

Provisión del servicio ecosistémico de retención de nitrógeno total y su variación bajo usos y coberturas cambiantes en la cuenca del río Jejuí Guazú, Paraguay

Provisioning of the ecosystem service "total nitrogen retention" and its variation under changing land use and coverage in the Jejuí Guazú river basin, Paraguay

Andrea Carolina Parra Ruiz Díaz^{1*}, Lucía Janet Villalba Marín¹ y Stella Mary Amarilla Rodríguez¹

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

*Autor para correspondencia:
andreparrard@gmail.com

Conflicto de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Contribución de autoría:

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales en la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de datos, a la revisión del manuscrito y la aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Historial:

Recibido: 30/12/2020;
Aceptado: 02/04/2022

Periodo de Publicación:

Enero-Junio de 2022



RESUMEN

Uno de los factores directos más importantes que afectan a los servicios ecosistémicos (SE) y su provisión han sido el cambio del uso y cobertura de la tierra. La ausencia de información de cómo estos factores afectan a la provisión de los servicios pueden llevar a su deterioro o uso no sostenible. Esta investigación fue realizada en la cuenca del río Jejuí Guazú, en la Región Oriental de Paraguay, con el fin de describir la variación del servicio ecosistémico de retención de nitrógeno total (NT) y ante la reducción de la superficie boscosa sin protección legal, utilizando el modelo InVEST y softwares de Sistema de Información Geográfica. Para este efecto, se generaron el uso y cobertura de la tierra del año 2017 (identificándose ocho clases), modelo digital de elevación, promedio anual de precipitación del mismo año y límite de subcuencas. Los resultados resaltan el rol fundamental de las áreas naturales, tanto bosques como humedales, para el mantenimiento del servicio de retención de nutrientes. Especialmente, los humedales los cuales presentan la mayor proporción porcentual de retención de NT, observándose cuencas cubiertas por humedales con un 90,94 y 91,10%; y la menor disminución de su capacidad con el cambio de la configuración del paisaje reduciéndose solo en un 1,53%.

Palabras clave: servicios ecosistémicos, nitrógeno total, uso y cobertura de la tierra, sistemas de información geográfica

ABSTRACT

One of the most important direct drivers affecting ecosystem services (ES) and their provision has been land use and land cover (LULC) change. The absence of information on how these factors affect ecosystem services provision can lead to their deterioration or unsustainable use. This research was carried out in the Jejuí Guazú river watershed, in the Eastern Region of Paraguay, in order to describe the variation of the ecosystem service of total nitrogen (TN) retention and under forested area reduction, considering the ones without legal protection using the InVEST model and Geographic Information System's software. For this purpose, the land use and land cover of the year 2017 (where eight classes were identified), a digital elevation model, the annual average rainfall for the same year and sub-basin limits were generated. The results highlight the fundamental role of natural areas, both forests and wetlands, for the maintenance of the nutrient retention service. Especially, wetlands which present the highest percentage of TN retention, where watersheds covered by wetlands got 90.94 and 91.10% of retention; and the smallest decrease in its retention capacity with the change in the landscape configuration, decreasing only by 1.53%.

Key words: ecosystem services, total nitrogen, land use land cover, geographic information system

INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos (SE) son considerados como los beneficios que obtienen los seres humanos de la naturaleza, los cuales derivan en mejoras de su calidad de vida (IPBES, 2019). Una de las categorías engloba los procesos de regulación de la calidad del agua reteniendo o degradando contaminantes

antes de su entrada a los cursos hídricos a través de la vegetación, el suelo o humedales (Sharp et al., 2018). El escurrimiento del agua puede captar una gran variedad de contaminantes, como nutrientes (nitrógeno o fósforo) que provienen de los fertilizantes utilizados en la agricultura. Sin esta filtración, los componentes entrarían a los cursos de agua, alterando la calidad del hábitat acuático

y degradando la calidad para los consumidores ubicados aguas abajo. Entonces, la retención de nutrientes se podría definir como la capacidad que posee la vegetación o el suelo para mitigar las cargas de nutrientes transportados a través del escurrimiento superficial (Chalazas, Tzoraki, Cooper, Efstratiou y Bakopoulos, 2017).

Existen factores externos que afectan a la naturaleza, los bienes antropogénicos, los servicios ecosistémicos y por ende la calidad de vida de los seres humanos. Estos factores pueden ser directos, indirectos, naturales y antropogénicos. Entre los factores antropogénicos directos principales se incluyen la transformación de los hábitats tales como la degradación del suelo, deforestación, cambio climático, entre otros (IPBES, 2019).

Al respecto, Paraguay posee una de las tasas de deforestación más altas del mundo (De la Sancha, Boyle y McIntyre, 2021), esta fue de 0,99% entre los años 2005 a 2010 (Imbach et al., 2016). El Bosque Atlántico en Paraguay ha sido altamente impactado en años recientes, la continua presión antrópica sobre los recursos naturales ha llevado a una pérdida del 90% de la cobertura boscosa en la región este del país (Da Ponte et al., 2017). Esta ecorregión cubre diez departamentos del país, entre estos, Canindeyú se ubicó con el tercer mayor porcentaje de cambio de uso entre los años 2000 y 2019, con una reducción de superficie del 34,1%. Por otro lado, San Pedro se encuentra en segundo lugar con una reducción de 46,9% de masa boscosa en los mismos años (De la Sancha, Boyle y McIntyre, 2021).

Los SE, el ecosistema en sí mismo y las demandas de estos por los seres humanos son variables en el espacio, por lo que, frecuentemente estos dependen de una configuración de los ecosistemas o elementos del paisaje específicos para su generación. Algunos SE pueden variar positivamente, como al mantener la calidad de suelo se promueve el ciclaje de nutrientes. Otros varían de forma negativa, como al aumentar los servicios de producción (expansión de la frontera agrícola) se puede perjudicar a algunos servicios de regulación (Bastian, Grunewald y Syrbe, 2012).

La ausencia de información de cómo estos factores afectan a la provisión de los SE pueden llevar a su deterioro o uso no sostenible. De esta necesidad surge la posibilidad de lograr un acercamiento representando espacialmente los servicios ecosistémicos provistos por los ecosistemas en un determinado lugar, a través de la aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos determinísticos que estimen y analicen datos espaciales. Pocos estudios han analizado servicios ecosistémicos y su relación

con la configuración del paisaje, tanto en la región como en el país. Entre estos, se han estimado el stock de carbono para ciertas coberturas forestales en la ecorregión del Bosque Atlántico del Paraná utilizando el modelo InVEST, en la cual se observó una variabilidad de este SE de acuerdo a la ocupación y uso de la tierra (Ojeda, Amarilla y Villalba, 2019). Asimismo, se ha analizado la protección de acuíferos por cobertura vegetal en la Reserva de la Biósfera del Bosque Mbaracayú a través de datos y herramientas espaciales. Las mismas resaltan que los análisis realizados con el apoyo de sensores remotos y análisis espaciales como metodologías que facilitan la evaluación de territorios a nivel paisaje (Galluppi-Selich, Villalba, Salas-Dueñas y Rodríguez, 2019).

Considerando el papel fundamentalmente del balance del nitrógeno para los procesos de calidad del agua, el objetivo de la presente investigación fue describir la provisión del servicio ecosistémico de retención de nitrógeno total en la cuenca Jejuí Guazú y su variación bajo un uso y cobertura de la tierra cambiante. Con el fin comprender ¿cómo un escenario de reducción de superficie boscosa afecta a la proporción porcentual de nitrógeno total retenido?

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la cuenca del río Jejuí Guazú, la cual abarca los departamentos de San Pedro, Canindeyú, Amambay, parte de Caaguazú y Alto Paraná. Esta cuenca cubre una superficie aproximada de 21.060 km² y se encuentra dentro de la ecorregión del Bosque Atlántico del Paraná.

Existen numerosas herramientas para el modelado espacial de SE que han sido desarrolladas con el tiempo, las cuales presentan una gran oportunidad para apoyar de la toma de decisiones relacionadas con el consumo de los recursos naturales y la planificación del uso de la tierra (Ochoa et al. 2015). Una de las herramientas más utilizadas y difundidas para la cuantificación y visualización de los SE es InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), que posee una colección de modelos fundamentados en los SIG (Crossman et al., 2013)

Para la presente investigación, se utilizó el modelo retención de nutrientes NDR (*Nutrient Delivery Ratio*) de InVEST v3.4.4., con el cual se estimó la retención de nitrógeno total (NT) de dicha cuenca teniendo en cuenta los diferentes usos y coberturas de la tierra. Un flujograma de la metodología se presenta en la Figura 1. Se puede observar la división en tres etapas; E1, E2 y E3 con los respectivos pasos principales llevados cabo para su culminación.

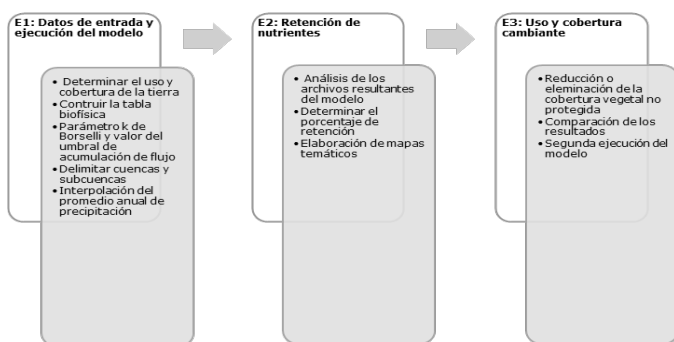


Figura 1. Procesos por cada etapa de la investigación.

Las imágenes satelitales fueron productos del sensor Sentinel 2, de la fecha 15 de noviembre del año 2017, obtenidos desde la plataforma Land Viewer de EOS (*Earth Observing System*). Para cubrir el área de estudio, se trabajó con siete escenas, utilizando las bandas B2, B3, B4 y B8 (azul, verde, rojo del espectro visible y el infrarrojo cercano, en ese orden). Se procedió a la unión de las bandas utilizando *Composite bands* del Arcgis v10.3. Luego, se realizó una clasificación orientada al objeto de la imagen satelital utilizando el software eCognition Developer 9, en su versión de prueba, para la segmentación y la clasificación de la imagen. Para esto se inició un proceso de Segmentation y se utilizó el algoritmo de *Multiresolution segmentation*, para lo cual se establecieron los siguientes parámetros en la configuración: escala (80), forma (0.1) y compacidad (0.5). Por último, se realizó una verificación a campo a través de puntos de control para comparar los resultados obtenidos en gabinete con la realidad. Para esto se empleó un GPS de modo a georreferenciar puntos de control.

Por otra parte, el modelo digital de elevación (DEM) se obtuvo del sensor SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) DEM, con una resolución espacial de 30 metros, de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), estas imágenes fueron descargadas del centro de datos de la USGS EROS. Luego fueron procesadas en ArcGIS, donde se procedió a la creación de un mosaico de las 13 escenas obtenidas.

A partir del modelo digital de elevación se generaron subcuencas mediante el conjunto de herramientas de *Hidrology* de ArcGIS. Para lo cual se siguieron los siguientes pasos: (a) cálculo de la dirección de flujo, (b) cálculo de la acumulación de flujo, (c) Definición de la red hídrica con *ráster calculator*, (d) herramienta *Stream feature* (e) Creación de puntos en las desembocaduras importantes, (f) Delimitación de las subcuencas con *Watersheds*, (g) Conversión de ráster a polígonos. Como resultado de este proceso, se delimitaron 32 subcuencas originadas de cauces y afluentes principales del río Jejui Guazú.

El elemento conocido como potencial de escurrimiento del nutriente en formato ráster, fue generado mediante la interpolación del promedio de la precipitación anual de la zona. Para lo cual se utilizaron los datos de precipitación de 11 estaciones de la red de estaciones meteorológicas de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la DINAC. El método de interpolación por el cual se optó fue Kriging Universal, utilizado el semivariograma "*Linear with quadratic drift*".

Los parámetros y coeficientes utilizados para la tabla biofísica, formato fueron obtenidos de la recopilación de datos y estudios realizados en Brasil. La decisión de utilizar dichos datos fue tomada teniendo en cuenta las características de los ecosistemas de dicho país y sus posibles similitudes con los del Paraguay, además de la cercanía y ausencia de información como ésta a nivel nacional. En el Tabla 1 se puede observar cada uno de estos valores distinguidos por su clase de uso y cobertura de la tierra al que están relacionados.

Luego, para la selección del valor del umbral de acumulación de flujo (TFA) el cual es un valor numérico que al ser introducido en el modelo sirve para la representación de la red de cursos de agua se realizaron pruebas en la ejecución del modelo con diferentes valores, los cuales fueron los siguientes: 10.000, 5.000 y 1.000 Resultando este último el valor que presentaba mayores coincidencias. Finalmente, en cuanto al parámetro K de Borselli para la aplicación de este modelo se recomienda configurar este parámetro por su número por defecto, que es dos (Sharp et al., 2018).

El modelo INVEST se ejecutó en su plataforma independiente, pero los resultados fueron visualizados en ArcGIS v 10.3. Se elaboró una planilla Excel para el cálculo de la retención de NT, siendo esta la diferencia entre los valores de carga y exportación generados por el modelo. Para llegar a este resultado se utilizó la siguiente fórmula, donde LOAD representa la carga de nitrógeno total y EXP la exportación.

$$\frac{LOAD - EXP}{LOAD} * 100$$

Finalmente, en la última etapa, se generó un LULC alternativo hipotético de cambios de uso y cobertura de la tierra. Se optó por representar la reducción de la superficie boscosa que no cuenta con una categoría de protección legal. Así, se mantuvieron la Reserva Natural del Bosque Mbaracayú, Reserva Natural Morombi y la Reserva Natural Laguna Blanca. Una vez hecho el cambio, se calculó la variación porcentual de la retención del nitrógeno total.

Tabla 1. Valores adoptados como coeficientes en la tabla biofísica para cada clase de uso y cobertura de la tierra.

AGUA				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	2,60142 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,05 (%)	150	0
Fuente	TNC Brazil citado por Miteva et al. 2014	Base de datos NatCap	Por defecto	Por defecto
BOSQUE (SEMI CADUCIFOLIO)				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	2,19 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,8 (%)	150	0
Fuente	São Paulo Env Agency 2010 (Base de datos NatCap)	TNC Brazil Miteva et al. 2014	Por defecto	Por defecto
CERRADO				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	1,5 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,5 (%)	150	0
Fuente	Wilcke& Lilienfein, 2005	TNC Brazil Miteva et al. 2014	Por defecto	Por defecto
CULTIVOS				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	10,767 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,15 (%)	150	0
Fuente	São Paulo Env Agency 2010 (Base de datos NatCap)	TNC Brazil Miteva et al. 2014	Por defecto	Por defecto
HUMEDALES				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	1,62 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,8 (%)	150	0
Fuente	Base de datos NatCap	TNC Brazil Miteva et al. 2014	Por defecto	Por defecto
PASTURAS				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n (%)	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	5,4125 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,25	150	0
Fuente	Base de datos NatCap	TNC Brazil Miteva et al. 2014	Por defecto	Por defecto
PLANTACION FORESTAL				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	1,75 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,75 (%)	150	0
Fuente	TNC-Brazil (base de datos NatCap)	Base de datos NatCap (Oyarzun2007)	Por defecto	Por defecto
URBANO				
Nombre	Carga de nitrógeno total	Máxima eficiencia porcentual de retención	Distancia donde se alcanza la máxima retención	Proporción sub-superficial
ID	load_n	eff_n	crit_len_n	proportion_sub surface_n
Valor	5,812 kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0,496 (%)	150	0
Fuente	São Paulo Env. Agency 2010 (Base de datos NatCap)	Base de datos NatCap	Por defecto	Por defecto

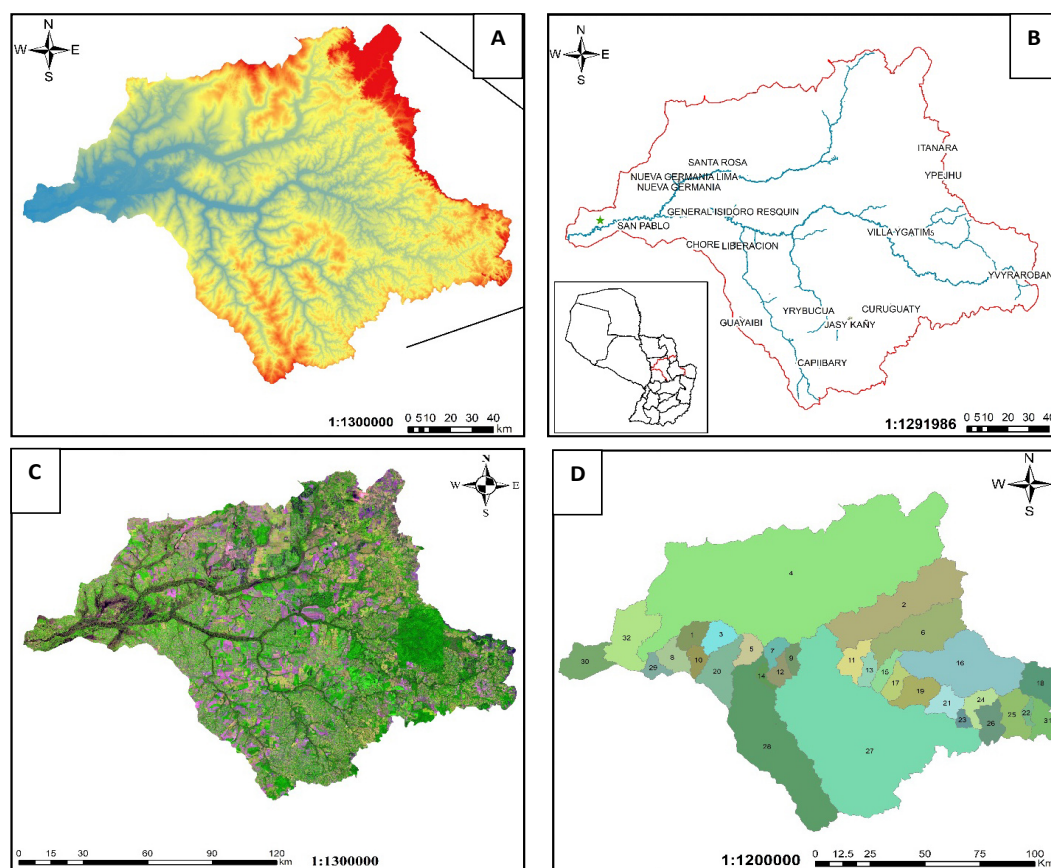


Figura 2. Mapas descriptivos de la cuenca. (a) Modelo digital de elevación (b) Red hídrica principal y distritos ubicados en la cuenca (c) Imagen satelital utilizada (d) Delimitación de subcuencas.

RESULTADOS

Para la clasificación de usos y coberturas de la tierra, se determinaron ocho tipos: espejos de agua, bosques, cerrado, cultivos en línea, humedales, pastura, plantación forestal y urbano (Tabla 2). Las áreas de cultivo ocupan el 50,88% de la superficie de la cuenca, siendo el uso más expandido. En segundo lugar, se encuentran los bosques con un 31,15%, para esta clase se tuvieron en cuenta los bosques primarios, secundarios y de galería dentro de una misma clasificación. Esta clasificación fue utilizada como insumo principal para el modelo.

En cuanto a la retención de NT, el mayor porcentaje se observa en la cuenca número 30 con un 91,10%. Estos altos valores podrían deberse a la presencia de humedales en la desembocadura del río Jejui Guazú al río Paraguay. Por otro lado, la subcuenca 18 presentó la menor capacidad de retención con un 83,56%. Como se puede distinguir, en la parte baja (verde) de la cuenca se agrupan las que poseen mayor rango de retención (87- 91%). Mientras que, en la cuenca media y alta (rojos), predominan los menores (83-85%). Los rangos porcentuales de cada subcuenca se observan en la Figura 3.

Para la generación del uso hipotético se mantuvieron

los ocho tipos de usos y coberturas de la tierra del LULC base, en el cual se reemplazaron las superficies de bosque sin categoría de protección legal por cultivos o pasturas resultando en una reducción 85,84% de los bosques. Para este estudio se consideraron como áreas protegidas: Reserva Natural del Bosque Mbaracayú, Reserva Natural Morombi y la Reserva Natural Laguna Blanca.

Con este nuevo escenario, la mayor retención de NT se dio nuevamente en la cuenca número 30 con un 89,71%. Sin embargo, se presentó una reducción del 1,53% con respecto al LULC base. Por otro lado, la subcuenca número 25 presentó la menor capacidad de retención con un 66,08%, en la misma también se observó la mayor variación porcentual con una reducción del 22,21%

En este sentido, la subcuenca número 16 sufrió una reducción del 5,49% pero a pesar de esto se mantuvo entre las subcuencas con mayor proporción de NT retenido. En la misma se encuentra la Reserva Natural del Bosque Mbaracayú, destacando la importancia de las áreas protegidas para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

Tabla 2. Superficie por cada uso y cobertura identificados.

TIPO	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE %
Espejos de agua	2.578,201	0,13
Bosque	634.066,906	31,15
Cerrado	4.976,670	0,24
Cultivos	1.035.696,628	50,88
Humedales	98.147,390	4,82
Pastura	244.632,893	12,02
Plantación forestal	10.953,408	0,54
Urbano	4.432,844	0,22
TOTALES	2.035.484,940	100

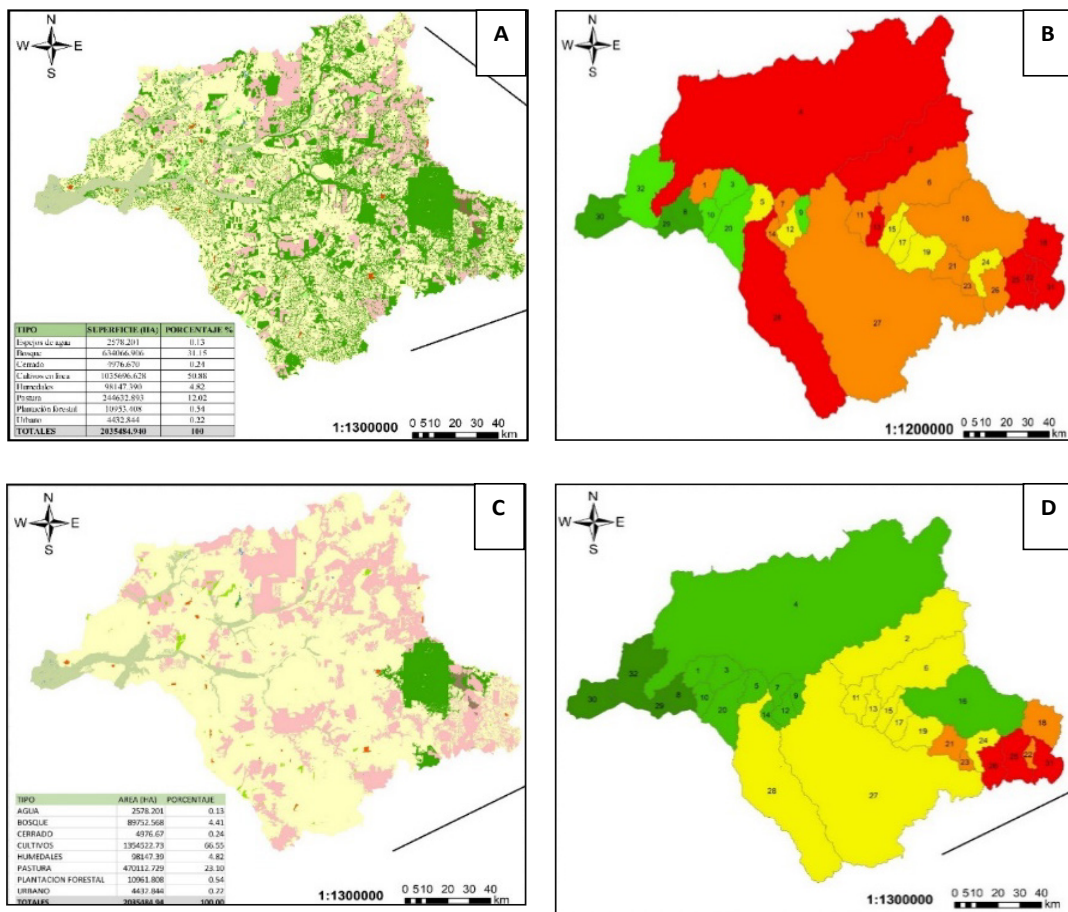


Figura 3. Mapas resultantes de la clasificación y la ejecución del modelo, (a) Uso y cobertura de la tierra de la cuenca del río Jejuí Guazú, año 2017; (b) Porcentaje de retención de NT por subcuencas para el LULC base; (c) Uso y cobertura de la tierra hipotético, con reducción de la superficie boscosas; (d) Porcentaje de retención de NT por subcuencas para el LULC hipotético.

DISCUSIÓN

La reducción de cobertura boscosa ha ido aumentando en la cuenca del río Jejuí Guazú, esta tendencia no es ajena a las tasas de deforestación de la ecorregión en la que se encuentra. Naidoo y Ricketts (2006), mencionan que en el año 1973 esta cuenca se

encontraba cubierta de bosque nativo en un 90%. Sin embargo, para el 2004 esta área boscosa se había reducido en un 56%, exceptuando al área protegida en la zona central y varios remanentes en tierras privadas.

En la elaboración del mapa de cobertura de la

tierra del país, para el 2011, se encontró que en el departamento de San Pedro la categoría de cobertura más extensa eran las tierras cultivadas, ocupando el 51,33% de la superficie total del departamento. Esta misma situación se dió en Canindeyú, donde el 68,30 del departamento está cubierto por tierras cultivadas (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestry and Forest Products Research Institute, 2013). De las ocho categorías identificadas en el área de estudio, los usos antropogénicos como cultivos y pasturas fueron predominantes, ocupando el primer y tercer lugar respectivamente.

La cuenca media y alta se encuentra ocupada, en su

mayoría, por usos agropecuarios. Se observa que a mayor superficie cubierta por dichos usos, menor es el porcentaje de retención de NT. Específicamente, las dos subcuencas con menor retención (18 y 4), están cubiertas por un 59,97 y 69,88% por uso agropecuario respectivamente.

A pesar de esto, ninguno de los porcentajes se encuentra por debajo del 80% de retención, con esto se puede inferir que el servicio de retención de nitrógeno, y la consecuente regulación de la calidad del agua, es bastante eficiente en la cuenca. Un resumen de los resultados se encuentra en el Tabla 3.

Tabla 3. Estimaciones de retención anual de NT y variación de la misma considerando ambos escenarios.

SUBCUENCA	RETENCIÓN de NT en LULC base (%)	RETENCIÓN de NT en LULC hipotético (%)	VARIACIÓN DE PORCENTAJE DE RETENCIÓN (%)
1	85,420	83,818	-1,87
2	85,054	76,845	-9,65
3	88,018	83,765	-4,83
4	84,764	80,391	-5,16
5	86,721	82,481	-4,89
6	85,782	75,738	-11,71
7	85,212	81,19	-4,72
8	89,393	86,404	-3,34
9	88,346	82,009	-7,17
10	87,747	82,559	-5,91
11	85,845	79,476	-7,42
12	86,490	81,168	-6,15
13	84,982	79,093	-6,93
14	85,744	81,035	-5,49
15	86,912	78,054	-10,19
16	86,104	81,405	-5,46
17	87,124	78,045	-10,42
18	83,566	71,901	-13,96
19	86,415	75,437	-12,70
20	87,637	82,058	-6,37
21	85,485	74,271	-13,12
22	84,938	70,387	-17,13
23	85,524	72,096	-15,70
24	87,090	77,871	-10,59
25	84,946	66,08	-22,21
26	85,474	69,189	-19,05
27	85,277	76,866	-9,86
28	84,890	78,498	-7,53
29	90,941	87,38	-3,92
30	91,102	89,708	-1,53
31	84,868	67,151	-20,88
32	87,955	85,428	-2,87

Existen dos subcuencas que superan el 90% de retención de NT (29 y 30) con 90,94 y 91,10% respectivamente. Estos altos valores podrían deberse a la presencia de humedales en las mismas. Entre los sistemas acuáticos, los humedales retienen mayor proporción de carga de nitrógeno en comparación a ríos y lagos. En promedio, estos ecosistemas retienen un 64% de la carga de NT, esto se debe al tiempo de residencia del agua y la presencia de densas formaciones de plantas acuáticas favoreciendo procesos de retención como la desnitrificación y la sedimentación (Saunders y Kalff, 2001).

Estas condiciones coinciden con los resultados de Galluppi-Selich, Villalba, Salas-Dueñas y Rodríguez (2019), estudio realizado en la Reserva de Biósfera del Bosque Mbaracayú, donde la provisión de diferentes servicios ecosistémicos se ve favorecida por la presencia de coberturas naturales.

Con el uso hipotético generado se produjo una disminución en la capacidad de retención de NT de todas las subcuencas. En cuanto a la exportación total, la cantidad de NT que no fue retenida, se pudo observar un aumento del 81,5% de ese valor dentro de la cuenca. Como es de esperarse, la mayor pérdida en la provisión de servicios ecosistémicos ocurre en escenarios "no sostenibles", en donde la cantidad de nutrientes exportados aumenta (Guarín y Hotz, 2015).

CONCLUSIONES

El promedio total de NT exportado en la cuenca es de 5,66 kg ha⁻¹ año⁻¹. De esta forma, se estima un alto porcentaje de nitrógeno retenido, entre 91,1% y 83,57% para el año 2017. La provisión de este servicio ecosistémico en particular se mostró sensible a cambios de usos y coberturas, presentando una variabilidad espacial y reducción de sus beneficios ante el aumento de usos antropogénicos. Para el área de estudio, los cultivos son los mayores aportadores de nitrógeno total a los cursos hídricos con una media exportada de 0,138 t NT/ha/año, reafirmando como una fuente importante de nutrientes. De ahí, surge la necesidad de la implementación de prácticas de manejo y planificación de uso de la tierra.

En este sentido, las coberturas naturales poseen un rol fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos. Lo anterior se ratifica al observar la disminución de la capacidad de retención de las subcuencas con el escenario hipotético. Asimismo, se produjo una reducción del 14,80% de toda la provisión, donde las subcuencas cubiertas por humedales fueron las que presentaron la menor reducción de su capacidad de retención. Es importante mencionar que el modelo InVEST, no toma como insumo la variación espacial de tipos de suelos y, en consecuencia, no fue posible considerar

las características y propiedades de los mismos que podrían favorecer una mayor retención de NT.

Se resalta que la metodológica de esta investigación permite un acercamiento a comprender las dinámicas entre la provisión servicios ecosistémicos y los cambios de uso de la tierra, basándose en datos espaciales para la identificación de zonas con necesidad de protección y fortalecimiento para su conservación. Además de explorar la importancia del enfoque ecosistémico para la planificación del territorio, aún en ausencia de información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastian, O., Grunewald, K. & Syrbe, R. (2012). *Space and time aspects of ecosystem services, using the example of the EU Water Framework Directive*. Disponible en <https://doi.org/10.1080/021513732.2011.631941>
- Chalazas, T., Tzoraki, O., Cooper, D. M., Efstratiou, M. A. & Bakopoulos, V. (2017). Ecosystem service evaluation of streams for nutrient and bacteria purification in a grazed watershed. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26, 7849-7859. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/321747575_Ecosystem_service_evaluation_of_streams_for_nutrient_and_bacteria_purification_in_a_grazed_watershed
- Crossman, N. V., Burkhard, B., Nedkov, S., Willemen, L., Petz, K., Palomo, I., Drakou, E., Martín-López, B., McPhearson, T., Boyanova, K., Alkemade, R., Egoh, B. & Dunbar, M. B. & Maes, J. (2013). A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/912e/dfe9c51cbd4ae7e369f71b0cd8b9a36ed250.pdf>
- Da Ponte, E., Mack, B., Wohlfart, B., Rodas, O., Fleckenstein, M., Oppelt, N., Dech, S. & Kuenze, C. (2017). *Assessing Forest Cover Dynamics and Forest Perception in the Atlantic Forest of Paraguay, Combining Remote Sensing and Household Level Data*. Disponible en <https://www.mdpi.com/1999-4907/8/10/389/htm>
- De la Sancha, N., Boyle, S. & McIntyre, N. (2019). Identifying structural connectivity priorities in eastern Paraguay's fragmented Atlantic Forest. *Scientific reports*, 11. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-95516-3.pdf>
- Facultad de Ciencias Agrarias y Forestry and Forest Products Research Institute (Japón). (2013). *Mapa de Cobertura de la Tierra Paraguay, 2011. Proyecto "Desarrollo de Metodologías de Monitoreo de Carbono almacenado en los Bosques" para la REDD+ en el Paraguay*. San Lorenzo. 30 p.
- Galluppi-Selich, T., Villalba, J., Salas-Dueñas D. A. & Rodríguez L. (2019). *Análisis de la función ecosistémica "protección de acuíferos por cobertura vegetal" en la Reserva de Biósfera del Bosque Mbaracayú*. Disponible en: <http://sociedadcientifica.org.py/ojs/index.php/rscopy/article/view/59>
- Guarín, A. & Hotz, H. (2015). *El análisis de servicios ecosistémicos forestales como herramienta*

- para la formulación de políticas nacionales en el Perú. SERFOR - Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. Disponible en <http://repositorio.serfor.gob.pe/bitstream/SERFOR/264/1/SERFOR.%202015.%20EI%20an%C3%A1lisis%20de%20SE%20forestales%20como%20herramienta.pdf>
- Imbach, P., Robalino, J., Zamora, J., Brenes, C., Sandoval, C., Pacay, E., Cifuentes-Jara, M. & Labbate, G. (2016). *Escenarios de deforestación futura en Paraguay*. Asunción, Paraguay: FAO/PNUD/PNUMA, 16 p.
- IPBES. (2019). Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on *Biodiversity and Ecosystem Services*. doi:10.5281/zenodo.3553579
- Naidoo, R. & Ricketts, T.H. (2006). Mapping the Economic Costs and Benefits of Conservation. Disponible en <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.0040360>
- Ojeda, J., Amarilla, S. & Villalba, J. (2019). *Stock de carbono y propiedades del suelo para dos coberturas forestales en la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná*. Congreso Paraguayo de Ciencia del Suelo. Sociedad Paraguaya de Ciencia del Suelo. San Lorenzo, Paraguay: SOPACIS, 81-86 pp.
- Saunders, D. & Kalff, J. (2001). *Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers*. *Hydrobiologia*, Vol. 443. Disponible en <https://booksc.xyz/dl/11171755/ac04f5>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D. & Douglass, J. (2018). *InVEST User's Guide*. Disponible en http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-usersguide/INVEST_+VERSION+_Documentation.pdf