

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE
MÉXICO

Simulación en *NetLogo* de la dinámica poblacional de leones
africanos mediante modelos basados en agentes

Javier Pérez Ramírez

Asesor:
Fernando Ramírez Alatríste

2 de noviembre de 2025

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos

La culminación de este trabajo de investigación representa un hito significativo en mi trayectoria académica. Este logro no hubiera sido posible sin el apoyo y la colaboración de numerosas personas a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, quiero expresar mi profunda gratitud a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en un ambiente académico enriquecedor y estimulante. La calidad de la formación recibida y los recursos puestos a mi disposición han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por otorgarme la beca que me permitió dedicarme por completo a esta investigación. Su apoyo financiero ha sido de vital importancia para llevar a cabo este proyecto y alcanzar mis objetivos académicos.

A mis padres, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente en todas mis decisiones, les dedico este logro. Su amor, paciencia y sabiduría han sido mi guía a lo largo de toda mi vida. Gracias por inculcar en mí el valor del esfuerzo y la perseverancia.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis profesores, quienes con su conocimiento y pasión por la enseñanza me inspiraron a seguir una carrera académica. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi formación y me han proporcionado las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis, el Doctor Fernando Ramírez Alatríste, por su invaluable orientación y apoyo durante todo el proceso de investigación. Su paciencia, conocimiento y entusiasmo han sido fundamentales para el éxito de este trabajo. Su guía me ha permitido desarrollar mis habilidades de investigación y me ha motivado a alcanzar mis objetivos.

De igual manera, quiero expresar mi gratitud a mis sinodales: la Doctora Silvia Castellanos Castro, el Maestro en Ciencias José Luis Gutiérrez Sánchez y el Doctor Jorge Fernando Camacho Pérez, por el tiempo y dedicación que brindaron a la revisión de este trabajo. Sus valiosas aportaciones, observaciones y sugerencias enriquecieron significativamente el contenido de esta tesis y me permitieron fortalecerla con una visión más amplia y rigurosa.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo por la dedicación, el esfuerzo y la perseverancia que he demostrado a lo largo de este proceso. He enfrentado numerosos desafíos, pero gracias a mi determinación he logrado superar cada obstáculo. Este logro

4

es un testimonio de mi capacidad para alcanzar mis metas.
A todos ustedes, muchas gracias.

Resumen

Este trabajo de investigación se centra en comprender y abordar la problemática del declive de las poblaciones de leones, una situación que se suscita actualmente en varios países de África oriental y meridional, como Kenia, Tanzania, Botsuana y Zimbabue, así como en algunas regiones de África occidental. A través de un enfoque interdisciplinario, se ha explorado la dinámica poblacional de esta especie emblemática, considerando factores ecológicos y sociales. Este modelo basado en agentes (*ABM*, por sus siglas en inglés), ofrece una perspectiva novedosa para la modelación ecológica de grandes felinos.

En primer lugar, se realizó una revisión amplia de la literatura científica existente sobre la biología y ecología de los leones, así como sobre las principales amenazas que enfrentan estas poblaciones. Esta revisión permitió identificar los principales factores que contribuyen a su declive, como la pérdida y fragmentación de hábitat, los conflictos con humanos y los cambios en las comunidades de presas.

Posteriormente, se desarrolló un modelo computacional, específicamente un *ABM*, para simular la dinámica poblacional de los leones bajo diferentes escenarios. Estos modelos permitieron explorar factores como la territorialidad, la dispersión, la mortalidad y la natalidad que interactúan para influir en el crecimiento y la persistencia de las poblaciones. Además, se integraron datos espaciales sobre la presencia humana para evaluar el impacto de este factor en la dinámica poblacional.

Los resultados de los modelos mostraron que la fragmentación del hábitat, la pérdida de presas y los conflictos con humanos son los principales factores que impulsan el declive de las poblaciones de leones. Asimismo, se identificaron áreas críticas para la conservación de la especie, así como las estrategias de manejo más efectivas para mitigar las amenazas y promover la recuperación de las poblaciones.

Finalmente, se propone una serie de recomendaciones para la conservación de los leones, basadas en los resultados de esta investigación. Estas recomendaciones incluyen la creación de corredores biológicos para conectar poblaciones fragmentadas, la implementación de medidas para reducir los conflictos con humanos, como la compensación por pérdidas de ganado y la promoción de prácticas de manejo sostenible, y el fortalecimiento de las áreas protegidas existentes. Además, se enfatiza la importancia de involucrar a las comunidades locales en los esfuerzos de conservación y de promover la educación ambiental para generar conciencia sobre la importancia de los leones y la necesidad de protegerlos.

Este trabajo de investigación ha proporcionado una visión integral de los desafíos

que enfrenta la conservación de los leones y ha identificado una serie de estrategias para abordar estos desafíos. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de un enfoque multidisciplinario que combine el estudio ecológico tradicional con herramientas de modelación computacional para comprender y gestionar sistemas complejos como las poblaciones de grandes carnívoros.

Índice de figuras

3.1. Mapa actual del Parque Nacional Serengeti	34
3.2. Mapa usado como representación del Parque Nacional Serengeti	35
3.3. Interacciones entre leones, humanos y el entorno.	40
4.1. Captura de pantalla de la interfaz del modelo de simulación desarrollado en <i>NetLogo</i> . Se muestran los controles principales, los parámetros ajustables, las gráficas de resultados y los contadores de estado de los agentes.	49
4.2. Población total de machos y hembras a lo largo del tiempo.	51
4.3. Población de machos en el tiempo.	52
4.4. Población de hembras en el tiempo.	52
4.5. Muertes por encuentros territoriales.	55
4.6. Muertes por inanición en machos nómadas y sedentarios.	57
4.7. Muertes por inanición en cachorros y jóvenes.	57
4.8. Muertes por inanición.	58
4.9. Muertes por humanos e infanticidios.	59
4.10. Acumulación de muertes por edad en hembras.	60
4.11. Matriz de correlaciones de las variables.	63

Índice de cuadros

2.1. Estadísticas de conflictos humano-león en el noroeste de Zimbabwe (2008–2013), con base en Loveridge et al. (2015).	23
3.1. Valores de variables biológicas en leones	45
4.2. Tabla de parámetros del modelo	48

Índice general

Agradecimientos	3
Resumen	5
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	9
1. Introducción	13
1.1. Hipótesis	16
1.2. El propósito de la investigación	17
1.3. Metodología	17
1.4. Plan de la obra	18
2. Teorías y modelos de dinámica poblacional	21
2.1. Marco teórico	21
2.1.1. Introducción al marco teórico	21
2.1.2. Ecología del león	21
2.1.3. Fundamentos de los ABM	23
2.1.4. Aplicaciones previas	24
2.1.5. Dinámica poblacional de los leones	24
2.1.6. Estrategias de conservación	26
2.1.7. Conclusión del marco teórico	28
3. Desarrollo del modelo en <i>NetLogo</i>	31
3.1. Descripción del modelo de simulación (ODD)	32
3.1.1. Visión general	32
3.1.2. Procesos y programación	35
3.1.3. Conceptos de diseño	39
3.1.4. Detalles del modelo	41
3.1.5. Conclusiones y posibles extensiones	44
3.1.6. Resultados esperados	44
3.1.7. Relevancia	44
3.2. Validación del modelo	45

4. Resultados y discusión	47
4.1. Gráficas	49
4.1.1. Total de individuos en el tiempo	49
4.1.2. Muertes por encuentros territoriales	53
4.1.3. Muertes por inanición	55
4.1.4. Muertes causadas por humanos e infanticidios	56
4.1.5. Muertes por edad en hembras	60
4.1.6. Correlaciones	62
4.2. Potencial de la detección temprana	65
5. Conclusiones	67
5.1. Síntesis de los resultados	67
5.2. Aportaciones del modelo desarrollado	67
5.3. Implicaciones para la conservación	68
5.4. Líneas futuras de investigación	68
5.4.1. Integración avanzada de datos geoespaciales y ambientales	68
5.4.2. Refinamiento de mecanismos comportamentales y demográficos internos	69
5.4.3. Calibración y validación del modelo con expertos	70
5.4.4. Ampliación del alcance y aplicabilidad del modelo	70
5.4.5. Exploración de dinámicas espaciales variables	71
5.4.6. Análisis de políticas de reinserción de especies	71
5.4.7. Consideraciones computacionales para la precisión extrema	71
5.5. Autoorganización y estructura social de las manadas	72
5.6. Originalidad y contribución del modelo desarrollado	73
Apéndice A	75
Glosario	91
Bibliografía	98

Capítulo 1

Introducción

El león (*Panthera leo*) es uno de los depredadores más icónicos de las sabanas africanas, ocupando un lugar central en la cadena alimenticia y desempeñando un papel crucial en la estabilidad de los ecosistemas en los que habita Bauer et al. (2015b). Su función como máximo depredador es fundamental para mantener el equilibrio ecológico, regulando las poblaciones de presas y actuando como reguladores del ecosistema al modificar el entorno a través de sus interacciones. Sin embargo, la situación de los leones es alarmante: en las últimas décadas, las poblaciones han disminuido drásticamente, afectadas por una combinación de factores naturales y antropogénicos que han alterado significativamente su dinámica poblacional; por ejemplo, en el Parque Nacional Kafue de Zambia, la población de leones es extremadamente baja, con apenas 3.43 individuos por cada 100 km^2 . Esto, combinado con la baja tasa de supervivencia de cachorros, indica una disminución significativa de la población y de recursos disponibles Vinks et al. (2024).

Para comprender la gravedad de la disminución de las poblaciones de leones, es fundamental establecer un punto de referencia. Estudios a largo plazo en ecosistemas africanos relativamente inalterados sugieren que una densidad poblacional viable de leones puede variar entre 5 y 15 individuos por cada 100 km^2 , dependiendo de la disponibilidad de presas y la extensión del territorio. Por ejemplo, en el Parque Nacional Serengeti —considerado uno de los ecosistemas más óptimo de África— se han registrado densidades de hasta 10 leones por cada 100 km^2 durante períodos de alta productividad, entendida como fases en las que la abundancia de presas herbívoras es elevada gracias a condiciones ambientales favorables (como lluvias regulares y disponibilidad de pastizales). En contraste, la densidad de 3.43 individuos por cada 100 km^2 en el Parque Nacional Kafue de Zambia, como mencionamos anteriormente, representa una disminución drástica y una clara señal de que esta población se encuentra muy por debajo de lo considerado viable. Esta escasez de leones tiene implicaciones significativas para la estructura y función del ecosistema, afectando no solo a las poblaciones de presas sino también a la dinámica general de las interacciones ecológicas Nowell and Packer (2002); Packer et al. (2013).

La pérdida de hábitat es una de las principales amenazas que enfrenta la especie. La

expansión agrícola y urbana ha fragmentado los territorios tradicionales de los leones, reduciendo sus rangos de hogar y limitando su acceso a recursos vitales, como presas y fuentes de agua. Esta fragmentación del hábitat no solo disminuye las posibilidades de supervivencia individual, sino que también afecta las dinámicas poblacionales al aislar grupos y reducir la diversidad genética. Además, los conflictos con los humanos han exacerbado la situación. Los ataques de leones al ganado son frecuentes en áreas donde sus hábitats naturales se superponen con zonas rurales, lo que a menudo resulta en represalias por parte de los ganaderos, disminuyendo aún más las poblaciones de leones Bauer et al. (2015b).

Comprender la complejidad de estos desafíos exige un enfoque igualmente sofisticado. En este contexto, los modelos de simulación basados en agentes emergen como herramientas poderosas y versátiles. Estos modelos permiten replicar la no linealidad, la emergencia y la retroalimentación, características intrínsecas de los sistemas ecológicos. Al simular el comportamiento individual de los leones y sus interacciones con el entorno, se puede captar la autoorganización y la adaptabilidad del sistema. Estos aspectos son esenciales para entender cómo responden las poblaciones de leones a diversas presiones ambientales y antropogénicas.

NetLogo Wilensky (1999) ha sido seleccionado como la herramienta principal para desarrollar este modelo debido a su idoneidad para simular sistemas complejos y dinámicos, como los ecosistemas. Esta plataforma destaca por su capacidad para representar múltiples agentes, como los leones, que interactúan tanto entre sí como con su entorno, en un espacio discreto. Su interfaz intuitiva y su lenguaje de programación sencillo permiten la creación de modelos detallados que capturan la complejidad de los comportamientos individuales y colectivos. Además, *NetLogo* ofrece potentes herramientas de visualización y análisis, lo que facilita la interpretación y comprensión de los resultados obtenidos.

El comportamiento de los leones está influenciado por diversos factores, y su hábitat es altamente dinámico. Por ello, se requería una herramienta que pudiera simular las complejas interacciones entre un gran número de individuos y su entorno. *NetLogo* se presenta como una opción ideal gracias a su capacidad para modelar sistemas espacialmente explícitos y su flexibilidad para incorporar reglas de comportamiento complejas y elementos estocásticos. Esto permite capturar la incertidumbre inherente a los procesos ecológicos, enriqueciendo la comprensión de las dinámicas poblacionales de los leones y su respuesta a diferentes perturbaciones ambientales.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación por agentes en *NetLogo* para profundizar en la comprensión de la dinámica poblacional de los leones y los factores que influyen en su declive. Mediante esta simulación, buscamos explorar y analizar patrones de comportamiento y cuellos de botella poblacionales que pueden resultar difíciles de detectar en estudios de campo tradicionales. Si bien investigaciones como las de Packer et al. (1990) y Mosser and Packer (2009) han proporcionado valiosos conocimientos sobre la estructura social y la respuesta de los leones a cambios en su hábitat, los modelos de simulación ofrecen una plataforma flexible para experimentar con diferentes escenarios y evaluar las consecuencias de distintas intervenciones.

Al simular diversos escenarios, se busca identificar potenciales soluciones para mitigar la disminución de las poblaciones de leones, explorando estrategias como la creación de corredores biológicos, el manejo de conflictos con humanos y la implementación de programas de educación ambiental. Esta investigación busca complementar los estudios de campo existentes, proporcionando una herramienta adicional para comprender y abordar los desafíos que enfrenta la conservación de los leones.

La modelación basada en agentes (*ABM*) ha sido utilizada ampliamente para simular dinámicas poblacionales y territoriales en especies de grandes carnívoros, destacándose como una herramienta efectiva para capturar las interacciones complejas entre individuos y su entorno. Modelos tempranos, como el de Ahearn et al. (2001b), aplicaron un enfoque espacial explícito para simular la dispersión de tigres en India, aunque este modelo impuso territorios fijos y no incluyó interacciones dinámicas entre los individuos. Kenney et al. (1995) también desarrollaron modelos de población de tigres que simulaban el impacto de la fragmentación del hábitat y las tasas de caza furtiva sobre la supervivencia, aunque no integraron territorialidad dinámica ni la influencia directa del comportamiento de los tigres en el uso del territorio.

A lo largo del tiempo, los avances en la modelación por agentes han permitido una mayor precisión en la simulación de comportamientos territoriales y sus efectos en las dinámicas poblacionales. Por ejemplo, Wang and Grimm (2007) y Wang and Grimm (2010) incorporaron territorios dinámicos en su modelación de pequeños mamíferos, como el ratón de campo (*Apodemus sylvaticus*) y la musaraña común (*Sorex araneus*), utilizando la disponibilidad de recursos como principal determinante en la adquisición de territorios. Estos modelos permitieron observar cómo las interacciones espaciales entre individuos afectan la estructura poblacional, lo cual sentó las bases para estudios más complejos como el de Carter et al. (2015). El enfoque basado en agentes de estos estudios más recientes ha demostrado ser particularmente útil para abordar preguntas ecológicas complejas, como la respuesta de los grandes carnívoros a la fragmentación del hábitat y las fluctuaciones en la disponibilidad de recursos Ahearn et al. (2001a), Kenney et al. (1995) y Wang and Grimm (2007).

El programa de *NetLogo* utilizado en el estudio de Carter et al. (2015) para modelar la dinámica poblacional y territorial de tigres es un (*ABM*) que simula cómo los territorios y las interacciones sociales de los tigres afectan su dinámica poblacional. Este modelo tiene en cuenta tanto el comportamiento territorial de machos y hembras como la disponibilidad de recursos en el entorno. Funciona mediante la creación de entidades (tigres) que establecen territorios en función de la calidad del hábitat (disponibilidad de presas) y las interacciones con otros tigres. Las hembras establecen sus territorios en áreas donde la biomasa de presas es alta, y los machos intentan superponer sus territorios sobre los de varias hembras para maximizar su acceso a compañeras reproductivas.

El modelo fue capaz de predecir con precisión el tamaño, la ubicación y la evolución de los territorios de los tigres en respuesta a las condiciones del hábitat y la densidad poblacional. Estos resultados fueron validados con estudios de campo llevados a cabo en el Parque Nacional Chitwan, Nepal, donde se han recopilado datos sobre el comportamiento y ecología de los tigres durante varias décadas. Por ejemplo, Smith et al.

(1993) observaron que las hembras tienden a establecer sus territorios cerca de áreas con alta densidad de presas, mientras que los machos abarcan varios territorios de hembras, lo que se refleja en el modelo. De igual manera, estudios como los de Carter et al. (2013) confirmaron que la densidad de tigres en áreas de alta disponibilidad de presas coincide con los resultados del modelo, lo que subraya la exactitud del mismo al reflejar los patrones observados en el campo. Si bien esta validación empírica aporta evidencia sobre la utilidad de los modelos basados en agentes, es importante considerar que sus predicciones están condicionadas por los supuestos que los sustentan. Estos modelos, aunque valiosos para explorar dinámicas territoriales en grandes carnívoros y orientar estrategias de conservación, no capturan la totalidad de factores ecológicos, sociales y ambientales que influyen en dichos procesos.

Este trabajo presenta un nuevo modelo de simulación por agentes en *NetLogo*, diseñado específicamente para explorar los patrones de comportamiento y las presiones demográficas que enfrentan los leones en sus hábitats naturales. Basado en los últimos hallazgos sobre la ecología y el comportamiento de esta especie, nuestro modelo ofrece una representación más detallada y actualizada de las interacciones entre los leones y su entorno. Con este enfoque innovador, buscamos contribuir al campo de la ecología de la conservación, proporcionando una herramienta valiosa para evaluar estrategias de manejo y conservación de esta especie emblemática.

En particular, este estudio se centró en explorar cómo las interacciones entre los leones y los humanos, así como otros factores ambientales, afectan la viabilidad a largo plazo de las poblaciones de leones. Se analizaron preguntas clave, como: ¿cómo influyen los cambios en el paisaje y la disponibilidad de presas en la conectividad entre poblaciones de leones?, ¿qué estrategias de conservación son más efectivas para mitigar los conflictos con los humanos y promover la coexistencia?

La respuesta a estas preguntas no solo amplió nuestro conocimiento sobre la ecología del león, sino que también contribuyó directamente a la conservación de la especie. Aunque una mejor comprensión de los patrones de comportamiento y las dinámicas poblacionales puede contribuir al diseño de estrategias de conservación más efectivas, es fundamental reconocer que dicha comprensión suele derivarse de modelos que simplifican la realidad.

1.1. Hipótesis

La dinámica poblacional de los leones puede ser modelada eficazmente mediante un enfoque basado en agentes que simule sus interacciones territoriales y comportamentales. Al integrar datos empíricos y literatura científica sobre la ecología y biología de los leones, el modelo reflejó las complejas dinámicas de sus poblaciones en diversos entornos. Esto permitió estudiar los factores que influyen en su supervivencia y reproducción, y contribuyó al desarrollo de estrategias de conservación más efectivas, especialmente en lo que respecta a las interacciones con humanos. En la discusión posterior, se explorará cómo el modelo puede ser utilizado para simular y evaluar escenarios que incluyan la

detección temprana de leones por parte de humanos, destacando su potencial impacto en la reducción de interacciones conflictivas.

1.2. El propósito de la investigación

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación basado en agentes utilizando *NetLogo* para comprender con mayor detalle la dinámica poblacional de los leones y los factores que influyen en su declive. A través de esta simulación, se busca identificar patrones de comportamiento, cuellos de botella poblacionales y posibles soluciones para mitigar la disminución de la especie. Los resultados de este modelo sirvieron para evaluar el impacto de diferentes estrategias de conservación, como la creación de corredores biológicos, el manejo de conflictos con humanos y la educación ambiental, y para diseñar planes de manejo más efectivos.

1.3. Metodología

Desarrollo del *ABM*: Para desarrollar un modelo en *NetLogo* que simule el comportamiento de los leones y su entorno, se utilizaron bases de datos georreferenciados. Este modelo permitió observar cómo los leones interactúan con su hábitat natural, así como con los poblados humanos cercanos. De este modo, se podrá estudiar y predecir situaciones de conflicto, y desarrollar estrategias de conservación y manejo para minimizar los riesgos tanto para los leones como para las comunidades humanas.

Para asegurar la precisión y relevancia del modelo, se siguió un enfoque riguroso que incluyó los siguientes pasos:

- **Definición de reglas de comportamiento:** Se establecieron reglas de comportamiento para los leones basadas en datos empíricos y literatura científica sobre su biología y ecología. Este enfoque incluyó la revisión de artículos especializados y estudios empíricos, proporcionando información sobre patrones de comportamiento, hábitos alimenticios, interacciones sociales, y respuestas a distintos estímulos ambientales. Esto permitió crear un modelo para su estudio y conservación.
- **Implementación y calibración del modelo:** Se implementó el modelo en *NetLogo* y se calibró cuidadosamente para reflejar la dinámica poblacional y el comportamiento territorial de los leones. Se realizaron ajustes iterativos para mejorar su precisión y robustez, demostrando que las simulaciones pueden coincidir con las observaciones empíricas.
- **Simulaciones y evaluación de la robustez:** Se realizaron múltiples simulaciones bajo diferentes escenarios para evaluar la robustez del modelo. Esto permitió identificar patrones emergentes y comportamientos críticos que podrían ser cruciales para la conservación de los leones.

- **Validación del modelo:** Los resultados obtenidos del modelo se compararon con datos empíricos y estudios previos para validar su precisión. Las discrepancias que se encuentren durante este proceso se utilizaron para realizar ajustes y refinamientos adicionales en el modelo.
- **Pruebas de sensibilidad:** Se llevaron a cabo pruebas de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en los parámetros afectan los resultados del modelo, mejorando así su fiabilidad y precisión en diversos contextos.
- **Evaluación y discusión de los resultados:** Se evaluó la relevancia de los resultados obtenidos en el contexto de la conservación de los leones. Además, se discutió cómo los hallazgos del modelo pueden informar estrategias de manejo y conservación efectivas.

1.4. Plan de la obra

En esta investigación, se ha desarrollado un modelo de simulación basado en agentes en *NetLogo* para estudiar el comportamiento de los leones y su interacción con el entorno. La metodología empleada, detallada en la sección anterior, se basa en un enfoque riguroso que combina la recopilación de datos empíricos, la definición de reglas de comportamiento basadas en la literatura científica, y la implementación y calibración del modelo en *NetLogo*. A través de este modelo, se han explorado diversas dinámicas poblacionales. Los resultados obtenidos de estas simulaciones se presentan y discuten en detalle en los siguientes capítulos.

En el capítulo 2 “Teorías y modelos de dinámica poblacional”, establecemos las bases teóricas de nuestra investigación, revisando la literatura existente sobre la dinámica poblacional de los leones y los factores que influyen en su declive. A partir de este marco teórico, en el capítulo 3 “Desarrollo del modelo en *NetLogo*”, desarrollamos un modelo de simulación en *NetLogo* que nos permitirá explorar de manera detallada las hipótesis planteadas. En este capítulo, se detalla la arquitectura del modelo, la definición de los agentes y las reglas de comportamiento, así como las consideraciones metodológicas adoptadas. Este modelo funcionó como una herramienta fundamental para contrastar nuestras hipótesis con la evidencia empírica y avanzar en nuestra comprensión de la dinámica poblacional de los leones.

En el capítulo 4 “Resultados y discusión”, presentamos los resultados de las simulaciones realizadas y un análisis detallado de las mismas. Se discuten los patrones emergentes, se comparan nuestros hallazgos con la evidencia empírica existente y exploramos las implicaciones de nuestros resultados para la comprensión de la dinámica poblacional de los leones. Además, se evalúa cómo diferentes variables, como la disponibilidad de recursos y la fragmentación del hábitat, influyen en el comportamiento y la supervivencia de las poblaciones de leones. También analizamos las limitaciones de nuestro estudio y sugerimos posibles mejoras para futuras investigaciones. Finalmente, en el capítulo 5 “Conclusiones”, sintetizamos los principales hallazgos y proponemos recomendaciones

específicas para la conservación de los leones y su hábitat. Estas recomendaciones incluyen información para mitigar los efectos negativos de la fragmentación del hábitat y promover la conectividad entre áreas protegidas, así como sugerencias para políticas de manejo que puedan apoyar la viabilidad a largo plazo de las poblaciones de leones.

Capítulo 2

Teorías y modelos de dinámica poblacional

En este capítulo se presenta un marco teórico que establece las bases conceptuales necesarias para comprender las dinámicas poblacionales y territoriales de los leones, así como los factores que contribuyen a su declive. Este marco incluye definiciones clave, teorías ecológicas y descripciones detalladas de los procesos que afectan directamente a esta especie emblemática. La información recopilada en esta sección es fundamental para interpretar los objetivos del modelo de simulación que se describirá en el capítulo 3, donde se explica la implementación de un programa en *NetLogo* diseñado para explorar y analizar escenarios de conservación y gestión de poblaciones de leones.

2.1. Marco teórico

2.1.1. Introducción al marco teórico

Dado el papel crucial del león en la conservación de la biodiversidad africana, es fundamental desarrollar herramientas que permitan comprender a profundidad las dinámicas de sus poblaciones. Los modelos de simulación basados en agentes se presentan como una solución prometedora, capaces de capturar la complejidad y la interconexión de los factores que influyen en las poblaciones de leones.

2.1.2. Ecología del león

Factores que afectan a la población de leones

Pérdida y fragmentación del hábitat: La pérdida y fragmentación de hábitat, impulsada principalmente por la expansión agrícola, urbana e industrial, constituye una de las mayores amenazas para la persistencia de las poblaciones de leones. La conversión de los ecosistemas naturales en tierras de cultivo y asentamientos humanos reduce drásticamente el área disponible para que los leones puedan deambular y llevar a

cabo sus actividades vitales Lindsey et al. (2017). Esta disminución del hábitat no solo limita el acceso de los leones a recursos esenciales como presas y fuentes de agua, sino que también restringe su capacidad para establecer territorios adecuados y mantener poblaciones viables.

La fragmentación del hábitat, es decir, la división de un hábitat continuo en fragmentos más pequeños y aislados, exacerba aún más los efectos negativos de la pérdida de hábitat. Los fragmentos de hábitat más pequeños suelen tener una menor capacidad de sustentar poblaciones de grandes carnívoros como los leones, ya que ofrecen una menor cantidad de presas y un mayor riesgo de conflictos con los humanos. Además, el aislamiento de las poblaciones fragmentadas limita el flujo genético entre ellas, lo que puede conducir a una disminución de la diversidad genética, una mayor susceptibilidad a enfermedades y, en última instancia, a un mayor riesgo de extinción local Bjorneraas et al. (2012).

Conflictos entre humanos y leones: En numerosas regiones de África, la superposición del hábitat de los leones con zonas dedicadas a la agricultura y la ganadería ha intensificado los conflictos entre humanos y estos grandes felinos. En el área del complejo protegido Hwange–Matetsi, en el noroeste de Zimbabwe, se registraron entre 2,008 y 2,013 más de 1,000 eventos de depredación de ganado por grandes carnívoros (incluidos leones), lo que representó aproximadamente el 19 % del ganado existente en la zona. En respuesta a estos ataques, cerca de 50 leones —principalmente hembras con cachorros y machos subadultos— fueron asesinados como represalia por ganaderos y autoridades locales durante el mismo periodo Loveridge et al. (2015).

La gran mayoría (más del 80 %) de estas agresiones ocurrieron durante la noche, cuando el ganado permanecía fuera de recintos seguros como corrales (*bomas*), lo que evidencia la alta vulnerabilidad de los animales durante las horas nocturnas Loveridge et al. (2015).

En cuanto a la frecuencia de los ataques, se documentaron 1,527 incidentes en tres sitios al noroeste de Zimbabwe entre 2,008 y 2,013, que resultaron en 2,039 animales muertos y 306 heridos. Estas agresiones fueron atribuidas mayoritariamente a leones y a la hiena manchada Loveridge et al. (2015).

El impacto socioeconómico para las comunidades locales es sustancial. La pérdida de aproximadamente el 19 % del ganado representó un duro golpe económico para los ganaderos, mientras que la muerte de leones adultos, especialmente hembras reproductoras y subadultos, no solo afecta la dinámica poblacional de la especie, sino que también pone en riesgo los esfuerzos de conservación a largo plazo.

Cuadro 2.1: Estadísticas de conflictos humano-león en el noroeste de Zimbabwe (2008–2013), con base en Loveridge et al. (2015).

Zona geográfica	Estadísticas destacadas
Hwange–Matetsi (Zimbabwe, 2008–2013)	Más de 1,000 ataques de depredación de ganado; pérdida del 19 % del total; alrededor de 50 leones muertos en represalia.
Noroeste de Zimbabwe (2008–2013)	1,527 incidentes documentados, con 2,039 animales muertos y 306 heridos; ataques atribuidos principalmente a leones e hiena manchada.
Temporalidad de ataques	Más del 80 % de los ataques ocurrieron durante la noche, cuando el ganado no estaba protegido en corrales.

2.1.3. Fundamentos de los ABM

2.1.3.1. Concepto de agente

En el contexto de la modelación basada en agentes, un agente se define como una entidad autónoma que interactúa con otros agentes y con su entorno en un espacio simulado. Los agentes pueden representar una variedad de elementos, como individuos, grupos sociales, organismos biológicos o unidades económicas, dependiendo del propósito y alcance del modelo Steven F. Railsback (2019).

Los agentes poseen ciertas características esenciales:

- **Autonomía:** Los agentes toman decisiones de manera independiente, sin la intervención directa de un controlador externo. Esta autonomía permite que los agentes operen de acuerdo con reglas predefinidas o en respuesta a cambios en su entorno Wilensky et al. (2015).
- **Heterogeneidad:** Los agentes pueden tener diferentes atributos o comportamientos, lo que permite modelar la diversidad presente en sistemas complejos. Por ejemplo, en modelos ecológicos, los agentes pueden variar en características como tamaño, capacidad de desplazamiento o nivel de depredación Steven F. Railsback (2019).
- **Capacidad de interacción:** Los agentes interactúan entre sí y con el entorno, lo que da lugar a comportamientos emergentes en el sistema. Las interacciones pueden ser de cooperación, competencia o simple intercambio de información, y son fundamentales para capturar las dinámicas complejas de los sistemas modelados Macal (2010).
- **Adaptabilidad:** Muchos agentes pueden modificar su comportamiento a lo largo del tiempo en respuesta a las condiciones cambiantes del entorno. Esta capacidad de adaptación permite que los modelos sean más realistas al simular procesos dinámicos Wilensky et al. (2015).

Los agentes se utilizan en la modelación computacional para estudiar fenómenos en sistemas complejos, donde las interacciones locales pueden dar lugar a patrones globales inesperados o emergentes. En la modelación de sistemas ecológicos, por ejemplo, los agentes pueden representar individuos de una especie y proporcionar información sobre la dinámica poblacional, los patrones de movimiento y las interacciones con el entorno. La capacidad de simular estos procesos a nivel individual hace que los modelos basados en agentes sean herramientas poderosas para comprender y predecir las dinámicas de sistemas reales Railsback and Grimm (2019); Wilensky et al. (2015).

2.1.4. Aplicaciones previas

Los modelos basados en agentes han sido utilizados para analizar la dinámica de poblaciones de grandes carnívoros, como tigres y leones. Un estudio realizado por Carter et al. (2015) mostró la utilidad de los *ABM* en la exploración de las interacciones territoriales entre tigres (*Panthera tigris*). Mediante la simulación del comportamiento individual, incluyendo la búsqueda de alimento, la defensa de territorios y las interacciones sociales, dicho estudio permitió identificar cómo las dinámicas territoriales inciden en la distribución de la población, la densidad de individuos y la viabilidad a largo plazo de la especie.

La metodología empleada en este trabajo puede aplicarse al caso de los leones, dado que ambas especies presentan características comunes en cuanto a territorialidad, competencia por recursos y formación de coaliciones. Al adaptar los *ABM* para representar las interacciones sociales y ecológicas de los leones, es posible obtener información sobre los factores que afectan la dinámica poblacional de esta especie en distintos paisajes y bajo diversas condiciones ambientales.

2.1.5. Dinámica poblacional de los leones

Interacciones territoriales

Las interacciones territoriales constituyen un pilar fundamental en la comprensión de la dinámica poblacional y la estructura social de los leones. Estos grandes felinos son reconocidos por su naturaleza social, viviendo en grupos familiares conocidos como manadas. La territorialidad, definida como la defensa de un área específica frente a otros individuos de la misma especie, desempeña un papel crucial en la organización social de los leones, regulando el acceso a recursos esenciales como presas, agua y sitios de descanso Packer et al. (1990).

La defensa del territorio implica un conjunto de comportamientos complejos, que incluyen la marcaje olfativo, las vocalizaciones y las patrullas fronterizas. Estas actividades son energéticamente costosas y requieren una coordinación estrecha entre los miembros de la manada. La fragmentación del hábitat, resultado de la expansión humana y otras actividades, puede interrumpir estas dinámicas territoriales de diversas maneras. Por ejemplo, la reducción del tamaño y la calidad de los territorios pueden

generar una mayor competencia entre manadas, lo que a su vez puede aumentar la agresión, la dispersión de individuos y la fragmentación de las poblaciones Mosser and Packer (2009).

Impacto de la fragmentación del hábitat

En el caso de los leones, la fragmentación del hábitat tiene múltiples impactos negativos. En primer lugar, reduce drásticamente la cantidad de territorio disponible para las manadas, limitando el acceso a recursos esenciales como presas, agua y sitios de refugio. Esta disminución en el tamaño de los territorios puede generar una mayor competencia entre manadas, lo que a su vez puede aumentar la agresión, la dispersión de individuos y la fragmentación de las poblaciones.

Además de reducir el tamaño de los territorios, la fragmentación del hábitat también compromete la conectividad entre las diferentes poblaciones de leones. Al limitar el movimiento de los individuos entre fragmentos, la fragmentación restringe el flujo genético, es decir, el intercambio de material genético entre poblaciones. Esta reducción en el flujo genético tiene profundas implicaciones para la salud genética y la viabilidad a largo plazo de las especies.

La falta de flujo genético puede conducir a la endogamia, un fenómeno que ocurre cuando individuos estrechamente relacionados se reproducen. La endogamia aumenta la probabilidad de que se expresen alelos recesivos deletéreos —genes dañinos que solo se manifiestan si se heredan de ambos padres—, lo que puede reducir la aptitud de los individuos y aumentar la susceptibilidad a enfermedades. Además, la disminución de la variabilidad genética limita la capacidad de las poblaciones para adaptarse a los cambios ambientales.

De igual manera, un factor natural que contribuye significativamente a la fragmentación del hábitat de los leones es la presencia de ríos, que actúan como barreras geográficas dentro de su rango de distribución. Los ríos limitan el movimiento tanto de los leones como de sus presas, lo que afecta directamente su acceso a recursos esenciales, como fuentes de agua y áreas de caza. Esta fragmentación natural puede provocar el aislamiento de subpoblaciones, reduciendo la conectividad entre ellas y afectando la viabilidad genética a largo plazo. La falta de interacción entre grupos de leones separados por ríos aumenta el riesgo de endogamia, disminuye la diversidad genética y puede hacer que las poblaciones sean más vulnerables a las presiones ambientales y antropogénicas.

Además, en un paisaje fragmentado por la presencia de ríos, los leones enfrentan dificultades para establecer territorios viables y para encontrar parejas reproductivas adecuadas. Estas barreras naturales también limitan las oportunidades de migración y dispersión, procesos clave para mantener la salud y la resiliencia de las poblaciones. De este modo, los ríos no solo fragmentan el hábitat físico de los leones, sino que también fragmentan su estructura social, afectando negativamente las dinámicas poblacionales y la capacidad de la especie para adaptarse a cambios en su entorno J. Ogotu (2004).

Infanticidio

La dinámica social intrínseca a las manadas de leones ejerce una influencia significativa en la supervivencia de los cachorros. Uno de los factores más determinantes en la tasa de mortalidad de los cachorros es el infanticidio, un comportamiento agresivo en el que los leones machos recién llegados a una manada matan a las crías existentes. Este comportamiento, aunque brutal, es una estrategia evolutiva que ha sido ampliamente documentada en diversas especies sociales Banerjee and Jhala (2012).

Cuando un nuevo macho, o coalición de machos, toma el control de una manada, existe una alta probabilidad de que mate a los cachorros que no son su progenie. Al eliminar a la competencia directa, el nuevo macho asegura que las hembras entren en celo más rápidamente y puedan concebir sus propias crías. Esta estrategia, aunque reduce drásticamente la expectativa de vida de los cachorros, aumenta las posibilidades de transmitir los genes del nuevo macho a la siguiente generación. Estudios recientes sugieren que el infanticidio puede representar hasta un 30 % de las muertes de cachorros, destacando su importancia como factor de mortalidad en las poblaciones de leones Packer et al. (2013).

2.1.6. Estrategias de conservación

Corredores biológicos

Los corredores biológicos representan una herramienta fundamental en la conservación de especies como el león, ya que actúan como puentes ecológicos que conectan fragmentos de hábitat aislados. Al permitir el movimiento de individuos entre poblaciones fragmentadas, estos corredores contribuyen significativamente a mantener la diversidad genética y la viabilidad poblacional a largo plazo Beier and Noss (1998). En el caso de los leones, los corredores biológicos son esenciales para asegurar que las poblaciones aisladas puedan interactuar, lo que no solo favorece el intercambio genético, sino que también permite la dispersión de individuos en busca de nuevos territorios y recursos, contribuyendo a la resiliencia de la especie ante cambios ambientales y eventos estocásticos como enfermedades o desastres naturales Kark et al. (2015).

La creación de corredores biológicos efectivos requiere un conocimiento profundo de la ecología de la especie objetivo y del paisaje. Es fundamental considerar factores como la selección de hábitat de los leones, las barreras artificiales que pueden limitar el movimiento (como carreteras o cercas) y la conectividad funcional del paisaje. También es importante garantizar que los corredores sean lo suficientemente extensos y conectados para permitir el movimiento de los leones a lo largo de su ciclo de vida.

Un ejemplo documentado de corredor instalado para otra especie es el Futi Corridor, en Mozambique, que restablece la ruta migratoria histórica de elefantes entre la Reserva Especial de Maputo y el Parque de Elefantes Tembe en Sudáfrica, facilitando su movimiento transfronterizo.

Aunque este ejemplo no corresponde a leones, ilustra cómo se puede aplicar el principio de conectividad funcional al diseño de corredores. El libro *Corridor Ecology: Linking*

Landscapes for Biodiversity Conservation and Climate Adaptation proporciona un marco teórico y metodológico que es aplicable en distintos contextos ecológicos, incluido el caso de los leones Hilty et al. (2020).

Manejo de conflictos con humanos

El manejo de los conflictos entre humanos y leones es un aspecto crucial para la conservación a largo plazo de esta especie emblemática. La coexistencia entre humanos y grandes carnívoros representa un desafío complejo, ya que los leones a menudo entran en conflicto con las actividades humanas, como la ganadería, debido a la depredación de ganado. Para mitigar estos conflictos y promover la coexistencia pacífica, se han implementado diversas estrategias de manejo.

La compensación por la pérdida de ganado es una herramienta fundamental para reducir las represalias contra los leones y fomentar la tolerancia de las comunidades locales. Al compensar económicamente a los ganaderos por las pérdidas causadas por los leones, se disminuye el incentivo para matar a estos animales. Además, la implementación de cercas eléctricas y otras medidas de protección del ganado ha demostrado ser efectiva para reducir los ataques de leones y las pérdidas económicas para los ganaderos. Por otro lado, la promoción de prácticas de pastoreo sostenibles, como la rotación de pasturas y la utilización de corrales nocturnos, puede ayudar a minimizar los encuentros entre leones y ganado, reduciendo así el riesgo de conflicto Hazzah et al. (2014)

Es importante destacar que el manejo de conflictos entre humanos y leones requiere un enfoque multidisciplinario que involucre a diversas partes interesadas, como conservacionistas, gobiernos, comunidades locales y ganaderos. La participación activa de las comunidades locales es esencial para garantizar la sostenibilidad de las iniciativas de conservación a largo plazo.

Educación ambiental

La educación y sensibilización de las comunidades locales representan un pilar fundamental en la conservación de los leones y en la mitigación de los conflictos entre humanos y fauna silvestre. Al fomentar una mayor comprensión y apreciación de los leones y su papel en los ecosistemas, los programas de educación ambiental pueden generar cambios significativos en las actitudes y comportamientos de las comunidades locales, facilitando la implementación de otras medidas de conservación y promoviendo la coexistencia pacífica entre humanos y leones Dickman (2010).

A través de la educación ambiental se pueden abordar temas como la importancia ecológica de los leones, los beneficios económicos de la conservación, las estrategias para reducir los conflictos y las alternativas de sustento que no dependan de la explotación de la vida silvestre. Además, la participación activa de las comunidades locales en la planificación e implementación de las iniciativas de conservación puede fortalecer el sentido de pertenencia y responsabilidad hacia la conservación de los leones y sus hábitats.

Es importante destacar que los programas de educación ambiental deben ser adaptados a las necesidades y características de cada comunidad, utilizando métodos de enseñanza participativos y atractivos que promuevan la reflexión crítica y el aprendizaje experiencial. Asimismo, es fundamental establecer alianzas con escuelas, organizaciones comunitarias y líderes locales para garantizar la sostenibilidad de los esfuerzos educativos a largo plazo.

Evaluación de estrategias existentes

Estudios recientes han evaluado de manera rigurosa la efectividad de diversas estrategias de conservación implementadas para proteger a los leones y sus hábitats. Estas investigaciones han explorado un amplio rango de intervenciones, desde la creación de corredores biológicos para mejorar la conectividad entre poblaciones hasta el manejo de conflictos humanos-leones para reducir la retaliación contra estos grandes felinos Hunter et al. (2007). Los resultados de estos estudios han proporcionado una base empírica sólida para el desarrollo de políticas y prácticas de conservación más efectivas, adaptadas a las condiciones ecológicas, sociales y económicas de cada región.

La evaluación de estas estrategias ha permitido identificar los factores que influyen en su éxito o fracaso, así como las mejores prácticas para su implementación. Por ejemplo, se ha demostrado que la combinación de diferentes estrategias, como la creación de áreas protegidas, la educación ambiental y la compensación por pérdidas, puede ser más efectiva que la aplicación de una sola medida. Además, los estudios han subrayado la importancia de involucrar a las comunidades locales en la planificación y ejecución de las iniciativas de conservación, ya que su participación es fundamental para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los esfuerzos de conservación.

2.1.7. Conclusión del marco teórico

Este marco teórico subraya la necesidad de adoptar un enfoque interdisciplinario que integre conocimientos de diversas disciplinas para comprender y abordar de manera efectiva el declive de las poblaciones de leones. La ecología tradicional, que estudia las interacciones entre los organismos y su entorno, proporciona una base sólida para entender los procesos ecológicos que influyen en la dinámica de las poblaciones de leones. Sin embargo, para abordar la complejidad de los desafíos que enfrentan estas especies, es fundamental complementar este conocimiento con herramientas analíticas más sofisticadas.

Los modelos basados en agentes han surgido como una herramienta poderosa para simular y analizar sistemas complejos, como las poblaciones de leones. Estos modelos permiten explorar cómo factores como la territorialidad, la fragmentación del hábitat, los conflictos humanos-leones y la variabilidad ambiental interactúan entre sí, influyendo en la dinámica poblacional. Al integrar estos factores en un marco común, los *ABM* pueden ayudar a identificar los procesos clave que impulsan el declive de las poblaciones de leones y a evaluar las consecuencias de diferentes escenarios de conservación.

La combinación de la ecología tradicional y los modelos computacionales avanzados ofrece una perspectiva holística que permite diseñar y evaluar estrategias de conservación más efectivas. Al simular diferentes escenarios, los investigadores pueden identificar las intervenciones más prometedoras para abordar los desafíos específicos que enfrentan las poblaciones de leones en cada región. Además, los *ABM* pueden ayudar a pronosticar los efectos a largo plazo de las diferentes estrategias de conservación, lo que permite tomar decisiones informadas y basadas en la evidencia.

En este capítulo, hemos explorado las dinámicas poblacionales y territoriales de los leones, así como los factores que influyen en su declive. Hemos identificado las principales amenazas que enfrentan estas majestuosas criaturas, incluyendo la pérdida y fragmentación de su hábitat, la caza furtiva y los conflictos con humanos. Además, hemos discutido la importancia de desarrollar estrategias de conservación efectivas para garantizar la supervivencia a largo plazo de los leones.

Toda esta información fue fundamental para el desarrollo del programa de simulación basado en agentes que se presenta en el siguiente capítulo. En el capítulo 3, detallamos cómo se implementó este modelo en *NetLogo*, describiendo su arquitectura, las reglas de comportamiento de los agentes y las variables que se consideraron. Este modelo permitió simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de diversas estrategias de manejo en la conservación de los leones, ayudándonos a mejorar el entendimiento actual para la toma de decisiones en la conservación de esta especie emblemática.

Capítulo 3

Desarrollo del modelo en *NetLogo*

En este capítulo se centra el desarrollo, implementación y análisis del modelo de simulación basado en agentes diseñado para estudiar las dinámicas poblacionales de los leones. Este modelo, desarrollado en la plataforma NetLogo, permite explorar de manera detallada cómo los factores ecológicos, sociales y territoriales interactúan para influir en la viabilidad de las poblaciones de leones. Además, proporciona una herramienta valiosa para evaluar diferentes estrategias de conservación bajo escenarios específicos.

El origen del programa surge a partir de la formalización matemática de los procesos que describen la vida de los leones. Inicialmente, la interacción entre individuos y su entorno se representó mediante funciones y relaciones básicas derivadas de la literatura ecológica: tasas de natalidad y mortalidad, probabilidades de dispersión, funciones de competencia y consumo de recursos. Estos elementos se expresaron en términos de ecuaciones diferenciales simplificadas y funciones de probabilidad, que posteriormente fueron discretizadas y adaptadas para poder ser implementadas dentro de un modelo basado en agentes. Es decir, cada regla de comportamiento que se observa en la simulación —la defensa del territorio, la dinámica de caza, la permanencia en una manada o la expulsión de machos jóvenes— tiene un trasfondo matemático que la sustenta, traducido en condiciones lógicas y funciones computacionales.

El programa no se escribió de manera lineal ni definitiva desde un inicio, sino que se construyó de forma incremental, tomando como base lo revisado en la literatura científica y una investigación prolongada sobre la interacción de las manadas de leones, tanto entre ellos como con su entorno. Cada nueva sección del código fue diseñada para responder a un aspecto previamente estudiado, transformando los supuestos teóricos en algoritmos explícitos que gobiernan la simulación.

Cabe mencionar que el modelo tiene limitaciones, ya que no se abordan todos los aspectos de la vida de los leones. Por lo tanto, está condicionado por sus propios supuestos y las simplificaciones necesarias para su construcción. Sin embargo, en su diseño se consideraron aspectos clave de la ecología de la especie, aquellos que, según la literatura, tienen mayor impacto en su dinámica poblacional. Asimismo, se variaron los parámetros de manera sistemática para comprobar la estabilidad del modelo y se realizaron múltiples pruebas de coherencia, verificando que los resultados obtenidos correspondieran

con las tendencias reportadas en estudios previos.

A lo largo de este capítulo, se detallarán los aspectos clave del modelo, comenzando por su diseño conceptual, que incluye las hipótesis, los agentes involucrados y las reglas que rigen su comportamiento. Posteriormente, se describirá el proceso de implementación, que incluye la codificación y las pruebas iniciales. También se explicará el funcionamiento del modelo, destacando cómo se representan las dinámicas de dispersión, territorialidad y competencia por recursos. Finalmente, se abordarán los métodos de calibración y validación utilizados para garantizar la precisión y la robustez de las simulaciones realizadas.

Este modelo no solo busca comprender mejor las dinámicas poblacionales de los leones, sino también ofrecer una base científica sólida para proponer intervenciones prácticas en su conservación. Al final de este capítulo, se espera que el lector tenga una visión clara de cómo fue desarrollado este modelo, cuál es su fundamento matemático, cómo opera y de qué manera contribuye al análisis de los problemas que enfrentan las poblaciones de leones en la actualidad.

3.1. Descripción del modelo de simulación (ODD)

Este documento sigue la estructura *ODD* (*Overview Design concepts and Details*, por sus siglas en inglés) Grimm et al. (2010) para describir el modelo de simulación basado en agentes que analiza la dinámica poblacional de los leones y su interacción con los humanos.

3.1.1. Visión general

3.1.1.1. Propósito

El modelo tiene como objetivo simular la dinámica poblacional de leones en un entorno que incluye la presencia de humanos y la disponibilidad de recursos (presas). Se exploran procesos como la reproducción, la caza, la competencia por territorios, las interacciones entre machos (incluyendo peleas y toma de territorio), la interacción con humanos y la mortalidad (por inanición, edad, enfrentamientos, infanticidio, etc.). El propósito es comprender cómo estos procesos, en forma individual y local, dan lugar a patrones emergentes en la población y distribución espacial de los leones.

3.1.1.2. Entidades, variables de estado y escalas

Entidades:

▪ **Agentes (*turtles*):**

- **Leones:** Se distinguen dos grupos (*breeds*): *females* y *males*. Cada león posee variables individuales:

- *energy*: Energía actual.
 - *age*: Edad (en días).
 - *age-class*: Categoría etaria (*cub*, *juvenile* o *mature*).
 - *territory*: Conjunto de parches que conforman su territorio.
 - *state*: Estado funcional (para hembras: *fertile*, *gestating*, *maternity*; para machos: *nomad* o *sedentary*).
- **Humanos**: Se crean como agentes de la raza *humans* y se ubican en parches fuera del parque, influyendo en la mortalidad de leones nómadas, caracterizados por su posición.
 - **Parches (*patches*)**: Representan el espacio del modelo. Cada parche tiene variables:
 - *is-park?*: Indica si el parche forma parte del parque nacional.
 - *energy-preys*: Cantidad de energía disponible en forma de presa.
 - *male-owner*: Identificador del macho que “posee” el parche (para definir territorios).
 - *origin?*: Indica si el parche es origen, cabe mencionar que un parche es origen cuando pertenece al territorio de alguna manada, para asignar territorios.

Variables globales: Se utilizan para llevar registros estadísticos y de control, tales como:

- Contadores de muertes según causa:
 - death-by-humans*, *death-by-fights*, *death-by-infanticide*,
 - death-by-inanition-cub-female*, *death-by-inanition-juvenile-female*,
 - death-by-inanition-mature-female*, *death-by-inanition-cub-male*,
 - death-by-inanition-juvenile-male*, *death-by-inanition-mature-male*,
 - death-by-inanition-juvenile-male-nomad*,
 - death-by-inanition-mature-male-nomad*,
 - death-by-inanition-mature-male-sedentary*,
 - death-by-inanition-juvenile-male-sedentary*,
 - death-by-age-nomad*, *death-by-age-sedentary*, *death-by-age-females*.
- *available-colors*: Lista de colores disponibles para asignar a territorios.
- *p-origins*: Conjunto de parches candidatos a ser origen de territorios.

Escala:

- **Temporal:** El modelo avanza en pasos discretos (*ticks*), donde cada “tick” representa un día.
- **Espacial:** La zona de estudio es el Parque Nacional del Serengeti (ver figura 3.1), que abarca $14,763 \text{ km}^2$. El modelo simula el entorno como una red de 14,021 parches (ver figura 3.2), es decir, cada parche representa cerca de $1,053 \text{ km}^2$. Esta alta densidad de parches, cubriendo aproximadamente el 94.97% del área total, permite una representación detallada de los territorios y la distribución de recursos (presas) en la zona modelada, donde se distingue el área protegida mediante la función *is-park?*.



Figura 3.1: Mapa actual del Parque Nacional Serengeti

En la figura 3.2 se muestra una representación esquemática de la dinámica territorial de los leones dentro de un área protegida. Cada polígono de color corresponde al territorio de un macho dominante, diferenciados visualmente para evitar la superposición; en caso de coincidencias cromáticas, los límites se distinguen mediante el radio asignado en el programa, lo cual garantiza que no existan traslapes. Las figuras con rostro de león en color naranja representan a las hembras, mientras que las de color azul corresponden a los machos. Su distribución espacial es aleatoria, aunque restringida al interior de la zona delimitada (círculo central multicolor). Los puntos dispersos alrededor del círculo

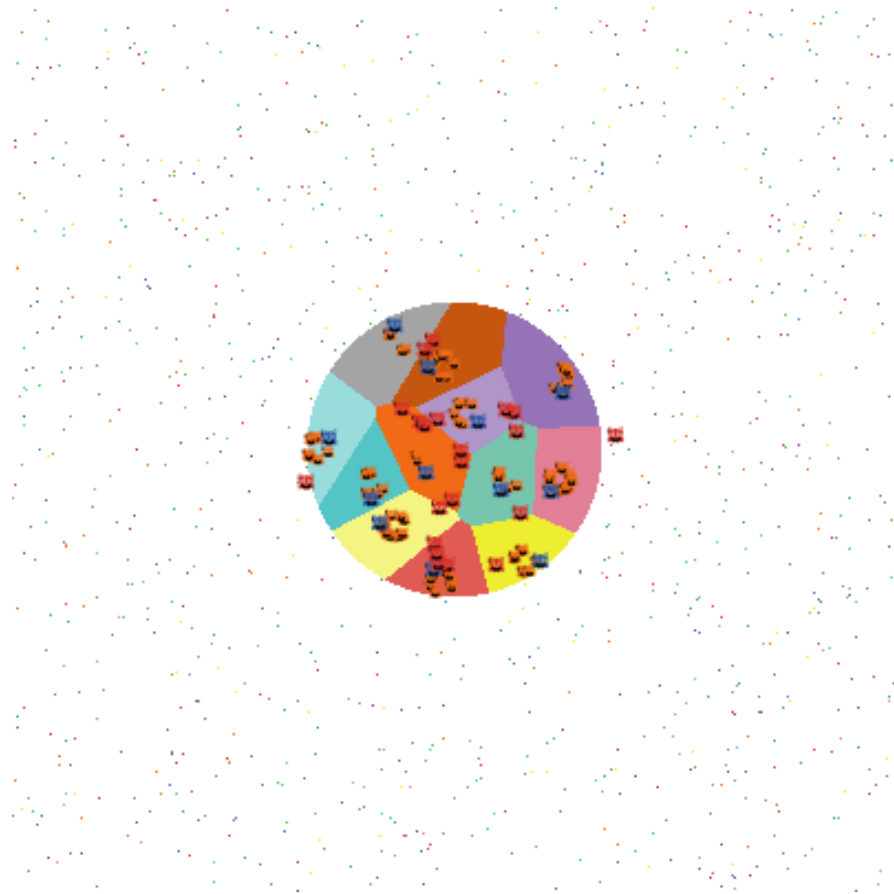


Figura 3.2: Mapa usado como representación del Parque Nacional Serengeti

representan asentamientos humanos, cuya cercanía genera conflictos frecuentes con las poblaciones de leones. En conjunto, esta simulación busca ofrecer una aproximación simplificada a la configuración territorial del Serengeti, mostrando la tensión existente entre las áreas de conservación y la presión humana circundante.

3.1.2. Procesos y programación

3.1.2.1. Inicialización del modelo

El modelo se inicia mediante el procedimiento *setup*, que a su vez invoca:

- **setup-patches:** Inicializa todos los parches asignándoles su estado de parque (o no) y configura la energía inicial de las presas en los parches que forman parte del parque. El programa utiliza una distribución aleatoria para asignar energía a los parches disponibles. Por ejemplo, si la variable “*initial-prey-density*” se establece en 0.3, un tercio de los parches cuenta con energía disponible; si se configura en 0.25, equivale a un cuarto de los parches. Por su parte, la variable “*initial-prey-*

energy”, también ajustable desde la interfaz, determina un valor aleatorio entre 0 y el máximo seleccionado para dicha variable.

- **setup-turtles:** La función *setup-turtles* inicializa las tortugas (agentes) en el modelo y permite personalizar diversos parámetros al inicio de la simulación. Se puede elegir el número inicial de hembras (*initial-females*), machos (*initial-males*) y humanos (*NH*) desde la interfaz. También permite ajustar la distribución inicial de las hembras en las manadas utilizando una distribución normal, con parámetros configurables de media y desviación estándar.

Todas las hembras se inicializan en estado *fertile* y se distribuyen en los territorios de manera coherente con la configuración definida. Por otro lado, los machos se distribuyen uno por territorio disponible, mientras que el resto se clasifica como *nomad*. Estos machos nómadas se ubican inicialmente en un área separada y tienen la capacidad de deambular por el mapa durante la simulación.

Además, se definen atributos clave como la energía inicial, la edad, y las clases de edad de los agentes, que son calculados o ajustados con base en los parámetros iniciales establecidos. La función organiza la población inicial de manera eficiente, permitiendo personalizar las condiciones de partida según las necesidades del modelo.

- **allocate-humans:** Distribuye los agentes humanos de manera aleatoria en parches que no pertenecen al parque.

3.1.2.2. Ciclo de ejecución (*go*)

En cada *tick* del modelo se ejecutan los siguientes procesos:

1. Actualización de edad, clase de edad y energía:

- La edad de los leones se actualiza en cada *tick*, y existe un procedimiento separado llamado *update-age-class* que clasifica a los leones en los estados *cub*, *juvenile* y *mature*. Cuando un macho alcanza cierta edad, este procedimiento también actualiza su estado a *nomad* y simula su expulsión de la manada. En cuanto a la energía, se dispone de varios parámetros ajustables desde la interfaz, como la energía perdida por dar a luz, la energía utilizada en peleas entre machos, la energía obtenida al consumir presas, la energía inicial de cada individuo y la energía perdida simplemente por vivir, en el libro Packer et al. (2013) se reporta que en condiciones naturales, la expectativa de vida promedio es de alrededor de 8–12 años en leones macho (la mayoría muere antes de los 10 por peleas o expulsión de la manada) y alrededor de 12–15 años, con casos excepcionales de hasta 17–18 años en estado silvestre para las leonas, representada por la variable *energy-loss*. Esta última se actualiza en cada *tick* para reflejar la cantidad de energía que se consume por el hecho de existir.

2. Reproducción:

- Las hembras en estado *fertile* que se encuentran en presencia de machos sedentarios y con probabilidad definida (*probability-of-mating*) inician el proceso de gestación (*gestating*).
- Una vez finalizado el periodo de gestación, que en promedio dura 110 días, se produce el parto mediante el procedimiento *reproduction*, generando nuevos *cubs*. La probabilidad de que un cachorro sea macho es del 50 %, al igual que la probabilidad de que sea hembra. El número de cachorros que tiene una hembra se puede ajustar mediante el parámetro *litter-size*, se utilizó un número promedio de 4 cachorros por camada. Después del parto, la hembra entra en estado de *maternity*, permaneciendo en este estado hasta que pierde a los cachorros o los machos son desterrados de la manada. Una vez que esto sucede, la hembra puede volver a cambiar su estado a *fertile*, preparándose nuevamente para reproducirse.

3. Caza (*hunt* y *hunt-nomads*):

- Los leones se mueven hacia parches con disponibilidad de energía de presa, recuperando energía que se reparte entre los integrantes del territorio. La cantidad total de energía que posee la presa se distribuye equitativamente entre todos los miembros de la manada, asegurando que cada león reciba una parte proporcional según el tamaño de la presa y la cantidad de individuos en el territorio.
- Los machos nómadas obtienen energía adicional al cazar en parches. A diferencia de los leones en manadas, los nómadas toman una parte aleatoria del total de energía de la presa, ya que no tienen que dividirla entre otros integrantes, maximizando así la energía que pueden obtener en cada cacería.

4. Interacción territorial (*protec-territory*):

- Los machos con territorio pueden enfrentarse a machos nómadas en un radio definido (*radius-herd*), el cual es ajustable desde la interfaz. Además, las peleas entre nómadas están limitadas únicamente a machos que tienen 4 años o más de edad, asegurando que solo los individuos maduros participen en estos enfrentamientos.
- Se utiliza la función *calculate-strength* (basada en la edad y la energía) para determinar el ganador de un enfrentamiento. Esta función calcula la fuerza de un león considerando dos factores principales: su energía relativa y su edad. La energía del león se normaliza dividiéndola por el valor máximo de energía entre todos los machos, asegurando una comparación proporcional. Además, la función asigna un *factor de edad* que varía según las etapas de vida del león: la fuerza aumenta linealmente hasta los 5 años (representando su desarrollo), alcanza su máximo entre los 5 y los 7 años, y luego comienza

a disminuir progresivamente a partir de los 7 años debido al envejecimiento. El resultado final es la suma del factor de edad y la energía normalizada, proporcionando una medida integrada de la fuerza del león para decidir el ganador.

- Dependiendo del resultado, se pueden producir cambios de estado, toma de territorio o muerte (por pelea). Si el león nómada gana la pelea, toma el territorio del león derrotado, mata a las crías presentes (si las hay) y pone a la hembra en estado *fertile*. El macho derrotado tiene una probabilidad de morir tras la pelea, determinada por el parámetro ajustable *probability-of-death-on-fight*. Si muere, se registra como una muerte por pelea; si sobrevive, su estado se actualiza a *nomad*. Por otro lado, si el león nómada pierde la pelea, tiene la misma probabilidad de morir. Si muere, se registra como una muerte por pelea, pero de un nómada; si sobrevive, huye y escapa. En ambos casos, la energía de los leones involucrados se actualiza, restando una cantidad de energía determinada por el parámetro ajustable *energy-loss-by-fight*.

5. Interacción con humanos (*interaction-with-humans*):

- Los leones nómadas que se acercan a un agente humano tienen un radio de interacción ajustable denominado *lion-humans-radius-interaction*, configurable desde la interfaz. Cuando un león entra en este radio, se activa un procedimiento estocástico en el cual el león puede morir con una probabilidad ajustable llamada *dead-probability-with-humans*. Si ocurre este evento, se registra como una muerte atribuida a humanos.

6. Crecimiento de presas (*grow-prey*):

- Los parches del parque regeneran la energía de presa de forma estocástica, siguiendo dos casos específicos. En el primero, si un parche ya contiene energía, esta se incrementa en una cantidad aleatoria comprendida entre 0 y el valor asignado a la variable "*growth-prey-rate*", la cual puede ajustarse desde la interfaz. En el segundo caso, si un parche no contiene energía, existe una probabilidad denominada "*probability-growth-prey*" para que el parche adquiera energía. Esta energía inicial se asigna de manera aleatoria entre 0 y el valor establecido por la variable "*initial-prey-energy*", que corresponde a la energía definida al inicio de la simulación.

7. Mortalidad:

- Se evalúa la muerte por inanición (*check-death*) cuando la energía de un león es menor o igual a cero. Cada león pierde energía de manera constante debido al proceso de metabolización y las demandas de su vida diaria, una cantidad representada en el programa por la variable "*energy-loss*", que puede ajustarse desde la interfaz. Cuando esta energía acumulada alcanza el valor

de cero, se considera que el león ha muerto por inanición. Además, dentro de la función *check-death*, se lleva un registro detallado de las muertes por inanición, clasificándolas por género y por rango de edad de los individuos.

- Se procesan muertes por envejecimiento (*mortality*) diferenciadas para machos y hembras. En el caso de los machos que mueren por vejez y son “dueños” de una manada, su fallecimiento deja ese territorio sin un macho dominante. El programa asigna ese territorio al macho nómada más cercano, quien se convierte en el nuevo líder del grupo. Si el territorio cuenta con cachorros, el macho nómada los elimina, incentivando que la hembra entre en estado fértil. En caso de que no haya machos nómadas disponibles, el territorio permanece sin un macho dominante, afectando la dinámica de la manada.

8. Actualización de territorios:

- En caso de parches sin asignar, se reasignan al azar a machos nómadas.

9. Incremento del contador de “ticks”:

- Se actualiza el tiempo de simulación, siendo cada *tick* del programa equivalente a un día completo en la vida real, como ya se mencionó anteriormente. Esto implica que todas las edades y sus correspondientes actualizaciones están medidas en días, lo que permite una representación precisa del paso del tiempo dentro de la simulación y asegura que los cambios en las edades de los individuos sean consistentes con la escala temporal establecida.

La figura 3.3 presenta un diagrama conceptual que sintetiza la dinámica de interacción entre los diferentes agentes del modelo y su entorno. En él se distinguen los roles principales: el león macho nómada, el león macho sedentario, las hembras, los cachorros, los humanos y el entorno. Las flechas indican relaciones clave: los machos nómadas pueden enfrentarse a los sedentarios en peleas territoriales, además de tener una alta probabilidad de mortalidad (90 %) en encuentros con humanos. Asimismo, los machos nómadas pueden ejercer infanticidio sobre los cachorros al tomar control de un territorio. Los machos sedentarios, por su parte, establecen vínculos reproductivos con las hembras, mientras que tanto machos como hembras obtienen energía del entorno. Este esquema permite visualizar de manera simplificada los procesos fundamentales que estructuran la dinámica poblacional del modelo, incluyendo reproducción, competencia intraespecífica, presión antropogénica y flujo de energía.

3.1.3. Conceptos de diseño

3.1.3.1. Principios básicos

El modelo está diseñado bajo un enfoque individual, estocástico y orientado al ciclo básico de la vida (nacer, reproducirse y morir): la interacción dinámica entre los seres

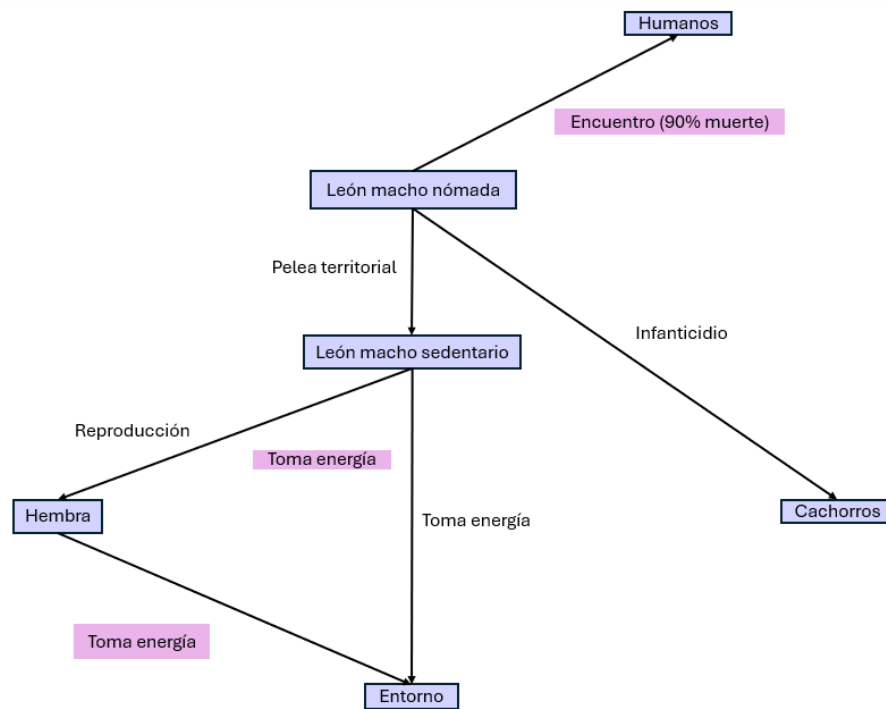


Figura 3.3: Interacciones entre leones, humanos y el entorno.

vivos y su entorno. Cada agente, ya sea un león o un humano, actúa de manera autónoma siguiendo un conjunto de reglas predefinidas. Su comportamiento está determinado tanto por sus atributos internos, como la edad, energía y estado, como por la información disponible en su entorno inmediato, incluyendo las características del territorio, la disponibilidad de presas, la presencia de otros humanos y de otros leones.

3.1.3.2. Emergencia

La dinámica poblacional y la distribución espacial de territorios emergen de las interacciones locales entre los agentes y con el entorno. No se programan reglas globales, sino que el comportamiento colectivo surge de la suma de las acciones individuales.

3.1.3.3. Adaptación y objetivos

No se programó adaptación ni la búsqueda de objetivos.

3.1.3.4. Estocasticidad

El modelo incorpora elementos aleatorios en:

- La asignación inicial de la edad y la energía.

- La determinación del tamaño de camada (utilizando distribuciones normales).
- La probabilidad de eventos críticos, tales como el acierto en la caza, la probabilidad de apareamiento, la probabilidad de muerte en enfrentamientos o por interacción con humanos.

3.1.3.5. Interacción

- **Entre agentes:** Interacciones entre leones machos, como peleas por territorios, y entre leones machos y hembras durante el apareamiento. Los leones nómadas interactúan con la manada de leones si ganan una pelea contra el macho dominante, llegando a matar a los cachorros para que las hembras entren en celo. Además, todos los leones, independientemente del género, interactúan con los humanos.
- **Con el entorno:** En la simulación, los leones machos sedentarios no se mueven físicamente; en su lugar, los cálculos asociados a su interacción se realizan sin presentar movimiento físico. Por el contrario, los leones machos nómadas sí se desplazan físicamente en el entorno, cazando para obtener energía. Este comportamiento fomenta peleas entre machos, enfrentamientos con humanos y la expulsión de los machos de la manada al alcanzar cierta edad. Las leonas, por su parte, interactúan con el medio ambiente al obtener energía de este. Los agentes en general se mueven y se alimentan en parches cuya disponibilidad de recursos varía en función del crecimiento de la presa (*grow-prey*).

3.1.3.6. Observación y salida

El modelo registra y permite observar:

- La evolución en el número de leones clasificados por edad (*cub, juvenile, mature*).
- Estadísticas de mortalidad desglosadas por causa (por inanición, edad, peleas, interacción con humanos, infanticidio).
- La asignación y dinámica de territorios en el entorno.

3.1.4. Detalles del modelo

3.1.4.1. Inicialización

No se utilizan datos de entrada externos en formato de archivo (e.g., *GIS*) para la inicialización del entorno espacial.

- **setup:** Procedimiento principal que limpia el entorno, inicializa parches y agentes, y reinicia el contador de “ticks”.

- **setup-patches:** Configura los parches; establece la variable *is-park?* en *true* para parches que caen dentro del radio definido y asigna una energía inicial a la presa de forma aleatoria.
- **setup-turtles:** Crea la población inicial de leones (hembras y machos) y asigna:
 - Energía inicial (con valor aleatorio en función de *initial-birth-energy*).
 - Edad inicial (distribuida aleatoriamente, considerando meses y días).
 - Estado y clase de edad (mediante *update-age-stage-class*).
 - Asignación de territorios en parches del parque, utilizando la lista de colores disponibles para distinguirlos.
- **allocate-humans:** Distribuye un número predefinido de humanos (*NH*) en parches que no pertenecen al parque.

3.1.4.2. Submodelos y procesos específicos

3.1.4.2.1 Reproducción

- Las hembras en estado *fertile* y que no son *cub* pueden iniciar el proceso de reproducción si existen machos sedentarios en su proximidad y se cumple la probabilidad de apareamiento.
- Durante el estado *gestating*, se decrementa el contador *t-gestation* (con variación aleatoria entre 100 y 120 días). Una vez finalizado, la hembra entra en estado *maternity* y da a luz mediante la función *hatch-females*, generando nuevos cubs que heredan parte de la energía de la madre y se clasifican como *cub*.

3.1.4.2.2 Caza y crecimiento de presas

- En el procedimiento *hunt*, se identifican parches con energía disponible (*energy-preys*) y se reparte la energía obtenida entre los leones que pertenecen al territorio asociado a dicho parche.
- El crecimiento de la presa se simula en el procedimiento *grow-prey*, en el cual los parches del parque incrementan o regeneran la energía de las presas de manera estocástica.

3.1.4.2.3 Interacción territorial y enfrentamientos

- Los machos con territorio (*sedentary*) pueden enfrentar a machos nómadas que se acerquen (definido por un radio *radius-herd*).
- Se evalúa la “fuerza” de cada león mediante la función *calculate-strength*, que combina la edad y la energía del león.

- Dependiendo del resultado del enfrentamiento:
 - El macho rival (nómada) puede tomar el territorio, o
 - Puede perder la pelea y sufrir una reducción en energía o incluso morir (con probabilidad definida por *probability-of-death-on-fight*).

3.1.4.2.4 Interacción con humanos

- Los leones en estado *nomad* que se encuentran en proximidad a humanos (dentro del radio *lion-humans-radius-interaction*) tienen una probabilidad (*dead - probability-with-humans*) de morir al interactuar.
- Esta interacción se registra mediante el contador *death-by-humans*.

3.1.4.2.5 Mortalidad

- Se evalúa la mortalidad en función de:
 - **Energía:** Si la energía del león es menor o igual a 0, se ejecuta *check-death* y se registra la muerte por inanición, diferenciando por clase de edad, estado y sexo.
 - **Edad:** Los machos y hembras tienen límites de edad (15 años) tras los cuales mueren, registrándose en contadores específicos (*death-by-age-nomad*, *death-by-age-sedentary*, *death-by-age-females*).

3.1.4.2.6 Actualización de la clase de edad y estados

- El procedimiento *update-age-stage-class* clasifica a los leones en:
 - *cub*: Desde el nacimiento hasta aproximadamente 2 años.
 - *juvenile*: Entre 2 y 3 años.
 - *mature*: A partir de 3 años.
- Esta clasificación es determinante para la capacidad reproductiva, la competencia territorial y la susceptibilidad a ciertos tipos de mortalidad.

3.1.4.2.7 Secuencia de eventos en cada *tick*

La ejecución del modelo en cada *tick* sigue la secuencia:

1. Incremento de la edad y disminución de energía en hembras y machos.
2. Ejecución del proceso de reproducción para hembras.
3. Realización de la caza (*hunt* y *hunt-nomads*).

4. Actualización de la clase de edad (*update-age-stage-class*).
5. Procesos de interacción territorial y enfrentamientos (*protec-territory*).
6. Interacción con humanos (*interaction-with-humans*).
7. Crecimiento de las presas (*grow-prey*).
8. Evaluación de la mortalidad (*check-death* y *mortality*).
9. Actualización de territorios en parches sin dueño.
10. Incremento del contador de “ticks”.

3.1.5. Conclusiones y posibles extensiones

El modelo permite estudiar la interacción compleja entre variables biológicas y ambientales en una población de leones, abarcando procesos de reproducción, caza, competencia territorial, interacción con humanos, y diversas causas de mortalidad. Gracias a su carácter estocástico y basado en agentes, surgen patrones emergentes que pueden ser analizados para intentar entender mejor la dinámica poblacional y territorial.

Posibles extensiones:

- Incorporar una mayor heterogeneidad espacial en el entorno, por ejemplo, variaciones en la calidad y distribución de las presas.
- Desarrollar estrategias de comportamiento más sofisticadas para la interacción entre leones y humanos o incluir otros factores ambientales.
- Ampliar el modelo con procesos de migración, dispersión o cambios en la estructura social de la manada.
- Una posible extensión es utilizar la funcionalidad existente del modelo para incorporar mapas en formato *.shp* para aumentar la precisión de las dinámicas simuladas.

3.1.6. Resultados esperados

El modelo permite proyectar la evolución de la población de leones bajo diferentes escenarios de manejo y conservación, identificando factores críticos para la supervivencia de la especie.

3.1.7. Relevancia

Este modelo es una herramienta valiosa para evaluar estrategias de conservación y entender la dinámica de los leones en un contexto de presión humana creciente.

3.2. Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante la comparación de sus resultados con datos empíricos obtenidos de estudios científicos sobre poblaciones de leones en diversas regiones de África. Para ello, se utilizaron fuentes bibliográficas especializadas que proporcionaron información clave sobre distintos aspectos de la biología y ecología de la especie.

Entre los parámetros contrastados con la literatura (cuadro 3.1) se incluyeron el número promedio de cachorros por camada, el tamaño medio de una manada, la esperanza de vida de los leones en estado salvaje, la tasa de mortalidad por infanticidio, el tiempo de gestación de las hembras y la edad promedio a la que los machos jóvenes son expulsados de la manada. Estos valores se compararon con datos reportados en estudios como los de Banerjee and Jhala (2012), Bauer et al. (2015b), Mosser and Packer (2009), entre otros.

Variable	Valor
Media de hembras en una manada	7
Desviación estándar de hembras en una manada	4
Número promedio de cachorros por camada	3
Esperanza de vida de los leones	15 años
Tasa de mortalidad por infanticidio	30 %
Tiempo de gestación de las hembras	100 – 120 días
Edad promedio de expulsión de la manada de machos jóvenes	2 años

Cuadro 3.1: Valores de variables biológicas en leones

El modelo también fue evaluado en términos de su capacidad para reproducir patrones observados en la naturaleza, como la estabilidad del tamaño poblacional en condiciones sin presión humana y la variabilidad en la estructura social de las manadas. La comparación de los resultados simulados con datos empíricos indicó que el modelo se acerca de manera realista la dinámica de los leones en su entorno natural. Asimismo, los resultados mostraron que los tamaños de las manadas no superaron los valores máximos reportados en la literatura, lo que sugiere un proceso de autoorganización dentro del sistema. De manera adicional, surgieron patrones emergentes, como la proporción de hembras en las manadas, lo cual refuerza la utilidad del modelo para explorar la dinámica social y poblacional de la especie.

No obstante, se reconoce que existen limitaciones en la representación de ciertos factores, como la influencia del cambio climático y la variabilidad en la disponibilidad de presas. A pesar de estas limitaciones, el modelo constituye una herramienta válida para el estudio de la dinámica poblacional de los leones y su aplicación en estrategias de conservación.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos a partir de la ejecución del modelo de simulación en un entorno paralelo, lo que permitió optimizar el tiempo computacional y procesar un volumen significativo de datos. Cada escenario fue configurado con un conjunto específico de parámetros ecológicos, definidos de manera constante a lo largo de las 50 repeticiones independientes realizadas por escenario. El cuadro 4.2 resume los parámetros y sus respectivos valores seleccionados para representar condiciones plausibles de equilibrio ecológico frente a la presión humana, entendida como la constante expansión de asentamientos humanos y la progresiva reducción de las áreas destinadas a conservación.

Cada simulación abarcó 250,000 “ticks”, equivalentes a aproximadamente 685 años en tiempo ecológico, lo que permitió observar patrones de persistencia poblacional y respuesta adaptativa en el largo plazo. Esta escala temporal cubre cerca de 46 generaciones de leones, ofreciendo una perspectiva amplia sobre la dinámica y resiliencia de la población modelada.

La estructura del modelo permite ajustar diversos parámetros —como las tasas de natalidad, mortalidad, comportamiento de caza e impacto humano— directamente desde la interfaz del programa, lo que facilita su configuración según distintos escenarios ecológicos. Para esta etapa del análisis, se fijaron valores diseñados para reflejar un ecosistema en el que la población de leones pudiera mantenerse viable a lo largo del tiempo, incluso bajo condiciones adversas.

El procesamiento de los datos generados por las simulaciones se realizó en *Python* utilizando la librería *Pandas*, lo cual permitió limpiar, organizar y analizar eficientemente el gran volumen de información generado. A través de esta herramienta, se calcularon estadísticas descriptivas y se identificaron tendencias clave para evaluar el comportamiento del sistema simulado y su sensibilidad frente a distintas condiciones.

Antes de presentar los resultados obtenidos por medio de las simulaciones, es pertinente mostrar la interfaz gráfica del modelo, desarrollada en la plataforma *NetLogo*. Esta interfaz permite ajustar parámetros clave del sistema, visualizar en tiempo real la evolución de la población y monitorear eventos relevantes como muertes por inanición, infanticidio o interacciones con humanos. La figura 4.1 ilustra la disposición de los con-

Nombre del parámetro	Valor del parámetro	Descripción del parámetro
Hembras iniciales	100	Número inicial de hembras.
Machos iniciales	33	Número inicial de machos.
Número de humanos	1,000	Número total de humanos.
Densidad inicial de presas	0.1	Porcentaje de patches con energía disponible para cazar.
Promedio de hembras en la manada	7	Promedio de hembras en una manada.
Desviación estándar de hembras en la manada	4	Desviación estándar de hembras en una manada.
Probabilidad de crecimiento de presas	0.01	Probabilidad de que un patch sin energía ahora la contenga.
Crecimiento de presas	0.01	Probabilidad de aumento de energía en un patch existente.
Radio de manada	3	Radio del centro de reunión de las manadas.
Probabilidad de embarazo	0.1	Probabilidad de que una hembra no quede embarazada tras interacción.
Probabilidad de morir ante humanos	0.9	Probabilidad de que un león muera al interactuar con humanos.
Energía de nacimiento	3	Energía perdida por una hembra al dar a luz.
Energía inicial de presas	50	Rango inicial de energía en un patch.
Pérdida de energía	0.1	Energía perdida por un león con el tiempo.
Pérdida de energía por peleas	2	Energía perdida por un macho en encuentros territoriales.
Probabilidad de morir en batalla	0.8	Probabilidad de que un macho muera en encuentros territoriales.
Energía por alumbramiento	250	Energía inicial al nacer de un león.
Porcentaje de energía perdido por caza de nómadas	0.8	Cantidad de energía obtenida por nómadas de una presa.
Radio de interacción con humanos	0.8	Radio de interacción entre un humano y un león.

Cuadro 4.2: Tabla de parámetros del modelo

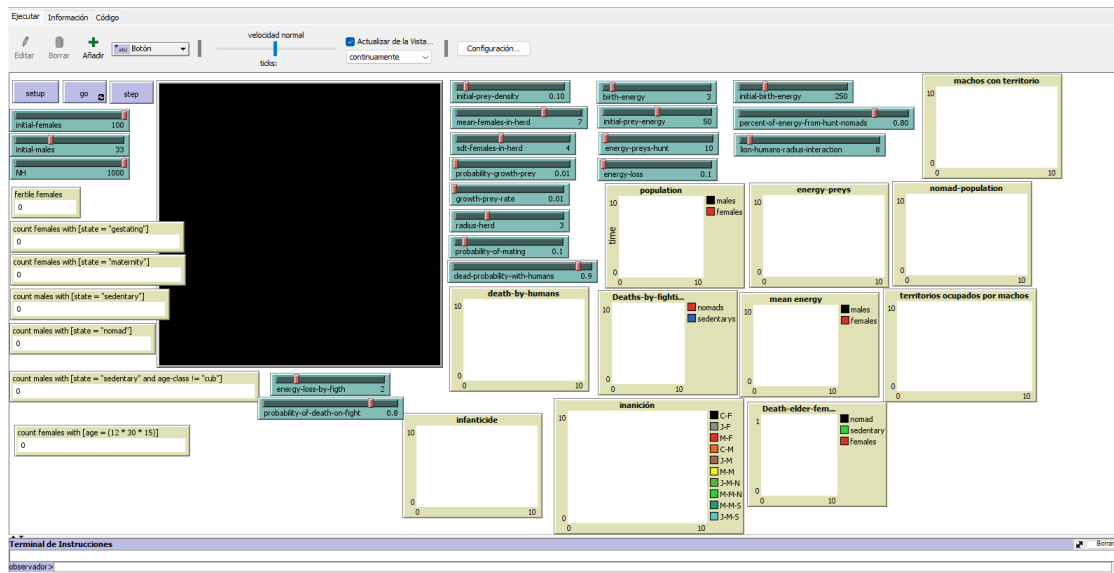


Figura 4.1: Captura de pantalla de la interfaz del modelo de simulación desarrollado en *NetLogo*. Se muestran los controles principales, los parámetros ajustables, las gráficas de resultados y los contadores de estado de los agentes.

troles, gráficas y campos de observación utilizados para llevar a cabo los experimentos descritos en las secciones siguientes.

4.1. Gráficas

A continuación, se presentan las gráficas que ilustran visualmente los resultados del modelo. Cada figura muestra la evolución temporal de una variable clave, construida a partir de la agregación estadística de los datos obtenidos en las 50 repeticiones por escenario. Para cada uno de los 250,000 “ticks”, se calcularon la media y la desviación estándar de cada una de las 26 variables registradas, generando así una serie temporal consolidada.

En las gráficas, la línea central representa la media de los valores registrados para cada variable en cada instante de tiempo, mientras que el área sombreada indica la desviación estándar, reflejando la variabilidad entre ejecuciones. Este enfoque permite visualizar tanto la tendencia general como la dispersión estocástica de los datos, ofreciendo una comprensión más robusta del comportamiento del sistema simulado.

4.1.1. Total de individuos en el tiempo

En las gráficas de la figura 4.2, las poblaciones de machos y hembras tienden a alcanzar un estado de equilibrio dinámico a lo largo del tiempo. Esta tendencia indica una capacidad del sistema simulado para ajustarse a las condiciones internas del

entorno modelado, permitiendo la supervivencia sostenida de ambas poblaciones en el largo plazo. Cabe destacar que este análisis considera el comportamiento agregado de toda la población, sin segmentación por rangos de edad. Hablando de la evolución temporal durante la fase inicial de las simulaciones (los primeros miles de días simulados) se observa un crecimiento acelerado de ambas poblaciones, con tasas promedio de aproximadamente 0.07 machos por *tick* y 0.1 hembras por *tick*, hasta alcanzar sus respectivos picos iniciales. Este comportamiento responde a un entorno en el que los recursos no presentan limitaciones inmediatas, lo que favorece una tasa de reproducción superior a la de mortalidad. A medida que transcurre el tiempo, dicho crecimiento comienza a desacelerarse hasta alcanzar un punto de estabilización o incluso una leve disminución, lo cual sugiere la presencia de mecanismos de autorregulación en el sistema. Esta ralentización se puede interpretar como una aproximación a la capacidad de carga del entorno modelado, en donde factores como la competencia intraespecífica o la limitación de recursos comienzan a influir de manera más marcada en la dinámica poblacional.

De manera más precisa, al analizar el intervalo comprendido entre los 150,000 y 200,000 días (aproximadamente 137 años), se observa un decrecimiento promedio en ambas poblaciones. En el caso de las hembras, la población disminuye de alrededor de 400 a 370 individuos, lo que equivale a una reducción promedio de aproximadamente 0.219 hembras por año ($\approx 0.055\%$ anual respecto al tamaño inicial). En los machos, la reducción va de cerca de 130 a 115 individuos, con una tasa de decrecimiento promedio de aproximadamente 0.109 machos por año ($\approx 0.084\%$ anual). Estos valores indican una ligera tendencia decreciente en el largo plazo, aunque a una magnitud mucho menor que la que documentan estudios de campo y revisiones continentales.

En efecto, distintos análisis poblacionales muestran que las poblaciones de leones en África han declinado de manera mucho más pronunciada, con reducciones acumuladas del 40–75 % en períodos de 20 a 50 años, lo que equivale a tasas compuestas anuales de 2–4 % Bauer et al. (2015a); Henschel and et al. (2014); Group (2015); Loveridge et al. (2022); Mweetwa et al. (2018). Esto implica que el modelo aquí presentado reproduce una dinámica poblacional mucho más estable que la observada en contextos reales, lo que sugiere que ciertos factores de mortalidad o presión antrópica presentes en la realidad no están del todo reflejados en la simulación.

Tras alcanzar esta etapa de madurez poblacional, se observan fluctuaciones recurrentes en ambas curvas (machos y hembras) alrededor de sus respectivas medias. Este patrón no debe interpretarse como inestabilidad, sino como una manifestación típica de la dinámica ecológica en sistemas complejos, en donde los efectos estocásticos introducen variabilidad temporal aun en ausencia de cambios en los parámetros estructurales del modelo. Las simulaciones revelan que, aunque las condiciones son homogéneas, los resultados individuales pueden diferir significativamente debido a la influencia del azar en cada ejecución.

Aunque las 50 simulaciones comparten idénticos parámetros y condiciones iniciales, cada una presenta una trayectoria poblacional ligeramente distinta. Esto ocurre porque los eventos probabilísticos —por ejemplo, si una hembra se reproduce o no en un día

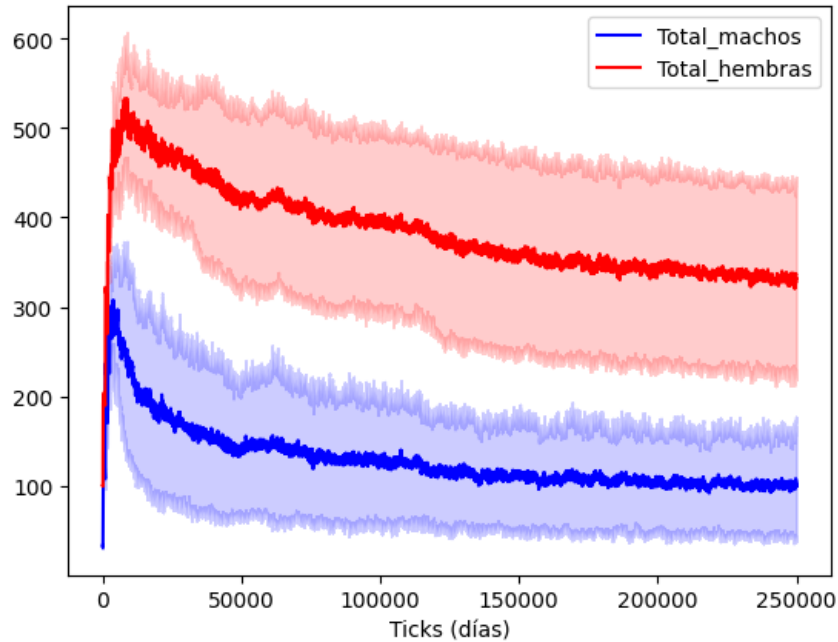


Figura 4.2: Población total de machos y hembras a lo largo del tiempo.

dado, o si un individuo muere prematuramente— pueden tener consecuencias acumulativas a lo largo de los 250,025 días de simulación. Incluso pequeñas diferencias iniciales en eventos clave pueden producir efectos amplificados en generaciones posteriores, fenómeno comúnmente conocido como “efecto bola de nieve”. De este modo, la variabilidad observada es un reflejo directo de cómo la incertidumbre inherente a procesos biológicos puede conducir a resultados diferentes, aunque se parta de condiciones aparentemente idénticas.

Lejos de ser un defecto del modelo, la dispersión registrada ofrece información valiosa: permite conocer no solo el comportamiento promedio de la población, sino también el rango de posibles escenarios realistas que podrían observarse en un sistema natural con características similares. En este sentido, la dispersión cuantifica la incertidumbre de los resultados y da cuenta de la robustez del modelo frente a la aleatoriedad. Si bien sería ideal contar con un número mayor de simulaciones para mejorar la precisión estadística, el conjunto actual de 50 simulaciones ya proporciona una base sólida para interpretar tendencias y evaluar la estabilidad del sistema ecológico simulado.

En las gráficas de las figuras 4.3 y 4.4, se muestra la evolución temporal de las poblaciones de machos y hembras, esta vez desagregadas por rangos etarios específicos. Al igual que en las gráficas de población total previamente analizadas, se observa una clara tendencia hacia la estabilización, aunque con matices particulares en función del grupo etario considerado.

En la gráfica 4.3 al enfocar el análisis en el intervalo comprendido entre los 150,000 y 200,000 días (≈ 137 años), se aprecia que los *machos sedentarios* pasan de aproxima-

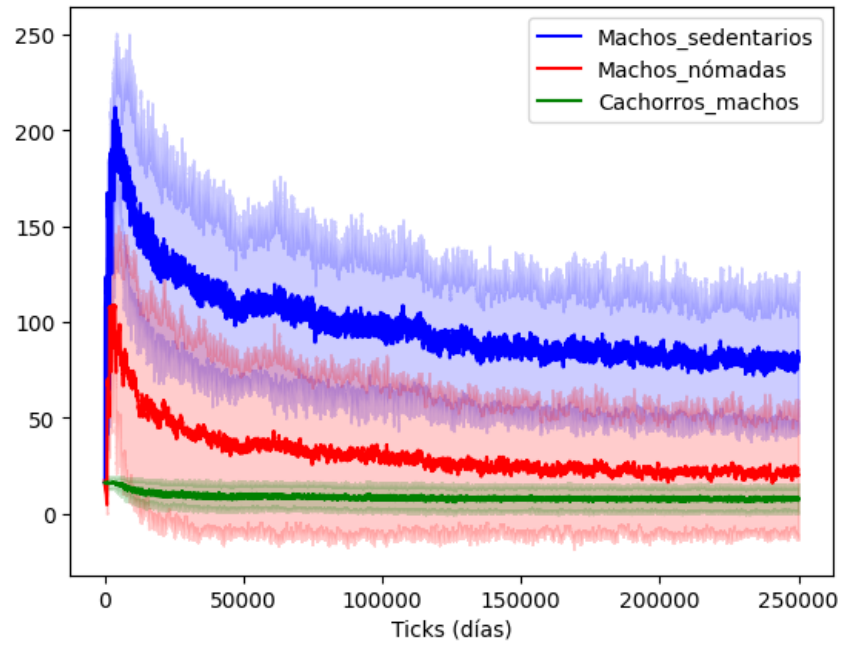


Figura 4.3: Población de machos en el tiempo.

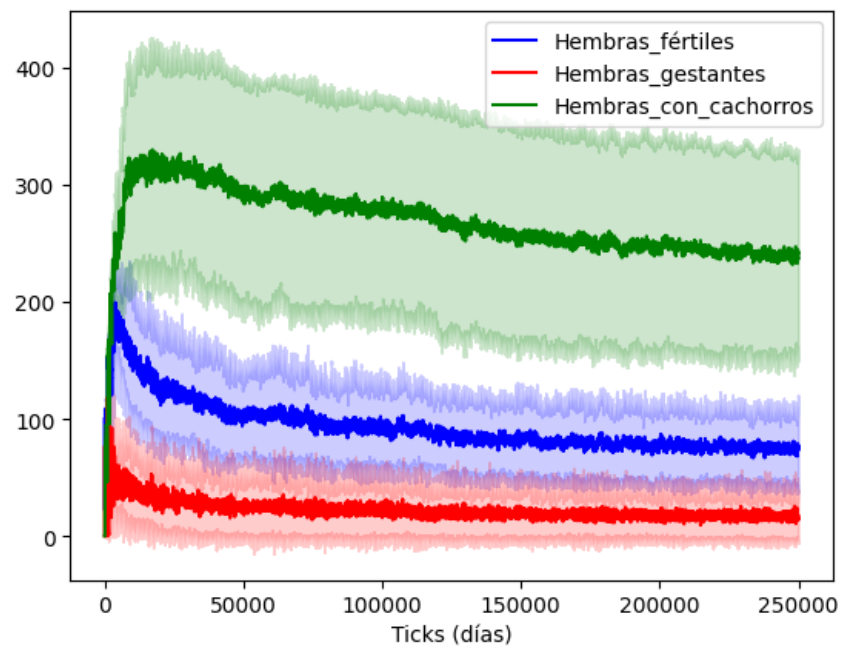


Figura 4.4: Población de hembras en el tiempo.

damente 100 a 85 individuos, lo que corresponde a un decrecimiento de ≈ 0.109 machos por año ($\approx 0.109\%$ anual). En el caso de los *machos nómadas*, la reducción es de 40 a 30 individuos, con una tasa de ≈ 0.073 machos por año ($\approx 0.182\%$ anual). Finalmente, los *cachorros machos* descienden de 10 a 8 individuos, lo que implica una pérdida de ≈ 0.015 machos por año ($\approx 0.15\%$ anual). Estas cifras refuerzan la idea de una población que, si bien tiende hacia la estabilidad, mantiene un decrecimiento leve y constante, más marcado en los grupos más vulnerables como los nómadas y los cachorros.

En la figura 4.4 se observa que durante la fase inicial de las simulaciones existe un marcado crecimiento de las subpoblaciones de hembras: las fértiles aumentan a un ritmo de aproximadamente 0.04 individuos por *tick*, las gestantes a 0.035 por *tick* y las que se encuentran con cachorros a 0.064 por *tick*, alcanzando sus máximos en los primeros miles de días simulados. Posteriormente, todas las curvas muestran un descenso sostenido: las fértiles decrecen a un ritmo cercano a -0.0022 individuos por *tick*, las gestantes a -0.0011 por *tick* y las hembras con cachorros a -0.0016 por *tick*, estabilizándose en valores menores y reflejando un proceso de ajuste poblacional tras el pico inicial.

A nivel agregado, las trayectorias de cada grupo etario se integran para reproducir la misma tendencia de comportamiento observada en las gráficas de población total: una fase inicial de expansión, seguida de una estabilización dinámica alrededor de valores medios, con fluctuaciones acotadas por la desviación estándar. Esta coherencia entre los niveles de análisis (total y desagregado por edad) no solo valida la consistencia del modelo, sino que permite atribuir patrones específicos a procesos biológicos concretos en diferentes fases del ciclo de vida.

En suma, los resultados por clasificación etaria confirman la tendencia general observada en las poblaciones totales, pero enriquecen el análisis al revelar la contribución específica de cada grupo de edad a la dinámica poblacional global. Estos hallazgos refuerzan la utilidad del modelo como herramienta para explorar sistemas ecológicos complejos y subrayan la importancia de considerar la estructura etaria para una comprensión más completa y precisa del comportamiento poblacional de especies como el león.

4.1.2. Muertes por encuentros territoriales

En la figura 4.5, al igual que en las gráficas anteriores, el eje x representa el tiempo medido en “ticks”, mientras que el eje y muestra la cantidad acumulada de muertes, abarcando un rango aproximado de -500 a 3,500. Cabe señalar que, especialmente al inicio de la simulación, los intervalos de confianza (representados por las áreas sombreadas) pueden extenderse hacia valores negativos. Este fenómeno es común cuando el valor esperado está cercano a cero, aunque conceptualmente el número de muertes acumuladas no puede ser negativo, sino únicamente igual o superior a cero.

- Línea azul (“*death by figths*”): dicha curva representa el total acumulado de muertes por peleas o encuentros territoriales dentro del sistema simulado. Su comportamiento es de crecimiento constante y aproximadamente lineal a lo largo del

tiempo, iniciando en cero y alcanzando entre 1,300 y 1,400 muertes al finalizar la simulación (en el *tick* 250,025). La pendiente de esta línea sugiere que las muertes por peleas crecen de manera continua, pero con una clara desaceleración temporal: la tasa promedio en toda la simulación es de aproximadamente 0.0055 muertes por *tick* ($\approx 1,400$ muertes a 250,000 días). En la fase inicial la pendiente es más alta (≈ 0.012 muertes/*tick* en los primeros 50,000 *ticks*), luego se reduce en el tramo medio (≈ 0.006 muertes/*tick* entre 50,000 y 150,000) y cae aún más en tiempos largos (≈ 0.0025 muertes/*tick* después de 150,000). En resumen, aunque el acumulado sigue subiendo, la tasa instantánea no es estable: muestra un pico temprano y una progresiva disminución —es decir, crecimiento acumulado sublineal en el largo plazo.

- Línea roja (“*death by figths nomad*”): corresponde a las muertes acumuladas por peleas en individuos nómadas. Su trayectoria es también lineal y creciente, muy similar a la línea azul, aunque consistentemente por debajo de ella. Al final del periodo simulado, acumula entre 1,000 y 1,100 muertes. Esto indica que los individuos nómadas son responsables de una proporción significativa de las muertes por conflictos territoriales, posiblemente debido a su mayor exposición o involucramiento en estos eventos.
- Línea verde (“*death by figths sedentary*”): representa las muertes acumuladas por peleas en individuos sedentarios. Al igual que las otras, presenta un incremento sostenido, pero su pendiente es visiblemente menor. Al final de la simulación, acumula entre 900 y 1,000 muertes, lo que indica una menor mortalidad por encuentros territoriales en comparación con los nómadas. Esta diferencia puede atribuirse a que los individuos sedentarios, al permanecer en un territorio definido, tienen mayores probabilidades de mantenerse alimentados y posiblemente cuentan con más experiencia en la defensa de su espacio.

A medida que transcurre el tiempo, se observa que los intervalos de confianza se ensanchan progresivamente. Esto es esperable en procesos acumulativos, donde la incertidumbre se incrementa con la duración de la simulación. Es decir, el número de muertes posibles se vuelve más variable conforme avanza la simulación.

La superposición entre las áreas sombreadas es también relevante. El área azul, que representa el total de muertes, abarca las áreas roja y verde, lo cual es coherente con la idea de que el total es la suma de las contribuciones de nómadas y sedentarios. Además, se observa una superposición considerable entre las áreas roja y verde durante las etapas iniciales de la simulación. Esto sugiere que, en ese periodo, la diferencia en mortalidad entre ambos grupos podría no ser estadísticamente significativa. Sin embargo, conforme avanzan los “*ticks*”, las líneas se separan visiblemente y los intervalos dejan de solaparse completamente, lo que indica una divergencia más clara en la mortalidad acumulada de ambos grupos.

En conjunto, los resultados muestran que los individuos nómadas sufren de manera consistente un mayor número de muertes por conflictos territoriales que los sedentarios.

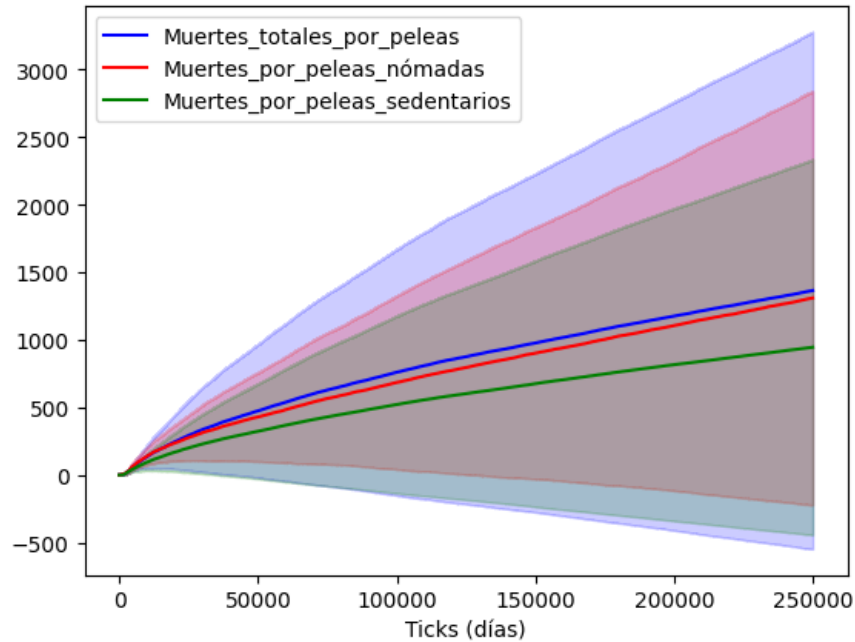


Figura 4.5: Muertes por encuentros territoriales.

Esto podría interpretarse como una consecuencia del estilo de vida móvil, que conlleva una mayor exposición a encuentros territoriales peligrosos.

Finalmente, la tasa de muertes —tanto para cada grupo como en el total— se mantiene relativamente constante, sin indicios de aceleración o desaceleración en el transcurso de la simulación. En promedio, las muertes totales por peleas ocurren a un ritmo de aproximadamente 54 individuos cada 10,000 *ticks*, siendo ligeramente mayor la contribución de los machos nómadas (≈ 50 muertes cada 10,000 *ticks*) en comparación con los machos sedentarios (≈ 38 muertes cada 10,000 *ticks*). La presencia de intervalos de confianza resulta fundamental, ya que evidencia que los valores presentados no son deterministas, sino que representan un rango plausible de resultados dentro de la estocasticidad inherente al modelo.

4.1.3. Muertes por inanición

En el contexto de la simulación, se define la muerte por inanición como la eliminación de un agente (león) cuya energía, determinada por los parámetros iniciales, se reduce a cero debido a la incapacidad de recuperar dicha energía mediante la alimentación. Este mecanismo busca representar de forma simplificada el desgaste fisiológico que experimentan los individuos cuando no logran acceder a fuentes de alimento a lo largo del tiempo.

El análisis de los resultados obtenidos revela que los cachorros de ambos sexos son los individuos más vulnerables a la mortalidad por inanición, como se ilustra en la figura

4.7. Esta alta vulnerabilidad se explica por su total dependencia del grupo adulto para la alimentación y su limitada capacidad para competir por recursos en periodos de escasez.

Al comparar las tasas de mortalidad por inanición entre los distintos grupos etarios, se observa una disparidad notable. Las gráficas correspondientes a los cachorros (azul y roja) mostraron una tendencia similar, registrando aproximadamente 850 muertes en los primeros 10,000 *ticks*.

En contraste, la gráfica del grupo de hembras adultas registró alrededor de 150 muertes en el mismo periodo. Si estos valores se comparan con los datos presentados en la figura 4.8, se evidencia una diferencia significativa:

- Hembras jóvenes: Aproximadamente 100 muertes.
- Hembras adultas: Alrededor de 200 muertes.
- Machos adultos: Aproximadamente 10 muertes.
- Machos jóvenes y adultos nómadas: Menos de 1 muerte.

La marcada diferencia en los números de muertes subraya la alta vulnerabilidad de los cachorros en comparación con los demás grupos de edad.

Los leones adultos sedentarios mostraron ser el grupo menos afectado por la mortalidad por inanición. Se observó que el número de muertes por esta causa en machos adultos fue de 0 (ver figura 4.6) a lo largo del periodo de estudio. Este fenómeno puede atribuirse a su prioridad en el acceso a la alimentación durante las cacerías, lo que reduce su riesgo de inanición.

4.1.4. Muertes causadas por humanos e infanticidios

La gráfica 4.9, titulada “Muertes por humanos e infanticidios”, presenta la acumulación de muertes a lo largo del tiempo o los pasos de la simulación.

- **Línea azul (*death by humans*):**
 - Representa el total de muertes acumuladas causadas directamente por humanos.
 - Incremento constante y aproximadamente lineal a lo largo de los *ticks*.
 - La mortalidad causada por la interacción con humanos comienza en 0 y alcanza aproximadamente las 11,000 muertes al final de la simulación, lo que equivale a un promedio de 16 muertes por año. Como se detalla en la sección 4.1.4 al, al final de la simulación hay aproximadamente 480 individuos, la tasa de muertes representa aproximadamente el 4% de la población total al final del estudio.

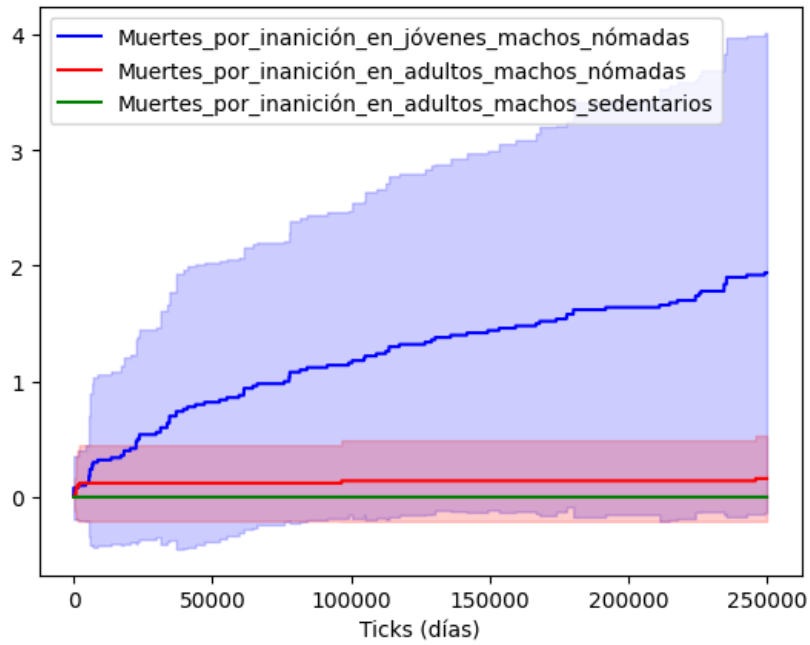


Figura 4.6: Muertes por inanición en machos nómadas y sedentarios.

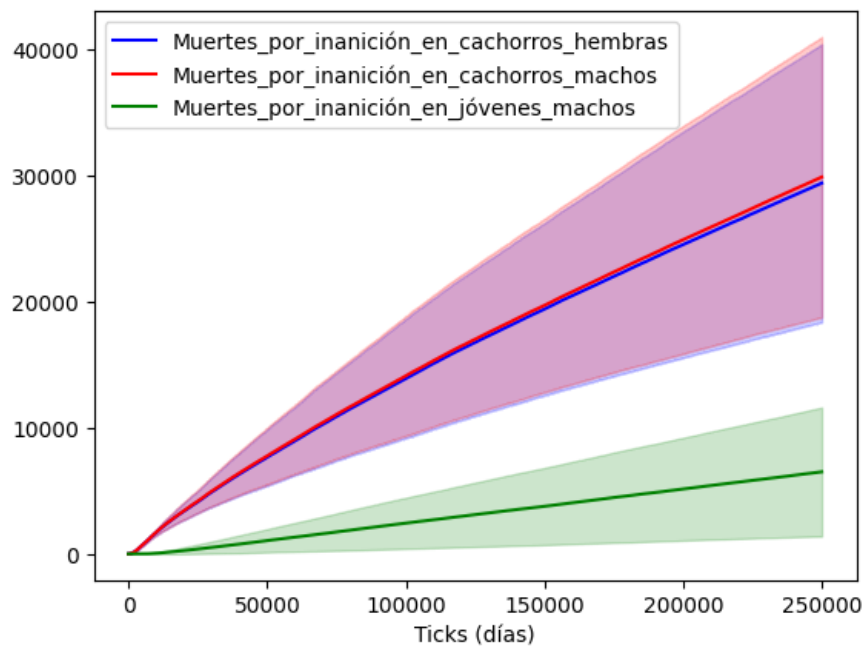


Figura 4.7: Muertes por inanición en cachorros y jóvenes.

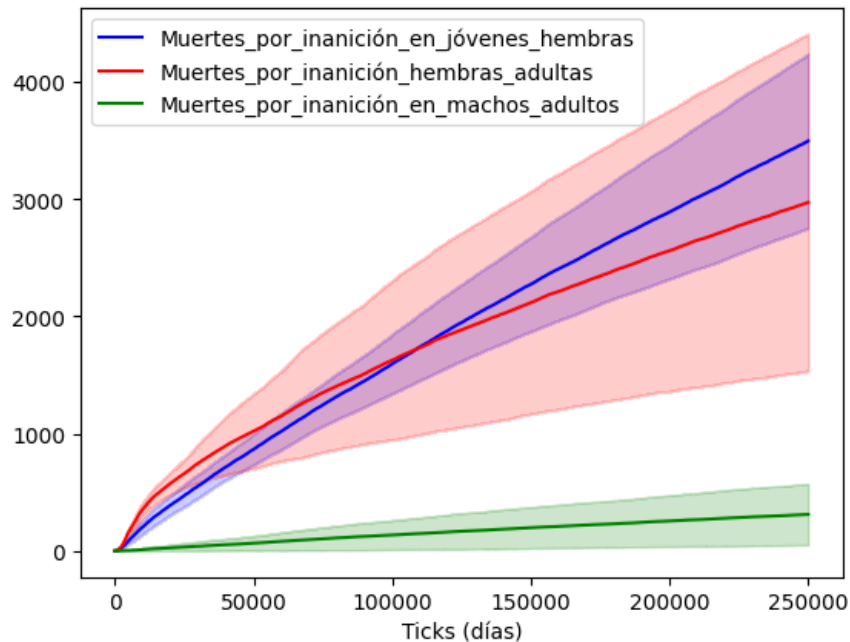


Figura 4.8: Muertes por inanición.

- Su pendiente es menor que la de los infanticidios, indicando una tasa de acumulación de muertes más lenta, 0.16 % anual.
- **Línea roja (*death by infanticide*):**
 - Muestra las muertes acumuladas debido al infanticidio.
 - Crecimiento constante con una pendiente más pronunciada, especialmente al inicio, con un aproximado de 29 muertes por año.
 - Siempre por encima de la línea azul, indicando mayor cantidad de muertes por infanticidio.
 - Alcanza alrededor de 20,000 muertes al final de la simulación, comparado con el total de individuos (480) y las 29 muertes por año, la tasa de muertes representa al rededor de 6.25 % del total.
 - **Áreas sombreadas (Intervalos de confianza/incertidumbre):**
 - Se ensanchan con el tiempo, mostrando la incertidumbre acumulativa en procesos simulados.
 - El área sombreada roja es más ancha, reflejando mayor variabilidad en muertes por infanticidio.
 - El límite inferior del área roja generalmente se mantiene por encima del límite superior del área azul, indicando que las muertes por infanticidio son estadísticamente mayores.

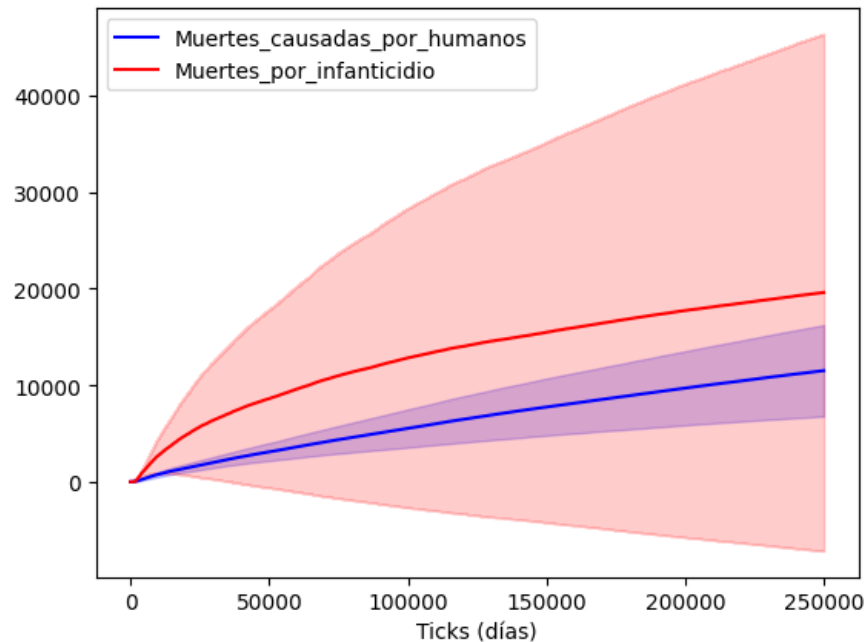


Figura 4.9: Muertes por humanos e infanticidios.

Cuando un nuevo león macho, o una coalición de machos, logra desplazar a los anteriores dominantes y tomar el control de una manada, su prioridad reproductiva es maximizar la descendencia propia en el menor tiempo posible. Sin embargo, las hembras que aún amamantan cachorros —descendientes de los antiguos machos— no entran en celo, lo que retrasa la posibilidad de reproducción para los nuevos líderes.

Para contrarrestar esta limitación, el nuevo macho dominante adopta una estrategia evolutivamente arraigada: el infanticidio. La eliminación sistemática de cachorros no destetados responde a dos presiones selectivas fundamentales:

- **Aceleración de la reproducción:** Al eliminar a los cachorros, las hembras dejan de amamantar, lo que permite una rápida recuperación fisiológica y la entrada en celo en cuestión de semanas o meses. Esto optimiza el tiempo disponible para que el nuevo macho genere descendencia propia.
- **Eliminación de competencia genética:** Se asegura de que toda la inversión parental de las hembras se dirija exclusivamente a sus propios cachorros, eliminando la línea genética de sus predecesores y favoreciendo la propagación de sus propios genes.

Si bien el infanticidio es un evento drástico a nivel individual, su representación en la simulación es crucial para reflejar fielmente la estructura y dinámica poblacional de los leones. Su alta incidencia impacta en los siguientes aspectos:

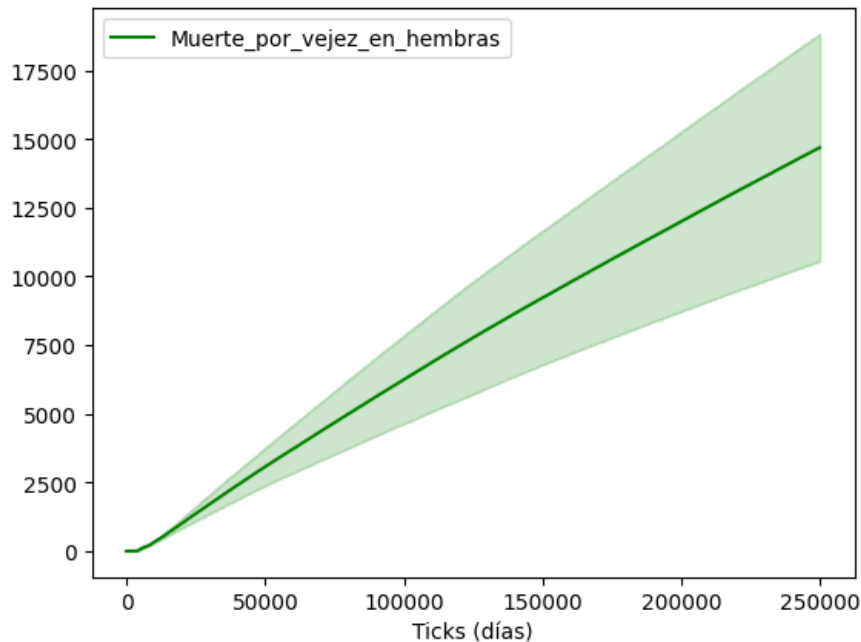


Figura 4.10: Acumulación de muertes por edad en hembras.

- **Determinación del legado genético:** La eliminación de cachorros de antiguos machos garantiza que el nuevo dominante transmita su linaje a la siguiente generación, reforzando el ciclo de sucesión genética.
- **Regulación de la dinámica poblacional:** Este mecanismo, aunque brutal, actúa como un filtro selectivo que influye en la composición genética de la manada y en los patrones de crecimiento poblacional a lo largo del tiempo.
- **Reflejo de la competencia intraespecífica:** La presencia del infanticidio en la simulación enfatiza la intensa competencia entre machos por el control de la manada y el acceso a hembras reproductivas, un proceso que define la estructura social de la especie.

Este fenómeno, lejos de ser un evento aleatorio, forma parte de una estrategia reproductiva adaptativa cuya manifestación es clave en la dinámica de la población simulada.

4.1.5. Muertes por edad en hembras

La figura 4.10 titulada “Muertes por edad en hembras” ilustra la acumulación de muertes de leonas a lo largo del tiempo de simulación, medido en “tick”, específicamente aquellas atribuidas a causas relacionadas con la edad (es decir, mortalidad natural por vejez o causas intrínsecas del envejecimiento).

Comportamiento de la línea principal

- **Línea verde (*death-by-age-females*):** Esta línea representa el total acumulado de muertes de leonas que han fallecido debido a causas asociadas con la edad.
- La línea exhibe un incremento constante y marcadamente lineal, aproximadamente 22 muertes por año, a lo largo de toda la simulación. Parte de 0 muertes y asciende progresivamente hasta alcanzar aproximadamente entre 14,500 y 15,000 muertes al llegar a los 250,025 “tick”.
- La pendiente constante de la línea sugiere que la tasa de mortalidad por edad en hembras se mantiene relativamente estable a lo largo del tiempo de la simulación. Esto implica que las leonas alcanzan una edad avanzada y mueren de causas naturales de manera continua y predecible dentro del modelo.

Área sombreada (intervalo de confianza/incertidumbre)

- El área sombreada alrededor de la línea verde representa el intervalo de confianza o el rango de incertidumbre de los resultados de la simulación. Esto es crucial para entender la variabilidad inherente en el modelo.
- Se observa que el intervalo de confianza se ensancha significativamente a medida que avanza el tiempo (“ticks”). Al inicio, es muy estrecho, indicando poca variabilidad en las muertes por edad. Sin embargo, al final de la simulación, el rango se extiende desde aproximadamente 10,000 hasta 19,000 muertes. Este ensanchamiento es una característica común en procesos acumulativos y sugiere que, aunque la tendencia es lineal, el número exacto de muertes por edad puede variar considerablemente entre diferentes ejecuciones de la simulación debido a la estocasticidad del modelo.

Implicaciones en el contexto de la población de leones

- Esta gráfica destaca que la mortalidad por edad es un factor significativo y persistente en la dinámica poblacional de las leonas dentro del modelo. En comparación con otras causas de muerte vistas en análisis previos (como muertes por humanos o infanticidios), 20,000 muertes causadas por humanos y 11,000 muertes causadas por infanticidio, la mortalidad por edad en hembras representa una contribución sustancial al número total de muertes acumuladas, con un total de 15,000.
- El patrón lineal sugiere que, en el modelo, una proporción constante (22 muertes por año aproximadamente) de la población femenina envejece y muere, lo que contribuye a la renovación demográfica.
- La considerable amplitud del intervalo de confianza al final de la simulación indica que, aunque el envejecimiento es una causa de muerte inevitable, factores estocásticos o la interacción con otras dinámicas del modelo pueden influir en el

número preciso de leonas que alcanzan la vejez y mueren por esta causa en un momento dado. Esto podría estar relacionado con la variabilidad en las tasas de supervivencia en etapas de vida anteriores o con la fluctuación de los tamaños de las cohortes.

4.1.6. Correlaciones

La figura 4.11 presenta la matriz de correlación de las medias para las diferentes variables monitoreadas a lo largo de las simulaciones. Esta matriz es una herramienta crucial para identificar la fuerza y dirección de las relaciones lineales entre las distintas métricas de la dinámica poblacional de leones. Los valores oscilan entre 1 (correlación positiva perfecta, color rojo intenso) y -1 (correlación negativa perfecta, color azul intenso), con valores cercanos a cero (colores claros o blanco) indicando una ausencia de correlación lineal. Es importante señalar que los espacios en blanco en la matriz corresponden a pares de variables cuya correlación lineal es nula o tan insignificante que su valor medio se aproxima a cero, o bien, no fue calculable debido a la ausencia de variabilidad en una de las series de datos a lo largo de las simulaciones. Las abreviaturas de la figura 4.11 se señalan en el glosario de términos.

Correlaciones positivas de alta magnitud

Un patrón dominante en la matriz es la presencia de correlaciones positivas muy fuertes, con valores que frecuentemente se aproximan a 0.990 o 1.000, especialmente en el cuadrante superior izquierdo que agrupa la mayoría de las categorías de muerte. Esto sugiere que las diferentes causas de mortalidad en el modelo están altamente interrelacionadas. Por ejemplo, “*mean-death-by-age-females*”, “*mean-death-by-fights*”, “*mean-death-by-humans*”, “*mean-death-by-infanticide*” y diversas categorías de “*mean-death-by-inanition*” (muertes por inanición en cachorros, juveniles y adultos de ambos sexos, tanto nómadas como sedentarios) muestran una fuerte correlación positiva entre sí. Esto implica que, si una causa de muerte aumenta su incidencia media en el sistema, es altamente probable que otras causas de muerte también lo hagan. Esto podría ser indicativo de un factor subyacente de estrés poblacional o de recursos, donde las condiciones que propician un tipo de mortalidad (e.g., peleas territoriales) también exacerban otras (e.g., inanición debido a la competencia por recursos).

Relación entre reproducción y mortalidad por infanticidio

Una de las correlaciones más notables y con implicaciones directas en la dinámica de las manadas es la observada entre “*mean-death-by-infanticide*” y las variables de actividad reproductiva de las hembras. Específicamente, “*mean-death-by-infanticide*” presenta correlaciones extremadamente altas con “*mean-female-gestating*” (0.990) y “*mean-female-maternity*” (0.980). Este hallazgo robustece la explicación de que el número de muertes por infanticidio está intrínsecamente ligado al ciclo reproductivo de las leonas. Una mayor actividad reproductiva (más hembras gestando o con crías) conlleva,

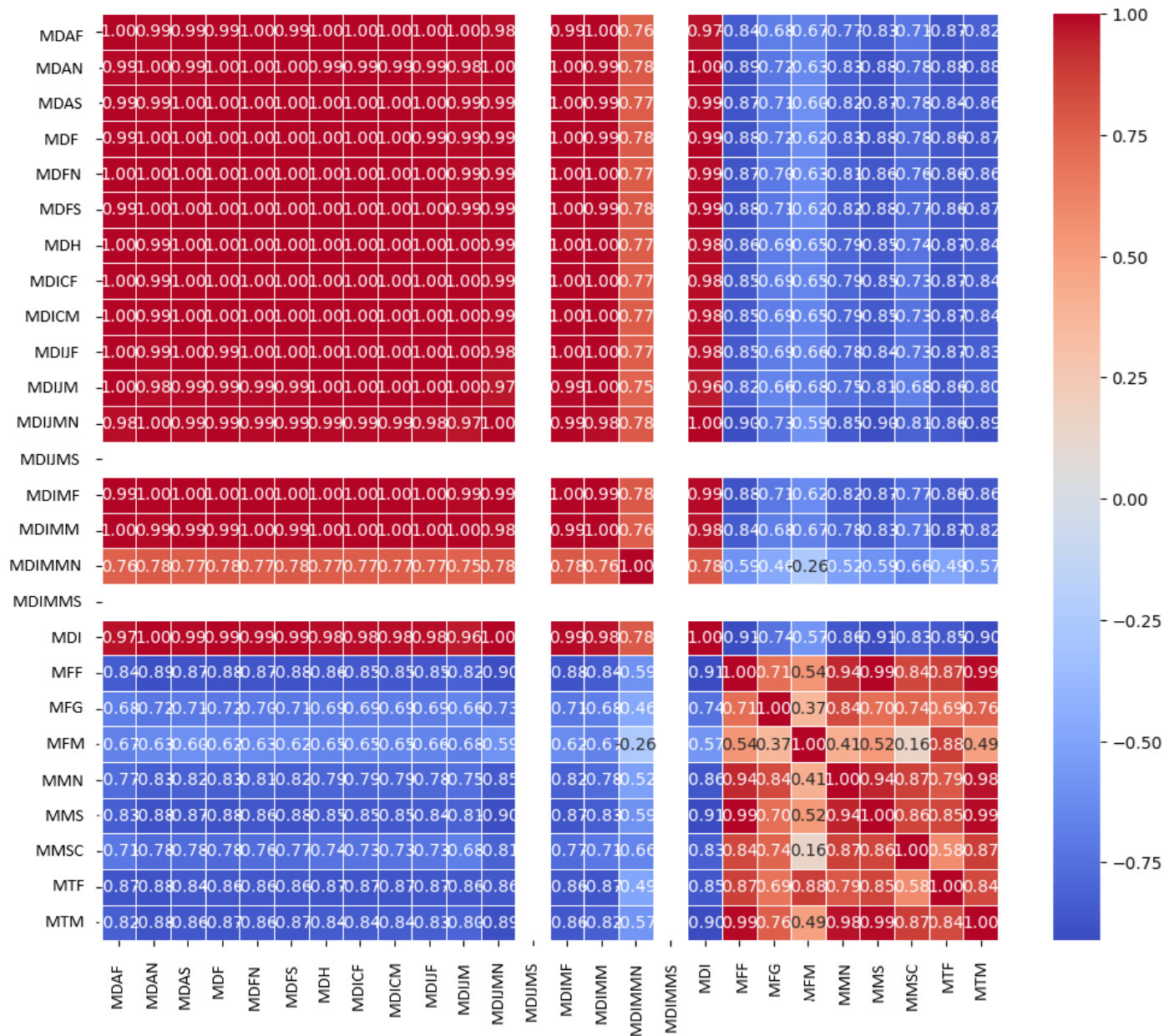


Figura 4.11: Matriz de correlaciones de las variables.

en el contexto del modelo, una mayor probabilidad de que ocurran eventos de infanticidio (como la toma de manadas por nuevos machos, que buscan llevar a las hembras al celo rápidamente).

Impacto del tamaño poblacional en la mortalidad

Las variables “*mean-total-females*” y “*mean-total-males*”, que representan el tamaño total de la población de leones, también exhiben correlaciones positivas fuertes con la mayoría de las categorías de muerte. Por ejemplo, “*mean-total-females*” se correlaciona fuertemente con “*mean-death-by-infanticide*” (0.840) y “*mean-death-by-human*” (0.880), y “*mean-total-males*” muestra valores similares (0.840 y 0.880, respectivamente). Esto sugiere que poblaciones más grandes, al tener un mayor número de individuos, experimentan naturalmente un mayor número absoluto de muertes, y/o que la densidad poblacional aumentada puede intensificar la competencia intra e inter-específica, llevando a más muertes por diversas causas.

Correlaciones negativas relevantes

Aunque menos predominantes que las positivas, la matriz también revela correlaciones negativas importantes. Un ejemplo destacable es la relación entre “*mean-female-fertile*” y diversas categorías de muertes por inanición, como “*mean-death-by-inanition-juvenile-male*” (-0.620), “*mean-death-by-inanition-juvenile*” (-0.630), “*mean-death-by-inanition-juvenile-nomad*” (-0.650) y “*mean-death-by-inanition-juvenile-male-nomad*” (-0.660). Esto indica que a medida que la proporción de hembras fértiles aumenta en la población, la media de muertes por inanición en individuos juveniles tiende a disminuir. Esta relación podría interpretarse como un indicador de que una población con una mayor proporción de hembras reproductivamente activas es, en general, más saludable o tiene un mejor acceso a recursos, lo que reduce la mortalidad por inanición entre los individuos más jóvenes y vulnerables.

Interpretación de valores cercanos a cero

Los valores de correlación cercanos a 0 (representados en tonos blancos o grises claros en el centro de la escala de color) son cruciales para identificar parámetros cuyas medias temporales no presentan una relación lineal significativa. En esta matriz, se observan algunos ejemplos de estas correlaciones débiles, particularmente entre:

- Parámetros de reproducción/estado reproductivo de hembras (*mean female - gestating*, *mean-female maternity*) y ciertos tipos de mortalidad o poblaciones específicas.
- *mean-death-by-fights-nomad* y diversos tipos de mortalidad por inanición (*mean - death by inanition-cub-male*, *mean-death-by-inanition-juvenile-female*, *mean-death-by-inanition-mature-male*, etc.).

- *mean-female-maternity* y mortalidad por edad en machos maduros (*mean-death-by-age-mature-male-nomad*, *mean-death-by-age-mature-male-sedentary*).

La presencia de estas correlaciones débiles sugiere que estos parámetros evolucionan de manera relativamente independiente en el tiempo, lo cual puede deberse a varios factores:

1. **Procesos independientes o con desfase temporal:** La gestación y maternidad de las hembras pueden depender de regulaciones fisiológicas o ambientales que no están directamente ligadas a las fluctuaciones de la mortalidad de otros grupos dentro de la población.
2. **Interacciones no lineales:** Muchos procesos biológicos no siguen relaciones puramente lineales. Factores como la densidad poblacional, competencia por recursos o estructuras sociales pueden influir en estos parámetros de formas que no se reflejan en una correlación simple.
3. **Heterogeneidad dentro de los grupos:** Diferentes segmentos poblacionales pueden responder a condiciones ecológicas y presiones ambientales de manera diferenciada. Por ejemplo, la mortalidad en machos nómadas está más relacionada con competencia intraespecífica y territorial, mientras que los procesos reproductivos de hembras pueden depender más de la disponibilidad de alimento y refugio.
4. **Estabilidad relativa de ciertos parámetros:** Si alguno de los parámetros tiene una variabilidad baja en el tiempo (es decir, poca desviación estándar), su relación con otros factores tenderá a ser estadísticamente débil debido a la baja covariación.

Estos resultados destacan la necesidad de examinar interacciones más complejas dentro del sistema ecológico simulado. Para una comprensión más detallada, sería conveniente recurrir a enfoques estadísticos alternativos, como regresiones no lineales.

En definitiva, los valores cercanos a cero en la matriz de correlación no significan una ausencia total de relación entre los parámetros, sino más bien la falta de una dependencia lineal evidente. Esto enfatiza la importancia de explorar posibles conexiones no lineales y analizar los factores que contribuyen a la aparente independencia de ciertos procesos. Estos patrones podrían sugerir la existencia de mecanismos biológicos o ecológicos que operan de manera relativamente autónoma dentro del modelo simulado.

4.2. Potencial de la detección temprana

En la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, se propuso que la detección temprana de la posición de los leones podría reducir significativamente sus interacciones con humanos. Si bien el modelo desarrollado no implementa directamente un mecanismo

de detección temprana activa, los resultados y la estructura del modelo permiten discutir esta posibilidad como una extensión lógica y relevante de su aplicación.

Específicamente, el modelo contempla parámetros como *lion-humans radius-interaction* y *dead-probability-with-humans*, los cuales determinan la distancia a la que pueden ocurrir encuentros entre leones y humanos, así como la probabilidad de que dichos encuentros resulten en la muerte del animal. Al modificar estos valores, es posible simular de manera indirecta escenarios que representen contextos con detección o alerta temprana, como aquellos en los que los humanos pueden anticipar la presencia de leones mediante tecnologías de monitoreo o patrullajes comunitarios.

A partir de estos escenarios hipotéticos, se pueden observar variaciones en las tasas de mortalidad por causas humanas. Esto permite evaluar cómo disminuir la exposición de los leones a zonas de alto riesgo podría influir positivamente en la estabilidad poblacional. De este modo, el modelo ofrece una herramienta útil para explorar el posible impacto de estrategias de conservación que incluyan mecanismos de prevención o disuasión antes del contacto directo.

Si bien esta posibilidad se presenta aquí como una implicación o proyección del modelo, se considera que da cumplimiento parcial a la hipótesis inicial, en tanto demuestra que el enfoque basado en agentes no solo permite comprender las dinámicas poblacionales y los factores de amenaza, sino también simular los beneficios potenciales de intervenciones específicas como la detección temprana. En trabajos futuros, esta línea de exploración podría fortalecerse mediante la incorporación explícita de agentes humanos reactivos o sistemas de alerta, enriqueciendo así la capacidad predictiva y propositiva del modelo.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Síntesis de los resultados

Este trabajo abordó la problemática del declive de las poblaciones de leones africanos mediante un modelo de simulación basado en agentes desarrollado en *NetLogo*. A través del modelo, fue posible representar con detalle las interacciones territoriales, sociales y ecológicas de los leones, la escasez de presas y los conflictos con humanos.

Los resultados obtenidos destacan que:

- La territorialidad y la estructura social tienen un rol fundamental en la dinámica poblacional de los leones, en particular para la supervivencia de crías y la estabilidad de las manadas.
- Las principales causas de mortalidad simuladas fueron la inanición en cachorros, con alrededor de 30,000 muertes, los infanticidios, aproximadamente 20,000 al año, las muertes provocadas por humanos, con 11,000 muertes y muertes por vejez en hembras, 15,000 aproximadamente, estos datos fueron arrojados al final de la simulación.

5.2. Aportaciones del modelo desarrollado

El modelo desarrollado proporciona una herramienta flexible para analizar escenarios de conservación en ecosistemas fragmentados. Entre sus principales aportaciones destacan:

- La incorporación de agentes humanos como factor externo permite simular interacciones negativas con las poblaciones de leones.
- La representación espacial detallada permite identificar áreas críticas para la conservación, donde las presiones externas y la densidad poblacional generan mayor vulnerabilidad.

- El modelo permite analizar el efecto de intervenciones como la creación de corredores biológicos o la reducción de conflictos humanos-fauna.

5.3. Implicaciones para la conservación

Los hallazgos de esta investigación respaldan la necesidad de:

- Fortalecer la conectividad entre hábitats mediante corredores biológicos que permitan el flujo genético entre poblaciones aisladas.
- Implementar programas de educación ambiental y compensación por pérdidas de ganado para mitigar los conflictos humanos-leones.
- Priorizar la conservación de áreas núcleo con alta densidad de presas y baja presencia humana como refugios seguros para la especie.

5.4. Líneas futuras de investigación

El desarrollo de un *ABM* para el estudio de dinámicas poblacionales, como el implementado en esta tesis utilizando *NetLogo*, es intrínsecamente un proceso iterativo y de mejora continua. A medida que la investigación de campo y la literatura sobre la ecología y el comportamiento de los leones (*Panthera leo*) avanzan, y se profundiza en la comprensión de sus complejidades biológicas y sociales, se abren nuevas avenidas para refinar y calibrar el programa, buscando una representación cada vez más fiel a la realidad. Este enfoque permite que el modelo evolucione constantemente, incrementando su capacidad predictiva y su valor como herramienta de investigación y apoyo a la conservación.

A continuación, se detallan varias líneas de trabajo futuro que podrían desprenderse directamente de esta investigación:

5.4.1. Integración avanzada de datos geospaciales y ambientales

Una mejora sustancial en la precisión y el realismo del programa reside en la capacidad de incorporar y procesar información geoespacial detallada. El programa ya cuenta con la funcionalidad de recibir entradas de mapas georreferenciados en formato *shapefile*, lo que abre un vasto potencial. Las futuras investigaciones podrían enfocarse en:

- **Representación del paisaje:** Integrar mapas que detallen la orografía del terreno, la distribución de cuerpos de agua (ríos, lagos), y la densidad/ubicación de la vegetación. Esta información es crucial para delimitar el hábitat disponible,

modelar los patrones de movimiento y dispersión, y simular la disponibilidad de recursos.

- **Factores antropogénicos:** Incorporar las ubicaciones precisas de asentamientos humanos, fronteras o delimitaciones de poblados, carreteras y caminos. Esto permitiría simular con mayor fidelidad el impacto de la actividad humana en el comportamiento de los leones, sus patrones de uso del espacio y los conflictos humano-león.
- **Dinámicas de recursos y amenazas:** Incluir mapas de la cantidad y estacionalidad de la lluvia, la distribución de la fauna (especies presa) y sus patrones migratorios con su temporalidad. Adicionalmente, la integración de datos sobre eventos disruptivos como incendios forestales permitiría evaluar su impacto en el hábitat y la dinámica de la población de leones.

La implementación de estos datos geospaciales proporcionaría un entorno de simulación mucho más contextualizado y dinámico, permitiendo investigar interacciones complejas entre los leones y su entorno, tanto natural como modificado por el hombre.

5.4.2. Refinamiento de mecanismos comportamentales y demográficos internos

La robustez del modelo está estrechamente vinculada a la precisión con la que se representan los comportamientos individuales y las interacciones poblacionales. Debido a la limitada disponibilidad de literatura específica sobre el tema, el desarrollo se basó en la información accesible al momento. No obstante, futuras mejoras en el código podrían lograrse mediante una exploración más profunda de fuentes especializadas, reconociendo que no es posible abarcar la totalidad del conocimiento existente. Algunas posibles líneas de mejora incluyen:

- **Algoritmos de caza:** Desarrollar algoritmos de caza más sofisticados que consideren factores como la estrategia de grupo, la topografía del terreno, la velocidad y agilidad de la presa, y la experiencia de los leones. Esto iría de la mano con una representación más detallada de la distribución espacial y temporal de las presas.
- **Demografía reproductiva y supervivencia:** Implementar procesos estocásticos más refinados para la supervivencia de los cachorros, considerando factores como la competencia intra-manada, la disponibilidad de leche, la salud de la madre y la ocurrencia de eventos como el infanticidio ante nuevas tomas de manada por parte de machos. Se podría modelar con mayor granularidad la influencia de estos factores en la probabilidad de supervivencia de cada cachorro.
- **Comportamiento territorial de machos:** Incorporar rutinas que simulen el comportamiento de patrullaje de los leones machos, donde se alejan periódicamente de la manada para supervisar y defender su territorio. Esto afectaría su exposición a riesgos y su interacción con otras manadas o machos nómadas.

- **Modelado de enfermedades y patógenos:** Una adición crucial para aumentar el realismo del modelo sería la implementación de mecanismos que simulen la propagación y el impacto de enfermedades que afectan a las poblaciones de leones, como la moquillo o la tuberculosis felina. Esto implicaría modelar tasas de infección, recuperación y mortalidad asociadas a distintas patologías, así como sus efectos en la reproducción y el comportamiento. Simular estas dinámicas permitiría evaluar cómo los brotes epidémicos influyen en la supervivencia de los individuos, la fragmentación de las manadas y la dinámica poblacional general, ofreciendo una visión más completa de las presiones que enfrentan los leones en la naturaleza.

5.4.3. Calibración y validación del modelo con expertos

La precisión de los parámetros del modelo es fundamental para la fiabilidad de los resultados. Un área de trabajo futuro de gran valor sería la colaboración con expertos en ecología de leones, biólogos de campo y conservacionistas. Su conocimiento empírico y su experiencia directa en el campo permitirían:

- **Ajuste estratégico de parámetros:** Refinar los valores de los parámetros clave del modelo (tasas de natalidad, mortalidad, éxito de caza, umbrales de territorialidad, etc.) basándose en datos reales y observaciones de campo.
- **Validación de comportamientos emergentes:** Utilizar el juicio de expertos para validar si los comportamientos emergentes del modelo (p. ej., patrones de dispersión, tamaño de las manadas, dinámica de machos) son consistentes con lo observado en la naturaleza.

Esta colaboración no solo mejoraría drásticamente la precisión del modelo, sino que también fomentaría la interdisciplinariedad en la investigación de la conservación.

5.4.4. Ampliación del alcance y aplicabilidad del modelo

Más allá de las mejoras específicas, el programa desarrollado en esta tesis tiene el potencial de servir como base para futuras investigaciones en el campo de la ecología de poblaciones:

- **Adaptación a otras especies:** La estructura general del modelo y los principios de programación de dinámicas poblacionales basadas en agentes podrían adaptarse para estudiar la ecología y el comportamiento de otras especies de grandes carnívoros o de fauna con dinámicas sociales complejas.
- **Aporte metodológico:** La experiencia y las soluciones de programación desarrolladas para simular procesos como la caza, la reproducción o la territorialidad pueden servir como ideas y referencias para futuros proyectos de modelado de poblaciones.

5.4.5. Exploración de dinámicas espaciales variables

El modelo desarrollado en la presente tesis opera bajo la premisa de un área espacial fija e inmutable a lo largo del tiempo de simulación. Esta configuración, si bien facilita la comprensión de otras dinámicas demográficas y ecológicas, representa una simplificación de la realidad.

Una extensión natural para futuras investigaciones implicaría experimentar con distintos tamaños de este espacio, lo que permitiría evaluar la resiliencia poblacional en hábitats de diversas extensiones y determinar umbrales críticos de tamaño para la persistencia de las especies. Adicionalmente, sería de gran relevancia incorporar dinámicas espaciales que reflejen la realidad contemporánea, como la reducción progresiva del área disponible para la vida silvestre debido al avance de los asentamientos humanos.

La implementación de un mecanismo que simule la constricción del territorio de las reservas naturales permitiría analizar de forma más precisa el impacto de la fragmentación del hábitat y la presión antropogénica sobre las poblaciones modeladas, ofreciendo información valiosa para la planificación de políticas de conservación en escenarios de expansión humana.

5.4.6. Análisis de políticas de reinserción de especies

Si bien el programa de simulación cuenta con la capacidad inherente de modelar escenarios de reinserción de especies criadas en cautiverio a sus hábitats naturales, esta funcionalidad no fue explorada en el presente trabajo debido a las limitaciones de tiempo, tal como se mencionó al inicio de este capítulo.

No obstante, la experiencia derivada de las observaciones y análisis de los resultados obtenidos en esta tesis sugiere una reflexión importante sobre la viabilidad de tales políticas de conservación. Se ha evidenciado consistentemente que los individuos que no poseen una manada o que adoptan un estilo de vida nómada enfrentan una probabilidad de mortalidad significativamente mayor en comparación con aquellos que pertenecen a un grupo social o manada establecida.

En este contexto, la implementación de estrategias de reinserción de especies, particularmente aquellas que podrían resultar en individuos solitarios o sin grupo social establecido, no parecería ser una política de conservación óptima o eficaz bajo las dinámicas modeladas. Futuras simulaciones podrían cuantificar con mayor detalle este riesgo y explorar estrategias de reinserción que mitiguen estos factores de vulnerabilidad, como la reintroducción de grupos completos o el acompañamiento post-liberación.

5.4.7. Consideraciones computacionales para la precisión extrema

A medida que el modelo incorpore más detalles y complejidad, las demandas computacionales aumentan. Para ejecutar simulaciones con mayor resolución espacial, temporal o con un mayor número de agentes, podría ser necesario:

- **Simulaciones en paralelo:** Implementar el modelo para ejecutarse en plataformas de computación de alto rendimiento (*HPC*) o en sistemas con procesamiento paralelo. Esto permitiría ejecutar un mayor número de replicaciones, explorar espacios de parámetros más amplios y realizar simulaciones a escalas que serían inviables en computadoras convencionales, aumentando significativamente la precisión y fiabilidad de los resultados.

En última instancia, la mejora continua de este programa basado en agentes no solo aumenta la fiabilidad y precisión de los resultados, lo que permitiría explicar de manera más detallada el comportamiento de los leones en diversas condiciones, sino que también ofrecerá una herramienta invaluable para diseñar y evaluar estrategias de conservación efectivas. Esto incluye mitigar el declive de las poblaciones, optimizar la gestión del hábitat o predecir la respuesta de la especie ante escenarios de cambio climático o presión humana.

5.5. Autoorganización y estructura social de las manadas

Un hallazgo significativo derivado de las simulaciones es la notable autoorganización que emerge en la estructura social de las poblaciones de leones a lo largo del tiempo. Aunque las gráficas de resultados muestran una estabilización en la cantidad total de individuos hacia las fases finales de la simulación, este equilibrio poblacional no se traduce en una distribución arbitraria o desordenada de los leones en el espacio simulado. Por el contrario, se observa una tendencia clara hacia la formación y mantenimiento de manadas con tamaños y composiciones que se mantienen dentro de un rango promedio característico.

Esta conclusión se fortaleció al analizar el comportamiento demográfico observado durante las simulaciones, particularmente en relación con la población de hembras. En las primeras etapas, se registró un aumento considerable en el número de hembras, posiblemente influenciado por la abundante disponibilidad de alimento y la baja densidad poblacional inicial, lo que favorece condiciones óptimas para la reproducción. Sin embargo, este crecimiento no se mantuvo indefinidamente: con el paso del tiempo, la cantidad de hembras descendió hasta alcanzar un valor estable, lo que sugiere la existencia de mecanismos de autorregulación dentro del modelo. Este patrón refuerza la idea de que, incluso en entornos simulados con parámetros limitados, pueden emerger dinámicas sociales complejas que reflejan comportamientos ecológicos plausibles.

Este comportamiento de autoorganización es crucial, ya que el programa no produce formaciones de manadas con estructuras biológicamente no plausible, como agrupaciones excesivamente grandes (por ejemplo, manadas compuestas por cien hembras y un único macho). En cambio, la simulación tiende a converger hacia tamaños de manada que son consistentes con la ecología conocida de los leones Mosser and Packer (2009).

Esta emergencia de tamaños característicos de manadas refuerza la validez del modelo, sugiriendo que las reglas de interacción y las dinámicas individuales implementadas capturan efectivamente los mecanismos que rigen la estructura social de la especie. La capacidad del modelo para replicar esta autoorganización social más allá de la mera cantidad de individuos subraya su utilidad para explorar la resiliencia y la estabilidad poblacional bajo escenarios diversos.

5.6. Originalidad y contribución del modelo desarrollado

Un aspecto fundamental que dota de particular relevancia al presente trabajo de tesis es la originalidad y el carácter pionero del programa de simulación basado en agentes desarrollado. Tal como se señaló en la introducción de este documento, una revisión amplia de los recursos disponibles en línea y la literatura especializada reveló una marcada escasez de programas de modelado de este tipo diseñados específicamente para simular las dinámicas poblacionales y la ecología social de los leones.

Si bien existen modelos *ABM* consolidados para el estudio de otras especies (como, por ejemplo, el programa de agentes para tigres de Carter et al. (2015)), la aplicación de esta metodología al estudio de la especie *Panthera leo* bajo las condiciones y complejidades abordadas en esta tesis representa una contribución metodológica y temática novedosa.

Esta originalidad no solo llena un vacío en las herramientas computacionales disponibles para la modelación ecológica de grandes felinos, sino que también proporciona una plataforma única y flexible para la investigación de la viabilidad poblacional de los leones y la evaluación de estrategias de conservación.

El desarrollo de un *ABM* específico para leones permite explorar interacciones complejas a nivel individual y de manada que serían difíciles de abordar con modelos de población más tradicionales. Esto ofrece nuevas perspectivas sobre la autoorganización de las manadas, la resiliencia de la especie frente a presiones ambientales y antropogénicas, y los impactos de diversas políticas de manejo.

En este sentido, el programa desarrollado no solo constituye una contribución académica relevante al campo de la modelación ecológica, sino también una base tecnológica robusta para futuras investigaciones en la ecología de la conservación de esta icónica especie.

Apéndice A

A continuación, se presenta el código completo del modelo desarrollado en *NetLogo* para esta tesis:

```
1 globals
2 [
3   available-colors
4   cub-females
5   cub-males
6   juvenile-females
7   juvenile-males
8   mature-females
9   mature-males
10  p-origins
11  death-by-humans
12  death-by-figths
13  death-by-infanticide
14  death-by-inanition-cub-female
15  death-by-inanition-juvenile-female
16  death-by-inanition-mature-female
17  death-by-inanition-cub-male
18  death-by-inanition-juvenile-male
19  death-by-inanition-mature-male
20  death-by-inanition-juvenile-male-nomad
21  death-by-inanition-mature-male-nomad
22  death-by-inanition-mature-male-sedentary
23  death-by-inanition-juvenile-male-sedentary
24  death-by-age-nomad
25  death-by-age-sedentary
26  death-by-figths-nomad
27  death-by-figths-sedentary
28  death-by-age-females
29 ]
30
31 breed [humans human]
32 breed [females female]
33 breed [males male]
```

```

34
35 turtles-own
36 [
37   energy ;energía que posee una tortuga-----
38   age ; Age in days
39   age-class ; Indicates age class of male
40   (i.e., cub, juvenile,
41   transient, or breeder)
42   territory ; Set of patches belonging to territory
43
44   state ;mature;males:nomad, sedentary; females: fertile,
         gestating, breastfeeding
45   my-mom
46 ]
47
48 males-own
49 [
50   females-in-my-territory ; conjunto de agentes de leonas
51   ;dentro del territorio de los machos
52 ]
53
54 females-own
55 [
56   t-gestation ; Indica cuánto tiempo ha gestado la hembra.
         -----
57   t-parenting ; Indica cuánto tiempo la hembra ha sido
58   ;madre de la camada actual. -----
59 ]
60
61 patches-own
62 [
63   is-park? ; Indicates whether patch falls within national
64   ;park boundary
65   male-owner ; the identity of the male "owning" a patch
66   ;(i.e., belongs to his territory or home range)
67   ;usado en el procedimiento to setup-territory-influence
68   energy-preys ;cantidad de energía que pueden extraer de la
         biomasa
69   origin?
70 ]
71
72
73 to setup
74   ca
75   setup-patches ;rios, elevaciones
76   setup-turtles ; dar de alta la población de leones piramide

```

```

    poblacional
77  reset-ticks
78  end
79
80  to setup-patches
81  ask patches
82  [
83    set is-park? false
84    set origin? False
85  ]
86  ask patch 0 0
87  [
88    ask patches in-radius (world-width * 0.5 / 3)
89    [
90      if random-float 1 < initial-prey-density
91      [
92        set energy-preys random initial-prey-energy
93      ]
94      set is-park? true
95    ]
96  ]
97  recolor-patches
98  end
99
100 to recolor-patches
101 ask patches
102 [
103   set pcolor ifelse-value (is-park?) [green] [white]
104 ]
105 end
106
107
108 to setup-turtles
109 set available-colors shuffle filter [ c ->
110   (c mod 10 >= 3) and (c mod 10 <= 7)
111 ] n-values 140 [ n -> n ]
112 birth-females initial-females
113 birth-males initial-males
114 update-age-stage-class
115
116 allocate-humans
117 ;   if lists? = true
118 ;   [
119 ;   set age-adult-male-died []
120 ;   set age-adult-fem-died []
121 ;   set litter-size-list []

```

```

122 ; set male-land-tenure-list []
123 ; set fem-land-tenure-list []
124 ; set male-disp-dist-list []
125 ; set fem-disp-dist-list []
126 ; set total-cub-list []
127 ; set cub-indep-list []
128 ; ]
129 ;
130
131 end
132
133 to allocate-humans
134   create-humans NH
135   [
136     set shape "person"
137     move-to one-of patches with [not is-park?]
138   ]
139 end
140
141 to birth-females [NF]
142   create-females NF
143   [
144     set territory 0
145     set t-gestation 110; Indica cuánto tiempo
146     ha gestado la hembra. -----
147     set t-parenting 2 * 360; Indica cuánto tiempo la hembra ha sido
148     madre de la camada actual.
149     set energy random initial-birth-energy
150     ;energía que posee una tortuga-----
151     set age (random 40 * 30) + 12 * 30
152     set my-mom nobody
153     ;set my-mom nobody; the identity of cub's mom
154     set age-class ""; Indicates age class of male
155     ;(i.e., cub, juvenile, transient, or breeder)
156     set state "fertile"
157   ]
158   let count-initial-females initial-females
159   let i-color 0
160   while [any? females with [territory = 0] and
161         count-initial-females >= 0]
162     [
163       let fem int (random-normal mean-females-in-herd
164                   sdt-females-in-herd)
165       if fem < 0 [set fem 0]
166       let origin one-of patches with [is-park? and not any?
167         other females in-radius 20 with [territory != 0]]

```

```

167     ask origin [set pcolor item i-color available-colors
168     set origin? True]
169     set i-color i-color + 1
170     if any? females with [territory = 0 ]
171     [
172         if (fem > count-initial-females)
173     [set fem count-initial-females]
174         ask n-of fem females with [territory = 0 ]
175         [
176             set size 5
177             set shape "cat"
178             move-to origin
179             set color [pcolor] of origin
180             set territory origin
181         ]
182         set count-initial-females
183         count-initial-females - fem
184     ]
185 ]
186 ask patches with [is-park?]
187 [
188     set pcolor [color] of min-one-of females
189 [distance myself]
190 ]
191 ask females [set color orange fd 5]
192 end
193
194 to birth-males [NM]
195 set p-origins patches with [origin?]
196 let n-origins count p-origins
197 create-males NM
198 [
199     set energy random initial-birth-energy
200     set age (random 40 * 30) + 2 * 360
201     ;my-mom ; the identity of cub's mom
202     set age-class ""; Indicates age class of male (i.e., cub,
203         juvenile, transient, or breeder)
204     set females-in-my-territory 0
205     set territory 0; Set of patches belonging to territory
206     set my-mom nobody
207     set size 7
208     set shape "cat"
209     ifelse n-origins > 0
210     [
211         let ori one-of p-origins with [not any? males-here]
212         move-to ori

```

```

212     set state "sedentary"
213     set n-origins n-origins - 1
214     ask ori
215     [
216         set male-owner myself
217     ]
218     set color [pcolor] of ori
219     set territory ori
220 ]
221 [
222     move-to one-of patches with [is-park?]
223     set state "nomad"
224     set age (2 * 360) + random 40
225 ]
226 ]
227 ask males [set color ifelse-value (state = "sedentary")
228 [blue][red] fd 7]
229 end
230
231
232 to update-age-stage-class
233     ask turtles
234     [
235         set age-class (ifelse-value
236             (age >= 0 and age < 12 * 30 * 2)
237             ["cub"]
238             (age >= 12 * 30 * 2 and age < 12 * 30 * 3)
239             ["juvenile"]
240             (age >= 12 * 30 * 3)             ["mature"])
241     ]
242 ]
243 ask males with [age-class = "juvenile" and age = int
244 (12 * 30 * 2)]
245 [
246     set state "nomad"
247     set territory 0
248     ifelse any? p-origins with [male-owner = nobody]
249     [
250         let p one-of p-origins with [male-owner = nobody]
251         move-to p
252         ask p
253         [
254             set male-owner myself
255         ]
256         set state "sedentary"
257     ]

```

```

258     [
259         move-to one-of patches with
260         [is-park? and not any? males-here]
261     ]
262     if my-mom != nobody
263     [
264         ask my-mom
265
266         [
267             set state "fertile"
268         ]
269     ]
270 ]
271 set cub-females females with [age-class = "cub"]
272 set cub-males males with [age-class = "cub"]
273 set juvenile-females females with [age-class = "juvenile"]
274 set mature-females females with [age-class = "mature"]
275 set juvenile-males males with [age-class = "juvenile"]
276 set mature-males males with [age-class = "mature"]
277 end
278
279 to go
280     ask females
281     [
282         set age age + 1
283         set energy energy - energy-loss
284         reproduction
285         gestation
286         check-death
287     ]
288
289     ask males
290     [
291         set age age + 1
292         set energy energy - energy-loss
293         check-death
294     ]
295
296     hunt
297     hunt-nomads
298     protec-territory
299     ;movimiento nómadas
300     ask males with [state = "nomad"]
301     [
302         rt 360
303         lt 360

```

```

304   if [not is-park?] of patch-ahead 1
305     [
306       rt 180
307     ]
308     fd 0.1
309   ]
310   grow-prey
311   update-age-stage-class
312   interaction-with-humans
313   mortality
314   if any? p-origins with [male-owner = nobody]
315     [
316       ask one-of p-origins with [male-owner = nobody]
317       [
318         let l one-of males with [state = "nomad"]
319         if l != nobody
320           [
321             ask l
322             [
323               set territory myself
324               move-to territory
325               ask territory
326                 [
327                   set male-owner myself
328                 ]
329             ]
330           ]
331       ]
332     ]
333   tick
334 end

335
336 to reproduction
337   (ifelse
338     age-class != "cub" and state = "fertile" and
339     any? males with [state = "sedentary" and
340     age-class != "cub"] and
341     random-float 1 < probability-of-mating
342     [
343       set state "gestating"
344       set t-gestation 100 + random 21
345     ]
346     state = "gestating" and t-gestation > 0
347     [set t-gestation t-gestation - 1]
348     state = "gestating" and t-gestation = 0
349     [; dar a Luz

```

```

350     set state "maternity"
351     set energy energy - birth-energy
352     let litter-size int random-normal 3 1
353     hatch-females litter-size
354     [
355         set breed one-of list males females
356         set age 0
357         set age-class "cub"
358         set state ifelse-value breed = males
359         ["sedentary"]["fertile"]
360         set energy energy / litter-size
361         set my-mom myself
362     ]
363 ]
364 )
365 end
366
367
368 to hunt
369     ask p-origins
370     [
371         let ori self
372         let target-hunting-patch one-of (patches with
373         [energy-preys != 0 and pcolor = [pcolor] of myself])
374         [pcolor] of myself) [energy-preys]
375         ask target-hunting-patch
376         [
377             let hunt-energy random-float 1 * energy-preys
378             set energy-preys energy-preys - hunt-energy
379             if energy-preys < 1
380             [
381                 set energy-preys 0
382             ]
383             let herd-size count turtles with [territory = ori]
384             ask turtles with [territory = ori]
385             [
386                 set energy energy + hunt-energy / herd-size
387             ]
388         ]
389     ]
390 end
391
392
393 to check-death
394     if energy <= 0
395     [

```

```
396 (ifelse state = "nomad" and breed = males and
397 age-class = "juvenile"
398 [
399   set death-by-inanition-juvenile-male-nomad
400   death-by-inanition-juvenile-male-nomad + 1
401 ]
402
403 (state = "nomad" and breed = males and
404 age-class = "mature")
405 [
406   set death-by-inanition-mature-male-nomad death-by-inanition-
407   mature-male-nomad + 1
408 ]
409 (breed = males and age-class = "mature")
410 [
411   set death-by-inanition-mature-male
412   death-by-inanition-mature-male + 1
413 ]
414 (breed = males and age-class = "juvenile")
415 [
416   set death-by-inanition-juvenile-male
417   death-by-inanition-juvenile-male + 1
418 ]
419
420 (breed = males and age-class = "cub")
421 [
422   set death-by-inanition-cub-male
423   death-by-inanition-cub-male + 1
424 ]
425
426 (breed = females and age-class = "mature")
427 [
428   set death-by-inanition-mature-female
429   death-by-inanition-mature-female + 1
430 ]
431
432 (breed = females and age-class = "juvenile")
433 [
434   set death-by-inanition-juvenile-female
435   death-by-inanition-juvenile-female + 1
436 ]
437
438 (breed = females and age-class = "cub")
439 [
440
```

```

441     set death-by-inanition-cub-female
442     death-by-inanition-cub-female + 1
443 ]
444
445     (breed = males and age-class = "mature" and
446     state = "sedentary")
447 [
448     set death-by-inanition-mature-male-sedentary
449     death-by-inanition-mature-male-sedentary + 1
450 ]
451
452     (breed = males and age-class = "juvenile" and
453     state = "sedentary")
454 [
455     set death-by-inanition-juvenile-male-sedentary
456     death-by-inanition-juvenile-male-sedentary + 1
457 ]
458 )
459 if breed = males and state = "sedentary" and
460 age-class != "cub"
461 [
462 ]
463 die]
464
465 end
466
467 to protec-territory
468 ask males with [territory != 0 and age-class != "cub"]
469 [
470     if any? males with [state = "nomad" and
471     age >= (4 * 360)] in-radius radius-herd [
472         let rival one-of males with [state = "nomad" and
473         age >= (4 * 360)] in-radius radius-herd
474
475         ; Calcular la fuerza de ambos leones
476         let my-strength calculate-strength age energy
477         let rival-strength calculate-strength [age]
478         of rival [energy] of rival
479
480         ifelse rival-strength > my-strength
481         [
482             ask rival
483             [
484                 set territory [territory] of myself
485                 ask turtles with [territory = [territory]
486                 of myself and age-class = "cub"]

```

```

487     [
488         set death-by-infanticide death-by-infanticide + 1
489         die
490     ]
491     ask females with [territory = [territory] of myself]
492     [
493         set state "fertile"
494     ]
495     ask territory
496     [
497         set male-owner myself
498     ]
499     set state "sedentary"
500 ;
501 ]
502 ifelse random-float 1 < probability-of-death-on-fight
503 ; 80% de probabilidad de morir
504 [
505     set death-by-figths-sedentary death-by-figths-sedentary +
506         1
507     die
508 ]
509 [
510     set state "nomad"
511     set energy energy - energy-loss-by-figth
512     right 180
513     fd 5
514     set territory 0
515 ]
516 [
517     ; El león defiende su territorio y el rival pierde
518     ask rival
519     [
520         ifelse random-float 1 < probability-of-death-on-fight
521         ; 80% de probabilidad de morir
522         [
523             set death-by-figths-nomad death-by-figths-nomad + 1
524             die
525         ]
526         [
527             set energy energy - energy-loss-by-figth
528             right 180
529             fd 5
530         ]
531     ]

```

```

532     ]
533     set death-by-fights death-by-fights + 1
534 ]
535 ]
536 end
537
538
539 to-report calculate-strength [lion-age lion-energy]
540   let age-factor 0
541
542   if lion-age < (5 * 360) [set age-factor lion-age /
543     (5 * 360)] ; Crece hasta los 5 años
544   if lion-age >= (5 * 360) and lion-age <= (7 * 360)
545     [set age-factor 10] ; Máxima fuerza entre 5 y 7 años
546   if lion-age > (7 * 360) [set age-factor max
547     (list 0 (1 - (lion-age - (7 * 360)) * 0.1))]
548     ; Disminuye después de 7 años
549
550   report (lion-energy / max [energy] of males) + age-factor
551 end
552
553
554 to interaction-with-humans
555   ask turtles with [state = "nomad"]
556   [
557     let person one-of humans in-radius lion-humans-radius-
558       interaction
559
560     if person != nobody
561     [
562       if random-float 1 < dead-probability-with-humans
563       [
564         set death-by-humans death-by-humans + 1
565         ;show (word breed " " state " " age-class " " age)
566         die
567       ]
568     ]
569   ]
570 ]
571 ]
572 end
573
574 to grow-prey
575   ask patches with [is-park?]
576   [

```

```

577 ifelse initial-prey-energy != 0
578   ; Sólo si ya hay una presa
579   [
580     let growth random-float growth-prey-rate
581     set energy-preys energy-preys + growth
582   ]
583   [ ; Si no hay presa, existe la posibilidad de que
584     ; crezca una nueva
585     if random-float 1 < probability-growth-prey
586     [
587       set energy-preys random initial-prey-energy
588     ]
589   ]
590 ]
591 end
592
593
594
595 to mortality
596   ; muerte por edad de leones
597   ask males with [age >= (12 * 30 * 15)]
598   [
599     ; show word "muerte por viejo " state
600     if state = "seditary"
601     [
602       ; show "muerte de macho dominante"
603       ifelse any? males with [state = "nomad"]
604       [
605         ; show "buscando macho"
606         ask min-one-of (males with [state = "nomad"])
607         [distance myself]
608         [
609           set territory [territory] of myself
610           ask territory
611           [
612             set male-owner myself
613           ]
614           ask turtles with [territory = [territory]
615             of myself and age-class = "cub"]
616           [
617             ; show (word breed " " state " " age-class " " age)
618             die
619           ]
620           ask females with [territory = [territory] of myself]
621           [
622             set state "fertile"

```

```

623     ]
624     set state "sedentary"
625 ]
626 ]
627 [
628     ask territory
629     [
630         ;show "territorio sin macho"
631         set male-owner nobody
632     ]
633 ]
634 ]
635 if state = "sedentary"
636 [
637     set death-by-age-sedentary death-by-age-sedentary + 1
638 ]
639
640 if state = "nomad"
641 [
642     set death-by-age-nomad death-by-age-nomad + 1
643 ]
644 die
645 ]
646
647
648
649 ;muerte por edad de leonas
650 ask females with [age >= (180 * 30)]
651 [
652     set death-by-age-females death-by-age-females + 1
653     ;show (word breed " " state " " age-class " " age)
654     die
655 ]
656 end
657
658 to hunt-nomads
659     ask males with [state = "nomad"]
660     [
661         set energy energy + random-float
662         (percent-of-energy-from-hunt-nomads *
663         [energy-preys] of patch-here)
664     ]
665
666 end

```


Glosario

Términos generales

Agentes: Entidades virtuales o físicas con autonomía, interacción y adaptabilidad. Se usan para representar individuos en modelos computacionales Wooldridge (1997).

ABM: Siglas en inglés de “Agent-Based Model”, o Modelo Basado en Agentes.

CONAHCYT: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Organismo público mexicano que financia investigaciones.

Panthera leo: Nombre científico del león africano.

Panthera tigris: Nombre científico del tigre. “Panthera” es el género de grandes felinos; “tigris” significa “tigre” en latín.

ODD: Acrónimo de “Overview, Design concepts, and Details”. Es un protocolo estandarizado para describir modelos basados en agentes en publicaciones científicas.

Tick: Unidad de tiempo discreta utilizada en *NetLogo*, que puede representar segundos, días, o cualquier intervalo definido por el modelo.

Patch: Unidad espacial de *NetLogo*. Cada patch representa una celda del entorno donde los agentes se mueven o interactúan.

Términos de la interfaz en inglés (*NetLogo*)

initial-females: Número inicial de hembras.

initial-males: Número inicial de machos.

initial-prey-density:	Densidad inicial de presas en el entorno.
mean-females-in-herd:	Promedio de hembras por manada.
sdt-females-in-herd:	Desviación estándar de hembras por manada.
probability-growth-prey:	Probabilidad de crecimiento de las presas.
growth-prey-rate:	Tasa de crecimiento de las presas.
radius-herd:	Radio de alcance de una manada.
probability-of-mating:	Probabilidad de que ocurra apareamiento.
dead-probability-with-humans:	Probabilidad de que un león muera al interactuar con humanos.
birth-energy:	Energía utilizada o ganada al nacer.
initial-prey-energy:	Energía inicial contenida en una presa.
energy-loss:	Pérdida diaria de energía por existir.
energy-loss-by-fight:	Energía perdida por peleas territoriales o sociales.
probability-of-death-on-fight:	Probabilidad de morir durante una pelea.
initial-birth-energy:	Energía asignada a los cachorros al nacer.
percent-of-energy-from-hunt-nomads:	Porcentaje de energía obtenida por los machos nómadas al cazar.
lion-human-radius-interaction:	Radio de distancia en el cual un león puede entrar en contacto con humanos.

Abreviaturas

En esta sección se detallan las abreviaturas de la matriz de correlaciones que aparece en la figura 4.11.

MDAF:	mean-death-by-age-females
MDAN:	mean-death-by-age-nomad

MDAS:	mean-death-by-age-sedentary
MDF:	mean-death-by-fights
MDFN:	mean-death-by-fights-nomad
MDFS:	mean-death-by-fights-sedentary
MDH:	mean-death-by-humans
MDICF:	mean-death-by-inanition-cub-female
MDICM:	mean-death-by-inanition-cub-male
MDIJF:	mean-death-by-inanition-juvenile-female
MDIJM:	mean-death-by-inanition-juvenile-male
MDIJMN:	mean-death-by-inanition-juvenile-male-nomad
MDIJMS:	mean-death-by-inanition-juvenile-male-sedentary
MDIMF:	mean-death-by-inanition-mature-female
MDIMM:	mean-death-by-inanition-mature-male
MDIMMN:	mean-death-by-inanition-mature-male-nomad
MDIMMS:	mean-death-by-inanition-mature-male-sedentary
MDI:	mean-death-by-infanticide
MFF:	mean-female-fertile
MFG:	mean-female-gestating
MFM:	mean-female-maternity
MMN:	mean-male-nomad
MMS:	mean-male-sedentary
MMSC:	mean-male-sedentary-cub
MTF:	mean-total-females
MTM:	mean-total-males

Bibliografía

- Ahearn, S. C., Smith, J. L., O'Brien, J. L., and Forester, E. O. (2001a). Modeling large carnivore behavior and ecology: integrating predators into ecoregional plans for sustainable development and biodiversity conservation. *Ecological Modelling*, 140:271–291.
- Ahearn, S. C., Smith, J. L. D., Joshi, A. R., Ding, J., and Thapa, K. (2001b). Modeling the interaction between humans and animals in multiple-use forests: A case study of panthera tigris. *Ecological Modelling*, 140(1-2):81–97.
- Banerjee, K. and Jhala, Y. (2012). Demographic parameters of endangered asiatic lions (panthera leo persica) in gir forests, india. *Journal of Mammalogy*, 93(6):1420–1430.
- Bauer, H., Chapron, G., Nowell, K., Henschel, P., Funston, P., Hunter, L., Macdonald, D., and Packer, C. (2015a). Lion (panthera leo) populations are declining rapidly across africa, except in intensively managed areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(48):14894–14899.
- Bauer, H., Packer, C., Funston, P., Henschel, P., and Hunter, L. (2015b). Lion (*Panthera leo*) populations are declining rapidly across africa, except in intensively managed areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(48):14894–14899.
- Beier, P. and Noss, R. F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology*, 12(6):1241–1252.
- Bjorneraas, K., Solberg, E. J., Herfindal, I., Van Moorter, B., Rolandsen, C. M., Tremblay, J. P., and Saether, B. E. (2012). Habitat quality influences population distribution, movements and demography in an ecosystem engineer, the eurasian beaver. *Oecologia*, 168(4):947–959.
- Brassine, M. (2023). Lion rangers' use of smart for lion conservation in kunene. In *Etosha Pan to the Skeleton Coast: Conservation Histories, Policies and Practices in North-west Namibia*, pages 471–482. Por determinar.
- Carter, N., Levin, S., Barlow, A., and Grimm, V. (2015). Modeling tiger population and territory dynamics using an agent-based approach. *Ecological Modelling*, 312:347–362.

- Carter, N. H., Gurung, B., Viña, A., Campa III, H., Karki, J. B., and Liu, J. (2013). Assessing spatiotemporal changes in tiger habitat across different land management regimes. *Ecosphere*, 4(10):124.
- Dickman, A. J. (2010). Complexities of conflict: the importance of considering social factors for effectively resolving human–wildlife conflict. *Animal Conservation*, 13(5):458–466.
- Dolrenry, S., Stenglein, J., Hazzah, L., Lutz, R. S., and Frank, L. (2014). A metapopulation approach to african lion (*panthera leo*) conservation. *PLoS ONE*, 9(2):e88081.
- Estes, J. A., Terborgh, J., Brashares, J. S., Power, M. E., Berger, J., Bond, W. J., et al. (2011). Trophic downgrading of planet earth. *Science*, 333(6040):301–306.
- Everatt, K. T., Kokés, R., and Lopez Pereira, C. (2019). Evidence of a further emerging threat to lion conservation; targeted poaching for body parts. *Biodiversity and Conservation*, 28(14):4099–4114.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., and Railsback, S. F. (2010). The odd protocol: a review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23):2760–2768.
- Grimm, V. and Railsback, S. F. (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press.
- Group, I. S. C. S. (2015). *Panthera leo*: The iucn red list of threatened species. Assessment and range/population summaries (consultar la ficha en IUCN Red List para la versión y año de referencia).
- Hazzah, L., Dolrenry, S., Naughton-Treves, L., Edwards, C. T. T., Mwebi, O., Kearney, F., and Frank, L. (2014). Efficacy of two lion conservation programs in maasailand, kenya. *Conservation Biology*, 28(3):851–860.
- Henschel, P. and et al. (2014). The lion in west africa is critically endangered. *PLOS ONE*, 9(1):e83500.
- Hilty, J. A., Keeley, A. T., Lidicker, W. Z., and Merenlender, A. M. (2020). *Corridor Ecology: Linking Landscapes for Biodiversity Conservation and Climate Adaptation*. Island Press, 2nd edition.
- Hunter, L. T. B., Pretorius, K., Carlisle, L. C., Rickelton, M., Walker, C., Slotow, R., and Skinner, J. D. (2007). Restoring lions *panthera leo* to northern kwazulu-natal, south africa: short-term biological and technical success but equivocal long-term conservation. *Oryx*, 41(2):196–204.
- J. Ogotu, H. D. (2004). Spatial dynamics of lions and their prey along an environmental gradient. *African Journal of Ecology*, 42(1):8–22.

- Kark, S., Brokovich, E., Mazor, T., Levin, N., and Beth, E. W. (2015). Emerging conservation challenges and prospects in an era of offshore hydrocarbon exploration and exploitation. *Conservation Biology*, 29(6):1573–1585.
- Kenney, J. S., Smith, J. L. D., Starfield, A. M., and McDougal, C. W. (1995). The long-term effects of tiger poaching on population viability. *Conservation Biology*, 9(5):1127–1133.
- Lindsey, P. A. et al. (2017). Conserving large carnivores: dollars and fence. *Ecology Letters*, 20(5):753–775.
- Loveridge, A. et al. (2022). Where have all the lions gone? establishing realistic baselines for conservation. *Diversity and Distributions*.
- Loveridge, A. J., Woodroffe, R., and Frank, L. G. (2015). *Living with Lions: People, Wildlife, and Livelihoods in Africa*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Macal, C. M. and North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3):151–162.
- Macal, Charles M. North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3):151–162.
- Maziar Yazdani, F. J. (2017). Lion optimization algorithm (loa): A nature-inspired metaheuristic algorithm. *Journal of Knowledge-based Systems*, 30(4):123–135.
- Midgley, G. F. et al. (2002). Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. *Global Ecology and Biogeography*, 11(6):445–451.
- Mosser, A. and Packer, C. (2009). Group territoriality and the benefits of sociality in the african lion, panthera leo. *Animal Behaviour*, 78(2):359–370.
- Munson, L., Terio, K. A., Kock, R., Mlengeya, T., Roelke, M. E., Dubovi, E. J., Summers, B. A., Sinclair, A. R. E., and Packer, C. (2008). Climate extremes promote fatal co-infections during canine distemper epidemics in african lions. *PLoS ONE*, 3(6):e2545.
- Mweetwa, T. et al. (2018). Quantifying lion (panthera leo) demographic response to land-use change. *PLOS ONE*.
- Nowell, K. and Packer, C. (2002). Panthera leo. *IUCN Red List of Threatened Species*, 2002.1. Esta es una evaluación de la especie león realizada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), una autoridad mundial en el estado de conservación de las especies.

- Packer, C., Caro, T. M., and Collins, A. J. (2013). *The Serengeti lion: behavioral ecology of a cooperative hunter*. University of Chicago Press. Este libro es una referencia clásica en el estudio de los leones del Serengeti, proporcionando datos detallados sobre la densidad poblacional y la dinámica social de esta población emblemática.
- Packer, C., Scheel, D., and Pusey, A. E. (1990). Why lions form groups: food is not enough. *American Naturalist*, 136(1):1–19.
- Railsback, S. F. and Grimm, V. (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton University Press, 2nd edition.
- Ray, J. C., Redford, K. H., Steneck, R. S., and Berger, J. (2005). *Large Carnivores and the Conservation of Biodiversity*. Island Press.
- Ripple, W. J., Estes, J. A., Beschta, R. L., Wilmers, C. C., Ritchie, E. G., Hebblewhite, M., et al. (2014). Status and ecological effects of the world’s largest carnivores. *Science*, 343(6167):1241484.
- Smith, J. L. D., McDougal, C., and Sunquist, M. E. (1993). Female land tenure system in tigers. In *Carnivore Behavior, Ecology, and Evolution*, volume 2, pages 97–109. Springer.
- Steven F. Railsback, V. G. (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2nd edition.
- Vinks, M. A., Creel, S., Schuette, P., Becker, M., Rosenblatt, E., Sanguinetti, C., Banda, K., Goodheart, B., Young-Overton, K. D., Stevens, X., Chifunte, C., Midlane, N., and Simukonda, C. (2024). Response of lion demography and dynamics to the loss of preferred larger prey. *Ecological Applications*, 31(4):e02298.
- Wang, M. and Grimm, V. (2007). Home range dynamics and population regulation: An individual-based model of the common shrew *Sorex araneus*. *Ecological Modelling*, 205(3-4):397–409.
- Wang, M. and Grimm, V. (2010). Population models for small mammals: A review of advances in the modeling of life cycles, home ranges, and dispersal. *Ecological Modelling*, 221(11):1378–1388.
- Wilensky, U. (1999). Netlogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- Wilensky, U., Rand, W., and et al. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Wooldridge, M. (1997). Agent-based software engineering. *IEE Proceedings-Software*, 144(1):26–37.