

SUELOS DE BAJA CAPACIDAD PRODUCTIVA EN SANTA FE: MEJORA CON RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA¹

PILATTI, M. A.²; GHIRBERTO, P. J.²; FELLI, O. M.² & BADINO, O.³

RESUMEN

Se evaluó el uso de Residuos Líquidos Orgánicos (RLO) de la industria láctea como mejorador de suelos de baja aptitud productiva de Santa Fe (Argentina). En un Natracualf típico sin cultivos, se aplicaron 6.600 kg materia orgánica/ha/año de RLO (2010 a 2014) comparándose con un lote testigo. Hubo aporte significativo de materia orgánica (MO), nitrógeno (Nt), fósforo (P); calcio (Ca) y azufre (S) al suelo. El Nt y P se lavaron en profundidad debido a que no hubo extracción por cultivos. La adición de Ca originó reducción del contenido de sodio en el perfil del suelo, así como de potasio (K) y magnesio (Mg). Con RLO cambió negativamente conductividad hidráulica, intervalo hídrico óptimo, arcilla dispersa en agua y densidad de suelo. Se requiere de una mínima remoción del suelo, rotación de cultivos y agregado de Mg para uso agronómico de RLO proponiéndose las propiedades evaluadas para monitorear.

Palabras claves: efluentes industria láctea, Natracualf típico, contaminación, calidad del suelo.

ABSTRACT

Santa Fe soils with low productive capacity: Improvement with food industry waste liquid.

The application of Organic Liquid Waste (OLW) of the dairy industry was assessed as an ameliorative of soils with low productive capacity of the Santa Fe province (Argentina). In a Typical Natracualf without crops, were applied 6,600 kg organic matter/ha/year of OLW during 2010 to 2014 period and compared to a control test without OLW. The results indicate the contribution of organic

1.- Financiado por CA+ID 2011 (UNL) 20/C409 y PICT-2012-2691

2.- Departamento Ciencias del Ambiente. Facultad de Ciencias Agrarias (UNL). 86-Kreder 2805. (3080HOF) Esperanza, provincia de Santa Fe. Telefax +54 (3496) 426400. Email: mpilatti@fca.unl.edu.ar

3.- Departamento de Producción Animal Facultad de Ciencias Agrarias (UNL).

Manuscrito recibido el 20 de octubre de 2016 y aceptado para su publicación el 24 de mayo de 2017.

matter, phosphorus (P), calcium (Ca) and sulfates (S) to soil. The N and P were leached because there was no mineral extraction by crops. The addition of Ca originated the reduction of sodium content in the soil profile, as well as K and Mg. The OWL caused the degradation of hydraulic conductivity, least limiting water range, clay dispersed in water and soil density. A monitoring of soil properties, minimum soil crop rotation and appropriate addition of Mg are important for agronomic use of OWL.

Key words: dairy industry effluents, tipyc Natracualf, contamination, soil qualitywere.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo considera una cuestión relacionada con los suelos de menor aptitud productiva de Santa Fe y los residuos provenientes de la industria alimentaria. ¿Estos residuos serán útiles como mejoradores de aquellos suelos? Esas dos desventajas: baja aptitud y residuos, al combinarse podrían tener efectos positivos: hacer más productivos los suelos y transformar un residuo en un mejorador edáfico.

Los Natracualf típicos tienen muy baja aptitud y capacidad productiva. En los Bajos Submeridionales santafesinos (más de 2,6 millones de hectáreas) ocupan el 46% de la superficie (elaboración propia a partir de mapa suelos Santa Fe, escala 1:500.000; 23,24). Considerando además los existentes en la Bajos de los Saladillos (40) y en las áreas adyacentes a los ríos Salado y Cululú (24) se aproxima a las 1,5 millones de hectáreas. De allí la importancia de estudiarlos y, desde la óptica productiva, mejorarlos.

La industria alimentaria y agroganadera genera efluentes residuales líquidos, lodos semilíquidos y barros que si son vertidos a cuerpos receptores sin el tratamiento y controles adecuados producen contaminación del ambiente y afectan la salud de la población.

Muchos de estos residuos orgánicos no contienen elementos peligrosos en su composición -de acuerdo a la Ley Nacional 24.051, Decreto 1844/02 de la provincia de Santa Fe- pudiendo ser utilizados como fertilizantes de suelo si se cumplimenta con la Ley 11.717 de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la provincia de Santa Fe y Decreto N° 101/03.

Existen otros antecedentes en el país donde se reglamenta el “uso agronómico de los efluentes” como el aprovechamiento, en la actividad agronómica, del agua, nutrientes y materia orgánica presentes en los efluentes líquidos tratados (Decreto 846/16 de la provincia de Córdoba).

El suero, permeado de suero, efluentes de la industria láctea y otras alimentarias, así como los purines de la producción pecuaria se encuadran dentro de lo descripto y se designan en este artículo como: residuos líquidos orgánicos (RLO). Se caracterizan por tener menos del 15% de materia seca (MS), macronutrientes para los vegetales, alto contenido de materia orgánica (MO) y aportan cationes divalentes. En algunos casos la presencia de sales, especialmente cloruradas de sodio y pH ácidos o básicos constituyen limitaciones para su aplicación al suelo.

Los RLO aplicados directamente al suelo, en forma controlada, resultan una oportunidad como mejoradores ya que tendrían valor tanto agrícola (como fuente de nutrimentos para los cultivos), como enmiendas y control de la degradación edáfica. Su uso en Natracualf debe hacerse en periodos en los que no haya excedentes hídricos ni freáticos próximos a la superficie y/o en sectores donde es posible controlarlos. Para mejorarlos es necesario modificar la consistencia del suelo, disminuyendo su resistencia mecánica a la penetración radical, incrementar su macroporosidad y con ello la aireación y la infiltración, disminuir sensiblemente el pH y la salinidad y mejorar la fertilidad química (43). La incorporación de RLO a esos suelos podría mejorar la mayoría de esas propiedades.

Existe evidencia empírica sobre los beneficios de su aplicación como así también de algunos cuidados a tener en cuenta para no dañar al suelo (22, 30, 3, 4, 5, 20, 14, 35). Debe destacarse que casi la totalidad de esos estudios se hicieron sobre suelos con aptitud media o alta.

El objetivo de este trabajo es la evaluación de RLO proveniente de la industria láctea como mejorador de suelo de baja aptitud productiva de Santa Fe, transformando un residuo en un recurso y agregando valor en otro proceso productivo. Así se utilizaría al suelo como receptor y digestor de aquellos RLO, intentando disminuir y/o erradicar el problema de su acumulación y potencial contaminación ambiental con mejoramiento de la capacidad productiva del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un lote en el que desde el 2010 al 2014 se aplicó 6.600 kg materia orgánica/ha/año de RLO de la industria láctea (ver en Cuadro 1 su composición), no se realizó ningún cultivo y cada 3 a 5 semanas se efectuó una labor superficial para favorecer la mineralización de la MO y la infiltración del RLO asperjado con estercolera. En este ensayo no hubo extracción de minerales por las cosechas, actividad radical ni aporte de rastrojos al suelo dejando solo la influencia acumulada del RLO y el efecto de las labores mecánicas mensuales: así las características más desfavorables –si las hubiere–podrán manifestarse: exceso de minerales con posibilidades de llegar a la freática, salinidad, calidad inadecuada de la MO para la regeneración y/o estabilización estructural y desmenuzamiento mecánico de los agregados edáficos.

Según la calificación canadiense la calidad ambiental de las Materias Residuales Abonos (17) se clasifica en: C: Contaminantes químicos; P: Patógenos; O: Olores. Así C1; P1, O1 indica que no presenta riesgos de contaminación química, ni de patógenos, ni olores. Este RLO se encuentra dentro de esta categoría.

En el lote estudiado, centro oeste de la provincia de Santa Fe, predomina el Natracualf típico Aurelia (23).

Se compara el sitio sobre el cual se asperjó el RLO con un lote colindante que tiene el mismo suelo pero con uso ganadero sobre vegetación natural (T o testigo) ésta era la historia de uso del área del ensayo. Los análisis edafológicos realizados se presentan en el Cuadro 2a y b.

Para decidir qué atributos edáficos medir y qué técnicas analíticas usar para evaluar qué condiciones alejan al suelo estu-

Cuadro 1: Características químicas y físicas del residuo líquido orgánico (RLO) de la industria láctea utilizado para aplicar sobre un Natracualf típico Aurelia durante 4 años (centro oeste de Santa Fe, Argentina).

Mediciones efectuadas	RLO	kg aplicado /ha/año
pH	10,8	
Conductividad eléctrica (dS/m) (20° C)	5,2	1569 (*)
Demanda química de oxígeno (g/L)	532	
Demanda bioquímica de oxígeno (g/L)	29,5	
Materia orgánica total (g/L)	1,4	6600
Nitrógeno Total (g N/L)	0,14	660
C/N	5	
N-Nitrato (g N/L)	0,03	141
N-Amonio (g N/L)	0,01	47
Fósforo Total (g P/L)	0,08	377
Cloruros (g Cl/L)	0,05	236
S-Sulfatos (g S/L)	0,34	1728
Sodio (g Na /L)	0,09	424
Potasio (g K /L)	0,02	94
Calcio (g Ca /L)	0,44	2074
Magnesio (g Mg /L)	0,05	236

(*) 1 dS/m = 0,064 % de sales

diado de los requisitos de un “suelo ideal” para la producción de los cultivos se sigue lo propuesto por Orellana, Pilatti y Felli (32, 38, 41) actualizado en (37, 39)

En ambos lotes se tomó muestra perturbada compuesta por 30 extracciones (47) abarcando tanto la profundidad enraizable como la de enraizamiento (44) de los siguientes espesores que coinciden con los horizontes presentes: 0 a 14 cm, 15 a 30 cm, 31 a 44 cm, 50 a 70 cm y 100 a 120 cm. Se seleccionó esa profundidad porque coincide con la de mayor extracción de agua y nutrientes de los cultivos anuales y porque se encuentra por encima de la freática: si en el horizonte más profundo muestreado hay acumulación de elementos puede -al menos sospechase- riesgo de contaminación.

También se tomaron muestras no perturbadas en cilindros de 100 cm³ de capacidad para análisis físicos en el estrato superficial de suelo debajo de la zona laboreada (10 a 15 cm; 10 cilindros). En ambos tratamientos se evaluó por sextuplicado, en superficie, la conductividad hidráulica con tensioinfiltrómetros. Se determinó K₀ en tensión 0 con todos los poros del suelo conduciendo agua (saturado), K_{1,5} con poros de radio equivalente a 1,5 cm de tensión o menores y K₃ con poros de radio equivalente a 3 cm de tensión o menores conduciendo agua.

Se calculó el porcentaje de disminución de la conductividad hidráulica saturada (%DK₀) usando la ecuación (1) según lo propuesto por Gibertho (13, 21).

Suelos de baja capacidad productiva en Santa Fe

Cuadro 2a: Determinaciones químicas realizadas en dos lotes del centro oeste de Santa Fe (Argentina) domina el Natracualf típico serie Aurelia (Octubre 2014): tratamiento con aplicación de residuo líquido (RLO) y testigo (T).

Medida	Símbolo	Método	Referencia
Materia orgánica total	MO	Combustión húmeda Walkley-Black (54) (Factor recuperación 0,77) (MO= C x 1,724)	51, 26
Nitrógeno total	Nt	Kjeldahl	51
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	Turbidimetría	51
Fósforo extraíble	P	Bray y Kurtz N° 1 (8)	51
Capacidad de intercambio catiónico	CIC	Extracción con acetato de amonio y posterior determinación del amonio mediante destilación	51
Calcio y Magnesio intercambiable	Ca ²⁺ y Mg ²⁺	Complexometría	51
Sodio y Potasio intercambiable	Na ⁺ y K ⁺	Fotometría de llama	51
Conductividad eléctrica extracto de saturación	CEes	Conductimetría	51
Reacción del suelo	pH	Potenciometría (pH en H ₂ O rel. 1:2.5)	51

Cuadro 2b: Determinaciones físicas realizadas en dos lotes del centro oeste de Santa Fe (Argentina) domina el Natracualf típico Aurelia (Octubre 2014): tratamiento con aplicación de residuo líquido orgánico y testigo.

Medida	Símbolos	Método	Referencia
Granulometría	Ar, Arc, Lim	Densímetro	12
Densidad del suelo	δ	Cilindro	7
Densidad de las partículas del suelo	δ_p	Por cálculo en f(MO)	42
Macroporosidad	Ma	Por cálculo : $Ma = \theta_s - \theta_a$ kPa diámetro 50 μ m	
Curva de retención hídrica	CRH	Mesa de tensión y cámaras de presión de Richards	28
Curva de resistencia mecánica	CRM	Penetrometría	52
Contenido de agua del suelo saturado	θ_s	Por cálculo : $\theta_s = 1 - (\delta/\delta_p)$	
Contenido de agua del suelo a capacidad de campo	θ_{cc}	Mesa de tensión, retenida a 0,01 MPa	28
Contenido de agua a partir de la cual la aireación limita	θ_a	Por cálculo: $\theta_a = \theta_s - 0,15$	
Contenido de agua fácilmente disponible	θ_{FU}	Por cálculo de curva de retención hídrica (Retenida a -0,17 MPa)	36
Contenido de agua resistencia mecánica limitante	θ_{RP}	Por cálculo: $RP = a \theta^{-b} \delta^c$ Valor crítico según textura: 3,7 MPa	36
Intervalo hídrico óptimo	IHO	Por cálculo $IHO = \text{Mín}(\theta_{cc}; \theta_a) - \text{Máx}(\theta_{RP}; \theta_{FU})$	48,33
Conductividad Hidráulica	K	Tensioinfiltrometría	2

$$\%DK_0 = \left(1 - \frac{K_{0RLO}}{K_{0T}}\right) \times 100$$

Donde: K_{0RLO} y K_{0T} son las conductividades hidráulicas saturadas del tratamiento con la aplicación de residuo líquido (RLO) y Testigo (T).

Análisis estadístico

Datos físicos: En todos los casos se evaluó la normalidad de la distribución de los datos usando los test: chi-cuadrado de bondad de ajuste, W de Shapiro-Wilks y Z para curtosis y asimetría. Para normalizar el IHO se usó $[\pi/2 \arcsin(\text{IHO})^{0.5}]$.

Posteriormente se identificaron datos atípicos o extraños usando el test de Grubbs y el de Dixon: ambos asumen normalidad. Cuando hubo datos atípicos se los reemplazó por el valor medio del tratamiento a esa profundidad.

Por último se realizó el análisis de varianza y comparación de medias con el test de Tuckey ($\alpha=5\%$).

Definición IHO (48): Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) es el contenido hídrico del suelo dentro del cual las raíces de las plantas superiores pueden respirar, absor-

ber agua y expandirse sin restricciones que afecten a su crecimiento. Las magnitudes que definen los límites del IHO son: θ_{CC} : volumen de agua retenida en CC; θ_a : contenido hídrico al cual el espacio con aire es superior al 15%; θ_{RP} : contenido hídrico por debajo del cual las raíces no pueden horadar el suelo; θ_{FU} : contenido mínimo de agua fácilmente utilizable, por debajo del cual comienza el estrés hídrico y, al no poder mantener la tasa de evapotranspiración potencial, las plantas inician el cierre estomático. Simbólicamente: $\text{IHO} = \text{Mín}(\theta_{CC}; \theta_a) - \text{Máx}(\theta_{RP}; \theta_{FU})$. Integra así tres variables: Porosidad de aireación, Agua fácilmente utilizable y Resistencia mecánica a la penetración radical, de modo que durante dicho intervalo las raíces no hallan mayores dificultades para ocupar volúmenes crecientes de suelo ni para absorber agua y disponer de oxígeno suficiente. Por lo tanto cuando mayor es su valor mejor es el suelo.

Datos químicos: Se efectuaron comparaciones de a pares: T vs. RLO; sólo se disponía del valor medido de una muestra compuesta. Para comparar se usó la distribución “t” para una probabilidad de 95%, asumiéndose valores típicos del coeficiente de variación (CV) para cada propiedad (Cuadro 3).

Cuadro 3: Coeficientes de variación (%) de propiedades edáficas según distintas fuentes de información.

Propiedad Fuente	pH	P	MO	Nt	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEes
Internacional (*)	2 a 15	39 a 157	16 a 41		19 a 32	31 a 44		51 a 53		91 a 263
Local (**)	4 a 8	7 a 65	3 a 30	15 a 25	3 a 21	2 a 24	27 a 40	4 a 43	13 a 74	108 a 142
Adoptado en este trabajo	8	65	30	25	21	24	40	43	74	142

(*) 19,31, (**) Algunos muestreos a nivel de grilla en lotes, otros varios lotes a nivel regional, (50, 6,10,49, 53, 34,18, 45,46,11, 9, 1).

Se consideraron diferencias significativas cuando las diferencias entre los valores de cada muestra compuesta respecto del error típico de la diferencia de medias superaba el valor tabulado para la “t” (29).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El RLO (Cuadro 1) tiene reacción alcalina con intermedia cantidad de sales. La demanda química de oxígeno (DQO) es alta, no así la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ni el nivel de cloruros. Es importante el aporte de Nt (más de 600 kg N/ha/año). La relación C/N es baja a muy baja: lo que indica dificultades para su descomposición como lo señala también el valor de DBO. Hay aportes de nitratos y amonio, formas que se mueven fácilmente con el agua. También es significativa la adición de P y muy importante la de S y Ca; siendo intermedia la de Na y Mg, con bajos niveles de K.

El Natracualf típico Aurelia, tiene una Aptitud de Uso 6 ws con un Índice de Aptitud productiva de la Tierra de 21 (15). Son tierras con restricciones en su uso productivo por exceso de agua, sales y/o sodio.

En los Cuadros 4 a 7 se presentan los resultados de los análisis edafológicos efectuados en T y RLO.

Hay una importante acumulación de MO en los primeros 14 cm de RLO pero no más abajo. Lo mismo se observa para Nt pero con incremento hasta los 44 cm y también en el horizonte más profundo.

En general las relaciones C/N en los primeros 30 cm varía entre 10 - 11,5 en T y entre 8 - 10 en RLO, indicando la mayor dificultad de mineralización en RLO y por lo tanto su acumulación. En profundidad

todos están en torno a 5, en estas condiciones la mineralización es ínfima.

Debe advertirse que la riqueza en MO del RLO le confiere una característica indeseable por los niveles de DBO y DQO cuando el cuerpo receptor es un curso de agua, vía de drenaje o laguna. Pero si se aplica al suelo esa MO es potencialmente valiosa ya que no sólo al descomponerse deja nutrientes disponibles para las plantas sino que promovería una gran actividad biológica capaz de regenerar los macroagregados edáficos y con ellos influir positivamente en las propiedades físicas del suelo: especialmente aquellas que controlan la dinámica de los fluidos (agua y aire) como también la resistencia mecánica del suelo. La MO aplicada con el RLO tiene relación C/N de 5 la cual es muy baja. Por tanto para lograr el efecto benéfico sobre las propiedades físicas debería promoverse la producción de biomasa vegetal con alta relación C/N e incorporar los rastrojos, los que, al mezclarse con el RLO rico en N aunque pobre –comparativamente- en hidratos de carbono, podrían favorecer –por un lado- la actividad microbiana y con ella la generación de macroagregados y –por otro- la formación de humus.

El P incrementa en todo el perfil siendo beneficioso para los cultivos, especialmente leguminosas, siendo evidente que hay formas de P móviles –posiblemente hidrosolubles-

Evidentemente hay formas móviles de N y P que, si no son absorbidas por los cultivos profundizarán hasta la freática contaminándola. Aquí es donde, en primera instancia, se reconoce la necesidad de que sean extraídos para lograr por un lado mayor producción y por otro para evitar la contaminación. Se destacan entonces como indicadores el Nt y el P (By K nº 1) para

Cuadro 4. Resultados de los análisis químicos realizados a un lote asperjado durante 4 años con residuo líquido (RLO) de la industria láctea y un lote colindante con uso agrícola ganadero típico de la zona (Testigo); domina el Natracualf típico serie Aurelia (Centro oeste de Santa Fe, Argentina). Letras distintas indican diferencias significativas a nivel del 5% (test "t"); se comparan sólo pares de valores correspondientes a la misma propiedad y profundidad.

Referencia	Testigo 0-14 cm	Testigo 15-30 cm	Testigo 30-44 cm	Testigo 50-70 cm	Testigo 100-120 cm	Aspersión RLO 0-14 cm	Aspersión RLO 15-30 cm	Aspersión RLO 30-44 cm	Aspersión RLO 50-70 cm	Aspersión RLO 100-120 cm
Materia Orgánica (%)	2,6a	1,5a	0,8a	0,4a	0,5a	3,4b	1,4a	0,9a	0,5a	0,6a
Nitrógeno Total (%)	0,132a	0,086a	0,054a	0,068a	0,061a	0,207b	0,098b	0,098b	0,066a	0,078b
C : N	11,4	10,1	8,6	3,4	4,8	9,5	8,3	5,3	4,4	4,5
Fósforo Extraíble (g Mg ⁻¹)	24a	11a	14a	13a	19a	574b	35b	28b	46b	124b
S-SO ₄ (g Mg ⁻¹)	69a	86a	121a	85a	123a	148b	98a	157b	142b	128a
pH actual (1:2,5)	6,4a	7,4a	7,8a	7,9a	6,7a	7,0b	6,9b	7,3b	7,7a	7,8b
Conductividad eléctrica extracto de satur. (dS/m)	1,6a	2,2a	3,4a	3,9a	2,7a	6,3b	3,0a	2,8a	2,6a	2,5a
Ca ²⁺ intercamb. (cmolc/kg)	7,4a	7,5a	9,5a	10,4a	10,3a	12,2b	8,6b	9,7a	14,2b	16,3b
Mg ²⁺ intercamb (cmolc/kg)	2,1a	2,4a	1,6a	2,1a	3,5a	0,8b	0,8b	1,6a	2,6b	3,7a
Na ⁺ intercamb. (cmolc/kg)	0,9a	1,9a	2,2a	3,3a	4,2a	0,8a	1,0b	1,2b	1,0b	0,7b
PSI (%)	7	14	12	17	21	5	8	9	5	4
K ⁺ intercamb. (cmolc/kg)	1,4a	1,0a	1,4a	2,0a	2,7a	2,7b	1,6b	1,3a	1,5b	1,9b
CIC (cmolc/kg)	12,9a	13,9a	17,8a	19,7a	20,2a	16,4b	13,3a	13,4b	18,3a	19,2a
Ca:Mg	3,5	3,1	5,9	5,0	2,9	15,3	10,8	6,1	5,5	4,4
K:Mg	0,7	0,4	0,9	1,0	0,8	3,4	2,0	0,8	0,6	0,5

monitorear y guiar la aplicación de RLO, suspendiéndola si fuere necesario hasta que se recuperen valores normales.

Aumentan significativamente tanto los sulfatos como el calcio, ambos componentes del yeso: enmienda utilizada para desodificar a los suelos.

El suelo estudiado originalmente contiene sodio, se ve en T que está presente en cantidades importantes con PSI que supera el 15% en profundidad. En RLO se mejora significativamente ya que el Na decrece a niveles bajos en todo el perfil, como consecuencia de la aplicación de esos efluentes. La reacción del suelo se mantiene próxima a la neutralidad en ambos casos, posiblemente por el predominio del anión sulfato en la solución del suelo.

La salinidad incrementa significativamente sólo en superficie en RLO pero sin llegar a ser muy perjudicial para los cultivos: ese efecto indeseable es corregible y monitoreable a través de la CEes. En estratos más profundos los niveles son similares.

En RLO el K aumenta significativamente hasta los 30 cm: deseable para la nutrición potásica de los cultivos. En profundidad dis-

minuye posiblemente porque se reemplaza por Ca en el intercambio catiónico.

En cambio el Mg disminuye mucho y significativamente en los primeros 30 cm con respecto al T aumentando en profundidad. Además las inadecuadas relaciones Ca:Mg y K:Mg (Cuadro 4) indican que no sólo hay menos Mg sino que la mayor cantidad de Ca y de K, en el complejo intercambiable, puede limitar aún más su absorción por los cultivos. El Mg se lava, en forma similar a lo que ocurrió con el Na. Sin embargo la menor disponibilidad de Mg en superficie es de fácil corrección.

Estos resultados indican que la importante cantidad de calcio aplicada –predominantemente como sulfato– durante todo el periodo (más de 8.000 kg Ca/ha/4años) reemplazó en todo el perfil prioritariamente al Na, luego al K y en menor medida –sólo en superficie– al Mg.

El Cuadro 5 presenta la conductividad hidráulica del suelo a diferentes tensiones. La conductividad hidráulica fue más alta en todas las tensiones en T demostrando su mejor condición para la captación de agua. También puede observarse que, quién más

Cuadro 5. Conductividad hidráulica a diferentes tensiones medida en superficie de un Natracualf típico Aurelia (Centro oeste de Santa Fe, Argentina) sobre un lote asperjado durante 4 años con residuo líquido orgánico (RLO) de la industria láctea y en un lote colindante con uso agrícola ganadero típico de la zona (Testigo) (Noviembre, 2014). K₀ K_{1,5} K₃ es la conductividad hidráulica del suelo a 0, 1,5 y 3 cm de tensión

	Tensión (cm)	Testigo (mm h ⁻¹)	RLO (mm h ⁻¹)
K ₀	0	25,8a	3,7b
K _{1,5}	1,5	14,0a	3,2b
K ₃	3	8,5a	0,2b

Letras distintas indican diferencias altamente significativas al nivel del 1% (test de Tuckey)

disminuyó es K_0 , indicando el deterioro de los poros mayores del suelo, que siempre son los primeros en degradarse. La mayor conductividad hidráulica en T puede asociarse con mayor cantidad de macroporos y mejor continuidad lo que es frecuente cuando hay bioporos generados por las raíces de las plantas: esto ocurre en T pero no donde se aplicó RLO allí no hubo cultivos.

Horizontes con valores de K_0 entre 20 y 40 mm/h (Caso Testigo) son moderadamente limitantes y menores a 5 mm/h (Caso donde se aplicó RLO) indican una muy baja captación de agua. Aquí, si hubiera pendiente, se produciría escurrimiento superficial y con él el arrastre de partículas y solutos que en exceso pueden ser perjudiciales para cursos de agua, hecho preocupante si no se controla el escurrimiento en la zona donde se aplica RLO. Si no hay escurrimiento habrá encharcamiento con anaerobiosis temporaria, acentuándose esta limitante natural en estos suelos.

El porcentaje de disminución de la conductividad hidráulica saturada ($\%DK_0$) fue del 86% en RLO comparado con T. Esta disminución se debe probablemente al bloqueo de poros causado por partículas del suelo dispersas debidas a la acción mecánica de las frecuentes labores, también a que la calidad de MO adicionada no tiene –posiblemente– capacidad de agregación si no se aumenta su relación C/N con la incorporación de raíces y rastrojos; en este caso aquella dispersión no se debe al sodio que en RLO decreció. En una experiencia sobre el mismo suelo (35) aplicaron lodos de depuradora con altos niveles de MO (más del 40%), relación C/N superior a 20 y con cultivos de sorgo y avena, en estas condiciones la estabilidad de agregados al agua aumentó significativamente y también el

IHO; lo que pone de manifiesto que no sólo la cantidad de MO agregada es importante sino su calidad y la presencia de cultivos. Ambos aspectos deben tenerse en cuenta al usar el RLO de la industria láctea.

La influencia del frecuente laboreo, la pobre calidad agregante de la MO del RLO así como la falta de plantas que aporten actividad radical y rastrojos muestra su efecto en el significativo incremento de la arcilla dispersa donde se aplicó RLO respecto del T (Cuadro 6) que pasa de valores inferiores al 2% en T a más de 15%. Sin embargo la arcilla dispersa donde se aplicó RLO no sólo es mayor que en T en superficie sino también en los dos estratos siguientes. La explicación de la causa, en estos horizontes, requeriría de indagaciones adicionales.

En el trabajo realizado en Molisoles de la provincia de Santa Fe (13) sugieren que cuando $\%DK_0$ sea del 25 % o más se interrumpa el manejo que se está realizando y se adopten prácticas de recuperación, ya sea con enmiendas y/o con manejos especiales del cultivo como son propuestos por (16 y 27). Este es un caso en que debe aplicarse este tipo de manejo porque $\%DK_0$ sí lo justifica. Se destaca entonces que el $\%DK_0$ es un indicador útil para monitorear este particular deterioro físico y guiar acerca de cuándo detener una determinada práctica porque resulta perjudicial.

El IHO es bajo en el T (Cuadro 7), esperable por la pobre calidad física que tienen naturalmente los Natracuafes; esto indica que en este estrato a cualquier contenido hídrico desde húmedo a seco siempre las raíces tienen limitaciones ya sea por aireación o por resistencias mecánicas. Donde se asperjó RLO el IHO es aún menor. Las propiedades que determinan el IHO fueron la porosidad de aireación y la resistencia me-

cánica a la penetración en T, indicando que las plantas serán afectadas por falta de aire o las raíces no podrán explorar el suelo. En cambio donde se aplicó RLO en vez de limitar primero la resistencia a la penetración lo hace el agua fácilmente utilizable que aumenta notablemente el contenido hídrico al cual comienza a limitar. Esto denota que cambia la trama porosa en favor de los poros más pequeños. Es un hecho no frecuente en los Argiúdoles: por lo general cuando disminuye el IHO es porque se pierden poros grandes –densificándose-. Esto no ocurre Natracualf ya que en ambos tratamientos la Ds es de 1,25 g/cm³ pero lo que sí cambia es la distribución porosa: macroporos en T se convierten en microporos donde se aplicó RLO y por eso se eleva θ_{FU} .

Cuadro 6: Análisis granulométricos y arcilla dispersa del perfil del Natracualf típico Aurelia asperjado con residuo líquido orgánico (RLO) de la industria láctea durante 4 años y un lote colindante con uso agrícola ganadero típico de la zona (testigo).

Horizonte	Profundidad (cm)	RLO			Testigo			RLO	Testigo
		Arena	Arcilla	Limo	Arena	Arcilla	Limo	Arcilla dispersa (%)	Arcilla dispersa (%)
E	0-14	5,2	22,0	72,8	3,8	27,3	68,9	15,6	0,6
Bt1	15-30	2,9	31,2	65,9	3,4	30,9	65,7	13,7	1,3
Bt2	30-44	0,3	42,6	57,1	2,4	38,2	59,4	6,9	1,3
Bt3	50-70	2,6	41,2	56,3	2,6	39,9	57,5	1,4	0,7
BC	100-120	5,0	31,7	63,3	5,2	29,1	65,7	1,4	1,3

Cuadro 7. Intervalo hídrico óptimo y contenidos hídricos (cm³/cm³) que delimitan el IHO; en el horizonte superficial E del Natracualf típico Aurelia (Centro oeste de Santa Fe, Argentina) sobre un lote asperjado durante 4 años con residuo líquido orgánico (RLO) de la industria láctea y en un lote colindante con uso agrícola ganadero típico de la zona (Testigo) (Noviembre, 2014). (θ_s , $\theta_{s-0,15}$, θ_{10kPa} , θ_{RP} , θ_{FU} , son, respectivamente, los contenidos hídricos volumétricos: a saturación, cuando la Porosidad Aérea no es limitante, a capacidad de campo, en el límite inferior de agua fácilmente utilizable y cuando la resistencia mecánica comienza a ser limitante).

Tratamiento	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	$\theta_{s-0,15}$ (cm ³ cm ⁻³)	θ_{10kPa} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{RP} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{FU} (cm ³ cm ⁻³)	IHO (cm ³ cm ⁻³)	Macroporos > 50 μ m	Agua fácilmente utilizable
T	0,513	0,363	0,405	0,321	0,291	0,039a	0,08	0,114
RLO	0,511	0,361	0,437	0,330	0,370	0,005b	0,05	0,067

Letras distintas indican diferencias altamente significativas al nivel del 1% (test de Tuckey)

El IHO medido en T concuerda estrechamente con el evaluado en (35) (IHO en el horizonte E es de 0,023) para el mismo suelo pero en el centro de la Provincia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de RLO de la industria láctea aportó al suelo importantes cantidades de MO, Nt, P; Ca, S. Pero, como se mantuvo el suelo desnudo, sin cultivos ni malezas, con labranza superficial una vez por mes, los nutrimentos se acumularon en el perfil edáfico. Además la labranza superficial mensual sin cultivos deterioraron propiedades físicas del horizonte superficial, de por sí con limitaciones naturales para la captación de agua, resistencia mecánica elevadas y deficiente aireación.

Sin extracción de minerales por los cultivos el N y P profundizó pudiendo alcanzar la freática y contaminarla.

El Natracualf estudiado tenía sodio en todo el perfil pero la adición de sulfatos con Ca a través del RLO hizo que se reduzca significativamente por reemplazamiento catiónico y lavado en profundidad. Lo mismo ocurrió parcialmente con el K y Mg que también fueron reemplazados por el Ca.

En esta experiencia se mostraron como indicadores valiosos para monitorear los cambios que ocurrieron cuando se aplicó RLO: Nt, P (KyB 1), PSI, complejo de cationes intercambiables, CEes, %DK0 y el IHO.

El RLO podría aplicarse directamente al suelo aunque para aprovechar sus cualidades se requeriría de

(a) mínima remoción del suelo, (b) adecuada rotación de cultivos que lo aprovechen productivamente y (c) extraigan los

nutrimentos agregados evitando así que lleguen a la freática, (d) haya actividad de raíces que favorezcan tanto la agregación como la generación de bioporos; (e) adicione MO con alta relación C/N que equilibre la extremadamente baja del RLO. (f) Agregar Mg para equilibrar la probable deficiencia inducida por los altos tenores de Ca y K.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **ALESSO, C.A.; PILATTI, M.A.; IMHOFF, S. Y GRILLI, M.** 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 30 (1): 85-93.
- 2.- **ANKENY, M.D.; AHMED M.; KASPAR, T.C. Y HORTON, R.** 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 467-470.
- 3.- **BADINO, O.; PILATTI, M.A.; FELLI, O.M. Y CARRIZO, M.E.** 2009a. Permeado de suero: uso en un natrustol del centro este de Córdoba en la secuencia Maíz-Alfalfa. I. Respuesta productiva del maíz para silo y del suelo. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur; Rosario (S.Fe), Argentina. 8 pp.
- 4.- **BADINO, O.; PILATTI, M.A.; FELLI, O.M. Y CARRIZO, M.E.** 2009b. Permeado de suero: uso en un natrustol del centro este de Córdoba en la secuencia Maíz-alfalfa. II. Respuesta productiva de alfalfa y suelo. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur; Rosario (Santa Fe), Argentina. 8 pp.
- 4.- **BADINO, O.; PILATTI, M.A.; FELLI, O.M.; WEIDMANN, P.E. Y GHIBERTO, P.** 2011. Permeado de suero como abono:

- Respuesta de maíz para silo y efectos en un Argiudol de la Pampa llana Santafesina. Revista FAVE, sección Ciencias Agrarias. ISSN 1666-7719. Vol. 10 N°2- 77-85.
- 6.- **BARBERIS, L.A.; ANDREJUK, E.J. Y HUERGO, F.J.** 1976. Variación del P disponible a nivel de tres series del sur de Santa Fe. Actas. 7ª Reun. Arg. de la C. del Suelo. IDIA (Supl. Nro 33): 279-282.
 - 7.- **BLAKE, G.R. Y HARTGE, K.H.** 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Editor), Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. 2. ed. America Society of Agronomy, Madison, pp. 363-375.
 - 8.- **BRAY, R. Y KURTZ, L.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. Soils Sci., 59:29-45.
 - 9.- **CARRIZO M.E.; PILATTI, M.A.; ALESSO, C.A. Y IMHOFF, S.C.** 2011. Atributos químicos y biológicos de suelos Argiudoles cultivados y no cultivados del departamento Las Colonias (Santa Fe). Ci. Suelo (Argentina). 29 (2), 173-179.
 - 10.- **CONTI, M.E., RICHTER, M. Y MIZUNO, I.** 1978/79. Uso del método de fraccionamiento densimétrico de los complejos órgano-minerales del suelo en el diagnóstico de la fertilidad edáfica. R.I.A. Serie 3. Vol.14 (1): 9-24.
 - 11.- **FLORES, G.** 2009. Evolución de las propiedades químicas en Argiudoles de centro de Santa Fe: 1980-2007. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Agrarias UNL. 55pp.
 - 12.- **GEE, G. W. Y OR, D.** 2002. Particle-Size analysis. Chapter 2. En: Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. J. H. Dane and G. C. Topp (Eds.). Book series: 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA: 255-294.
 - 13.- **GHIBERTO, P.J.; PILATTI, M.A.; IMHOFF, S. Y ORELLANA, J.A. DE.** 2007. Hydraulic conductivity of Molisolls irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentine). Agric. Water Manag. 88, 192–200.
 - 14.- **GHIBERTO, P.J.; GENERO, F.; HEYMO, A. Y IMHOFF, S.** 2014. Lavado de nutrientes generado por la adición de efluentes líquidos de tambo al suelo. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Materia orgánica y sustancias húmicas. Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, Argentina: AACCS, 2014. p. 1-6.
 - 15.- **GIORGI, R.; TOSOLINI, R.; SAPINO, V. Y LEÓN, C.** 2010. Índices de aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe. <http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/>
 - 16.- **GUPTA, R.K. Y ABROL, I.P.** 1990. Salt affect soils: Their reclamation and management for crop production. Adv. Soil Sci. 11, 223-288.
 - 17.- **HÉBERT, M.** 2004. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes- Cráteres de referente et normes réglementaires. Direction du milieu rural. Environnement Québec.Canadá. Dépôt légal-Bibliothèque nationale du Québec. ISBN 2-550-42069-1.
 - 18.- **IMHOFF, S. Y PILATTI, M.A.** 1995. Nitrógeno orgánico en Molisoles del centro de Santa Fe. FAVE 8 (1-2) 10-18.
 - 19.- **IMHOFF, S.; PIRES DA SILVA, A. Y TORMENA, C.A.** 2000. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing system. Plant and Soil 219, 161-168
 - 20.- **IMHOFF, S.; GHIBERTO, P.J.; CARRIZO, M.E. Y CALAMARI, M.** 2012. Uso de efluentes de tambo como abono I: Efecto sobre propiedades químicas del suelo y reciclado de nutrientes. En: XIV Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 2012. Latinoamérica unida protegiendo sus suelos. Mar del Plata, Argentina: AACCS. p. 1-7.

- 21.- **IMHOFF, S.; GIBERTO, P.J.; GRIONI, A. Y GAY, J.P.** 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma* 158, 268-274.
- 22.- **INTA.** 1991. Carta de Suelos de la República Argentina Hojas 3160-26 y 25-Esperanza Pilar. 135 pp.
- 23.- **INTA-MAG PROVINCIA DE SANTA FE.** 1981. Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. Escala 1:500.00. Tomo I (centro y sur de Santa Fe). 246 pp. Convenio INTA-MAGIC.
- 24.- **INTA-MAG PROVINCIA DE SANTA FE.** 1983. Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. Escala 1:500.00. Tomo II (norte de Santa Fe). 216 pp. Convenio INTA-MAGIC.
- 25.- **JACKSON, M.L.** 1982. Análisis químico de suelos. Omega, Barcelona, 663 pp.
- 26.- **JAYAWARDANE, N.S. Y CHAN, K.Y.** 1994. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils-A review. *Aust. J. Soil Res.* 32, 13-44.
- 27.- **KLUTE, A.** 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: physical and mineralogical methods*. 2 ed. American Society of Agronomy, Madison, 26, pp.635-660.
- 28.- **LOMA, J. L.** 1980. Experimentación agrícola. UTEHA, México. 493 pp.
- 29.- **MARZETTI, M.; RACCA MADOERY, M.S.; MIRETTI, M.C.; CARRIZO, M.E. Y IMHOFF, S.** 2010. Uso de efluentes de tambo para mejorar la productividad de los cultivos. In: XXII Congreso Argentino De La Ciencia Del Suelo, Rosario 2010. CD de XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS.
- 30.- **MULLA, D.J Y MCBRATNEY, A.B.** 2000. Soil Spatial Variability. En Summer M.E : Handbook of S. Sc. A9. p. 324.
- 31.- **ORELLANA, J.A. DE Y PILATTI, M.A.** 1999. The Ideal Soil: I) An Edaphic Paradigm for Sustainable Agriculture. *J. of Sustainable Agriculture* 15 (1): 47 a 59.
- 32.- **ORELLANA, J.A. DE; PILATTI, M.A. Y GRENÓN, D.A.** 1997. Soil quality: an approach to the physical state assessment. *J.of Sustainable Agriculture* 9 (2-3):91-108.
- 33.- **ORELLANA, J. A. DE; PRIANO, L J. J. Y PILATTI, M. A.** 1988. Niveles de pH y nutrimentos en Argiudoles de Las Colonias (Santa Fe). *Rev. FAVE III* (1-2), 51 a 57.
- 34.- **PILATTI, M.A.; ALESSO, A.; FELLI, O. Y GASPAROTTI, E.** 2014. Uso de lodos de depuradora sobre suelos de baja productividad en Santa Fe (Argentina). *Revista FAVE sección Ciencias Agrarias*. 13 (1) 63-80.
- 35.- **PILATTI, M. A.; ORELLANA, J. A. DE; IMHOFF, S. Y DA SILVA, Á. P.** 2012. Revisión de los límites críticos del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). *Ciencia del Suelo* (Argentina). 30 (1): 9-21.
- 36.- **PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J. A DE.** 2012. Suelos ideales para agricultura sostenible. *Revista FAVE sección Ciencias Agrarias*, Vol.11 N°1- 65-87.
- 37.- **PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J. DE.** 2000. The Ideal Soil. II: Critical Values of the Ideal Soil, for Mollisols in the North of the Pampean Region (In Argentina). *J. of Sustainable Agriculture* 17 (1): 89-111.
- 38.- **PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J.A. DE.** 2016. Hacia una clínica de suelos: Mirando al suelo con ojos de planta. Edic. Colección 'Cátedra' UNL, 280 pp. (En prensa). Publicada versión preliminar en ocasión del XXV Congreso argentino de la Ciencia del Suelo. ISBN: 978-987-657-959-9.
- 39.- **PILATTI, M.A., D'ANGELO, C., MARRANO, R.P., PENSIERO, POTENTE, J. H. Y LÓPEZ CALDERÓN, A.** 2003. Ordenamiento Territorial de la Cuenca de Los Saladillos. Estudio de prefactibilidad del uso

- actual y potencial de los recursos naturales. Ed. Universidad Nacional del Litoral, 227 pp. ISBN 987-508-225-2.
- 40.- PILATTI, M.A., ORELLANA, J. DE. Y FELLI, O.** 2003. The Ideal Soil: III) Fitness of Edaphic Variables to Achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. of Sustainable Agriculture* 22 (2): 109-132.
- 41.- PILATTI, M.A., GHIBERTO, P. Y IMHOFF, S.** 2006. Application of a General Relationship between Soil Particle Density and Organic Matter to Mollisols of Santa Fe (Argentina). 18° Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Philadelphia, USA. Trabajo 163-11.
- 42.- PILATTI, M.A., GHIBERTO, P.J. Y FELLI, M.O.** 2016. Capítulo 2: Bajos submeridionales (Santa Fe). Limitaciones del suelo predominante para la producción de cultivos anuales. En "La salinidad y alcalinidad en suelos de la Argentina y su efecto sobre vegetación natural y cultivos. Prospección y manejo para su aprovechamiento productivo". 19 pp. Editores: E. Taleisnik y R. S. Lavado; Red Argentina de Salinidad.
- 43.- PILATTI, M. Á. Y GRENÓN, D. A.** 1995. La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica. Segunda versión, corregida, ampliada, software y manual para el usuario. Comunicaciones FAVE, C-003-AD-003, 29 pp.
- 44.- PILATTI, M.A. GRENÓN, Y D. A.** 2008a. Información química de Argiudoles del centro de Santa Fe. – I) Nitrógeno y Fósforo. *Revista FAVE sección Ciencias Agrarias*, 7 (1 y 2): 105-120..
- 45.- PILATTI, M.A. Y GRENÓN, D. A.** 2008b. Información química de Argiudoles del centro de Santa Fe. – II) pH y cationes intercambiables K, Ca y Mg. *Revista FAVE sección Ciencias Agrarias*, 7 (1 y 2): 121-130.
- 46.- PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J.A. DE.** 1995. Instrucciones para tomar muestras de suelos. 2ª. Ed., corregida y ampliada. Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 10pp.
- 47.- PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J. A. DE.** 1993. Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad: II) el intervalo hídrico óptimo. 15 pp. Inédito. Presentado en el XIV Congr. Arg. de Ciencia del Suelo. Publ. Resumen.
- 48.- PIÑEIRO, A., PILATTI, M.A. Y MISTRORIGO, D.** 1982. Degradación del recurso natural suelo y la consecuente disminución de la productividad de la región noreste de Santa Fe. Publicado por la Dir. Gen. de Extensión e Investigaciones Agropecuarias, MAG. 42 pp.
- 49.- RONDINI, M.A.S. DE Y DOVAL, H.G.C. DE.** 1975. Evaluación del fósforo orgánico y su relación con el carbono y nitrógeno orgánicos en suelos de tres regiones argentinas. *IDIA* (331-333): 16-26.
- 50.- SAMLA,** 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis. Recopilación de técnicas de laboratorio. Formato CD-ROM. ISBN 987-9184-40-8.
- 51.- SILVA, A.P. DA., KAY, B.D. Y PERFECT, E.** 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 1775-1781.
- 52.- VÁZQUEZ, M.** 1983. Variaciones temporales en las determinaciones de Ca, Mg y K intercambiables. *Rev. Facultad de Agronomía* 4 (3): 317-323.
- 53.- WALKLEY, A. Y BLACK, I.** 1945. En Jackson ML. 1982. Análisis químico de suelos. Omega: Barcelona. 663 pp.