



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>
Cisneros Basualdo, N. E., Banda Noriega, R.B., Miguel, R.E. Rodríguez, C.I. y Ruiz de Galarreta, V.A.
Peligro de contaminación del agua subterránea por sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos
e004, <https://doi.org/10.59069/24225703e004>

Peligro de contaminación del agua subterránea por sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos

Groundwater contamination hazard by lagoon systems for effluent treatment from dairy farms

Nicolás Eloy Cisneros Basualdo^{1,2*} Roxana Bettina Banda Noriega¹ Roberto Esteban Miguel³
 Corina Iris Rodríguez^{1,4} Víctor Alejandro Ruiz de Galarreta¹

* Autor de contacto

Recibido: 08 de noviembre de 2022 • Aceptado: 17 de abril de 2023 • Publicado: 24 de julio de 2023

Resumen

El ordeño bovino en tambo es una de las principales actividades primarias en la provincia de Buenos Aires. Abastece al mercado interno y externo de leche cruda y derivados. La cuenca lechera Mar y Sierras abarca 68.267 km² del sudeste de la provincia, y en el último registro del año 2013 contaba con 182 tambos. El proceso de ordeño genera un efluente líquido con alta carga orgánica que debe ser tratado previo su vuelco. El sistema más utilizado por los productores es el de lagunaje. Sin embargo, su diseño y construcción no son adecuados o presentan fallas. Debido a la diversidad regional del medio físico, se requiere de herramientas para evaluar la peligrosidad de que el recurso hídrico subterráneo sea contaminado por esta actividad. El objetivo del trabajo fue evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea por el uso de sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos en el sudeste bonaerense. Se aplicó el método GOD para determinar la vulnerabilidad del acuífero y estimar índices de carga contaminante (ICC) en cinco campos con siete tambos de distintas escalas productivas y ubicadas en sitios con diversas características. Los sitios mostraron peligrosidad 'Elevada' y 'Moderada' de contaminación. Los tambos familiares, aunque presentaron menor ICC, se ubicaban en sitios con alta vulnerabilidad, mientras que los tambos de mayor escala, con alta carga contaminante, se situaron en áreas de menor vulnerabilidad. Estos análisis colaboran en la prevención y categorización del peligro de contaminación del recurso hídrico subterráneo por la actividad de tambos.

Palabras clave: carga contaminante, producción lechera en tambo, recurso hídrico subterráneo, vulnerabilidad.

1. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA).
2. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA)
3. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, Estación Experimental Agropecuaria Chilecito.
4. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Abstract

Dairy farms are one of the main primary activities in Buenos Aires province. It supplies the local and foreign markets with raw milk and derivatives. The 'Mar y Sierras' dairy basin extends over 68,267 km² of the province's southeast. 182 dairy farms in activity were registered in 2013. The milking process generates a liquid effluent with a high organic load that must be treated prior to dumping. The most used system by producers is that of lagooning. However, its design and construction are not adequate or have flaws. Due to the regional diversity of the physical environment, tools to assess the danger of the groundwater resource being contaminated by this activity are required. The aim of this work was to evaluate the danger of groundwater contamination due to lagoon systems for effluent treatment from dairy farms in the southeast of Buenos Aires. The GOD method was applied to assess the vulnerability of the aquifer and to estimate pollution load indices (PLI) in five fields with seven dairy farms of different production scales located in sites with different characteristics. The farms showed 'High' and 'Moderate' danger of contamination. The family-scale dairy farms, although they presented lower PLI, were located in sites with high vulnerability, while the larger-scale dairy farms, with a high pollutant load, were located in areas of less vulnerability. These analyzes collaborate in the prevention and categorization of the danger of contamination of groundwater resource due to dairy farms.

Keywords: pollution load, dairy farms production, groundwater resources, vulnerability.

Introducción

El ordeño bovino en tambo aprovecha los procesos fisiológicos de parto y lactancia de mamíferos rumiantes (vacas) para la obtención de leche cruda como producto para consumo humano o como insumo para la elaboración de derivados lácteos.

Esta es una de las principales actividades primarias en Argentina, la cual abastece de leche cruda al mercado interno y externo. Según datos de la Fundación para la Promoción y el Desarrollo de la Cadena Láctea Argentina (FunPel), en 2021 se alcanzó una producción nacional de 11.553 millones de litros de leche, lo cual representó un crecimiento interanual de 3,4% respecto a 2020. Esta productividad resulta de una serie de estrategias económicas que se implementaron desde la década de 2000, con el objetivo de impulsar la industria láctea en el mercado internacional. La inclusión de nuevas técnicas y tecnologías en el sector significó un aumento en el volumen de leche extraída por animal en un menor número de establecimientos (Mancuso y Teran, 2008). La falta de infraestructura para afrontar este aumento productivo trajo asociado un incremento en los impactos ambientales generados, evidenciado por un aumento en los problemas con la calidad del agua, mayor recurrencia de enfermedades en los animales (p.ej. mastitis), falta de adecuación a normativas vigentes (García *et al.*, 2011), entre otros.

La actividad de tambo en Argentina se divide administrativamente en 'cuencas' lecheras que reúnen productores regionales con similares intereses y dinámicas socio-productivas. Dentro de la provincia de Buenos Aires se destaca la cuenca administrativa de 'Mar y Sierras', la cual abarca 68.267 km² sobre el sudeste del territorio (e incluye parte de diferentes cuencas hidrográficas). Los últimos datos disponibles respecto al número de establecimientos en la cuenca lechera Mar y Sierras son del año 2013. En tal sentido, la cuenca contaba con 182 tambos que representaban el 7,10 % de los tambos bonaerenses (FunPel, 2013).

El ordeño bovino requiere del uso de importantes volúmenes de agua, principalmente para el preenfriamiento de la leche (proceso vital para el control microbiológico de la leche) y la limpieza de maquinarias e infraestructura. La principal fuente de abastecimiento es el recurso hídrico subterráneo, debido a las reservas disponibles, los bajos costos de extracción y mantenimiento, y su temperatura estable a lo largo del año acorde a los procesos de intercambio térmico con la leche.

En el proceso de limpieza se genera un efluente con alta carga orgánica (purín) proveniente de desechos animales que debe ser gestionado y tratado correctamente. Según la Encuesta Sectorial Lechera de INTA (Gastaldi *et al.*, 2020), el 83% de los establecimientos optó por el sistema de lagunas para manejar dichos residuos. Sin embargo, esta práctica no se realiza en forma adecuada en la mayoría de los tambos bonaerenses. Esto representa una amenaza como fuente potencial de contaminación hacia el recurso hídrico utilizado para consumo humano, animal y productivo.

La evaluación del peligro de la contaminación de un acuífero resulta una herramienta esencial para la gestión de los recursos hídricos subterráneos y la planificación territorial (Grondona *et al.*, 2013). Este peligro se estima a partir de la interacción entre una carga contaminante volcada por determinada actividad humana y la vulnerabilidad del acuífero según sus características hidrogeológicas (Foster e Hirta, 1988).

Cada contaminante debe ser analizado de forma independiente, debido a las características fisicoquímicas que puedan afectar la dinámica, transporte y/o retardo en el perfil edáfico. La evaluación puede realizarse de diversas maneras, aunque por lo general se contempla la clase y carga hidráulica del contaminante, modo y tiempos de disposición en el terreno (Foster *et al.*, 2002; Zaporozec *et al.*, 2002).

Los métodos paramétricos para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos pueden dividirse en

tres grandes grupos (Barbulescu, 2020): los sistemas matriciales (ejemplo Matriz de Riesgo de La Manna y Malcuori, *et al.*, 2012), de sumas ponderadas (DRASTIC de Aller *et al.*, 1987) y de rating. Dentro de este último grupo, la metodología propuesta por Foster e Hirata (1988), denominada GOD (según las siglas en inglés), estima la probabilidad de que el recurso hídrico subterráneo sea contaminado por compuestos de origen antrópico en concentraciones que superen las recomendadas por la Organización Mundial de la Salud, para calidad de agua potable (OMS, 2006). En 2002, los autores publicaron una actualización de la metodología donde se agregó el suelo como un componente más para determinar la vulnerabilidad del acuífero.

El método GOD presenta como ventaja el escaso número de parámetros a relevar para cada sitio y la sencillez operativa al momento de su aplicación, sin dejar de contemplar el comportamiento hidráulico y características de los acuíferos a evaluar (Auge, 2007). Esto permite realizar un análisis comparativo de las actividades antrópicas en una región determinada.

En el sudeste bonaerense, por ejemplo, se ha aplicado en numerosos trabajos para evaluar la peligrosidad de actividades industriales y su potencial afección al acuífero (Ruiz de Galarreta *et al.*, 2004; Miguel, 2009; Lexow *et al.*, 2016; Ruffo *et al.*, 2019). Sin embargo, no se encontraron antecedentes de aplicación en la actividad de ordeño bovino.

No corresponde a este trabajo incluir un debate respecto al uso de conceptos de 'Peligro' o 'Riesgo' de contaminación de un acuífero. Tal como lo aclara Foster *et al.* (2002), en adelante se considerarán ambos conceptos como la posibilidad de que una sustancia alcance el recurso hídrico subterráneo utilizado para consumo humano y productivo. Por tal motivo en este trabajo se entenderán como conceptos equivalentes.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el peligro de contaminación hídrica por la actividad de tambo en el sudeste bonaerense. Con el propósito de aportar una herramienta a los tomadores de decisión para priorizar acciones paliativas o preventivas en la actividad de tambo.

Metodología

2.1 Selección de predios

A partir de la caracterización general de la cuenca lechera Mar y Sierras, sus particularidades y variaciones físico-naturales y socioeconómicas, se seleccionaron cinco campos característicos. Debido a la ausencia de una base de datos completa y actualizada sobre los tambos en actividad, se optó por ponderar factores que diferencien la dinámica productiva de los establecimientos, con especial énfasis en la relación con el recurso hídrico superficial y/o subterráneo. Con esto se buscó hacer un trabajo en detalle de los establecimientos que pertenecen a la cuenca bajo estudio.

2.2 Relevamiento de información en campo

A partir de fuentes primarias y secundarias se realizó una caracterización con un enfoque integral de la dinámica productiva en la cuenca lechera 'Mar y Sierras'. Se identificaron las regiones hidrogeológicas según Auge (2004), así como áreas de recarga, transición y descarga del recurso hídrico subterráneo a escala provincial.

En los campos seleccionados, se relevó información productiva y de infraestructura mediante visitas a los tambos, acompañando las actividades de ordeño. Esta información se complementó con entrevistas a actores clave (Valles, 1999), productores y tamberos.

En adición, se caracterizó el proceso productivo, el uso del agua y la gestión de los efluentes. Se midieron caudales volumétricos por etapa y se calculó el balance hídrico en la actividad. Se realizó una toma de muestra compensada de los efluentes generados durante las etapas de ordeño y lavado, adaptando la metodología de Taverna *et al.* (2014). En un laboratorio privado se analizó su composición fisicoquímica de acuerdo con la normativa provincial vigente. Dentro de los elementos determinados se puso especial atención en la concentración de nitrógeno total y nitrógeno total Kjeldahl.

La carga hidráulica del efluente se calculó según la Ecuación 1. El caudal diario de residuos generado por día se dividió por el área de aplicación. Se consideró también el aporte aproximado de la infiltración natural de la precipitación para el lugar, para lo cual se consideró la precipitación media diaria y un porcentaje de infiltración proporcionada por el balance hídrico regional.

Ecuación 1: Cálculo de carga hidráulica

Carga hidráulica: $(Q(\text{m}^3/\text{día})/\text{Sup}(\text{m}^2) * 1000) + \text{Inf nat de la Pp med}(\text{mm}/\text{día})$

Donde: Q – Caudal de efluente; Sup – Superficie de lagunas o piletas; Inf nat de la Pp med – Infiltración natural de la precipitación media anual, dividida por 365 días del año.

El aporte final de nitratos con potencial de alcanzar el recurso hídrico subterráneo dependerá de la gestión realizada sobre los efluentes en cada establecimiento y los procesos fisicoquímicos y microbiológicos con relación al ciclo del nitrógeno in situ.

Acorde con otros antecedentes (Suzuki *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 2010; Mienis y Arye, 2018), Foster e Hirata (1988) plantean la dificultad de establecer un valor de remoción debido a la incertidumbre en los procesos involucrados. Sin embargo, consideran posible un rango de lixiviación entre el 20 al 60% del nitrógeno total volcado.

Para el presente trabajo, se tomó una postura conservadora en los porcentajes de remoción. En aquellos sitios con serie de lagunas, se estimó un 28% de transformación del Nt (orgánico más amoniacal) volcado a ion nitrato con potencialidad de percolar hasta el recurso subterráneo. Donde se dispone en suelo, se tomó una remoción del orden del 60% a la especie oxidada NO_3^- de acuerdo con Foster e Hirata (1988).

Los suelos en cada sitio se describieron, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), a partir del análisis de la capa vectorial de suelos de INTA (1994) de escala 1:50.000 y de la información detallada para cada unidad cartográfica, disponible en la página web.

Para cada establecimiento se hizo un censo de pozos preexistentes dentro y en las inmediaciones de los campos. Se relevó tipo de bomba instalada, datos de construcción (si los dueños contaban con esa información), antigüedad, entre otros. En cada uno de ellos se midió la profundidad del agua subterránea con una sonda piezométrica con frecuencia estacional durante un ciclo hidrológico (2018-2019). Asimismo, tomaron muestras de agua subterránea para determinar concentración de nitratos y cloruros en los pozos usados para la producción y en un pozo aledaño ubicado aguas arriba, a modo de referencia.

2.3 Método GOD

Carga contaminante

Según Foster y Hirata (1988), el Índice de Carga Contaminante (ICC) se estima en base a cuatro características semi-independientes de la carga contaminante generada por la actividad de tambo.

a) la clase de contaminante involucrado (I_A): se obtiene a partir la tendencia a la degradación o transformación in situ del contaminante seleccionado y su retardación respecto al flujo de agua durante la percolación;

b) la intensidad de la contaminación (I_B): se define a partir de la concentración relativa del contaminante según valores guía recomendados por OMS y la proporción de la recarga local de agua subterránea afectada por el vuelco del contaminante. Este trabajo consideró la concentración del contaminante en el efluente a partir del aporte de la carga orgánica propia de la actividad de tambo. No se incluye la concentración del elemento presente en el agua de abastecimiento al establecimiento, cuya fuente es el recurso hídrico subterráneo.

c) el modo de disposición en superficie o subsuelo (I_C): surge a partir de la carga hidráulica del vuelco y la profundidad bajo superficie a la cual el efluente es dispuesto;

d) el tiempo de aplicación de la carga contaminante (I_D): se define de acuerdo a la probabilidad de que el contaminante sea descargado y el tiempo de duración del mismo.

A cada una de ellas, se le asigna un valor entre 0 y 1 según su grado de amenaza. De acuerdo al método original, el ICC se obtiene a partir de la situación más desfavorable calculado para cada establecimiento. Sin embargo, para este trabajo se aplicó la propuesta de Lexow *et al.* (2016) y Ruffo *et al.* (2019), quienes lo obtienen a partir de la sumatoria de cada una de las características y su multiplicación por un factor de homogeneización de 0,25.

Vulnerabilidad del acuífero

El índice de vulnerabilidad del acuífero parte del análisis de cuatro componentes principales a los cuales se le asigna un valor de coeficiente entre 0 y 1: distancia al agua subterránea (G), ocurrencia del recurso o grado de confinamiento del acuífero (O), características del sustrato litológico (D) y características de los materiales en la zona no saturada en suelo (S). De su multiplicación (Ecuación 2), se obtiene el índice de vulnerabilidad para cada sitio.

Ecuación 2: Vulnerabilidad del acuífero

$$\text{Vulnerabilidad del acuífero} = G * O * D * S$$

Peligro de contaminación de agua subterránea

La metodología asigna un índice numérico entre 0 y 1 para ambos parámetros (vulnerabilidad y carga contaminante), en base a las características de sus componentes. De su entrecruzamiento (Figura 1) se obtiene el valor final asignado al peligro de contaminación del acuífero.

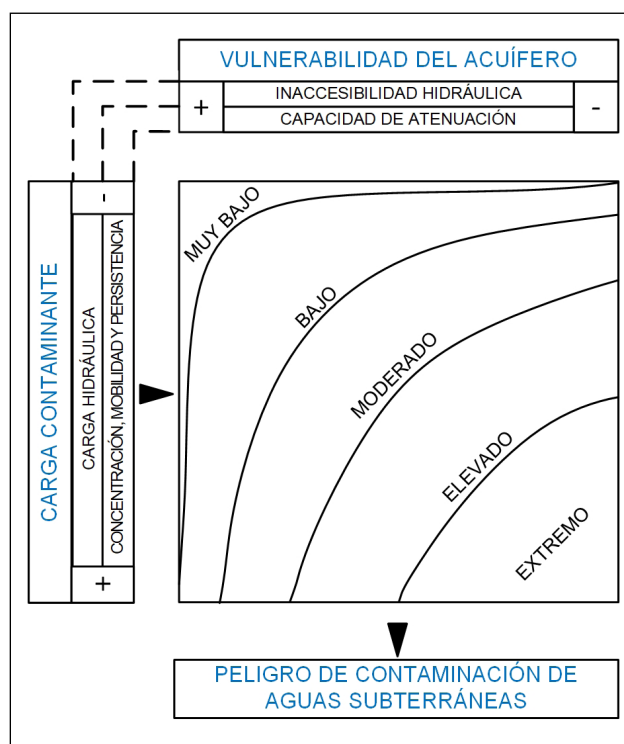


Figura 1: Esquema conceptual del peligro de contaminación de aguas subterráneas (Fuente: Foster et al., 2002)

Resultados y discusión

3.1 Breve caracterización del medio físico del sudeste bonaerense

El sudeste de la provincia de Buenos Aires presenta un clima de tipo subhúmedo húmedo (B2) según la clasificación de Thornthwaite-Mather.

El balance hídrico modular para la ciudad de Tandil en el período 1900-2016 (Cifuentes *et al.*, 2022), mostró una precipitación media anual de 849 mm, una evapotranspiración potencial (EVTp) de 729 mm/año y una real (EVTr) de 703 mm/año. Los meses de diciembre, enero y febrero (de mayor temperatura media) presentaron déficit hídrico, y los meses de mayo a noviembre registraron excesos hídricos que alcanzaron 146 mm/año.

El sudeste de la provincia de Buenos Aires se caracteriza por la presencia de las Sierras Septentrionales (Tandilia) que atraviesan la llanura pampeana en sentido NO a SE. Alcanza aproximadamente unos 340 km de largo y 60 km en su corte más ancho, con alturas máximas de ≈500 m s.n.m. en la parte central del cordón serrano.

Todos los sitios comparten características geológicas similares en su perfil estratigráfico, aunque variando en su profundidad. En el sector costero, el horizonte medanoso resulta de mayor tamaño. Sin embargo, el área de estudio se encuentra en una zona de transición con la región interserrana y pedemontano (IP), con el cual comparte características.

Específicamente, Teruggi y Kilmurray (1975, 1980) realizaron un análisis completo de la composición y estructura geológica del basamento cristalino del sector de Tandilia. Se lo caracterizó como típico del sistema de montañas en bloques, separados y alineados por fallas. Sufrió procesos de meteorización y erosión, y durante el precámbrico superior se depositaron sedimentos de cuarcitas, calizas y arcillas.

La columna estratigráfica del Precámbrico sedimentario de Tandilia se puede visualizar en la Figura 2.

La orogénesis andina en el Terciario reactivó las fallas regionales de la región de llanura, lo cual produjo ascensos y

descenso de bloques que configuraron la morfología del Basamento y el zócalo del área ubicada al NE de las Sierras. La erosión pliocena cuaternaria suavizó el relieve ayudado por la acumulación de depósitos eólicos cuaternarios. A fines del Cuaternario, se produjo el último episodio deposicional bajo la forma de un manto loessoides de pocos metros de potencia que cubrió las llanuras aluviales y las superficies ligeramente inclinadas de relieve tabular. En las laderas, entre tanto, se produjeron acumulaciones de detrito de falda (Teruggi, 1974).

La formación de los suelos en superficie se corresponde con la situación de la pampa húmeda bonaerense, la cual se caracteriza por la deposición eólica y fluvial de sedimentos limosos y limo-arenosos del cuaternario (“limos loessoides pampeanos”) provenientes de zona cordillerana.

Según la zonificación hidrogeológica de Buenos Aires (Auge, 2004), el área de estudio incluye principalmente tres regiones: Serranías (SE) e Interserrano y pedemontano (IP), principalmente, y Costero (CO) en menor superficie.

3.2 Establecimientos seleccionados

Se seleccionaron cinco establecimientos con siete tambos en total (Figura 3). Estos son:

Sitio 1: Ubicado en el partido de Lobería, en proximidades del pueblo de Napaleofú. Se encuentra sobre un sector de serranía. Este establecimiento de escala productiva empresarial cuenta con dos tambos bajo su gestión (Tambo 2 y Tambo 3);

Sitio 2: Se encuentra en el partido de Benito Juárez, a escasos kilómetros al oeste de la ciudad homónima. Es un emprendimiento de escala familiar con vistas a suplantar cantidad de animales bajo ordeño por la fabricación de derivados lácteos in situ. Hidrogeológicamente, se ubica en una zona de piedemonte.

Sitio 3: Análogo al anterior, es un tambo de escala familiar ubicado en el partido de Ayacucho. Se encuentra en una zona de transición interserrana.

Sitio 4: Establecimiento de escala empresarial, cuenta con dos tambos en actividad (Tambo Grande y Tambo Chico). Se ubica dentro del partido de Tandil, en proximidades del paraje de La Pastora. La extensión del campo incluye una zona de transición entre la región serrana e interserrana, con una marcada topografía y ondulaciones;

Sitio 5: Se encuentra en zona periurbana de la localidad de Orense. Es un emprendimiento de escala intermedia. Se encuentra en el límite entre las regiones interserrana y de costa.

3.3 Datos productivos de los establecimientos

Las Tablas 1 y 2 presentan una síntesis de aspectos clave de infraestructura, procesos productivos de los sitios bajo

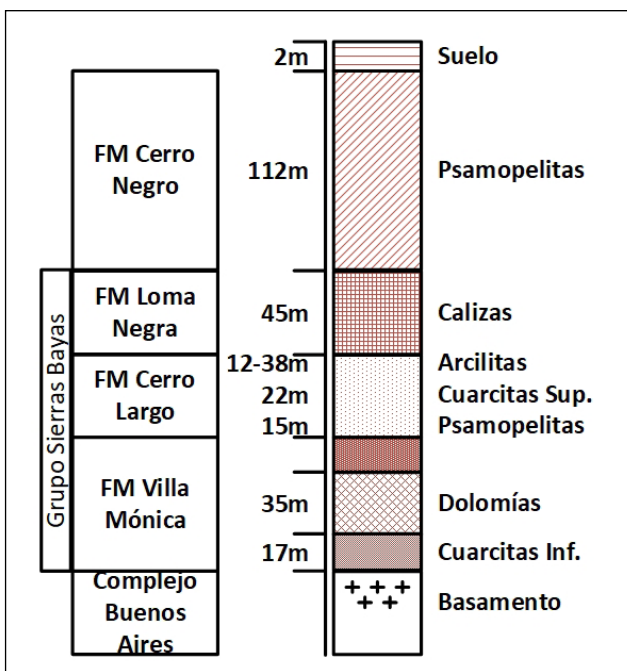


Figura 2: Columna estratigráfica del Precámbrico en Tandilia (Fuente: Iñiguez Rodríguez, 1999)

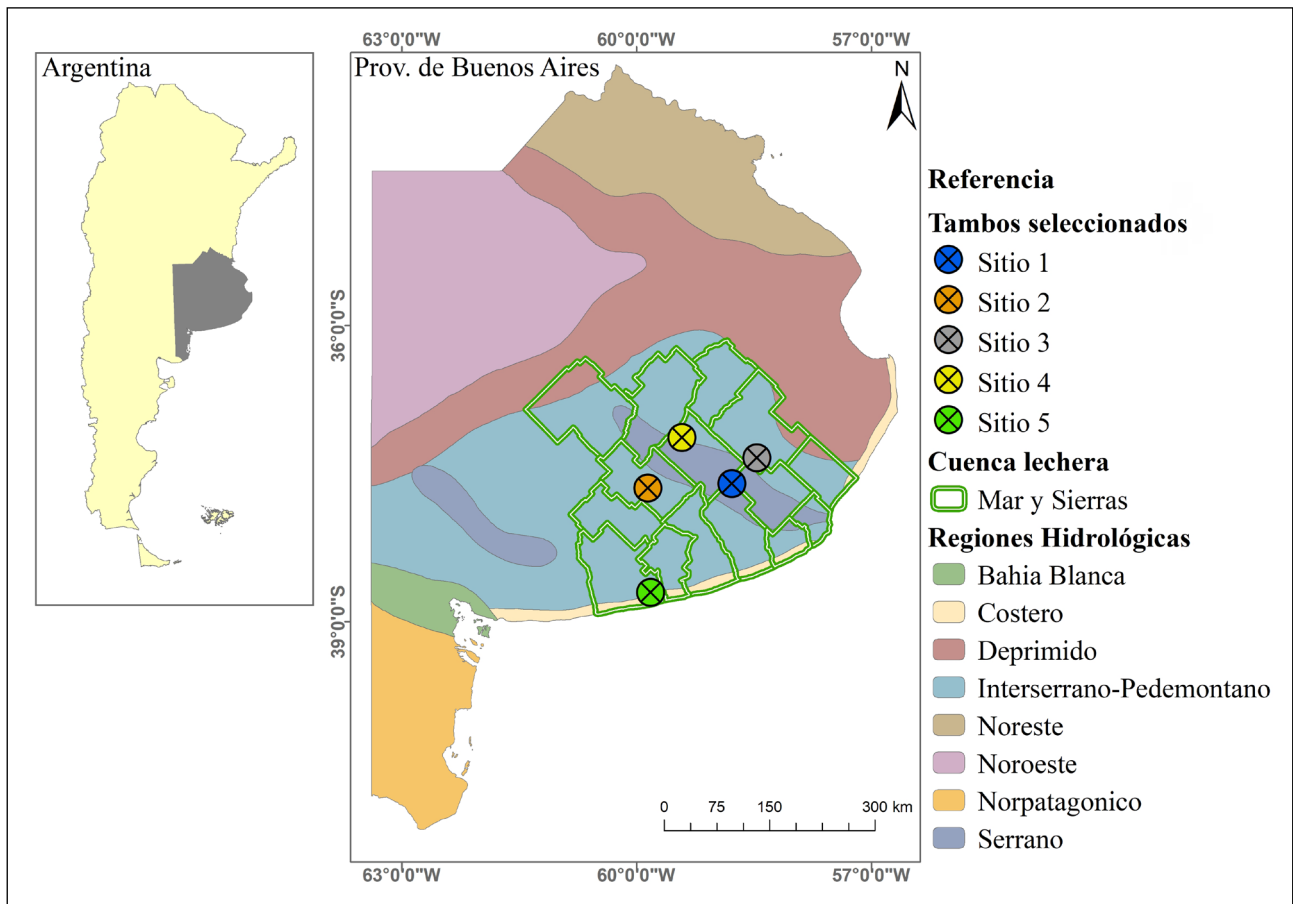


Figura 3: Tambos seleccionados ubicados según las regiones hidrogeológicas (Auge, 2004)

estudio y su medio físico natural, donde se observan las diferencias entre ellos.

La extensión de la cuenca lechera Mar y Sierras y la presencia del sistema serrano de Tandilia, proporciona una amplia variabilidad en características geomorfológicas, edáficas e hidrológicas superficiales y subterráneas. Asimismo, otorga al lugar una identidad y dinámicas socio productivas propias en relación con el nivel de turismo que presenta la zona, en el cual la gastronomía de productos regionales (derivados lácteos entre ellos) forma parte esencial.

De las visitas y entrevistas a productores tamberos, se obtuvo la caracterización de los procesos productivos para cada sitio. Los tambos en Sitios 1 y 4 fueron los de mayor tamaño. En ambos se contaba con dos salas de ordeño para manejar la cantidad total de animales. Se identificó que, aunque los tambos de cada sitio antes mencionados pertenecían a una única gerencia, presentaban diferencias en la gestión del rodeo, uso de agua y por lo tanto en el caudal y calidad del efluente final. El tambo en sitio 5 era de tamaño intermedio con 400 vacas en ordeño (VO). En los sitios 2 y 3, la producción era de escala familiar con 60 y 36 VO, respectivamente.

Tabla 1: Síntesis de aspectos clave productivos y de infraestructura

Característica	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5	
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde		
Productivas	L leche/ ordeño	4080	6360	450	750	3050	5700	4250
	V.O.	340	530	36	60	340	560	400
	Tiempo de ordeño (min)	140	220	39	37	215	228	158
Infraestructura	Pares de bajadas	24	24	24	12	12	16	18
	Caudal de agua (m ³ /ordeño)	25,10	25,10	12,00	4,63	30,02	36,02	16,21

Donde: Tbo1= Tambo 1, Tbo2= Tambo 2, Tbo Cco= Tambo Chico y Tbo Gde= Tambo Grande, VO= Vacas en ordeño

Tabla 2: Síntesis de aspectos clave del medio físico

Característica	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5		
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde			
Taxo ppal suelo	Argiudol típico		Argiudol petrocálcico	Argiudol vértico	Argiudol típico		Argiudol páquico		
Medio natural	Prof. NE (m)	Min	4,9	5,8	2,2	1,4	2,9	3,4	2,5
		Max	7,4	6,5	3,2	2,7	4,2	4,1	3,9
		Med	6,6	5,5	2,6	2,1	3,8	3,8	3,1

Donde: Taxo Ppal= Taxonomía principal del suelo, Prof. NE= Profundidad del nivel estático, Min= Mínimo, Max= Máximo, Med= Media

El abastecimiento de agua potable para consumo humano, animal y productivo fue de fuente subterránea. Los sitios contaban con bombas sumergibles para extraer agua del acuífero libre. En ninguno de los sitios se contaba con información antecedente sobre las características constructivas del pozo (perfil, profundidad, materiales).

En cada sitio se evidenció una variación temporal (a lo largo del año bajo estudio) en la profundidad del recurso hídrico subterráneo (Tabla 2). Factores climáticos determinaron períodos de déficit y excesos hídricos que se vieron reflejados en la medición de los niveles piezométricos. Sin embargo, todos permanecieron dentro de los rangos esperados según los balances hídricos modulares de la zona.

La Tabla 3 sintetiza la calidad fisicoquímica del agua. Al igual que con la profundidad, se observó una variación espacio temporal en las concentraciones de nitratos y cloruros. El recurso utilizado para la producción y en pozos vecinos de referencia, no mostraron grandes variaciones a excepción del Tambo 2 del Sitio 1. La laguna de tratamiento de efluente se construyó a escasos metros del pozo que abastece de agua. El cono de depresión generado por el bombeo favorece la circulación del agua subterránea y potenciales contaminantes provenientes de la infiltración de las lagunas. Si bien en este sitio los valores en el recurso hídrico subterráneo muestran un impacto de contaminación puntual, se aplicó la metodología a fin de evaluar la vulnerabilidad del medio físico y

Tabla 3: Variación de nitratos y cloruros en pozos de agua

Tambo	Marzo 2018	Septiembre 2018	Febrero 2019	Agosto 2019	
Nitratos (mg/L)					
Sitio 1	Tbo 3	37,1	35,4	24,0	25,8
	Tbo 2	381,9	317,6	247,1	220,9
	Ref	-	45,1	35,2	40,4
Sitio 2	Tbo	64,6	51,2	35,4	37,7
	Ref	-	46,6	35,2	38,7
Sitio 3	Tbo	23,4	29,6	18,2	18,2
	Ref	6,6	6,3	5,7	6,4
Sitio 4	Tbo C	44,0	47,8	40,7	44,2
	TboG	46,0	37,0	32,7	37,0
	Ref	-	37,82	31,93	37,25
Sitio 5	Tbo	30,8	29,0	23,2	26,0
	Ref	-	63,5	49,8	40,9
Cloruros (mg/L)					
Sitio 1	Tbo 3	80,0	88,5	46,0	48,0
	Tbo 2	197,9	163,5	88,0	74,0
	Ref	-	52,98	30,0	28,0
Sitio 2	Tbo	58,0	50,0	34,0	28,0
	Ref	-	48,0	22,0	20,0
Sitio 3	Tbo	76,0	76,0	50,0	58,0
	Ref	94,0	80,0	46,0	46,0
Sitio 4	TboG	46,6	46,0	36,0	26,0
	Tbo C	34,7	43,0	30,0	28,0
	Ref	-	19,5	20,0	14,0
Sitio 5	Tbo	847,7	699,8	484,8	479,9
	Ref	-	549,8	414,9	489,8

Donde: Ref = Pozo de referencia

*Resaltados aquellos pozos con concentraciones por encima de los valores mínimos recomendados por el Código Alimentario Argentino.

la carga contaminante en dicha situación.

En el análisis, comparación y distribución de los contaminantes entre pozos debe considerarse las dinámicas del recurso subterráneo, así como los usos de suelo predominantes. El sistema de Tandilia cuenta con una amplia historia de actividad agrícola ganadera lo cual favoreció la presencia de nitratos en concentraciones elevadas, considerándolo como un ion mayoritario (Hernández, 2005).

3.4 Método GOD+S

Vulnerabilidad del acuífero

La principal fuente de agua explotada en los establecimientos proviene del acuífero libre, por su facilidad en la extracción, sus propiedades fisicoquímicas y la ausencia de otras alternativas. Por lo tanto, el coeficiente de ocurrencia es de 1,0. Asimismo, el sudeste de la provincia de Buenos Aires presenta como sustrato litológico el Loess pampeano, por lo cual su coeficiente es 0,5 para todos los tambos.

Como se mencionó, la profundidad del nivel de agua varió significativamente. De las mediciones realizadas en campo, se consideraron aquellos pozos que abastecen de agua al establecimiento, ya que en todos los casos corresponden a los puntos más cercanos a donde se realiza la disposición final de efluentes/purines. Para mantener un criterio conservador, se tomó el registro de menor profundidad de nivel de agua subterránea a boca de pozo, por lo tanto, la situación más desfavorable.

A partir de los valores de profundidad de agua subterránea (Tabla 2), se asignó a los tambos en el sitio 1 un coeficiente de 0,8. Los sitios 2, 4 y 5, cuentan con un coeficiente de 0,9. El sitio 3, por otro lado, alcanza un coeficiente de 1.

De igual manera, se asignaron los coeficientes a partir de las características del suelo, de acuerdo con lo expresado en la Tabla 2. En el sitio 2 y 4 (zonas de Benito Juárez y La Pastora) los suelos presentan texturas franco arcillosas por lo cual se le asigna un coeficiente de 0,6. En el Sitio 1, próxi-

mos a Napaleofú los suelos presentan texturas de tipo franco limosas/limosas, a lo cual se asignó un valor de 0,8. En la zona costera, la textura presenta mayor presencia de arenas en el perfil, por lo cual se asigna un coeficiente de 0,85. Por último, el sitio 3 presenta suelos de tipo argiudol vértico, es decir con alta concentración de arcillas expansivas, lo que representa mayor facilidad para procesos de infiltración y percolación. Por lo tanto, se asignó un valor de 0,95.

La Figura 4 y la Tabla 4 resumen el cálculo de los componentes para cada sitio y el índice de vulnerabilidad del acuífero, el cual varía entre 0,32 y 0,5.

Carga Contaminante

El ICC se obtuvo a partir de las siguientes características:

Clase de contaminante:

El efluente generado en la actividad de tambo se compone principalmente de altas cargas de materia orgánica producto de los desechos animales, leche de descarte, restos de productos de limpieza, alimentos balanceados y barro/ tierra. La carga de nitrógeno (N) es importante, se presenta en forma orgánica (ácidos nucleicos, proteínas) e inorgánica (NH_4^+). No se detectó la presencia de ión nitrato (NO_3^-) generada directamente por el desecho animal. Sin embargo, a partir de los procesos de nitrificación es de esperar la generación de esta especie oxidada del nitrógeno, elemento estable en agua, de insignificante transformación, que se moviliza con el flujo advectivo y que termina percolando hasta alcanzar el recurso hídrico subterráneo, generando un ciclo de aporte, extracción y vuelco de nitrato en suelo. Por tal motivo, es relevante analizar el peligro de contaminación al recurso hídrico subterráneo del nitrato.

Debido a las características del NO_3^- , su insignificante degradación en el medio y poco retardamiento en el perfil edáfico, se definió la clase contaminante para los tambos bajo estudio en 1,0.

Tabla 4: Caracterización de la vulnerabilidad del acuífero en sitios de estudio

Componentes	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Distancia al agua	0,80	0,8	0,9	1	0,9	0,9	0,9
Ocurrencia de agua subterránea	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Sustrato litológico	0,50	0,50	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Suelo	0,80	0,80	0,6	0,95	0,6	0,6	0,85
Vulnerabilidad del acuífero	0,32	0,32	0,45	0,5	0,45	0,45	0,45

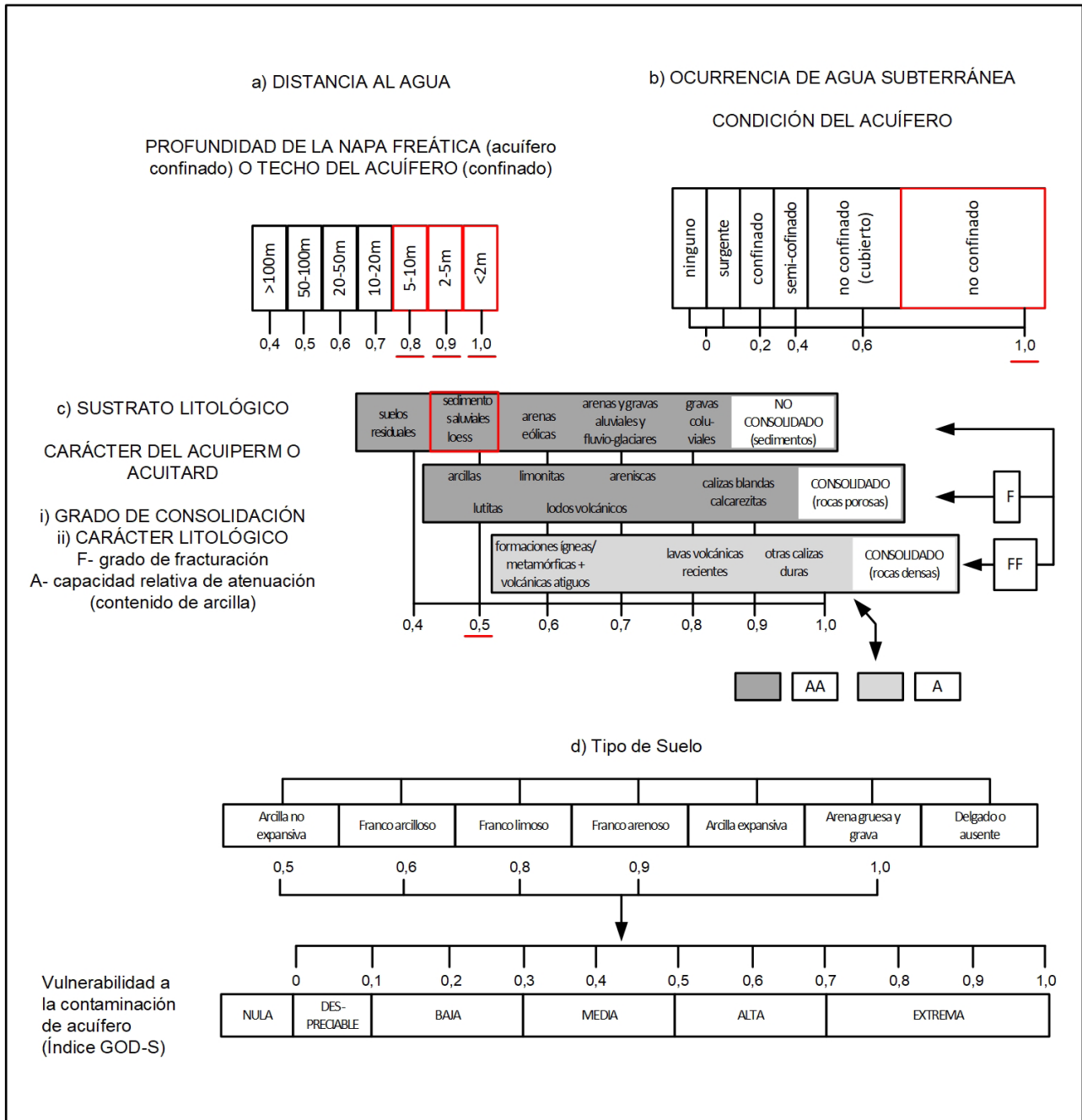


Figura 4: Vulnerabilidad del acuífero (Fuente: Adaptado a partir de Foster et al., 2002)

Intensidad de contaminación:

Los sitios bajo análisis no contaban con sistemas de tratamientos acorde a sus necesidades. En Napaleofú y Orense (Sitios 1 y 5), los tambos contaban con lagunas de estabilización previo al vuelco a suelo. Por problemas en su diseño y constantes rebalses, la impermeabilización (con silo bolsas) debió ser retirada. En el Sitio 4 (La Pastora), se diseñó una cámara de separación de sólidos a la salida de los corrales de espera. El líquido era canalizado hasta un predio vecino sin protección. En los tambos de escala familiar de Benito Juárez y Ayacucho, no se contaba con tratamiento alguno.

De acuerdo con los valores de N_t volcados, y a los coeficientes de remoción según tipo de disposición por establecimiento, se determinó una concentración de NO_3^- con potencialidad de alcanzar el recurso subterráneo. Los valores oscilaron en un rango entre 1,52 y 0,17 órdenes de magnitud por sobre el límite recomendado por la OMS (50 mg/L).

En comparación con el área de recarga regional del sistema hídrico subterráneo, la superficie de afectación por el vuelco de los efluentes, pueden considerarse de tipo puntual ya que representa una baja proporcionalidad.

Por lo tanto, de acuerdo con la gráfica presentada en la

metodología (Figura 5.b), todos los sitios presentan un coeficiente en el rango de 0,1.

Modo de disposición:

En relación con la profundidad de descarga del efluente, se evidenciaron dos situaciones en relación a la gestión y disposición de los residuos. Por un lado, aquellos establecimientos donde se vuelca a predios lindantes, se los consideró como descarga superficial. Este es el caso de los tambos de escala familiar y en La Pastora (sitios 2, 3 y 4).

Por otro lado, los tambos de Orense y de Napaleofú (sitios 1 y 5) contaban con un sistema de lagunaje de estabilización, aunque sin impermeabilización, donde se consideró una descarga en profundidad. Para evaluar su peligrosidad, se efectuó un cálculo porcentual sobre la proximidad a la profundidad mínima del NE medido en el pozo más cercano.

La Tabla 5 resume los cálculos de carga hidráulica y profundidad de descarga, así como los coeficientes del modo de disposición final para cada sitio. La Figura 5.c grafica los resultados en un esquema publicado por Foster e Hirata (1988). Para facilitar su comprensión, se asignó un color a cada establecimiento.

Los tambos de escala familiar presentaron un coeficiente de 0,3 debido a su bajo caudal y su disposición superficial. Aunque con un volumen mayor de residuos, el ‘Tambo Gran-

de’ de La Pastora evidenció el mismo coeficiente debido a una mayor superficie de vuelco que disminuye el valor de carga hidráulica para el sitio.

Duración de la carga:

Debido a las dinámicas fisiológicas de animales y productivas de los establecimientos, se realizan dos ordeñes diarios por tambo. Aunque el volumen total y las concentraciones de contaminantes varían de acuerdo con la época del año y cantidad de animales bajo ordeño, la probabilidad de generar el efluente y volcarlo al medio es de 100 %.

Asimismo, de acuerdo a las entrevistas realizadas a productores y encargados, los establecimientos cuentan con más de 20 años de actividad de forma ininterrumpida.

En base a lo anterior, el coeficiente de duración de carga asignado es de 1,0 para todos los tambos.

Cálculo de índice de carga contaminante:

A partir de los coeficientes anteriormente desarrollados, se estimó el índice de carga contaminante para cada establecimiento bajo estudio. El ICC varía de 0,72 a 0,6, siendo los tambos en Napaleofú los de mayor complejidad y el tambo BJ el de menor índice (Tabla 6).

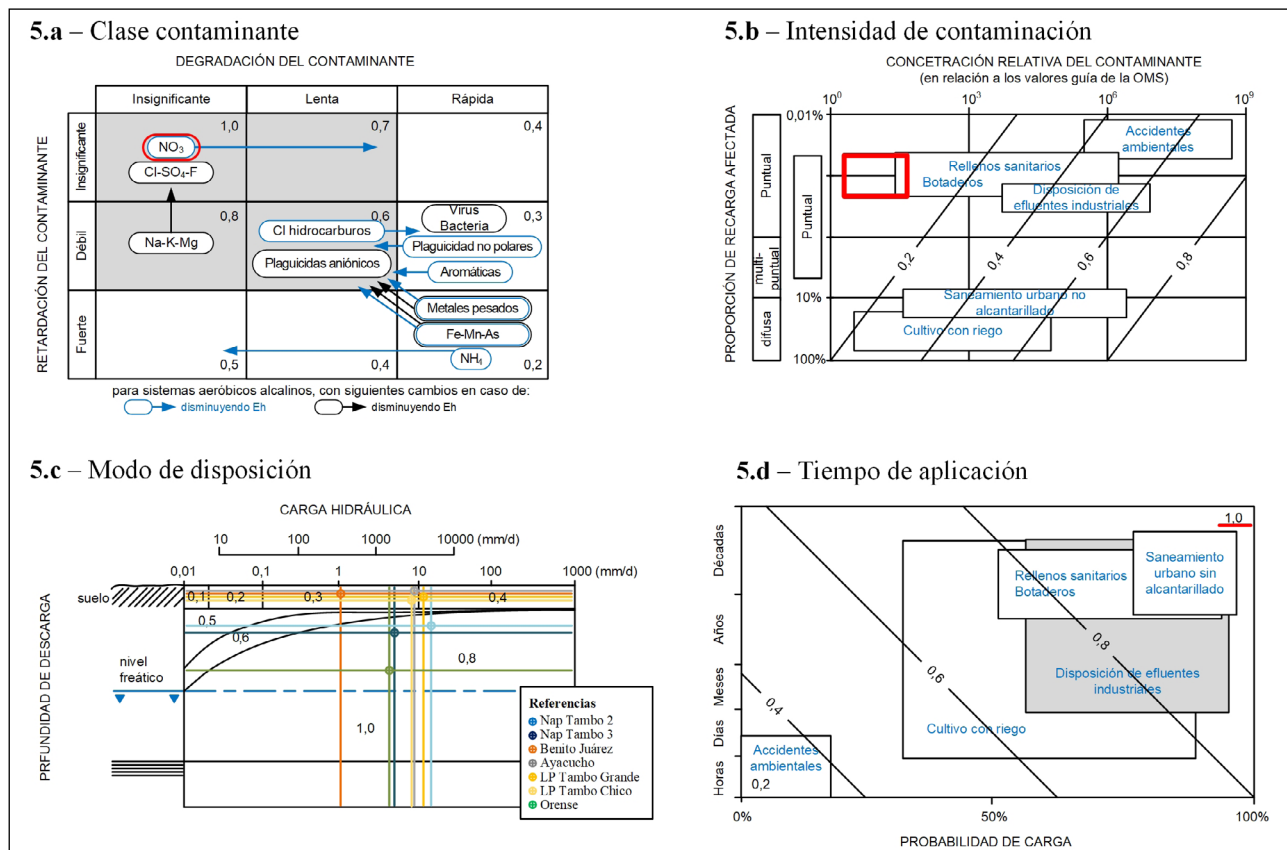


Figura 5: Cargas contaminantes (Fuente: Elaboración personal en base a Foster et al., 2002)

Tabla 5: Datos para el cálculo de coeficiente

Tambo	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Prof de NE (m)	6,64	5,46	2,20	1,40	3,35	2,86	2,50
Prof descarga (m)	2,50	2,50	Sup	Sup	Sup	Sup	2,00
Q efl (m ³ /día)	17,1	19,9	8,4	4,5	18,9	42,2	14,4
Sup tratamiento* (m ²)	1109,7	3778,5	13596,0	532,1	1786,3	5245,2	3376,6
Inf nat PP media (mm)	165,6	165,6	151,0	165,6	151,0	151,0	138,2
Inf /día (mm)	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
Carga hidráulica (mm/día):	15,9	5,7	1,0	8,9	11,0	8,5	4,6
Coefficiente Modo de Disposición	0,8	0,8	0,3	0,3	0,4	0,3	0,8

Donde: Prof = Profundidad; NE = Nivel estático; Q efl = Caudal de efluente; Sup tratamiento = Superficie de tratamiento (Sumatoria del área que ocupan las diversas lagunas o piletas donde se depositan los efluentes/purines en el tambo); Inf nat PP media = Infiltración natural de la precipitación media; Inf/día = Infiltración por día

3.5 Peligro de contaminación

Calculados los índices de vulnerabilidad del acuífero y carga contaminante del nitrato para cada sitio, se procedió a establecer su interacción a través del entrecruzamiento de dichos índices, con el objetivo de determinar el peligro de contaminación (Tabla 7). Con el fin de identificar los establecimientos dentro del esquema, se conservan los colores anteriormente detallados para cada tambo (Figura 6).

La mayoría de los sitios bajo estudio presentaron un peligro Moderado de contaminación del acuífero por nitratos, con excepción del sitio 3 (Ayacucho) y sitio 5 (Orense) que mostraron un peligro Elevado. Debido al volumen y descarga de efluentes, los establecimientos de mayor tamaño productivo presentaron un índice de carga contaminante mayor, aunque como se ubican en zonas con un acuífero menos vulnerable principalmente por la profundidad del nivel freático, el peligro disminuye.

El tambo de ‘Ayacucho’, aunque de escala familiar, pre-

sentó un índice de carga contaminante acorde al tamaño productivo. Sin embargo, la mayor vulnerabilidad del acuífero donde se sitúa, le otorga una peligrosidad de contaminación en la escala de elevado.

Conclusiones

La determinación del peligro de contaminación hídrica por la disposición de efluentes generados en la actividad de ordeño bovino en tambo brinda una importante información de base para la toma de decisiones tanto en ámbito público y privado, como así también para asesores y servicios de productores tamberos.

El procedimiento metodológico desarrollado, implicó la identificación y caracterización físico-natural del medio donde se localizan los establecimientos objeto de estudio y la evaluación de la gestión del agua y la generación, tratamiento y disposición final de los efluentes de la actividad de ordeño bovino.

Tabla 6: Carga contaminante de nitratos

Componentes	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Clase de contaminante	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Intensidad de contaminación	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Modo de disposición	0,8	0,8	0,3	0,4	0,8	0,8	0,8
Duración de la carga	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ICC (NO ₃)	0,72	0,72	0,6	0,62	0,72	0,72	0,72

Donde: ICC= Índice de carga contaminante modificado según Lexow *et al.* (2016)

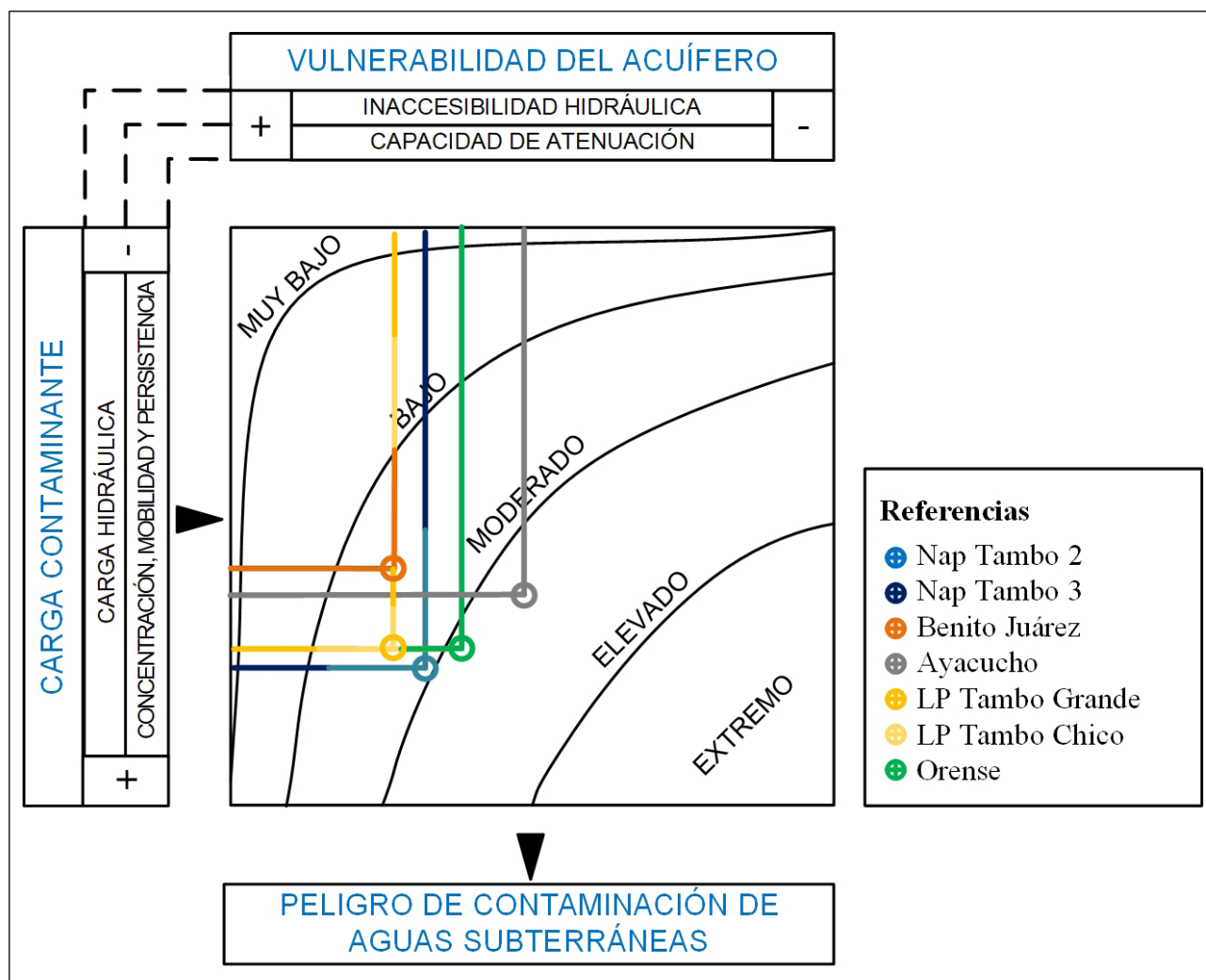


Figura 6: Peligro de contaminación

La mayoría de los sitios bajo estudio presentaron un ‘moderado’ peligro de contaminación del acuífero, a excepción de los sitios 3 y 5, ubicados en Ayacucho y Orense respectivamente, que presentan un peligro ‘elevado’ de contaminación. Aunque la actividad de ordeño bovino esté estandarizada en sus procesos generales, las particularidades de cada lugar y las características del medio físico generan dinámicas específicas que deben ser consideradas.

No se observó gran variabilidad en el ICC entre establecimientos. Los sitios con mayor valor (0,75) están asociados a un modo de disposición de efluente similar. La construcción de los sistemas de lagunaje sin impermeabilización hace que

este método sea contraproducente al concentrar gran volumen de caudal en poca superficie y a profundidad (mayor cercanía al nivel freático).

El principal componente que determinó la vulnerabilidad del acuífero fue la distancia al recurso subterráneo. Sin embargo, en todos los sitios el nivel freático se encontró somero, entre 2 y 10 metros de profundidad.

Como sucede con otras actividades primarias y agroindustriales en la región, la única fuente de agua disponible es la subterránea. La protección de los acuíferos que abastece el agua debe ser considerada en las políticas públicas y em-

Tabla 7: Peligro de contaminación

Tambo	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Vulnerabilidad del acuífero	0,4	0,4	0,45	0,5	0,45	0,45	0,45
Índice de carga contaminante (NO ₃ ⁻)	0,72	0,72	0,6	0,62	0,72	0,72	0,72
Peligro de contaminación	Moderado	Moderado	Elevado	Moderado	Elevado		

presariales, ya que su deterioro impactará a mediano o largo plazo en la rentabilidad del producto y la salud animal y de la población local y regional. Para ello es básico y necesario conocer la vulnerabilidad del mismo y fundamentalmente trabajar en la mejora del manejo de los efluentes, y su tratamiento para disminuir el impacto de la carga orgánica, favoreciendo formas más seguras de disposición.

El método GOD, utilizado en el presente trabajo, no presenta mayor complejidad en su cálculo y requiere de información que, en general, es de fácil acceso y producción. Sin embargo, es necesario el conocimiento de funcionamiento del sistema para su correcta interpretación. Su fácil aplicación la hace una herramienta de gran utilidad para una aproximación al entendimiento de la problemática ambiental y a la gestión territorial.

Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Nicolás Eloy Cisneros Basualdo, Víctor Alejandro Ruiz de Galarreta, Roxana Bettina, Banda Noriega, Roberto Esteban Miguel y Corina Iris Rodríguez. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Nicolás Eloy Cisneros Basualdo y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. y Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Research Laboratory, Report 600/2-87/035.
- Auge, M. (2004). Regiones hidrológicas: provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Edición del autor.
- Auge, M. (2007). Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y métodos. SEGEMAR.
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like methods: A review. *Water*, 12(5), 1356. <https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Cifuentes, M. R., Rodriguez, C. I., Ruiz de Galarreta, A. y Gabellone, N. (2022). Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil. *Cuadernos del CURIHAM*, 28. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.178>
- Foster, S. y Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. (2002). Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. World Bank.
- FunPEL. (2013). Anuario de la lechería argentina. Inforcampo S.A.
- García, K., Arenas, M., Filipone, J. y Charlón, V. (2011). Evaluación de un tamiz estático para el tratamiento de los efluentes de tambo. En 34º Congreso Argentino de Producción Animal. ASAS-AAPA
- Gastaldi, L., Litwin, G., Maekawa, M., Moretto, M., Marino, M., Engler, P. y Galetto, A. (2020). Encuesta sectorial lechera del INTA: resultados del ejercicio productivo 2018-2019. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Grondona, S., Gavilán, S., Massone, H. y Quiroz Londoño, O. M. (2013, 17-20 de septiembre). Evaluación de la peligrosidad de contaminación por pesticidas en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires [presentación en congreso]. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea, Universidad Nacional de La Plata, La Plata (Argentina).
- Hernández, M. (2005). Panorama ambiental de los recursos hídricos subterráneos en la provincia de Buenos Aires. En *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 347-358). Ministerio de Producción de la Provincia de Buenos Aires.
- Iñiguez Rodríguez, A. (1999). La cobertura sedimentaria de Tandilia. En R. Caminos, *Anales de la Geología Argentina* (Vol. 29) (pp. 101-106). SEGEMAR.
- La Manna, A. y Malcuori, E. (2012). El uso de herramientas económico-ambientales para el diseño de políticas públicas: aplicación de una matriz de riesgo para priorizar casos en lechería. *Revista INIA*, 31, 54-60.

- Lexow, C., Di Martino, C., Lafont, D., Albouy, R. y Marcos, A. (2016). Identificación y cuantificación de la carga contaminante al acuífero de la localidad de Monte Hermoso. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 37, 37-44.
- Mancuso, W. y Teran, J. (2008). El sector lácteo argentino. En INTA, XXI Curso Internacional de lechería para profesionales de América Latina (pp. 13-22). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Mienis, O. y Arye, G. (2018). Long term nitrogen behavior under treated wastewater infiltration basins in a soil-aquifer treatment (SAT) system. *Water Research*, 134, 192-199.
- Miguel, R. E. (2009). Gestión de residuos de arenas de fundición en Tandil y su impacto en el sistema hídrico subterráneo. Tesis de Maestría. Facultad regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional).
- Organización Mundial de la Salud ([OMS], 2006). Guías para la calidad de agua potable (3ª ed., Vol. I).
- Ruffo, A. G., Lafont, D., Carbajo, M., Albouy, R. y Lexow, C. (2019). Peligro de contaminación del acuífero freático en la localidad balnearia de Monte Hermoso, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 42, 15-22.
- Ruiz de Galarreta, A., Banda Noriega, R. y Granato, M. F. (2004). Riesgo de contaminación del agua subterránea debido a las actividades en el parque industrial de Tandil [presentación en evento]. IV Seminario-Taller. "Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación: Protección de la Calidad del Agua". Red XVII-A (CYTED), Lima (Perú).
- Suzuki, T., Katsuno, T. y Yamaura, G. (1992). Land application of wastewater using three types of trenches ser in lysimeter and its mass balance of nitrogen. *Water Research*, 26, 1433-1444.
- Taverna, M., García, K. y Adorni, M. (2014). Procedimiento de muestreo de efluentes líquidos y residuos sólidos orgánicos generados en tambo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Teruggi, M. (1974). Los dominios tectónicos de la región de Balcarce. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29(3), 265-276.
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1975). Tandilia. En *Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires*. 6to Congreso Geológico Argentino (pp. 55-77).
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1980). Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. En J.Turner (Ed.), *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina* (pp. 919-956). Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.
- Valles, M. S. (1999). Técnicas cualitativas de investigación social: reflexión metodológica y práctica profesional.. Editorial Síntesis S.A.
- Wang, X., Tieheng, S., Li, H. y Pand, J. (2010). Nitrogen removal enhanced by shunt distributing wastewater in a subsurface wastewater infiltration system. *Ecological Engineering*, 36, 1433-1438.
- Zaporozec, A., Conrad, J., Hirata, R., Johansson, P., Nonner, J., Romijn, E. y Weaver, J. (2002). Groundwater contamination inventory: A methodological guide. IHP-VI, UNESCO.