



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado en Veterinaria

Análisis de Viabilidad de Población del Leopardo (*Panthera pardus*) en Sri Lanka mediante el software Vortex

Leopard (*Panthera pardus*) Population Viability Analysis in Sri Lanka by means of Vortex software

Autor/es

Lucía R. de la Lastra Lanza

Director/es

María Teresa Tejedor Hernández y Luis Vicente Monteagudo Ibáñez

Facultad de Veterinaria

2021



ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	4
3.1. Distribución	4
3.2. Subespecies de leopardo	5
3.3. Hábitats	6
3.4. Territorio y dieta	6
3.5. Reproducción	7
3.6. Dispersión.....	7
3.7. Caza y exportación del leopardo.....	8
3.8. Sri Lanka	8
3.9. Población Humana y su interacción con el medio natural de Sri Lanka	9
3.10. Distribución y hábitat del Leopardo de Sri Lanka.....	10
3.11. Densidad de población del Leopardo en Sri Lanka	10
3.12. Expectativas de futuro	11
3.13. Niveles de Áreas Protegidas de Sri Lanka.....	12
3.14. Meta-población del Leopardo de Sri Lanka: división en poblaciones	12
A. Primera población: Zona húmeda	15
B. Segunda población: Parque Nacional de Yala	16
C. Tercera Población: Resto de la zona seca	17
3.15. <i>Vortex 10 “A stochastic simulation of the extinction process”</i>	18
4. MATERIAL Y MÉTODOS	18
4.1. Parámetros aplicados durante la ejecución del software Vortex	19
4.2. Simulaciones sin dispersión	21
4.2.1. Simulación nº 1 (S1;P1,P2 y P3)	21
4.2.2. Simulación nº 1.1 (S1.1;P1,P2 y P3)	21
4.2.3. Simulación nº 1.2 (S1.2;P1,P2 y P3)	21
4.2.4. Simulación nº 1.3 (S1.3;P1 y P3)	22
4.2.5. Simulación nº 2 (S2;P1 y P3).....	22
4.2.6. Simulación nº 3 (S3)	23
4.2.7. Simulación nº 3.1.....	23
4.3. Simulaciones con dispersión	23



4.3.2.1.	Simulación nº 4 (S4)	26
4.3.2.2.	Simulación nº 4.1 (S4.1)	26
4.3.2.3.	Simulación nº 4.2 (S4.2)	27
4.3.2.4.	Simulación nº 4.3 (S4.3)	27
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5.1.	RESULTADOS	27
5.1.1.	Probabilidad de extinción y retención de variación genética	27
5.1.1.1.	Simulaciones nº 1 y 1.1 de la primera población (S1 y 1.1;1)	27
5.1.1.2.	Simulación nº 1.2 de la primera población (S1.2;P1).....	27
5.1.1.3.	Simulación nº1.3 de la primera población (S1.3;P1).....	27
5.1.1.4.	Simulación nº 2 de la primera población (S2;P1).....	28
5.1.1.5.	Simulación nº 1 de la segunda población (S1;P2)	28
5.1.1.6.	Simulación nº 1.1 de la segunda población (S1.1;P2)	28
5.1.1.7.	Simulación nº 1.2 de la segunda población (S1.2;P2)	28
5.1.1.8.	Simulaciones nº 1, 1.1 y 1.2 de la tercera población (S1, S1.1 y S1.2;P3).....	28
5.1.1.9.	Simulación nº 1.3 de la tercera población (S1.3;P3)	28
5.1.1.10.	Simulación nº 2 de la tercera población (S2;P3)	29
5.1.1.11.	Simulación nº 3 y 3.1 (S3 y S3.1)	29
5.1.1.12.	Simulaciones nº 4 y 4.1 (S4 y 4.1).....	29
5.1.1.13.	Simulación nº 4.2 y 4.3 (S4.2 y 4.4)	29
5.1.2.	Tasas de crecimiento de la población de leopardos	30
5.1.2.1.	Simulaciones nº1, 1.1, 1.2, 1.3 y 2 de la primera población	30
5.1.2.2.	Simulaciones nº 1, 1.1 y 1.2 de la segunda población	30
5.1.2.3.	Simulaciones nº 1, 1.1, 1.2 de la tercera población	30
5.1.2.4.	Simulaciones nº 3 y 3.1	30
5.1.2.5.	Simulaciones nº 4 y 4.1	30
5.1.2.6.	Simulaciones nº 4.2 y 4.3	30
5.1.3.	Susceptibilidad a los cambios demográficos.....	32
5.2.	Discusión	32
6.	CONCLUSIONES	34
7.	CONCLUSIONS	35
8.	VALORACIÓN PERSONAL	36
9.	BIBLIOGRAFÍA	37



1. RESUMEN

El leopardo (*Panthera pardus*) es uno de los animales terrestres más ampliamente distribuidos alrededor del mundo. Una de las nueve subespecies de leopardo es la del leopardo de Sri Lanka o de Ceilán (*Panthera pardus kotiya*); su presencia tan solo se da en esta isla. El mayor número de individuos se encuentran en los parques nacionales de Yala, Wilpattu y Horton Plains, entre otras. Sri Lanka es un país en vías de desarrollo cuya población humana vive principalmente de la agricultura y ganadería de subsistencia, y se concentra en la zona húmeda del país. Esta subespecie a pesar de considerarse en estado "vulnerable" según la Lista Roja de IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), no muestra un descenso muy grande del número de individuos, pero esto podría variar a largo plazo debido al crecimiento de la población humana y la sobreexplotación de recursos. Todo ello provoca la degradación y fragmentación de hábitats y al aislamiento de poblaciones. Se decide llevar a cabo una serie de simulaciones con el programa de análisis de viabilidad de poblaciones (PVA) Vortex para predecir cómo esos factores pueden influir sobre la población de Sri Lanka; en ellas se somete (*in silico*) a la población a pérdida del hábitat, a aislamiento del censo total en tres poblaciones y a la restricción de los individuos en el interior de las zonas protegidas. Además, se realizan varios modelos donde se incluye la dispersión como herramienta para evitar la extinción. Como conclusión definitiva, los resultados de los modelos indican que la degradación del hábitat y el aislamiento afectan, sobre todo, a poblaciones pequeñas y las conducen a la extinción. Sin embargo, gracias a la dispersión y a la formación de una metapoblación se podría garantizar la supervivencia de una subpoblación en riesgo de extinción.

2. ABSTRACT

The leopard (*Panthera pardus*) is one of the most widely distributed terrestrial animals in the world. One of the nine subspecies of leopard is the Sri Lankan or Ceylan leopard (*Panthera pardus kotiya*), which is only found in Sri Lanka. The largest census is found in Yala, Wilpattu and Horton Plains National Parks, among others. Sri Lanka is a developing country; the human population lives mainly on subsistence agriculture and livestock and is concentrated in the humid zone of the country. This subspecies, despite being in "vulnerable" status according to the IUCN (International Union for Conservation of Nature) Red List, do not reflect an extremely big decline in the number of individuals. However, this might be changing over the years due to the growth of the human population and the overexploitation of resources. These changes



lead to the degradation and fragmentation of habitats and the isolation of populations. For these reasons, a series of simulations with the population viability analysis (PVA) software Vortex were performed to predict how these factors may influence the Sri Lankan population by subjecting (*in silico*) the population to habitat loss, isolation of the total census in three populations and restriction of individuals within protected areas. In addition, several models are run in which dispersal is included as a tool to avoid extinction. As a final conclusion, it can be seen from the models' results that both habitat degradation and isolation affect, above all, to small populations and as a consequence, leads them to extinction. However, thanks to dispersal and the formation of a meta-population, the survival of an endangered sub-population could be guaranteed.

3. INTRODUCCIÓN

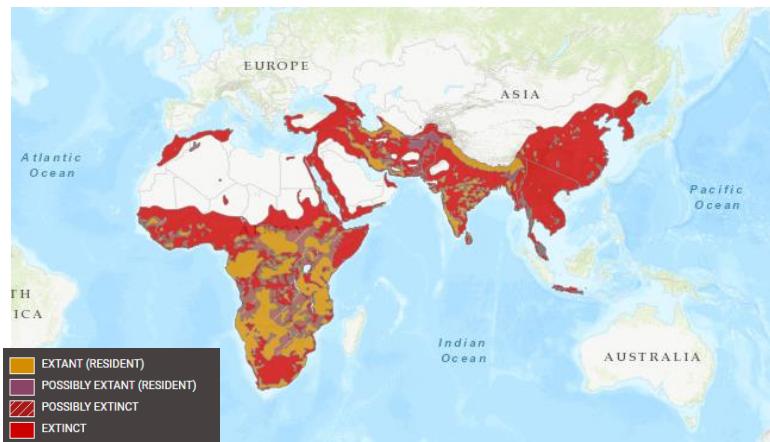
El leopardo, *Panthera pardus* (Linnaeus, 1758), es un mamífero carnívoro perteneciente a la familia *Felidae*; se trata de una de las 5 especies del género *Panthera* (Stein et al., 2020). Es un regulador de las cadenas tróficas con gran importancia en el funcionamiento de los ecosistemas (Abade et al., 2018).

3.1. Distribución

Tal y como se aprecia en la *figura 1*, es el felino con mayor distribución alrededor del mundo (Stein et al., 2020; Parchizadeh y Adibi, 2019; Abade et al., 2018). Se extiende a lo largo de los continentes africano y asiático, incluyendo el África subsahariana, Oriente Medio y el sur asiático hasta el lejano oriente ruso (Stein y Hayssen, 2013). En el norte de África es donde la presencia del leopardo está más discutida actualmente a pesar de los esfuerzos para poder detectar su presencia. En el resto de África las distintas poblaciones se están reduciendo críticamente, excepto en el sur donde se encuentra el grupo de animales más viable. Todos los individuos que habitan en este continente pertenecen únicamente a la subespecie *Panthera pardus* (Linnaeus, 1758).



Figura 1. Mapamundi donde se indica el territorio ocupado antiguamente, y actualmente por el leopardo y los lugares donde su presencia actual es desconocida. Tomada de Stein et al., 2020.



En el continente asiático la situación es diferente. En Oriente Medio han desaparecido la mayoría de las poblaciones conocidas históricamente. En el sudoeste asiático y en el Cáucaso se encuentran varios grupos de densidades muy bajas. En el norte y centro de China las poblaciones están reducidas y aisladas en lugares protegidos (Stein et al., 2020). Lo mismo ocurre en los países del sur de este mismo continente, donde además los datos de muertes reportadas muestran que la mayoría se dan fuera de las áreas protegidas donde el leopardo es más vulnerable (Naderi, Farashi y Erdi, 2018). A pesar de que la especie está ampliamente distribuida, las poblaciones se encuentran muy fragmentadas, el número de individuos es muy pequeño y continúa disminuyendo (Stein et al., 2020).

3.2. Subespecies de leopardo

La especie *Panthera pardus* puede dividirse en 9 subespecies genéticamente diferenciadas. Las nueve subespecies se identifican según su localización geográfica, por lo que tradicionalmente se pensaba que el aislamiento genético se debía a esas localizaciones (Miththapala, Seidensticker y O'Brien, 1996). Pero recientes estudios como el de Asad et al. (2019) muestran, al menos, una excepción. En este estudio se recogieron muestras de dos subespecies genéticamente diferentes en localizaciones muy próximas en Pakistán, lo que indica que ambas subespecies se solapan y que podría haber intercambio de genes fluyendo entre ellas.

Las nueve subespecies son: *Panthera pardus* en África (Linnaeus, 1758); *Panthera pardus nimr* (Hemprich y Ehrenberg, 1833) conocido como el leopardo de Arabia; *Panthera pardus saxicolor* (Pocock, 1927), el leopardo persa; *Panthera pardus melas* (Cuvier, 1809), el leopardo de Java; *Panthera pardus kotiya* (Deraniyagala, 1956), el leopardo de Sri Lanka; *Panthera pardus fusca* (Meyer, 1794), el leopardo indio; *Panthera pardus delacouri* (Pocock, 1930), el



leopardo indochino; *Panthera pardus japonensis* (Gray, 1862) en el norte de china y *Panthera pardus orientalis* (Schlegel, 1857), el leopardo de Amur (citados por Stein et al., 2020).

3.3. Hábitats

Gracias a su capacidad de adaptación podemos encontrarlo en prácticamente todo tipo de ambientes: es el felino con mayor gama de hábitats, como bosques, montañas, áreas semiáridas, sabanas, zonas rocosas, desiertos e incluso áreas suburbanas (Stein y Hayssen, 2013; Abade et al., 2018; Stein et al., 2020). Existen poblaciones en las regiones desérticas y semidesérticas de Namibia y Bostwana y también alguna población remanente en Egipto y la península Arábiga. Persisten en las regiones montañosas de Irán, en una variada gama de paisajes en la India y en las sabanas de las praderas de África oriental y meridional. Pueden encontrarse hasta una altitud de 5.200 metros en el Himalaya. También prosperan en las selvas tropicales de África occidental y central, así como en Sri Lanka y el sureste de Asia. Incluso sobrevive una subpoblación de leopardos en las regiones nevadas del Lejano Oriente ruso. Lo más insólito es que en la India y partes del África subsahariana habitan entornos urbanos y suburbanos (Stein et al., 2020) solapándose de esta forma sus territorios con espacios humanos y obligando a ambas especies a convivir (Kshetry, Vaidyanathan y Athreya, 2017).

A pesar de esta ventaja adaptativa, recientemente, la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), basándose en el estudio de Stein et al. (2020), ha clasificado a esta especie como “vulnerable” y a varias de las subespecies asiáticas como la *P. pardus delacouri* “en peligro crítico”.

3.4. Territorio y dieta

El tamaño del territorio de cada individuo varía principalmente según la disponibilidad de presas y la estructura del hábitat. En entornos más áridos y con menos densidad de presas los territorios son más extensos, mientras que en lugares como las selvas tropicales del sur y sureste de Asia su longitud no suele sobrepasar los 20 Km² (Stein et al., 2020).

Al igual que el territorio, la dieta del leopardo está relacionada con la disponibilidad de presas al igual que con la presencia de otros competidores como tigres, perros salvajes o hienas (Canela, 2020).



3.5. Reproducción

Las épocas reproductivas varían según la posición geográfica de cada población. Normalmente coinciden con los períodos de mayor abundancia de alimentos en el medio. Esto permite que la hembra pueda alimentarse adecuadamente para poder asegurar el correcto desarrollo fetal y embrionario y la posterior lactación, además de garantizar el nacimiento de los cachorros en un momento más ventajoso. Por ejemplo, en Irán las montas se producen entre enero y mediados de febrero, naciendo las crías en primavera; mientras que, en Sudáfrica, se producen a lo largo de todo el año (Stein y Hayssen, 2013). La gestación de este felino dura entre 88-122 días. Pueden llegar a tener hasta 6 cachorros, aunque lo más habitual son las camadas de 2 a 4 neonatos. Lo común es que cada hembra tenga entre 1 y 2 partos al año. El intervalo entre partos puede ir desde los 3,5 hasta los 45 meses. La primera cópula se produce a los 18 meses de edad en machos y a los 23-32 meses en hembras, ocurriendo el primer parto entre los 27-52 meses de edad de las hembras (Stein y Hayssen, 2013). Pueden vivir hasta 20 años en cautividad y se estima el intervalo generacional en 7,4 años (Stein et al., 2020).

3.6. Dispersión

La dispersión es una de las claves para la estructuración espacial de las meta-poblaciones (Hauser, 2001). Según varios estudios realizados a lo largo de los años por múltiples científicos (*Tabla 1*) la distancia que puede llegar a recorrer un leopardo al abandonar su territorio natal es muy diversa, contemplándose cifras desde 2 km (Muckenhirn y Eisenberg, 1973) hasta 194,5 km (Fattebert et al., 2013) respecto al territorio materno. Por norma general son los machos subadultos los que se ven obligados a abandonar el territorio y migrar a lugares más alejados. El rango de edad a la que abandonan el territorio va desde los 15 a los 30 meses: muchas veces son sus propias madres los que los expulsan a una edad muy temprana (13-18 meses) debido a que las condiciones del medio no son las más adecuadas, lo que podría sugerir que el momento de dispersión es función de la variabilidad social y ambiental (Sunquist, 1983).



Tabla 1. Edad de dispersión y distancia en línea recta recorrida por leopardos subadultos en África y Asia según varios estudios. Tomada de Fattebert et al., 2013.

Sex	Age (months)	Net distance (km)	Fate	Study area	Study reference
M	24–36	2–6.4	–	Wilpattu NP, Sri Lanka	Muckenheim & Eisenberg 1973
M	30	15	Contact lost	Tsavo NP, Kenya	Hamilton 1976
M	15–18	8–11	Dead	Chitwan NP, Nepal	Sunquist 1983
M	14.2	–	Dispersed	Londolozi GR, South Africa	Le Roux & Skinner 1989
F	30	–	Philopatric	Londolozi GR, South Africa	Le Roux & Skinner 1989
M	18–28	2.5–24	Dead/contact lost	Kruger NP, South Africa	Bailey 1993
F	36–42	–	Philopatric	Kruger NP, South Africa	Bailey 1993
M	Subadult	112.6	Dispersed/contact lost	Kalahari, South Africa & Botswana	Bothma <i>et al.</i> 1997
M	–	25–162	Dead	Namibia	Stander <i>et al.</i> 1997
F	–	–	Dispersed	Huai Kha Khaeng WS, Thailand	Simcharoen <i>et al.</i> 2008
M	23	194.5	Dead	Maputaland ecoregion	This study

M, male; F, female; –, not reported in the cited reference; NP, national park, GR, game reserve, WS, wildlife sanctuary.

3.7. Caza y exportación del leopardo

El leopardo se encuentra incluido en el apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) desde 1975. De acuerdo con el Artículo III de CITES, el comercio de las especies del apéndice I está prohibido (salvo las contadas excepciones en las que se certifique por las autoridades que la exportación de una determinada pieza no perjudique la conservación de la población, y siempre excluyendo los usos comerciales). En la Resolución Conf. 10.14 (Rev.Cop16) (2013) el CITES establece cupos de trofeos de caza y pieles para uso personal, y las condiciones y recomendaciones para la exportación de trofeos de caza y pieles. El CITES, además, establece unos cupos de exportación de pieles y caza para ciertos países del continente africano (Resolución Conf. 10.14, Rev.Cop16, Decimosexta reunión de la Conferencia de las Partes, 2013 y Septuagésima reunión del Comité Permanente, 2018), pero no para países como Sri Lanka, en el cual, actualmente, no hay ningún cupo legal de exportación de esta especie (CITES, 2021).

En adelante se va a seleccionar tan solo una de las subespecies para profundizar en sus características individuales y realizar con ella los modelos de simulación de viabilidad de poblaciones.

3.8. Sri Lanka

En la Isla de Sri Lanka, al sur de la India se encuentra la única subpoblación formada por individuos de la subespecie *Panthera pardus kotiya* (Deraniyagala, 1949), también conocido como el leopardo de Ceilán. La IUCN (2020) lo cataloga como subespecie “vulnerable”. Sri Lanka es una isla tropical en el subcontinente indio con una extensión de aproximadamente



65.610 km cuadrados. La topografía de la isla se compone de un macizo central con más de 2.500 metros de altitud y una llanura que lo rodea (Geekiyanage et al, 2015). Sri Lanka, junto con los Ghats occidentales de la India, es considerado uno de los puntos calientes de biodiversidad mundial en la región de Asia y el Pacífico por la *Conservation International* (2021). La diversidad de especies por unidad de área en Sri Lanka es la más alta de la región asiática (Geekiyanage et al., 2015).

3.9. Población Humana y su interacción con el medio natural de Sri Lanka

Sri Lanka es uno de los países más poblados de Asia, el crecimiento anual de la población desde 2010 se estima en 1,1%. La densidad de población por kilómetro cuadrado aumentó de 54 personas en 1900 a 139 personas en 1956 y a 329 personas en 2010. El 55% de la población habita tan solo en un 24% de la superficie del país que corresponde con la zona húmeda, en comparación con la zona seca, su densidad de población es mucho mayor (650 personas por km cuadrado en la zona húmeda y 175 en la zona seca) (Geekiyanage et al., 2015). Más del 72 por ciento de la población del país vive en áreas rurales, mientras que menos del 22 por ciento de la población está en áreas urbanas y el 6 por ciento en áreas de plantaciones de tierras altas (Pushpakumara, Bandara y Weerawardena citado por Geekiyanage et al., 2015).

El crecimiento de la población provoca expansión e intensificación de la agricultura, crecimiento incontrolado de la urbanización e industrialización y destrucción de los hábitats naturales lo que significa una amenaza elevada para el medio. El crecimiento poblacional y el deterioro ambiental desafían el desarrollo sostenible. La degradación ambiental es el resultado de la interacción dinámica de factores socioeconómicos, institucionales y actividades tecnológicas (Ray y Ray, 2011).

Sri Lanka se encuentra en una transición de la agricultura a la industria. La alta densidad de población y los esfuerzos sostenidos para mejorar los niveles de vida en el país han ejercido una enorme presión sobre el entorno natural del mismo. Como resultado, durante las últimas décadas, la base de recursos ha disminuido sustancialmente. Por lo tanto, se han tomado muchas iniciativas del sector gubernamental, privado y otros para promover el desarrollo sostenible en el país (Geekiyanage et al., 2015).

El área total de bosques naturales densos del país es de 1.675.000 Ha. Casi todos los bosques naturales de Sri Lanka son propiedad del Departamento de Bosques del Estado (FD) o del Departamento de Conservación de la Vida Silvestre (DWLC), que los gestiona y protege. Debido a los cambios de política del gobierno de Sri Lanka sobre la explotación de bosques naturales,



en 1990 se impuso una prohibición de tala en bosques naturales que aún, actualmente, continúa. La orientación de la producción ha cambiado a la orientación de la protección (Geekiyanage et al., 2015).

3.10. Distribución y hábitat del Leopardo de Sri Lanka

La distribución del felino a lo largo de Sri Lanka abarca diferentes medios incluyendo bosques de montaña, sub-montaña, de lluvia tropical, monzónicos secos y matorrales de zonas áridas (Kittle, Watson y Fernando, 2017). El hábitat de esta subespecie depende de la cobertura que ofrece el bosque, el tamaño de este, la conectividad, el nivel de protección del paisaje (presencia de refugios) (Kittle et al., 2018) y la densidad de presas (Kittle y Watson, 2020).

Sobreviven en paisajes en mosaico formados por cultivos, bosques de plantaciones, bosques naturales y otras áreas de uso humano, siempre que tengan zonas donde ocultarse y parches de bosque natural cercanos (Kittle y Watson, 2020). Un buen ejemplo son las plantaciones de té, donde los leopardos creen encontrar refugio y protección, pero se ven sorprendidos por los humanos que trabajan allí; esto provoca un aumento del número de ataques a humanos y el incremento de muertes de leopardos de origen antropogénico (Kshetry, Vaidyanathan y Athreya, 2017).

Debido a esta amplia distribución (Kittle y Watson, 2018) y a la ausencia de otros grandes depredadores como el tigre, el leopardo es el mayor eslabón de la cadena trófica (Canela, 2020) y se le puede considerar como un elemento clave que influye enormemente sobre los distintos ecosistemas de la isla.

3.11. Densidad de población del Leopardo en Sri Lanka

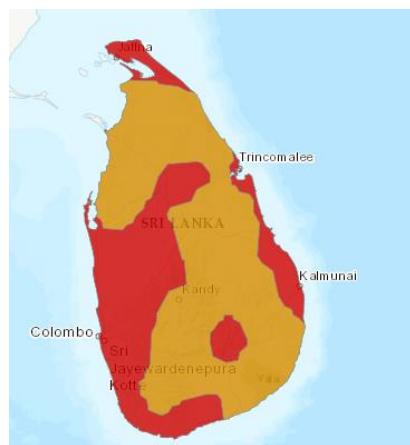
En todo el mundo, los leopardos han desarrollado una serie de adaptaciones para poder competir contra otros depredadores (tigres, leones, hienas y perros salvajes). Son nocturnos y solitarios, y utilizan los árboles para poder almacenar a sus presas y alimentarse durante varios días de estas (Stander et al., 1997). En cambio, en Sri Lanka este felino no tiene que compartir sus presas con ninguna otra especie. Esto ha provocado que no gaste tanta energía en proteger sus presas, cuidar su territorio o evitar ataques de otros grandes depredadores y ha podido desarrollar la cualidad de cazar grandes presas, en vez de especies más pequeñas (Stephens y Krebs, 1987). Además, esta peculiaridad favorece niveles de densidad más elevados en la isla que en otros países como la India o los países africanos (Canela, 2020).

Aun así, se calcula que han dejado de habitar un 63% del total de espacio ocupado de la isla desde 1750 (*figura 2*): se estima que quedan unos 776 adultos maduros en toda la isla, de los



cuales un 80% se encuentran en áreas protegidas (AP) y el 20% en las no protegidas (ANP). En concreto, del total de leopardos de las ANP un 17% se encuentran en la zona seca y un 30% en las zonas húmedas del interior (Kittle y Watson, 2020).

Figura 2. Distribución geográfica del leopardo en Sri Lanka. Zonas en marrón coinciden con las áreas habitadas por leopardos. Tomada de Kittle y Watson, 2020.



Los dos parques con mayores densidades de población son el Parque Nacional (PN) de Yala y el Parque Nacional (PN) de Horton Plains. En el primero existe una densidad de 12,1 adultos maduros cada 100 km² y de 21,7 individuos cada 100 km² en total (Kittle, Watson y Fernando, 2017). En el segundo la densidad es de adultos maduros es de 11,7 individuos por cada 100 km² y en el total de edades de 13,3 por cada 100 km² según un estudio basado en sistemas de captura y recaptura. Es en estos parques donde mayor densidad de adultos maduros hay en la isla (Kittle y Watson, 2018).

3.12. Expectativas de futuro

Respecto a sus perspectivas de futuro, a pesar de solo haber sufrido una pequeña disminución en la última década, se prevé una caída de la población mucho mayor basada en la pérdida de bosques actual, el aumento del conflicto entre humanos y leopardos, incluida la matanza directa (por ejemplo, represalia por la depredación del ganado, caza...) y la matanza accidental (Kittle y Watson, 2020). Su gran capacidad de adaptación a hábitats sub-óptimos ha impedido por el momento que las densidades de población disminuyan de forma drástica debido a la gran pérdida de bosque que está sufriendo la isla. Es decir, la perdida de hábitat todavía no ha provocado una disminución rápida en el número de individuos, pero debe vigilarse de cerca por si esto cambiase y se diesen cambios más abruptos (Kittle y Watson, 2020).

Existe un abanico muy amplio de amenazas que afectan a esta subespecie destacando el desarrollo de áreas recreativas y turísticas, los medios de transporte, la caza, las presas y la



gestión del uso del agua y el cambio climático (sequias, inundaciones y temperaturas extremas) como aquellos factores con un alcance mayoritario (50-90%). El mayor impacto (impacto medio de valor 6 según la Lista Roja de la IUCN) podría deberse al cambio climático. Aun así, hay trabajos que señalan la sospecha de que el descenso en la densidad de la subpoblación se debe a la perdida de hábitat por deforestación, el aumento del conflicto humano-leopardo provocado principalmente por el ataque al ganado, la caza furtiva y las muertes indirectas. Desde 2018 no se ha visto aumento del censo e incluso se sospecha de la bajada de este. Se estima que las muertes por causas humanas rondan los 7,6 leopardos muertos al año, lo que indica un aumento de la mortalidad por esta causa desde 2017 (Kittle y Watson, 2020).

3.13. Niveles de Áreas Protegidas de Sri Lanka

Clasificación de las áreas protegidas de Sri Lanka según Kittle y Watson (2020):

- A. Parques Naturales (PN).
- B. Áreas Protegidas (AP) de nivel I. Áreas con un nivel superior de protección como Parques Nacionales y Reservas Naturales Estrictas en Sri Lanka, donde las personas no son admitidas y donde el personal del Departamento de Vida Silvestre patrulla regularmente.
- C. AP de nivel II. Las Reservas Forestales, Santuarios, Bosques Reservados y Bosques de Conservación permiten cierto uso humano y no están bien vigilados, lo que permite incursiones regulares que impactan negativamente en la vida silvestre y la calidad de los bosques. Como resultado, estas áreas suelen contener una menor biomasa de presas disponible.

Las de nivel I permiten un hábitat adecuado para el leopardo, pero las de nivel II no (Kittle et al., 2018).

3.14. Meta-población del Leopardo de Sri Lanka: división en poblaciones

La mayoría de los individuos se concentran en las áreas protegidas (AP); la falta de corredores de fauna entre ellas provoca que se encuentren aisladas entre sí. Estas zonas protegidas se encuentran delimitadas, principalmente, por áreas rurales cuyos habitantes viven de la ganadería y agricultura de subsistencia y por áreas urbanas.

Los avistamientos de leopardos se concentran mayoritariamente en las AP donde no solo se respeta el hábitat, sino que abundan las presas. En las *figuras 3* (tomada de Brinkhoff 2021;



Kittle y Watson, 2020) y 4 (tomada de SEDAC, 2009) se puede comprobar como las áreas con mayor densidad humana se encuentran en la parte oeste del país, donde no se da ni un solo avistamiento de leopardo, y descendiendo dicha densidad en dirección noreste. Los leopardos prefieren evitar estas zonas altamente pobladas por personas (Ngoprasert, Lynam y Gale, 2007). Los núcleos de población rural, que engloba el 81% de la población total (Banco Mundial, 2019), son barreras antropogénicas que impiden la migración de leopardos entre las AP. Pese a todo, en las zonas de densidad humana baja, como el norte, se dan abundantes avistamientos fuera de las áreas protegidas que pueden atribuirse a menor impacto humano sobre el hábitat. También se debe tener en cuenta que el país cuenta con una amplia red de carreteras principales (*figura 5* tomada de Google Maps, 2020) que atemorizan a la fauna salvaje (Ngoprasert, Lynam y Gale, 2007) y actúan como barreras para su dispersión (Fattebert et al., 2013).

Figura 3. Representación de las provincias de Sri Lanka junto con la huella urbana marcada mediante punteado por la figura y de las densidades de población humana mediante colores (roja máxima densidad, después naranja, amarillo y por último verde. Los polígonos verdes representan los parques naturales y con puntos amarillos se representan los avistamientos de leopardos entre los años 2009-2018. Adaptada de Kittle y Watson, 2020 y Brinkhoff: City Population, 2021.

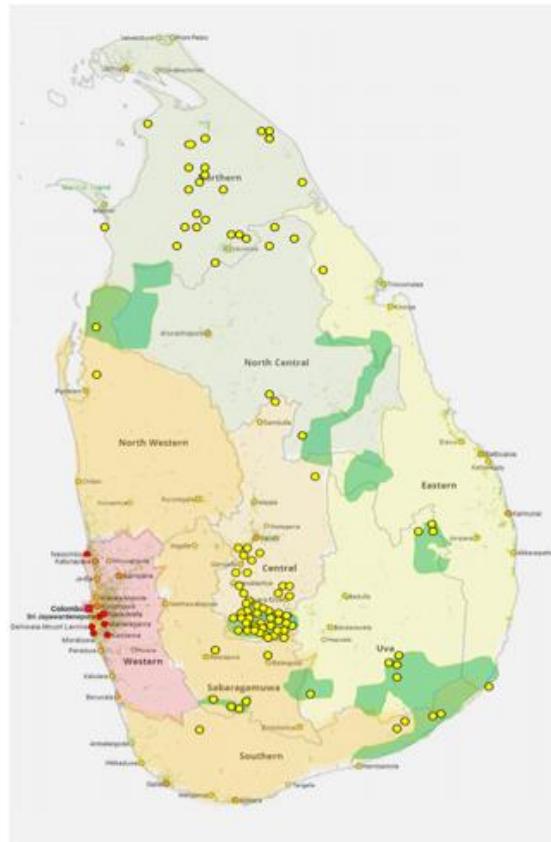


Figura 4. Densidad de población humana en Sri Lanka (Proyecto global de cartografía rural-urbana (GRUMP v1) del Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2009).

Figura 5. Figura de Sri Lanka. Se observan los núcleos de población más grandes y las carreteras nacionales tomado de Google Maps, 2020.

Figura 4

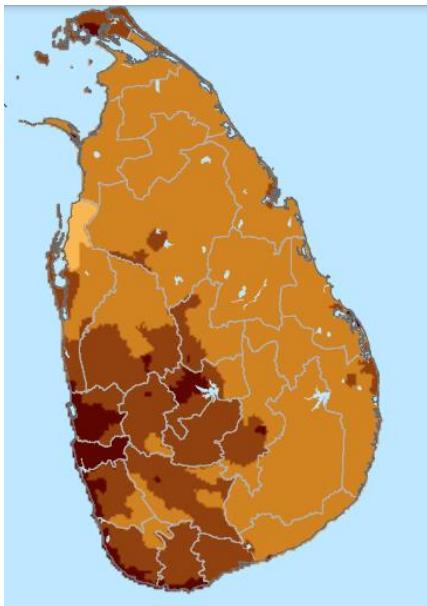


Figura 5



La reducción de la presencia de estos animales fuera de los lugares protegidos no solo está condicionada por la población humana sino, también, por la baja densidad de presas. Estas se ven obligadas a abandonar los espacios que antes ocupaban por falta de alimento debido a los cultivos, por competencia con la ganadería y por otras presiones antropogénicas.

A la vista de todo lo anterior, se podría decir que los paisajes terrestres fragmentados y dominados por humanos provocan una segregación de hábitats que puede conducir al aislamiento de poblaciones animales conectadas únicamente a través de movimientos entre parches (Miller y Cale, 2000).

En consecuencia, de todo lo expuesto, en las simulaciones que se desarrollarán en este trabajo se propone la división del censo total en tres poblaciones justificado por los siguientes argumentos:

- Entre ellas hay núcleos de población humana de gran tamaño
 - Se encuentran lejos las unas de las otras
 - No existen corredores de fauna que puedan conectarlas



- Las áreas que rodean a las zonas protegidas están totalmente ocupadas por cultivos y ganadería, obligando a los animales a prácticamente habitar, tan solo, las zonas con protección

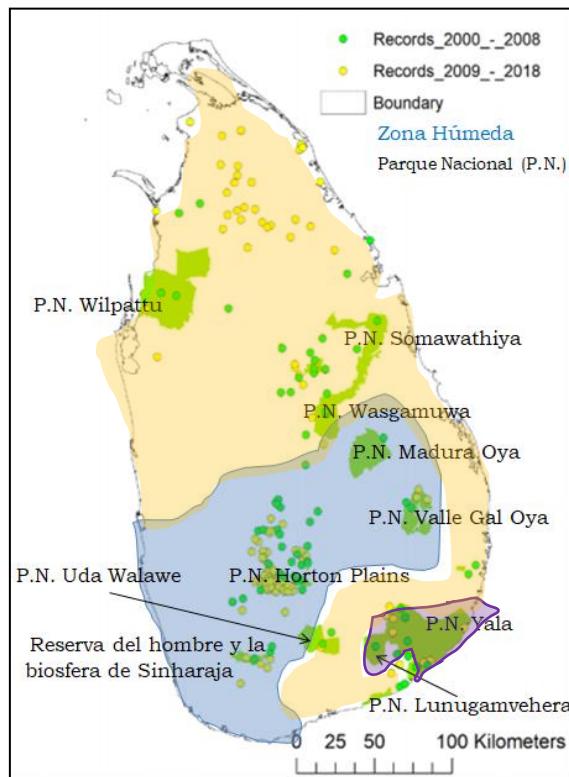
Ciertamente, se podría estar sobreestimando la capacidad de migración dentro de cada una de las tres poblaciones ya que, por ejemplo, en el caso del PN de Wilpattu, se considera su censo junto con el de áreas de otros niveles y no protegidas debido a su cercanía, pero no se tiene en cuenta si las barreras humanas son capaces de impedir totalmente su deambulación por toda la zona.

A. *Primera población: Zona húmeda*

Comprende el Parque Natural Horton Plains, las áreas protegidas de nivel I como la Reserva Forestal de Sinharaja y Reserva Natural Estricta de Hakgala, las áreas de nivel II y las áreas no protegidas de la zona húmeda, corresponde con el sombreado azul de la *figura 6* adaptada de Kittle y Watson, 2020.

Los censos, densidades de población y tamaño del área se presentan en la *tabla 2* (adaptada de Kittle y Watson, 2020). El mayor número de avistamientos se sitúan en los parques naturales como puede verse en la *figura 6* (adaptada de Kittle y Watson, 2020), esto se debe a que es la zona de Sri Lanka con mayor densidad de población humana, sobre todo, en la costa como puede comprobarse en la *figura 3* (tomada de Brinkhoff, 2021 y Kittle y Watson, 2020) y en la 4 (tomada de SEDAC, 2009). Además, el parque donde mayor número de animales hay, PN Horton Plains, se encuentra rodeado por las áreas urbanas y rurales más pobladas, tal y como se aprecia en la *figura 4* (tomada de SEDAC, 2009). En la zona seca sólo se utiliza el 30 por ciento de la tierra, mientras que en la zona húmeda la utilización de la tierra ha alcanzado su punto máximo con más del 80 por ciento utilizado, sin dejar apenas margen para la expansión (Ray y Ray, 2015). Esto podría provocar el aislamiento de todos los individuos de ese parque y de las zonas concomitantes. El crecimiento de la población humana de esa provincia se ha duplicado en 40 años, lo que provoca una enorme disminución de la capacidad de carga de la zona para los leopardos, debido a la construcción y, sobre todo, a la deforestación para cultivo. Así mismo, queda aislada del resto de poblaciones de leopardo por carreteras principales y áreas rurales y urbanas, como se aprecia en la *figura 5* (tomada de Google Maps, 2020).

Figura 6. Representación de los Parques Naturales de Sri Lanka en forma de figuras verdes y de los lugares donde se han registrado leopardos adultos con puntos verdes (2000 - 2008) y con puntos amarillos (2009 – 2018). Y representación de las diferentes poblaciones: en azul población 1, en morado población 2 y en naranja población 3. Adaptada de Kittle y Watson, 2020.



B. Segunda población: Parque Nacional de Yala

Se encuentra en la zona seca del sur de la isla, relativamente cerca de las provincias con altas densidades de población humana, puede verse en color morado en la *figura 6* (adaptada de Kittle y Watson, 2020). Está rodeado por carreteras principales como se aprecia en la *figura 5* (tomada de Google Maps, 2020), y por zonas rurales donde se práctica la agricultura y ganadería de subsistencia. Las áreas protegidas y no protegidas más cercanas que están en la zona sur se consideran pertenecientes a la tercera población: aunque podrían ser consideradas la misma población, debido a su distancia y por la comodidad del manejo de los datos se prefiere considerarlas como dos poblaciones independientes. Se debe tener esto siempre en cuenta, sobre todo, al tratar los mecanismos de aislamiento y dispersión. Los censos, densidades de población y tamaño del área se presentan en la *Tabla 2* (adaptada de Kittle y Watson, 2020).



Tabla 2. Datos sobre la población de leopardo de Sri Lanka según niveles de protección de las áreas naturales (adaptada de Kittle y Watson, 2020).

* Comprende PN Wilpattu y las zonas de nivel I del área seca. Se utilizan los datos del Parque Natural para estimar los datos de las otras zonas así que se podría estar sobreestimando ya que en Wilpattu la disponibilidad de presas y agua es mayor.

* Esta estimación relativamente alta se debe al paisaje único de la finca de té que comprende parches de bosques mixtos, pastizales y plantaciones y contiene una cantidad razonable de presas silvestres y, de esta manera, es similar a las AP de Nivel II aquí.

		km ²	Densidad total (individuos/ km ²)	Nº de individuos total	Densidad Adultos (individuos/ km ²)	Nº de adultos total
Zona seca de tierras bajas	PN Yala	141 km ²	21,7		12.1	17
	Nivel I (PN Wilpattu)	5177,56 km ²	16,2	838*	8,3	429
	Nivel II	2829,86 km ²			4.15	117
	Aéreas no protegidas	5748,22 km ²			2.075	119
	Total					683
Zonas húmedas	PN Horton Plains	31,6 km ²			11.7	3
	Nivel I	100.06 km ²			9.15	9
	Nivel II	700,49 km ²			6.6	46*
	Aéreas no protegidas	505,78 km ²	7,6	38	6,6	33
	Total					92
TOTAL						776
Áreas protegidas						623
Áreas no protegidas						153

C. Tercera Población: Resto de la zona seca

Comprende el Parque Nacional de Wilpattu (extensión del parque de 1.317 km²) y otras áreas protegidas de nivel I, las áreas de nivel II de la zona seca y las áreas no protegidas de este mismo lugar. Los censos, densidades de población y tamaño del área se presentan en la Tabla 2 (adaptada de Kittle y Watson, 2020).



3.15. Vortex 10 “A stochastic simulation of the extinction process”

Vortex (actualización 10.0.7.0) (Lacy y Pollak, 2020) es un programa informático de simulación individual tipo Monte Carlo, utiliza los efectos de las fuerzas deterministas, así como eventos estocásticos demográficos, ambientales y genéticos para realizar simulaciones en poblaciones de vida silvestre (Lacy, 1993). Simula mediante modelos predictivos y estocásticos los efectos de las tasas demográficas medias, las catástrofes, la depresión endogámica, la extracción, la suplementación y la estructura de la meta-población sobre la viabilidad de la población de vida silvestre, es decir, permite realizar un análisis de viabilidad de poblaciones (PVA) para determinar la probabilidad de su extinción bajo diferentes circunstancias variables (Lacy, 2000). La estocasticidad demográfica surge de la variación aleatoria en la que los individuos se reproducen, mueren y pertenecen a cada sexo (Lacy, 2000). Es sencillo, de acceso libre a través de su web y se utiliza en multitud de estudios sobre poblaciones (Palazón, 2012).

Vortex simula una población sometida a una serie de eventos discretos y secuenciales que ocurren en un ciclo anual (u otro intervalo de años) normal de reproducción sexual de un individuo diploide. Todos los eventos son variables aleatorias que siguen distribuciones que pueden ser especificadas por el usuario. Está diseñado para especies de vida larga, con baja fecundidad, como mamíferos, reptiles y aves (Lacy, 1993); pero la versión actual confiere al usuario la capacidad de variar los días que tendría un año de esa especie en concreto, permitiendo utilizarlo con animales cuyo ciclo de vida se considera menor de 365 días (Lacy, Miller y Traylor-Holzer, 2015). La simulación de la población se repite muchas veces para generar la distribución de destinos que podría experimentar la población. Con estos modelos Vortex es capaz de identificar una amenaza individual para la cual una especie es particularmente vulnerable (Lacy, 1993). Para ampliar más los conocimientos sobre el programa se puede acudir a su manual “Vortex 10 User’s Manual” (Lacy, Miller y Traylor-Holzer, 2015).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

Para poder definir los valores básicos de los parámetros de población del leopardo de Sri Lanka y los datos relativos al software VORTEX, se ha recurrido a la bibliografía habitual utilizando buscadores científicos como Pubmed y Google Académico. También se han utilizado fuentes como la *Lista Roja* de la UICN, CITES y la revista National Geographic.



4.1. Parámetros aplicados durante la ejecución del software Vortex

- Se trabaja con un número mínimo inicial de 200 interacciones, durante 200 años, teniendo en cuenta también lo ocurrido a 50, 100 y 150 años según la situación. La extinción se define como la desaparición de uno de los sexos. Cada año tiene 365 días.
- No variamos el número de los equivalentes letales existentes propuesto por defecto en el programa, de acuerdo con las recomendaciones de O`Grady et al. (2006). Se mantiene en el valor 6,29; de acuerdo con las instrucciones del programa, ya que no existen evidencias científicas para variar esta cifra. Un equivalente letal es un alelo deletéreo que causaría la muerte del individuo si se presentase en homocigosis (Morton, Crow y Muller, 1956) o una colección de alelos equivalentes, un alelo con un 50% de probabilidad de provocar letalidad o 10 alelos, cada uno de los cuales tiene un 10% de probabilidad de provocar letalidad si se da homocigosis (Morton, Crow y Muller, 1956). Con ellos se puede cuantificar la magnitud de la depresión consanguínea. Por ejemplo, el estudio de O`Grady et al. (2006) muestra que en muchas poblaciones con problemas de consanguinidad el valor se sitúa en torno a 6,29 equivalentes letales: es como si las poblaciones tuvieran 6,29 alelos que en homocigosis causarían letalidad a los individuos. Obviamente, los alelos pueden pertenecer a varios loci, y su efecto letal sólo se da cuando en un locus concreto se da la homocigosis para un alelo letal. También es obvio que la homocigosis por descendencia típica de las poblaciones afectadas de consanguinidad es la que facilita que se dé esa homocigosis (O`Grady et al., 2006).
- También se mantiene la correlación de la variación ambiental (EV) entre poblaciones definida por defecto por el programa (0,5). De acuerdo con el manual del programa (Lacy, Miller y Traylor-Holzer, 2015), se define la EV como la variación en las probabilidades de supervivencia y reproducción anuales que surgen de la variación aleatoria de las condiciones ambientales. Por lo que la correlación de EV entre las poblaciones muestra si los efectos ambientales afectan a la supervivencia y reproducción de cada población de la misma manera, es decir, si la correlación es alta un año con buenas tasas de supervivencia o reproducción en una población nos indica que también lo habrá sido en la otra. La correlación de EV entre las poblaciones obtiene valores desde 0.0; cuando las EV son totalmente independientes entre poblaciones, a 1.1; cuando EV está totalmente sincronizado entre poblaciones. En resumen, la correlación elegida para la simulación es simplemente la proporción de EV total que es común a todas las poblaciones. En el caso de



Sri Lanka donde hay muchas variaciones en las condiciones ambientales una relación de 0,5 es adecuada.

- Tampoco se varían las probabilidades de muerte para cada rango de edad.
- Los datos reproductivos no varían entre las diferentes simulaciones y se presentan en la *Tabla 3*.
- Se asume que el número de adultos es la población total puesto que son los reproductores que realmente existen, a menos que se indique otro tamaño poblacional.

Tabla 3. Datos reproductivos utilizados para todas las simulaciones por igual.

Sistema Reproductivo (Reproductive System)	
Edad primera camada hembra	3
Edad primera camada macho	3
Esperanza de vida (en libertad, hasta 20 en cautividad)	10
Máximo nº de camadas por año	1
Máximo nº de cachorros por camada	3
Sex ratio	50
Edad máxima de reproducción del macho	8
Edad máxima de reproducción de la hembra	10
Tasas reproductivas (Reproductive Rates)	
% De hembras adultas que se aparean	70
SD	10
Distribución de camadas por año (%) - 0 camadas /1 camada	0 / 100
Distribución normal del número de descendencia por camada y hembra	Media 2,5 // SD 1
monopolización de la copulación - pool de machos que se reproducen (%)	100

- Se subdivide el censo en tres poblaciones geográficamente aisladas o aparentemente aisladas como se ha explicado anteriormente en la introducción; la primera comprende la zona húmeda completa, la segunda el Parque Natural de Yala y la tercera el resto de zona seca. Se utilizan los datos de nº de población de la Tabla 2 (adaptada de Kittle y Watson, 2020).

- En Vortex se asume una capacidad de carga de un 5% mayor que el tamaño poblacional actual ($K=5\%N+N$). Este parámetro suele ser algo mayor en las poblaciones, pero en este caso hablamos de una isla en la que la población humana crece y se extiende continuamente, lo que predispone a un decrecimiento en los recursos naturales y un empeoramiento del hábitat. Es uno de los parámetros que más influyen sobre una población.
- Se realizan en total 27 simulaciones diferentes con el objetivo de obtener respuestas sobre diferentes situaciones que se plantean. Para ello se van a variar en Vortex los parámetros de capacidad de carga (K), tamaño de población (N), caza y dispersión. Si no se indica lo contrario se asumen en las simulaciones las características descritas en el apartado 4.1.

4.2. Simulaciones sin dispersión

4.2.1. Simulación nº 1 ($S1;P1,P2$ y $P3$)

Se asume que las tres poblaciones antes descritas están aisladas entre sí y se analiza la viabilidad de cada una de ellas.

- Simulación nº 1, primera población ($S1; P1$)
- Simulación nº 1, segunda población ($S1;P2$)
- Simulación nº 1, tercera población ($S1;P3$)

4.2.2. Simulación nº 1.1 ($S1.1;P1,P2$ y $P3$)

Se analiza la viabilidad de las tres poblaciones aisladas si llegan a la capacidad de carga máxima ($K=N$).

- Simulación nº 1.1, primera población ($S1.1;P1$)
- Simulación nº 1.1, segunda población ($S1.1;P2$)
- Simulación nº 1.1, tercera población ($S1.1;P3$)

4.2.3. Simulación nº 1.2 ($S1.2;P1,P2$ y $P3$)

Se simula nuevamente la simulación nº 1, pero variando a largo plazo la capacidad de carga, que se reduce 1% al año durante 80 años. Los datos se estiman a partir de la densidad de población humana de datos históricos y del crecimiento de la población humana en la zona cercana a los leopardos, que se calcula en 1,1% al año (Geekiyange et al., 2015) teniendo en cuenta que siempre que aumenta la población humana disminuye la K del lugar.



En el caso de esta simulación se debe recordar que la segunda población es un PN por lo que se tendería a pensar que el nivel de conservación se mantendría y el crecimiento poblacional no influenciaría, al menos, directamente al parque ni a su naturaleza, pero qué ocurriría si deja de respetarse esta área.

Por otro lado, en el resto de las poblaciones también se incluye zonas protegidas de niveles altos, al realizar esta simulación buscamos saber el impacto que provocaría que estas zonas se vieran afectadas, tanto directamente como indirectamente por la pérdida del hábitat de su alrededor o por cambios en las políticas de conservación de las áreas protegidas. Por lo cual, se habla del decrecimiento de la capacidad de carga de estos lugares de un 1% al año teniendo en cuenta que no se hace nada para conservar las AP.

- Simulación nº 1.2, primera población (S1.2;P1)
- Simulación nº 1.2, segunda población (S1.2;P2)
- Simulación nº 1.2, tercera población (S1.2;P3)

4.2.4. Simulación nº 1.3 (S1.3;P1 y P3)

Análisis de la viabilidad cuando la perdida de hábitat solo afecta a las áreas no protegidas (ANP) y de nivel II.

Es más realista pensar que son estas áreas las que directamente se van a ver afectadas ya que su nivel de protección es mucho menor e incluso inexistente, esto queda explicado en el párrafo introductorio “3.13. Niveles de áreas protegidas”. Por ese motivo se utilizarán los tamaños de población de estas áreas concretamente; primera población, N= 79 K=82 y tercera población, N=236 K=247, recogidos en la *tabla 2* (adaptada de Kittle y Watson, 2020) y se someterán a una pérdida de capacidad de carga del 1%.

- Simulación nº 1.3, primera población (S1.3;P1)
- Simulación nº 1.3, tercera población (S1.3;P3)

4.2.5. Simulación nº 2 (S2;P1 y P3)

Análisis de la viabilidad de las poblaciones existentes tan solo en las áreas protegidas (PN y áreas de nivel I) de las poblaciones primera y tercera. Respecto a la segunda, ya se ha realizado este análisis en la primera simulación.



Se utilizan los tamaños de población correspondientes a las áreas de mayor protección; parques naturales y áreas de nivel I presentes en la *tabla 2* (adaptada de Kittle y Watson, 2020). En el caso de la primera población, N=12 y K=13, y de la tercera población, N=429 y K=450.

- Simulación nº 2, primera población (S1.3;P1)
- Simulación nº 2, tercera población (S1.3;P3)

4.2.6. *Simulación nº 3 (S3)*

Análisis del impacto de la caza sobre los individuos de las ANP y del NII utilizando un tamaño de población de 316 individuos (datos obtenidos a partir de la *tabla 2* adaptada de Kittle y Watson, 2020). Al año se estiman unas 7,6 muertes de leopardo por causas humanas por lo que se decide poner en el Vortex las siguientes características: se cazan adultos de más de tres años, tres hembras y cuatro machos de media (el valor de un macho adulto es mayor), manteniendo esta cifra anual de muertos durante 80 años (para que sea un tiempo intermedio entre poco y largo plazo).

4.2.7. *Simulación nº 3.1 (S3.1)*

Además de la caza, se reduce 1% la K al año.

4.3. Simulaciones con dispersión

4.3.1. Características específicas de las simulaciones con dispersión

A. El descarte de la zona humeda como lugar de dispersión en ningun sentido

La dispersión se ve reducida e incluso anulada por las barreras humanas como se ha comentado anteriormente. Este lugar en concreto presenta al menos un 80% de utilización humano (Geekiyamage et al., 2015), es decir, las áreas no humanizadas son escasas por lo que se asume que esta población no se dispersa más allá de la zona húmeda, y nunca llega a ninguna de las otras poblaciones, impidiéndose con ello el flujo de genes y dejándola aislada. Por otro lado, tampoco puede recibir animales nuevos tanto por las barreras humanas como por la falta de espacio en el medio que podría impedir que ningún otro leopardo encontrase un territorio desocupado. Además, este lugar avanza hacia la pérdida del espacio natural casi por completo, la posibilidad de re-naturalizar esta área es ínfima; las personas tienen la necesidad de cumplimentar sus necesidades básicas y a mayor incremento de población mayores necesidades de la población humana.

**B. Subpoblaciones 2 y 3 (Yala y Wilpattu, respectivamente)**

Como nos demuestran los datos anteriormente citados en la *Tabla 1*, el leopardo podría llegar a otras áreas protegidas, pero deben atravesar barreras humanas como la agricultura y las carreteras, en el caso de que se creasen pasos de fauna en las carreteras y corredores o parches muy cercanos protegidos podría darse la dispersión del leopardo incluso por todo el país. Asentándose sobre todo en la zona seca, ya que en la húmeda no queda espacio sin humanizar.

Se va a trabajar principalmente con la premisa de que, a pesar del aislamiento por las carreteras y resto de barreras humanas del Parque Natural de Yala, de este sí que son capaces de migrar varios animales a otras zonas protegidas y no protegidas concomitantes que se encuentran contempladas en la tercera población, es decir, en el resto de la zona seca. Esto supondría que dos poblaciones sí que podrían estar entrando en contacto. Obviamente sería muy asombroso que un animal pudiese cruzar todo el país hasta la zona norte, pero si moverse por la zona seca del sur fuera del parque. Por lo que se asume la presencia de dos subpoblaciones: Subpoblación de Yala (corresponde con la segunda población) y subpoblación de Wilpattu (corresponde con la tercera población).

C. Tamaños de población

El resto de las simulaciones se han llevado a cabo con un tamaño poblacional igual al número de adultos maduros (madurez sexual a los tres años de media), ya que era de lo que se tenía datos fiables. Sin embargo, en este caso, se debe tener en cuenta que son los subadultos de entre uno y tres años los que comienzan a migrar (Sunquist, 1983) y es a los cuatro años cuando se asume que ya estarán asentados en un territorio. De esta forma se decide calcular un número aproximado de cachorros entre 0-2 años, considerando a los de tres ya adultos a partir de los datos de la *table 2* (Kittle y Watson, 2020). Se asume una fertilidad de las hembras del 70% y un 100% de machos que pueden criar. En las áreas de nivel II y las no protegidas se cree que las hembras tan solo tienen un cachorro por camada, debido a que son áreas menos protegidas, con más repercusiones humanas y más recursos sobreexplotados, mientras que en las áreas protegidas (PN y NI) serían dos cachorros por camada y hembra de media. Cuando hay decimales se asume siempre una hembra más; su probabilidad de supervivencia es mayor ya que no deben alejarse tanto del territorio natal (menos probabilidad de muerte por causa humana), son más pequeñas por lo que necesitan menos recursos y son menos codiciadas como trofeo de caza.



Los datos recopilados para cada subpoblación se encuentran resumidos en la *tabla 4* (adaptada de Kittle y Watson, 2020) y son los siguientes:

- **Subpoblación Yala:** El tamaño de población total se calcula en 27 individuos, 17 adultos maduros de ambos sexos y 10 cachorros de ambos sexos. Y una K de 28.
- **Subpoblación Wilpattu:** El número de adultos maduros es igual a 665 (*table 2* adaptada de Kittle y Watson, 2020), el número de cachorros total calculado es de 491 (mitad hembras y mitad machos). Se asume siempre de cualquier cifra de tamaño de población que el 50% hembras y 50% machos. Por lo que se utiliza un tamaño de población total de 1.156 y una capacidad de carga de 1.213.

Tabla 4. Resumen de cifras de tamaño de población utilizadas para cada rango de edad en las simulaciones de dispersión. Datos obtenidos a partir de la *tabla 2* adaptada de Kittle y Watson, 2020.

ANIMALES QUE HAY en total	YALA	WILPATTU
Nº de animales entre 1-3 años	14	656
Nº de animales entre 4-10 años	13	500

A partir de todos estos datos se rellena manualmente (intentando seguir la misma pauta que el programa) la tabla del número de individuos por edad del “Initial population size”.

D. La dispersión

Se debe tener en cuenta dos cosas fundamentales: la subpoblación Yala posee una densidad muy alta de individuos (21,1/100 km²) y que la subpoblación Wilpattu tiene mucho espacio ya que abarca todo el resto de zona seca, incluyendo otras zonas protegidas y no protegidas.

Se establece que no pueden entrar individuos en poblaciones saturadas y se introducen los valores en número de individuos que migran.

Se consideran las ratios de mortalidad especificados por el programa de forma automática, siendo importante destacar lo siguiente:

- ***Ratios de mortalidad:*** al año mueren un 20% de individuos (hembras y machos) de más de tres años. Son estos los que ocupaban un territorio y al morir queda libre y puede ser ocupado por otro individuo que este en plena dispersión.
- ***Muertos en Wilpattu mayores de tres años:*** 20% de 500 son 100 nichos ecológicos libres que pueden ser ocupados.
- ***Muertos en Yala mayores de tres años:*** 20% de 11 son dos nichos ecológicos libres.



E. Movimiento de animales

Tras esto se decide realizar la simulación de la siguiente manera:

1. De YALA a WILPATTU

Wilpattu abarca toda la zona seca, según los Km un leopardo podría llegar a la mitad de esta zona desde Yala, eso sumado a las barreras humanas que sigue habiendo, hace asumir siendo conservadores, que tan solo un 30% de individuos desde Yala pueden llegar y ocupar un territorio en Wilpattu.

Según esto y teniendo en cuenta la alta densidad de Yala se puede pensar que al menos el 90% de los individuos entre 1-3 años deben abandonar el parque para buscar otro territorio y de esta forma impedir sobrepasar el nivel de saturación del medio. Migran 90% de 14 (*tabla 5*).

2. De WILPATTU a YALA

Se debe asumir que los huecos que queden libres en este territorio podrán ser ocupados por la propia población. Aun así, se podría considerar en un nivel de dispersión muy bajo como de 0,5%, es decir, 3 individuos (*tabla 5*).

Tabla 5. Resumen del número de animales que migran en el rango de edad establecido.

ANIMALES QUE MIGRAN	DE YALA	DE WILPATTU
% de animales entre 1-3 años	90%	0.5 %
nº de animales entre 1-3 años	90% de 14 son 12,6 truncos a 12	0,5% de 656 es 3,28 y truncos a 3

4.3.2. Simulaciones

Con todos los datos anteriores se desarrollan 4 simulaciones. Se analiza la viabilidad de las poblaciones variando la supervivencia de los migrantes en las dos primeras simulaciones, y añadiendo la degradación del habitat en las dos siguientes.

4.3.2.1. Simulación nº 4 (S4)

Viabilidad de la meta-población cuando la supervivencia de los que migran es de 10%. Esto podría considerarse como momento actual.

4.3.2.2. Simulación nº 4.1 (S4.1)

Viabilidad de la meta-población si la migración es efectiva (70% de supervivencia a la migración).



4.3.2.3. Simulación nº 4.2 (S4.2)

Viabilidad de la meta-población con una supervivencia del 10% más la degradación del habitat de un 1% durante 80 años.

4.3.2.4. Simulación nº 4.3 (S4.3)

Viabilidad de la meta-población con una supervivencia del 70% más la degradación del ecosistema en un 1% al año durante 80 años.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESULTADOS

Todos los resultados se encuentran resumidos y ordenados en la *tabla 6*. A continuación, utilizando los códigos para las simulaciones propuestos en el apartado 4 se indican los resultados más importantes.

5.1.1. Probabilidad de extinción y retención de variación genética

5.1.1.1. Simulaciones nº 1 y 1.1 de la primera población (S1 y 1.1;1)

La probabilidad de extinción de la primera población cuando se queda aislada es del 0% en 200 años que dura la simulación. En esta misma simulación y en la nº 1.1 (aislada y con capacidad de carga en el límite) la población tiene un mínimo de 95% de probabilidad de supervivencia en 200 años, manteniendo un nivel de heterocigosidad observada de 0,64. Teniendo un tiempo medio para la primera extinción de 200 años y un tamaño de población a los 100 años de 87 individuos (N inicial es igual a 92).

5.1.1.2. Simulación nº 1.2 de la primera población (S1.2;P1)

Cuando se aísla la primera población y se produce perdida de 1% al año de capacidad de carga: la probabilidad de supervivencia es del 83% con una retención de variabilidad genética de 0,89 en 100 años; pero 50 años más tarde (año 150) la probabilidad de extinción aumenta hasta el 90% (probabilidad de supervivencia 10%) y un tiempo medio de extinción de 118 años. Al acabar la simulación la probabilidad de extinción en 200 años es del 100%.

5.1.1.3. Simulación nº 1.3 de la primera población (S1.3;P1)

Cuando la degradación del habitat solo se da en las áreas con menor protección (Nivel II y ANP) en 150 años la probabilidad de extinción es del 98% con un nivel de heterocigosidad de 0,65.



Siendo el último año con individuos viables el 163. La media de tiempo de extinción son 107 años.

5.1.1.4. Simulación nº 2 de la primera población (S2;P1)

Cuando la primera población queda aislada tan solo en las áreas de mayor protección la probabilidad de extinción a los 50 años es del 84% con una retención de heterocigosidad de 0,6. La extinción media se da a los 32 años y la máxima a los 95 en este modelo.

5.1.1.5. Simulación nº 1 de la segunda población (S1;P2)

En la segunda población aislada, en 100 años sobrevivirán tan solo con una probabilidad del 3,5% y una heterocigosidad de 0,29. Y con una media de tiempo de extinción de 52 años y la extinción total en un máximo de 121 años.

5.1.1.6. Simulación nº 1.1 de la segunda población (S1.1;P2)

A los 150 años ya se ha dado la extinción total con un 100% de probabilidad. En el año 100 la probabilidad de extinción es del 98%, la media de tiempo para la extinción es a los 46 años y la extinción total se da a los 121 años.

5.1.1.7. Simulación nº 1.2 de la segunda población (S1.2;P2)

A los 100 años ya está la población totalmente extinta con una media de tiempo de la primera extinción de 42 años y una extinción total a los 74 años con una probabilidad del 95%. A los 50 años la probabilidad de supervivencia es del 24% con una retención de variabilidad genética del 0,57.

5.1.1.8. Simulaciones nº 1, 1.1 y 1.2 de la tercera población (S1, S1.1 y S1.2;P3)

Respecto a la tercera población, la probabilidad de extinción a los 200 años es 0, al igual que si se asume K=N y que, si se pierde 1% de K al año, con una retención de heterocigosidad de 0,94 en los dos primeros casos y de 0,8 en el último.

5.1.1.9. Simulación nº 1.3 de la tercera población (S1.3;P3)

Cuando la pérdida se da tan solo en las áreas no protegidas y las de nivel II de 200 simulaciones se llega en 34 a la extinción con una probabilidad de extinción de 17% en los 200 años que dura el modelo, con un tiempo medio de extinción de 179 años y una heterocigosidad del 0,5.



5.1.1.10. Simulación nº 2 de la tercera población (S2;P3)

Al aislar esta población en las AP tipo PN y N II la población no llega a extinguirse con una probabilidad del 100% de supervivencia y una retención de heterocigosidad del 0,91.

5.1.1.11. Simulación nº 3 y 3.1 (S3 y S3.1)

En la primera simulación en las que se incluye la caza en 200 años la probabilidad de extinción es de cero y cuando se incluye el decrecimiento de la capacidad de carga anualmente la probabilidad aumenta a un 3% en 200 años con una retención heterocigosidad de 0,64 y el tamaño de población decrece hasta 52 individuos.

5.1.1.12. Simulaciones nº 4 y 4.1 (S4 y 4.1)

En los análisis en los que se ha permitido la dispersión, en ambos casos tanto la subpoblación de Yala como la de Wilpattu, y como la meta-población que forman, tienen a los 200 años como mínimo un 95% de probabilidad de supervivencia y un 0,96 de retención de heterocigosidad menos en el caso de la subpoblación de Yala de la *simulación 4* (10% de supervivencia de los individuos dispersantes) que retiene un 0,86. En este mismo modelo, además, se observan 25 recolonizaciones con un tiempo medio de 75 años y 5 re-extinciones.

5.1.1.13. Simulación nº 4.2 y 4.3 (S4.2 y 4.4)

Cuando junto con la dispersión se produce la pérdida del ecosistema en 1% en el caso de que la supervivencia sea baja (10%); la probabilidad de supervivencia en 200 años es del 100% para cada subpoblación y para la meta-población, con una retención genética de 0,86 como mínimo. Estos resultados obtenidos varían poco respecto a los anteriores, en cambio, en la simulación 4.3 (70% de supervivencia) hay una probabilidad de un 9% de extinción a los 200 años de la meta-población con una heterocigosidad de 0,88, igual que en la subpoblación de Wilpattu. A los 100 años la subpoblación de Yala tiene un 3,5% de probabilidad de extinguirse y a los 200 años esa probabilidad aumenta hasta un 33,5%, con una retención de variabilidad de 0,81. Además, esta subpoblación sufre 309 recolonizaciones con una media de tiempo de recolonización de 1922 años y 243 re-extinciones con un tiempo medio de 1.808 años. El tiempo medio de extinción de la meta-población es de 142 años, mientras que es de unos 170 años el de las subpoblaciones.



5.1.2. Tasas de crecimiento de la población de leopardos

5.1.2.1. *Simulaciones nº1, 1.1, 1.2, 1.3 y 2 de la primera población*

En la primera población, los mejores crecimientos se dan en las primeras simulaciones con un 6% y cae en las tres últimas realizadas sobre esta población a un 4% con degradación del hábitat, 4,5% con degradación del hábitat solo en áreas de baja protección y el más bajo de todos 1,7% cuando se aísla y restringe a los parques naturales y áreas de nivel I.

5.1.2.2. *Simulaciones nº 1, 1.1 y 1.2 de la segunda población*

Los crecimientos de los modelos de la segunda población son todos menores del 2% independientemente de la situación a la que estén sometidas.

5.1.2.3. *Simulaciones nº 1, 1.1, 1.2 de la tercera población*

En la tercera población se observan las tasas de crecimiento de población (r) más altas: 11% en las *simulaciones nº 1 y 1.1*; 9,4% en el modelo con degradación del hábitat del 1% (S1.2) y 10% si se aíslan los PN y N II (S2) reduciéndose a un 5,8% cuando la pérdida del hábitat del 1% afecta solo a las áreas de menor nivel (S1.3).

5.1.2.4. *Simulaciones nº 3 y 3.1*

Con el parámetro de caza activado los crecimientos siguen siendo del 9% y algo más bajos cuando incluimos la pérdida del hábitat (5,7%).

5.1.2.5. *Simulaciones nº 4 y 4.1*

En los modelos de dispersión destaca el crecimiento de la subpoblación del parque de Yala de un 26% cuando la supervivencia de la migración es del 70% y de un 5,5% cuando es del 10%. El crecimiento de la meta-población y de la subpoblación Yala en ambos modelos es de alrededor de un 11%.

5.1.2.6. *Simulaciones nº 4.2 y 4.3*

Cuando además de dispersión hay perdida del medio los crecimientos de las meta-poblaciones son de 10,4% (S4.2) y 8,4 (S4.3), siendo el crecimiento más bajo el de la subpoblación de Yala de la S4.3 con una tasa del 4,8%. Cabe destacar la variación del crecimiento en esta misma subpoblación ($SD_{(r)} 0,201$); a pesar de ser baja no se extingue, seguramente, por las recolonizaciones.



Tabla 6. Resultados obtenidos en las simulaciones del Vortex. r=tasa de crecimiento exponencial. SD(r)= variación en el crecimiento de la población, esto mide la susceptibilidad de una población a los cambios demográficos; es inversamente proporcional al tiempo medio de extinción. TME: Tiempo medio de extinción. AME: año máximo de extinción. PE: probabilidad de extinción.

	Simulación	N ₍₀₎	r(%)	SD(r)	TME	PE (%)				AME	Heterocigosidad observada			
						50	100	150	200		50	100	150	200
P1	S1;P1 K=5%N+N	92	6	0,11	-	0	0	0	0	-	0,92	0,84	0,75	0,67
	S1.1;P1 K=N	92	6	0,112	200	0	0	0	0,5	-	0,92	0,82	0,76	0,67
	S1.2;P1 K=(5%N+N)-1%/año	92	4	0,159	118	0	16,5	90	100	-	0,89	0,65	0,25	0
	S1.3;P1 K=(5%N+N)-1%/año en ANP y NII	79	4,5	0,163	107	0	35	98	100	163	0,88	0,65	0,3	0
	S2;P1 Solo AP: PN Y NI	12	1,7	0,217	32	84	100	100	100	95	0,6	0	0	0
P2	S1;P2 K=5%N+N	17	1,4	0,200	48	53,5	96,5	100	100	121	0,6	0,5	0	0
	S1.1;P2 K=N	17	1,5	0,201	47	57	98	100	100	121	0,61	0,29	0	0
	S1.2;P2 K=(5%N+N)-1%/año	17	2,1	0,212	42	76	100	100	100	74	0,57	0	0	0
P3	S1;P3 K=5%N+N	655	11	0,098	-	0	0	0	0	-	0,98	0,97	0,96	0,94
	S1.1;P3 K=N	655	11	0,098	-	0	0	0	0	-	0,98	0,97	0,95	0,94
	S1.2;P3 K=(5%N+N)-1%/año	655	9,4	0,104	-	0	0	0	0	-	0,98	0,94	0,87	0,8
	S1.3;P3 K=(5%N+N)-1%/año en ANP y NII	236	5,8	0,129	179	0	0,5	1,5	17	-	0,96	0,81	0,67	0,5
	S2;P3 Solo AP: PN Y NI	429	10	0,099	-	0	0	0	0	-	0,98	0,96	0,94	0,91
C	S3 Caza solo ANP y NII	316	9	0,1	-	0	0	0	0	-	0,97	0,94	0,91	0,88
	S3.1. Caza+(K=(5%N+N)-1%/año)	316	5,7	0,117	187	0	0	0	3	-	0,96	0,97	0,75	0,64
S4	P2	27	5,5	0,168	113	0	0	0,5	0,5	-	0,88	0,87	0,86	0,86
	P3	1156	11,5	0,106	-	0	0	0	0	-	0,99	0,98	0,97	0,96
	M1	1183	11,6	0,105	-	0	0	0	0	-	0,99	0,98	0,97	0,96
S4.1	P2	27	26	0,137	-	0	0	0	0	-	0,99	0,98	0,97	0,96
	P3	1156	11	0,105	-	0	0	0	0	-	0,99	0,98	0,97	0,96
	M2	1183	11	0,104	-	0	0	0	0	-	0,99	0,98	0,97	0,96

**Tabla 6.** Continuación.

S4.2	P2	27	8,8	0,131	-	0	0	0	0	-	0,94	0,92	0,89	0,86
	P3	1156	10,5	0,108	-	0	0	0	0	-	0,99	0,96	0,93	0,89
	M3	1183	10,4	0,103	-	0	0	0	0	-	0,98	0,96	0,92	0,89
S4.3	P2	27	4,8	0,201	-	172	3,5	17	33,5	-	0,87	0,86	0,86	0,81
	P3	1156	8,7	0,119	-	171	0	1,5	9	-	0,99	0,96	0,93	0,89
	M4	1183	8,4	0,117	-	142	0	1,5	9	-	0,98	0,95	0,92	0,88

5.1.3. Susceptibilidad a los cambios demográficos

La población más susceptible a los cambios demográficos es la segunda en cualquiera de las situaciones a las que se le ha sometido con variaciones de crecimiento de población altas (SD_r de 0,200; 0,201, 0,212), menos cuando se permite la dispersión (S4, 4.1, 4.2 y 4.3) que es más estable. También se encuentra en este rango la primera población cuando se le aísla en los PN y áreas de nivel I (*simulación 2*) con una variabilidad de la ratio de crecimiento de población (SD) igual a 0,217. Esto concuerda con los tiempos medios de extinción, cuando la SD_r ronda los 0,2 el tiempo medio de extinción no supera los 50 años.

5.2. Discusión

En el presente trabajo se ha asumido homogeneidad del paisaje para llevar a cabo las simulaciones; esta misma consideración se aplica en numerosos trabajos anteriores como el de Hanski (1994) donde de forma sencilla se supone que las tasas de colonización y de extinción están relacionadas, generalmente, con los atributos físicos de la red de parches en la que habita una meta-población.

En cambio, en otros trabajos como los estudios SPOM (modelos estocásticos de ocupación de parches) se presupone que el medio es heterogéneo, es decir, se asume que cada parche del terreno es diferente por lo que las probabilidades de extinción y colonización varían según las características ecológicas individuales de cada uno. Esto conlleva un mejor enfoque sobre la ecología espacial de un lugar y una visión más realista de la naturaleza (Hanski y Ovaskainen, 2003). Sin embargo, no ha sido posible disponer de los datos bibliográficos que hubieran sido necesarios para abordar la heterogeneidad del medio en este Trabajo de Fin de Grado.

Los resultados obtenidos en el presente estudio indican una clara relación entre la capacidad de carga del medio y la extinción de las poblaciones: cuando la capacidad del medio se reduce los tamaños de población tienden a disminuir también, sobre todo, cuando la extinción se



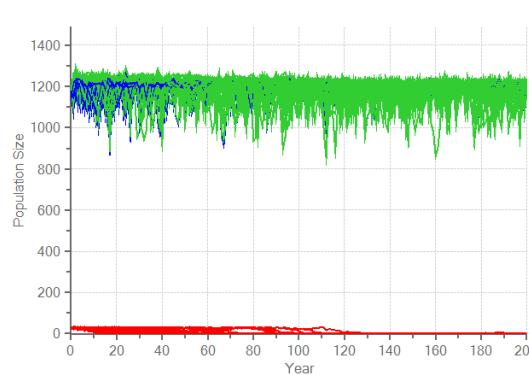
debe a eventos aleatorios. Similares observaciones se han publicado por autores como Lande (1993), Foley (1994) y Middleton, Veitch y Nisbet (1995); citados por Hanski y Ovaskainen (2003).

Al analizar la segunda población puede comprobarse como al aislar un grupo de individuos estos se extinguén con rapidez. Por el contrario, en las simulaciones donde se permite la dispersión entre dos subpoblaciones (*simulaciones nº 4, 4.1, 4.2, 4.3*) se puede apreciar como tras 25 recolonizaciones de individuos de otras subpoblaciones cercanas (*simulación nº 4*) la extinción de una subpoblación pequeña (segunda subpoblación) se evita. De esta forma la estructura de la meta-población se mantiene estable y sobrevive cuando de forma aislada se extingue a los 45 años. Ballou et. al (1989) aprecian la misma idea en su estudio; en una meta-población las diferentes subpoblaciones que la forman pueden estar sometidas a los efectos estocásticos y encaminarse por separado a la extinción, en cambio, permitiendo la migración tienen la oportunidad de sobrevivir.

La meta-población de la *simulación nº 4.3*, en la que además hay perdida del hábitat, tiene un 9% de probabilidad de extinguirse en 200 años mientras que la segunda población aislada se ha extinguido con una probabilidad del 100% a los 150 años, es decir, como muestran los modelos de SPOM mencionados anteriormente, el tiempo hasta la extinción de la meta-población puede ser muy largo en comparación con el tiempo de extinción local (Hanski y Ovaskainen, 2003).

Como puede apreciarse en la *figura 7* el tamaño de la meta-población fluctúa debido a las continuas extinciones y recolonizaciones, pero se mantiene estable a largo plazo. Hanki y Ovaskainen hablan de esto mismo en su trabajo de 2003.

Figura 7. Representación gráfica de la tendencia temporal del tamaño de la meta-población (línea verde) formada por la subpoblación de Yala (línea roja) y de Wilpattu (línea azul) de la simulacion nº 4 donde se permite la migración entre subpoblaciones. Realizado con el programa Vortex (Lacy y Pollack, 2020).





La población nº 3 tiene un mejor crecimiento y mayor número de individuos ya que su capacidad de carga se lo permite. Como suponen Hanski y Ovaskainen (2003), es razonable suponer que muchas meta-poblaciones funcionan así, al igual que las poblaciones locales dependen de la capacidad de carga.

En las simulaciones puede apreciarse como la perdida de variabilidad (perdida de heterocigosidad) es más pronunciada en poblaciones pequeñas como la segunda (tamaño de población igual a 17) en la cual en 50 años se llega a perder un 0,1; mientras que en la tercera (tamaño de población igual a 655) se reduce un 0,01 en esos mismos años. Ballou et al. (1989) argumentaban que las poblaciones con problemas demográficos tienen un riesgo genético mayor. Si la población tiene entre 10-100 individuos los eventos aleatorios comienzan a predominar y la supervivencia se convierte en una lotería. La variación genética se pierde porque no hay suficientes individuos que la trasmitan y esto se conoce como deriva genética, como recalcan en su estudio de viabilidad de la población de la pantera de florida (*Felis concolor coryi*) Ballou et al. (1989): “La deriva genética es un fenómeno aleatorio, no adaptativo que supera las fuerzas de selección en las poblaciones pequeñas, se pierden los alelos adaptativos y se fijan las variantes deletéreas”.

Puede observarse como en las simulaciones con dispersión la perdida de heterocigosidad en poblaciones pequeñas no es tan drástica como antes; la subpoblación Yala (equivalente a la población nº2) tan solo pierde 0,02 de heterocigosidad en 50 años. En concordancia los autores Ballou et al. Presuponen que: “Todo lo perdido solo se puede recuperar si se encuentra en los genes de otro individuo y este entra en esa población, sino se pierde para siempre”.

6. CONCLUSIONES

- 1- Las *simulaciones* ejecutadas con la primera y segunda población indican que si se limitase la población únicamente a las áreas estrictamente protegidas (parques naturales), serían inviables.
- 2- Es necesario mantener un número mínimo de individuos en una población para garantizar su viabilidad por sí misma. Así, el reducido tamaño de la segunda población (17 individuos), la conduce a la extinción, sin que el control de la degradación del habitat pueda evitarlo.



- 3- Las tasas de crecimiento mejoran gracias a las recolonizaciones en una población muy pequeña (crecimiento de la población de 26% cuando sobreviven el 70% de los inmigrantes de la segunda población, mostrado en la *tabla 6*). Se debería garantizar la migración con medidas como pasos de fauna en las carreteras, parches de bosque, corredores naturales, restricciones de cultivos y deforestación.
- 4- Garantizar la dispersión, incluso sin llegar a ser muy efectiva (10% de supervivientes), permite la supervivencia de poblaciones en riesgo grave de extinción.
- 5- La heterocigosidad disminuye de forma más rápida en las poblaciones pequeñas. Por ejemplo, la proporción de heterocigotos se reduce en una población de 17 individuos un 10% en 50 años, frente a una reducción del 1% en el mismo tiempo en una población de 665 ejemplares.
- 6- Las simulaciones realizadas indican que, en sus términos actuales, la caza (o muerte por mano del hombre en general) no es un factor determinante en la extinción del leopardo en Sri Lanka.
- 7- Los programas informáticos de simulación tipo Vortex permiten predecir la evolución de una población y proponer medidas preventivas útiles para su preservación: son por ello herramientas adecuadas para poder minimizar los riesgos reales a la hora de tomar decisiones.
- 8- Como conclusión general de las situaciones analizadas: las causas principales de perdida de viabilidad de la población del leopardo de Sri Lanka y posiblemente de la mayoría de Asia son la degradación y fragmentación del hábitat, el aislamiento de individuos y los tamaños de población pequeños. Estos tres factores están muy interrelacionados entre sí.

7. CONCLUSIONS

- 1- The simulations performed with first and second population indicate that if the population were solely limited to strictly protected areas (natural parks), they would be unviable.
- 2- - It is necessary to maintain a minimum number of individuals in a population to ensure its viability on its own. Thus, the small size of population 2 (17 individuals) leads to its extinction, without being able to prevent the habitat degradation's control.
- 3- Growth rates improve thanks to recolonizations in a very small population (population growth of 26% when 70% of the immigrants in population 2 survive, shown in *table 6*).



Migration should be ensured with measures such as wildlife crossings on roads, forest patches, natural corridors, restrictions on cultivation and deforestation.

- 4- Ensuring dispersal, even if it is not very effective (10% of survivors), allows populations at serious risk of extinction to survive.
- 5- Heterozygosity decreases more rapidly in small populations. For example, the proportion of heterozygotes decreases by 10% in 50 years in a population of 17 individuals, in comparison with 1% reduction at the same time in a population of 665 individuals.
- 6- The simulations achieved, demonstrate that, in their current terms, hunting (or killing by man in general) is not a determining factor in the leopard's extinction in Sri Lanka.
- 7- Simulation software such as Vortex allows to predict the evolution of a population and to propose useful preventive measures for its preservation: therefore, they are very useful tools for minimising real risks when making decisions.
- 8- As a general conclusion of the analysed situations: the main causes of leopard population's viability loss in Sri Lanka and possibly in most of Asia are habitat degradation and fragmentation, isolation of individuals and small population sizes. These three factors are closely (or highly) interrelated.

8. VALORACIÓN PERSONAL

El motivo de elección de este tema para realizar el Trabajo de Fin de Grado (TFG) fue el interés que me despierta la conservación de las especies salvajes. Además, es un tema muy poco profundizado a lo largo de la carrera por lo que ha resultado una forma de aprender sobre una rama diferente de la veterinaria. La elección del leopardo viene de mi fascinación por los felinos salvajes, de los cuales he aprendido un gran número de cosas realizando la investigación sobre la especie y posteriores análisis en el programa de simulación. A su vez, he aprendido a utilizar una herramienta nueva de trabajo, el programa de simulaciones, y a tratar y comprender datos analíticos. Por lo que, en conclusión, escribir un TFG ha supuesto una experiencia muy enriquecedora.

A mi juicio este TFG podría ser una muestra más de la importancia de la conservación de todas las especies y de su medio, y de la necesidad de incorporar la previsión a cualquier proyecto de investigación sobre conservación de especies, especialmente de las salvajes.



9. BIBLIOGRAFÍA

Abade, L., Cusack, J., Moll, R. J., Strampelli, P., Dickman, A. J., Macdonald, D. W. y Montgomery, R. A. (2018). "Spatial variation in leopard (*Panthera pardus*) site use across a gradient of anthropogenic pressure in Tanzania's Ruaha landscape". *PLoS ONE*, 13(10): e0204370. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204370>

Asad M., Martoni F., Ross J.G., Waseem M., Abbas F. y Paterson A.M. (2019). "Assessing subspecies status of leopards (*Panthera pardus*) of northern Pakistan using mitochondrial DNA." *PeerJ*, 7:e7243. DOI: <http://doi.org/10.7717/peerj.7243>

Ballou, J. D., Foose, T. J., Lacy, R. C.; Seal, U. S., in the name of the Captive breeding Specialist Group y Species Survival Commission IUCN. (1986). *"Florida Panther (*Felis concolor coryi*) Population Viability Analysis"*. Disponible en <http://www.cpsg.org/sites/cbsg.org/files/documents/FloridaPantherPVA_1989.pdf> [Consultado: 7-5-2021].

Banco Mundial. (2019). Banco Mundial. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/home> [Consultado: 16-04-2021].

Brinkhoff, T. (2021). City Population. Disponible en: <https://www.citypopulation.de/> [Consultado: 13/04/2021].

Canela, A. (2020). "Un Año entre Felinos: Leopardo, Cazador Total". *National Geographic España*, 6 de octubre. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/felinos/viaje/leopardo_15558/amp [Consultado 23/02/2021].

Center for International Earth Science Information Network, Earth Institute and Columbia University. (2021). "Global Urban-rural Mapping Project (GRUMP) version 1". *Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)*. Disponible en: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/grump-v1>

Conferencia de las partes. (2013). "Resolución Conf. 10.14 (Rev. CoP16) sobre Cupos de trofeos de caza y pieles de leopardo para uso personal". *Decimosexta reunión de la Conferencia de las Partes*. Bangkok, 3-14 de marzo de 2013. CITES.



Conservation International (2021). “**Critical Ecosystem Partnership Fund**”. Disponible en: <https://www.cepf.net/our-work/biodiversity-hotspots> [Consultado 13-05-2021].

Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). (1973). “Texto de la Convención”. **Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestres**. Washington, 3 de marzo de 1973. CITES.

Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). 2018. “Cupos para los trofeos de caza de leopardo (*Panthera pardus*): informe del comité de fauna”. **Septuagésima reunión del Comité Permanente**. Rosa Khutor, Sochi (Federación de Rusia), 1-5 de octubre de 2018. CITES.

Fattebert, J., Dickerson, T., Balme, G., Slotow, R. y Hunter, L. (2013). “Long-distance natal dispersal in leopard reveals potential for a three-country metapopulation”. **African Journal of Wildlife Research**, 43(1), pp. 61-67. DOI: 10.3957/056.043.0108

Foley, P. (1994). “Predicting extinction times from environmental stochasticity and carrying-capacity”. **Conservation Biology**, 8 (1), pp. 124–137. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1994.08010124.x

Geekyanage, N., Vithanage, M., Wijesekara, H. y Pushpakumara, G. (2015). “State of the Environment and Environmental Governance in Sri Lanka”. En: Mukherjee, S. y Chakraborty, D. (Coord.). **Environmental Challenges and Governance Diverse perspectives from Asia**. Reino Unido: Routledge, Taylor y Francis Group, pp. 106-122.

Google (2020). Google Maps. Disponible en: <https://www.google.es/maps/@7.8517298,78.4613767,7z?hl=es> [Consultado: 13/04/2021].

Hanski, I. (1994). “A practical model of metapopulation dynamics”. **Journal of Animal Ecology**, 63 (1), pp. 151–162. DOI: <https://doi.org/10.2307/5591>

Hanski, I. y Ovaskainen, O. (2003). “Metapopulation theory for fragmented landscapes”. **Theoretical Population Biology**, 64(1), pp. 119-127. DOI: 10.1016/S0040-5809(03)00022-4

Hauser, L. (2001). “Dispersal”. **Heredity**, 87(4), pp. 508. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2001.0963a.x>



Kittle, A. M. y Watson, A. C. (2018). "Density of leopards (*Panthera pardus kotiya*) in Horton Plains National Park in the Central Highlands of Sri Lanka". *Mammalia*, 82(2), pp.183-187. DOI: 10.1515/mammalia-2016-0139

Kittle, A. y Watson, A.C. (2020). "Panthera pardus ssp. kotiya." *The IUCN Red List of Threatened Species 2020:* e.T15959A50660847. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T15959A50660847.en>. [Consultado 23/02/2021]

Kittle, A., Watson, A. C. y Fernando, S. (2017). "The ecology and behaviour of a protected area Sri Lankan leopard (*Panthera pardus kotiya*) population". *Tropical Ecology*, 58(1), pp.71-86. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313798055_The_ecology_and_behaviour_of_a_protected_area_Sri_Lankan_leopard_Panthera_pardus_kotiya_population [Consultado 23/02/2021]

Kittle, A., Watson, A.C., Cushman, S.A. y Macdonald, D.W. (2018). "Forest cover and level of protection influence the island-wide distribution of an apex carnivore and umbrella species, the Sri Lankan leopard (*Panthera pardus kotiya*)". *Biodiversity and Conservation*, 27(1), pp.235-263. DOI: 10.1007/s10531-017-1431-8

Kshetry, A., Vaidyanathan, S. y Athreya, V. (2017). "Leopard in a tea-cup: A study of leopard habitat-use and human-leopard interactions in north-eastern India". *PLoS ONE*, 12(5): e0177013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177013>

Lacy, R.C. (1993). "VORTEX: A computer simulation model for Population Viability Analysis". *Wildlife Research*, 20(1), pp. 45-65. DOI: 10.1071/WR9930045

Lacy, R.C. (2000). "Structure of the Vortex simulation model for population viability analysis". *Ecological Bulletins*, 48, pp. 191-203. DOI: 10.2307/20113257

Lacy, R.C., and J.P. Pollak. (2020). "Vortex: A stochastic simulation of the extinction process. Version 10.3.8". *Chicago Zoological Society*, Brookfield, Illinois, USA.

Lacy, R.C., P.S. Miller, and K. Traylor-Holzer. (2015). "Vortex 10 User's Manual". *IUCN SSC Conservation Breeding Specialist Group, and Chicago Zoological Society*. Apple Valley, Minnesota, USA, actualizado el 19 de enero de 2015



Lande, R. (1993). "Risks of population extinction from demographic and environmental stochasticity and random catastrophes". *The American Naturalist*, 142 (6), pp.911–927. DOI: 10.1086/285580

Linnaeus, C. (1758). "*Systema naturae per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis*". (Décima edición). Stockholm, Sweden: Reformata. Disponible en: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/10277#page/1/mode/1up> [Consultado: 18-3-2021]

Middleton, D.A.J., Veitch, A.R. y Nisbet, R.M. (1995). "The effect of an upper limit to population size on persistence time". *Theoretical Population Biology*, 48(3), pp. 277–305. DOI:10.1006/tpbi.1995.1030

Miller, J.R. y Cale, P. (2000). "Behavioral mechanisms and habitat use by birds in a fragmented agricultural landscape". *Ecological Applications*, 10(6), pp. 1732–1748. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[1732:BMAHUB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1732:BMAHUB]2.0.CO;2)

Miththapala, S., Seidensticker, J., y O'Brien, S. J. (1996). "Phylogeographic Subspecies Recognition in Leopards (*Panthera pardus*): Molecular Genetic Variation". *Conservation Biology*, 10(4), pp.1115–1132. DOI:10.1046/j.1523-1739.1996.10041115.x

Morton, N.E., Crow, J. F. y Muller, H. J. (1956). "An Estimate of the Mutational Damage in Man From Data on Consanguineous Marriages". *National Academy of Sciences of the United States of America*, 42(11), pp. 855-863. DOI: [10.1073/pnas.42.11.855](https://doi.org/10.1073/pnas.42.11.855)

Muckenhirn, N. A. y Eisenberg, J. F. (1973). "Home ranges and predation of Ceylon leopard". En: Eaton, R.L. (Coord). *The world's cats. Vol. 1. Ecology and Conservation*. Winston, Oregon, U.S.A: World Wildlife Safari, pp. 142–175.

Naderi, M., Farashi, A. y Erdi, M.A. (2018) "Persian leopard's (*Panthera pardus saxicolor*) unnatural mortality factors analysis in Iran". *PLoS ONE*, 13(4): e0195387. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195387>

Ngoprasert D, Lynam AJ, Gale GA. (2007). "Human disturbance affects habitat use and behaviour of Asiatic leopard *Panthera pardus* in Kaeng Krachan National Park, Thailand". *Oryx*, 41(3), pp. 343–51. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0030605307001102>



Nietlisbach, P., Muff, S., Reid, J. M., Whitlock, M. C. y Keller, L. F. (2019). "Nonequivalent lethal equivalents: Models and inbreeding metrics for unbiased estimation of inbreeding load". *Evolutionary Applications*, 12(2), pp. 266-279. DOI: 10.1111/eva.12713

O'Grady, J., Brook, B., Reed, D., Ballou, J. Tonkyn, D. y Frankham, R. (2006). "Realistic levels of inbreeding depression strongly affect extinction risk in wild populations". *Biological Conservation*, 133(1), pp. 42-51. DOI: 10.1016/j.biocon.2006.05.016

Palazón, S., Sanzo, G.S., Plaza, P. y Melero, Y. (2012). *"Análisis de la Viabilidad de la Población española de visón europeo (Mustela lutreola). Aplicación del programa Vortex 9"*. Disponible en: [10.13140/RG.2.1.4162.3768](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4162.3768) [Consultado: 17-05-2021].

Parchizadeh, J. y Adibi, M. A. (2019). "Distribution and human-caused mortality of Persian leopards *Panthera pardus saxicolor* in Iran, based on unpublished data and Farsi gray literatura". *Ecol Evol*, 9, pp. 11972-11978. DOI: 10.1002/ece3.5673

Pocock, R. I. (1927). "XXVII.—Description of two subspecies of leopards". *Annals and Magazine of Natural History*, 20(116), pp. 213–214. DOI: 10.1080/00222932708655586

Ray, S. y Ray, I. (2011). "Impact of Population Growth on Environmental Degradation: Case of India". *Journal of Economics and Sustainable Development*, 2(8), pp. 72-77. Disponible en: ISSN 2222-2855.

Stander, P.E., Haden, P.J., Kaece, I.I. y Ghau I.I. (1997). "The ecology of asociality in Namibian leopards". *Journal of Zoology*, 242(2), pp.342-364. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1997.tb05806.x

Stein, A.B. y Hayssen, V. (2013). "*Panthera pardus* (Carnivora: Felidae)". *Mammalian Species*, 45 (900), pp. 30–48. DOI: 10.1644/900.1

Stein, A.B., Athreya, V., Gerngross, P., Balme, G., Henschel, P., Karanth, U., Miquelle, D., Rostro-Garcia, S., Kamler, J.F., Laguardia, A., Khorozyan, I. y Ghoddousi, A. (2020). "Panthera pardus (amended version of 2019 assessment)". *The IUCN Red List of Threatened Species 2020*: e.T15954A163991139.

Stephens, D. W. y Krebs, J. R. (1987). *"Foraging Theory"*. Nueva Jersey: Princeton University Press.



Sunquist, M. E. (1983). "Dispersal of three radiotagged leopards". *Journal of Mammalogy*, 64(2), pp. 337-341. DOI: <https://doi.org/10.2307/1380574>