

¿PUEDE EL RIEGO REHABILITAR TIERRAS PARA AGRICULTURA?

Carnevale, I^{1,✉}; Marano, RP¹; Imhoff, S^{1;2}; Damiano, FF³ y Jobbágy, EG⁴.

1. Facultad de Cs. Agrarias. Universidad Nacional del Litoral

2. CONICET Santa Fe

3. Instituto de Clima y Agua. INTA

4. IMASL, Universidad Nacional de San Luis. CONICET San Luis

✉ Fac. de Cs. Agrarias. UNL. Kreder 2805. Esperanza (S3080HOF), Sta Fe. Argentina. Tel/Fax: +54(3496)426400

E-mail: icarnevale@unl.edu.ar

RESUMEN

El avance del riego es comúnmente considerado ambientalmente riesgoso debido a la fuerte competencia con otros usos del agua dulce y sus posibles efectos negativos sobre la fertilidad de los suelos. Sin embargo, en algunos contextos la competencia puede ser baja y los efectos sobre el suelo positivos. Se analizó la evolución de un lote cultivado con arroz bajo riego superficial con agua de río y se lo comparó con áreas adyacentes bajo vegetación natural. En el horizonte superficial se determinó pH, salinidad, carbono total, porcentaje de materia orgánica, contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , suma de bases, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de sodio intercambiable, saturación catiónica y relaciones entre cationes principales. También se analizó calidad y dinámica de aguas subterráneas y superficiales. La concentración de Na^+ intercambiable del lote estudiado disminuyó luego de 10 años de cultivo de arroz continuo, principalmente debido al riego con agua de buena calidad, mientras que el PSI mantuvo valores superiores al recomendado. El pH evolucionó de alcalino a levemente ácido en este periodo. La concentración de Ca^{2+} disminuyó hasta alcanzar niveles menores al rango sugerido para alta productividad de arroz. La salinidad inicial del lote cultivado fue inferior a la de las condiciones naturales y aunque tuvo incrementos en el periodo estudiado no alcanzó valores limitantes. La salinidad del agua fue baja al ingreso y a la salida del canal principal de riego, presentando las aguas de drenaje, durante el cultivo, también baja salinidad. La profundidad del manto freático fue variable durante el periodo de riego, sin alcanzar a saturar el perfil. La salinidad del acuífero superficial no manifestó correlación ni con su profundidad ni con el pH y presentó contenidos salinos variables, resultando afectados en algunos casos por los canales de riego y de drenaje. Se estimó que en cada campaña infiltra entre 100 y 600 mm que favorecen la dilución y/o lavado de las sales del suelo. Las mejoras edáficas generadas por el riego en estas tierras originalmente consideradas no agrícolas las habilitarían para el cultivo de arroz (posiblemente no para cultivos de secano) y para el establecimiento de pasturas.

Palabras clave: arroz, salinidad, sodicidad, agua superficial, humedales

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos para satisfacer a una población mundial en aumento se ve limitada por la disponibilidad de recursos, principalmente de tierras y aguas. Para el 2050 se necesitaría aumentar la producción agropecuaria un 70 % (100% en los países en desarrollo) para satisfacer las necesidades de la población. Ello se traduce en un billón de toneladas de cereal y en 200 millones de toneladas de carne anuales. Se prevé que el 90% (80% en los países en desarrollo) del aumento de producción deberá ser resultado de mayores rendimientos y del incremento de la intensificación, y el remanente de la incorporación de nuevas tierras cultivables. Este último aspecto se espera que sea mayor en África y en Latinoamérica. Por otro lado, la disponibilidad de agua dulce sigue la misma tendencia que las tierras cultivables, si bien es globalmente suficiente, está distribuida desigualmente (FAO, 2009).

En este contexto de escasez y competencia de recursos, la aplicación de riego permitiría aumentar la productividad y habilitar nuevas tierras que actualmente tienen bajo índice de aptitud para la producción de alimentos. Sin embargo, malas prácticas asociadas al riego podrían favorecer problemas de salinización y degradación de suelos. Estos efectos son bien conocidos en zonas áridas, donde la magnitud de los incrementos en la salinidad depende del tipo y concentración de sales presentes en las aguas, del manejo del riego y de la eficiencia del drenaje (Ayers y Westcot, 1985). En ambientes húmedos a sub-húmedos la alternancia de excesos y déficits hídricos asociada a un drenaje impedido puede ocasionar que las sales se acumulen en la superficie. El balance salino está intrínsecamente ligado al balance hidrológico, por lo que cuando el riego es incorporado como práctica agronómica, de acuerdo a su cantidad y calidad, puede modificar la dinámica de sales, mediando su transporte, redistribución y acumulación en los suelos y paisajes (Rhoades *et al.*, 1990; Hillel, 2000).

El arroz (*Oryza sativa L.*) es una de las principales fuentes de alimento del mundo. Su cultivo se realiza en diversos ambientes, pero mayormente bajo riego. Es el cultivo con mayor uso del suelo a nivel mundial para la producción de alimentos, ocupando 9% de la superficie cultivable del planeta, es decir, más de 125 millones de hectáreas. De éstas, 79 millones de hectáreas son irrigadas, representando el 75% de la producción de arroz mundial (Maclean *et al.*, 2002).

En diversas zonas del mundo donde se cultiva arroz se ha estudiado el efecto del agua de riego sobre la salinización de suelos y de acuíferos. En general el problema más común es el de la salinización de tierras originalmente no salinas ni sódicas, especialmente bajo climas secos. Sin embargo, el efecto inverso, es decir la mejora de los suelos, también es posible. En el Sahel, región semi-árida del oeste africano, se cultiva arroz desde hace más de 30 años sobre suelos originalmente salino-sódicos y de textura fina con fuentes de aguas superficiales alcalinas. La evolución histórica de la salinidad y alcalinidad de esos suelos y la proyección futura, a través de modelos de simulación, muestra que no se presentan en el suelo procesos de salinización y de alcalinización secundarios y que con un adecuado manejo del rastrojo y del drenaje se pueden mejorar estos suelos (van Asten *et al.*, 2004; Hammecker *et al.*, 2009). Incluso se ha documentado que en suelos del delta del río Senegal bajo doble cultivo de arroz la salinidad disminuye como consecuencia de la lámina de agua que se mantiene en el cultivo, debido a que se evita el ascenso capilar desde el manto freático salino (Wopereis *et al.*, 1998)

La superficie sembrada con arroz en Argentina se mantiene en el orden de 220 mil hectáreas, representado tan sólo 0,2% de la superficie y 0,3% de la producción mundial (Pagliettini *et al.*, 1997; Maclean *et al.*, 2002; ACPA, 2010). El cultivo de arroz en Argentina es realizado bajo riego por superficie, la fuente de agua tiene diverso origen: en la provincia de Entre Ríos se utiliza

agua subterránea de tipo bicarbonatadas sódicas, de salinidad media y en algunos casos con embalses de agua superficial de buena calidad química (Benavidez *et al.*, 2006); en Corrientes se utiliza agua superficial embalsada en ríos, esteros, lagunas y represas (INTA y ACPA, 2008) y en Santa Fe se dispone agua de muy buena calidad y en cantidad proveniente de brazos del río Paraná (Pilatti *et al.*, 2003; Trímboli *et al.*, 2003). La provincia de Santa Fe participó en la campaña 2009/10 con el 16,2% en la superficie sembrada con arroz (figura 1) y con el 15,3% de la producción de este cereal a nivel nacional posicionándose como una de las provincias arroceras en el contexto nacional (ACPA, 2010).

En la provincia de Santa Fe el cultivo de arroz es realizado en el sector Este-Noreste, en la denominada Cuenca de los Saladillos, una extensa área deprimida que cubre una superficie próxima a las 600.000 ha. Al Oeste, el área limita con el domo oriental de la provincia de Santa Fe y algunos antiguos albardones y se identifica claramente por el incremento de la pendiente natural del terreno; el límite Este corresponde con el cauce del río San Javier (Gollán y Lachaga, 1939). Un rasgo ecológico particularmente importante del área es que más del 70% de su superficie está ocupada por “humedales”¹ (Pilatti *et al.*, 2003).

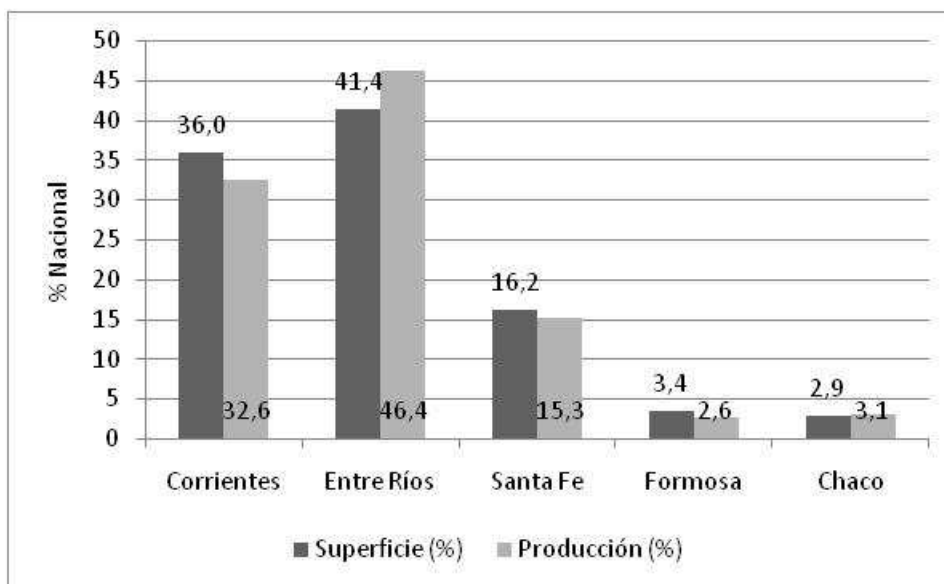


Figura 1: Participación de las provincias de Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Formosa y Chaco en la superficie sembrada y en la producción de arroz en la campaña 2009/10.

El 75 % del área tiene aptitud ganadera extensiva sobre pastizales naturales con índices de aptitud productiva inferior a 10. En general sólo son aptas para la utilización de pastizales naturales por ganado bovino de cría, con limitaciones extremadamente severas; la receptividad estimada es de 1 unidad ganadera cada 10 ha. Sólo el 10 % de las tierras presenta aptitud agrícola y ganadera. (Pilatti *et al.*, 2003).

¹ De acuerdo a la Convención Ramsar, o “Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional”, por humedales se entienden “extensiones de marismas, pantanos, y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en la marea baja no exceda de seis metros”. En términos generales, todos los humedales comparten una característica fundamental: el papel determinante del agua en la estructuración del ecosistema.

Esta área presenta como principal vulnerabilidad la afectación periódica por inundaciones alternadas con sequías, agravada por la existencia de suelos hidromórficos y salino-sódicos. Estas condiciones limitan severamente otros planteos agrícolas mientras que son favorables para el cultivo de arroz, contando también entre otras ventajas el aporte de agua de buena calidad y en cantidad suficiente para riego proveniente del río San Javier y su facilidad de extracción (Pilatti *et al.*, 2003; Trímboli *et al.*, 2003). En este contexto productivo, donde predomina la ganadería extensiva sobre pastizales naturales de baja receptividad, en 1942 se inició la actividad arrocera, logrando en la actualidad, por prueba y error, rendimientos promedio de arroz de 5,5 Mg ha⁻¹, cercanos a la media nacional de 5,8 Mg ha⁻¹ (ACPA, 2010). Los establecimientos arroceros en la cuenca son mixtos, alternan la actividad agrícola con la ganadería extensiva. Además, los motores diesel fueron reemplazados por motores eléctricos hace más de diez años, logrando una disminución en los costos de riego de alrededor del 70 %, lo cual coloca a la zona en una posición más competitiva respecto a otras áreas arroceras del país (Trímboli *et al.*, 2003).

El efecto de la aplicación de agua de buena calidad sobre suelos salinos sódicos en ambientes húmedos a sub-húmedos no está suficientemente evaluado. Por ello, el objetivo de este trabajo fue demostrar los efectos producidos por la aplicación de riego durante 10 campañas de arroz con aguas de bajo contenido de sales, en la calidad química de suelos salinos-sódicos en ambientes húmedos a sub-húmedos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se desarrolló en la localidad Colonia San Joaquín ubicada en el norte del departamento Garay, en la denominada Cuenca de Los Saladillos, en la Pcia. de Santa Fe, Argentina (30°42'50,8" S y 60°02'23,3" O). Las evaluaciones se realizaron en el Establecimiento San Joaquín, particularmente en el lote 9B y en condiciones prístinas del mismo bajo pastizales naturales y cañadas en distintas posiciones relativas en el relieve plano cóncavo (Figura 2). El establecimiento está dedicado principalmente a la producción agrícola y, en menor medida, a la actividad ganadera. El cultivo predominante es arroz, que ocupa actualmente una superficie mayor a 8000 ha en el establecimiento. Este cultivo es realizado bajo riego por superficie con agua proveniente del río Paraná, a través del río San Javier, durante aproximadamente 100 días al año y luego se drena antes de la cosecha.

El clima de la región es sub-húmedo húmedo (C2), mesotermal (B₃) (Mosconi *et al.*, 1981). El área se encuentra cubierta por bosques, sabanas, pajonales y praderas y bajos con comunidades hidrófilas (Hilgert *et al.*, 2003).

Las redes de drenaje de la cuenca están conformadas por el río San Javier hacia el este y los arroyos Saladillo Dulce y Saladillo Amargo hacia el oeste, los que funcionan como descarga de agua superficial y subterránea. Paralela al río San Javier, a menos de 1 km de la ribera, está emplazada la ruta provincial n°1, cuyas características constructivas ejercen influencia sobre la dinámica del agua subterránea, modificando los niveles freáticos hacia el oeste. Existen evidencias (Paine², com. pers.), a través de freatómetros colocados inmediatamente al oeste de la ruta de referencia y entre esta y la costa del río que, luego de una recarga general producida por

² Ing. Agr. Responsable Área Arroz Est. San Joaquín.

precipitaciones o riego, el nivel freático próximo al río fluctúa en función a la altura hidrométrica (efecto de banco); mientras que al oeste los niveles se mantienen elevados durante más tiempo.

Los caudales del arroyo Saladillo Dulce, hacia el cual descargan las aguas superficiales del Est. San Joaquín, son variables, registrándose valores entre 1 y $364,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Pedraza, 1999) coincidentes con un período de estiaje (mínimo) y una crecida extraordinaria en menos de un mes. La calidad química de las aguas de los A° Saladillos Dulce y Amargo hacen inadecuado su uso para agricultura, aunque el Dulce es algo menos salino (Pedraza, 1999). El río San Javier constituye la principal fuente de abastecimiento para riego. Su caudal medio anual es de $595 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con valores mínimos y máximos medios anuales de $168 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $3.068 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, 1994).

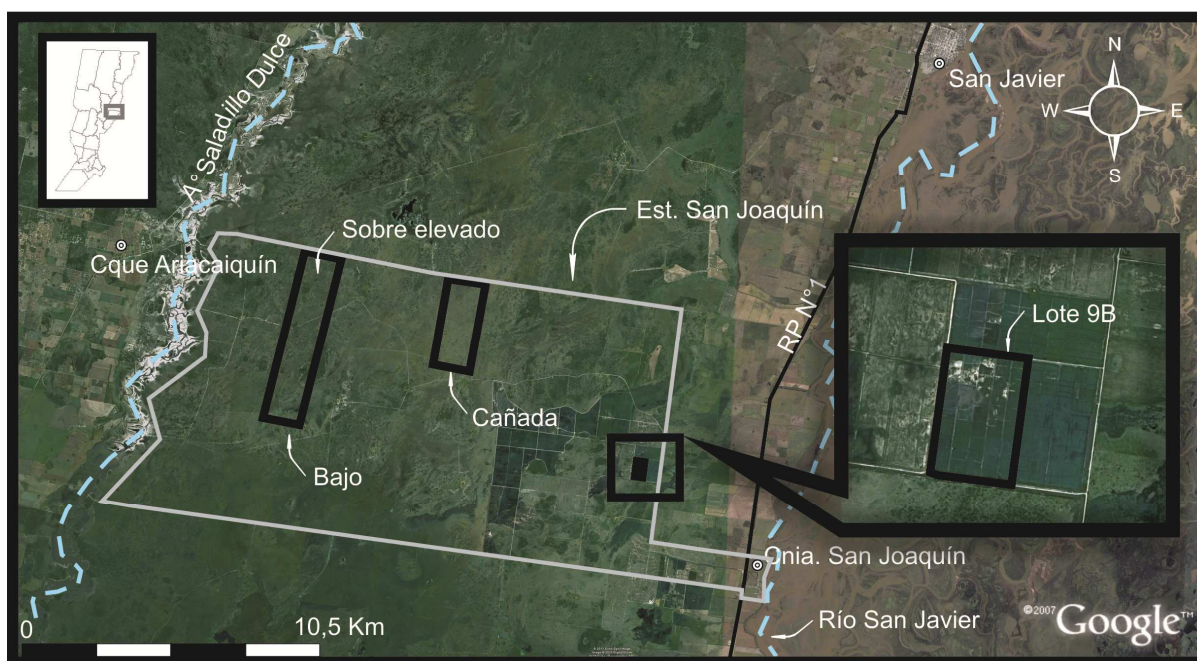


Figura2: Ubicación del Est. San Joaquín con los lotes 9B y de las condiciones prístinas de cañada, bajo y sobre elevado, Cnia. San Joaquín, Santa Fe.

De acuerdo a registros de la estación ubicada en Colonia Macías para el período de septiembre de 1975 a diciembre de 1980 el nivel freático nunca alcanzó la superficie del terreno y osciló entre 0,83 y 2,31 m de profundidad (Pedraza, 1999).

Las condiciones topográficas del área pueden asociarse a la dinámica del agua superficial. En ese sentido se reconoce una pendiente uniforme de dirección Norte-Sur, en concordancia con los arroyos Saladillo Dulce y Saladillo Amargo. En ambas márgenes existen planos de escurrimiento lateral, con dirección Oeste-Este para el Amargo y Noreste-Suroeste para el Dulce. Entre ambos cursos de agua ocurre una terraza plana, con áreas anegadizas que en crecidas extraordinarias los vincula. La margen derecha del Amargo se caracteriza por pendientes más abruptas, del orden del 1%, mientras la margen izquierda del Dulce es muy plana, con pendientes promedios de $0,05$ a $0,1 \text{ m km}^{-1}$ (Pilatti *et al.*, 2003).

Los suelos son aluvionales, predominando Natracualfes, a los que se asocian Albacualfes en las depresiones y Entisoles taphto nátrico en las elevaciones (Pilatti *et al.*, 2003). La serie “Los Cerrillos” (CER) es un Natracualf típico representativo del área de estudio (Tabla 1). Se ubica en los planos de interfluvios, posee drenaje pobre y rasgos hidromórficos desde superficie, son

inundables/anegables y tienen un horizonte superficial franco, claro, mal estructurado. Su uso actual es ganadero extensivo con una aptitud agropecuaria de 7ws (Pilatti *et al.*, 2003).

Tabla 1: Características químicas de la serie “Los Cerrillos” (Escala 1:250.000).

Horizonte	E	2Bt1	2Btg2	2Btg3	2BCg
Profundidad (cm)	0 -20	20-32	32-52	52-80	80
Carbono orgánico (%)	2,9	0,7	0,3		
Nitrógeno total (%)	0,242	0,077	0,058		
Relación C/N (%)	12	9	6		
Arcilla, < 2m (%)	22	35	38	33	34
Limo, 2- 50 m (%)	42	34	35	35	37
Arena; (%)	36	31	32	32	29
pH agua (1 : 2,5)	5,5	6,5	6,8	6,9	7
Na+, % de T	16	23	22	20	22

Análisis químico de suelos

En el lote 9B, bajo cultivo de arroz continuo, se obtuvieron datos iniciales en diciembre de 1999, en el horizonte superficial de 0 a 10 cm (Marano, com. pers.), donde se tomó una muestra compuesta de 25 submuestras (Pilatti y Orellana, 1994). Se determinó pH, conductividad eléctrica del extracto (CE_e), contenido de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, suma de bases (S) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral (FCA-UNL). Los valores correspondientes a 10 años posteriores (julio de 2009 y agosto de 2010) del mismo lote, con igual metodología de muestreo y de 0 a 20 cm fueron obtenidos por el laboratorio de Suelos Inagro (Paine, com. pers.), adicionando las determinaciones de carbono total (Ct) y materia orgánica (MO). Las técnicas de laboratorio utilizadas para las determinaciones son acordes a las especificadas por las normas del Sistema de Apoyo Metodológico de Laboratorios de Suelos y Aguas (SAMLA, 1998).

Las condiciones prístinas corresponden a tres sitios bajo pastizales naturales y cañadas con diferentes posiciones en el relieve plano cóncavo: cañada, bajo y sobre-elevado. En ellos se tomaron muestras perturbadas superficiales de 0 a 20 cm en agosto de 2010, realizándose determinaciones de Ct, MO, pH, CE, contenido de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, S y CIC en el laboratorio comercial Inagro (Paine, com. pers.).

Cabe mencionar que las áreas consideradas como condiciones prístinas se incorporaron al cultivo de arroz en la campaña 2010, a posteriori de realizar los muestreos.

También se calculó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en relación a la suma de bases (S) y en relación a la CIC para cada lugar y fecha muestreado. Y por último se calcularon la saturación cálcica, magnésica y potásica con respecto a la CIC y las relaciones Ca/K, Ca/Mg y Mg/K.

Análisis químico del agua

Al inicio de la campaña se tomaron muestras de agua superficial a la entrada y a la salida del canal principal de riego para evaluar posibles cambios producidos entre la toma del río y al final del recorrido, que presenta 30 km de longitud y construido con material propio del lugar. A estas

muestras se le determinaron pH y conductividad eléctrica del agua (CE_a) con potenciómetro y conductivímetro, respectivamente.

También, durante la campaña 2010/11 se registró la profundidad de los niveles freáticos y se tomaron muestras de la capa freática a través 20 pozos de observación (Po) colocados en el Est. San Joaquín, cubriendo diferentes posiciones del relieve en una dirección general este-oeste (Figura 3). A las muestras se les determinó pH y CE_a con potenciómetro y conductivímetro, respectivamente. Luego se realizó interpolación de la o las variables de importancia con el método de Kriging con el software Surfer 9.9.

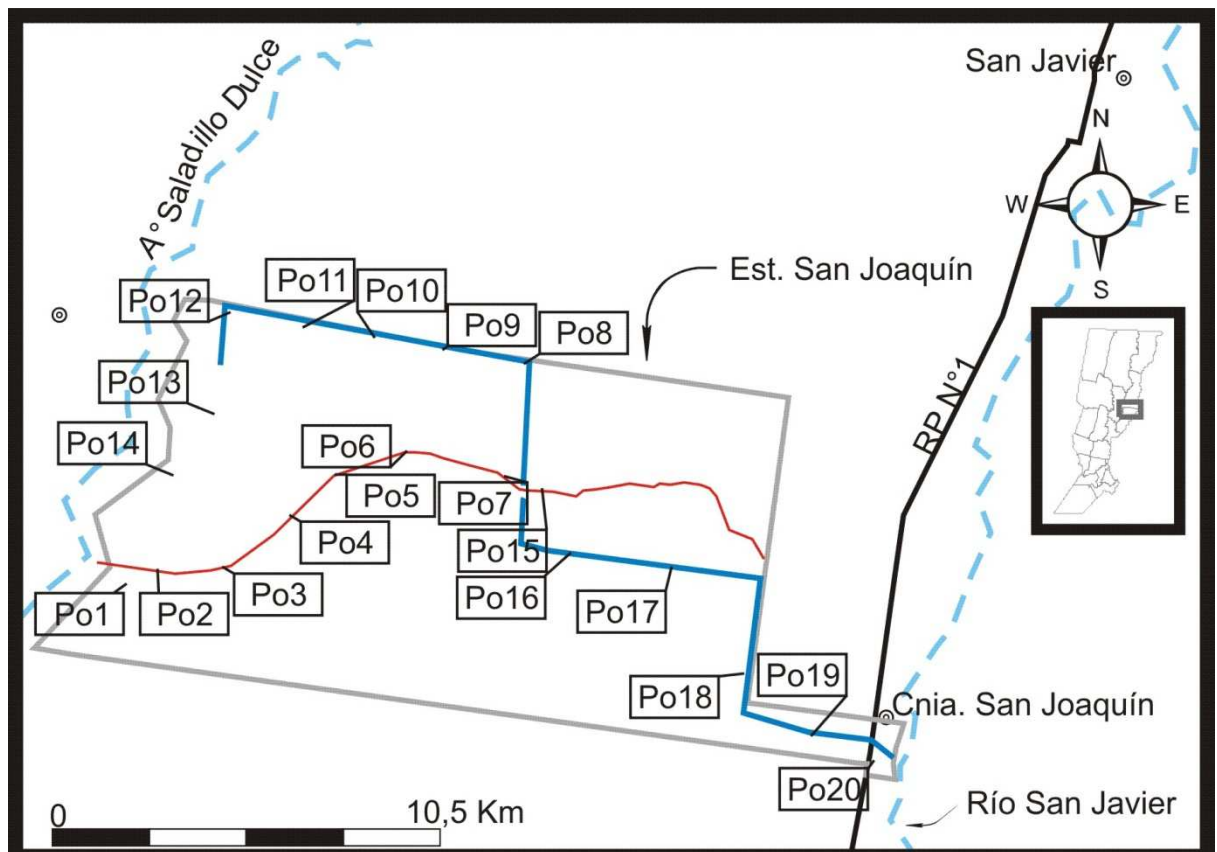


Figura 3: Posición de los pozos de observación instalados, el canal de riego principal (línea azul continua) y el canal de desagüe principal (línea roja) en el Est. San Joaquín.

Dinámica hídrica

Se analizaron los componentes del balance hídrico y su relación con la dinámica hídrica superficial y subterránea en base a información previa de la Cuenca de Los Saladillos (Pedraza, 1999; Pilatti et al., 2003; Filippi, 2011; Muzio, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad química del suelo

Las condiciones químicas iniciales del suelo correspondiente al lote 9B (Tablas 2 y 3) indican elevada concentración de Na^+ , consistente con los datos la serie “Los Cerrillos” (Natrualf típico, Tabla 1). Una característica de esta situación es que S supera la CIC, es decir, que la acidez de cambio es despreciable. Se obtuvieron valores de PSI de 22 y 25,3% en relación a S y a CIC respectivamente, superiores a lo recomendado para el cultivo de arroz (Tabla 4). Esto implica suelos fuertemente sódicos, con problemas asociados de dispersión de las partículas, baja conductividad hidráulica y posibles efectos tóxicos. Las concentraciones de Ca^{2+} y K^+ se encuentran dentro de los rangos óptimos para la producción de arroz, mientras que la de Mg^{2+} es inferior a lo sugerido. La deficiencia de este macronutriente se refleja en la saturación con respecto a la CIC y en la relación con los otros cationes (Tablas 3 y 4). El valor de pH es propio de un suelo alcalino, consistente con la elevada saturación de bases. La CE_e representa una baja salinidad del suelo, lo que pudo estar influenciado por el lavado superficial provocado por la lámina de riego aplicada previamente.

Tabla 2: Carbono total, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y contenido de los principales cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) de un lote bajo cultivo de arroz y de condiciones prístinas en el Est. San Joaquín en diferentes fechas.

Sitio	Fecha	Laboratorio	Prof (cm)	Ct (%)	MO (%)	pH	CE_e (dS m ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na
								(cmol _c kg ⁻¹)			
Arroz											
9B	Dic/1999	FCA-UNL	0-10	s/d	s/d	8,4	0,7	6,2	0,5	0,4	2,0
	Jul/2009	Inagro	0-20	0,85	1,47	7,7	1,1	4,5	1,3	0,5	1,5
	Ago/2010	Inagro	0-20	0,96	1,66	6,6	0,9	4,5	1,4	0,4	1,0
Condiciones prístinas											
Cañada	Ago/2010	Inagro	0-20	2,87	4,95	6,7	2,6	4,1	2,3	0,6	5,2
Sobre-elevada	Ago/2010	Inagro	0-20	0,96	1,66	9,6	2,1	3,8	1,5	0,6	3,6
Bajo	Ago/2010	Inagro	0-20	3,09	5,33	6,9	1,5	5,5	2,1	0,5	3,7

Tabla 3: Suma de bases (S), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) respecto a ambos, saturación cálcica, magnésica y potásica y las relaciones Ca/K, Ca/Mg y Mg/K de un lote bajo cultivo de arroz y de condiciones prístinas en el Est. San Joaquín en diferentes fechas.

Sitio	Fecha	Prof (cm)	S (cmol _c kg ⁻¹)	CIC	PSI*	PSI**	Saturación (%)			Relación		
					(%)		Ca	Mg	K	Ca/K	Ca/Mg	Mg/K
Arroz												
9B	Dic/1999	0-10	9,1	7,9	22,0	25,3	78,5	6,3	5,1	15,5	12,4	1,3
	Jul/2009	0-20	7,8	6,7	19,5	22,8	67,8	19,6	6,9	9,9	3,5	2,8
	Ago/2010	0-20	7,2	7,4	13,3	13,0	60,4	18,5	5,7	10,6	3,3	3,3
Condiciones prístinas												
Cañada	Ago/2010	0-20	12,2	11,4	42,8	45,7	35,9	20,2	5,0	7,2	1,8	4,0
Sobre-elevada	Ago/2010	0-20	9,5	6,4	37,6	55,6	58,6	24,1	9,8	6,0	2,4	2,4
Bajo	Ago/2010	0-20	11,7	13,8	31,2	26,4	39,8	15,1	3,5	11,4	2,6	4,4

Referencias: *: Respecto a S y **: Respecto a CIC

En este lote las concentraciones de Na^+ disminuyeron un 25% y un 50% en 2009 y en 2010, respectivamente (Tablas 2 y 3). En tanto que el PSI, pese a mostrar una tendencia a disminuir, continuó con valores más elevados que los recomendados para el cultivo de arroz (>8%) en los años 2009 y 2010. Las concentraciones de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ disminuyeron 13,4% y 11,9% en 2009 y 2010, respectivamente. En consecuencia, en 2009 hubo una disminución total de bases de 1,2 cmol_c kg⁻¹ que representó la misma diferencia de CIC, es decir que no se produjo reemplazo catiónico. Entre

2009 y 2010 la CIC aumentó $0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, al tiempo que disminuyó también el Na^+ ($0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), manteniéndose invariable $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. De este modo, comenzó a aparecer acidez intercambiable y las bases ya no saturaron la totalidad de la CIC, corroborándose estos resultados con la disminución de pH (Tabla 3).

La disminución de la concentración de Na^+ en estos años fue consecuencia principalmente de la aplicación del riego, puesto que si bien las precipitaciones fueron abundantes en algunos años (2005 llovió 1623 mm), estos eventos de gran magnitud también se presentaron antes del período de análisis (1532 mm caídos en 1972, 1688 mm en 1984 y 1352 mm en 1998) y ello no fue reflejado en la alteración del PSI de suelos naturales analizados. Otra evidencia que refuerza la hipótesis anterior es que no se aplicaron enmiendas cálcicas e incluso se registraron disminuciones de la concentración de Ca^{2+} en estos años, llegando a niveles levemente inferiores a los recomendados (Tabla 4). Otra posibilidad de disminución de la concentración de Na^+ estaría explicada con el manejo de los rastrojos. En siembra tradicional estos son quemados antes de las labores de siembra, sin aportar MO al suelo. En caso de siembra directa los residuos no son quemados y por lo tanto se consigue un aporte adicional de MO al suelo. Ello podría explicar el incremento de MO entre 2009 y 2010 (Tabla 2).

Tanto las concentraciones de Mg^{2+} y K^+ , las saturaciones de cada uno de ellos respecto a CIC y las relaciones entre cationes estuvieron dentro de los rangos óptimos (Tablas 2, 3 y 4). La CE_e del horizonte superficial aumentó levemente, llegando a valores cercanos a 1 dS m^{-1} , siendo aún inferior al límite máximo recomendado (Tablas 2 y 4).

Tabla 4: Rangos óptimos sugeridos para alta productividad del cultivo de arroz.

Determinación	Rango óptimo
MO	2,5 – 8%
pH	4,8 – 6,5
CE	<1,5 dS m^{-1}
Concentración de Ca^{2+}	5 – 30 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
Concentración de Mg^{2+}	2 – 7 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
Concentración de K^+	0,3 – 1,2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
Saturación cálcica	30 – 75%
Saturación magnésica	8 – 22%
Saturación potásica	1 – 4%
Saturación sódica (PSI)	<8%
Relación Ca/K	10 – 50
Relación Ca/Mg	1 - 9
Relación Mg/K	2 - 18

Fuente: Quintero y Figueroa, 2008

En las condiciones prístinas la concentración de Na^+ , PSI y CE_e fueron superiores que los presentados en los lotes cultivados (Tablas 2 y 3). Ello indica que los suelos que se están utilizados para arroz naturalmente son salinos-sódicos y en algunos casos alcalinos, cuando la MO presente es relativamente inferior. En situaciones donde la posición del relieve permite acumular agua durante los períodos de lluvia se generan condiciones para mayor producción de biomasa vegetal y, por ende, mayor MO. Esto implica que el pH ya no es alcalino sino tendiente a neutro con valores de CIC superiores.

Calidad del agua superficial y subterránea

La salinidad del agua de riego, expresadas como CE_a y medida a la entrada del canal principal (toma del río) y al final de éste (30 km de recorrido), fue $0,115 \text{ dS m}^{-1}$ y $0,145 \text{ dS m}^{-1}$, a la entrada y a la salida respectivamente. De esto se deduce que la salinidad del agua del río es muy baja y que el transporte por canales de tierra no aportó significativamente sales en su recorrido. Cabe aclarar, además, que en todo el recorrido del canal principal de riego no hay ingresos de agua de drenaje.

En cuanto al agua subterránea, se pudieron medir sólo 14 de las 20 perforaciones por problemas de no accesibilidad. No existió correlación entre las profundidades del manto freático y la CE , ni entre esta y pH. Por tal motivo se analizó la CE_a individualmente, agrupándose en cuatro intervalos de clase (Tabla 5). Los resultados muestran que los sitios con menor salinidad correspondieron a situaciones diversas: tres freáticos (PO9, PO12 y PO18) colocados en suelos naturalmente salino-sódicos pero con influencia de canales principales de riego (<5 m de distancia); uno ubicado en el albardón no salino y con influencia del río San Javier (PO20), uno está instalado en suelos salino-sódicos y con influencia del canal principal de drenaje (PO2) y el último (PO17) colocado en un área más elevada topográficamente, con monte sin cultivar y próximo a un canal secundario de drenaje construido para evacuar excedentes de áreas arroceras adyacentes. Los sitios que presentan una salinidad media entre $1,5$ y 4 dS m^{-1} también representan condiciones diversas. Uno (PO1) se sitúa en el punto de salida de la sub-cuenca; tres (PO8, PO10, PO11) en suelos naturalmente salino-sódicos con influencia de canales principales de riego y el restante (PO13) se ubica en zona de monte natural sin ninguna influencia de canales de riego y/o drenaje. Los freáticos que presentan una salinidad más elevada, entre 4 y 8 dS m^{-1} (PO7 y PO15), están próximos a canales de drenaje principales y, finalmente, el freático que presentó salinidad máxima (PO14) está instalado en las adyacencias de una zona de pastizales naturales, incorporadas para arroz en la campaña 2010 y que al momento de ser muestreado no había recibido aún riego.

Tabla 5: Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo a su conductividad eléctrica.

Rango (dS m^{-1})	Frecuencia
< 1,5	6
1,5 a 4	5
4 a 8	2
> 8	1

Algunos sitios que están en la misma posición de relieve con condiciones de las capas superficiales de suelo similares y aledaños a un canal principal de riego presentaron salinidad variable. La evolución de las profundidades del manto freático en los pozos de observación involucrados (PO8, PO9, PO10, PO11 y PO12) no explicaría el fenómeno anterior, dado que en general la profundidad del nivel freático fue similar en todos ellos, oscilando entre 1,5 y 2 m, lo que indicaría igual influencia del canal de riego. Probablemente la explicación esté vinculada con la permeabilidad y granulometría del subsuelo, aspecto que serán evaluados en futuros trabajos.

Todos los freáticos ubicados en las cercanías canales de riego, con pérdidas por percolación profunda, tendrían una recarga de agua con muy bajo tenor salino que favorece el lavado o dilución de sales. En los canales de drenaje el agua que circula en época de cultivo de arroz es la proveniente de las lluvias y por lo tanto tiene bajo contenido salino (CE_a de $0,13 \text{ dS m}^{-1}$, registrada en enero de 2011), afectando también el balance salino en las zonas donde influye. Se utilizó el término lavado o dilución porque se desconoce el movimiento el transporte horizontal de sales junto con las aguas subterráneas hacia las áreas de descarga natural de la cuenca (A° Saladillo Dulce al oeste y río San Javier al este).

Dinámica hídrica

Un efecto secundario que podría producir el riego sería la activación de esteros y cañadas en período cuando las lluvias son escasas o nulas. En este sentido, el riego a través de las aguas del río San Javier retomarí­a el rol que cumplía éste durante crecidas extraordinarias cuando aún no estaba construido el terraplén sobre la RP N°1. En efecto, el río San Javier atravesaba el albardón durante crecidas extraordinarias transportando sedimentos y modificando la morfología de cañadas y esteros (Pilatti *et al.*, 2003).

Para considerar la cantidad de agua que ingresa a la subcuenca es necesario estimar la lámina promedio aplicada en sucesivas campañas de arroz. Esta es variable en función de las condiciones ambientales, principalmente precipitaciones y evapotranspiración. Estimaciones realizadas regionalmente refieren láminas promedio entre 1800 y 2200 mm, para el período comprendido entre diciembre y marzo (Pilatti *et al.*, 2003; Muzio, 2011). De esta cantidad, 900 mm anuales son requeridos para satisfacer la evapotranspiración del cultivo, entre 100 y 600 mm se necesitan para la saturación del suelo hasta el nivel freático (Tabla 6) más una lámina de almacenamiento superficial de aproximadamente 100 mm. Sin embargo, de acuerdo a las mediciones realizadas de niveles freáticos, el perfil de los lotes con riego no se saturó, aunque probablemente los contenidos hídricos hayan estado muy próximos a dicho valor.

De lo anterior se deduce que la diferencia entre el agua aplicada y la requerida por el cultivo de arroz produce excedentes, de los cuales una proporción escurre superficialmente y el resto se almacena en el suelo, para posteriormente percolar. Es necesario cuantificar estas proporciones, pero se estima que gran parte de las precipitaciones durante la campaña -que en la región representan entre 600 a 800 mm (Filippi, 2011)- no son aprovechadas debido al método de inundación continua utilizado en el cultivo de arroz y por ende escurren a través del drenaje.

En cuanto al agua almacenada en el suelo, dado que en el área de estudio no se siembran cultivos de invierno, queda en el lote luego de la cosecha produciendo la dilución y/o el lavado de sales del suelo. El agua que percola tiene un movimiento lateral muy lento, el cual aún resta ser cuantificado, y en algunos casos se ve impedido por barreras, como la RP N°1.

Tabla 6: Lámina de agua requerida para la saturación del suelo hasta el nivel freático considerando distintas profundidades, un almacenamiento de saturación de $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y distintos contenidos hídricos iniciales (θ_i).

Profundidad nivel freático (mm)	θ_i		
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$		
	0,25	0,3	0,35
1000	200	150	100
2000	400	300	200
3000	600	450	300

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La concentración de Na^+ intercambiable del horizonte superficial del lote en estudio disminuyó 50% luego de 10 años de cultivo de arroz continuo, principalmente debido a la aplicación de agua de riego de buena calidad química. En cuanto el PSI, a pesar de disminuir, se mantuvo con valores más elevados que los recomendados.

El pH del horizonte superficial evolucionó de alcalino a levemente ácido en este período. Además del agua de riego, también hubo influencia de un manejo diferente de los rastrojos.

La CE_c inicial del lote cultivado fue entre 53% y 73% inferior a la de las condiciones naturales. Si bien tuvo incrementos en el periodo de estudio no alcanzó valores limitantes para los cultivos.

La concentración de Ca^{2+} del horizonte superficial disminuyó hasta alcanzar niveles por debajo de los sugeridos para altas productividades de arroz, pudiendo ser necesarias las aplicaciones de enmiendas cálcicas.

La calidad de agua de riego fue de bajo contenido salino tanto en el ingreso como en la salida del canal principal, asimismo las aguas de drenaje durante la etapa de cultivo también presentaron baja salinidad.

La profundidad de los niveles freáticos fue variable durante el periodo de riego, aunque en ningún caso se alcanzó a saturar el perfil, aspecto que deberá ser evaluado en futuras investigaciones. La CE_a del acuífero superficial no presentó correlación ni con la profundidad freática ni con el pH. Los contenidos salinos fueron variables, resultando afectados en algunos casos por los canales de riego y de drenaje.

Durante cada campaña infiltra entre 100 y 600 mm que favorecen la dilución y/o lavado de las sales del suelo.

La rehabilitación serviría sólo para suelos arroceros, posiblemente no para cultivos de secano, y eventualmente para uso de pasturas o pastizales naturales

Se recomiendan evaluaciones futuras referidas a la dinámica vertical y horizontal de agua y solutos.

BIBLIOGRAFÍA

- ACPA -Asociación Correntina de Plantadores de Arroz-** (2010) *Memoria descriptiva. Relevamiento arrocero nacional. Informe final campaña 2009/10: Fin de cosecha*. Frede, JA. Corrientes, Argentina.
- Ayers, R. S. y W. Westcot** (1985). “*Water quality for agriculture*”. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1, FAO. Roma, Italia.
- Benavidez, R. A.** (Ed.) (2006) *El Arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos*. Editorial de la UNER- Ediciones UNL. ISBN: 950-698-168.-1. Argentina.
- FAO** (2009) “*The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?*” Bruinsma, J. Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Economic and Social Development Department. Roma, Italia.
- Filippi, R. A.** (2011) *Caracterización de prácticas culturales en arroz bajo riego en el albardón costero santafesino*. Trabajo final de graduación. Fac. de Cs. Agrarias, Univ. Nac. del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Gollán, J. y D. Lachaga** (1939) *Aguas de la provincia de Santa Fe*. Min. de Instruc. Pública y Fomento. Instituto Experimental de Investigación Agrícola-Ganadero. Dep. de Química Agrícola y Edafología. Santa Fe, Argentina.
- Hammecker, C. ; P. J. A. van Asten; S. Marlet; J. L. Maeght y R. Poss** (2009) “*Simulating the evolution of soil solutions in irrigated rice soils in the Sahel*”. *Geoderma* 150, pp 129–140.
- Hilgert, N.I.; J. F. Pensiero; G. Marino; J. P. Lewis y C. H. D’Angelo** (2003) “*Vegetation of The Saladillo area (Province of Santa Fe) in the south of the Chaco, Argentina*”. *Interciencia*, septiembre, año/vol. 28, número 009. Asociación Interciencia. Caracas, Venezuela.
- Hillel, D.** (2000) *Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment, and economics*. The World Bank. Washington D.C., EE.UU.
- INTA y ACPA** (2008) *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para el Cultivo de Arroz en Corrientes*. Kurtz, D. y F. Terenzio (Eds.). Corrientes, Argentina.
- Macleán, J. L.; D. Dawe; B. Hardy y G. P. Hettel** (Eds.) (2002) *Rice almanac: Source book for the most important economic activity on earth*. 3rd edn. CABI Publishing. International Rice Research Institute. Wallingford, Reino Unido.
- Marano, R. P.** (2000) *Posibles efectos de la calidad de las aguas subterráneas con fines de riego suplementario en suelos de la región centro-este santafesina*. Tesis de Ms. Sc. Fac. de Cs. Agrarias, Univ. Nac. de Cuyo. Mendoza, Argentina.
- Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos** (1994) *Estadística hidrológica 1994*. Ed. Secretaría de Energía, Contrato de Energía, EVARSA. Tomo I. Buenos Aires, Argentina.
- Mosconi, F. P. ; Priano, L. J. J.; Hein, N. E. ; Moscatelli, G. ; Salazar, J. C. ; Gutiérrez, T. Y Cáceres, L.** (1981) *Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe*. INTA - MAG Santa Fe. Santa Fe, Argentina.
- Muzio, S. N.** (2011) *Evaluación de indicadores de desempeño de riego en el cultivo de arroz en el albardón costero santafesino*. Trabajo final de graduación. Fac. de Cs. Agrarias, Univ. Nac. del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Pagliettini, L.; C. Carballo; J. Domínguez; O. Miranda y O. Arizio** (1997). “*Arroz en el MERCOSUR: cambios y sostenibilidad en el sector primario de Argentina*”. *Revista Agroalimentaria*, n° 4. Centro de Investigaciones Agroalimentarias, Mérida, Venezuela.
- Pedraza R.; C. Zapata; A. Villordo y N. Cammisi** (1999) *Caracterización hidrológica y dinámica hídrica superficial del Sistema A° Saladillo Dulce y A° Saladillo Amargo (Prov. de Santa Fe)*. Informe final. Consejo Federal de Inversiones. Argentina.

- Pilatti, M. A. y J. A. Orellana De** (1994) *Instrucciones para tomar muestras de suelos*. 2ª. Ed. Comunicaciones FAVE. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Pilatti, M. A.; C. H. D'Angelo; R. P. Marano; J. F. Pensiero; H. Potente y A. López Calderón** (2003) *Ordenamiento territorial de la cuenca de Los Saladillos (Santa Fe)*. Ediciones UNL. Santa Fe, Argentina.
- Quintero, C. E. y E. A. Figueroa** (2008) “*Fertilización del arroz*”. En: Fertilización de cultivos y pasturas (2º ed). Melgar, R. J. y M. Díaz Zorita (Eds.). Editorial Hemisferio Sur S.A. Buenos Aires, Argentina.
- Rhoades, J. D.; S. M. Lesch; P. J. Shouse y W. J. Alves** (1990) “*Locating sampling sites for salinity mapping*” *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, pp 1799-1803.
- SAMLA** (1998) *Sistema de Apoyo Metodológico para Laboratorios de Análisis de Suelos y Aguas (SAMLA)*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Dirección de Agricultura (SAGPyA), Buenos Aires, Argentina.
- Trimboli, G.; R. Vicino y M. Peart** (2003) *Análisis de la producción de arroz en la provincia de Santa Fe*. INTA EEA Reconquista. Información para Extensión N° 77. Reconquista, Santa Fe, Argentina.
- van Asten, P. J. A.; L. Barbiéro; M. C. S. Wopereis y S. E. A. T. M. van der Zee** (2003) “*Actual and potential salt related soil degradation in an irrigated rice scheme in the Sahelian zone of Mauritania*”. *Agric. Water Manag.* 60, pp 13–32.
- Wopereis, M. C. S.; J. Ceuppens; P. Boivin; A. M. Ndiaye y A. Kane** (1998) “*Preserving soil quality under irrigation in the Senegal river valley*” *Neth. J. Agric. Sci.* 46, pp 97–107.