

EVALUACIÓN QUÍMICA Y TOXICOLÓGICA DE EFLUENTES DE TAMBOS EN UNA SUBCUENCA LECHERA DE ARGENTINA

Chemical and toxicological assessment of dairy farm effluents in a dairy sub-basin in Argentina

Alberto PILATI^{1*}, Silvia Laura FANELLI^{1,2}, Ingrid Violeta POGGIO HERRERO¹, Agustín HIDALGO¹, Camila Kassandra PÉREZ¹, Rocío Denisse CASADO¹ y Camila RODRÍGUEZ¹

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Uruguay 151, Santa Rosa, CP 6300, La Pampa, Argentina.

² Instituto de Limnología "Dr. Raúl A. Ringuelet", Blvr. 120 y 62 núm. 1437, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina.

*Autor para correspondencia: apilati@exactas.unlpam.edu.ar

(Recibido: mayo de 2025; aceptado: junio de 2025)

Palabras clave: normativa, nutrientes, reúso, toxicidad, *Daphnia magna*, bioensayos.

RESUMEN

La actividad lechera en La Pampa contaba en 2020 con 133 tambos (granjas lecheras), mayormente ubicados en la subcuenca lechera sur. En los últimos años, la intensificación de la industria conllevó una intensificación de la producción de efluentes en los tambos. Estos desechos (combinación de excretas, alimento y químicos utilizados en la limpieza y el saneamiento) generan un efluente potencialmente negativo para el ambiente. Debido a la falta de información sobre estos efectos, se realizó una encuesta aleatoria a 25 tambos de esta subcuenca para caracterizarlos. Con base en ello, se seleccionaron nueve tambos para analizar sus efluentes. La encuesta indicó que un tambo promedio utilizaba entre 2620 y 12400 L/d, principalmente para el lavado de pisos, la cámara de enfriamiento y el lavado del equipo, y que el agua se desechaba sin tratamiento previo en canales o pozos. Los análisis químicos indicaron altos valores de demanda química de oxígeno (179-683 mgO₂/L), nitrógeno total (48-221 mgN/L), nitrógeno amoniacal (7-146 mgN-NH₄⁺/L), fósforo total (14-57 mgP/L) y fosfatos (2-15 mg P-PO₄³⁻/L). Todos estos valores superaron ampliamente los límites establecidos por ley. Los bioensayos de toxicidad con *Daphnia magna* indicaron efluentes tóxicos o muy tóxicos para la biota (CL₅₀: 51.3-10.5 %). Sin embargo, no se pudo asociar esta toxicidad a ninguna de las variables estudiadas, lo que indica que pueden existir interacciones entre ellas o bien con compuestos no estudiados en este proyecto. El contenido de nutrientes demuestra buen potencial para reúso como riego, previo tratamiento. Es imperativo que la nueva legislación incluya análisis de toxicidad.

Keywords: legislation, nutrients, reuse, toxicity, *Daphnia magna*, bioassays.

ABSTRACT

Dairy activity in La Pampa in 2020 included 133 dairy farms, mostly located in the southern dairy sub-basin. In recent years, industry intensification has led to increased wastewater production from these dairy farms. These wastes (a combination of manure, feed residues, and cleaning chemicals) pose a potential environmental threat.

Due to the lack of data about these environmental effects, a randomized survey of 25 dairy farms in this sub-basin was conducted. Nine of them were selected to analyze their effluents. The survey revealed that an average dairy farm used between 2620 and 12 400 L/d primarily for floor washing, cooling chambers, and equipment cleaning. This wastewater was typically discharged into canals or wells without prior treatment. Chemical analyses of the effluents indicated elevated levels of several parameters: chemical oxygen demand (179-683 mgO₂/L), total nitrogen (48-221 mgN/L), ammonia nitrogen (7-146 mgN-NH₄⁺/L), total phosphorus (14-57 mgP/L), and phosphates (2-15 mg P-PO₄³⁻/L). All these values greatly exceeded the limits established by law. Toxicity bioassays using *Daphnia magna* indicated that the effluents were toxic or highly toxic to biota (LC₅₀: 51.3-10.5 %). However, this toxicity could not be associated with any of the variables studied, indicating that there may be interactions between them, or it may be due to compounds not studied in this project. The nutrient content demonstrates good potential for reuse as irrigation after treatment. It is imperative that new legislation include toxicity analysis.

INTRODUCCIÓN

La industria láctea, al igual que la de sus derivados, es una de las actividades económicas más relevantes de Argentina y ha experimentado un proceso de intensificación en los últimos años. El proceso de intensificación y concentración es producto de la disminución del número de tambos (granjas lecheras), el aumento en el tamaño de los rodeos, la carga animal por hectárea, y el incremento de la producción de leche por vaca (Taverna et al. 2004, Centeno 2013, Fundación Pel 2014, Gastaldi et al. 2018, Paollili et al. 2022). Esta intensificación conduce a generar mayor cantidad de residuos sólidos y líquidos en las salas de ordeño (Taverna et al. 2004, Herrero y Gil 2008).

Particularmente, el agua utilizada en los tambos cumple un rol relevante en la salud y nutrición del animal, como elemento de higiene en las instalaciones, pisos y pezones de los animales, y para el enfriamiento de la leche (Herrero et al. 2002, Salazar et al. 2003). Los líquidos residuales así generados están conformados por el agua del lavado de instalaciones, equipos y corrales, excretas (heces y orina), restos de leche y de alimentos, detergentes y productos químicos de limpieza (Raghunath et al. 2016). Estos productos, al combinarse, generan un efluente con alto contenido de nutrientes, sólidos, materia orgánica y microorganismos que aumentan su impacto en el ambiente receptor (Herrero et al. 2009, Martínez-Suller et al. 2010, Herrero 2014, Fyfe et al. 2016).

La mala gestión de los efluentes originados en estas salas es una de las principales causas de contaminación de aguas subterráneas (Harter et al. 2002, Taverna et al. 2004, Brião y Tavares 2007, Cappellini 2011, Herrero 2014, Badino et al. 2015, Chandra et al. 2018). Asimismo, estos efluentes

pueden causar eutrofización en ambientes acuáticos por la alta concentración de nutrientes o toxicidad por amonio en peces y otros vertebrados (Yang et al. 2008, Dubrovsky et al. 2010, Chislock et al. 2013). En ambientes terrestres, pueden observarse múltiples efectos negativos en microorganismos del suelo, inhibición de la germinación y del crecimiento de las plantas (Kuppusamy et al. 2018). De más está aclarar que estos efectos deletéreos dependerán del volumen, tratamiento y destino de estos efluentes.

De esta manera, la producción de efluentes líquidos con alto contenido de nutrientes (y otros productos tóxicos) puede producir un importante desbalance en el ecosistema receptor, sea acuático o terrestre. Por ello se sugiere tratar los efluentes antes de ser desechados al suelo, lagunas o ríos. También se los puede diluir para reutilizarlos como fertilizantes. Al ser tan ricos en nitrógeno, los desechos de estos tambos pueden aplicarse para mejorar los rendimientos de los cultivos anuales con mayor demanda de nitrógeno (Smith y Chambers 1993), como maíz, avena, trigo o alfalfa, y, en algunos casos, promover una mayor biomasa y diversidad microbiana en el suelo (Hawke y Summers 2006). Sin embargo, los efectos puntuales son potenciales dentro del tambo, dependiendo de su manejo; más aún, considerando la falta de plantas de tratamiento en el mismo. Aunque los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales no están diseñados para la eliminación de micro contaminantes, la eliminación de materia orgánica y parcialmente de varios productos farmacéuticos se lleva a cabo por rutas biológicas o físicas y químicas dentro de estos sistemas (García-Rodríguez et al. 2014, Ramírez-Morales et al. 2024), reduciendo así al menos parcialmente el riesgo asociado a las aguas residuales.

Según el Ministerio de Producción de La Pampa (MP 2023), en Argentina la actividad primaria láctea se localiza principalmente en las provincias de Santa Fe (31.3%), Córdoba (32.3%), Buenos Aires (27.9%), Entre Ríos (4.9%), Santiago del Estero (1.3%) y La Pampa (1.2%). La mayor concentración de tambos se ubica en la región pampeana húmeda (Herrero 2014) donde, debido a la intensificación y aumento de rodeos lecheros, aumentó tanto la demanda de agua como la cantidad de efluentes producidos (Herrero et al. 2002, Nosetti et al. 2002, Herrero y Gil 2008).

Marginal a la cuenca de la región pampeana húmeda, se encuentra la cuenca La Pampa, ubicada en la zona este de la provincia homónima. En esta provincia, la producción lechera (ubicada en la región subhúmeda seca) se divide en tres subcuencas: norte, centro y sur, siendo la más importante la última (Fig. 1). Según la Dirección General de Estadísticas y Censos de La Pampa (DGEyCLP 2021) y el Ministerio de Producción (MP 2023), en 2020 esta subcuenca poseía 83 de los 133 tambos presentes en la provincia que producían un promedio 9 306 952 L de leche al mes, es decir, aproximadamente 80 millones de L/año. La actividad tampera en esta zona adquiere particular relevancia debido a que, por sus condiciones agroclimáticas, el agua no es naturalmente abundante y los suelos son pobres y de escasa profundidad, muy susceptibles a la degradación (Sánchez et al. 2001, Murcia 2018a). El vertido de desechos potencialmente contaminantes puede ser

un agravante de su condición, limitando la capacidad de uso del suelo, que actualmente consiste en la cría de bovinos para la producción de leche, pasturas implantadas (alfalfa) y, en menor medida, cultivo de maíz y cereales (Cano 1980).

Para evitar que la disposición final de estos desechos o su reúso provoque efectos deletéreos en el ambiente, existen leyes y disposiciones que la regulan. Al respecto, la legislación de la provincia de La Pampa a través de la Ley Provincial N° 1508/1993, publicada en el Boletín Oficial de La Pampa (BOLP 1993), y la Ley Ambiental Provincial N° 1914/2000 (BOLP 2000) prohíben la emisión o descarga de todo tipo de efluentes líquidos sin previo tratamiento, pero no establecen normativas específicas para el uso del agua y el manejo y utilización de efluentes provenientes de tambos lecheros. Sumado a esto, la gran variedad de sustancias nocivas de los efluentes hace que sea necesario un enfoque integral que considere la interacción entre sus componentes, incluyendo también la de aquellos que se encuentran en concentraciones tan bajas que no pueden ser detectados y sus posibles consecuencias sobre la biota. Los compuestos que en ellos convergen los convierten en mezclas complejas con potencial tóxico (Roche 1998, Mishra et al. 2000, Herrero 2014, Sivrioglu y Yonar 2015, Rodríguez 2018, Poggio 2020).

La estimación de los efectos tóxicos sobre los organismos se puede realizar mediante bioensayos (Day et al. 1988). Conocer la toxicidad de los efluentes de tambo resulta de importancia para caracterizar su efecto sobre la biota y a su vez permite evaluar la disposición final y/o posibles usos que pueden darse a esas aguas residuales, entre estos su reúso como agua de riego. Por ello es necesario caracterizar los tambos de la zona, no sólo haciendo hincapié en el uso de agua dentro de ellos (origen, uso y destinos), sino también analizando los efluentes para determinar su potencial efecto tóxico. De reutilizarse los efluentes de tambos, no solo se estaría reduciendo el volumen de efluentes desechados al ambiente, sino que también se estaría contribuyendo al desarrollo sostenible al revalorizar ese desecho (Diez 2009, 2010 y 2016). La presente investigación tuvo como objetivos: 1) encuestar establecimientos tamperos de la subcuenca sur de La Pampa y determinar el uso de agua dentro de los mismos; 2) evaluar las características químicas básicas de los efluentes para determinar si superaban el límite permitido por la legislación vigente y de esta manera establecer si puede darse algún tipo de reúso, y 3) evaluar la toxicidad aguda de los efluentes producidos por medio de bioensayos con *Daphnia magna*.

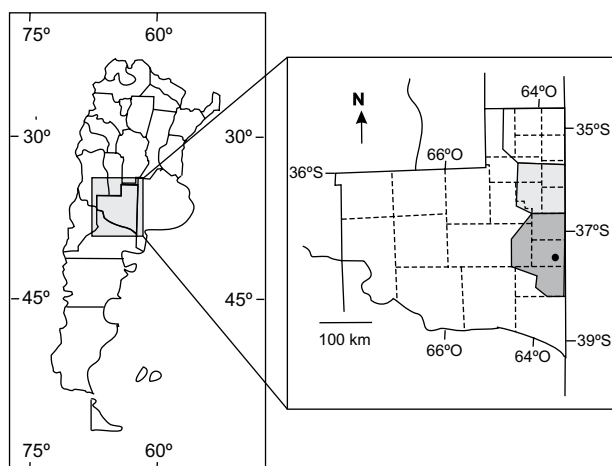


Fig. 1. Ubicación de la provincia de La Pampa en Argentina. A la derecha se detallan las tres subcuencas que componen la cuenca lechera La Pampa: subcuenca norte (blanco), subcuenca centro (gris claro) y subcuenca sur (gris oscuro). El punto negro representa la ciudad de Guatraché.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos

Para la determinación de nutrientes, se prepararon curvas de calibración utilizando patrones de cloruro de amonio, nitrato de sodio, nitrito de sodio y fosfato dibásico de potasio. Otros reactivos utilizados incluyeron: sulfanilamida, N-naftil etilendiamina, molibdato de amonio, ácido ascórbico, tartrato de antimonio y potasio, persulfato de potasio, fenol y nitroprusiato de sodio, permanganato de potasio y oxalato de sodio. Todos los reactivos utilizados fueron de pureza superior al 98 % (marca Sigma-Aldrich).

Encuesta

Para caracterizar los tambos del área estudiada, se encuestaron 25 tambos durante 2020 tomando como base la metodología utilizada por Salazar et al. (2003). Se relevaron tanto características básicas de los establecimientos y su funcionamiento, como volúmenes de agua utilizados durante el proceso productivo (uso de agua en L/d que incluía el lavado de pisos, de pezones, limpieza del equipo y cámara de enfriamiento de la leche) y destino del agua. La encuesta se realizó a los dueños o encargados del tambo para asegurar la veracidad de los datos.

Toma de muestras y análisis químicos

De los 25 tambos encuestados, se seleccionaron nueve que abarcaban un amplio rango de volúmenes de agua utilizados, leche producida y lugar de disposición final de los efluentes (**Cuadro SI** en el material suplementario). Los muestreos se realizaron en diciembre de 2021 según las técnicas propuestas por Taverna et al. (2014). Para analizar las características de efluentes producidos por los tambos se tomaron dos muestras en el canal/piletón donde se desechaban los efluentes de cada tambo. Estas muestras se integraron en una muestra principal de las cuales se obtuvieron tres submuestras de 1 L cada una. Las submuestras destinadas a bioensayos y análisis de nutrientes totales fueron inmediatamente conservadas en refrigeración. Las submuestras destinadas a nutrientes disueltos fueron filtradas con filtros de fibra de vidrio tipo GF/F y posteriormente conservadas en refrigeración hasta su análisis, siguiendo protocolos establecidos por la American Public Health Association (APHA 2012).

En el momento en que se obtuvieron cada una de las dos muestras originales de cada lugar de dispensa de desechos, también registró el pH y la conductividad con un medidor portátil de pH y conductividad

(Oakton PCSTestr 35 Waterproof Multiparameter) y el oxígeno disuelto y temperatura con un oxímetro (YSI modelo 50).

En el laboratorio, las determinaciones de nutrientes disueltos se realizaron con los métodos del ácido ascórbico, hidrazina y fenato para analizar los fosfatos ($P-PO_4^{3-}$), nitratos ($N-NO_3^-$) y amonio o nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$), respectivamente (APHA 2012). El nitrógeno total (NT) y el fósforo total (PT) se midieron en muestras sin filtrar previa digestión con persulfato de potasio, mediante el método de la segunda derivada (Ferree y Shannon 2001) y ácido ascórbico (APHA 2012), respectivamente. Todas las determinaciones se realizaron con un espectrofotómetro (UV-Vis Ocean Optics Red Tide USB650UV). Para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó el cálculo del índice de oxidabilidad por reducción del permanganato potásico por la materia orgánica contenida en la muestra de agua (APHA 2012). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se estimó a partir de la relación empírica que considera que es alrededor del 61 % de la DQO (Sánchez-Ramírez et al. 2017). Los sólidos suspendidos totales (SST) se estimaron filtrando agua en filtros de fibra de vidrio tipo GF/F previamente pesados, secados por 24 h a 60 °C y pesados nuevamente siguiendo protocolos establecidos por la US Environmental Protection Agency (USEPA 1993).

Límites permitidos de vuelco

Para determinar si la calidad de los efluentes analizados se encontraba dentro de los límites permitidos para el vertido al ambiente, se utilizó el Decreto 2793 de la provincia de La Pampa (BOLP 2006). Este decreto estaba vigente al momento del muestreo. Por ello se utilizaron también legislaciones extraprovinciales como el Decreto 847/16 de Córdoba publicado en el Boletín Oficial de la provincia de Córdoba (BOCBA 2016), por ser esta una provincia de importante producción lechera, y la Resolución 283/19 de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR 2019) de la provincia de Buenos Aires, debido a que esta cuenca recibe una gran variedad de efluentes (**Cuadro I**).

Bioensayos de toxicidad

Con el fin de evaluar la peligrosidad de los efluentes se realizaron ensayos de toxicidad utilizando *Daphnia magna* como organismo de prueba, siguiendo lo establecido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD 2004). Esta especie se emplea ampliamente en

pruebas de toxicidad, ya que es fácilmente cultivable, presenta reproducción partenogénica (lo que asegura una uniformidad de respuesta) y un ciclo de vida corto, con un alto número de crías. Específicamente, los ensayos permiten determinar la toxicidad de sustancias químicas puras, aguas residuales, lixiviados, aguas superficiales o subterráneas, agua potable y agua de poro de sedimentos, entre otros (Castillo 2004). Las hembras de *D. magna* fueron cultivadas con agua reconstituida de una dureza entre 160 y 180 mg CaCO₃/L en cámaras de cultivo a una temperatura de 22 ± 2 °C, con un fotoperiodo aproximado de 16 h luz/8 h oscuridad (16:8). Se las alimentó con una suspensión de algas *Scenedesmus* sp. (Castillo 2004).

Para el desarrollo de pruebas de toxicidad aguda con *D. magna* se trabajó con neonatos expuestos a diferentes diluciones de los efluentes. La dilución de los efluentes se realizó en forma seriada con medio de cultivo como medio de dilución; así, se analizaron los efluentes puros (100 %) y diluidos (50, 25, 12.5, 6.25 y 3.12 %). Se realizó un control negativo con neonatos *D. magna* en medio de cultivo consistente en agua dura reconstituida siguiendo protocolos de la APHA (2012) y Castillo (2004). A las 48 h se cuantificó el número de organismos muertos. Como es difícil verificar con certeza la muerte de los individuos expuestos, por su pequeño tamaño, se consideró como parámetro de medición final la inmovilidad de éstos, ya que normalmente se encuentran en constante movimiento. Se calculó la concentración letal 50 (CL₅₀) mediante el método Probit. El porcentaje de organismos muertos por la acción tóxica de la sustancia se transformó en unidades Probit y al mismo tiempo se hizo una transformación logarítmica de las concentraciones de ensayo (Castillo 2004). Esta transformación permitió el ajuste a una recta de regresión, en la cual la concentración perteneciente al Probit 0.5 corresponde a la cantidad de efluente capaz de generar la muerte en la mitad de la población (USEPA 2000, Díaz-Báez y Pica-Granados 2004). La aceptabilidad de los resultados dependió de que la mortalidad en el control negativo (blanco realizado con el medio de cultivo) no superara el 10 %. En caso contrario, se invalida la prueba y se debe repetir el ensayo (Castillo 2004). Como la toxicidad es inversamente proporcional a la CL₅₀ (las muestras más tóxicas se corresponden con los valores de CL₅₀ más bajos), para facilitar la interpretación de los resultados se emplearon las unidades de toxicidad aguda (UT), cuyo valor se calcula como 100/CL₅₀. Para la interpretación de la UT se utilizaron los criterios propuestos por Saldaña et al. (2002).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa Past (Hammer et al. 2001). Todas las variables fueron normalizadas utilizando el logaritmo para asegurar la normalidad. Se realizó un análisis multivariado de componentes principales (PCA) para precisar las variaciones observadas en los parámetros físicos y químicos en los distintos tambos muestreados. En el PCA se incluyeron SST, N-NH₄⁺, NT, N-NO₃⁻, PT, conductividad (Cond.), DQO, UT, P-PO₄³⁻ y uso de agua en los tambos (Uso Ag.). El pH no se incluyó en el PCA, ya que no presentó un eigenvalor significativo en ninguno de los dos primeros componentes. Tampoco se consideró la DBO, ya que fue estimada a partir de la DQO y no eran independientes entre sí. Para el análisis de conglomerados se utilizó el método de Ward para minimizar la varianza dentro de cada grupo. Para analizar si las UT estaban correlacionadas con el número de vacas de ordeño, los litros de leche producidos por día, litros de agua usados diariamente para la limpieza, SST, conductividad, pH, DQO, PT, P-PO₄³⁻, NT, N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), ya que no se logró normalizar la totalidad de las variables.

RESULTADOS

Caracterización de los establecimientos

Los establecimientos encuestados se clasificaron como privados (50 %) o familiares (50 %), con uno a cuatro empleados. Sólo 16 manifestaron contar con asesoramiento profesional. El ordeño (100 % mecánico) se realizaba con uno o dos equipos de seis a 10 bajadas. El promedio de vacas de ordeño (VO) por establecimiento fue de 113 cabezas (rango: 22-230) con un peso aproximado de 600 kg cada una y una producción de 2537 L/d (rango: 400-5800). El 71 % de los establecimientos encuestados manifestó no realizar estabulación alguna, mientras que el 24 % sólo realizó medio día de estabulación y el 5 % restante realizó una estabulación permanente. La dieta consistió mayormente en pasturas (50 %), seguida por suplementos alimenticios (28 %) y granos (22 %).

Uso del agua

El suministro de agua de todos los tambos provino de perforaciones, de las cuales sólo nueve de los 25 tambos encuestados declararon realizar exámenes rutinarios de la misma. Un tambo promedio utilizó 5600 L/d (rango: 2620-12 400). El uso diario promedio de agua por vaca de ordeño fue de 59 L/VO/d

(rango: 24-187). El agua se utilizó principalmente para el lavado de pisos (3590 L/d), seguida por el enfriamiento de la leche (895 L/d), el lavado de los pezones (730 L/d) y la limpieza del equipo una vez finalizado el ordeño (378 L/d).

Destino de los efluentes líquidos

Sólo dos de los 25 tamberos encuestados manifestaron realizar análisis de los efluentes. Lamentablemente, no se pudo acceder a los análisis mencionados. Sólo la mitad de los tamberos declararon que sus tambos poseían pileta de decantación para los efluentes. En cuanto al destino de estos, el 61 % de los tambos disponía de los efluentes en un canal y el 39 % en un pozo de tierra. Estos destinos finales se encontraban a una distancia de 30 y 3000 m del tambo, pero no recibían ningún tipo de tratamiento. Sólo uno de los tambos manifestó reutilizar el agua para riego de pasturas, aplicando los purines con carros en dosis de 2000 L/ha/año en la estación primaveral.

Parámetros de calidad de agua

La mayoría de las mediciones de nutrientes analizados (**Fig. 2**) superaron los límites establecidos por la legislación descrita en el **cuadro I**. El 100 % de los tambos analizados superaron ampliamente lo establecido por el Decreto 2793/2006 de La Pampa para el NT (límite: 15 mg/L; rango encontrado: 48-221 mgN/L) y el Decreto 846/2017 de Córdoba para el N-NH₄⁺ (límite: 3 mgN-NH₄⁺/L; rango determinado: 7-144 mgN-NH₄⁺/L). Sin embargo, ninguno de los tambos superó el límite establecido para N-NO₃⁻ de 10 mgN-NO₃⁻/L (**Fig. 2a**). Todos los tambos superaron el límite establecido para PT (límite: 10 mgP/L; rango encontrado: 13-60 mgP/L) y sólidos suspendidos (límite: 35 mg/L; rango encontrado: 268.5-1770 mg/L), mientras que el 55 % de los tambos superó los límites establecidos para P-PO₄ (límite: 5 mgP-PO₄³⁻/L; rango encontrado: 1.8-15.3 mgP-PO₄³⁻/L; **Cuadro I, Fig. 2b**). Exceptuando un solo tambo, los niveles de DQO registrados superan ampliamente el límite

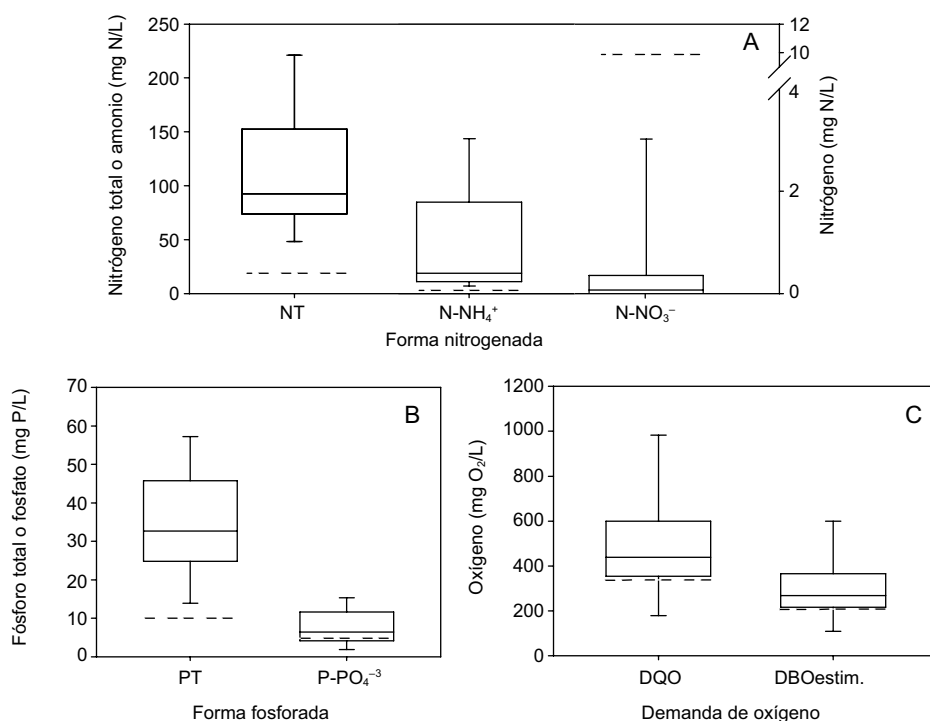


Fig. 2. Composición del efluente de los nueve tambos muestreados de la subcuenca sur de La Pampa: (a) nitrógeno total (NT), nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) y nitratos (N-NO₃⁻); (b) fósforo total (PT) y fosfatos (P-PO₄³⁻); (c) demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBOestim) estimada a partir de la DQO. Los bigotes de los diagramas de caja indican los valores extremos, la caja el rango intercuartílico y la línea negra la mediana. Las líneas punteadas indican los límites permitidos para el vuelco según el **cuadro I**.

CUADRO I. LEGISLACIÓN SELECCIONADA JUNTO A SU VALOR MÁXIMO PERMITIDO (LÍMITE) PARA DIFERENTES PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS.

Parámetro	Legislación	Límite (mg/L)
Fósforo total	Resolución 283/2019 ACUMAR (2019)	10
Fosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	Decreto 847/16 Córdoba (BOCBA 2016)	< 5
Nitrógeno total	Decreto 2793/06 La Pampa (BOLP 2006)	15
Amonio (N-NH ₄ ⁺)	Decreto 847/16 Córdoba (BOCBA 2016)	3
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Decreto 847/16 Córdoba (BOCBA 2016)	< 10
Demanda química de oxígeno	Decreto 2793/06 La Pampa (BOLP 2006)	250-350
Demanda biológica de oxígeno	Decreto 2793/06 La Pampa (BOLP 2006)	50-200
pH	Decreto 2793/06 La Pampa (BOLP 2006)	6.5-10
Sólidos suspendidos	Resolución 283/2019 (ACUMAR 2019)	< 35

ACUMAR: Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo; BOCBA: Boletín Oficial de la provincia de Córdoba; BOLP: Boletín Oficial de La Pampa.

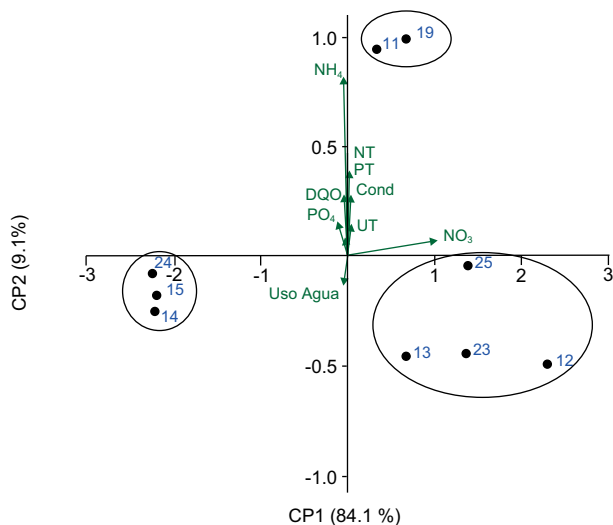


Fig. 3. Agrupación de tambos según el análisis de componentes principales considerando: sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺), nitrógeno total (NT), nitrato (N-NO₃⁻), fósforo total (PT), conductividad (Cond.), demanda química de oxígeno (DQO), unidades tóxicas (UT), fosfatos (P-PO₄³⁻) y uso de agua en los tambos (Uso Ag.). Cada componente principal muestra, entre paréntesis, el porcentaje de la varianza explicada por cada eje.

establecido de 250-350 mgO₂/L (**Cuadro I, Fig. 2c**). El valor mínimo registrado de DQO, único dentro de los parámetros permitidos, estuvo cerca de los 180 mgO₂/L. Sin embargo, el valor promedio fue casi el doble del límite permitido y el máximo casi cuadruplicó el límite de la legislación, alcanzando 982 mgO₂/L. Los valores estimados de DBO fluctuaron entre 89.5 y 291.3 mgO₂/L, superando los valores máximos de vuelco permitidos por el Decreto 2793/2006 de La Pampa (50-200 mg/L; **Fig. 2c**).

El pH promedio de los efluentes de los tambos muestreados fue de 8.03 ± 0.67 (rango: 7.1-8.9) y la conductividad fue de 2.81 ± 1.09 mS/cm (rango: 1.7-4.9).

Los resultados del PCA (**Fig. 3**) indicaron que los dos primeros componentes principales explicaron el 93.1 % de la varianza total de las observaciones. El CP1 estuvo fuertemente relacionado de manera positiva con los niveles de N-NO₃⁻, mientras que el CP2 se relacionó principalmente de manera positiva con los niveles de N-NH₄⁺, SST, NT, PT, conductividad, DQO, UT y P-PO₄³⁻, y de manera negativa con el uso de agua en los tambos. En la **figura 3** se observan claramente tres grupos asociados a los valores con mayor peso: 1) tambos 14, 15 y 24; 2) tambos 19 y 11, y 3) tambos 12, 13, 23 y 25. El grupo 1 se caracterizó por presentar niveles de N-NO₃⁻ por debajo del nivel de detección. El grupo 2 presentó los niveles más elevados de N-NH₄⁺ (140.3-143.6 mgN-NH₄⁺/L). Por otro lado, el grupo 3 presentó los niveles más bajos de PT (13.9 - 32.7 mgP/L). Particularmente, el tambo 12, si bien se agrupó con otros tambos, se caracterizó por tener los niveles más altos de N-NO₃⁻ y los más bajos de SST, DQO, PT y NT dentro del grupo. A su vez, el tambo 23, presentó la concentración más baja de P-PO₄³⁻ de todos los tambos y grupos.

El agrupamiento de muestras realizado por el análisis de conglomerados fue consistente con el PCA. A una distancia de 3 (50 %) también formó tres grupos definidos con los mismos tambos (**Fig. 4**). Los resultados coherentes entre el PCA y el análisis de conglomerados refuerzan la idea de que los patrones en los datos están claramente definidos y que ambos métodos tienen la capacidad de identificar estos patrones de manera similar.

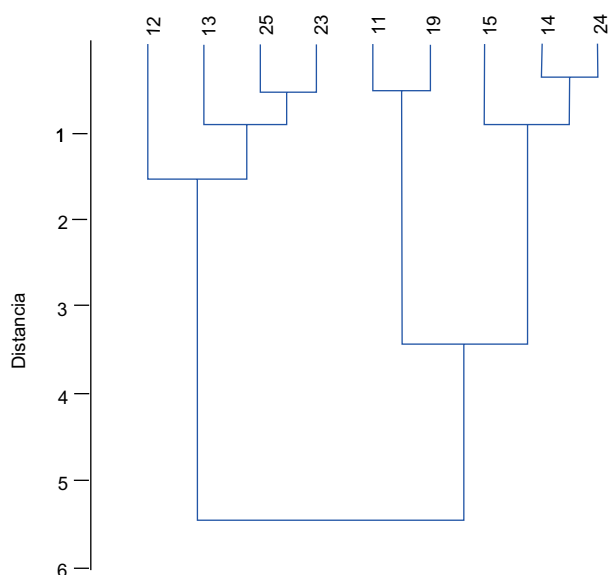


Fig. 4. Agrupación de tambos según el análisis de conglomerados.

Bioensayos de toxicidad con *Daphnia magna*

Respecto a los bioensayos, casi todas las muestras presentaron una elevada mortalidad de los organismos de prueba aun en las concentraciones de efluentes más diluidas. El 88.8 % de las muestras ensayadas presentaron valores de CL_{50} menores al 50 % ($UT < 2$). De los nueve tambos analizados, el efluente más tóxico fue el del tambo 15, con una CL_{50} de 10.5 % (UT : 9.6). La muestra del tambo 14, mostró una baja mortalidad incluso a altas concentraciones del efluente, siendo, por lo tanto, la de menor toxicidad con una CL_{50} de 93.32 % (UT : 1.07).

De acuerdo con la clasificación en UT (Saldaña et al. 2002), en todas las descargas de efluentes se detectó toxicidad sobre los organismos de prueba (rango UT : 1.1 a 9.6). Esta respuesta fue clasificada como muy tóxica para el 33.3 % de los efluentes testeados, tóxica para el 55.5 % y ligeramente tóxica para el 11.1 % restante (**Cuadro II**).

La correlación entre la UT y los parámetros físicos y químicos analizados en los efluentes de los nueve tambos no fue significativa al 5 % en ningún caso (**Cuadro III**). Sin embargo, es importante destacar un indicio de asociación entre la UT y el NT .

DISCUSIÓN

Este estudio actualizó y amplió la información sobre los tambos de la cuenca sur de La Pampa e incluyó, por primera vez, una caracterización de

CUADRO II. EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD CON *Daphnia magna*, UNIDADES TÓXICAS Y SUS RESPECTIVAS CONCENTRACIONES LETALES MEDIAS.

Muestra	CL_{50}	UT	Clasificación según toxicidad
11	24.0	4.2	Muy tóxico
12	32.4	3.1	Tóxico
13	29.5	3.4	Tóxico
14	93.3	1.1	Ligeramente tóxico
15	10.5	9.6	Muy tóxico
19	51.3	1.9	Tóxico
23	26.3	3.8	Tóxico
24	40.7	2.5	Tóxico
25	23.4	4.3	Muy tóxico

UT : unidades tóxicas (Saldaña et al. 2002); CL_{50} : concentración letal media.

CUADRO III. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN (ρ) ENTRE UNIDADES TÓXICAS Y CADA UNA DE LAS VARIABLES ANALIZADAS Y EL VALOR DE LA PROBABILIDAD ASOCIADA A LA PRUEBA DE HIPÓTESIS DE CORRELACIÓN NULA.

	ρ	Valor p
UT - número de vacas de ordeño	0.318	0.4015
Litros de leche/día	0.100	0.8099
Litros de agua usados/día	-0.500	0.1777
Sólidos suspendidos totales	0.300	0.4366
Conductividad	0.134	0.7311
pH	-0.353	0.3475
Demanda química oxígeno	0.267	0.4782
Fósforo total	0.567	0.1206
Fosfatos	0.233	0.5517
Nitrógeno total	0.600	0.0968
Nitrógeno amoniacal	0.117	0.7756
Nitratos	-0.009	0.9942

UT : unidades tóxicas.

sus efluentes. Se tomó como referencia el trabajo de Larrea et al. (2020) sobre los tambos pampeanos en 2017. En nuestro estudio, un tambo promedio poseía 113 (rango: 22-230) vacas en ordeño (VO), cifra inferior al promedio de 166 VO (rango: 12-2120) reportado en 2017, coincidente con la disminución en el número de tambos y VO registrados a nivel provincial debido a los vaivenes económicos de la actividad en el país (MP 2023).

La producción de leche observada en este estudio se encuentra dentro de los valores habituales para La Pampa. Históricamente, los tambos de la cuenca sur producían entre 1200 y 2400 L/d (Sánchez et al. 2001,

Murcia 2018a), alcanzando picos de 3510 L/d (Larrea et al. 2020). En este trabajo, la producción varió entre 144000 y 2088000 L/año, con un promedio de 926187 L/año, en línea con los rangos provinciales previos. Las diferencias en la producción reflejan la diversidad de los tambos en las distintas cuencas. En la subcuenca sur, la producción promedio fue de 2537 L/día, lo que clasificaría a los establecimientos como pequeños a medianos según se cita en Castro y Torres (2018).

Los tipos de alimentación reportados en esta investigación difieren de los establecidos por Larrea et al. (2020), quienes indicaron que un tambo promedio en la provincia de La Pampa alimenta sus vacas con 20 % de pasturas, 36 % de granos y 35 % de suplementos. En la subcuenca sur, por otro lado, las pasturas naturales aportaban el 50 % de la dieta. Esta diferencia puede justificarse porque los tambos de este estudio, además de ser más pequeños y de tipo familiar respecto del resto de la provincia, deben enfrentar condiciones ambientales menos favorables (semiáridas), y la alimentación de las vacas se basa en un recurso natural abundante, como son las pasturas.

Respecto al uso de agua, al no haber datos provinciales, se comparó con los de la provincia vecina de Buenos Aires (Nosetti et al. 2002; **Cuadro IV**). Los valores obtenidos en este estudio respecto del lavado de máquinas y de pezones se encuentran dentro del rango reportado por estos autores. Sin embargo, el volumen de agua utilizado para el lavado de pisos en este estudio fue casi tres veces mayor que el máximo valor reportado por Nosetti et al. (2002). Esta discrepancia no ha podido ser dilucidada a partir de los datos obtenidos en las encuestas ni en las visitas a los tambos muestreados. Finalmente, el promedio de agua usada por vaca y día (59 L/VO/d) concuerda con valores reportados en Irlanda y Chile (Martínez-Suller et al. 2010, Salazar et al. 2003). Sin embargo, es ligeramente superior a los 50 L/VO/d reportados por García (2015) para Argentina. Esto indica que el uso de agua en el sureste de La Pampa es menos eficiente que en el país en general. Sin embargo, muchos tamberos no conocían con precisión el volumen

de agua utilizado, por lo que estos datos pueden estar sobreestimados y deben tomarse con cautela.

En este estudio se observó que ninguno de los tambos contaba con tratamiento de los efluentes líquidos, que se descartaban directamente en zanjales o pozos. A diferencia de otras regiones de Argentina, donde entre el 50 y 81 % de los tambos tienen algún tratamiento (Herrero 2009), en La Pampa, alrededor del 90 %, utiliza cavas sin tratamiento (Larrea et al. 2020), situación que no ha mejorado con el tiempo según lo observado en esta investigación. Esto puede deberse al desconocimiento sobre el uso de efluentes para riego y fertilización, así como a la limitada inversión de los productores (Murcia 2018b). Además, el lugar donde se disponen los efluentes influye en su calidad: mientras que en canales pequeños hay condiciones que impiden la nitrificación y en lagunas grandes se evidencia una fuerte descomposición anaeróbica y contaminación con residuos nitrogenados y fósforo, en campos abiertos se mantienen condiciones más equilibradas, con mayor presencia de $N-NO_3^-$ y menor DQO.

El sitio de disposición final de los efluentes influyó notablemente en su agrupamiento en el análisis PCA. En los tambos del grupo 1, los efluentes se descargaban en canales pequeños y poco profundos, donde la ausencia de $N-NO_3^-$ y los elevados niveles de $N-NH_4^+$ indican un ambiente reductor con alta carga orgánica que limita la nitrificación. En el grupo 2, los efluentes se vertían en lagunas grandes y profundas, con concentraciones muy altas de $P-PO_4^{3-}$, $N-NH_4^+$, NT, PT y DQO, lo que refleja una intensa descomposición anaeróbica y posible pérdida de nitrógeno por desnitrificación. También se registraron altos niveles de SST y de fósforo, asociados a residuos orgánicos o detergentes. En cambio, los efluentes del grupo 3 se aplicaban directamente al suelo, sin almacenamiento previo. Este manejo mostró un balance redox más favorable, con presencia de $N-NO_3^-$ y una menor DQO, lo que permitió condiciones más oxidantes en comparación con los grupos 1 y 2, donde predominaban ambientes anóxicos o reductores.

CUADRO IV. COMPARACIÓN ENTRE EL CONSUMO DE AGUA ENCONTRADO POR NOSETTI ET AL. (2002) Y ESTE ESTUDIO. PARA ESTE ESTUDIO, EL NÚMERO INDICA LA MEDIA Y EL RANGO ENTRE PARÉNTESIS.

Estudio/ Variable	Enfriamiento (L agua/L leche)	Lavado de máquinas (L/d)	Lavado de pisos (L/vaca ordeño/d)	Lavado de pezones (L/vaca ordeño/d)
Nosetti et al. (2002)	4.65 - 9.20	180 - 400	3.57 - 8.33	0 - 3.11
Estudio actual	0.3 (0 - 2.5)	203 (50 - 500)	21.5 (7.7 - 83.3)	2.5 (0 - 15.6)

Este trabajo constituye el primer estudio de caracterización de efluentes de tambos en el sudeste de La Pampa. Ante la falta de datos específicos para la provincia, se compararon los resultados con estudios realizados en otras áreas de la región pampeana, aunque en establecimientos de distintos tamaños (**Cuadro V**). Los valores de NT, N-NH₄⁺ y PT obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos informados por Nosetti et al. (2002), Herrero (2014) y Di Nasso (2019). En cambio, los niveles de demanda química de oxígeno (DQO) fueron inferiores a los reportados por diversos autores. Por ejemplo, García (2015) registró valores de DQO cercanos a 4600 mg/L en un tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Rafaela del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria sin tratamiento, mientras que Nosetti et al. (2002) y Herrero (2014) reportaron entre 530 y 27000 mg/L en tambos de Buenos Aires. A pesar de no contar con sistemas de tratamiento, los tambos estudiados mostraron niveles relativamente bajos de DQO, en línea con trabajos previos realizados en Argentina (García et al. 2006, Herrero 2014, Poggio 2020), que señalan que muchos efluentes no alcanzan los valores de DQO requeridos para su descarga ambiental. Esta diferencia podría deberse a que en los tambos evaluados las áreas de encierro y escurrimiento postordeño no están impermeabilizadas, lo que permite que parte de las excretas y la materia orgánica queden retenidas en el suelo, reduciendo su arrastre hacia la laguna de disposición final (Nosetti et al. 2002). En casos de elevada carga orgánica en los efluentes, estudios como los de Craggs et al. (2004) y USEPA (1999) han demostrado que su reducción es posible mediante sedimentación de sólidos combinada con sistemas de lagunas anaeróbicas y facultativas.

Para determinar si la composición de los efluentes supera los límites establecidos para La Pampa o la región, se utilizaron como referencia los valores establecidos por el Decreto provincial N° 2793/06, vigente al momento de la toma de muestras (BOLP 2006). Esto se debe a que actualmente la provincia de La Pampa no cuenta con una normativa específica para

regular el vertido de efluentes al ambiente. Al comparar los valores de PT, P-PO₄³⁻, NT, N-NH₄⁺, SST y DQO obtenidos en este estudio con los valores de referencia, se constató que todos ellos superaban ampliamente los valores máximos permitidos por la legislación; por lo tanto, no serían aptos para su vuelco directo. Sin embargo, monitorear únicamente los parámetros físicos y químicos de los efluentes no es suficiente para evaluar la seguridad de las aguas residuales vertidas. Por este motivo, se recomienda complementar el análisis con ensayos de toxicidad, como pruebas con *Lactuca sativa* que permitan detectar efectos tóxicos en plantas mediante la evaluación del porcentaje de inhibición de la germinación, del crecimiento de la radícula o de índices de fitotoxicidad.

En este estudio, los resultados de toxicidad obtenidos para los nueve tambos evaluados coinciden con los rangos señalados por Poggio et al. (2014) y Poggio 2020), en los que la CL₅₀ varió de 43 a 89 %. Aunque algunos tambos presentaron niveles de toxicidad superiores a los registrados en esa investigación, todas las muestras analizadas fueron clasificadas como tóxicas para la especie ensayada (UT entre 1 y 100). De forma similar, en otras regiones de Latinoamérica, Ramírez-Morales et al. (2024) hallaron toxicidades en aguas residuales lecheras entre 1.06 y más de 100 UT, y Méndez-Rivera et al. (2023) detectaron UT entre 1 y 22.9 en todos los puntos muestreados. En nuestro estudio se detectó toxicidad en todos los efluentes, lo que sugiere la presencia de compuestos tóxicos incluso en concentraciones muy bajas, con la capacidad de afectar a los organismos utilizados en los ensayos. Las UT no mostraron una correlación significativa con los parámetros físicos y químicos evaluados (**Cuadro III**). No obstante, algunos tambos presentaron una toxicidad elevada, lo cual podría atribuirse a interacciones sinérgicas o antagónicas entre sustancias o a la presencia de contaminantes no analizados, como detergentes, desinfectantes o medicamentos utilizados en el manejo del tambo (Méndez-Rivera et al. 2023, Ramírez-Morales et al. 2024). En esos trabajos, los ensayos

CUADRO V. COMPARACIÓN ENTRE LA CARACTERIZACIÓN DE EFLUENTES DE TAMBOS DEL ESTUDIO ACTUAL CON OTROS AUTORES PERTENECIENTES A LA REGIÓN PAMPEANA.

Estudio/ variable	Nitrógeno total (mgN/ L)	Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄ ⁺ mg/ L)	Fósforo total (mgP/ L)	Demanda química de oxígeno (mgO ₂ / L)
Este estudio	48.4 - 221.2	7.0 - 146.3	13.9 - 57.2	179.0 - 682.6
Nosetti et al. (2002)	106.3 - 654.8	30.3 - 225	6.8 - 51.9	945 - 27 000
Herrero et al. (2014)	31 - 1180	3 - 341	7.3 - 130	510 - 27 000
Di Nasso (2019)	604	-	97	-

ecotoxicológicos revelaron que todas las muestras presentaron cierto grado de toxicidad para *Daphnia magna* y que la mayoría también resultó tóxica para *Vibrio fischeri* y *Lactuca sativa* (Ramírez-Morales et al. 2024).

Los ensayos de toxicidad, adoptados por la USEPA (1994, 2000), permiten evaluar el impacto potencial de los contaminantes en distintos organismos acuáticos y terrestres. Si bien no identifican las sustancias responsables de la toxicidad, son herramientas útiles que integran los efectos combinados de compuestos conocidos y desconocidos, así como sus posibles interacciones. Además, son aplicables tanto para proteger los ambientes receptores como para verificar la eficiencia de los tratamientos implementados antes del vertido (Saldaña et al. 2002, Aguayo et al. 2004, Ra et al. 2008).

CONCLUSIONES

Este estudio concluye que el uso de agua en los tambos de la subcuenca sur de La Pampa es similar al registrado en tambos de zonas cercanas. No obstante, los efluentes presentan concentraciones de sustancias químicas que exceden los límites establecidos por la normativa vigente, la cual requiere una urgente actualización. Esta revisión debería contemplar diferencias en la escala de producción, ya que no todos los tambos generan la misma cantidad de efluentes.

Por otro lado, el elevado contenido de nutrientes de los efluentes sugiere un potencial de aprovechamiento como fertilizante. Sin embargo, las pruebas revelaron que todos los efluentes resultaron tóxicos para *Daphnia magna*, lo que evidencia posibles efectos adversos sobre la biota y el ecosistema.

Actualmente, los efluentes suelen ser vertidos en canales, pozos o directamente en el suelo, prácticas que representan un riesgo de contaminación ambiental. Por ello, es fundamental que la futura normativa incluya evaluaciones de toxicidad no solo en organismos animales, sino también en vegetales, a fin de informar sobre los riesgos ambientales y definir posibles medidas de mitigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Néstor Ariel Pérez y Ángel Fabián Casado por facilitar el contacto con los tamberos de la zona, y reconocer a los revisores y al editor por sus valiosos comentarios y sugerencias. Esta investigación fue financiada por la Facultad de Ciencias

Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, a través del proyecto de investigación RN 46.

REFERENCIAS

- ACUMAR (2019). Tabla consolidada de límites admisibles de vertido de efluentes líquidos. Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo. RESOL-2019-283-APN-ACUMAR#MI. Ciudad de Buenos Aires, Argentina, 9 de diciembre.
- Aguayo S., Muñoz M.J., de la Torre A., Roset J., de la Peña E. y Carballo M. (2004) Identification of organic compounds and ecotoxicological assessment of sewage treatment plants (STP) effluents. *Science of The Total Environment* 328, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.013>
- APHA (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. American Public Health Association, Washington, DC, EUA, 724 pp.
- Badino O., Schmidt E., Ramos E., Herrero M.A., Weidmann R. y Giraudo F. (2015). Uso del agua, manejo de efluentes y residuos en tambos del noreste de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Revista Oficial de la Facultad de Ciencias Agrarias de Esperanza* 14, 7-16.
- BOCBA (2016). Estándares y normas sobre el vertido para la preservación del recurso hídrico provincial. *Boletín Oficial de Córdoba, Córdoba, Argentina*, 13 de julio.
- BOLP (1993). Sobre emisión o descarga al ambiente de efluentes líquidos y sus agregados. *Boletín Oficial del Gobierno de La Pampa (B.O. N° 2036, Ley N° 1508)*. Santa Rosa, La Pampa, Argentina, 30 de noviembre.
- BOLP (2000). Ley ambiental provincial. *Boletín Oficial del Gobierno de La Pampa (B.O. N° 2036, Ley N° 1508)*. Santa Rosa, La Pampa, Argentina, 2 de febrero.
- BOLP (2006). Límites para el vertido de efluentes líquidos en cuerpos de agua superficiales. *Boletín Oficial del Gobierno de La Pampa (B.O. N° 2712, Decreto N° 2793)*. Santa Rosa, La Pampa, Argentina, 1 de diciembre.
- Brião V.B. y Tavares C.R.G. (2007). Effluent generation by the dairy industry: Preventive attitudes and opportunities. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 24, 487-497. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000400003>
- Cano E. (1980). Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa. Instituto Superior de Agronomía, Buenos Aires, Argentina, 493 pp.
- Cappellini O.R. (2011). Dairy development in Argentina [en línea]. <https://www.fao.org/3/a-a1744e.pdf> 01/07/2025

- Castillo Morales G. (2004). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, 189 pp.
- Castro B.A. y Torres L.N.V. (2018). Caracterización de los diferentes sistemas de producción lechera de La Pampa. Tesis de licenciatura. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina, 114 pp.
- Centeno A.R. (2013). Intensificación en el tambo. ¿Qué cambió? Hoja de información técnica N° 33. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, San Francisco, Córdoba, Argentina, 3 pp.
- Chandra R., Castillo-Zacarias C., Delgado P. y Parra-Saldívar R. (2018). A biorefinery approach for dairy wastewater treatment and product recovery towards establishing a biorefinery complexity index. *Journal of Cleaner Production* 183, 1184-1196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.124>
- Chislock M.F., Doster E., Zitomer R.A. y Wilson A.E. (2013) Eutrophication: Causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge* 4 (4), 8 pp.
- Craggs R.J., Sukias J.P., Tanner C.T. y Davies-Colley R.J. (2004). Advanced pond system for dairy-farm effluent treatment. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 47 (4), 449-460. <https://doi.org/10.1080/00288233.2004.9513613>
- Day K.E., Ongley E.D., Scroggins R.P. y Eisenhauer R.P. (1988). Biology in the new regulatory framework for aquatic protection. *Proceedings of the Alliston Workshop*, abril 26-28. *Environment Canada Report* N° EN 37-88/1988E. National Water Research Institute, Canadá, 71 pp.
- Díaz-Báez C. y Pica-Granados Y. (2004). Ensayo de toxicidad aguda con *Daphnia magna*. En: Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. (Castillo G.C., Ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-International Development Research Center, Ciudad de México, México, 52-63.
- Di Nasso L. (2019). Evaluación de efluentes de tambo como abonos orgánicos para una forrajera invernal. Tesis de ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina, 25 pp.
- DGEyCLP (2021). Anuario estadístico 2021. Dirección General de Estadísticas y Censos de La Pampa, Gobierno de la Provincia de La Pampa [en línea]. <https://estadistica.lapampa.gob.ar/images/Archivo/Anuarios/Anuario%20Estadistico%202021.pdf> 01/07/2025
- Diez M. (2009). Respuesta del maíz a la aplicación de efluentes de tambo en entisoles y molisoles de la planicie medanosa. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina, 31 pp.
- Diez M. (2010). Manejo de los efluentes originados en tambo: una experiencia en el este de La Pampa. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 47, 16-18.
- Diez M. (2016). Alternativas de uso de efluentes de tambo. Efectos sobre la producción de cultivos y propiedades de molisoles y entisoles de la región semiárida pampeana. *Semiárida* 26 (1), 56-57.
- Dubrovsky N.M., Burow K.R., Clark G.M., Gronberg J.M., Hamilton P.A., Hitt K.J., Mueller D.K., Munn M.D., Nolan B.T., Puckett L.J., Rupert M.G., Short T.M., Spahr N.E., Sprague L.A. y Wilber W.G. (2010). The quality of our nation's waters—Nutrients in the nation's streams and groundwater, 1992-2004. U.S. Geological Survey Circular 1350, Reston, Virginia, EUA, 174 pp.
- Ferree M. A., y Shannon R. D. (2001). Evaluation of a second derivative UV/visible spectroscopy technique for nitrate and total nitrogen analysis of wastewater samples. *Water Research* 35 (1), 327-332. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00222-0)
- Fundación Pel (2014). Anuario de la lechería argentina. Fundación para la Promoción y el Desarrollo de la Cadena Láctea Argentina. Vicente López, Buenos Aires, Argentina [en línea]. <https://produccionbovina.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/anuario-de-la-lecherc3ada-argentina-2014.pdf> 01/07/2025
- Fyfe J., Hagare D. y Sivakumar M. (2016). Dairy shed effluent treatment and recycling: Effluent characteristics and performance. *Journal of Environmental Management* 180, 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.058>
- García K.E., Charlon V., Cuatrin A., Taverna M. y Walter E. (2006). Evaluación de un sistema de tratamiento de efluentes generados en las instalaciones de ordeño. *Revista Argentina de Producción Animal* 28, 313-314.
- García K. E. (2015). Manejo de efluentes en instalaciones tamberas. *Tecnología Láctea Latinoamericana* 88, 56-60.
- García-Rodríguez A., Matamoros V., Fontàs C. y Salvadó V. (2014). The ability of biologically based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 21, 11708-11728. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2448-5>
- Gastaldi L.B., Centeno A.R., Litwin G.M., Maekawa M., Marino M.R., Moretto M.L., Cuatrin A. y Engler P.L. (2018). Lechería pampeana. Resultados del ejercicio 2016-2017: información para productores. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [en línea]. <https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/han>

- dle/20.500.12123/2584/INTA_CRBsAsNorte_EEA-Pergamino_Gastaldi_Laura_Lecher%3%ada_Pampeana_resultados_del_ejercicio_2016_2017_informe_para_productores.pdf?sequence=1&isAllowed=y 01/07/2025
- Hammer Ø., Harper D.A.T. y Ryan P.D. (2001). Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4 (1), 1-9.
- Harter T., Davis H., Mathews M.C. y Meyer R.D. (2002). Shallow groundwater quality on dairy farms with irrigated forage crops. *Journal of Contaminant Hydrology* 55 (3-4), 287-315. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00189-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00189-9)
- Hawke R.M. y Summer S.A. (2006). Effects of land application of farm dairy effluent on soil properties: A literature review. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 49 (3), 307-320. <https://doi.org/10.1080/00288233.2006.9513721>
- Herrero M. A., Iramain M. S., Korol S., Buffoni H., Flores M., Pol M. y Fortunato M. (2002). Calidad de agua y contaminación en tambos de la cuenca lechera de Abasto Sur, Buenos Aires (Argentina). *Revista Argentina de Producción Animal* 22 (1), 61-70.
- Herrero M.A. y Gil S.B. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral* 18, 273-289.
- Herrero M.A., coord. (2009). Uso de agua, manejo de efluentes e impacto ambiental. II Jornadas Internacionales de Calidad de Leche, Buenos Aires, Argentina [en línea]. https://www.researchgate.net/publication/278028063_Uso_del_agua_manejo_de_efluentes_e_impacto_ambiental#fullTextFileContent25/04/2024
- Herrero M.A. (2014). Uso y manejo del agua y efluentes en un área rural: consecuencias sanitarias y ambientales de la intensificación de la producción primaria de leche. Tesis de doctorado. Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 380 pp.
- Kuppusamy S., Kakarla D., Venkateswarlu K., Megharaj M., Yoon Y. y Lee Y. (2018). Veterinary antibiotics (VAs) contamination as a global agro-ecological issue: A critical view. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 257, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.026>
- Larrea Á.T., Mata H., Benito J., Otorosky R., Saravia D., Hecker F., Barbará M.Á. y Meglia G.E. (2020). Caracterización de las explotaciones lecheras de La Pampa. *Ab Intus* 5, 71-82.
- Martínez-Suller L., Provolo G., Carton O.T., Brennan D., Kirwan L. y Richards K.G. (2010). The composition of dirty water on dairy farms in Ireland. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 49 (9), 67-80.
- Méndez-Rivera M., Montiel-Mora J.R., Ramírez-Morales D., Masis-Mora M., Rodríguez-Rodríguez E. (2023). On-farm occurrence of pharmaceuticals and their environmental hazard: Case study of a tropical dairy farm. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 111, 51. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03809-2>
- Mishra S., Barik S.K., Ayyappan S., Mohapatra B.C. (2000). Fish bioassays for evaluation of raw and bioremediated dairy effluent. *Bioresource Technology* 72, 213-218. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00124-8)
- MP (2023). Cadena láctea. Ministerio de Producción de La Pampa [en línea]. https://produccion.lapampa.gob.ar/images/Archivos/Servicios/cadena_lactea_pampeana/Informe_Cadena_Lactea_Feb.2023.pdf 01/07/2025
- Murcia M.G. (2018a). La producción lechera en La Pampa. En: Producción lechera: una mirada desde la región semiárida (Gigli I. y Murcia M.G., Eds.). Editorial Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, La Pampa, Argentina, 15-24
- Murcia M.G. (2018b). Manejo de efluentes. En: Producción lechera: una mirada desde la región semiárida (Gigli I. y Murcia M.G., Eds.). Editorial Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, La Pampa, Argentina, pp. 101-112.
- Nosetti L., Herrero M.A., Pol M., Maldonado May V., Iramain M.S. y Flores M. (2002). Cuantificación y caracterización de agua y efluentes en establecimientos lecheros. I. Demanda de agua y manejo de efluentes. *Investigación Veterinaria* 4 (1), 37-43.
- OECD (2004). Prueba No. 202: *Daphnia* sp. acute immobilisation test. Guidelines for the testing of chemicals, section 2. Organisation for Economic Co-operation and Development Publishing, París, Francia, 12 pp. <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>
- Paollilli M.C., Mattera J., Cabrini S.M., Fillat F.A. y Pagliaricci L.O. (2022). Evolución de la cadena láctea en Argentina. Periodo 2000-2021. Indicadores económicos e informes técnicos. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [en línea]. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/11802/INTA_CRBsAsNorte_Paollilli_Mar%3%ada_Evoluci%3%b3n_de_la_cadena_l%3%a1ctea_en_Argentina_Per%3%adodo_2000-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y 01/07/2025
- Poggio Herrero I.V., Mariamé M.P., Rodríguez C., Fanelli S.L., Porta A., Fort M., Mastrantonio Garrido G. (2014). Aplicación de bioensayos a la evaluación ecotoxicológica de efluentes de tambo. Avances en investigación en salud pública veterinaria en la Provincia de La Pampa. Estación Experimental

- Agropecuaria Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas” 97 (8), 64-66 [en línea]. https://hdl.handle.net/11336/16263_01/07/2025
- Poggio Herrero I.V. (2020). Estudios ecotoxicológicos para la gestión sustentable de efluentes líquidos urbanos y pecuarios. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, 111 pp.
- Ra J.S., Lee B.C., Chang N.I. y Kim S.D. (2008). Comparative whole effluent toxicity assessment of wastewater treatment plant effluents using *Daphnia magna*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 80 (3), 196-200. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9344-y>
- Raghunath B.V, Punnagaiarasi A., Rajarajan G., Irshad A., Elango A. y Mahesh G. (2016). Impact of dairy effluent on environment—A review. En: *Integrated waste management in India* (Prashanthi M. y Sundaram R., Eds.). Springer, Cham, Berlín, Alemania, 239-249. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27228-3_22
- Ramírez-Morales D., Masis-Mora M., Montiel-Mora J.R., Méndez-Rivera M., Gutiérrez-Quirós J.A., Brenes-Alfaro L. y Rodríguez-Rodríguez C.E. (2024). Pharmaceuticals, hazard and ecotoxicity in surface and wastewater in a tropical dairy production area in Latin America. *Chemosphere* 346, 140443. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140443>
- Roche K.F. (1998). Growth potential of *Daphnia magna* Straus in the water of dairy waste stabilization ponds. *Water Research* 32, 1325-1328. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00272-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00272-8)
- Rodríguez C. (2018). Uso de bioensayos para la evaluación toxicológica de efluentes provenientes de la producción láctea en la provincia de La Pampa. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, La Pampa Argentina, 86 pp.
- Salazar F.J., Dumont J.C., Santana M.A., Pain B.F., Chadwick D.R. y Owen E. (2003). Prospección del manejo y utilización de efluentes de lecherías en el sur de Chile. *Archivos de Medicina Veterinaria* 35 (2), 215-225. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2003000200009>
- Saldaña P., Lerdo de Tejada A., Gómez M.A. y López R. (2002). La importancia de incluir análisis de toxicidad en descargas industriales y municipales que afectan los cuerpos receptores. *Memorias. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Guayaquato, México*. 17-20 de abril.
- Sánchez A., Chau G., Ferretti S., Babinec F., Colazo R., de Durana J., Estelrich D. y Zappa M. (2001). Caracterización de los sistemas de producción lechera en las cuencas de La Pampa. *Semiárida* 12 (1), 7-19.
- Sánchez-Ramírez J.E., Ribes J., Ferrer J. y García-Usach M.F. (2017). Obtención de los principales parámetros del agua residual urbana empleados en los modelos matemáticos de fangos activados a partir de una caracterización analítica simple. *Ingeniería y Región* 17, 33-48.
- Sivrioğlu Ö. y Yonar T. (2015). Determination of the acute toxicities of physicochemical pretreatment and advanced oxidation processes applied to dairy effluents on activated sludge. *Journal of Dairy Science* 98, 2337-2344. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8278>
- Smith K.A. y Chambers B.J. (1993). Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms—problems and practical solutions. *Soil Use and Management* 9 (3), 105-111. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1993.tb00938.x>
- Taverna M.A., Charlon V., Panigatti C., Castillo A., Serrano P. y Giordano J. (2004). Manejo de los residuos originados en las instalaciones de ordeño. Una contribución al logro de ambientes locales sanos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Rafaela, Santa Fe, Argentina, 75 pp.
- Taverna M.A., García C. y Adorni M.B. (2014). Procedimiento de muestreo de efluentes líquidos y residuos sólidos orgánicos generados en el tambo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Rafaela, Santa Fe, Argentina, 33 pp.
- USEPA (1993). ESS Method 340.2. Total suspended solids, mass balance (dried at 103-105 °C), volatile suspended solids (ignited at 550 °C). United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, EUA, 3 pp. [en línea]. https://www.cyanopros.com/refs/epa_TSS.pdf 01/07/2025
- USEPA (1994). EPA 833-B-94-002 (4203). Whole effluent toxicity (WET) control policy. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, EUA, 25 pp. [en línea]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/owm0117.pdf> 01/07/2025
- USEPA (1999). EPA/833B-99/002. Toxicity reduction evaluation guidance for municipal wastewater treatment plant. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, EUA, 97 pp. [en línea]. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/tre.pdf> 01/07/2025
- USEPA (2000). EPA 821-B-00-004. Method guidance and recommendations for whole effluent toxicity (WET) testing (40 CFR Part 136). United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, EUA, 60 pp. [en línea]. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-D/part-136#136.3> 01/07/2025
- Yang X.E., Wu X., Hao H.L. y He Z.L. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science B* 9 (3), 197-209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>

MATERIAL SUPLEMENTARIO

CUADRO SI. DATOS DE LOS 25 TAMBOS MUESTREADOS OBTENIDOS MEDIANTE ENCUESTAS. EL AGUA UTILIZADA PARA EL LAVADO TOTAL INCLUYE LA UTILIZADA PARA EL LAVADO DE PISOS, EQUIPOS, PEZONES Y CÁMARA DE ENFRIAMIENTO.

Número de tambo	Análisis efluente	Número de vacas de ordeño	Litros de leche/día	Tanque de leche (L)	Lavado total (L/día)
1	No	22	400	5000	3230
2	No	130	2800	5000	5000
3	No	110	2600	5000	3100
4	No	130	3200	5300	3300
5	No	160	4600	4300	10 700
6	No	100	3000	8000	5740
7	No	120	2000	8000	5200
8	No	100	1800	1500	5000
9	No	114	2000	6000	3100
10	No	120	3300	5500	3820
11	Sí	102	2000	2900	3300
12	Sí	66	1800	3000	5600
13	Sí	95	2200	5400	3380
14	Sí	42	1200	4000	7840
15	Sí	90	2100	4300	2620
16	No	93	2500	5300	4500
17	No	84	2300	4000	5000
18	No	115	2100	5000	12400
19	Sí	180	5000	8000	6200
20	No	80	1700	3300	6820
21	No	230	5800	8200	9700
22	No	140	1200	7800	7800
23	Sí	120	3000	3200	10 000
24	Sí	90	2000	5200	2700
25	Sí	115	2800	10000	2740