductividad eléctrica (CE), relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CRS), cationes y bicarbonatos en muestras de agua de riego obtenidas en la región pampeana

	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	7,84 (n= 783)	6,5 (n= 1323)	9 (n=1323)
CE (dS m ⁻¹)	1,25 (n= 1163)	0,15 (n= 1703)	4,7 (n=1703)
RAS	12 (n= 1163)	0,38 (n= 1703)	57,7 (n=1703)
CRS	7,11 (n= 597)	-0,2 (n= 1137)	36,5 (n=1137)
Na⁺ (mmolc L ⁻¹)	12,41 (n= 456)	1 (n= 996)	68 (n=996)
Ca⁺² (mmolc L ⁻¹)	1,14 (n= 456)	0,1 (n= 996)	9,7 (n= 996)
Mg⁺² (mmolc L ⁻¹)	0,9 (n= 456)	0 (n= 996)	22,4 (n= 996)
HCO₃⁻ (mmolc L ⁻¹)	8,81 (n= 455)	1 (n= 995)	24 (n= 995)

Nota. n = número de muestras consideradas. Fuente: Álvarez et al. (2020a).

Según los antecedentes, la sodicidad es una problemática frecuente en sistemas de producción bajo riego complementario de zonas húmedas y sub-húmedas, donde los niveles de salinidad del suelo se mantienen bajos debido a la lixiviación generada por las lluvias (Sumner, 1993; Sainato et al., 2006). Los cambios desfavorables sobre la dinámica hídrica que produce la sodicidad en las zonas mencionadas, no ocurren con los mismos valores que la USSL Staff (1954) indica (CE < 4 dSm⁻¹ y de PSI >15 %), sino con PSI

menores al umbral mencionado (Sumner, 1993; Ghiberto et al., 2007; Costa y Aparicio, 2015). Esto se explica por un efecto conjunto del sodio en el complejo de cambio y las sales en solución. Las sales en solución tienen un efecto floculante en los suelos sódicos. Por esa razón, pueden existir suelos con bajos PSI que presentan problemas en su dinámica del agua por estar sus coloides pobremente floculados por la baja concentración de sales en solución (Mon et al., 2007).

En la región pampeana existen investigaciones sobre riego complementario. Peralta et al. (2019) y Torres Duggan et al. (2012) observaron que el riego complementario incrementa el pH del suelo. Así mismo, Costa y Aparicio (2015), Giubergia (2013) y Torres Duggan et al. (2012) señalan que el PSI del suelo se incrementa como consecuencia del riego complementario. Del mismo modo, Giubergia (2013) observó que la CE del suelo se incrementa en condiciones de riego. Sin embargo, Torres Duggan et al. (2012) y Ghiberto et al. (2007) mostraron que el riego complementario no afecta la CE del suelo. Por otra parte, Costa y Aparicio (2015) mencionan haber encontrado incrementos de la CE del suelo en algunas de las localidades donde la CE del agua era elevada.

La estabilidad y/o el incremento de algunas de estas propiedades (pH, CE y PSI) del suelo de acuerdo con los investigadores mencionados en los dos párrafos anteriores dependen principalmente de la aptitud del agua de riego. Cabe mencionar que en los casos donde la CE y el pH del suelo fueron incrementados, estos aumentos fueron ligeros, no alcanzando umbrales críticos para ser considerados perjudiciales para el normal crecimiento de las plantas. No obstante, los incrementos del PSI del suelo en la mayoría de los casos duplican al valor del tratamiento seco (testigo). Por ejemplo, Álvarez et al. (2020a) en una síntesis de 10 trabajos realizados en la Región Pampeana encontraron que

el pH incrementó de 6,17 a 6,76, la CE incrementó de 0,37 a 0,50 dS m⁻¹ y el PSI aumentó de 1,98 a 5,34%.

Otra propiedad del suelo que puede ser afectado por el riego complementario es la concentración de carbono orgánico del suelo (COS). El suelo es considerado como sumidero de carbono con potencialidad de amortiguar el efecto invernadero. A escala mundial se estima que el carbono de los suelos es de 2500 gigatons (Gt) de los cuales 1550 Gt representa el carbono orgánico y 950 Gt el carbono inorgánico. A la vez, el pool de carbono del suelo es 3,3 veces el pool atmosférico (760 Gt) (Lal, 2004). El secuestro de carbono implica transferir CO₂ atmosférico a pooles estables como el carbono orgánico e inorgánico del suelo. El contenido de COS en un agrosistema es el resultado del balance entre el carbono incorporado al suelo (rastreros y raíces) y las salidas de carbono asociados a la respiración heterotrófica (descomposición y mineralización) (Alvarez et al., 2015). Temperatura, humedad y textura del suelo, son los principales factores que afectan el contenido de COS, incrementándose con la disminución de la temperatura, el aumento de la humedad y en suelos de textura fina (Brady y Weil, 2017). De los factores mencionados la humedad del suelo puede ser modificada por el hombre a través del riego.

El riego tiende a producir mayores cantidades de biomasa con la potencialidad de incrementar los niveles del COS (Gillabel et al. 2007; Deneff et al., 2008; Lal, 2008). Por otra parte, el riego puede actuar sobre las emisiones de COS al estimular la actividad microbiana y, por lo tanto, la mineralización del COS se incrementaría resultando en una disminución de éste (Mermut et al., 2000; Calderon y Jackson, 2002; De Bona et al., 2006). Además, si las aguas de riego son bicarbonatadas sódicas, pueden sodificar el suelo. Los efectos que ocasionan los suelos sódicos pueden influir negativamente sobre la producción de biomasa de los cultivos (Qadir y Schubert, 2002), redundando en un menor ingreso y a la larga en una menor retención de COS.

El riego complementario tiende a incrementar el contenido de COS, aunque no siempre es estadísticamente significativo y según Trost et al. (2013) el COS en regiones irrigadas varía de acuerdo con el clima y al contenido inicial de COS. En tal sentido los autores indican que, en regiones semiáridas con bajos contenidos de COS inicial, el riego aumenta el COS en un promedio de 17,6% con respecto a los de secano. Por otra parte, en regiones húmedas con alto contenido de COS inicial, el riego no tiene efectos consistentes, solo incrementa en promedio de 2% de COS con respecto a los de secano.

En general las tendencias al incremento de los valores de COS son atribuidas a la mayor entrada de carbono con respecto a la salida (mineralización).

Objetivo

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del riego complementario sobre el pH, la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la concentración de carbono orgánico del suelo en lotes agrícolas bajo sistemas de producción que combinan la producción de granos y semillas en el Sudoeste Bonaerense.

Hipótesis

El riego complementario en el Sudoeste Bonaerense con aguas de dudosa o riesgosa aptitud produce un aumento marcado del PSI del suelo, mientras que la CE y el pH del suelo aumentan muy ligeramente.

El riego complementario producirá un incremento del carbono orgánico del suelo en el estrato de 0-20 cm de profundidad.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Localización del área de trabajo

Se trabajó en los partidos de Coronel Suárez, Coronel Pringles, Laprida, Guamini y Tornquist ubicados en el Sudoeste Bonaerense (Figura 4). La zona de estudio se

caracteriza por tener niveles pluviométricos promedios históricos anuales de 805 mm año^{-1} (Aliaga, 2020). En los primeros 20 cm del perfil, las texturas predominantes del suelo son franco-arenosas, francas y franco-arcillosas. Los principales cultivos que integran la rotación son soja, maíz, girasol, trigo y cebada. El maíz y el girasol pueden ser para producción de semillas. Estos cultivos son de bajo porte y baja producción de biomasa.

Se contó con dos tratamientos (Riego y Secano) con 30 repeticiones o lotes. El tratamiento Riego estuvo conformado por los círculos de riego mientras el tratamiento Secano estuvo representado por los respectivos córneres de cada lote como se presenta en la Figura 5.

En el tratamiento Riego, las áreas integran producción de semillas y granos. Los cultivos que integran producción de semillas son el maíz y el girasol, los cuales son de bajo porte y, por consiguiente, producen menor biomasa que los cultivos de grano. La historia de riego de los lotes estudiados fue de 2 a 20 años, dependiendo el establecimiento. El sistema de riego utilizado fue por pivote central y la lámina de riego promedio aplicada fue de 200 mm año^{-1} . Con respecto al tratamiento Secano, las áreas sembradas no tienen en su rotación cultivos para producción de semillas, esto porque para mantener la producción que garantice la calidad y rendimiento deseado por los semilleristas, las plantas no deberían sufrir estrés hídrico.

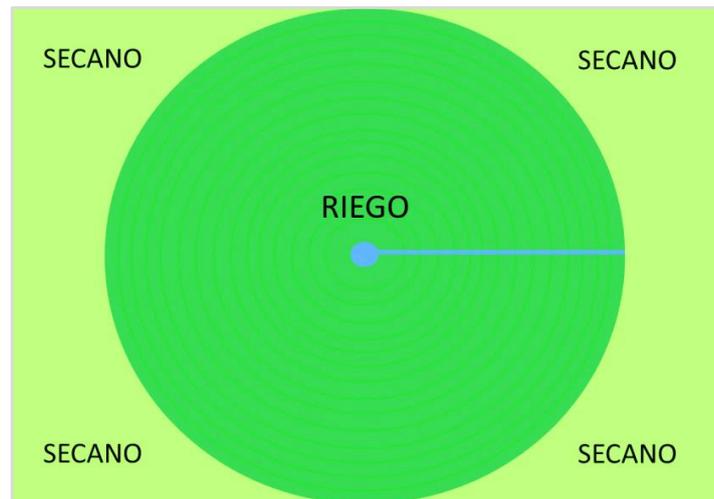


Figura 5

Ubicación de los tratamientos dentro de cada lote de estudio.

2.2.2 Muestreo y determinación de las propiedades químicas edáficas

Las evaluaciones fueron realizadas durante dos años (2016 y 2018) en distintos lotes ubicados en el Sudoeste Bonaerense (Figura 4) que corresponden a productores que integran el grupo de riego del Sudoeste Bonaerense. En cada lote en la situación de Secano y Riego se tomaron muestras de suelo en dos profundidades: de 0-10 y de 10-20 cm. La muestra estaba compuesta de 15 a 20 submuestras tomadas en la zona regada y otra de su respectivo córner, correspondiendo a los tratamientos Riego y Secano, respectivamente. En dichas muestras se analizó pH (potenciometría, relación suelo/agua: 1:2,5, Peech, 1965), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (extracción de cationes: Ca, Mg, K y Na con acetato de amonio 1N y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica) determinada con la formula $(Na/CIC)*100$, conductividad eléctrica (CE, en pasta saturada), capacidad de intercambio catiónico (CIC, acetato de amonio 1N, pH 7), carbono orgánico (CO) (Walkley y Black), y textura (arcilla, arena y limo; método Bouyoucos, Ashworth et al. 2001).

2.2.3 Análisis químico del agua de riego.

Por otro lado, se caracterizó el agua de riego en algunas de las situaciones analizadas (14 pozos) ubicados en los partidos de Coronel Suarez, Coronel Pringles y Tornquist. Estos partidos en su mayoría abarcan el ambiente hidrogeológico interserrano-pedemontano. En ellos se determinó pH, CE, relación de adsorción de sodio (RAS), sales solubles, carbonato de sodio residual (CSR), cationes: potasio, calcio, magnesio y sodio (absorción atómica), carbonato y bicarbonato (titulación), cloruro (titulación), sulfato (turbidimetría) y dureza total.

2.2.4 Análisis estadístico.

Los valores hallados de pH, CE, PSI y COS en cada uno de los tratamientos (Secano y Riego) se compararon estadísticamente utilizando el test de t apareada. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat (Di Rienzo et al. 2018).

2.3 Resultados y discusiones

En la Tabla 2 se presenta los resultados del análisis de caracterización del agua de riego de algunas situaciones analizadas. De acuerdo a INTA (1999) el riesgo de salinización es bajo. Y en cuanto, a la sodicidad, no tiene restricción de uso (Richards, 1954). Sin embargo, están clasificadas como aguas bicarbonatadas sódicas según el diagrama de Piper (Piper, 1944). Por otra parte, Ayers y Westcot (1976) al clasificar el agua de riego de acuerdo al RAS ajustado mostraron que con valores mayores de 6 de RAS ajustado y valores menores de 0,5 de CE del agua pueden aumentar los riesgos de sodificación del suelo y por ende riesgo de reducir la permeabilidad.

Tabla 2

Valores promedio, mínimo y máximo de la caracterización del agua (n=14), correspondientes a los partidos de Coronel Suarez, Coronel Pringles y Tornquist.

Variables	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	7,8	6,8	8,5
CE (dS m ⁻¹)	0,8	0,6	1,0
Sales solubles (g L ⁻¹)	0,5	0,4	0,8
Carbonato (mg L ⁻¹)	11,4	0,0	42,0
Bicarbonato (mg L ⁻¹)	413,0	297,7	549,0
Cloruro (mg L ⁻¹)	36,8	19,9	65,3
Sulfato (mg L ⁻¹)	19,8	0,0	108,0
Calcio (mg L ⁻¹)	30,5	8,4	67,2
Magnesio (mg L ⁻¹)	14,3	5,5	33,1
Sodio (mg L ⁻¹)	133,5	52,9	216,9
Potasio (mg L ⁻¹)	8,2	4,3	16,6
RAS	6,0	1,7	13,9
CSR (meq L ⁻¹)	4,4	1,1	7,8
Dureza total (ppm CaCO ₃)	135,4	44,3	302,0

El riego complementario incrementó significativamente el pH, la CE y el PSI del suelo en ambos estratos evaluados ($p < 0,05$) con respecto al tratamiento Secano (Tabla 3). El incremento del pH fue de 7% y 6% para 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente. La CE del suelo en ambos estratos tuvo un incremento aproximado de 28% por efecto del riego. En cuanto al PSI, el incremento en el primer estrato fue de 137% y en el segundo el incremento fue de 131%. Por otro lado, el riego complementario no tuvo efecto sobre la concentración de COS en ninguno de los estratos evaluados ($p > 0,05$).

Tabla 3

Valores promedio, mínimo y máximo de pH, conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y carbono orgánico (COS) del suelo para los tratamientos: Secano y Riego, en los estratos de suelo 0 – 10 cm (n=30) y 10 – 20 cm (n=30).

	pH		CE (dS m ⁻¹)		PSI (%)		COS (%)	
	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
0-10 (cm)								
Promedio	6,40b	6,87a	0,32b	0,41a	1,73b	4,10a	2,36a	2,40a
Mínimo	5,70	6,10	0,21	0,23	0,18	0,50	1,40	1,80
Máximo	7,80	8,10	0,80	0,80	7,60	8,80	3,84	3,60
10-20 cm								
Promedio	6,63b	7,01a	0,31b	0,40a	1,94b	4,49a	1,81a	1,78a
Mínimo	6,00	6,10	0,17	0,20	0,30	0,40	1,05	1,31
Máximo	8,10	8,30	0,90	0,90	7,10	13,00	3,43	2,44

Nota. Letras diferentes representan diferencia estadística ($p < 0,05$) para cada propiedad entre tratamientos dentro de cada profundidad.

El riego complementario incrementó el pH del suelo. Sin embargo, estos incrementos son ligeros y no son críticos para el crecimiento de la mayoría los cultivos (Smith y Doran, 1997). Estos resultados están en acuerdo con los hallados por Peralta et al. (2019) en el norte de la provincia de Buenos Aires y por Torres Duggan et al. (2012) en la Pampa Ondulada. Según lo referido anteriormente y a estos resultados, se podría decir que los incrementos ligeros del pH del suelo están ligados a la aptitud del agua de riego utilizada (Brady, 1984; Qadir y Schubert, 2002), donde los carbonatos y bicarbonatos pueden reaccionar con el agua y formar iones oxidrilo (OH⁻), que consecuentemente elevan el pH del suelo (Brady y Weil, 2014).

El riego complementario, también, incrementó la CE del suelo en ambos estratos del suelo. Los valores alcanzados en la situación de Riego (Tabla 3) están por debajo de los niveles perjudiciales para el crecimiento de la mayoría los cultivos (Smith y Doran, 1997). El incremento de la CE del suelo sería el resultado de cierta acumulación de sales solubles en los estratos evaluados (0-10 y 10-20 cm) no lixiviadas por el agua de lluvia a horizontes más profundos. Los resultados encontrados concuerdan con los trabajos de

Giubergia (2013) en el centro de la provincia de Córdoba (región semiárida) y con el estudio de Iseas et al. (2024) en Suipacha, provincia de Buenos Aires (región húmeda). Concuerda parcialmente con el trabajo de Costa y Aparicio (2015) en el Sudeste Bonaerense (región húmeda), quienes señalan haber encontrado incrementos con diferencia estadística solo en 2 de las 6 localidades evaluadas. Giubergia (2013) los resultados lo atribuyeron a la calidad del agua de riego y a la insuficiencia de las lluvias para lixiviar las sales. En Costa y Aparicio (2015) lo relacionaron con el agua de riego de elevada CE. Por otra parte, las otras 4 localidades evaluadas en el mencionado trabajo y otros estudios, tales como el trabajo de Torres Duggan et al. (2012) en la Pampa Ondulada (Sur de Santa Fe) y Mon et al. (2007) en la Pampa Ondulada (norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sur de Córdoba) discrepan con los resultados de esta tesis y señalan que, si bien hay ligeros incrementos de la CE del suelo, estos no son estadísticamente significativos. Los resultados de los autores anteriormente mencionados pueden ser atribuidos a las mayores precipitaciones medias anuales en estas subregiones pampeanas que producen una mayor lixiviación de las sales adicionadas con el agua del riego.

En tal sentido, algo que se puede destacar es que los resultados del presente trabajo en las situaciones de riego están dentro del rango de CE encontrados por los autores mencionados anteriormente (0,20 - 0,90 dS m⁻¹). Por otra parte, dado que las sales tienen un efecto floculante, las bajas CE encontradas pueden favorecer el comportamiento dispersante del sodio (Mon et al., 2007). Por consiguiente, pueden causar problemas en las propiedades físicas y podrían reflejarse en el rendimiento de los cultivos.

El PSI del suelo del tratamiento Riego presentó un considerable aumento, duplicando el valor respecto de la situación de Secano (Tabla 3). Esto muestra una acumulación de sodio intercambiable en el suelo, lo que significa que la aptitud del agua de riego está estrechamente relacionada con el aumento del PSI del suelo. Sobre todo,

cuando el agua de riego tiene baja salinidad y elevado RAS; además, las altas concentraciones de bicarbonatos y carbonatos en el agua pueden reducir las concentraciones de calcio y magnesio precipitándolos a carbonatos insolubles, de esta manera, aumentaría el PSI o RAS del suelo (Weil y Brady, 2017). Los resultados del presente estudio coinciden con Costa y Aparicio (2015) en el Sudeste Bonaerense, Giubergia (2013) en el centro de Córdoba, Torres Duggan et al. (2012) e Iseas et al. (2024) en la Pampa Ondulada. Estos autores encontraron resultados similares, inclusive algunos de ellos encontraron incrementos de PSI más elevados cuando la RAS del agua fue elevado. Sin embargo, esos niveles de PSI no fueron tan elevados como en zonas áridas. Aparentemente los bajos niveles de PSI del suelo no causarían degradación física, pero algunas evidencias muestran que para valores de 4,5 % de PSI y valores de CE menores de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ pueden causar dispersión del suelo (Ghiberto et al., 2007). Por consiguiente, en el caso de esta tesis (PSI alrededor del 4% y la CE alrededor de $0,39 \text{ dS m}^{-1}$) podrían ser suficientes para deteriorar algunas propiedades físicas del suelo. Este tema será abordado en el próximo capítulo.

En los anteriores párrafos se expone que el riego complementario incrementó el pH, la CE y el PSI del suelo. Sin embargo, no tuvo efecto sobre la concentración de COS ($p > 0,05$; Tabla 3). Este comportamiento es posiblemente debido a que los tratamientos bajo riego integran producción de granos y producción de semillas (generalmente semillas de maíz o girasol). Según Bollón (2015) la biomasa de estas líneas endocriadas de maíz tienen menor biomasa que los híbridos que generaran (por lo general la proporción de años de producción de semilla sobre la producción de granos es de 2:1). Por lo tanto, en los años en el que las áreas bajo riego son destinadas a producción de semilla de maíz, el aporte de biomasa al suelo será inferior comparados con otros en los que se producen solo grano. Además, la humedad que proporciona el riego no solo,

aumentaría el rendimiento de cultivo de grano sino también estaría aumentando la mineralización de COS (Giubergia, 2013; Deneff et al., 2008). Los resultados de la concentración de COS son similares a los de Giubergia (2013) en el centro Córdoba, quien tampoco encontró diferencias estadísticas significativas ($P > 0,05$).

De manera general también este trabajo podría ser respaldado por Torres Duggan et al. (2012) en el sur de Santa Fe, y Baridón y Pellegrini (2020) en el centro oeste de Formosa, quienes tampoco encontraron resultados estadísticamente significativos, pero ellos a diferencia de este trabajo, el análisis estadístico lo hacen sobre el contenido de COS expresado en $t\ ha^{-1}$ y no sobre la concentración como es en este estudio. Por otra parte, los resultados encontrados por Gillabel et al. (2007) en el suroeste de Nebraska – USA y Campos et al. (2020) en el oeste de Bahía – Brasil discrepan con los resultados de este trabajo, al encontrar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Los incrementos que ellos observaron fueron explicados por dos motivos distintos. En el primer caso, el experimento fue realizado en una zona semiárida (precipitación promedio anual 570 mm) donde en lotes bajo riego la incorporación de carbono al suelo es 2,5 veces más que en seco. En el segundo caso, el experimento fue realizado en una zona tropical semiárida, donde se realizaron dos cultivos al año en lotes bajo riego (doble incorporación de biomasa).

Los resultados obtenidos en este capítulo son importantes porque servirán como antecedentes para futuras investigaciones en el Sudoeste Bonaerense, así mismo, nos proporcionan información valiosa para indicar planificaciones de manejo sustentable del suelo bajo riego complementario en el Sudoeste Bonaerense. Sin embargo, sería de interés evaluar las propiedades químicas a mayores profundidades del suelo para ver si hay

acumulación subsuperficial de sales y para ver el comportamiento del COS en estratos más profundos.

2.4 Conclusiones del capítulo

El riego complementario tuvo un efecto sobre el pH, la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) del suelo. Sin embargo, no tuvo efecto sobre la concentración de carbono orgánico del suelo (COS). Las propiedades químicas tales como, el pH, CE y PSI resultaron tal como fue hipotetizado mientras la hipótesis propuesta para el COS fue rechazada. El riego complementario incrementó el PSI del suelo notablemente, no obstante, los incrementos de pH y CE del suelo fueron ligeros.

CAPÍTULO III: Efecto del riego complementario sobre las propiedades físicas del suelo

3.1 Introducción

El riego complementario puede afectar las propiedades físicas del suelo cuando la calidad de agua no es la adecuada. En la región Pampeana las aguas que se utilizan para riego complementario se caracterizan por ser bicarbonatadas sódicas con moderada a baja salinidad (Alvarez et al. 2020a). En estos casos el riego puede favorecer la acumulación del Na^+ , incrementando los valores de PSI y del RAS del suelo, a expensas de los cationes divalentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} en los sitios de adsorción de las partículas del suelo. En situaciones de excesos hídricos y bajo contenido salino el ion sodio en el complejo de intercambio contribuye a la expansión y dispersión de las arcillas afectando negativamente la continuidad del sistema poroso del suelo. Bajo estas condiciones, los suelos son más susceptibles a la compactación, evidenciándose en incrementos en la densidad aparente, la resistencia mecánica y consecuentemente la disminución de la infiltración y la conductividad hidráulica del suelo (Costa y Aparicio, 2015; Sánchez et al., 2016).

Por otra parte, los lotes bajo riego complementario que, por lo general, están destinados a la producción de semillas involucran una mayor cantidad de labores agrícolas. Por consiguiente, en estos lotes el tránsito de maquinaria es mayor que en cultivos bajo secano. Además, el tránsito de maquinaria puede coincidir con momentos en que los suelos presentan menor capacidad portante, que en consecuencia estarían también contribuyendo con la compactación de dichos suelos (Torres Duggan et al., 2017; Alvarez et al., 2020b).

Una de las propiedades del suelo que es afectada como consecuencia del riego complementario y todo lo que involucra la adopción de esta práctica es la densidad

aparente. En la región central de Córdoba, Giubergia (2013) en su trabajo encontró que en los lotes bajo riego complementario la densidad aparente se incrementó en todos los estratos evaluados (0-6, 6-12 y 12-18 cm) en 5,83; 5,19 y 4,44 % respectivamente. El incremento se atribuyó al paso de maquinaria agrícola cuando el suelo tiene baja capacidad portante debido al mayor contenido hídrico de los suelos bajo riego. Así mismo, en el Sudeste Bonaerense, Costa y Aparicio (2015) muestran un incremento de la densidad aparente (estrato de 0-8 cm) en 1,6 % (de 1,2 a 1,22 g cm⁻³) que fue estadísticamente significativo, atribuyendo dicho resultado al efecto de la calidad del agua de riego (aguas bicarbonatadas). Por otra parte, en el norte de la Región Pampeana a pesar de que la densidad aparente (estrato 0-5 cm) tiende a incrementarse en 5,6% (de 1,25 a 1,28 Mg m⁻³) no difirió estadísticamente entre tratamientos (Torres Duggan et al., 2012).

La resistencia a la penetración también puede ser afectada por la adopción del riego complementario. Por ejemplo, Torres Duggan et al. (2012) en su estudio en el norte de la Región Pampeana encontraron un incremento del 15 % en la resistencia a la penetración en los primeros 40 cm de profundidad del suelo, pero solo estadísticamente significativo en el estrato 35 - 40 cm. La tendencia al incremento de la resistencia a la penetración lo asociaron al tránsito de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante.

Así mismo, en estudios recientes Peralta et al. (2019) en el norte de la Región Pampeana, Alvarez et al. (2019) y Alvarez et al. (2020b) en el Sudoeste Bonaerense señalan que los efectos del riego complementario sobre la resistencia a la penetración no fueron estadísticamente significativos en ningún estrato. Los resultados que ellos encontraron fueron asociados a los niveles de PSI no tan elevados.

Otra importante propiedad del suelo que también puede ser afectada por el riego complementario es la infiltración. Suarez et al. (2006) en su estudio realizado en Montana

USA señalan que los incrementos de RAS de las aguas de riego afectan negativamente el tiempo de infiltración. Por ejemplo, mencionan que en suelos arcillosos este efecto es significativo cuando se incrementa el nivel de RAS del agua de 2 a 4 y en suelos francos el efecto es significativo a partir de 6 de RAS del agua. Así mismo, Pilatti et al. (2006) en la provincia de Santa Fe observaron que los suelos regados con aguas con mayor contenido de sodio y bicarbonatos tuvieron una menor tasa de infiltración con respecto a los demás.

La aptitud del agua de riego influye en la tasa de infiltración del suelo. Ayers y Westcot (1985) muestran que la CE y RAS del agua son los factores más comunes de la calidad del agua que influyen en la tasa de infiltración normal del suelo, así, a un determinado RAS del agua, la tasa de infiltración aumenta a medida que la salinidad del agua se incrementa (Tabla 4).

Tabla 4

Clasificación de la calidad del agua para riego de acuerdo al problema potencial de infiltración según la FAO (Ayers y Westcot, 1985).

	Grado de restricción de uso		
	Ninguno	Ligero o moderado	Severo
RAS entre 0 – 3 y CE (dS m ⁻¹) =	>0,7	0,7 – 0,2	<0,2
RAS entre 3 – 6 y CE (dS m ⁻¹) =	>1,2	1,2 – 0,3	<0,3
RAS entre 6 – 12 y CE (dS m ⁻¹) =	>1,9	1,9 – 0,5	<0,5
RAS entre 12 – 20 y CE (dS m ⁻¹) =	>2,9	2,9 – 1,3	<1,3
RAS entre 20 – 40 y CE (dS m ⁻¹) =	>5,0	5,0 – 2,9	<2,9

En el sur de Córdoba y Santa Fe, Mon et al. (2007) encontraron una reducción de la tasa de infiltración de 9 mm h⁻¹ (de 46 a 37 mm h⁻¹) en lotes bajo riego complementario, no obstante, mencionan que estos resultados podrían estar afectados por posibles

diferencias en la humedad inicial de los campos ya que no evaluaron la humedad gravimétrica de los suelos.

Por otra parte, Alvarez et al. (2020a) en un análisis de 4 trabajos realizados en la Región Pampeana observaron que la tasa de infiltración en lotes bajo riego complementario tiende a disminuir sin diferencias estadísticas significativas, aunque con incrementos marcados en el PSI y bajas CE del suelo. Atribuyendo la falta de significancia a la gran variabilidad dentro de las parcelas.

Resumiendo, de acuerdo a la revisión bibliográfica, los efectos del riego complementario sobre densidad aparente, resistencia a la penetración y la tasa de infiltración, en la Región Pampeana no muestran tendencias definidas de degradación física del suelo.

Objetivos:

Determinar el efecto del riego complementario sobre la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la tasa de infiltración del suelo en lotes que combinan la producción de semillas y producción de granos.

Hipótesis

El riego complementario aumenta la densidad aparente y la resistencia a la penetración y conduce a la disminución de la tasa de infiltración del suelo aún con valores de PSI inferiores al límite crítico de 15%.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Localización del área de trabajo

Se trabajó en el establecimiento San Miguel localizado en el partido Coronel Pringles ubicado en el Sudoeste Bonaerense ($38^{\circ} 10' 01''$ S; $61^{\circ} 20' 29''$ O). La zona de estudio se caracteriza por tener niveles pluviométricos promedios históricos anuales (1990-2010) de 743 mm año^{-1} (SMN, s.f.). Los suelos en los primeros 20 cm del perfil, poseen textura franco arcillosa y de acuerdo a USDA-Soil Taxonomy V.2014 presenta una asociación de Argiudol petrocálcico, fina, illítica, somera, térmica y Argiudol lítico, fina, illítica, somera, térmica (INTA, s.f.). Los principales cultivos que integran la rotación son soja, maíz, girasol, trigo y cebada.

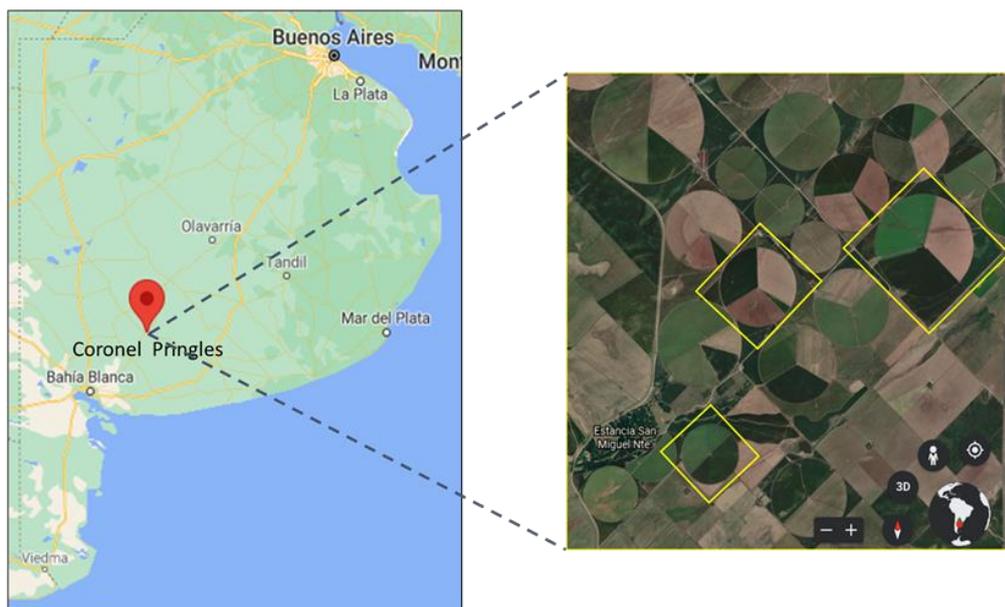


Figura 6

Ubicación del lugar de estudio (Coronel Pringles, provincia de Buenos Aires).

Nota: Los tres lotes en los que se trabajó están indicados en la imagen satelital bordeados por rectángulos de color amarillo.

Se contó con dos tratamientos (Secano y Riego) con 3 repeticiones (lotes) de cada uno, los lotes hasta el momento de la investigación tenían un historial de riego de 15, 12

y 6 años. El tratamiento Riego estuvo conformado por los círculos de riego mientras el tratamiento Secano estuvo conformado por los respectivos córneres de cada lote. Las áreas del tratamiento Riego por lo general son destinados para la producción de semillas de maíz y girasol, pero algunas veces se hacen producción de granos (relación 2:1). En los córneres destinados al tratamiento Secano solo se produce granos.

Las evaluaciones y toma de muestras para determinar las propiedades edáficas fueron llevadas a cabo a finales de primavera de 2020 en lotes del cultivo de maíz (cada lote evaluado estuvo en diferente etapa fenológica variando de V2 a V9).

3.2.2 Evaluación química del suelo

En cada unidad experimental se tomaron muestras de suelo en dos profundidades: de 0-10 y de 10-20 cm. Se analizó una muestra compuesta (9 submuestras) tomada en la zona regada y otra de su respectivo córner, correspondiendo a los tratamientos Riego y Secano, respectivamente. En dichas muestras se determinó el carbono orgánico (CO), pH en agua (1:2,5 p/p), conductividad eléctrica (CE) en extracto de saturación, Sodio (Na) extractable (AcNH_4 1N), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el PSI se determinó utilizando la fórmula ($\text{PSI} = (\text{Na}/\text{CIC}) * 100$). Estos parámetros fueron medidos para observar si tienen alguna relación con las propiedades físicas analizadas.

3.2.3 Evaluación física del suelo

La densidad aparente se evaluó a profundidades de 0-5 y 10-15 cm en 7 muestras por repetición (método del cilindro con un volumen de 100 cm^3 , Burke et al., 1986); en las muestras tomadas para densidad aparente se determinó el contenido hídrico gravimétrico ($\theta_g (\%) = (\text{peso del agua}/\text{peso del suelo seco}) * 100$). La resistencia a la penetración también denominada resistencia mecánica fue determinada por penetrómetro de golpe de punta cónica de 30° , evaluados de 0 a 20 cm de profundidad a intervalos de 5 cm, realizándose 10 determinaciones por repetición (Burke et al., 1986). Finalmente, se

determinó la tasa de infiltración básica a capacidad de campo, usando un permeámetro de disco (Perroux and White, 1988). Se inserta un anillo de 5 cm de altura, medio centímetro en el suelo. Se le adiciona arena hasta llenar al ras para asegurar un óptimo contacto entre la superficie y la membrana del disco (Minasny and McBratney, 2000; Foley et al., 2006). Se registra en forma secuencial el tiempo (cada 5 minutos) y la lámina que ingresa hasta que se alcanza un valor de infiltración constante (básica) o de equilibrio, esto a tensión cero. Se evaluaron 4 mediciones por cada repetición de cada tratamiento (Figura 7).



Figura 7

Medición de la tasa de infiltración con permeámetro de disco.

Nota: imagen de lado izquierdo maíz en V2 y lado derecho maíz en V8.

3.2.4 Análisis del agua de riego.

En el agua de riego se determinó pH, CE, relación de adsorción de sodio (RAS), sales solubles, carbonato de sodio residual (CSR), cationes: calcio, magnesio y sodio (absorción atómica), carbonato y bicarbonato (titulación), cloruro (titulación), sulfato (turbidimetría) y dureza total.

3.2.5 Análisis estadístico.

Los valores hallados para los tratamientos de Riego y Secano se compararon

estadísticamente utilizando test de t apareada. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2018).

3.3 Resultados y discusiones

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis de las propiedades químicas del suelo. Se observa que el pH y PSI del suelo son significativamente mayores en Riego que en Secano, en ambas profundidades, mientras la CE y el CO del suelo no difieren entre sí. De acuerdo a la USDA (1954) los suelos de ambos tratamientos en los que trabajamos se clasifican como no sódico – no salino ($CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$, $PSI < 15 \%$ y $pH < 8,5$). Los incrementos del PSI y la baja CE del suelo no indicarían a priori dispersión de partículas del suelo en zonas áridas. Sin embargo, algunas evidencias muestran que para valores de 4,5 % de PSI y valores de CE menores de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ pueden causar dispersión del suelo (Ghiberto et al., 2007).

Tabla 5

Valores Promedio, mínimo, máximo y error estándar (E.E.) de pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en muestras de suelo de los tratamientos: Secano y Riego, obtenidos a partir de los tres lotes evaluados. En las profundidades 0 a 10 cm y 10 a 20 cm

	pH		CE (dS m^{-1})		PSI (%)		CO (%)	
	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
0-10 cm								
Promedio	5,77 b	6,97 a	0,73 a	0,70 a	0,43 b	6,40 a	2,80 a	2,72 a
Mínimo	5,50	6,80	0,40	0,60	0,30	5,20	2,56	2,07
Máximo	6,10	7,10	1,00	0,80	0,60	7,50	3,23	3,11
E.E.	0,18	0,09	0,18	0,06	0,09	0,67	0,22	0,33
10-20 cm								
Promedio	6,17 b	7,13 a	0,33 a	0,43 a	0,43 b	6,43 a	2,03 a	2,21 a
Mínimo	6,10	6,90	0,30	0,30	0,30	6,20	1,67	1,56
Máximo	6,20	7,30	0,40	0,50	0,60	6,60	2,52	2,76
E.E.	0,03	0,12	0,03	0,07	0,09	0,12	0,25	0,35

Nota. Letras diferentes representan diferencia estadística ($p < 0,05$) para cada propiedad entre tratamientos dentro de cada profundidad ($n=3$).

Los valores del análisis del agua de riego se muestran en la Tabla 6. De acuerdo a la conductividad eléctrica del agua (CEa), no tiene restricción de uso. Por lo tanto, puede usarse para riego, sin necesidad de prácticas especiales de control de salinidad (INTA, 1999). No obstante, siguiendo lo propuesto por Ayers y Westcot (1985), de acuerdo a la RAS y CEa, el agua de riego podría afectar la infiltración moderadamente. De acuerdo al diagrama de Piper es clasificada como bicarbonatada sódica (Piper, 1944).

Es evidente también, que estas aguas son los causantes del incremento del PSI del tratamiento Riego (Tabla 5), dado que los córneres de los lotes (tratamiento Secano) poseen un PSI mucho más bajo.

Tabla 6

Valores del análisis de muestras de agua de riego obtenidas de los pozos de los tres lotes evaluados

	Pozo 1	Pozo 19	Pozo 3	Promedio
pH	8,50	8,03	8,16	8,23
CEa (dS m ⁻¹)	0,80	0,80	0,90	0,83
Sales solubles (g L ⁻¹)	0,50	0,56	0,63	0,56
Carbonato (mg L ⁻¹)	31,20	42,00	14,40	29,20
Bicarbonato (mg L ⁻¹)	429,40	341,60	402,50	391,17
Cloruro (mg L ⁻¹)	45,40	35,50	35,50	38,80
Sulfato (mg L ⁻¹)	7,20	4,80	4,80	5,60
Calcio (mg L ⁻¹)	8,40	17,40	12,00	12,60
Magnesio (mg L ⁻¹)	5,60	9,60	8,50	7,90
Sodio (mg L ⁻¹)	187,00	144,90	154,10	162,00
RAS	12,30	6,90	8,40	9,20
CSR (meq L ⁻¹)	7,20	5,40	5,80	6,13
Dureza total (ppm CaCO ₃)	44,30	82,98	64,96	64,08

Densidad aparente

En la Figura 8, se presentan los valores de la densidad aparente obtenidos en ambos tratamientos (Secano y Riego) a distintas profundidades (0-5 y 10 -15 cm). La densidad aparente, tanto en el primero como en el segundo estrato no presenta incrementos estadísticamente significativos.

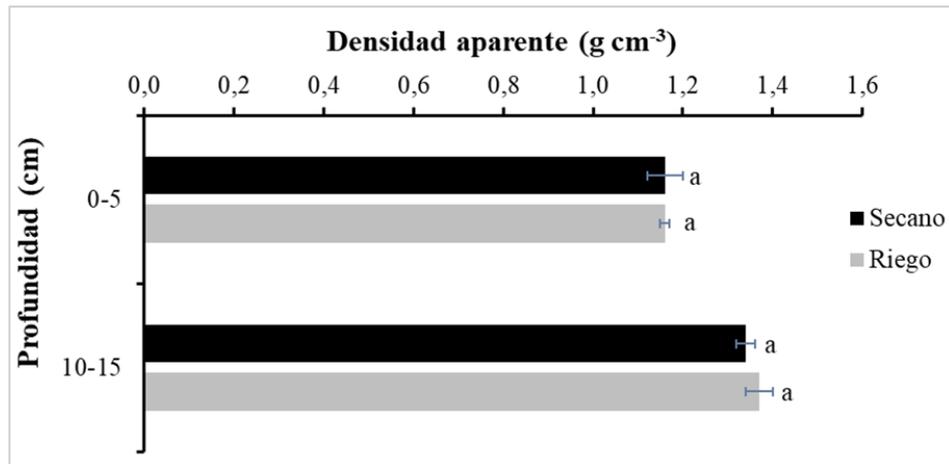


Figura 8

Densidad aparente para los tratamientos (Secano y Riego), (n=3).

Nota: Letras iguales en minúscula (a) indican diferencias no significativas (valor $p > 0,05$) entre los tratamientos de la misma profundidad y las barras indican error estándar.

Los resultados de la densidad aparente (Dap) en el estrato superior (0-5 cm) evaluados en este estudio para el tratamiento Riego coinciden con el estudio de Torres Duggan et al. (2012) en el norte de la Región Pampeana y los de Álvarez et al. (2020b) y Álvarez et al. (2019) en el Sudoeste Bonaerense que evaluaron la misma profundidad. Sin embargo, Giubergia (2013) en su investigación en la región central de Córdoba en el estrato del suelo de 0-6 cm y Costa y Aparicio (2015) en el Sudeste Bonaerense en estrato del suelo 0-8 cm encuentran incrementos con diferencia estadística significativa. Giubergia (2013) menciona que el paso de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante está causando la pérdida de porosidad total y consecuentemente elevando la densidad aparente. Mientras Costa y Aparicio (2015) mencionan que los efectos de la acumulación de sodio en el suelo son causantes de sus resultados. En la comparación descrita habría que tener en cuenta que el rango de profundidades fue mayor que el evaluado en esta tesis. Pues, la densidad aparente generalmente aumenta con la profundidad (Salamanca y Sadeghian, 2005). Además, la variación de los valores

encontrados por los autores pudo afectar en los resultados. Por ejemplo, se puede observar que, según Torres Duggan et al. (2012), un aumento del 5,6% en la densidad aparente no resultó en diferencias estadísticamente significativas. En contraste, Costa y Aparicio (2015) encontraron diferencias significativas con un incremento del 1,6% en la densidad aparente.

En el estrato de 10-15 cm, los resultados del tratamiento Riego no coinciden con los resultados obtenidos por otros autores. Álvarez et al. (2020b) y Álvarez et al. (2019) en el Sudoeste Bonaerense en su evaluación del estrato de suelo de 10-15 cm y Giubergia (2013) en la región central de Córdoba en su evaluación del estrato de suelo de 12-18 cm discrepan con los resultados de este estudio, porque encontraron que las situaciones bajo riego complementario fueron estadísticamente significativas con respecto a los de Secano. Estos autores atribuyeron el incremento de la densidad aparente al paso de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante. No obstante, en esta investigación dicho efecto aún no estaría siendo apreciable.

De la falta de diferencia estadística significativa entre los tratamientos en ambos estratos evaluados puede interpretarse que el mayor PSI del suelo (Tabla 5), la mayor cantidad de tránsito de maquinaria (lotes destinados para producción semilla precisan mayor cantidad de labores agrícolas) y las coincidencias del paso de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante en el tratamiento Riego no serían suficientes para degradar físicamente el suelo y como consecuencia incrementar su densidad aparente. Además, Taboada y Alvarez (2008) mencionan que la densidad aparente varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica. Nuestros tratamientos son de similar clase textural (franco arcilloso) y los contenidos de materia orgánica del suelo en ambos tratamientos también podrían ser similares dado que se tiene semejantes contenidos de

COS (Tabla 5). Por lo tanto, las densidades aparentes entre los tratamientos no tendrían por qué ser diferentes.

Los suelos en los cuales se trabajó fueron de textura franco arcillosos. Y para este tipo de suelos de acuerdo a Arshad et al. (1996) la densidad aparente a partir de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ causaría cierta compactación y podría restringir el crecimiento de las raíces en el suelo. Por otro lado, para Schmidt (2015) encontró valores de densidad aparente crítica menores al de Arshad et al. (1996) ($1,36- 1,34 - 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ para las profundidades de 0-5, 5-10 y 10-18 cm de profundidad del suelo, respectivamente). De acuerdo a Arshad et al. (1996) los valores que se encontraron en el presente estudio están muy por debajo del umbral límite mencionado. Por lo tanto, el riego complementario no estaría afectando el crecimiento de las raíces de los cultivos. Por otra parte, de acuerdo a Schmidt (2015) el estrato de 10-15 cm de esta tesis estaría afectando el crecimiento de las raíces. Sin embargo, la resistencia del suelo a ser penetrado por las raíces no solo es afectado por la densidad aparente, sino también, por su humedad (Weil y Brady, 2017).

Resistencia a la penetración del suelo

En la Figura 9a se presentan los valores de la resistencia a la penetración y al lado derecho la humedad gravimétrica para los tratamientos (Secano y Riego) a distintas profundidades.

La humedad gravimétrica del suelo no presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en las dos profundidades evaluadas (Figura 9b). Por ello, los resultados de la resistencia a la penetración se compararon sin corregir por humedad. La igualdad estadística existente de la humedad gravimétrica entre los tratamientos podría ser justificado por las lluvias que habían ocurrido 3 días antes de la evaluación del suelo. Los promedios de humedad gravimétrica de los tratamientos en el momento de la

evaluación fueron de 20,3% y 24,9% para las profundidades de 0-5 cm y 10-15 cm, respectivamente.

Del mismo modo, los resultados de la resistencia a la penetración (resistencia mecánica) tampoco mostraron diferencias estadísticas significativas (valor $p > 0,05$) entre los tratamientos.

No se pudo establecer una relación significativa entre la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración de 0 a 5 cm ni de 10 a 15 cm.

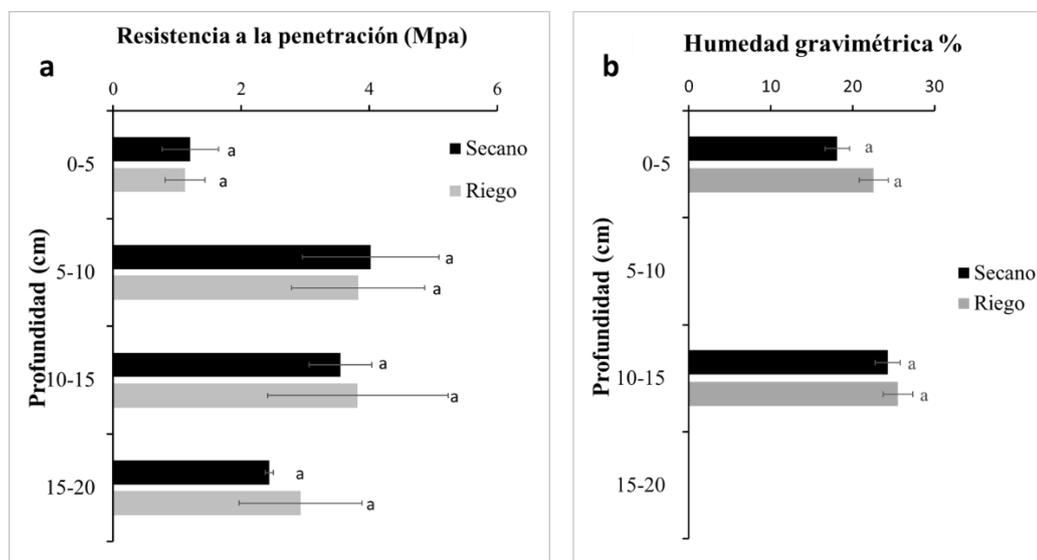


Figura 9

Resistencia a la penetración (a) y humedad gravimétrica (b) para los tratamientos (Secano y Riego).

Nota: Letras iguales en minúscula (a) indican diferencias no significativas (valor $p > 0,05$) entre los tratamientos de la misma profundidad y las barras indican error estándar.

La resistencia a la penetración tampoco fue afectada por el riego complementario en ninguno de los estratos evaluados, pero hay que tener en cuenta que hay mayor variación en los valores del tratamiento Riego (Figura 9a). De esto se puede entender que los efectos de la aptitud del agua de riego y otros factores que se relacionan con el riego no estarían afectando esta propiedad o que los efectos aún no son notables como para ser

detectadas estas variaciones. Sin embargo, los resultados muestran que solo en el primer estrato (0-5 cm) los valores de la resistencia a la penetración están por debajo del umbral límite (2 MPa), valores por encima de este son considerados como perjudiciales para muchos cultivos anuales de acuerdo a Soil Science Division Staff (2017). Esto podría sugerir que en los últimos estratos (5-10 cm, 10-15 cm y 15-20 cm) la resistencia a la penetración estaría dificultando el crecimiento de las raíces.

Por otra parte, algo que llama la atención es que en el primer estrato la resistencia a la penetración en promedio se acerca a 1 MPa, luego en los dos estratos siguientes en promedio se acercan a 4 MPa y posteriormente en el último estrato en promedio disminuye alrededor de 3 MPa. Esto podría significar la formación de una capa de mayor compactación entre los 5 y 15 cm de profundidad, lo cual podría causar cierta dificultad en el crecimiento de las raíces en los primeros estadios del cultivo, adicionalmente, la capa de compactación podría dificultar el movimiento del agua y los nutrientes (fertilizantes) suministrados al suelo. Sin embargo, en periodos sin lluvia, el riego suministrado en lotes bajo riego complementario podría hacer disminuir la resistencia del suelo. Esto teniendo en cuenta que un suelo húmedo ofrece menos resistencia que un suelo seco (Weil y Brady, 2017).

Los resultados encontrados en este trabajo son similares a los obtenidos por Peralta et al. (2019) en el norte de la Región Pampeana, Alvarez et al. (2019) y Alvarez et al. (2020b) en el Sudoeste Bonaerense y Torres Duggan et al. (2012) en norte de la Región Pampeana, quienes tampoco encontraron diferencias estadísticas significativas entre sus tratamientos. Sin embargo, en dichos trabajos los valores numéricos de la resistencia a la penetración en lotes bajo Riego presentaron una tendencia a ser mayores

que los de Secano, los cuales fueron atribuidos al tránsito de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante.

Relación entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo

En la Figura 10, se muestra la relación existente entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo (se utilizaron datos de ambos tratamientos de 0-5 cm y 10-15 cm de profundidad), en el cual se observa que hay una relación directamente proporcional entre estas. El ajuste para la regresión lineal es:

$$\text{Resistencia a la Penetración (MPa)} = -13,2 + 12,4 * \text{Densidad aparente (g cm}^{-3}\text{)},$$

con un $R^2 = 0,59$, siendo el ajuste estadísticamente significativo ($p\text{-valor} = 0,0032$).

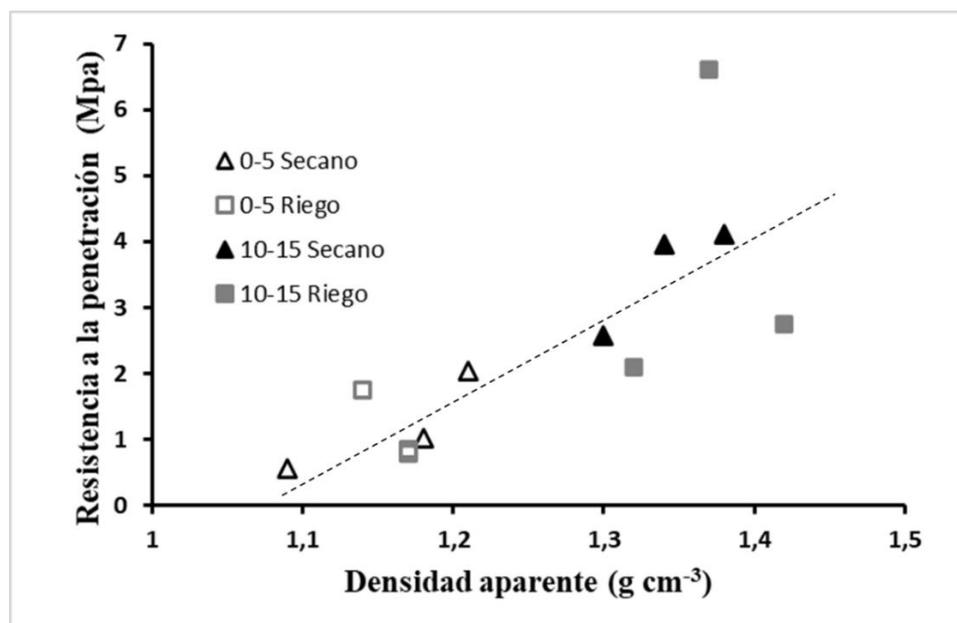


Figura 10

Densidad aparente versus resistencia a la penetración para los tratamientos (Secano y Riego).

Nota: figura elaborada con datos de los estratos 0-5 y 10-15 cm diferenciados de acuerdo a tratamiento.

Dado que la Figura 10 se elaboró con datos de ambos tratamientos, se podría decir que el riego no estaría influyendo en la relación directa que existe entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración. No hay estudios que hagan esta relación en

situaciones de Secano y Riego, si bien Kumar et al. (2012) encontraron, para los tratamientos considerados, sistemas de siembra directa y labranza convencional, resultados similares a los de esta tesis, este estudio muestra que, sin importar estos tipos de labranza, existía una relación directa entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración.

Infiltración del agua en el suelo

Finalmente, en la Figura 11 se muestran los valores de la tasa de infiltración del agua en el suelo para ambos tratamientos. No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre la situación de Secano y Riego (valor $p > 0,05$).

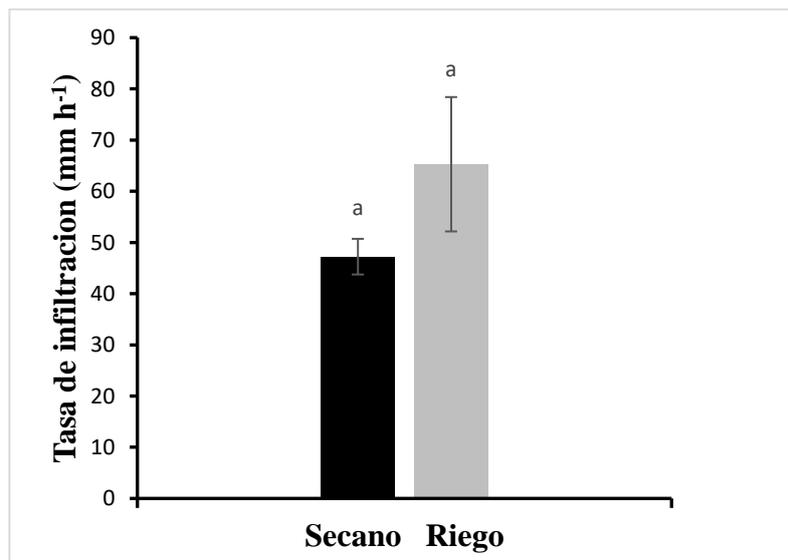


Figura 11

Tasa de infiltración para los tratamientos (Secano y Riego).

Nota: Letras iguales en minúscula (a) indican diferencias no significativas (valor $p > 0,05$) entre los tratamientos y las barras indican error estándar.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la tasa de infiltración no se vio afectada por efecto del riego complementario. Sin embargo, con los valores de la RAS y CE del agua de riego la infiltración debería haber sido alterada de acuerdo con Ayers y Westcot

(1985). No obstante, el agua de riego incidió en la acumulación de sodio en el suelo (PSI de 0,43 % y 6,40 % para Secano y Riego, respectivamente), pero este incremento no tuvo efecto en la infiltración a pesar que Ghiberto et al. (2007) mencionan que con valores de 4,5 % de PSI y valores de CE menores de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ se puede causar degradación del suelo. Por lo tanto, se podría decir que la dispersión de partículas del suelo por efecto de la sodicidad y su posterior deterioro en el movimiento del agua y aire (Qadir y Schubert, 2002) aun no es apreciable como para limitar la tasa de infiltración o que hay otros factores que pueden estar favoreciendo la tasa de infiltración que no han sido tomados en cuenta.

Otros autores como Álvarez et al. (2020a), Álvarez et al. (2020b), Peralta et al. (2019), Giubergia (2013) y Torres Duggan et al. (2012) tampoco encontraron diferencias significativas en la tasa de infiltración entre los tratamientos (Secano y Riego). Estos autores atribuyen sus resultados a la alta variabilidad existente en sus tratamientos. En esta tesis también se encontró alta variabilidad especialmente en el tratamiento Riego (Figura 11). De esto se puede suponer que a pesar de las pocas repeticiones que presenta este trabajo, las altas variaciones son comunes de encontrar al medir la infiltración. Este problema podría estar dado por la variación espacial del suelo, por el tipo de sistema radicular de los cultivos que combinan las rotaciones y otros factores que aún no son conocidos. Por lo tanto, se tendría que contar con un número grande de repeticiones para disminuir la variabilidad. Del mismo modo, Romay et al. (2023) no encontraron diferencias significativas de la infiltración en post-campaña de riego, pero en pre-campaña el tratamiento Riego si presentó mayor infiltración. El resultado favorable encontrado en pre-campaña fue atribuido al cultivo antecesor (trigo).

Una de las limitantes del trabajo de este capítulo podría ser la baja cantidad de lotes evaluados (3 lotes). Asimismo, puede haber prácticas o cultivos presentes en la

rotación que contribuyan a una mejora física edáfica, por ejemplo, en uno de los lotes bajo riego con muy buena infiltración se había realizado sorgo y se observaba el efecto favorable de su sistema radical sobre la estructura edáfica. En este sentido, los distintos cultivos pueden ser fuente de alta variabilidad en los resultados de infiltración, por lo que como se mencionó anteriormente es conveniente realizar un mayor número de repeticiones.

3.4 Conclusiones del capítulo

El riego complementario no tuvo efecto sobre la densidad aparente, la resistencia a la penetración ni la tasa de infiltración del suelo. Por consiguiente, se tuvo que rechazar la hipótesis que se había planteado para cada propiedad física evaluada. En consecuencia, se puede mencionar que el riego complementario y todo lo que conlleva su adopción (uso de aguas carbonatadas sódicas, mayor tránsito de maquinaria agrícola y mayor coincidencia de paso de maquinaria cuando el suelo tiene baja capacidad portante) no incrementa la densidad aparente y la resistencia a la penetración ni reduce la tasa de infiltración o que los cambios en estas propiedades aun no son apreciables como para ser detectados en el tiempo que estos suelos fueron sometidos al riego complementario (15, 12 y 6 años de historia de riego).

CAPÍTULO IV: El efecto del riego complementario sobre la emisión de óxido nitroso del suelo

4.1 Introducción

La persistente variación del clima que en estos tiempos afrontamos es conocido como cambio climático, el cual se debe principalmente al aumento de la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero (GEI) por encima de los niveles naturales, los cuales son atribuidas a la acción directa o indirecta del hombre (Moreira Muzio et al., 2019). Entre los principales GEI tenemos el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).

En nuestro planeta el sector de la agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra (AGSyOUT) durante 2007-2016 contribuyeron con el 23% ($12,0 \pm 2,9 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq año}^{-1}$) de las emisiones antropogénicas globales de GEI, de las cuales las emisiones de CO_2 representaron el 13 %, el CH_4 44 % y el N_2O 81 % (IPCC, 2019). Del mismo modo, este sector en Argentina en el año 2016 representó alrededor del 37 % ($135,53 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq}$) de las emisiones de GEI, de las cuales las emisiones de CO_2 representaron el 23,7 %, el CH_4 42,7 % y el N_2O 33,6 % (Moreira Muzio et al., 2019).

Las emisiones de GEI en el sector AGSyOUT se concentran notablemente en distintos subsectores. Por ejemplo, el cambio de uso de la tierra concentra la mayor cantidad de emisiones de CO_2 , las emisiones de N_2O se concentra en el uso de fertilizantes y las emisiones de CH_4 se concentra en los campos de arroz y el ganado rumiante (Shukla et al., 2019). El óxido nitroso (N_2O) es uno de los gases de efecto invernadero con mayor poder de calentamiento debido a que su poder calórico es 298 veces el poder de calentamiento del CO_2 (Solomon et al. 2007). Bajo este contexto, el estudio de la emisión de N_2O es fundamental en la agricultura, ya que este subsector hace uso de fertilizantes

nitrogenados para la producción de la mayoría de cultivos, a excepción de las leguminosas.

Las emisiones de N_2O desde los suelos ocurren como consecuencia de los procesos de nitrificación y desnitrificación (Linn y Doran, 1984). La nitrificación es la oxidación microbiana del amoníaco y amonio a nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) (Robertson y Groffman, 2015). Sin embargo, la nitrificación también puede emitir de manera directa N_2O al ambiente, esto como producto de la oxidación de hidroxilamina (NH_2OH), cuyo proceso es conocida como "desnitrificación del nitrificante" (Wunderlin et al., 2012). Por otro lado, la desnitrificación es el proceso por el que se reducen los nitratos y nitritos a compuestos gaseosos como óxidos de N (N_2O , NO) o a N elemental (N_2). Este proceso se lleva a cabo por una variedad de bacterias en su mayoría heterótrofas, donde utilizan NO_3^- en lugar de oxígeno (O_2) como aceptor de electrones terminales durante la respiración. El nitrato (NO_3^-) es un aceptor de electrones menos eficiente que el O_2 . Por lo tanto, la mayoría de los desnitrificadores emprenden la desnitrificación solo cuando el O_2 no está disponible (Robertson y Groffman, 2015).

La tasa de desnitrificación se encuentra regulada principalmente por tres factores edáficos: el contenido de humedad, el carbono orgánico lábil y la concentración de nitratos (Rodríguez y Giambiagi, 1995). El espacio poroso lleno de agua (EPLLA) es una medida fundamental para expresar la humedad del suelo. Así, según algunos estudios la desnitrificación comienza a ocurrir cuando las concentraciones de EPLLA es del 60% o más (Linn y Doran, 1984; Pimentel et al., 2015). Por otro lado, la importancia del carbono en la regulación de la desnitrificación es debido a que la mayoría de los desnitrificadores son heterótrofos y requieren carbono reducido como donador de electrones (Robertson y Groffman, 2015).

En condiciones de cultivos bajo secano, según Cosentino (2015) las emisiones de N_2O dependen principalmente de la temperatura del suelo, seguida por el porcentaje del EPLLA y finalmente por la concentración de NO_3^- del suelo. Sin embargo, Casanave Ponti et al. (2020) señalan que las emisiones de N_2O dependen principalmente del contenido de N mineral del suelo.

Por otra parte, en condiciones bajo riego, las emisiones de N_2O generalmente tienden a aumentar cuando los componentes nitrogenados están disponibles (Trost et al., 2013). Esto fue corroborado por Wang et al. (2019), quienes encontraron que la emisión de N_2O bajo riego tiene correlaciones positivas con la humedad, la concentración de NO_3^- y el pH del suelo. No obstante, cuando la fertilización nitrogenada es aplicada en igual cantidad en condiciones de secano y riego complementario, en este último la emisión de N_2O disminuye en un 36%, lo que sugieren es que el elevado EPLLA (0,87 – 0,96 durante el alargamiento de tallo y la antesis de trigo) podría haber causado la reducción de N_2O a N_2 en el proceso de desnitrificación (Lam, et al., 2013). Este proceso de reducción es conocido que ocurre cuando la humedad del suelo es elevada. Así, Ruser, et al. (2006) encontraron que la mayor emisión de N_2 se da cuando el EPLLA es mayor a 90 %.

El efecto que pueda tener el riego complementario sobre la emisión de N_2O en la región Pampeana aún no es conocida. No obstante, algo que es de conocimiento general, es que bajo riego complementario la fertilización nitrogenada empleada en los cultivos (maíz, trigo, girasol y cebada) utiliza dosis mayores a las que se emplean en cultivos bajo secano. Por lo tanto, los incrementos de humedad del suelo generados por el riego,

combinado con el uso de altas dosis de fertilizantes nitrogenados generan las condiciones predisponentes para este tipo de pérdidas.

Por lo enunciado, el impacto del riego complementario sobre la emisión de gases de efecto invernadero es sumamente complejo, poco estudiado y abre una serie de interrogantes que son importantes de abordar.

Objetivo

Cuantificar el efecto ambiental del riego complementario en situaciones que integran cultivos de producción de grano y producción de semillas a partir de la evaluación de las emisiones de óxido nitroso.

Hipótesis

Los lotes bajo riego complementario presentan mayor emisión de N_2O debido a la mayor humedad del suelo y mayor fertilización nitrogenada.

4.2 Materiales y métodos

Las mediciones de las emisiones de óxido nitroso se llevaron a cabo en el partido de Coronel Pringles en el establecimiento San Miguel en los mismos lotes donde se evaluaron las propiedades físicas del suelo (capítulo III), en el cual se contó con dos tratamientos (Secano y Riego) las cuales tuvieron tres repeticiones cada uno. El estudio se llevó a cabo durante el ciclo fenológico del cultivo de maíz para grano, los cuales recibieron fertilización de 110 y 200 kg de nitrógeno por hectárea para los tratamientos Secano y Riego, respectivamente.

4.2.1 Evaluación de emisión de óxido nítrico

El muestreo para cada tratamiento se realizó en 3 momentos del ciclo del cultivo utilizando el método propuesto por USDA (Collier et al., 2014). En cada repetición se instalaron tres cámaras estáticas de medición (volumen interno de cámara 0,0167 m³) y se realizaron 3 extracciones de gases a tiempo 0, 15 y 30 minutos tal como se muestra en la Figura 15. Las muestras de gases se extrajeron con jeringas y se inyectaron en viales de 10 ml, asegurando la purga del aire existente. Las muestras se analizaron por cromatografía de gases. Luego, se convirtió la concentración de gases traza de su expresión volumétrica a masa usando la Ley de los gases ideales. Finalmente, los flujos de N₂O se calcularon mediante regresión lineal entre los cambios en la concentración de gas y el tiempo de las tres mediciones consecutivas.

La emisión de N₂O, medida como $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, desde el suelo hacia la atmosfera se calculó mediante la ecuación (1).

$$f = (\Delta C/\Delta t) * (V/A) * (m/V_m) \quad (1)$$

Donde:

- $\Delta C/\Delta t$ es el cambio en la concentración de N₂O (ΔC) medido en partes por millón (ppm) dentro la cámara durante el tiempo de incubación medido en minutos (Δt).
- V es el volumen de la cámara (16,7 dm³).
- A es el área de suelo cubierta por la cámara (0,1336 m²).
- m es el peso molecular de N₂O.
- V_m es el volumen molar N₂O (dm³ mol⁻¹).

Para determinar la emisión acumulada de óxido nitroso, las emisiones de N₂O producidas durante el período de estudio (15/12/2020 al 12/02/2021) fueron calculadas por interpolación lineal entre fechas sucesivas según lo propuesto por Jantalia et al. (2008).

4.2.2 Evaluación de la temperatura, concentración de nitratos y humedad

Juntamente con la toma de gases, se midió la temperatura del aire a la sombra sobre la superficie del suelo y la temperatura del suelo cercano a las cámaras a los 5 cm de profundidad. Seguidamente, se colectaron muestras de suelo al costado de las cámaras para determinar la concentración de NO₃⁻ por colorimetría (Keeney y Nelson, 1982). Finalmente, para calcular el espacio poroso lleno de agua (EPLLA), se determinó la densidad aparente (Dap) del suelo por el método del cilindro (100 cm³; 5 cm de diámetro, Burke et al. 1986) y el contenido hídrico gravimétrico (CHg) por secado en estufa a 105 °C.

A partir de los valores de Dap y densidad de partícula (Dp = 2,65 Mg m⁻³) se calculó la porosidad total (PT) y el contenido hídrico volumétrico (CHv) usando las ecuaciones (2) y (3). El porcentaje del espacio poroso lleno de agua (EPLLA%) también llamado porcentaje de saturación en hidrología se calculó a partir de los valores de PT y CHv utilizando la ecuación (4).

$$PT (\%) = (1 - (Dap / Dp)) * 100 \quad (2)$$

$$CHv (\%) = CHg * Dap * 100 \quad (3)$$

$$EPLLA (\%) = CHv (\%) / PT (\%) * 100 \quad (4)$$



Figura 12

Toma de muestra de óxido nitroso en lote bajo Secano (derecha) y bajo riego complementario (izquierda).

4.2.3 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos para los flujos de N_2O y CO_2 , la temperatura del suelo, los nitratos del suelo y el espacio poroso lleno de agua (EPLLA) fueron comparados entre los tratamientos (Secano y Riego) para cada fecha de medición. Además, se compararon los flujos acumulados de N_2O entre los tratamientos. En estas comparaciones estadísticas se utilizaron test de t apareada. También, se ajustaron modelos de regresión simple y múltiple para evaluar las relaciones entre los flujos de N_2O y las variables del suelo (temperatura del suelo, nitratos del suelo y EPLLA). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat (Di Rienzo et al. 2018).

4.3 Resultados y discusiones

La tasa de emisión de óxido nitroso (Figura 13) no fue afectada por el riego complementario, no mostró diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas de medición. Esto puede estar influenciado por los valores muy variables especialmente en el tratamiento Riego. Los valores a lo largo de las fechas de medición

oscilaron entre 0,08 y 10,57 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, siendo la emisión promedio de 4,51 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

La emisión de dióxido de carbono (Figura 17) de acuerdo al análisis estadístico tampoco mostró diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas de medición. Los valores a lo largo de las fechas de medición variaron entre 3,08 y 39,36 $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, siendo la emisión promedio de 21,2 $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

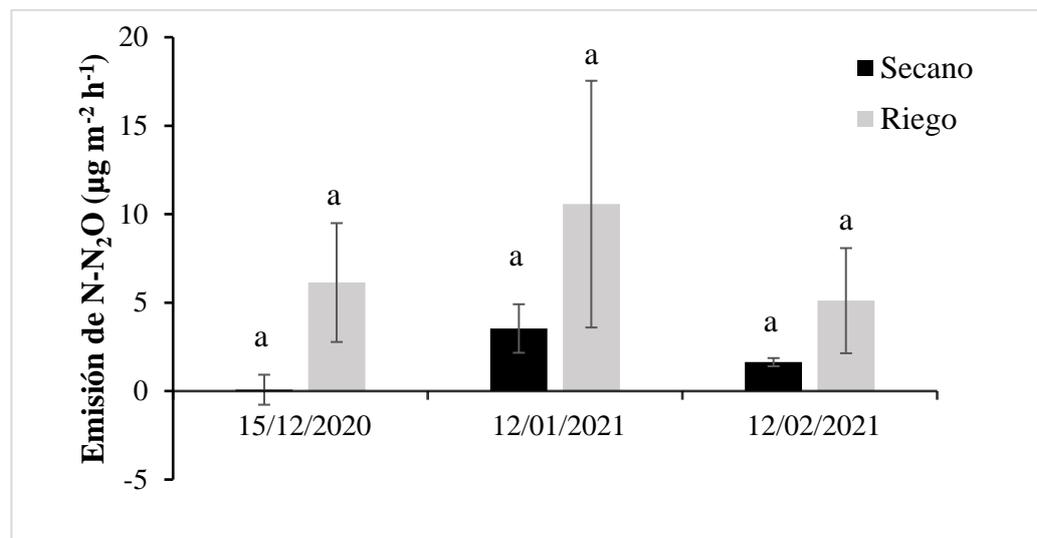


Figura 13

Flujos de N-N₂O en diferentes fechas de muestreo en diferentes condiciones.

Nota: Letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p > 0,05$). Las barras indican el error estándar.

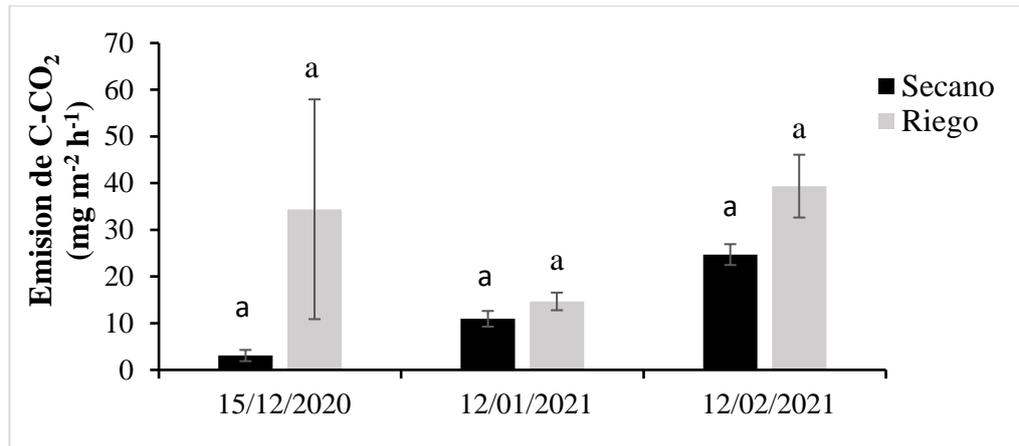


Figura 14

Flujos de C-CO₂ en diferentes fechas de muestreo en diferentes condiciones.

Nota: Letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p > 0,05$). Las barras indican el error estándar.

La temperatura del suelo (Figura 15) no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Secano y Riego) en ninguna de las fechas de medición. Los valores de temperatura variaron entre 18 y 23 °C.

La concentración de nitratos (NO₃⁻) del suelo (Figura 16) no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas de medición. El mayor contenido de nitratos en el suelo fue en la primera fecha de medición con un promedio de 72,88 ppm N-NO₃⁻ mientras que el contenido más bajo de nitrato en el suelo fue en la segunda fecha de medición con un promedio de 20,67 ppm N-NO₃⁻. La concentración de nitratos del suelo promedio durante las fechas de medición fue 40,51 ppm N-NO₃⁻, oscilando entre 19,43 ppm N-NO₃⁻ y 80,43 ppm N-NO₃⁻.

El porcentaje de espacio poroso lleno de agua (EPLLA) del suelo (Figura 17) tampoco presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en las dos primeras mediciones. Sin embargo, en la última fecha de medición, el tratamiento Riego tuvo mayor % de EPLLA con respecto al tratamiento Secano, siendo este aumento

estadísticamente significativo. El % EPLLA del suelo promedio durante las fechas de medición fue 47,49 %, los valores fluctuaron entre 27,23 % y 66,26 %.

Los resultados de realizar regresión lineal múltiple de la emisión de N₂O con los factores ambientales (temperatura del suelo, NO₃⁻ y EPLLA) no mostró ninguna relación estadísticamente significativa. Del mismo modo, al someter a una regresión lineal simple la emisión de N₂O con cada factor ambiental no se consiguió ninguna relación estadísticamente significativa ($p > 0,05$). Tampoco la emisión de N₂O se relacionó con la emisión de CO₂.

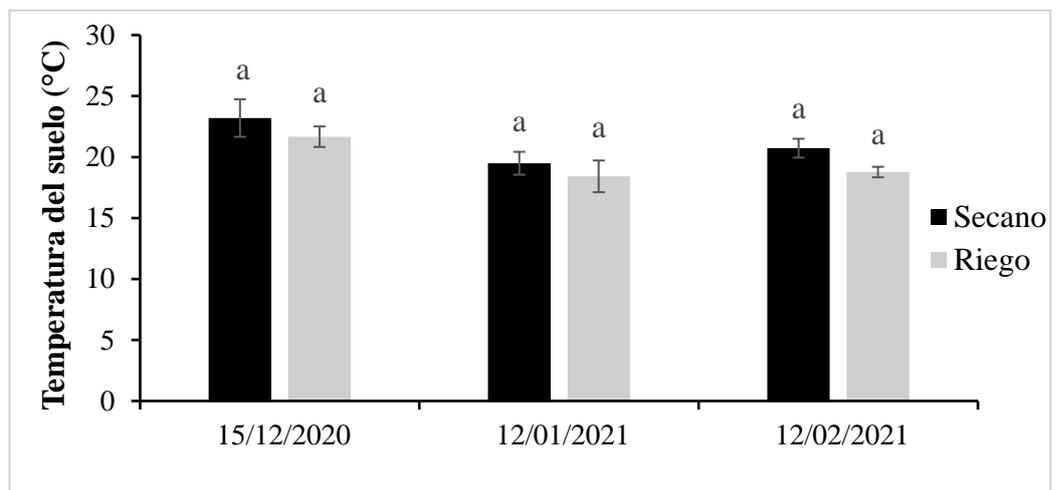


Figura 15

Temperatura del suelo a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada

Nota: Letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p > 0,05$). Barras indican el error estándar.

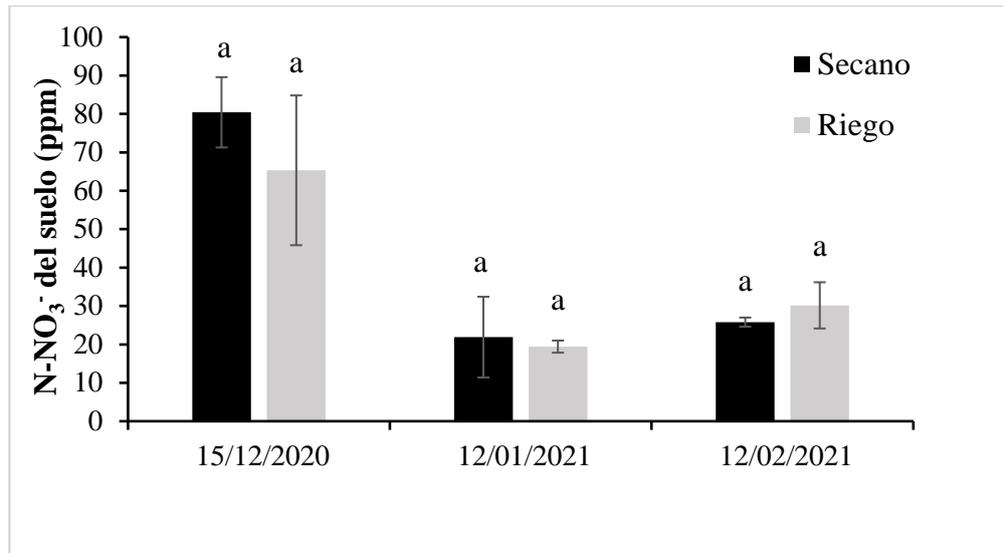


Figura 16

Contenido de nitrato del suelo a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada

Nota: Letras iguales indica diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p > 0,05$). Barras indican el error estándar.

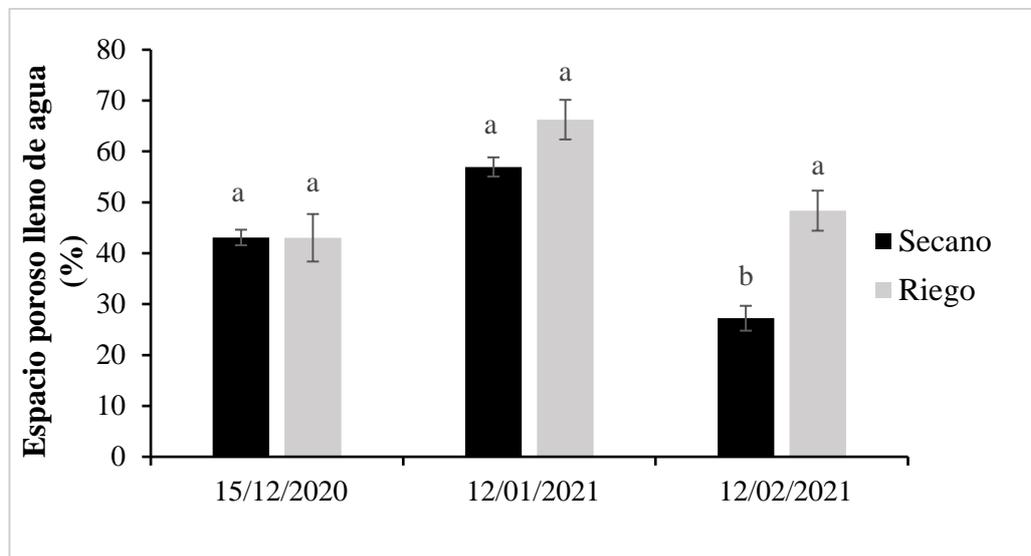


Figura 17

Espacio poroso lleno de agua del suelo (EPLLA) a 0–5 cm de profundidad en diferentes fechas de muestreo para cada situación evaluada

Nota: Letras diferentes indica diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p < 0,05$). Barras indican el error estándar.

La emisión acumulada durante el periodo analizado de óxido nitroso (15/12/2020 al 12/02/2021) tampoco mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Figura 18), a pesar de que el valor de emisión de óxido nitroso del tratamiento Riego fue 3,65 veces mayor que el tratamiento Secano.

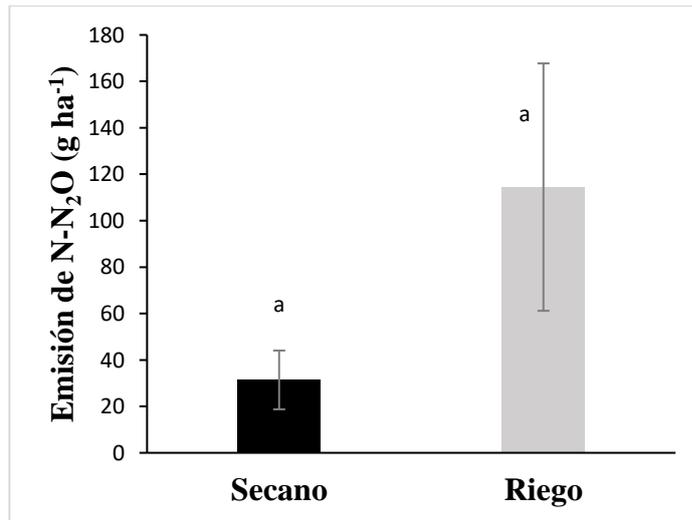


Figura 18

Emisión acumulada de N-N₂O del suelo para el periodo de 59 días para cada tratamiento.

Nota: Letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($p > 0,05$). Las barras indican el error estándar. El p-valor a dos colas fue igual 0,298.

. El riego complementario no afectó los flujos de óxido nitroso en ninguna de las fechas de medición (Figura 16), el cual coincide con un estudio realizado por Wulf et al. (1999) en Kenia, donde compararon la emisión de N₂O entre cultivo bajo seco y bajo riego por escorrentía. Por otra parte, nuestros resultados discrepan con los de Lam, et al. (2013), quienes a pesar de haber realizado una fertilización homogénea en sus tratamientos encontraron que el riego complementario disminuye la emisión de óxido nitroso con respecto al de seco, los cuales fueron atribuidos a la reducción del N₂O a N₂ inducidos por el alto % de EPLLA.

La falta de efecto del riego complementario en la emisión de óxido nitroso con respecto al de secano puede ser debido a que las variables que predisponen la emisión (la temperatura del suelo, el contenido de nitratos en el suelo y el % de EPLLA) fueron similares entre los tratamientos (estadísticamente no significativos en su mayoría, Figuras 18, 19 y 20). Si bien es cierto que el tratamiento Riego recibió casi el doble de fertilización nitrogenada (110 y 200 kg de nitrógeno para Riego y Secano, respectivamente), también debemos mencionar que parte de ésta fue fraccionada en el tiempo (en siembra, en V3 y V5), además, los fertilizantes nitrogenados depositados en el suelo podrían haber estado en otras formas no nítricas o se hayan perdido por las diferentes vías existentes (Sainju et al., 2009), tanto así que no se pudo observar diferencias estadísticas significativas en los contenidos de nitratos (N-NO_3^-) entre los tratamientos durante el muestreo del suelo. La falta de significancia estadística del % de EPLLA en las dos primeras fechas de medición puede ser debido a que días antes de las tomas de muestra había llovido considerablemente, el cual mantuvo la humedad del suelo de manera similar para ambas situaciones (Secano y Riego). En cuanto a la temperatura del suelo, la humedad similar que hubo en los tratamientos podría haber afectado en la temperatura del suelo, dado que tampoco hubo diferencia estadística de la temperatura del suelo entre los tratamientos. Esto puede ser justificado por la capacidad que tiene el agua de regular la temperatura Hillel (1998).

La tasa de emisión de óxido nitroso para los tratamientos como se había mencionado anteriormente osciló entre 0,08 y 10,57 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, los cuales son bajos en comparación con otros estudios en la región pampeana, pero son parecidos en la variación de los valores. Por ejemplo, Casanave Ponti et al. (2020) encontraron flujos de óxido nitroso en el cultivo de maíz que variaron desde 4,00 hasta 103,71 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Del mismo modo, Lewczuk (2017), en este mismo cultivo observó una emisión

promedio de $10,3 \pm 21,5 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Además, de acuerdo con Cosentino (2015) los valores que obtuvimos se encuentran dentro del rango reportado en sistemas de producción agrícolas, donde se observaron tasas de emisión desde -15 hasta $314 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Los bajos flujos de N_2O pueden estar causados debido a que en la mayoría de las fechas de medición los porcentajes de EPLLA estuvieron por debajo del 60 %, el cual no está considerado como el óptimo para el proceso de la desnitrificación (Linn y Doran, 1984; Pimentel et al., 2015). Por lo tanto, se podría decir que la mayor parte de lo poco que se emitió de óxido nitroso, podría haber sido causado por el proceso de nitrificación. Estas bajas emisiones por nitrificación podrían estar ocasionadas por las temperaturas del suelo que variaron entre 18 y 23 °C, fuera del rango óptimo, considerado por algunos autores, los cuales mencionan que la temperatura óptima para alcanzar mayores emisiones de óxido nitroso por nitrificación está entre 35 y 40 °C (Lai et al., 2019) y 38 °C (Prentice, 2008).

Las emisiones de óxido nitroso acumulado durante el periodo de mediciones fueron similares en ambos tratamientos (no significativos estadísticamente). Estos resultados eran de esperarse debido a que en cada fecha de medición las comparaciones fueron estadísticamente no significativas. No obstante, en un estudio en el noroeste de Kenia a pesar de que las emisiones en lotes regados en cada momento de evaluación eran mayores a los de secano, en el acumulado fueron estadísticamente no significativos (Wulf et al., 1999). En estos casos, las lluvias y los momentos de medición son las que podrían estar influyendo en la emisión de óxido nitroso, pues si llueve un mayor número de veces, entonces se regará menos, y si las mediciones de óxido nitroso se realizan cercanas a los momentos de lluvias probablemente las emisiones sean similares en ambos casos (Secano

y Riego), esto siempre y cuando los otros factores predisponentes de emisión también sean parecidos en ambos tratamientos.

Las emisiones que se obtuvo para un periodo de 59 días fueron de 31,4 y 114,45 g N-N₂O ha⁻¹ para los tratamientos Secano y Riego, respectivamente. Estos valores no son lejanos de los que encontraron Picone et al. (2013) en un periodo de estudio de 146 días en el cultivo de maíz sometido a dos distintos manejos (emisiones de 273 y 227 g N₂O ha⁻¹ para los sistemas de producción intensivo sustentable y productor medio, respectivamente).

Por otra parte, no existe relación entre la tasa de emisión de óxido nitroso y las variables ambientales, tales como la temperatura del suelo, el EPLLA y el contenido de nitratos del suelo. La relación más cercana que tuvo el flujo de óxido nitroso fue con el EPLLA con un $R^2 = 0,50$ pero el modelo no fue estadísticamente significativo ($p = 0,11$). Estos resultados discrepan con la mayoría de estudios debido a que los flujos de N₂O siempre están relacionados con la mayoría de los factores ambientales (temperatura del suelo, % EPLLA y contenido de nitratos del suelo) o al menos con uno de ellos (Cosentino, 2015; Lewczuk, 2017; Wang et al., 2019). No obstante, un estudio en Brasil si coincide en parte con esta tesis, dicho estudio muestra que los flujos de N₂O no se relacionaron significativamente con el % EPLLA ni con el contenido de nitratos (Jantalia et al., 2008). Estos últimos justifican sus resultados sugiriendo la existencia de ciertos lugares donde los factores de emisión de N₂O podrían haber sido excepcionalmente intensa, pero que estos puntos no fueron bien caracterizados por la metodología de muestreo. Lo que se puede sugerir a partir de esto es que podría haber otro factor u otros factores que no se tuvo en cuenta que estén influyendo en la emisión de óxido nitroso.

La limitante en este capítulo podría ser la poca cantidad de mediciones que se plantearon (3 fechas) y el número de repeticiones (3 lotes). Adicionalmente, las fechas de

siembra del cultivo de maíz fueron diferentes para cada unidad experimental hasta en el mismo tratamiento, por lo que los momentos de fertilización y las láminas de riego fueron distintos. Estas limitantes podrían haber afectado o influido en la cuantificación de los flujos de óxido nítrico. Por lo tanto, ampliar el número de fechas de medición, el número de lotes y uniformizar las fechas de siembra en los tratamientos podrían ayudarnos a definir mejor los efectos del riego complementario sobre la emisión de óxido nítrico del suelo. No obstante, este estudio puede servir como antecedente para futuras investigaciones.

4.4 Conclusiones del capítulo

La emisión de óxido nítrico bajo condiciones de este estudio no fue afectada por riego complementario. Las emisiones no variaron significativamente entre los tratamientos (Secano y Riego). Por lo tanto, se tuvo que rechazar la hipótesis que se había propuesto. Los principales factores de emisión que se midieron (contenido de nitratos, temperatura del suelo y EPLLA) tampoco mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, estos podrían haber conducido a obtener los resultados que se obtuvieron en la emisión de óxido nítrico. En este contexto, el riego complementario por ahora no sería un factor dominante en cuanto a la emisión de óxido nítrico.

CAPÍTULO V: Síntesis final

La adopción del riego complementario (por pivot) en el sudoeste bonaerense es una práctica cada vez más frecuente que contribuye a estabilizar y mejorar los rendimientos de los cultivos, a aumentar la producción y mejorar el beneficio económico del productor. Por otra parte, incrementos en la productividad de los cultivos podrían impactar positivamente sobre las entradas de carbono al suelo favoreciendo el balance de carbono edáfico. Sin embargo, las aguas que se utilizan para el riego en la región son bicarbonatadas sódicas, pudiendo impactar negativamente sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos y sobre la productividad. Así mismo, en general los lotes en que se realiza riego tienen como destino la producción de semillas. En estos planteos el protocolo de manejo es diseñado por la empresa semillera y generalmente implica mayor tránsito dentro de los lotes, tanto por el riego como por la aplicación de diferentes insumos.

A partir de la situación planteada, se desarrolló esta tesis con el objetivo de evaluar: 1) el efecto del riego complementario sobre las propiedades químicas y el carbono orgánico del suelo (capítulo II), 2) el efecto del riego complementario sobre las propiedades físicas del suelo (capítulo III) y 3) el efecto del riego complementario sobre la emisión de óxido nitroso (capítulo IV).

Los lotes manejados con riego por pivote presentan un sector denominado córner, que no recibe riego. Esta situación permitió establecer los tratamientos de riego y secano (corner sin riego) para cumplir con los objetivos mencionados y probar las hipótesis que se mencionan a continuación.

Las hipótesis del capítulo II fueron:

1) “El riego complementario con aguas de dudosa o riesgosa aptitud produce un aumento marcado del PSI del suelo, mientras que la CE y el pH del suelo aumentan muy ligeramente”.

2) “El riego producirá un incremento del carbono orgánico del suelo en el estrato de 0-20 cm de profundidad”.

El riego complementario, respecto de la situación de secano, produjo incrementos significativos del pH, la conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) del suelo tanto en la profundidad 0-10 como 10-20 cm. Si bien ninguna de las tres variables evaluadas superó los niveles críticos, considerados en la literatura como limitantes de la producción, el PSI fue la variable que presentó mayor incremento relativo por efecto del riego, en comparación a los incrementos producidos en la CE y el pH del suelo. El carbono orgánico del suelo no presentó diferencias significativas entre las situaciones de riego y secano tanto en la profundidad de 0-10 cm como de 10-20 cm. De acuerdo con estos resultados se aprueba la Hipótesis 1 y se rechaza la Hipótesis 2.

La hipótesis del capítulo III fue:

“El riego complementario aumenta la densidad aparente y la resistencia a la penetración y conduce a la disminución de la tasa de infiltración del suelo aún con valores de PSI inferiores al límite crítico de 15%”.

El riego complementario no afectó significativamente la densidad aparente, la resistencia a la penetración ni la tasa de infiltración del suelo, en ninguna de las profundidades evaluadas. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis planteada.

La hipótesis del capítulo IV fue:

“Los lotes bajo riego complementario presentan mayor emisión de N_2O debido a la mayor humedad y fertilización nitrogenada”.

Las emisiones de óxido nitroso no difirieron significativamente entre las situaciones de riego y seco. Los principales factores de emisión como contenido de nitratos, temperatura del suelo y espacio poroso lleno de agua tampoco presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de riego y seco. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis propuesta.

En este contexto, se concluye que, para las condiciones de la zona de estudio, el riego complementario puede aumentar el pH en un aproximado de 6%, la conductividad eléctrica en un aproximado de 28 % y el PSI en un 130 %. No obstante, el porcentaje de carbono orgánico en el suelo no fue afectado.

Por otro lado, los incrementos en las propiedades químicas del suelo, el mayor tránsito de maquinaria agrícola y la mayor coincidencia de paso de maquinaria en momentos de baja capacidad portante del suelo, no se reflejaron en las propiedades físicas evaluadas (densidad aparente, resistencia a la penetración y tasa de infiltración). Asimismo, no se encontró efectos del riego complementario sobre las emisiones de óxido nitroso.

Los aportes de esta tesis fueron:

Se ha generado información para una zona con una fuerte adopción de riego complementario.

Es uno de los primeros estudios de emisión de óxido nitroso bajo riego complementario en Argentina.

En futuras investigaciones se recomienda lo siguiente:

Plantear la evaluación del uso de enmiendas para reducir la sodicidad del suelo generada por el riego complementario.

Considerar realizar evaluaciones de las propiedades físicas en mayor cantidad de lotes bajo riego complementario para poder realizar un análisis conjunto con las propiedades químicas, el carbono del suelo y las emisiones de óxido nitroso.

Las mediciones de las emisiones de óxido nitroso se deberían realizar a lo largo del cultivo, distribuyendo las mediciones de forma que coincidan tanto con episodios de lluvias como distantes de estos para generar un amplio rango de humedad edáfica.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R., Steinbach, H. S., & De Paepe, J. L. (2015). Carbono orgánico. Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana (Ed. R Alvarez) pp, 47-91.
- Álvarez C.R., H. Rimski-Korsakov, H.S. Steinbach, A. Gonzalez, F. Mayol, J. Rosso Alba, E. Sabatté, G. y Peralta (2019). (22 al 25 de julio de 2019). Efecto del riego suplementario en el sudoeste bonaerense sobre las propiedades físico-químicas del suelo. [Presentación de trabajo] VI Congreso de la red argentina de la salinidad, "los diferentes medios salinos y alcalinos y el análisis de su desafío en diferentes escalas de percepción". Buenos Aires, Argentina.
- Alvarez, C. R., Rimski Korsakov, H. y Torres Duggan, M. (2020-1). Effects of supplementary irrigation on soils and crops in sub-humid areas in the Pampas Region of Argentina. En E. Taleisnik y R. S. Lavado (Eds.), *Saline and Alkaline soils in Latin America: Natural Resources, Management and Productive Alternatives*. (pp. 285-294). Springer Nature.
- Álvarez, C. R., Rimski Korsakov, H. y H.S. Steinbach (2020-2). (13 al 16 de octubre de 2020). Efecto del riego suplementario en el sudoeste bonaerense sobre las propiedades físicas del suelo. [Presentación de trabajo] XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, "Suelos: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables". Corrientes, Prov. de Corrientes, Argentina.
- Aliaga, V. S. (2020). Tendencia y variabilidad climática; subregiones pampeanas, Argentina (1960-2010). *Boletín geográfico*, 42(1), 13-32.
- Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, W., Jones, J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*, Madison, WI, 1996. *Soil Sci. Soc. Am.* 49, 123–141 (special publication).
- Ashwort, J.; Keyes, D.; Kirk, R. and Lessard, R. (2001). Standard procedure in the Hydrometer method for particle size analysis. *Com in Soil Science and plant Analysis*, 32(5-6), 633-642.
- Auge, M. P. (2004). *Regiones hidrogeológicas de la República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe*. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea. Editorial propia, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Ayers, R.S., & Westcot D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. *Irrigation and drainage, Paper 29 (1)*, Roma, Italia, pp.174.
- Ayers, A. S., & Westcot, D. W. (1976). *Calidad del agua para la agricultura*. 29. FAO. Roma.
- Baridón, J.E. y Pellegrini, A.E. (2020). Afectación de propiedades físicas y químicas en hapludalfes y natrudalfes con riego en Formosa-Argentina. XXVII Congreso Argentino

- de la Ciencia del Suelo.
- Barrionuevo, N., Waldman, C. P., & Martinez, R. S. (2023). Análisis espacio temporal del riego por pivote central en la provincia de Buenos Aires en el período 1995-2020. Ediciones INTA.
- Brady, N. C. (1984). The nature and properties of soils.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2014). Elements of the nature and properties of soils. 3rd ed. London.
- Brady, N. C., & Weil, R. (2017). The nature and properties of soils: Pearson New International edition. Pearson.
- Bollón, AE. (2015). Efectos de distintos métodos de despanojado de líneas endocriadas de maíz (*zea mays sp.*) sobre el rendimiento en grano. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina
- Burke, W., Gabriels, D., & Bouma, J. (1986). Soil structure assessment: AA Balkema. Rotterdam, Netherlands, 30-31.
- Calderon, F. J., & Jackson, L. E. (2002). Rototillage, disking, and subsequent irrigation: Effects on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux. *Journal of Environmental Quality*, 31(3), 752-758.
- Campos, R., Pires, G. F., and Costa, M. H. (2020). Soil Carbon Sequestration in Rainfed and Irrigated Production Systems in a New Brazilian Agricultural Frontier. *Agriculture*, 10(5), 156. doi:10.3390/agriculture10050156.
- Casanave Ponti S.M., Videla C., Monterubbianesi M.G., Rizzalli R.H., García F.O., Ortega F.M., Kreis M.P. y Andrade, F.A. (2020). Mediciones intensivas de emisiones de óxido nitroso en una rotación soja-cebada-maíz con diferente nivel de intensificación. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Suelos: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables" Corrientes, Prov. de Corrientes, Argentina 13 al 16 de octubre de 2020.
- Collier, S.M., Ruark, M.D., Oates, L.G., Jokela, W.E., and Dell, C.J. (2014). Measurement of Greenhouse Gas Flux from Agricultural Soils Using Static Chambers. *J. Vis. Exp.* (90), e52110, doi:10.3791/52110 (2014).
- Costa, J. L., & Aparicio, V. C. (2015). Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agricultural Water Management*, 159, 299-306.
- Cosentino, Vanina Rosa Noemí (2015). Factores y procesos que afectan la emisión de óxido nitroso en un suelo pampeano manejado con siembra directa. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Disponible en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad de Buenos Aires: <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2015cosentinovaninar>

[osanoemi](#)

- De Bona, F.D., Bayer, C., Bergamaschi, H., Dieckow, J. (2006). Soil organic carbon in sprinkler irrigations systems under no-till and conventional tillage. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 30, 911–919.
- Denef, K., Stewart, C. E., Brenner, J., & Paustian, K. (2008). Does long-term center-pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agro-ecosystems?. *Geoderma*, 145(1-2), 121-129.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión (2018). Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- FAO. (2015). "Estudio del potencial de Ampliación del riego en Argentina". UTF/ARG/017/ARG. Desarrollo institucional para la Inversión. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires. Argentina.
- FAO. (2022). Land use [online]. Rome. [Consultado en octubre 2022]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. (2018). The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition. Rome, FAO.
- FAO, (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. [Consultado en Junio 2021]. <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>
- Foley JL, Tolmie PE, Silburn DM. (2006). Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method. *Australian Journal of Soil Research* 44, 701–710. doi:10.1071/SR05195
- Forte Lay, J., Scarpati, O., Capriolo, A. (2008). Precipitation variability and soil water content in Pampean Flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*, 47 (4), 341-354.
- Giubergia, J. P. (2013). Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa (disertación Doctoral, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires).
- Gillabel, J., Denef, K., Brenner, J., Merckx, R., & Paustian, K. (2007). Carbon sequestration and soil aggregation in center-pivot irrigated and dryland cultivated farming systems. *Soil Science Society of America Journal*, 71(3), 1020-1028.
- Ghiberto, P.J., Pilatti, M.A., Imhoff, S., de Orellana, J.A. (2007). Hydraulic conductivity of Molisolls irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). *Agricultural water management*, 88, 192-200.
- Ghimire, U., Shrestha, N. K., Biswas, A., Wagner-Riddle, C., Yang, W., Prasher, S., ... & Daggupati, P. (2020). A review of ongoing advancements in soil and water assessment tool (SWAT) for nitrous oxide (N₂O) modeling. *Atmosphere*, 11(5), 450.

- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.
- INTA. (sin fecha). Carta de Suelos de la República Argentina: 3960 - 01 - estación Pillahuincó. [Consultado en septiembre 2021]. http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3960/Est_Pillahuinco/index.htm.
- INTA. (1999). Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG.
- IPCC. (2019). Resumen para responsables de políticas. En: *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres* [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.
- Iseas, M. S.; Sainato, C. M.; Gómez, A.; Romay, C. (2024). Assessing salinity and sodicity of irrigated soils using apparent electrical conductivity in the Pampean region. *Environ Earth Sci* 83, 378 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11643-w>. Jackson, M.L. 1958. *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Jantalia, C., Santos, H., Urquiaga, S., Boddey, R., Alves, B. (2008). Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 82, 161-173.
- Keeney, D. R., & Nelson, D. W. (1982). Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 643-698.
- Kumar, A., Chen, Y., Sadek, M. A. A., & Rahman, S. (2012). Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(1), 26-37.
- Lai, T. V., Farquharson, R., & Denton, M. D. (2019). High soil temperatures alter the rates of nitrification, denitrification and associated N₂O emissions. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2176-2189.
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal, R. 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 815-830.
- Lam, S. K., Chen, D., Norton, R., Armstrong, R., & Mosier, A. R. (2013). Influence of elevated atmospheric carbon dioxide and supplementary irrigation on greenhouse gas emissions from a spring wheat crop in southern Australia. *The Journal of Agricultural*

- Science*, 151(2), 201-208.
- Lewczuk, N. A. (2017). Estudio de las emisiones de óxido nitroso en sistemas agrícolas de la región pampeana. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Linn, D.M., and Doran, J.W. (1984). Effect of Water Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Non-Tilled Soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 48, 1267-1272.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2000). Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements. *Geoderma*, 95(3-4), 305-324.
- Marini, M. F. (2023). Actualización de superficie bajo riego con pivot central en el sudoeste bonaerense utilizando imágenes satelitales. Agencia de Extensión Rural Bahía Blanca, INTA.
- Marinissen, A. N. (2008). Impacto económico del riego complementario en el sudoeste bonaerense.
- Mermut, A.R., Amundson, R., Cerling, T.E. (2000). The use of stable isotopes in studying carbonate dynamics in soils. En: Lal, R., Kimble, J.M., Eswaran, H., Stewart, B.A. (Eds.). *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 65-85.
- Mon, R., Iurrtia, C., Botta, G. F., Pozzolo, O., Bellora Melcón, F., Rivero, D., and Bomben, M. (2007). Effects of supplementary irrigation on chemical and physical soil properties in the rolling pampa region of Argentina. *Cien. Inv. Agr.* 34(3),187-194.
- Moreira Muzio, M., Gaioli, F., y Galbusera, S. (2019). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero: Argentina, 2019*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Oweis, T. and Hachum, A. 2012. Supplemental irrigation, a highly efficient water-use practice. ICARDA, Aleppo, Syria. iv + 28 pp.
- Peech, M. (1965). Method for soil pH in water. Hydrogen-ion activity. En: *Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Black, CA. 915-926.
- Peralta, G., Agosti, B., Gil, R.C., Rimski Korsakov, H. y Alvarez, C.R. (2019). Impacto del riego complementario sobre las propiedades físico químicas del suelo en el norte de la Provincia de Buenos Aires. *Actas VI Congreso de la Red Argentina de Salinidad*: <https://redsalinidad.com.ar/wp-content/uploads/2021/04/Actas-RAS-2019.pdf>, Buenos Aires.
- Perroux, K. M., & White, I. (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52(5), 1205-1215.
- Picone, L., Videla, C., Bayer, C., Rizzalli, R. and García, F. (2013). Emisiones de óxido

- nitroso y dióxido de carbono en maíz bajo sistemas de producción con distinta intensificación. Proceedings Symposium Fertility 2013. IPNI LASC-Fertilizar AC, pp. 257–65.
- Pilatti, M.A., Imhoff, S., Ghiberto, P. y Marano, R.P. (2006). Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma*, 133, 431-443.
- Pimentel, L. G., Weiler, D. A., Pedroso, G. M., & Bayer, C. (2015). Soil N₂O emissions following cover-crop residues application under two soil moisture conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(4), 631-640.
- Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914–928.
- Prentice, I. C. (2008). Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 14(8), 1745-1764.
- Qadir, M., & Schubert, S. J. L. D. (2002). Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land degradation & development*, 13(4), 275-294.
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.
- Rodriguez, M.B., and Giambiagi, N. (1995). Denitrification in tillage and no tillage Pampean soils: Relationships among soil water, available carbon, and nitrate and nitrous oxide production. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26, 3205-3220.
- Robertson, G. P. and Groffman, P. M. (2015). Nitrogen transformations. Pages 421-446 in E. A. Paul, editor. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Fourth edition. Academic
- Romay, C., Sainato, C. M., Iseas, M. S., & Lemeillet, F. (2023). Comportamiento del proceso de infiltración del agua en un suelo bajo riego complementario. *Ciencia del suelo*, 41(1), 121-150. Press, Burlington, Massachusetts, USA.
- Ruser, R., Flessa, H., Russow, R.W., Schmidt, G., Buegger, F., & Munch, J.C. (2006). Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 263-274.
- Sainato, C., Galindo, G., and Heredia, O.S. (2006). *Agua subterránea: Explotación y su utilización agropecuaria*. 1 ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía. 115 pp.
- Sanchez, R.M., L Dunel Guerra, M Scherger. (2016). Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. Ediciones INTA, 74p.
- Saini, J., & Bhatt, R. (2020). Global Warming - Causes, Impacts and Mitigation Strategies in Agriculture. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39(7), 93-107. <https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i730580>.

- Sainju, U.M., Caesar-TonThat, T., Lenssen, A.W., Evans, R.G., Kol-berg, R. (2009). Tillage and cropping sequence impacts on nitrogen cycling in dryland farming in eastern Montana, USA. *Soil Tillage Res*, 103, 332–341
- Salamanca, A. y Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381-397.
- Servicio Meteorológico Nacional (sin fecha). Estadísticas de largo plazo: Coronel Pringles, Buenos Aires. [Consultado en mayo 2021]. <https://www.smn.gov.ar/estadisticas>.
- Schmidt, E. S. (2015). Modificaciones estructurales y funcionales de epipedones mólicos en suelos de la región pampeana semiárida bajo siembra directa continua.
- Smith, J. L., & Doran, J. W. (1997). Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. *Methods for assessing soil quality*, 49, 169-185.
- Soil Survey Division Staff (2017). *Soil Survey Manual*. United States Department of Agriculture Handbook No. 18.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Otros. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge y New York: Cambridge University Press - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Suarez, D.L., Wood, J.D., Lesch, S.M. (2006). Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agric. Water Manage.* 86, 150–164.
- Sumner, M. E. (1993). Sodic soils-New perspectives. *Soil Research*, 31(6), 683-750.
- Shukla P.R., J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira (eds.). (2019). Technical Summary. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Taboada, M., y C. Álvarez. 2008. *Fertilidad física de los suelos*. Ed. Facultad Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina.
- Torres Duggan M, CR 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
- Torres Duggan, M., Alvarez, C. R., Taboada, M. A., Celesti, T., Vignarolli, F., & D'ambrosio, D. (2012). Riego complementario en un argiudol típico de la pampa ondulada Argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo. *Ciencia del suelo: revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 30(2),

- 201-207.
- Trost, B., Prochnow, A., Drastig, K., Meyer-Aurich, A., Ellmer, F., Baumecker, M. (2013). Irrigation, soil organic carbon and N₂O emissions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 33 (4), 733-749.
- US Salinity Laboratory Staff (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture Handbook 60, Washington, DC.
- Wang Y, Yang P, Ren S, He X, Wei C, Wang S, Xu Y, Xu Z, Zhang Y, Ismail H. (2019). CO₂ and N₂O Emissions from Spring Maize Soil under Alternate Irrigation between Saline Water and Groundwater in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 16, 2669; doi: 10.3390/ijerph16152669.
- Wulf, S., Lehmann, J., and Zech, W. (1999). Emissions of nitrous oxide from runoff-irrigated and rainfed soils in semiarid north-west Kenya. *Agr Ecosyst Environ*, 72, 201–205.
- Wunderlin, P., Mohn, J., Joss, A., Emmenegger, L., & Siegrist, H. 2012. Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. *Water research*, 46(4), 1027-1037.
- Zhang, H.B., Han, K., Gu, S.B., and Wang, D. (2019). Effects of supplemental irrigation on the accumulation, distribution and transportation of ¹³C-photosynthate, yield and water use efficiency of winter wheat. *Agric Water Manag*, 214,1–8.