

Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas

Quiros, R., M.B. Boveri, C.A. Petracchi, A.M. Rennella, J.J. Rosso, A. Sosnovsky y H.T. von Bernard.

Área de Sistemas de Producción Acuática, Departamento de Producción Animal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. quiros@agro.uba.ar

Abstract

The effects of the Pampa wetlands agriculturization on shallow lakes eutrophication

Agriculture has being the most important cause for grassland and wetland conversion into agricultural land at the Pampas. During more than a hundred years, the Pampas, one of the last world's largest less developed grassland and wetland ecosystem, has been facing various threats, such as agriculturization, erosion and sedimentation, stream regulation, channelization and wetland desiccation, urbanization, and surface water eutrophication. The intensity of land use for agriculture has been increasing gradually since the last decades of the 19th century, but it has been heavily intensified during the last fifteen years. Fertilizer and pesticide use has increased more than four times between 1991-1993 and 2000-2002. As expected, pampean wetland change and degradation has been intensifying even more during the last few years, and high nutrient loads usually enter to the already naturally eutrophic shallow lakes.

The lakes of the Pampas wetlands ("lagunas") are very shallow, polimyctic, and highly fluctuating in salinity and water renewal time. They are situated in nutrient rich soil drainages, and its trophic state vary from meso-eutrophic to highly hypertrophic depending on land use intensity. Within the permanent large lakes, two extreme types can be identified: a) "clear" lakes, macrophyte dominated, with waters relatively transparent, and a high relative abundance of piscivorous fishes, and b) green water "turbid" lakes, phytoplankton dominated, with high abundance of planktivorous fishes. However, most of the lakes are neither completely "clear", nor entirely "turbid". Rather, a continuous distribution between a definitely "clear" state and highly "turbid" lake state is found. The relative abundance of "turbid" lakes is greater in zones with the higher intensity of land use. On the other hand, the "clear" lakes are situated in the remnant of the less disturbed Pampa grasslands and wetlands.

Very shallow lakes are the major component of the Pampas wetland system where pampean agroecosystems are included. The pristine state of the majority of these lakes was probably a clear water environment with a rich aquatic vegetation. However, nutrient loading from agriculture and urbanization has changed this situation in most cases. In a large portion of the pampean wetlands, the shallow lakes have shifted gradually from clear to turbid, and with the increase in algal turbidity, submerged plants have largely disappeared.

The environmental management for pampean agroecosystems and urbanizations is currently highly deficient. The poor management is highly responsible for both lake nutrient

enrichment with its associated high biomass of phytoplankton, and the current reduction in weighted biodiversity for the wetland lakes. Our results support that the primordial state for pampean lakes was one suffering low environmental pressure from natural wetlands and grasslands, with clear waters and macrophyte dominated.

Restoration of non-vegetated turbid shallow lakes to a more clear vegetated state is not easy. Reduction of the nutrient loading may have little effect in the short term, as during the period of nutrient enrichment a large amount of phosphorus has been adsorbed to the sediments. After the reduction of nutrient external loads to shallow lakes, phosphorus concentration in the water column usually did not drop immediately, and phosphorus release from the anoxic sediment becomes an important nutrient source for phytoplankton and an unfavorable habitat for macrophyte development. At the phytoplankton level, a several decades delayed lake response to nutrient load reduction can be expected. However, in order to accelerate the lake recovery process, several kind of very expensive lake internal measures can be applied.

To continue with the present non-action measure for the pampean wetlands environmental management is to condemn pampean lakes to a certain future. A gloomy future of very high nutrient levels due to agriculture and urbanization, phytoplankton dominated highly "turbid" lakes, with hypoxic and anoxic phosphorus saturated sediments, simplified vegetal and animal communities, high levels of organic matter in more reductive environments, and generate extended fish and avian mortalities and human health hazards.

Resumen

Las actividades agropecuarias han sido y son el principal factor modificador del pastizal y humedal de las Pampas. Estos han sufrido importantes cambios a través de la erosión de suelos y sedimentación en el humedal, regulación de arroyos, canalizaciones y desecamiento de tierras anegadizas, urbanización, y culminando con la eutrofización de las aguas de superficie. Los lagos de las Pampas (lagunas) son someros, polimícticos, y altamente fluctuantes en salinidad y tiempo de renovación de agua en función de los ciclos de sequía-inundación característicos de la región. Constituyen el componente central del humedal pampeano y sus drenajes se sitúan sobre suelos de alto potencial productivo. Dentro de las grandes lagunas permanentes, pueden identificarse dos tipos extremos: a) un estado "claro" dominado por la macrofitia y con aguas relativamente transparentes, y b) un estado "turbio" de aguas verdosas dominadas por el fitoplancton. Sin embargo, la mayoría de los lagunas no son ni completamente "claros", ni enteramente "turbios". Lo que generalmente se observa es una distribución continua entre un estado de laguna definitivamente "clara" y otro estado de laguna altamente "turbia". La abundancia relativa de lagunas "turbias" es mucho mayor en zonas con alta intensidad de uso de la tierra. Por otra parte, las lagunas "claras" se sitúan en las zonas menos perturbadas del pastizales y humedales. El estado prístino de la mayoría de las lagunas era probablemente uno de aguas claras y con una abundante y diversa vegetación acuática. Sin embargo, las cargas de nutrientes desde las zonas agropecuarias y las urbanizaciones ha cambiado esta

situación en la mayoría de los casos. En gran parte del humedal las lagunas han cambiado gradualmente desde un estado “claro” a uno “turbio” altamente eutrófico. La gestión ambiental de los agroecosistemas y urbanizaciones pampeanas es hoy altamente deficiente. Ello se ve reflejado en el nivel de eutrofización del humedal y sus lagunas. La restauración de las lagunas turbias no vegetadas hacia estados de aguas más claras no es fácil ni barato. Continuar con la actual ausencia de manejo ambiental es condenar al humedal pampeano a un futuro seguro. Un sombrío futuro de lagunas hipereutrofizadas, altamente turbias, con sedimentos anóxicos y saturados en fósforo, con comunidades vegetales y animales altamente simplificadas, con altos niveles de materia orgánica en ambientes altamente reductores, presentando mortandades masivas de peces y aves y riesgos para la salud pública.

Introducción

El estado prístino del humedal pampeano probablemente era uno donde la gran mayoría de sus lagunas se encontraba en un estado de “aguas claras” y presentaba una abundante y diversa vegetación acuática. La carga de nutrientes proveniente de las actividades agropecuarias y la urbanización ha cambiado esa situación, en la mayoría de los casos. En grandes zonas del humedal las lagunas han venido cambiando gradualmente desde un estado de aguas “claras” hacia otro de aguas verdes y “turbias”, con una macrofitia prácticamente inexistente.

Los humedales de la llanura pampeana se asientan sobre suelos de alto potencial productivo y, bajo condiciones naturales, experimentan frecuentes desagües anuales e interanuales. El drenaje extendido y la degradación de los humedales han provocado la disminución, y aún la eliminación, de una parte importante del componente temporal del humedal. Este, estacionalmente muy productivo, redujo su alta productividad natural y la biodiversidad vegetal y animal, terrestre y acuática. El tipo e intensidad del uso de la tierra se están modificando aceleradamente. La “agriculturización” intensiva de la planicie pampeana está conduciendo a que los ecosistemas terrestres estén cada vez más fragmentados mientras los acuáticos están siendo constantemente drenados o convertidos en sistemas hipertróficos altamente turbios.

La geomorfología de la llanura pampeana corresponde a un paisaje con un clima mucho más árido que el subhúmedo actual. Durante el pasado geológico reciente, los antiguos depósitos arenosos de origen fluvial fueron reelaborados por los vientos bajo condiciones áridas, formando campos de dunas en el “mar de arena” pampeano (Iriundo, 1989). La sucesión de períodos climáticos secos y húmedos, en el marco de la geomorfología de la región, llevó a un importante desarrollo de sistemas de humedales y lagos someros (lagunas), en las áreas más deprimidas (Iriundo, 2004). La hidrología actual de la región es resultado de los cambios climáticos, la geomorfología y el accionar humano. La porción noroeste de la región pampeana era naturalmente arreica y el este es exorreico con cauces de ríos efímeros que bajan de Tandilia pero con zonas arreicas y endorreicas entre ellos y el mar. Los extensos humedales pampeanos se extienden desde las sierras de Tandilia y Ventania al sur hasta la pampa plana en el noroeste,

pasando por la extensa “depresión de Salado” (Figura 1). Estos humedales han sido modificados en grado variable desde fines del siglo XIX, a nivel local y regional, por extensas canalizaciones. Entre los principales factores que determinan las características básicas del humedal pampeano se encuentran la geomorfología de la planicie, el clima, y la variabilidad climática estacional, interanual (con períodos de sequía e inundación variables (3-7 años) y de períodos de varios años y de duración variable (40-50 años).

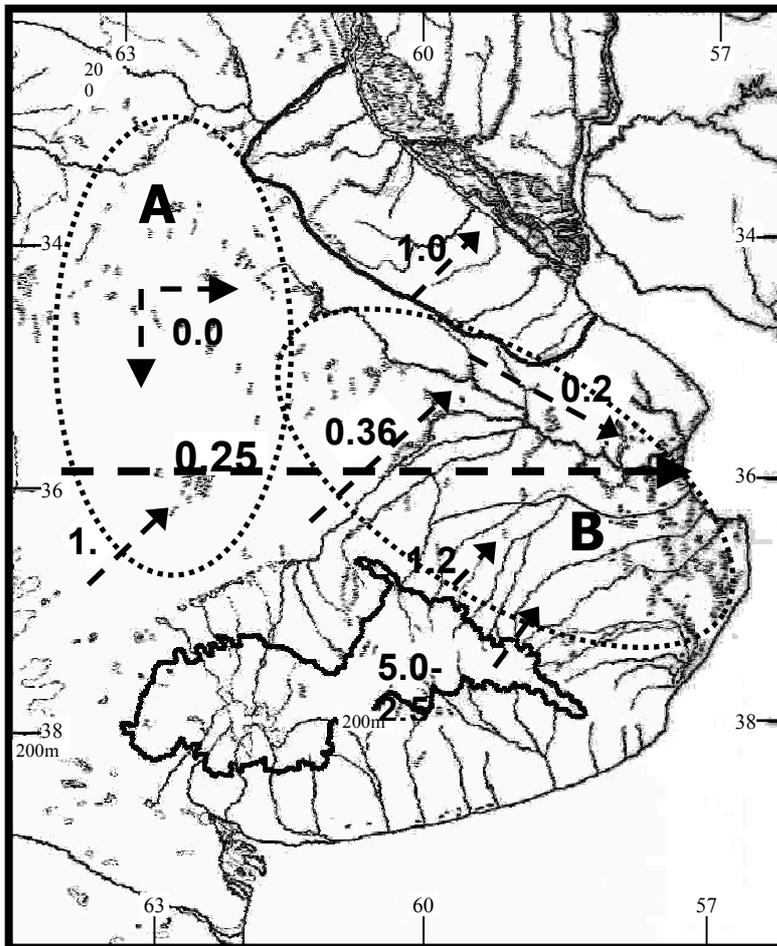


Figura 1. La región de las Pampas está situada en el cono sur de Sudamérica, extendiéndose al norte de la Patagonia y al este de las últimas estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes. La región es particularmente plana o levemente ondulada, sin embargo, hacia el centro-sur de la región se extienden las sierras de Ventania y Tandilia. Los extensos humedales pampeanos se extienden sobre las zonas más planas (A) y deprimidas (B) de la región, como puede observarse de las bajas pendientes del paisaje (expresadas en metros por kilómetro).

Los lagos someros (lagunas) son el componente central del humedal pampeano, y su profundidad media generalmente oscila entre uno y dos metros. Las lagunas experimentan profundos cambios en superficie, profundidad y salinidad de sus aguas en función de los ciclos de sequía-inundación característicos del paisaje pampeano (Quirós et al. 2002a, Quirós, 2005). El drenaje de lagunas, especialmente de las más pequeñas, y la canalización creciente, en búsqueda de la “agriculturización” del humedal, está llevando a que su abundancia y tamaño estén disminuyendo constantemente. Una alta proporción de las lagunas pampeanas se encuentra actualmente en estado hipertrófico, lo cual, además de disminuir su capacidad de uso recreativo, podría estar generando riesgos para la salud humana y animal.

Las lagunas pampeanas han sido estudiadas con anterioridad (Ringuelet, 1962; Quirós et al., 2002b) y también su estado actual ha sido relacionado con la intensidad de

uso de la tierra (Quiros et al., 2002a). Sin embargo, esta es la primera vez que se intenta integrar el desarrollo de las actividades agropecuarias en la región de las Pampas con el estado del humedal pampeano y sus lagunas. Aunque no existe información cuantitativa que de cuenta del devenir histórico del humedal pampeano (Vervoorst, 1967), su estado actual (Quirós et al. 2002b), hipótesis ergódica de por medio, y las transformaciones sufridas por los componentes terrestres (Soriano, 1992; Viglizzo et al., 2001) son buenos indicadores del cambio sufrido por el humedal durante la “agriculturización” de la Pampas. En este trabajo es nuestro propósito mostrar como un desarrollo considerado sostenible desde el punto de vista agropecuario puede no serlo tanto cuando se considera el humedal pampeano como un todo. Como indicador del nivel de degradación del humedal utilizaremos el grado de eutrofización de sus lagunas.

Los “agroecosistemas” pampeanos y su relación con el sistema del humedal de las Pampas

Durante más de un siglo, las Pampas, una de las últimas grandes regiones de pastizales y humedales menos desarrolladas del mundo, ha estado enfrentando profundos cambios, tales como agriculturización, urbanización, canalización y regulación de ríos y arroyos, desecamiento y eutrofización del humedal, contaminación por agroquímicos, erosión y sedimentación, y la implantación de industrias generalmente contaminantes. Las actividades agropecuarias han sido el impulsor más importante en la conversión del pastizal y humedal pampeano en tierra agrícola. Directamente a través de la transformación del pastizal natural en campos de cosecha anual y de cultivo de pasturas, e indirectamente porque actualmente muchas granjas pecuarias están siendo reemplazadas por campos de cultivo. Ello conduce a que la cría de ganado esté siendo desplazada hacia zonas marginales de sabana o aumentando drásticamente la intensidad de uso de la tierra a través del engorde a corral, con el consiguiente aumento de la eutrofización de las aguas de superficie.

La agricultura pampeana sigue siendo hoy, fundamentalmente, una agricultura de secano. La misma se ha venido intensificando durante los últimos quince años. Por ejemplo, el uso de fertilizantes y pesticidas agrícolas se ha incrementado más de cuatro veces entre 1991-1993 y 2000-2002. El avance de la agricultura sobre zonas previamente ganaderas ha favorecido la creciente tendencia a la implementación del engorde de ganado a corral (“feedlot”). Todo ello ha intensificado aún más los efectos deletéreos de los “agroecosistemas” sobre el humedal pampeano (ver Figura 2).

Un sistema de producción agrosostenible tiene dos componentes fundamentales: el natural (clima, planta, suelo y sus interacciones) y el humano (sus prácticas productivas, su gestión empresarial, su utilidad monetaria). Dentro de esta estrecha definición del sistema agropecuario, el suelo es el factor determinante de la sostenibilidad del agroecosistema, “sin un suelo saludable no se puede tener una producción sostenible”. Ciertamente, pero, como toda conclusión basada en una definición estrecha del sistema, también parcial. Dentro de la definición agropecuaria del sistema, los indicadores de salud del suelo son de suma importancia, incluyendo: textura, densidad, contenido de materia orgánica y de nutrientes, y actividad biológica. Sin embargo, no es raro que en muchos casos la manifestación de

óptimos valores de los indicadores de “salud del suelo” esté relacionada con la observación de pésimos valores de los indicadores de la salud del humedal. Ello puede sonar paradójico, pero es de esperar desde una visión macrosistémica.

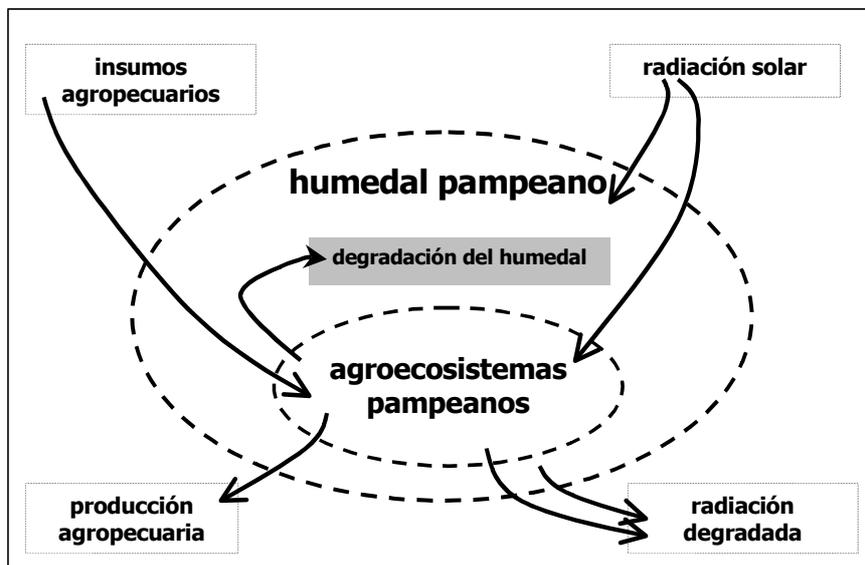


Figura 2. Definición conceptual del sistema del humedal de las Pampas. La eutrofización del mismo es sólo una de las manifestaciones del accionar humano basado, principalmente, en recursos energéticos y materiales externos al humedal.

La estrecha definición del sistema agropecuario es, desde el punto de vista macroecológico, evidentemente incompleta. Al no incluir el agua de superficie, componente esencial del sistema pampeano, la estrecha definición agropecuaria externaliza las consecuencias negativas de las actividades humanas sobre el humedal, incluidas las actividades agropecuarias (ver Figura 2). El enriquecimiento en nutrientes de las aguas de superficie pampeanas, y sus múltiples efectos negativos sobre sus lagunas, es hoy un serio problema ambiental para extensas zonas de la región. La carga interna de fósforo de las lagunas más degradadas llega a superar el 80% de la carga total. Además, la presencia de altos niveles de bacterias fecales y anaerobias del género *Clostridium* así como las floraciones de cianobacterias, son hechos casi cotidianos, especialmente durante los años relativamente secos.

La mayor parte de la llanura pampeana está constituida por áreas completamente planas que alternan con suaves lomadas, originalmente cubiertas por pastizales, que actualmente son objeto de una explotación agrícola relativamente intensa. Por otra parte, la gran mayoría de las ciudades y poblados no cuentan con sistemas de tratamiento de efluentes o los mismos son insuficientes u obsoletos. Las elevadas cargas de nutrientes resultantes se ven reflejadas en el alto grado de eutrofización de las aguas de superficie. Los esfuerzos ambientales actuales sobre el humedal pampeano pueden resumirse en:

- cambios en el tipo e intensidad de uso de la tierra (pastizales convertidos en tierra agrícola y humedales en pasturas); erosión y exportación de nutrientes
- drenaje, canalización y represado de cuerpos de agua
- agricultura y ganadería (cría y engorde extensiva, pasturas naturales mejoradas, pasturas implantadas, cultivos anuales, “feedlots”)

- urbanización no regulada y con sistemas de tratamiento cloacal deficientes o inexistentes
- relleno con sustancias tóxicas no regulado o pobremente controlado

Por otra parte, los efectos ambientales sobre el humedal pampeano que se producen debido a las acciones “externas” anteriormente listadas, entre otros, son:

- cambio en los patrones de drenaje naturales
- cambios en la morfología de los cuerpos de agua
- aumento de la sedimentación inorgánica y orgánica
- aumento de los niveles de materia orgánica poco oxidada y de sus metabolitos (ambientes anóxicos y reductores)
- enriquecimiento en nutrientes de las aguas superficiales y subterráneas (especialmente P y N)
- contaminación de las aguas de superficie y subterráneas con sustancias tóxicas usadas en las actividades agropecuarias modernas (herbicidas, insecticidas, y otras sustancias agrotóxicas)
- contaminación de las aguas de superficie y subterráneas (?) con sustancias altamente tóxicas utilizadas en la industria
- cambios dramáticos en la biodiversidad y abundancia vegetal y animal en los ecosistemas terrestres y acuáticos

Los cambios sufridos por el humedal de las Pampas

Los cambios que ha experimentado el humedal pampeano debido al accionar humano pueden rastrearse hacia varios siglos atrás (Vervoorst, 1967). Sin embargo, estos humedales han venido siendo modificados en grado variable desde fines del siglo XIX, a nivel local y regional, por extensas canalizaciones que drenan parcialmente el humedal para su utilización por parte de las actividades agropecuarias. Considerando que los agroecosistemas pampeanos están incluidos en el sistema más extenso constituido por el humedal pampeano (Figura 2), como indicador de cambio del humedal utilizaremos el cambio en el tipo e intensidad de uso de la tierra tal como fuera descrito por Viglizzo et al. (2001).

En las dos porciones más importantes del humedal pampeano, la pampa plana (central) y la pampa deprimida (Figura 1), el uso de la tierra varió apreciablemente durante los últimos 120 años. Sin embargo, ese cambio fue mucho más pronunciado en la pampa central (Figura 3). Desde fines del siglo XIX las pasturas naturales, como “campo natural” poco modificado (Viglizzo et al. (2001), decrecieron paulatinamente en las porciones más importantes del humedal, mientras aumentaba paulatinamente la tierra dedicada a los cultivos anuales y posteriormente a la implantación de pasturas (Figura 3). Las aguas de superficie generalmente reflejan, a través de su estado, el tipo e intensidad de actividades que los humanos realizan en sus drenajes. Es en la pampa

deprimida, la porción menos modificada del humedal, donde se pueden encontrar, por mucho, la mayor proporción de lagunas en estado “claro” (Quirós et al., 2002a).

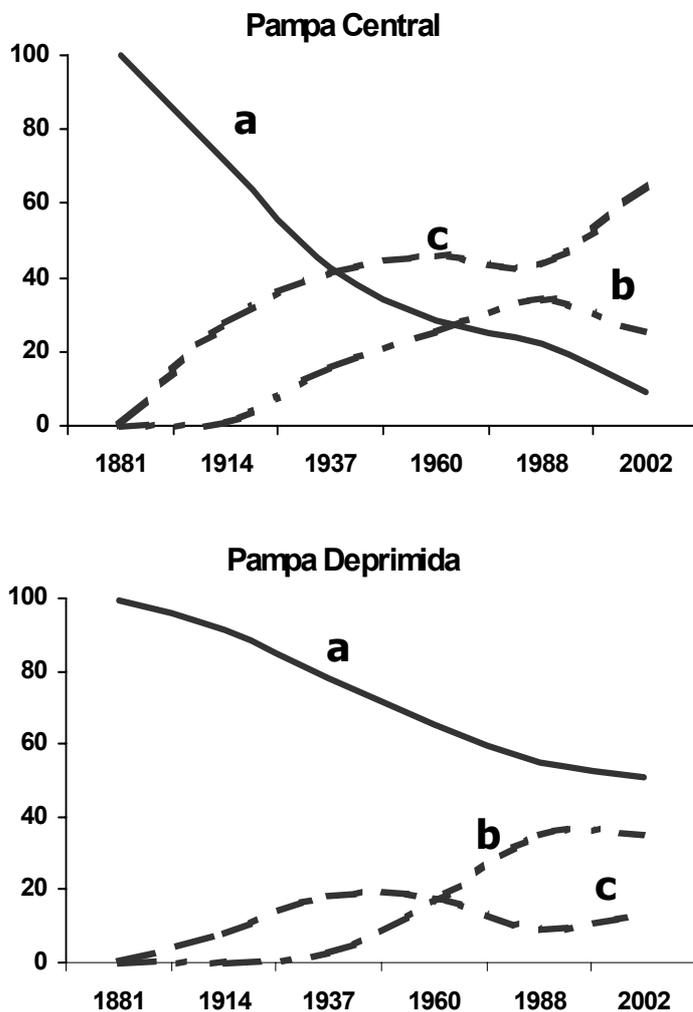


Figura 3. Variación temporal de la proporción de a) pasturas naturales, b) pasturas cultivadas, y c) cultivos anuales en las áreas más importantes del humedal pampeano (modificado de Viglizzo et al., 2001).

El estado trófico de las lagunas pampeanas y su relación con la intensidad de uso de la tierra

Las grandes lagunas pampeanas (superficie superior a los 2 km²), debido a sus cuencas de drenaje más extensas, integran los efectos de actividades más diversas, tales como agricultura y ganadería intensivas y urbanización con deficientes o inexistentes tratamientos de efluentes cloacales (Quirós et al., 2002). Ello explica en parte que todas las grandes lagunas claras estudiadas por nosotros se hallan situadas en zona de baja intensidad de uso de la tierra (Quirós et al., 2002b). Por otra parte, las pequeñas lagunas aquí consideradas (superficie inferior a los 1.5 km²) se encuentran situadas en el medio de campos agrícolas de intensidad de uso de la tierra variable y, como veremos más adelante, sufren efectos de enriquecimiento en nutrientes no totalmente esperados (Sosnovsky y Quirós, 2004) desde la visión clásica de la eutrofización de lagos someros (ver por ejemplo Scheffer, 1998).

Tabla 1. Indicadores de estado trófico en las lagunas pampeanas. Se presentan los valores medios y los rangos de variación para cada grupo de lagunas (Quirós, 1990; Rennella y Quirós, 2002; Quirós et al., 2002a; Sosnovsky y Quirós, 2004).

tamaño	tipo	SDL	Chl	TP	Chl:TP	TN	TN:TP
		(m)	(mg.m ⁻³)	(mg.m ⁻³)		(mg.m ⁻³)	
grande							
	“clara”	1.5 (0.6-4.6)	19.2 (1.6-82.4)	230 (23-1288)	0.11 (0.03-0.24)	6361 (2660-11592)	63 (9-45)
	“turbia”	0.4 (0.1-1.1)	107 (12.8-405)	479 (1250-25)	0.32 (0.58-0.09)	9320 (2900-28750)	40 (5-116)
pequeña							
	“clara”	> 0.8 (0.04- >2.3)	23.4 (0.2-258)	1889 (366-4910)	0.01 (0.0001-0.15)	2373 (161-21021)	1.3 (0.1-8)
	“turbia”	0.3 (0.04-1.0)	165 (3.7-1814)	2035 (688-5322)	0.08 (0.001-0.35)	6593 (1456-53124)	3.3 (0.6-11)

Las grandes lagunas “claras” se presentan generalmente como meso-eutróficas, dominadas por la macrofitia sumergida y emergente, y con menores valores medios de sus concentraciones de nutrientes totales (fósforo (TP) y nitrógeno (TN)), biomasa algal (Chl), y mayor transparencia del agua (SDL) (Tabla 1). La variabilidad estacional de estos parámetros es relativamente baja para las grandes lagunas (Rennella, información no publicada). Por su parte, las grandes lagunas “turbias” se presentan usualmente como eutróficas e hipertróficas, tal como lo indican los altos valores medios de sus concentraciones de nutrientes totales, biomasa algal, baja transparencia del agua (Tabla 1), y una macrofitia prácticamente inexistente. Como es de esperar, todas las grandes lagunas “claras” se desvían negativamente de la relación Chl-TP a concentraciones de TP relativamente bajas (Figura 4).

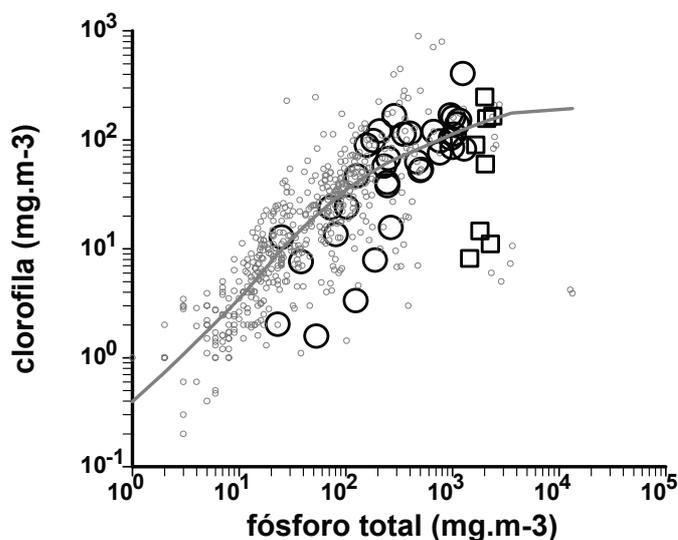


Figura 4. Relación entre la biomasa del fitoplancton (como clorofila a) y la concentración de fósforo total para las lagunas pampeanas en el marco de más de 600 lagos someros distribuidos mundialmente (Quirós, 2002). Lagunas grandes (○) y pequeñas (□).

Por otra parte, el estado trófico de las lagunas pequeñas se muestra como mucho más dependiente de las precipitaciones locales y del uso de la tierra en su entorno inmediato (Sosnovsky y Quirós, 2004). El valor medio de las concentraciones de fósforo y nitrógeno totales fueron sustancialmente mayores y menores respectivamente, que en las grandes lagunas. Tanto la biomasa algal como la transparencia del agua no fueron muy diferentes cuando se las compara con las de las grandes lagunas del mismo tipo, aunque sí bastante más variables (Tabla 1). Algo que no era de esperar es el hecho que algunas de las pequeñas lagunas sean “claras” aún a concentraciones de TP superiores a 1000-2000 mg.m⁻³ (Figuras 4 y 5) (Sosnovsky y Quirós, 2004).

Para el total de las grandes lagunas, las relaciones Chl:TP y TN:TP en la columna de agua son relativamente mayores que para las lagunas pequeñas. Para ambos grupos de tamaño, las mayores relaciones Chl:TP de las lagunas “turbias” sobre las “claras” (Tabla 1) son de esperar dado que, para las primeras, es evidente el predominio del fitoplancton sobre la macrofitia. Sin embargo, son de resaltar los mayores valores de ambas relaciones en las grandes lagunas sobre los bajísimos valores que se presentan en las pequeñas (Tabla 1). En éstas últimas, esto estaría indicando una mayor dependencia de sus cargas de nutrientes de las actividades agropecuarias. Las lagunas pequeñas, especialmente las “claras”, parecen sufrir un enriquecimiento en fósforo de origen erosivo que entra a las mismas con la escorrentía superficial. Esto llevaría a que presenten bajísimos valores de la relaciones Chl:TP y TN:TP aún por debajo de los valores medios de las relaciones N:P habituales en las excretas animales y aún en algunos de los fertilizantes inorgánicos usuales (Tabla 1).

Los efectos directos de la agricultura se estarían reflejando en los niveles de fósforo y nitrógeno de la mayoría de las lagunas del humedal pampeano, especialmente de las más pequeñas situadas en la pampa plana (Figura 1). Para las lagunas de mayor tamaño de la pampa central también deben considerarse los efectos de los efluentes urbanos no tratados. Para las grandes lagunas de las zonas más bajas de la pampa deprimida los efectos de la agricultura y de la urbanización serían actualmente bastante menores, como es indicado por el estado de “laguna clara” de muchas de sus lagunas. Sin embargo, para las zonas menos deprimidas de ésta última región, el efecto de eutrofización de los efluentes cloacales no tratados ha sido ampliamente reportado, viéndose ello reforzado aún más por las cargas de nutrientes provenientes de la agricultura y la cría de ganado intensivas actualmente en plena intensificación.

Por otra parte, la relación TN:TP decrece con la concentración de TP ($n = 36$, $R^2 = 0.65$, $P < 10^{-6}$) (Figura 5c) pero prácticamente no se encuentra relacionada con la concentración de TN ($P = 0.15$). La relación decreciente entre TN:TP y la concentración de TP prácticamente no diferencia las lagunas entre clases de tamaño o de transparencia del agua. Sólo es de resaltar el hecho que las lagunas pequeñas, ligadas directamente a la agricultura, son las que presentan las menores relaciones TN:TP (Figura 5c).

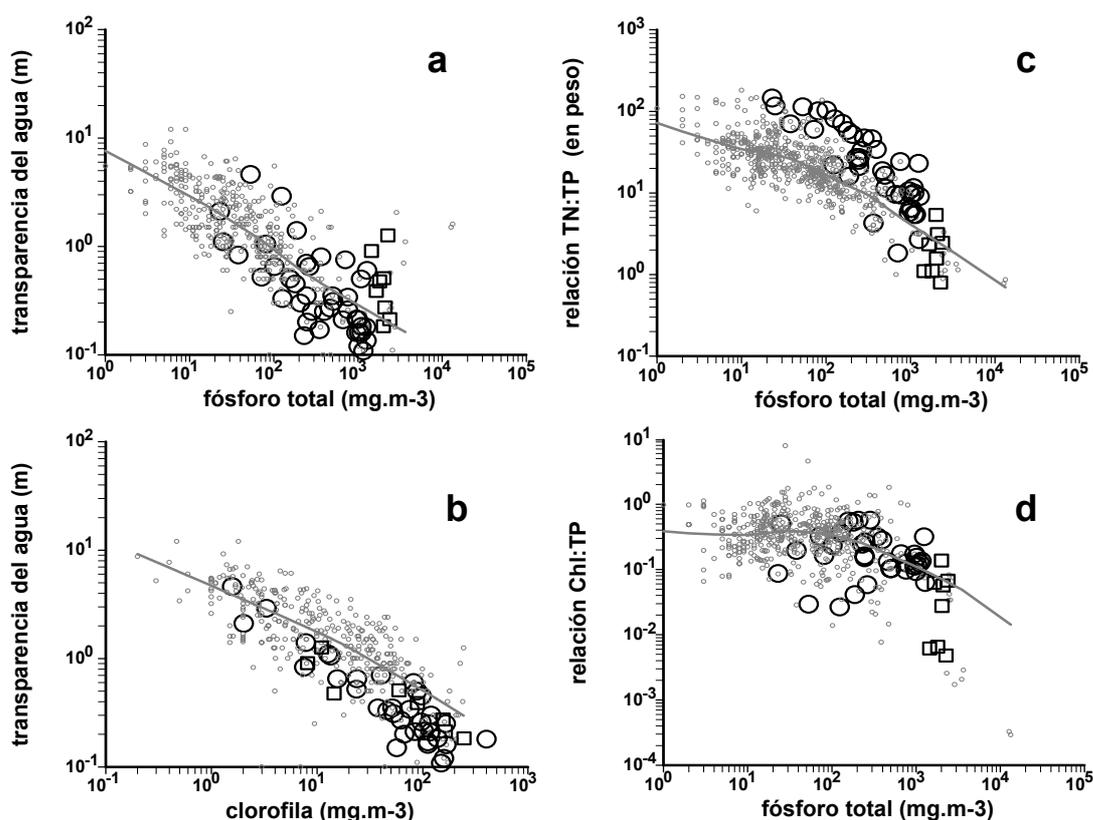


Figura 5. Relaciones entre la transparencia del agua y las concentraciones de fósforo total (TP) (a) y de clorofila (Chl) (b), y entre las relaciones TN:TP (c) y Chl:TP (d) con la concentración de fósforo total para las lagunas pampeanas en el marco de más de 600 lagos someros distribuidos mundialmente (Quirós, 2002). Lagunas grandes (○) y pequeñas (□).

Debido al carácter extremadamente somero de las lagunas pampeanas, la influencia de la turbidez de origen inorgánico en la columna de agua era de esperar. Aunque la relación estadística entre la disminución de la transparencia del agua y el aumento de la biomasa del fitoplancton es relativamente buena, esta se desvía negativamente de la relación obtenida para la media de los lagos someros mundiales (Figura 5b). Este efecto es mucho menos evidente, como era de esperar, cuando se relaciona la transparencia del agua con la concentración de TP (Figura 5a). Cabe aquí aclarar que las arcillas en suspensión generalmente poseen altos contenidos de fósforo adsorbido. El efecto negativo de la turbidez inorgánica sobre el desarrollo del fitoplancton podría concluirse del patrón observado en la Figura 5b, aunque el efecto de la presencia de lagunas en estado “claro” no puede ser netamente diferenciado.

Desde los humedales primigenios hasta la agriculturización del humedal

Las entradas de fósforo y nitrógeno al humedal provienen actualmente tanto de fuentes puntuales como difusas. Actualmente, las fuentes puntuales están ligadas a las urbanizaciones y establecimientos de cría animal. Las mismas están prácticamente no

controladas y se descargan principalmente sobre arroyos permanentes, ríos y lagunas. Por otra parte, las fuentes no puntuales están relacionadas a la agricultura y, frente a la no inclusión de medidas de manejo conservativas en las fuentes, aumentan casi proporcionalmente a su intensidad.

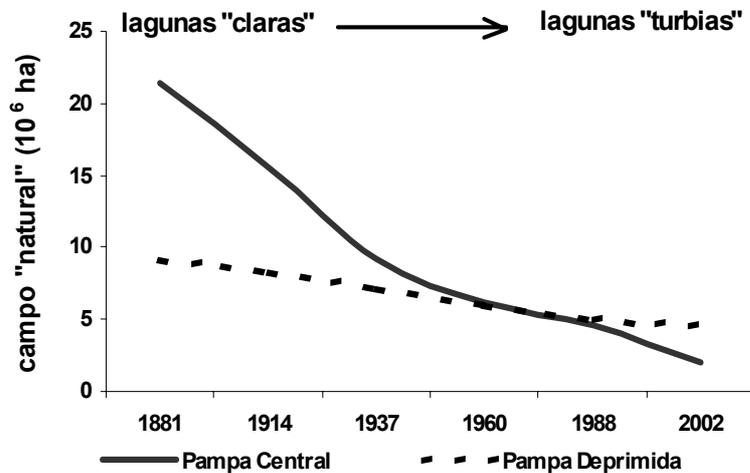


Figura 6. Disminución de la superficie de campo “natural” (sensu Viglizzo et al., 2004) durante los últimos 120 años.

Durante más de un siglo, las Pampas, una de las últimas grandes regiones de pastizales y humedales menos desarrolladas del mundo, ha estado enfrentando profundos cambios, tales como agriculturización, urbanización, canalización y regulación de ríos y arroyos, desecamiento y eutrofización del humedal, contaminación por agroquímicos, erosión y sedimentación, y la implantación de industrias generalmente contaminantes.

Es altamente probable que el cambio sufrido por los humedales de las Pampas desde su estado primigenio hasta su transformación para las actividades agropecuarias esté relacionado con los cambios en el uso de la tierra tal como fuera descritos por Viglizzo y colaboradores (Viglizzo et al., 2001). Dado que las relativamente pocas lagunas “claras” que quedan están ubicadas en la pampa deprimida donde el cambio de uso fue menor y que la mayor parte de las lagunas de la pampa central se encuentran en estados “turbios” (Figura 6), podemos hipotetizar que el estado original de las lagunas pampeanas era uno similar al de las lagunas “claras” actuales, así como que la causa más general del aumento de turbidez de las lagunas está en la “agriculturización” del humedal y en la urbanización asociada a la misma. Un resumen comparativo de los estados del humedal pampeano en su estado previo a la agriculturización y en el presente puede observarse en la Caja 1.

Pasado, presente y futuro del humedal pampeano y sus lagunas

En este trabajo hemos utilizado a la abundancia de lagunas “claras” y “turbias” como indicador de la intensidad de acción antrópica sobre el humedal pampeano. El cambio más evidente es la paulatina desaparición de la macrofitia arraigada al sedimento y la creciente importancia que va adquiriendo la biomasa algal en las aguas abiertas de las lagunas. La existencia de un continuo de estados de laguna que va desde lagunas plenamente “claras” a

otras completamente “turbias” fue ya relacionado con el incremento del nivel de anoxia en la interfase agua-sedimento (Quirós et al., 2002b, Quirós, 2005).

Caja 1. Desde los humedales primigenios hacia la agriculturización del humedal.

pasado	presente
pasturas naturales	asentamientos urbanos, agricultura, pastizales altamente modificados
drenajes naturales	drenajes media a altamente modificados
densidad animal relativamente baja	densidad animal relativamente alta
lagunas “claras”	lagunas “turbias”
dominadas por la macrofitia	dominadas por el fitoplancton
sedimentos óxicos no saturados en P	sedimentos hipóxicos o anóxicos, saturados en P
bajos niveles relativos de materia orgánica en la columna de agua, ambientes más oxidantes	altos niveles relativos de materia orgánica en la columna de agua, ambientes más reductores
niveles de nutrientes acordes a drenajes sobre suelos muy productivos cubiertos por la vegetación natural	niveles de nutrientes muy altos, acordes con las actividades agropecuarias y la urbanización
comunidades vegetales y animales balanceadas	comunidades vegetales y animales simplificadas
	mortandades generalizadas de aves y peces
	riesgos para la salud pública

El proceso de agriculturización que viene sufriendo el humedal pampeano no es novedoso. Desde hace siglos atrás los humanos venimos regulando y desecando humedales para utilizarlos para la agricultura. La novedad reside en el hecho que es uno de los últimos, sino el último, de sus características. Nuestra experiencia (Quirós et al., 2002a, 2002b), la reconstrucción histórica (ver por ejemplo Vervoort (1967)) y la experiencia con lagos de llanura a nivel mundial (Scheffer, 1998) nos permite suponer que el pasado del humedal pampeano era uno de altos pastizales y lagunas transparentes tapizadas por la macrofitia sumergida y emergente similares a las lagunas “claras” actuales. La

“agriculturización” del humedal fue transformando gran parte del pastizal llevando paulatinamente las lagunas hacia el estado “turbio” actual.

El presente de gran parte del humedal pampeano es uno de lagunas “turbias” altamente eutrofizadas. Frente a la total falta de manejo del humedal pampeano, restan solamente los procesos naturales para recuperarlo periódicamente de la eutrofización. Ello, obviamente, ocurre sólo de manera temporal y con capacidad de autodepuración decreciente. Los períodos de inundación favorecen la dilución de los nutrientes pero también aumentan las cargas de origen erosivo, por lo cual este balance queda aún por ser estudiado. Las aguas duras con altas concentraciones de calcio (la mayoría con concentraciones de Ca entre 30 y 50 g.m⁻³) y alto pH favorecen, especialmente durante la estación de crecimiento, la formación y precipitación de calcita que arrastra fósforo fuera de la columna de agua, por absorción y coprecipitación o como apatita. Sin embargo, es altamente probable que los sedimentos de las lagunas “turbias” se encuentren altamente enriquecidos en fósforo. La anoxia en la interfase agua-sedimento favorece el retorno de parte del mismo a la columna de agua en estado de biodisponibilidad.

La restauración de lagos someros no vegetados y turbios hacia un estado vegetado de aguas más claras es notoriamente dificultoso. La drástica reducción de la carga de nutrientes es una necesidad para la recuperación, pero sus efectos podrían llevar a observarse sólo luego de una demora de varias décadas, debido a la gran cantidad de fósforo que fue previamente almacenada en los sedimentos. Cuando la carga externa de fósforo se reduce, su concentración en la columna de agua comúnmente no baja inmediatamente, y la entrada de fósforo desde los sedimentos anóxicos llega a ser una fuente de nutrientes importante para el fitoplancton así como un sitio poco favorable para el desarrollo de la macrofitia. Para acelerar la recuperación de una laguna deberán aplicarse entonces métodos de tratamiento interno, generalmente poco económicos. Si no se comienza a considerar seriamente la eutrofización del humedal pampeano como un problema a resolver, obrando en consecuencia sobre el manejo de los agroecosistemas y las urbanizaciones en él contenidos, el futuro del humedal pampeano es altamente cierto. Será un futuro de cuerpos de agua turbios y embalsados, altamente enriquecidos en nutrientes, y bordeando el estado distrófico que los hará prácticamente inutilizables por parte de los humanos.

Bibliografía

Iriondo M. 1989. Quaternary lakes of Argentina. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 70, 81-88.

Iriondo, M. 2004. Large wetlands of South America: a model for Quaternary humid environments. *Quaternary International* 114: 3–9.

Quirós, R., 1990. Factors related to variance of residuals in chlorophyll total phosphorus regressions in lakes and reservoirs of Argentina. In R.D. Gulati, E.H.R.R.Lammers, M.L. Meijer, and E. van Donk (eds.) *Bio-manipulation -Tool for Water Management*. *Hydrobiologia* 200-201: 343-355.

- Quirós, R., 2002. The nitrogen to phosphorus ratio for lakes: A cause or a consequence of aquatic biology? (p: 11-26). In A. Fernandez C. and G. Chalar M. (eds.) *El Agua en Iberoamérica: De la Limnología a la Gestión en Sudamérica*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, Argentina. 172 p.
- Quirós, R., 2005. La ecología de las lagunas de las Pampas. Investigación y Ciencia. Madrid, España (en prensa).
- Quirós, R., A. Rennella, M. Boveri, J.J. Rosso y A. Sosnovsky. 2002a. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12: 175-185.
- Quirós, R., J.J. Rosso, A. Rennella, A. Sosnovsky y M. Boveri. 2002b. Estudio sobre el estado trófico de las lagunas pampeanas. *Interciencia* 27: 584-591.
- Rennella, A.M., and R. Quirós. 2002. Relation between planktivorous fish and zooplankton in two very shallow lakes of the Pampa Plain. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 28: 887-891.
- Ringuelet, R.A. 1962. *Ecología Acuática Continental*. EUDEBA, Buenos Aires, Argentina. 138 p.
- Scheffer, M. 1998. *Ecology of shallow lakes. Population and Community Biology Series 22*. Chapman & Hall.
- Soriano, A., 1992. Rio de la Plata grasslands (p. 367-407). In R. T. Coupland (ed.) *Ecosystems of the world 8A. Natural grasslands. Introduction and western hemisphere*, Elsevier, New York, USA.
- Sosnovsky, A., y R. Quirós. 2004. Efectos de la intensidad de uso de la tierra en pequeñas lagunas pampeanas (Argentina). CYTED (en prensa).
- Viglizzo, E.F., Lértora, F.A., Pordomingo, A.J., Bernardos, J.N., Roberto, Z.E., Del Valle, H., 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 81, 65– 81.
- Vervoort, F.B. 1967. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires). En *La vegetación de la República Argentina. Serie Fitogeográfica 7*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina. 219 p.