

Modelo de probabilidad de ocurrencia del caracol gigante africano (*Achatina fulica*) para Boyacá, Colombia

Occurrence Probability Model of the Giant African Snail (*Achatina fulica*) for Boyacá, Colombia

Edwin Fernando Sánchez Rojas ^{ad}, Maijdinayiver Mairán Gómez Cedeño ^{be}, María Alejandra Cárdenas Cárdenas ^{ce}
Luz Nidia Gil Padillab ^{bf}

^a Escuela de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

^b Unidad de Ecología en Sistemas Acuáticos, Escuela de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

^c Ecología de Bosques Andinos Colombianos, Escuela de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

^d edwinfernando.sanchez@uptc.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-5355-9065>

^e mgomez@corpoboyaca.gov.co | <https://orcid.org/0000-0003-1461-1083>

^f maria.cardenas02@uptc.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-6061-398X>

^g luznidia.gil@uptc.edu.co | <https://orcid.org/0000-0003-4664-2861>

Citation: Sánchez Rojas, E. F., Gómez Cedeño, M. M., Cárdenas Cárdenas, M. A., y Gil Padillab, L. N. (2024). Modelo de probabilidad de ocurrencia del caracol gigante africano (*Achatina fulica*) para Boyacá, Colombia. *Mutis*, 14(1). 1- 17. <https://doi.org/10.21789/22561498.1918>

Recibido: 6 de octubre de 2022

Aceptado: 4 de julio de 2023

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

La capacidad invasora y la historia natural de *Achatina fulica* (Linnaeus, 1758) posiciona esta especie como una de las 100 especies invasoras más peligrosas a nivel mundial. Su estudio ha trascendido los límites de la investigación biológica para complementarse con análisis de predicción de los comportamientos ecológicos y la influencia de los factores sociales y económicos. El objetivo de la investigación fue generar un modelo de probabilidad de ocurrencia para el caracol gigante africano, a escala espacial y temporal. Se recopilaron registros de presencia de la especie mediante información secundaria para el departamento de Boyacá; la información bioclimática se obtuvo a partir de la plataforma Worldclim, los indicadores sociales y económicos de cada localidad se extrajeron de la base de datos Terridata-DNP. La información se analizó por medio de software estadístico R Studio, mediante los paquetes ENMTML y ISLR. Para el modelamiento se utilizó el algoritmo de máxima entropía (Maxent); la validación del modelo se realizó con las métricas AUC, TSS, Kappa, Sorensen y Jaccard. Las variables bioclimáticas que más influyeron en el modelo de probabilidad de ocurrencia fueron temperatura, precipitación y humedad; así mismo, se determinó que las variables cobertura de acueducto y área deforestada están relacionadas estadísticamente en los municipios en donde se ha reportado la especie invasora en el departamento. En las condiciones actuales el caracol gigante africano, podría establecerse en aproximadamente 11.209,74 km²; es decir, en el 47,54% del territorio boyacense; bajo las condiciones socioeconómicas de la predicción futura, en el escenario SSP1 126 la especie podría ampliar su presencia hasta el 63.25% y en el escenario SSP4 585 al 50,42%, siendo este último el más caótico se encontró que la ocupación puede ser menor al primer escenario, pero la probabilidad de ocurrencia es más alta.

Palabras clave: especie invasora; invasiones biológicas; cambio climático; distribución; indicadores ambientales; ciencias naturales.

ABSTRACT

The invasive capacity and the natural history of the *Achatina fulica* (Linnaeus, 1758) has positioned it as one of the 100 most dangerous invasive species worldwide. Its study has transcended the limits of biological research and has been complemented with predictive analysis of ecological behaviors and the study of its social and economic influence factors. The objective of this research was to generate a probability of occurrence model for the giant African snail, at a spatial and temporal scale. Records of the appearance of the species were collected through secondary information from the department of Boyacá. Bioclimatic information was obtained from the Worldclim platform, and the social and economic indicators of each locality were extracted from the Terridata-DNP database. The information was analyzed using the R Studio statistical software, with ENMTML and ISLR packages. For the modeling, the maximum entropy algorithm (Maxent) was used; model validation was performed using the AUC, TSS, Kappa, Sorensen, and Jaccard metrics. The bioclimatic variables that most influenced the probability of occurrence model were temperature, precipitation and humidity. It was also determined that the variables aqueduct coverage and deforested area were statistically related in the municipalities where the invasive species has been reported in the department. Under current conditions, the giant African snail could establish itself in approximately 11,209.74 km, that is, in 47.54% of the Boyacá territory. Under the socioeconomic conditions of the future prediction, in the SSP1 126 scenario the species could increase its presence to 63.25% and in the SSP4 585 scenario to 50.42%. In the latter, the most chaotic scenario, it was found that although the occupation may be less than the first scenario, the probability of occurrence is higher.

Keywords: Invasive Species; Biological invasions; Climate change; Distribution; Environmental indicators; Natural sciences.

INTRODUCCIÓN

El caracol africano *Achatina fulica* ha desarrollado la capacidad de colonizar casi cualquier hábitat tropical o subtropical y desde la mitad del siglo xx se ha reportado su presencia en los cinco continentes (De La Ossa-Lacayo et al., 2012; Mead, 1961). En la mayoría de los casos esta especie ha sido causante de daños y pérdidas en plantaciones de interés agrícola, jardines y zonas verdes de las ciudades (Avenida y Linares, 2015; Liboria y Pino, 2009), además de su capacidad para transmitir parásitos como *Angiostrongylus cantonensis* y *Angiostrongylus costarricensis* (Albuquerque et al., 2008; INS, 2017; Liboria y Pino, 2009) causantes de graves enfermedades.

Su plasticidad ecológica lo convierte en un invasor de rápido crecimiento y dispersión. Estos animales se caracterizan por ser polípagos y consumir alrededor de 500 tipos diferentes de plantas, algas y líquenes también consume carroña y escombros, los cuales son fuente de calcio (De La Ossa-Lacay et al., 2012). La introducción intencional del caracol gigante africano en Suramérica se dio en Brasil para explotación por helicultura (cría de caracoles con fines comerciales), lo cual derivó en colapsos poblacionales sobre los países vecinos, generando peligro para las especies de

caracoles nativos por competencia de alimento y recursos (Avendaño y Linares, 2015). Adicionalmente, se ha convertido en plaga de distintos cultivos generando disminución en el retorno monetario (Maza, 2013) y pérdida de la seguridad-soberanía alimentaria. En Colombia esta especie se reportó desde el 2008 (Patiño y Giraldo, 2020) y ha logrado colonizar 27 de los 32 departamentos, incluido Boyacá, región en la cual se ha identificado la presencia de este invasor en nueve municipios (Corpoboyacá, 2019; Corpochivor, 2020).

Se ha demostrado una fuerte relación entre la presencia del caracol africano y las altas densidades de población humana, específicamente lugares con deficiente manejo de residuos sólidos, en los cuales la especie encuentra sitios para alimentación, refugio y anidación (De La Ossa-Lacayo et al., 2012; Gutiérrez-Bonilla, 2006; Roda et al., 2016). Por tanto, esta problemática ambiental trasciende los análisis bióticos, permitiendo reconocer variables transversales, tales como indicadores sociales, económicos e institucionales que inciden en la presencia de esta especie y que favorecen la dispersión a otros lugares con características similares, ampliando su rango de distribución y convirtiéndola en una especie invasora (Aguilera y Ortiz, 2020)

Patiño y Giraldo (2020) plantean que se requiere la interacción de distintas entidades a diferentes escalas que permitan la difusión de la información científica a las comunidades locales, integrando a los administradores del aparato estatal, la comunidad científica y la ciudadanía en aras de generar soluciones a la invasión del caracol gigante africano (Capdevila, 2013). Por eso, si se propone analizar esta problemática desde el contexto de los socio-ecosistemas mediante un modelo de probabilidad de ocurrencia de caracol gigante africano para el departamento de Boyacá, con aspectos sociales, económicos y biológicos que favorecen la dispersión de la especie (Raut y Barker, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en Colombia, en el departamento de Boyacá, el cual se encuentra ubicado en el altiplano cundiboyacense de la región andina, en el centro del país. Este departamento cuenta con una superficie aproximada de 23.189 km², posee 123 municipios con diversa topografía y clima; el 62% del territorio en climas de bajas temperaturas (frío a extremadamente frío); un 22% en climas medios (templados) y un 16% en climas cálidos (DNP, 2020). Las precipitaciones anuales oscilan entre 500 y 1000 mm por año y en el occidente del departamento aumentan entre 2000 y 4000 mm por año (Gobernación de Boyacá, 2017).

Registros de *A. fulica*

Para la construcción del modelo de probabilidad de ocurrencia se realizó la búsqueda de registros de presencia de *A. fulica* en diferentes bases de datos como Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Global Invasive Species Database (GISD) y el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SiB Colombia). Las series de datos se descargaron en el sistema de referencia de coordenadas (src) World Geodesic System wgs84. Posteriormente, fueron importados en el paquete ENMML en el programa R versión 3.6.3 (Team, 2019).

Información climática

El escenario actual se obtuvo teniendo en cuenta 19 variables obtenidas de la plataforma WorldClim (2020), la cual aportó una base de datos agrupada en capas climáticas para uso cartográfico y la generación del modelo. La temperatura se expresó en °C y la precipitación en milímetros.

Para la predicción futura de *A. fulica*, adicional a las variables bioclimáticas se tuvieron en cuenta cuatro escenarios de trayectorias socio-económicas compartidas (Tabla 1.) entendidas como “una descripción coherente, de un posible estado futuro a nivel global” (Carter et al, 1994) proyectadas hasta el 2100, las cuales buscan dar respuesta con supuestos de formas en las que evolucionara el mundo, teniendo en cuenta las asociaciones entre dimensiones socioeconómicas y la forma en la que puede tomar nuestro futuro climático para la especie.

Tabla 1. Trayectorias socioeconómicas compartidas.

SSP1 126	Sostenibilidad: tomar el camino verde (desafíos bajos para la mitigación y la adaptación).	<i>“El mundo cambia gradualmente, pero de forma generalizada, hacia un camino más sostenible, enfatizando un desarrollo más inclusivo que respeta los límites ambientales percibidos. Las inversiones en educación y salud aceleran la transición demográfica y el énfasis en el crecimiento económico se desplaza hacia el bienestar humano”. (Riahi, 2017; Van Vuuren, 2017).</i>
SSP2 245	Mitad del camino (desafíos medios para la mitigación y la adaptación).	<i>“El mundo sigue un camino en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas conservan los patrones históricos. Las instituciones trabajan lentamente para lograr los objetivos de desarrollo sostenible. Los sistemas ambientales experimentan degradación y la intensidad del uso de recursos y energía disminuye”. (Riahi et al, 2017; Fricko et al, 2017).</i>
SSP3 370	Rivalidad regional: un camino rocoso (grandes desafíos para la mitigación y la adaptación).	<i>“Disminuyen las inversiones en educación y desarrollo tecnológico. El desarrollo económico es lento, el consumo es intensivo en materiales y las desigualdades persisten. El crecimiento de la población es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo”. (Riahi et al, 2017; Fujimori et al, 2017).</i>
SSP4 585	Desigualdad: un camino dividido (desafíos bajos para la mitigación, desafíos altos para la adaptación).	<i>“Las diferencias en el capital humano, oportunidades económicas y poder político, conducen a la desigualdad entre los países. La cohesión social se degrada, los conflictos y los disturbios se hacen comunes. El sector energético globalmente se diversifica, con inversiones tanto en combustibles intensivos, como también en fuentes de energía bajas en carbono”. (Riahi et al, 2017; Calvin et al, 2017).</i>

Fuente: Adaptada de WorldClim (2020).

Modelado de probabilidad de ocurrencia

Se elaboró con el paquete ENMTML teniendo en cuenta 10 muestras válidas, con el fin de reducir la autocorrelación. Se utilizó el índice de Moran (Siabato y Guzmán-Manrique, 2019; Andrade y De Marco, 2020). Luego se usó el factor de Inflación de Varianza (VIF) para cuantificar la intensidad de la multicolinealidad en un análisis de regresión normal de mínimos cuadrados para el departamento de Boyacá.

El área utilizada para modelar el ajuste se delimitó mediante el método "Mask" en función de un polígono en donde están las ocurrencias de la especie, para lo cual fue necesario informar la ruta del archivo que se usó como máscara con el polígono del departamento (Andrade y De Marco, 2020). Se utilizó un buffer de 300 metros alrededor de los registros de presencia validados (Ortega Uribe, 2014).

El programa asignó falsas ausencias de la especie de forma aleatoria mediante RND, lo que corresponde a lugares con condiciones desfavorables para *A. Fulica*, lo que permitió generar la relación de presencia-ausencia, los valores de probabilidad de presencia de la especie oscilan entre 0 (sin probabilidad) y 1 (alta probabilidad), separando de forma binaria la idoneidad de las diferentes áreas; es decir, se identificaron los lugares de posible incidencia cuyos ambientes son similares a aquellos donde previamente se ha reportado la presencia de la especie (Vogler et al., 2013).

Se utilizó el Algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) (Phillips y Schapire, 2006), el cual fue seleccionado teniendo en cuenta que es un algoritmo de modelado de solo presencia, presenta mejor rendimiento respecto a otros métodos de modelado y su predicción es sólida porque se ve influenciado por tamaños de muestra pequeños (Sarma et al., 2015).

Validación del modelo

Para la validación del modelo de predicción de ocurrencia se realizó la evaluación del mapa de idoneidad generado por el algoritmo de Máxima Entropía, mediante cinco métricas de evaluación: Área bajo la curva (AUC), Coeficiente kappa de Cohen (KAPPA), True Skill Statistic (TSS), Índice de similitud de Jacard (Jacard) e Índice de similitud de Sorensen (Sorensen).

VARIABLES SOCIALES, ECONÓMICAS E INSTITUCIONALES

De los municipios con probabilidad de ocurrencia se excluyeron aquellos cuyas áreas de probabilidad no superaban el 20% de la superficie total del municipio y cuya información de variables sociales, económicas e institucionales se muestra incompleta, para un total de 24 municipios analizados con las 11 variables del portal gubernamental TerriData del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2020) relacionadas a en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables utilizadas para el análisis social, económico e institucional de los municipios con mayor probabilidad de ocurrencia de la especie.

Variables	Definición según Terridata (DNP, 2020)	Unidad de medida	Inclusión en el modelo
Densidad poblacional humana	Habitantes por kilómetro cuadrado de la entidad territorial.	Habitantes/Km ²	A mayor densidad de población humana, aumenta la cantidad de residuos que pueden ser utilizados por el caracol africano para su metabolismo.
Cobertura acueducto	Porcentaje de predios residenciales que tienen servicio de acueducto, del total de predios residenciales	Porcentaje (%)	Es necesario contar con acueducto para garantizar la cobertura de las necesidades básicas en salubridad.
Cobertura alcantarillado	Porcentaje de predios residenciales que tienen servicio de alcantarillado del total de predios residenciales.	Porcentaje (%)	Los predios residenciales que no tienen alcantarillado exponen a los habitantes a vivir en medio de los residuos y aumenta la disponibilidad de heces fecales como recurso de alimentación para el caracol africano.
Déficit cuantitativo de vivienda	Información censal del porcentaje de hogares que habitan en viviendas inadecuadas, mal construidas o en hacinamiento no mitigable, del total de hogares.	Porcentaje (%)	Las viviendas inadecuadas exponen a la sociedad a patógenos y enfermedades y son más susceptibles a la presencia del caracol africano.
Cobertura en educación	Porcentaje de alumnos matriculados en educación media del total de población que tiene entre 15 y 16 años.	Porcentaje (%)	La educación permite la difusión de información, conocimiento y manejo de la especie <i>A. fulica</i> .
Área deforestada	Área de la entidad territorial que ha sido deforestada.	Hectáreas (ha)	El área deforestada ofrece lugares de hábitat y refugio para el caracol africano.
Vulnerabilidad por cambio climático	Coficiente resultado de una amplia gama de factores, como las condiciones socioeconómicas en el caso de los sistemas humanos, en donde se relacionan sensibilidad y capacidad adaptativa como variables.	Unidades	Las acciones por el cambio climático de cada territorio mitigan los efectos de temperatura y las precipitaciones que favorecen la proliferación del caracol africano.
Total de UPA	Número total de Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) identificadas por el tercer Censo Nacional Agropecuario en la entidad territorial, indistintamente de su tamaño.	Unidades	Las UPA son unidades productivas vulnerables a la invasión del caracol africano.
Desempeño municipal y gestión	Componente de la Medición del Desempeño Municipal (MDM) que evalúa las acciones y/o decisiones que adelanta la administración local orientadas a alcanzar un mayor bienestar de la población y el desarrollo. El componente está compuesto por variables que son susceptibles de presentar cambios año a año, en las que se han evidenciado retos de desarrollo territorial y que permiten orientar política pública.	Puntos	Es necesario reconocer la capacidad institucional para resolver problemáticas ambientales.

Conflicto por sobreutilización del suelo	Área de la entidad territorial en la que los agroecosistemas predominantes hacen un aprovechamiento intenso de la base natural de recursos, sobrepasando su capacidad natural productiva.	Porcentaje (%)	La sobreutilización del suelo genera residuos y contaminación que favorece a las poblaciones de caracol africano.
Cobertura del Régimen Subsidiado en Salud	Porcentaje de población Sisbén validada en los niveles 1 y 2 afiliados al régimen subsidiado del Sistema General de Seguridad Social en Salud, del total de población Sisbén validada en los niveles 1 y 2.	Porcentaje (%)	El caracol africano genera problemas de salud y es necesario tener en cuenta la capacidad local de atención en temas de morbilidad.

Fuente: Adaptada de TerriData (2020).

Para analizar la influencia de las variables que se relacionan con la presencia de *A. fulica* en cada municipio, se realizó un Modelo de Regresión Logística, que permitió evaluar la probabilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno (Chitarroni, 2002). La variable dependiente dicotómica fue la presencia (1) o ausencia (0) de poblaciones de *A. fulica* y las características sociales e institucionales de cada municipio se incluyen como variables independientes.

Por medio del análisis de regresión logística, se buscó identificar de forma cuantitativa, los factores de índole social, económico o institucional que aumentan la vulnerabilidad de una localidad en un escenario de posible invasión. Este análisis estadístico se llevó a cabo con el programa R versión 3.6.3 (Team, 2019) con el paquete ISLR.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actualmente se registra la presencia de *A. fulica* en los municipios de Puerto Boyacá, Maripi, San Pablo de Borbur, San Eduardo, Miraflores, Páez, Berbeo (Corpoboyacá, 2019), San Luis de Gaceno y Santa María (Corpochivor, 2020). El modelo de probabilidad de ocurrencia evidencia en el escenario actual la probabilidad de ocurrencia de *A. fulica* en 42 municipios en el departamento de Boyacá, de los cuales 24 tienen mayor vulnerabilidad (>20% de invasión). Estos municipios se ubican en las provincias de Occidente, Ricaurte, Oriente, Neira, Lengupá, la Libertad, Valderrama, el distrito fronterizo de Cubará y la Zona de Manejo especial de Puerto Boyacá (Tabla 3).

Tabla 3. Municipios de Boyacá con probabilidad de ocurrencia de *A. fulica*.

Nº	Municipio	Temperatura promedio (°C)	Precipitación media anual (mm)	Presencia caracol
1	Campohermoso	23	2453	No
2	Coper	21,7	2591	No
3	Cubará	26	2920	No
4	La Victoria	23,4	3020	No
5	Labranzagrande	22,8	2309	No
6	Macanal	21	2177	No
7	Muzo	26	3152	No
8	Otanche	24	2562	No
9	Pajarito	24	4088	No
10	Pauna	20	2720	No
11	Paya	22,7	3229	No
12	Quipama	21	3000	No
13	Santana	20	2799	No
14	Soatá	20	1691	No
15	Tununguá	26	2660	No
16	Berbeo	23	4925	Si
17	Maripí	21	2500	Si
18	Miraflores	24	2000	Si
19	Páez	23	3500	Si
20	Puerto Boyacá	28	2369	Si
21	San Eduardo	20	2000	Si
22	San Luis de Gaceno	28	3994	Si
23	San Pablo de Borbur	26,2	2677	Si
24	Santa María	24	4282	Si

Fuente: Elaboración propia.

En Boyacá existen localidades cuyas temperaturas promedio son superiores a los 20° C y junto con la estacionalidad de la temperatura, permite que las poblaciones de *A. fulica* se mantengan en vida activa; sin que las fluctuaciones en las condiciones ambientales lo induzcan a entrar en periodos de latencia como la estivación o la hibernación (Liboria y Pino, 2009).

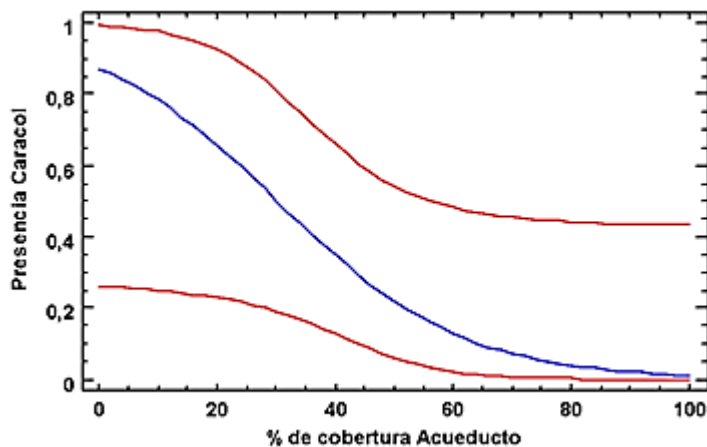
Las áreas de probabilidad de ocurrencia de *A. fulica* se encuentran ubicadas en distintos ecosistemas principalmente de clima cálido y templado. De esta manera el occidente de Boyacá, donde se identificaron las zonas más vulnerables en términos de crecimiento poblacional de la especie invasora, se ubica un piso biotérmico cálido, localizado en la zona media de la

cuenca del río Magdalena y en áreas de piedemonte llanero; la altitud oscila entre el nivel del mar y los 1000 msnm, con temperaturas superiores a 24° centígrados. En estas zonas se encuentran formaciones vegetales de bosque Premontano Bajo y bosque Andino; se destaca la Reserva Natural Serranía de las Quinchas y alta biodiversidad característica de los humedales aledaños a las cuencas hídricas. De igual forma en las provincias de Lengupá, La Libertad y en la subregión del Valle de Tenza, entre los 1000 y 2000 metros de altitud con temperaturas que oscilan entre los 18° y 24° centígrados se encuentra el piso biotérmico templado que corresponde a zonas geográficas ubicadas a la falda de la cordillera oriental; se mostró alta probabilidad de ocurrencia de la especie.

De acuerdo con los resultados del modelo de probabilidad de ocurrencia las variables bioclimáticas que más influyen en análisis fueron Bio 2 (rango diurno promedio), Bio 3 (isoterma), Bio 4 (estacionalidad de la temperatura), Bio 6 (temperatura mínima del mes más frío), Bio 15 (estacionalidad de la precipitación), Bio 18 (precipitación del trimestre más cálido) y Bio 19 (precipitación del trimestre más cálido). Lo anterior guarda relación con el estudio realizado por Vogler et al., (2013) en Suramérica, en donde se encontró que las variables determinantes para la presencia de *A. fulica* fueron Bio 4 (estacionalidad de la temperatura) y Bio 11 (temperatura media del cuarto más frío).

Por otra parte, se determinó mediante el análisis de regresión logística que los factores socioeconómicos que representan mayor riesgo y guardan relación estadística con los 24 municipios que superan el 20% de área invadida, son las variables cobertura de acueducto (Figura 1) y área deforestada (Figura 2).

Figura 1. Análisis de regresión logística para la variable Cobertura de acueducto.



Fuente: Elaboración propia.

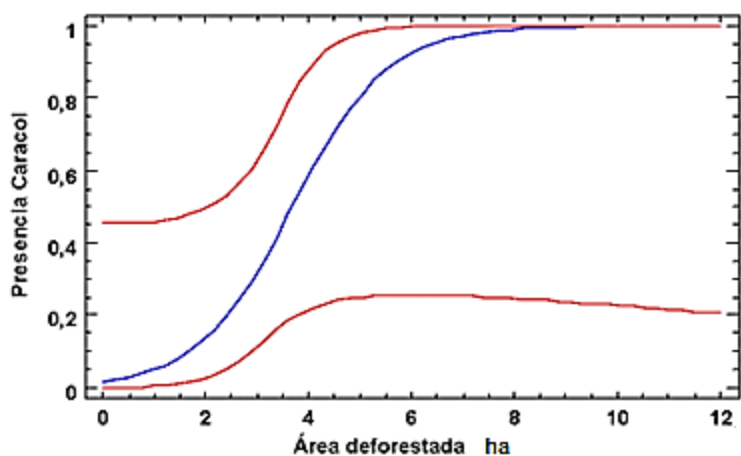
La regresión logística permitió identificar que los municipios con coberturas de acueducto (Figura 1.) inferiores al 40% presentan una mayor probabilidad de relación con la presencia de *A. Fulica* (Chi Cuadrado= 5,39954; valor $p = 0,0201$; $gl=1$). El agua potable sometida a tratamiento correspondiente es de vital importancia para garantizar la inocuidad de los alimentos, principalmente frutas frescas y vegetales. En los lugares en donde se reporta la presencia del caracol gigante africano se debe prestar especial atención a los alimentos que pueden estar en contacto con las secreciones o caracoles en estadios juveniles que pueden ser ingeridos accidentalmente, en los cuales pueden estar contenidas larvas de *Toxocara sp.*, *Blastocystis sp.*, *Strongyloides sp.*, *Giardia sp.* *A. cantonensis* y *A. costaricensis* (INS, 2017).

Para la variable cobertura de alcantarillado, las implicaciones de salubridad que representa esta deficiencia se relacionan directamente con la disposición al aire libre de heces fecales de caninos y humanos (Albuquerque et al., 2009), las cuales hacen parte de las preferencias alimenticias del caracol gigante africano (Gołdyn et al., 2017). Bajo este indicador se recomienda fortalecer los sistemas de higiene y saneamiento en las instituciones educativas y en los centros

hospitalarios como medida prioritaria que permita reducir los índices de contagio de enfermedades durante las jornadas escolares o en el tiempo de atención médica (UN-WATER, 2020).

Albuquerque y colaboradores (2009) plantean que el establecimiento y crecimiento poblacional de *A.fulica* inciden distintos factores ambientales como la temperatura y la humedad, asociados a otras variables como la presencia de asentamientos humanos urbanos, las áreas deforestadas o transformadas. En Boyacá, las áreas deforestadas están directamente relacionadas con la probabilidad de ocurrencia de la especie invasora (Chi Cuadrado= 7,50354; valor $p = 0,0062$; $gl=1$); de acuerdo con el modelo, la presencia de *A. fulica* está ligada a los municipios en donde se presentan mayores índices de deforestación (Figura 2).

Figura 2. Análisis de regresión logística para la variable Área deforestada.



Fuente: Elaboración propia.

En Colombia se presentan tasas de deforestación cercanas al 0.64 % anual y en algunas regiones puede ser mayor (Armenteras y Vargas, 2016). La deforestación tiene múltiples orígenes que van desde labores agropecuarias o de explotación de recursos naturales, proyectos minero-energéticos o fines ilícitos, los cuales en su mayoría desembocan en la pérdida de conectividad ecológica y rompimiento de las interacciones establecidas entre los componentes de cada ecosistema. Adicionalmente, este tipo de disturbios generan nuevas interrelaciones bióticas y abióticas que afectan directamente el proceso de circulación de la materia y la energía (Armenteras y Vargas, 2016), teniendo en cuenta que *A.fulica* prefiere hábitats transformados o deforestados con presencia de núcleos humanos urbanos en donde puede encontrar desechos orgánicos e inorgánicos que favorecen su establecimiento y la dispersión poblacional (Thiengo et al., 2007) (Gołdyn et al., 2017). En las localidades objeto de estudio se evidencia deforestación, generando espacios con características biofísicas que aumentan la vulnerabilidad de invasión.

Desde el punto de vista socioeconómico, variables como la densidad de población humana, el déficit cuantitativo de vivienda y la cobertura de alcantarillado, favorecen la dispersión de las poblaciones de la especie invasora, así en la regresión logística estas variables no fueran estadísticamente significativas. El incremento en la densidad de población humana se correlaciona con un aumento en los residuos sólidos que se producen, los cuales sirven de refugio, ofrecen lugares para anidación, alimentación y en muchos casos los escombros y residuos de construcción sirven como fuente de carbonato de calcio, necesario para la elaboración de las conchas (Albuquerque et al., 2009). De acuerdo con la preferencia de *A. fulica* por lugares con acumulación de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos (Albuquerque et al., 2008), el saneamiento básico debe incluir una gestión adecuada de los residuos sólidos domiciliarios, lo cual en un escenario de invasión por caracol gigante africano permite reducir la oferta alimenticia disponible en calles, andenes, zonas verdes y espacios abiertos de las áreas urbanas. Adicionalmente, a nivel departamental se debe prestar atención a los lugares de disposición final de

residuos, como son los rellenos sanitarios o botaderos de basura municipales encontrados en Puerto Boyacá, Páez, Santana, Coper, La Victoria, Maripi, Muzo, Otanche, Pauna, Quípama, San Pablo de Borbur y Tununguá (Corpoboyacá, 2020); convirtiéndose en una variable de gran importancia para el manejo y la prevención de invasión de *A. fulica* (Siabato y Guzmán, 2019).

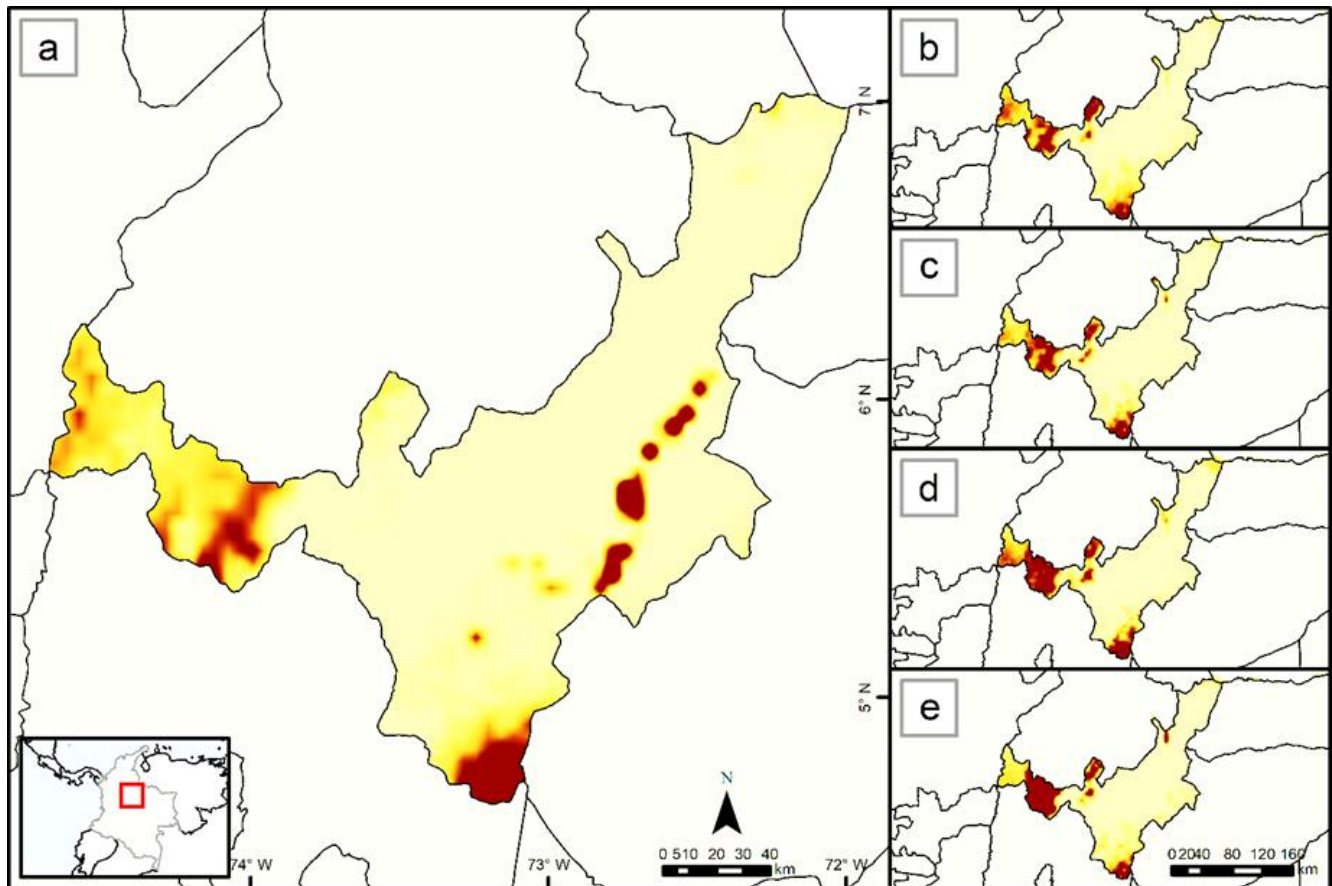
Las especies invasoras se pueden ver favorecidas por los impactos del cambio climático, ya que las áreas invadidas se mantienen o aumentan. Según los resultados, que se observan en la Tabla 4, en las condiciones actuales el caracol gigante africano podría establecerse en aproximadamente 11.209,74 km; es decir, en el 47,54% del territorio boyacense. Bajo las condiciones socioeconómicas del escenario ssp1 126l, la especie podría ampliar su presencia hasta 63.25% del área del departamento y en el escenario ssp4 585 correspondería a un 50,42% del área territorial; sin embargo, en el modelo (Figura 3) se evidencia que, aunque las áreas de ocupación sean menores la probabilidad de ocurrencia es más alta.

Tabla 4. Áreas de probabilidad de ocurrencia para Boyacá, para cuatro vías socioeconómicas compartidas (SSP): 126, 245, 370 y 585.

Tiempo	Vías Socioeconómicas Compartidas (ssp)	Probabilidad de ocurrencia	Área (Km ²)	% de área del departamento de Boyacá con probabilidad de ocurrencia
Presente	Actualidad	Ausente	12.289,99	-
		Presente	11.209,74	47,54
2100	126	Ausente	8.666,01	-
		Presente	14.913,67	63,25
2100	245	Ausente	13.385,11	-
		Presente	10.194,57	43,23
2100	370	Ausente	12.544,68	-
		Presente	11.035,00	46,80
2100	585	Ausente	11.579,07	-
		Presente	11.773,52	50,42

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Probabilidad de ocurrencia de *A. fulica* para Boyacá, el recuadro (a) corresponde al escenario actual. Las letras indican la escala de la catástrofe en términos de las Vías Socioeconómicas Compartidas (b) es el escenario más pacífico y (e) el más caótico.



Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo actual de probabilidad de ocurrencia se obtuvo un índice de Moran de 0.592. Esto representa una autocorrelación espacial positiva. Los registros se agruparon en conglomerados de puntos geográficos, se redujo la autocorrelación de los datos de ocurrencia de *A. fulica*, para disminuir el sesgo y que los reportes correspondan a un único registro de ocurrencia de la especie. En Boyacá, la objetividad en la representación de las áreas de ocurrencia está ceñida a las métricas utilizadas para el ajuste del modelo (Tabla 4). La función AUC (área bajo la curva) obtuvo valores en el escenario presente de 0.8905 y de 0.9089 para el escenario más caótico; los valores superiores a 0.5 indican una mayor validez de los puntos de presencia y falsas ausencias de la especie Andrade y De Marco (2020) Vogler et al. (2013) expresaron valores de AUC de 0.944 en la probabilidad de ocurrencia de *A. fulica* en Suramérica. Sin embargo, dadas sus propiedades matemáticas, esta métrica se recomienda para la obtención de información general de distribución de una única especie en un rango de condiciones ambientales (Lobo y Real, 2008).

Tabla 4. Métricas para la evaluación del modelo de probabilidad de ocurrencia.

Tiempo	Vías Socioeconómicas Compartidas (ssp)	AUC	KAPPA	TSS	JACCARD	SORENSEN
Presente	Actual (a)	0.8905	0.1219	0.1219	0.5325	0.6949
2100	126 (b)	0.9122	0.2560	0.2560	0.5741	0.7292
2100	245 (c)	0.9152	0.1463	0.1463	0.5398	0.7010
2100	370 (d)	0.9274	0.2804	0.2804	0.5882	0.7387
2100	585 (e)	0.9089	0.1707	0.1707	0.5470	0.7071

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el modelo predictivo, se observa mayor ocurrencia de la especie en territorios con actividad agraria dedicados a la producción de caña de azúcar, café, bananos, cacao, guanábana, diversidad de cítricos, algunos tubérculos de importancia gastronómica, tomate, legumbres de clima cálido, entre otros, los cuales se verán invadidos por la presencia del caracol gigante africano, generando afectaciones fitopatológicas por el incremento de virus y bacterias que desencadenarán en el aumento de los costos de producción (Gobernación de Boyacá, 2017), generando pérdidas de carácter social y económico para la alimentación y la sustentabilidad de las comunidades.

CONCLUSIONES

En el departamento de Boyacá el 47,7% del territorio presenta características bióticas (cobertura vegetal, sinergias ecológicas, patrones bioclimáticos) y abióticas (temperaturas superiores a 20 °C, precipitaciones frecuentes, humedad relativa superior al 60%) que favorecen el establecimiento de poblaciones de *A. fulica* (Vuille, 2000). Por tanto, la temperatura, la precipitación y la humedad son trascendentales en la presencia del caracol gigante africano y, en escenarios de cambio climático acorde con las proyecciones de las vías socioeconómicas compartidas para el año 2100, la especie presenta aumento en las áreas susceptibles de invasión para el escenario ssp1 126, y en el escenario ssp4 585 se presentan menores áreas de ocupación, pero la probabilidad de ocurrencia es más alta.

La proliferación del caracol gigante africano en el territorio boyacense está relacionada con deficiencias en el sistema de manejo de residuos sólidos, insuficiencia en la prestación de servicios de saneamiento básico y limitaciones en la comunicación y la apropiación social de la problemática.

Los resultados del modelo de probabilidad de ocurrencia se convierten en un mecanismo de alerta temprana que permite identificar áreas de atención prioritaria, sobre las cuales deben dirigirse las políticas para el manejo y prevención de la especie invasora; adicionalmente, permite realizar cercos epidemiológicos preventivos relacionados con la infección por parásitos transmitidos por el caracol.

En áreas de importancia para la conservación como la Serranía de las Quinchas, las zonas de Reserva de la sociedad civil, los Distritos de Manejo Integrado y los Parques

Naturales Regionales ubicados dentro del área de probabilidad de ocurrencia de *A. fulica*, deben gozar de especial atención por parte de las entidades encargadas de la administración de los recursos naturales, con el fin evitar procesos de deforestación, que generan pérdida de la conectividad ecológica, y dan apertura a nichos vacantes que pueden ser aprovechados por las especies exóticas para establecerse y eventualmente transformarse en especies invasoras.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a los municipios con presencia de *A. fulica* (Puerto Boyacá, Maripe, San Pablo de Borbur, San Eduardo, Miraflores, Páez, Berbeo, San Luis de Gaceno y Santa María) generar estrategias institucionales encaminadas a fortalecer el saneamiento básico de la población y la gestión integral de residuos sólidos, así como los municipios de Campohermoso, Coper, La Victoria, Macanal, Muzo, Otanche, Pajarito, Pauna, Quipama, Santana y Tununguá, que, por los indicadores estudiados, se encuentran en alto riesgo de invasión.

Se sugiere implementar un sistema de monitoreo en tiempo real que permita reportar la presencia de *A. fulica* por los habitantes del territorio, para tomar medidas de alerta temprana que permitan controlar la dispersión de la especie.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo académico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a la Corporación Autónoma Regional de Boyacá Corpoboyacá y a cada uno de los investigadores y compañeros que hicieron posible la realización de la presente investigación.

REFERENCIAS

- Albuquerque, F. S. de, Peso-Aguiar, M. C. & Assunção-Albuquerque, M. J. T. (2008). Distribution, feeding behavior and control strategies of the exotic land snail *Achatina fulica* (Gastropoda: Pulmonata) in the northeast of Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4), 837–842. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000400020>
- Albuquerque, F. S. de, Peso-Aguiar, M. C., Assunção-Albuquerque, M. J. T. & Gálvez, L. (2009). Do climate variables and human density affect *Achatina fulica* (Bowditch) (Gastropoda: Pulmonata) shell length, total weight and condition factor. *Brazilian Journal of Biology*, 69(3), 879–885. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842009000400016>
- Aguilera Arango, G. A. y Ortiz Cabrera, J. C. (2020). Distribución geográfica del caracol gigante africano en predios agrícolas del Valle del Cauca, Colombia. *Centro Agrícola*, 47(1), 5-12.
- Andrade, A. F. A. de, Velazco, S. J. E. & De Marco Júnior, P. (2020). ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. *Environmental Modelling and Software*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>

- Armenteras, D., Vargas, O. y Vargas, O. (2016). patrones del paisaje y escenarios de restauración en Colombia: Acercando escalas. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1Supl), 229–239. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1Supl.50848>
- Avendaño, J. M. y Linares, E. L. (2015). Morfometría del caracol gigante africano *Achatina fulica* (Gastropoda: Achatinidae) en Colombia. *Cuadernos de Investigación UNED*, 7(2), 287–293. <https://doi.org/10.22458/urj.v7i2.1155>
- Gobernación de Boyacá (2017). *Productividad sector agropecuario OTDB-Ordenamiento Territorial Departamental de Boyacá*.
- Calvin, K. et al. (2017). «The SSP4: A world of deepening inequality». *Global Environmental Change*, 42, 284-296. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.010>
- Carter, T., Parry, M., Harasawa, H. & Nishioka, S. (1994). IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. In *Part of the IPCC Special Report to the First Session of the Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change. Department of Geography, University College London, UK and Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan.
- Capdevila-Argüelles, L., Zilletti, B. y Suárez-Álvarez, V. Á. (2013). Causas de la pérdida de biodiversidad: Especies Exóticas Invasoras. *Memorias Real Sociedad Española de Historia Natural*. 2a. Época, 10.
- Chitarroni, H. (2002). La regresión logística. Instituto de Investigación. *Ciencias Sociales*, 10. <https://racimo.usal.edu.ar/83/1/Chitarroni17.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá, Corpoboyacá. (2019). *Corporación Autónoma Regional de Boyacá Plan de Acción 2016-2019. Informe de Gestión*.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá, Corpoboyacá (2020). *Diagnóstico, evaluación del estado actual y diseño de estrategias de control del caracol africano Achatina fulica (Bowdich, 1822) en las provincias de Lengupa y Occidente, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá*. 25.
- Corpochivor. (2020). *Especies invasoras con medidas de prevención, control y manejo en ejecución. Especies Invasoras Con Medidas de Prevención, Control y Manejo En Ejecución*. <https://www.corpochivor.gov.co/indicadores-web/1166/evaluacion>
- De La Ossa-Lacayo (2012). Registro del caracol africano gigante *Achatina fulica* (Bowdich 1822) (Mollusca: Gastropoda-Achatinidae) en Sincelejo, costa Caribe de Colombia. *Biota colombiana*, 13(2).
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2020). Terridata-DNP. Conjunto de Datos Territoriales Terridata. <https://terridata.dnp.gov.co/>

- Fricko, O. et al. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251-267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>
- Fujimori, S. et al. (2017). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
- Gołdyn, B., Kaczmarek, Ł., Roszkowska, M., Guayasamín, P. R., Książkiewicz-Parulska, Z. & Cerda, H. (2017). Urban ecology of invasive giant african snail *Achatina fulica* (féruissac)(gastropoda: achatinidae) on its first recorded sites in the Ecuadorian Amazon. *American Malacological Bulletin*, 35(1), 59-64. <https://doi.org/10.4003/006.035.0108>
- Instituto Nacional de Salud. Grupo de evaluación de riesgos en inocuidad de alimentos (ERIA) y plaguicidas (2017). *Concepto científico sobre consumo de caracol gigante africano y su implicación en salud*.
- Liboria, M., Morales, G., Sierra, C., Silva, I. y Pino, L. A. (2009). El caracol gigante africano *Achatina fulica*. *INIA Hoy*, 2, 224-231.
- Lobo, J. M., Jiménez-valverde, A. & Real, R. (2008). AUC: A misleading measure of the performance of predictive distribution AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2). <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>
- Maza Maza, J. E. (2013). Efecto de los extractos botánicos para el control del caracol (*Achatina fulica*) en el cultivo de arroz (oriza sativa).
- Ortega Uribe, T., Mastrangelo, M. E., Villaruel Torrez, D., Piaz, A. G., Vallejos, M., Saenz Ceja, J. E., Gallego, F., Franquesa Soler, M., Calzada Peña, L. y Espinosa Mellado, N. (2014). Estudios transdisciplinarios en iosistemas: Reflexiones teóricas y su aplicación en contextos latinoamericanos.
- Patiño Montoya, A. y Giraldo, A. (2020). Diez años del caracol gigante africano en Colombia: Revisión de la investigación y divulgación desarrollada entre 2008-2017. *Ecología austral*, 30(1), 125-133. <https://doi.org/10.25260/EA.20.30.1.0.973>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Raut, S. & Barker, G. (2002). *Achatina fulica* Bowdich and Other Achatinidae as Pests in *Molluscs as Crop Pests*, 55. <https://doi.org/10.1079/9780851993201.0055>
- Riahi, K.; van Vuuren, D. P.; Kriegler, E.; Edmonds, J.; O'Neill, B. C.; Fujimori, S.; Bauer, N.; Calvin, K. et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42:153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Sánchez Rojas, E. F., Gómez Cedeño, M. M., Cárdenas Cárdenas, M. A., y Gil Padillab, L. N. (2024). <https://doi.org/10.21789/22561498.1918>

- Sarma, R. R., Munsu, M., & Ananthram, A. N. (2015). Effect of climate change on invasion risk of giant African snail (*Achatina fulica* Féussac, 1821: Achatinidae) in India. *PLoS One*, *10*(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143724>
- Siabato, W. & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *28*(1), 1–22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Team, R. C. (2019). *2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- UN-WATER. (2020). *Agua, Saneamiento e Higiene*. <https://www.unwater.org/water-facts/water-sanitation-and-hygiene/>
- Van Vuuren, D. P. et al. (2017). Energy, land-use, and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, *42*, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>
- Vogler, R. E., Beltramino, A. A., Sede, M. M., Gregoric, D. E. G., Núñez, V. & Rumi, A. (2013). The giant African snail, *Achatina fulica* (Gastropoda: Achatinidae): Using bioclimatic models to identify South American areas susceptible to invasion. *American Malacological Bulletin*, *31*(1), 39–50. <https://doi.org/10.4003/006.031.0115>
- Vuille, M. & Bradley, R. S. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, *27*(23), 3885–3888. <https://doi.org/10.1029/2000GL011871>
- WorldClim. (2020). *WorldClim. Bioclimatic Data Base*. <https://www.worldclim.org/data/index.html#>