



Universidad
Rey Juan Carlos

GRADO EN BIOLOGÍA
Curso Académico 2023/24
Trabajo de Fin de Grado

**EXTENSIÓN DE LA CAPA DE HIELO PARA LA
FOCA DE ROSS, UN ÚNICO OBSTÁCULO PARA
UNA ESPECIE DESTINADA A PERSISTIR EN LA
ANTÁRTIDA EN UN FUTURO DESHIELO.**

Autor: Guillermo Martín Moreno

Directores: Dr. Brezo Díaz-Caneja Martínez

Tutor URJC: Dr. Brezo Díaz-Caneja Martínez

Índice.

1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	3
3. Material y Métodos.....	7
3.1. Especie de estudio.....	7
3.2. Registros de distribución.....	7
3.3. Capas ambientales.....	8
3.4. Capas ambientales futuras.....	9
3.5. Selección de las variables.....	11
3.6. Proyecciones de idoneidad del hábitat.....	11
4. Resultados.....	12
4.1. Análisis de coeficiente por pares de Pearson.....	12
4.2. Entrenamiento del modelo.....	13
4.3. Modelo Final.....	15
4.4. Proyecciones a futuro.....	17
5. Discusión.....	19
6. Conclusiones.....	21
7. Líneas futuras de investigación.....	21
8. Bibliografía.....	22

1. Resumen.

La foca de Ross ha sido siempre una incógnita para la biología marina debido a su escaso número de avistamientos, lo que sugiere una baja densidad de población y un conocimiento limitado sobre la especie. En 1988, el Comité Científico de Investigación Antártica (SCAR) le otorgó un nivel de protección especial debido a esta falta de información. Este estudio recopila la información más reciente sobre la distribución de la foca de Ross y se centra en la necesidad urgente de su reproducción, ya que esta especie pasa el 70% de su vida en aguas abiertas y se encuentra a más de 1936 km del borde de la capa de hielo. Los artículos consultados coinciden en que la parición de esta foca solo se ha registrado en la capa de hielo de banquisa antártica, la cual tiende a reducirse cada año en extensión y espesor. Utilizando el programa MaxEnt, se modeló de forma fiable y precisa la posible presencia de individuos de esta especie durante su época más vulnerable. Además, se realizaron proyecciones basadas en tres escenarios propuestos por el IPCC: uno con políticas restrictivas al Acuerdo de París, otro sin medidas para atajar el cambio climático, y un escenario intermedio que refleja el contexto actual. Este enfoque correlativo vincula los registros de presencia y avistamientos con capas de SIG que recogen el gradiente ambiental, aproximando el nicho efectivo de la especie y proyectándolo en escenarios futuros. Los resultados de este modelado predictivo permitirán estudiar los factores determinantes de la distribución de la foca de Ross y su probable tendencia futura en escenarios de cambio global.

2. Introducción

Actualmente existe una creciente preocupación sobre el cambio climático, la última evaluación del IPCC mostró que el calentamiento del aire desde la época preindustrial se estima que está en un rango de 1,38 °C a 1,68 °C. Además, eventos como las sequías e inundaciones han aumentado en intensidad y frecuencia en todas las regiones del planeta (IPCC, 2019). Este estrés ambiental está llevando a una reestructuración de ecosistemas y desarrollo de nuevas cadenas tróficas y comunidades biológicas cuyas interacciones son una gran incertidumbre para la ciencia (Pecl et al. 2017). La imprevisibilidad climática ha permitido que, en un primer momento, algunas especies experimenten un beneficio por cambio climático, sobre todo por la subida de temperaturas (McCarty, 2001). Este incremento concede la oportunidad de explotar ampliar la extensión del nicho ecológico de estas especies o reducir su competencia frente a otras especies más especialistas (McCarty, 2001, Fraser et al. 1992). Este caso puede verse en la Península Antártica en la que los pingüinos barbijo, Papúa y de Adelia explotan el mismo nicho (Taylor et Wilson,

1990; Fraser et al. 1992; Smith et al. 1999). Los pingüinos de Papúa y de Adelia han reducido su competitividad frente a las otras dos especies debido gracias a la disminución del hielo marino, la pérdida de hábitat invernal y una reducción en las poblaciones de krill, su presa principal (Taylor et Wilson, 1990; Fraser et al. 1992; Smith et al. 1999). Sin embargo, los pingüinos barbijo parecen beneficiarse de estas condiciones debido a su dieta mucho más generalista (Clucas et al., 2014). No obstante, la pasividad del ser humano ante este hecho de origen antrópico permite que aumenten las posibilidades de extinción incluso para las especies más resilientes. Un ejemplo de esto es la datación de un roedor en Australia que se identificó como el primer mamífero en estar extinto por el cambio climático (Waller et al. 2017). Además, el problema lejos de ser menor, amenaza con acrecentarse con los años según las previsiones del IPCC y, por tanto, afectar mayor número de especies. Se estima que el continente europeo podría perder más del 50% de sus especies locales para 2050 (Bellard, 2012). Según la RED LIST de la UICN (2024) el cambio climático amenaza ya 13151 especies de las 157190 que están registradas, lo que se traduce en un $\pm 8,36\%$ de las especies clasificadas por esta lista.

Aunque el cambio climático es visible en todo el planeta, sin duda sus efectos son más impactantes en territorios glaciales y marinos, como el territorio antártico. La Antártida es uno de los lugares de la Tierra, $0,1^{\circ}\text{C}/\text{década}$ durante los últimos 50 años (Steig et al., 2009). Además, Turner et al. (2005) y Thomas et al. (2008) también han mostrado un aumento de las precipitaciones en esta zona. Estos datos parecen destinados a acrecentarse según el trabajo de Tewari et al (2022), pues estima que para finales de 2099 la temperatura en la superficie de la Antártida podría ascender entre $5,1^{\circ}\text{C}$ y $5,3^{\circ}\text{C}$, y la tasa de precipitación podría ascender entre un 36-40% según los 10 modelos con mayor robustez de datos de los modelos CMIP5 y CMIP6. Pese al aumento de precipitaciones sobre la Antártida, el balance de hielo sobre esta sigue siendo negativo, aumentando la tasa de pérdida de masa significativamente desde el año 2000 (IPCC, 2019). En general, la Antártida ha perdido aproximadamente $2,720 \pm 1,390$ mil millones de toneladas de hielo entre 1992 y 2017, con una tasa promedio de pérdida de aproximadamente 109 ± 56 mil millones de toneladas de hielo por año (Shepherd et al. 2017).

Los efectos del cambio climático no solo están poniendo a prueba la resiliencia de la capa de hielo antártica, también de las especies que dependen de ella, como las pagófilas o especies dependientes de hielo en parte de su ciclo vital. En artículos como el desarrollado por Stelson et al. (2014) se encontró que hubo condiciones de hielo extremadamente deficientes en los años 2010 y 2011, lo que sirvió como una oportunidad para entender cómo especies dependiente del hielo, como las focas de arpa (*Pagophilus groenlandicus*),

podría adaptarse en décadas futuras en las que estas condiciones podrían volverse habituales. La respuesta fue que las hembras muestran una predisposición a buscar zonas de parición más al norte de sus áreas habituales, donde el hielo está más consolidado (Stelson et al. 2014). En casos extremos como 2011, el deshielo en la zona del golfo de San Lorenzo (Canadá) fue extremadamente fuerte, las hembras no retrasaron su época de parición si no que parieron en zonas donde la capa de hielo era escasa y fina. Esto provocó muchas veces rotura de la capa de hielo, lo que obligaba a la cría a someterse a condiciones de buceo sin haber tenido la oportunidad de desarrollar las capacidades fisiológicas para ello (Stelson et al. 2014). Este escenario llevó a un incremento de la tasa de mortalidad de las crías de un 1.1-1.4% en toda la zona del Golfo de San Lorenzo (Kovacs et al. 1985), hasta llegar a un 10% datado por los cadáveres de crías encontradas en zonas de playa (Stelson et al. 2014). Este no fue el único año fatídico para las crías de foca arpa, pues las baja cobertura de hielo en esos próximos años en las áreas de parición del Golfo (Bajzak et al. 2011), llevaron a que ~40% de los más de 1 millón de crías nacidas en 2010 no sobrevivieran (Hammill et al. 2012).

Según Hammill y Stenson, (2009) si siguen ocurriendo años con aumentos de mortalidad tan drásticos se verá afectada significativamente la dinámica poblacional de la especie. Hasta las fecha no hay estudio que haya mostrado más claro la tendencia futura de una especie pagófila, es por ello por lo que urge identificar la tendencia de especies tan susceptibles a estos cambios como son todas las especies pagófilas.

En este trabajo se ha decidido investigar sobre cómo podría afectar a una de estas especies, la foca de Ross (*Ommatophoca rossii*). Además, esta especie se considera uno de los mamíferos marinos con mayor escasez de datos que existen (Hindell et al. 2020). Los registros de datos tan limitados de observación e investigación que se tienen en la actualidad hacen que se tengan lagunas significativas en la comprensión de su ecología y comportamiento (McIntyre, 2014). Hasta hace relativamente poco tiempo, se creía que era porque su hábitat o zona de explotación era de difícil acceso y solo se podía llegar a él con acceso de buques rompehielos (Southwell, 2005). Sin embargo, se tienen observaciones de la foca de Ross en borde de la banquisa antártica, en especial en zonas cercanas al Mar del Rey Haakon VII y del Mar de la Reina Mause (Wege et al., 2021). También se han datado observaciones de la foca de Ross alcanzando latitudes de las islas Sandwich del Sur, Malvinas, Scott, Orcadas del Sur, Kerguelen, Islas Heard y Australia del Sur en individuos solitarios y viajeros (Thomas y Rogers 2009). Además, el estudio de Arcalís-Planas et al. (2015) no solo mostró que no habitan durante todo el año el hielo profundo, sino que la actividad de las 4 focas monitoreadas fue fuertemente pelágica, llegando a pasar en agua

alrededor de un 70% del tiempo al año. Todo esto ha provocado que autores como Kooyman y Kooyman (2009) propongan a la foca de Ross como una especie subantártica más que como una especie antártica propiamente dicha. Sin embargo, estos datos no la hacen completamente independiente al hielo dado que las hembras de foca de Ross se han observado que permanecen en el hielo durante períodos prolongados durante la temporada de cría (Blix & Nordøy 2007, Arcalís-Planas et al. 2015; Wege, 2023). Además, no se han encontrado artículos que hablen de ninguna datación de que la foca de Ross haya podido parir fuera de la zona de hielo, por lo que es inevitable sospechar que sucesos como los ocurridos a las focas arpa en 2010 puedan suceder en escenario de deshielo antártico. El gran desconocimiento alrededor de la foca de Ross es tan grande, que, aun no contando con ninguna medida de protección nacional, fue introducida en el Tratado Antártico y la Convención para la Conservación de las Focas Antárticas en 1959, y se elevó su medida de protección en 1988 por el alto desconocimiento sobre su biología (Red List UICN 2024).

Este trabajo versará sobre cuán dependiente es la foca de Ross al hielo y si podemos afinar más el conocimiento que se tiene sobre ella como para poder ayudar a su conservación modelando el hábitat de la que pensamos será la época determinante para su supervivencia, el periodo de cría y muda. Para ello, recurriremos a los Modelos de Distribución de Especies (SDM, por sus siglas en inglés). Estos modelos son herramientas esenciales en ecología y biogeografía que permiten predecir la distribución potencial de especies a partir de datos ambientales y de presencia de organismos. Estos modelos combinan datos sobre la presencia de especies con variables ambientales, como temperatura, precipitación y tipo de suelo, para generar mapas de distribución potencial (Elith & Leathwick, 2009). Entre los algoritmos más utilizados para construir SDM se encuentra MaxEnt, que se basa en la teoría de la entropía máxima. MaxEnt estima la distribución más probable de una especie bajo la condición de que los datos disponibles sobre su presencia sean el único conocimiento seguro, logrando así predicciones precisas y robustas incluso con conjuntos de datos incompletos (Phillips et al., 2006). Los SDM son particularmente útiles para entender cómo los cambios en el clima y el uso del suelo pueden afectar la distribución de las especies (Peterson et al., 2011). Estas predicciones pueden apoyar la planificación de la conservación, la gestión de hábitats y la evaluación de los impactos del cambio climático (Guisan & Thuiller, 2005). En este estudio, utilizaré el algoritmo MaxEnt para modelar el nicho ecológico de la foca de Ross, uno de los mamíferos marinos menos conocidos, con el objetivo de entender mejor su distribución actual y potencial bajo escenarios de cambio climático.

3. Materiales y Métodos

3.1. Especie de estudio

La foca de Ross o también conocida como foca cantora, es una especie solitaria y viajera que rara vez se encuentra en colonia. Arcalís-Planas et al. (2015) describieron 7 periodos con diferentes velocidades de traslado y distancia del hielo, llegando a alcanzar distancias de 1936km desde el borde del hielo. Este alto nivel de traslado hace que, pese a tener una dieta muy similar a la de otras focas antárticas como la foca de Weddell, la foca de Ross evite la competencia frente a estas, y se prevé que frente al deshielo pueda tener mayor ventaja que sus parientes. Esta especie suele bucear en una profundidad 100 y 200 m de profundidad, pero a menudo se sumergen a más de 300 m (Wege et al., 2023), aunque se ha llegado a monitorear un récord de inmersión de 792 m (Blix & Nordøy 2007). Su dieta, descrita por Skinner y Klages (1994), se compone principalmente de cefalópodos (47-%), pero también de peces (34%) e invertebrados (19%), incluido el krill.

En cuanto a la reproducción, no existen documentos que detallen las fechas de apareamiento, pero se sabe que los nacimientos ocurren entre principios de octubre y finales de noviembre (King, 1983) Durante este período, las hembras se encuentran en el hielo para parir y amamantar a sus crías (Southwell et al., 2003; Blix & Nordøy, 2007). Una observación inusual documentó una cría de foca de Ross en las Islas Sándwich el 6 de diciembre (Solyanik, 1964). Según Arcalis-Planas et al. (2015), las hembras también necesitan el hielo para la muda, pasando hasta un 85% del tiempo en el hielo hasta mediados de enero.

3.2. Registros de distribución

Para obtener los datos de distribución de la especie de estudio se utilizaron las bases de datos de avistamiento públicas, Global Biodiversity Information Facility, GBIF.org (22 April 2024) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.2wdw9y> y Ocean Biogeographic Information System, OBIS.org (22 April 2024) <https://datasets.obis.org/downloads/a1365e98-2b4e-4630-a375-8c584626d380.zip>. De ambas bases de datos se escogieron únicamente los datos recogidos entre 1959 y la actualidad para evitar los avistamientos desiguales con la actualidad que puedan alterar el poder predictivo del modelo. Además, para GBIF, se limitó la base de datos a avistamientos humanos, avistamientos por máquina o puntos de ocurrencia. La base de

datos resultante se pasó por una criba de verificación de duplicados en Excel minimizar error de los que resultaron 1442 valores únicos y 82 eliminados por duplicado.

De los avistamientos totales se recogieron aquellos coincidentes con la temporada de cría y muda (octubre a enero) ya que la bibliografía estudiada encuentra las mayores posibilidades del índice de mortalidad en este periodo, quedando 954 valores únicos (Fig. 1) de los 1442 iniciales.



Fig 1. Mapa cortado por el Trópico de Capricornio donde se muestran con puntos verdes los registros resultantes de la distribución de la foca de Ross en los meses de cría a muda.

3.3. Capas ambientales

Las capas superficiales ambientales necesarias para realizar los Modelos de Distribución de Especies (SDM, por sus siglas en inglés) correspondientes al período de referencia (2000-2010), que representan el clima reciente y presente, así como bajo los escenarios de cambio SSP o Trayectorias Socioeconómicas Compartidas" (SSP, por el inglés Shared Socio Economic Pathways) para el período 2040-2050, 2060-2070 y 2090-2100, se descargaron del repositorio web Bio-ORACLE (<https://www.bio-oracle.org/>). Este repositorio proporciona un conjunto global de rásters del Sistema de Información Geográfica (SIG) oceánica, geofísica y climática con una resolución de aproximadamente 9,2 km (5 minutos de arco), diseñados específicamente para modelar la distribución de especies marinas (Assis et al., 2017; Tyberghein et al., 2012). Para garantizar la integridad y coherencia espacial de las capas, todos los datos se referenciaron al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84). Las variables más relevantes para la distribución de la foca de Ross y que están disponibles en el repositorio anteriormente citado son la temperatura atmosférica, dado que las focas no emergen del hielo a temperaturas por debajo de los -20 °C (Arcalís-Planas et al. 2015), el grosor de la capa de hielo, la productividad primaria máxima y media (Zhao et al. 2004) y la distancia a la capa mixta (Wege, 2023). De estas variables se descargaron los valores máximos y mínimos anuales (determinados por el prefijo Lt. o long-term), excepto para el grosor de la capa de hielo, que se decidió añadir

también la media por si estas condiciones se asemejaban a las condiciones de época de cría que el verano austral (diciembre- marzo) (Tabla 1). Las capas ambientales de referencia que se utilizaron para entrenar los modelos se recortaron para incluir únicamente el territorio hasta donde podría llegar la foca de Ross en cualquier periodo de su peregrinaje, es decir, desde el límite meridional del continente antártico hasta el norte del continente australiano incluyendo el territorio sudamericano argentino y la isla de Madagascar en África.

Tabla 1. Variables ambientales iniciales, sus unidades y descripción.

Variables	Unidades	Descripción	Nombre de la variable en figuras
Lt. Temperatura atmosférica mínima	°C	Temperatura media anual entre los meses con temperaturas más bajas del año.	ltairtmin
Lt. Temperatura atmosférica máxima	°C	Temperatura media anual entre los meses con temperaturas más altas del año.	ltairtmax
Lt. Grosor de la capa de hielo mínimo	m	Grosor de la capa de hielo medio entre los meses con menor grosor de hielo.	meangro
LT. Grosor de la capa de hielo máximo	m	Grosor de la capa de hielo medio entre los meses con mayor grosor de hielo.	ltgromin
Grosor medio de la capa de hielo	m	Media del grosor de la capa de hielo durante todos los meses del año	ltgromin
Distancia media a la capa mixta	m	Media de la altura de la capa mixta durante todos los meses del año	mixcap
Lt. Distancia a la capa mixta máxima	m	Distancia hacia la capa mixta durante los meses con la capa mixta más superficial.	depthmixltmax
Lt. Productividad primaria máxima	mmol.m ⁻³	Tasa a la cual los organismos fotosintéticos producen materia orgánica media entre los meses con mayor tasa.	ltprimarmax
Productividad primaria media	mmol.m ⁻³	Tasa a la cual los organismos fotosintéticos producen materia orgánica media anual.	primarmean

Todas las variables comprenden un periodo entre 2000 y 2010 y están sacadas de Bio-ORACLE v3.0.

Las variables resaltadas en negrita fueron aquellas que superaron el test de coeficiente de correlación de Pearson

3.4. Capas ambientales futuras

Además, incluimos tres escenarios SSP diferentes: desde un escenario de “sostenibilidad” SSP1-1.9 siguiendo el objetivo del Acuerdo de París de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, hasta el escenario de “desarrollo impulsado por combustibles fósiles” SSP5-8.5 de altas emisiones y pocos desafíos para la adaptación. También hemos dejado espacio a un tercer escenario SPP2-4.5 que parece el más probable (Hausfather & Peters, 2020).

3.5. Selección de las variables

Para seleccionar una lista de variables predictoras que no muestren alta autocorrelación estadística entre ellas, se analizaron los coeficientes de correlación por pares de Pearson calculados de R. Para ello, se utilizaron los siguientes paquetes:

"devtools", "backports", "raster", "sp", "dismo", "ade4", "ape", "gbm", "ecospat", "ENMTools", "digest".

Se tuvieron en cuenta solo las variables con coeficiente con valor absoluto $< 0,85$ (Elith et al., 2006; Booth et al., AÑO) obteniendo 3 variables como únicas variables predictoras para incluir en el modelo.

3.6. Técnicas de modelización

Se emplearon y entrenaron Modelos de Distribución de Especies (SDM) utilizando el Modelado de Máxima Entropía (MaxEnt v3.4.4, http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent.). Este enfoque estadístico contrasta los registros reales de presencia de una especie con patrones de ocurrencias distribuidos aleatoriamente, reflejando sitios potenciales accesibles para la especie (Elith et al., 2011). El software MaxEnt requiere únicamente datos de presencia y un conjunto de variables ambientales para el área geográfica de interés (Phillips et al., 2006), que en este caso abarcó los años 2000-2014. Para evitar el posible sobreajuste asociado con el uso de funciones de respuesta complejas de dudoso significado ecológico y baja capacidad de proyección (revisado en Araújo & Guisan, 2006, y Austin, 2002), solo se seleccionaron ajustes lineales y cuadráticos durante la modelización.

La importancia de cada variable ambiental en la distribución de las especies se evaluó mediante “permutation importance” y “percent contribution” y el test Jack-knife de importancia de variables realizadas por MaxEnt (Yi et al. 2016; Elith et al. 2011).

El rendimiento del modelo se evaluó utilizando el Área Bajo la Curva (AUC) de un gráfico de Característica Operativa del Receptor (ROC), proporcionado por MaxEnt (Phillips et al., 2004). Esta métrica se calculó para todo el conjunto de datos realizando 10 iteraciones, evitando así el sesgo potencial asociado a la aleatorización, mediante un procedimiento de partición 70-30; es decir, se usó el 70% de los puntos para el entrenamiento del modelo y el 30% para las pruebas (Fielding y Bell, 1997; Guisan y Zimmermann, 2000).

3.6. Proyecciones de idoneidad del hábitat:

Las variables que mayor contribución tuvieron en el modelo, aquellas por encima de 20% en el porcentaje de contribución y en la importancia de permutación fueron las que se utilizaron para realizar un modelo final reducido. Para las proyecciones futuras bajo los escenarios SSP seleccionados (SSP 1-1.9, 2-4.5 y 5-8.5) también se utilizó el software MaxEnt, proyectando los escenarios sobre el modelo final. Las proyecciones obtenidas se mapearon utilizando ArcMap para generar mapas de proyección de idoneidad de hábitat.

4. Resultados

4.1. Análisis de coeficiente por pares de Pearson

Tras realizar el análisis de R se descartaron el Lt. Grosor de la capa de hielo máximo que se correlacionaba con el grosor de la capa de hielo medio; y la Lt. Temperatura atmosférica máxima que se correlacionaba con la Lt. Temperatura atmosférica mínima dado que sus coeficientes eran demasiados altos (superiores a 0,85) mostrando las variables independientes para el modelo (Tabla 2)

Tabla 2. Variables ambientales resultantes de la criba de coeficiente por pares de Pearson utilizadas para el modelo, sus unidades, período temporal que abarcan y su fuente.

Variables	Unidades	Año	Fuente	Designación en las figuras
Lt. Temperatura atmosférica mínima	°C	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	ltairtmin
Lt. Grosor de la capa de hielo mínimo	m	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	ltgromin
Grosor medio de la capa de hielo	m	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	meangro
Distancia media a la capa mixta	m	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	mixcap
Lt. Distancia a la capa mixta máxima	m	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	depthmixltmax
Lt. Productividad primaria máxima	mmol.m ⁻³	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	ltprimarmax
Productividad primaria media	mmol.m ⁻³	2000-2010	Bio-ORACLE v3.0	primarmean

4.2. Entrenamiento del modelo

Una vez se eliminaron las variables que mostraban colinealidad con otras y de menor importancia ecológica, se realizó el modelo inicial con el algoritmo MaxEnt (ver Tabla 3).

La temperatura atmosférica mínima fue la variable con mayor ganancia porcentual del test Jack-Knife (Fig.2) , sin embargo la información que nos aporta esta, parece insuficiente para explicar el modelo tal y como muestra el “permutation importance”. Sin embargo, el grosor de la capa de hielo medio con la segunda mayor ganancia del Jack-Knife, fue la única variable que mostró un resultado significativo para modelar. Por tanto, parece lógico sugerir no solo que las focas de Ross son claramente dependientes del hielo en su momento de cría.

Tabla 3. Resultados obtenidos de MaxEnt donde se muestra los resultados de la contribución.

Variables	Contribución Porcentual	Permutación Porcentual	AUC del modelo sin la variable	AUC del modelo con la variable
Lt. Temperatura atmosférica mínima	23.3803	0.1081	0.924	0.8613
Lt. Grosor de la capa de hielo mínimo	13.8196	8.1743	0.8818	0.7862
Grosor medio de la capa de hielo *	59.9769	91.4051	0.8581	0.9078
Distancia media a la capa mixta	0	0	0.9198	0.5372
Lt. Distancia a la capa mixta máxima	2.7163	0.3125	0.9198	0.5372
Lt. Productividad primaria máxima	0.0689	0	0.9198	0.8442
Productividad primaria media	0.0381	0	0.9198	0.5017

* variables seleccionadas para el modelo final-reducido con valores de “permutation importance” y “percent contribution” superior al 20

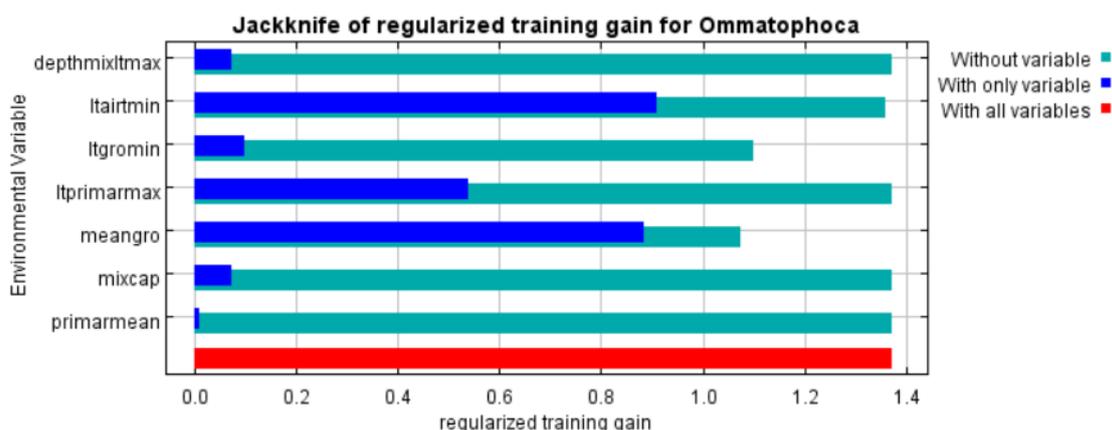


Fig.2 Resultados de la prueba Jack-Knife de importancia variable.

Por último, la validación de la eficacia del modelo queda demostrada por su AUC superior a 0,9 (ver Fig. 3) como un modelo excelente y preciso (Swets, 1988).

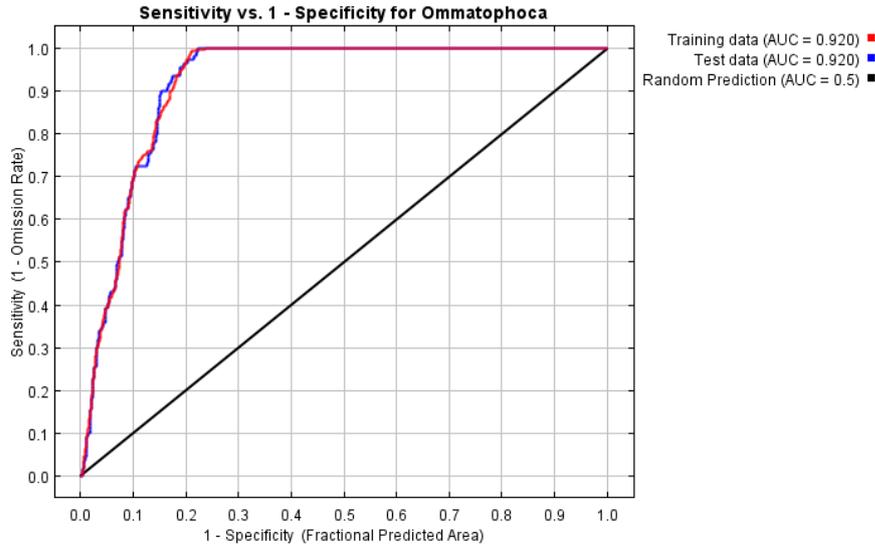


Fig 3. Curva de características operativas del receptor (ROC)

4.3. Modelo final

Conforme a los resultados del modelo anterior se vio que realmente aquella variable ambiental con suficiente poder predictor capaz de determinar la distribución de la especie en época de cría y muda sería fue_el “Grosor medio de la capa de hielo” lo que concuerda con la bibliografía leída (Arcalis-Planas et al., 2015; Blix, & Nordøy, 2007; Wege et al., 2023). Por tanto, se procedió a realizar otro modelo con esta única variable.

El efecto del grosor (ver Figura 4) es claramente positivo, se puede observar que conforme empieza a crecer la capa de hielo ya comienza a crecer la probabilidad de encontrar la especie hasta llegar a un óptimo de 2,25m de grosor de hielo en el cual la probabilidad de encontrar la especie se mantiene en 1 con independencia de cuanto aumente el grosor del hielo.

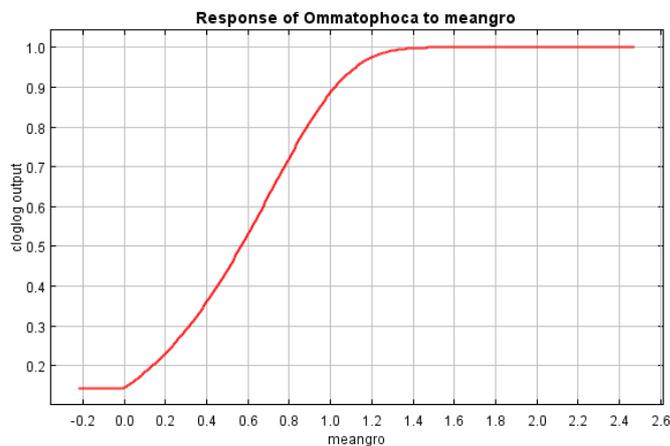


Fig.4 Curva respuesta del efecto del grosor de la capa de hielo medio sobre la posibilidad des presencia de la Ommatophoca rossii

En cuanto a la validación del modelo, sigue siendo excelente (Swets, 1988), con un AUC de 0.906 (Fig. 5). Esto parece demostrar que grosor del hielo puede condicionar la presencia de la especie durante la cría y muda.

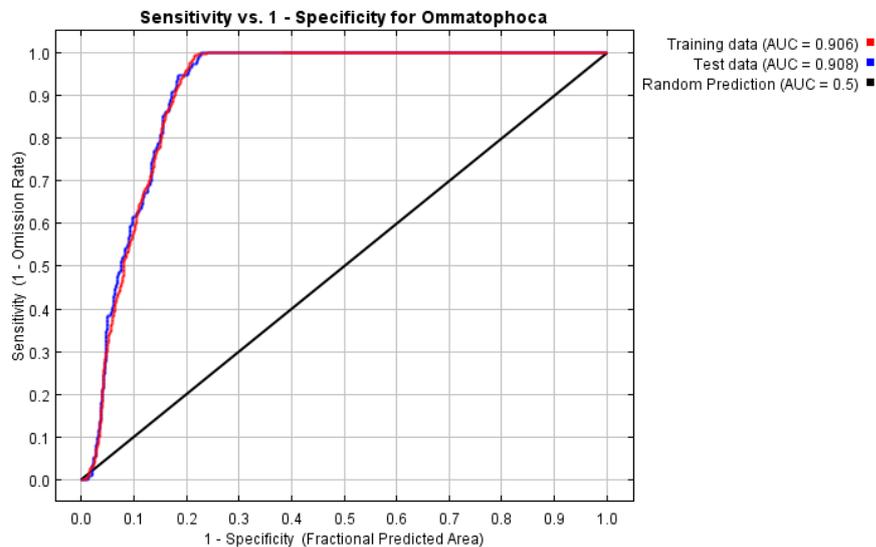


Fig. 5 Curva de características operativas del receptor (ROC) del modelo final.

En el mapa de MaxEnt (Fig.6) se puede observar como la foca debería tener una gran distribución por las zonas cercanas al mar de Weddell y la península Antártica. Además, muestra otro punto caliente un poco menos extenso por la zona de hielo que ocupa el borde de continente antártico desde el meridiano 40°E hasta el meridiano 70°E. Esta última zona es altamente confiable dado que la gran parte de los registros de distribución de cría ocurren en esta zona (Fig. 7).

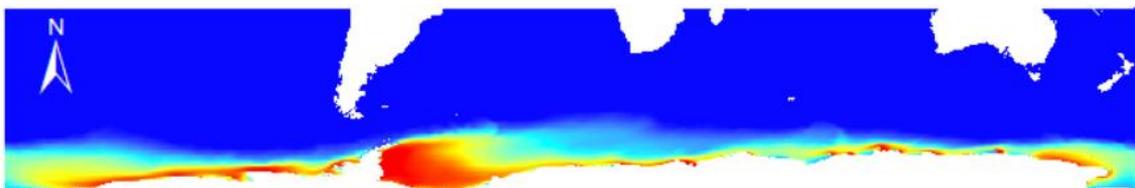


Fig 6. Mapa de calor de MaxEnt con escala de color en la que los colores más cálidos sugieren mayor probabilidad de presencia de la especie y los colores más fríos refieren menor probabilidad de la especie. También se observan los avistamientos proporcionados y las celdas utilizadas por el software para el entrenamiento.



Fig. 7 En la siguiente figura podemos comprobar el mapa de MaxEnt editado en Arcgis para clasificar los datos de calor en dos rangos, rojo en el caso de valores por debajo del valor de entrenamiento con sensibilidad y especificidad equilibradas y verde para aquellas zonas por encima de este umbral.

4.4. Proyecciones a futuro.

Proyecciones ssp1-1.9

En este escenario (Fig. 8 tan restrictivo y sostenible se puede observar como a pesar del paso del tiempo las zonas optimas para la presencia de la especie aparecen casi inalteradas y sin cambios significativos. Un escenario que hace innecesarias las medidas de protección adicionales.

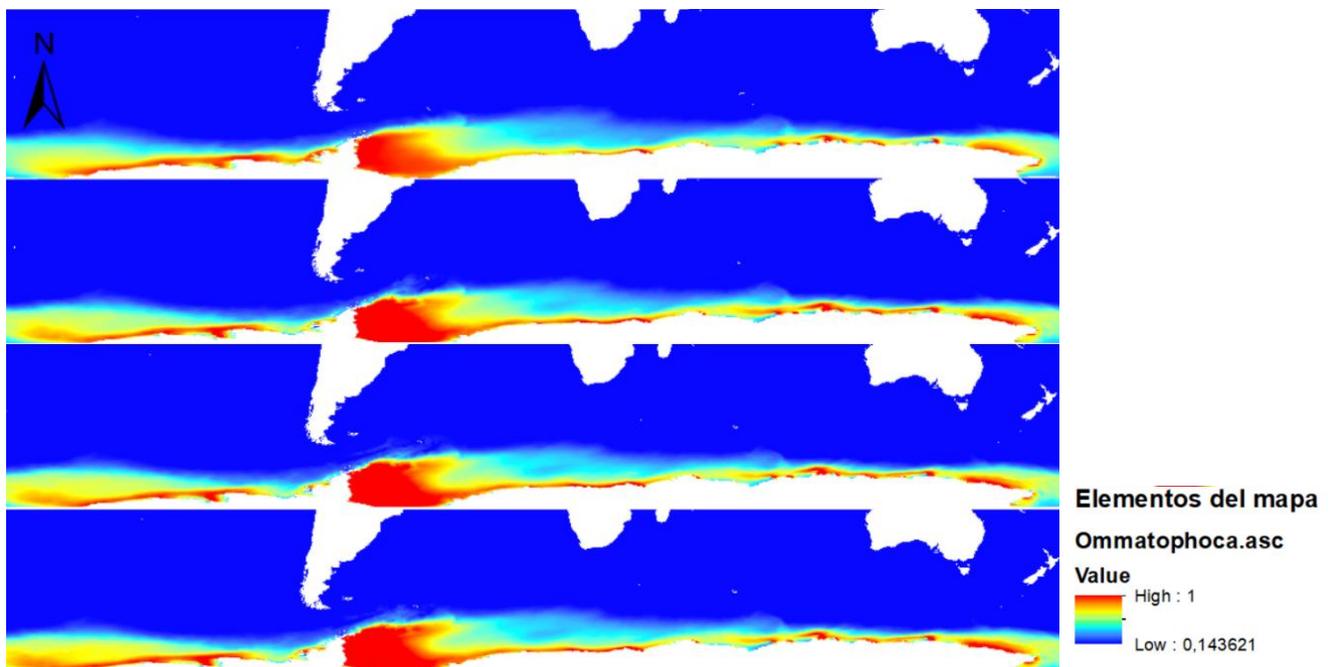


Fig. 8 En esta imagen podemos ver las proyecciones del modelo sobre diferentes años en un escenario SSP 1-1.9. La primera imagen corresponde a la actualidad, la segunda al 2040 la tercera al 2060y la última a 2090

Proyecciones SSP 2-4.5

Este es el escenario de alta probabilidad (Fig.9), los resultados indican un descenso en la calidad del hielo desde el modelo actual hasta 2090 ininterrumpida. Las zonas no son solo más pequeñas si no el hielo que contiene estas zonas baja significativamente su calidad.

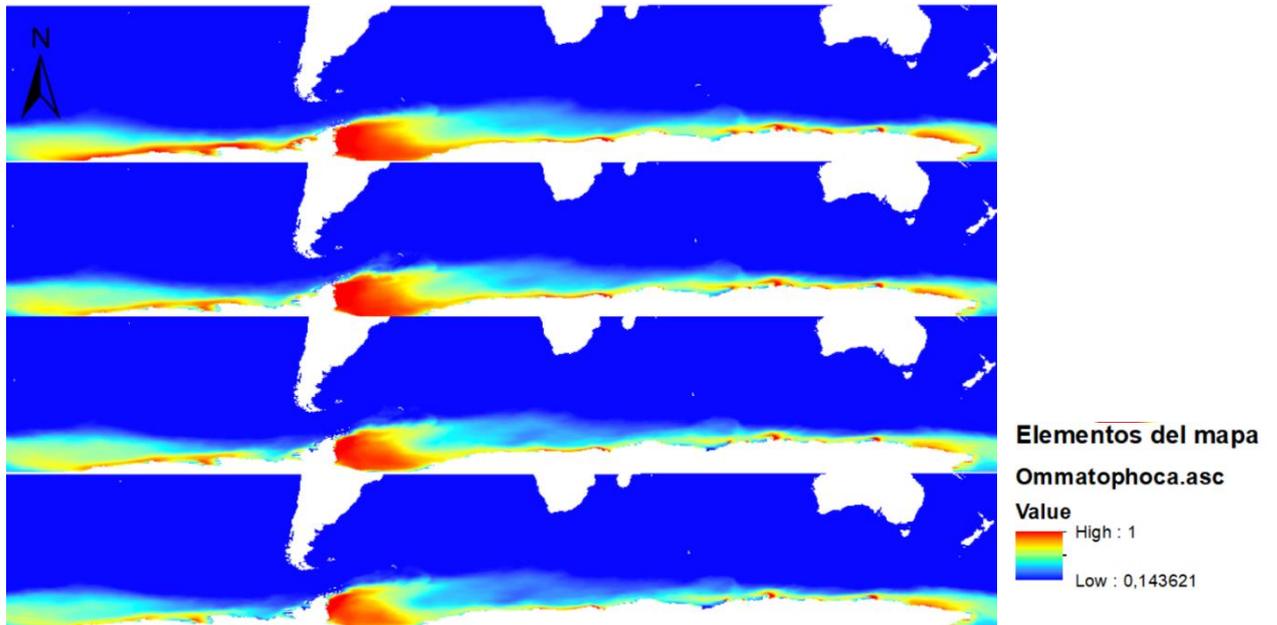


Fig. 9 En esta imagen podemos ver las proyecciones del modelo sobre diferentes años en un escenario SSP 2-4.5. La primera imagen corresponde a la actualidad, la segunda al 2040 la tercera al 2060 y la última a 2090.

Proyecciones SSP 5.85

Es el escenario climático más laxo en cuanto a medidas de sostenibilidad y también el más impactante (Fig.10). Las diferencias significativas en la presencia de la especie en prácticamente todos los periodos de tiempo proyectados,

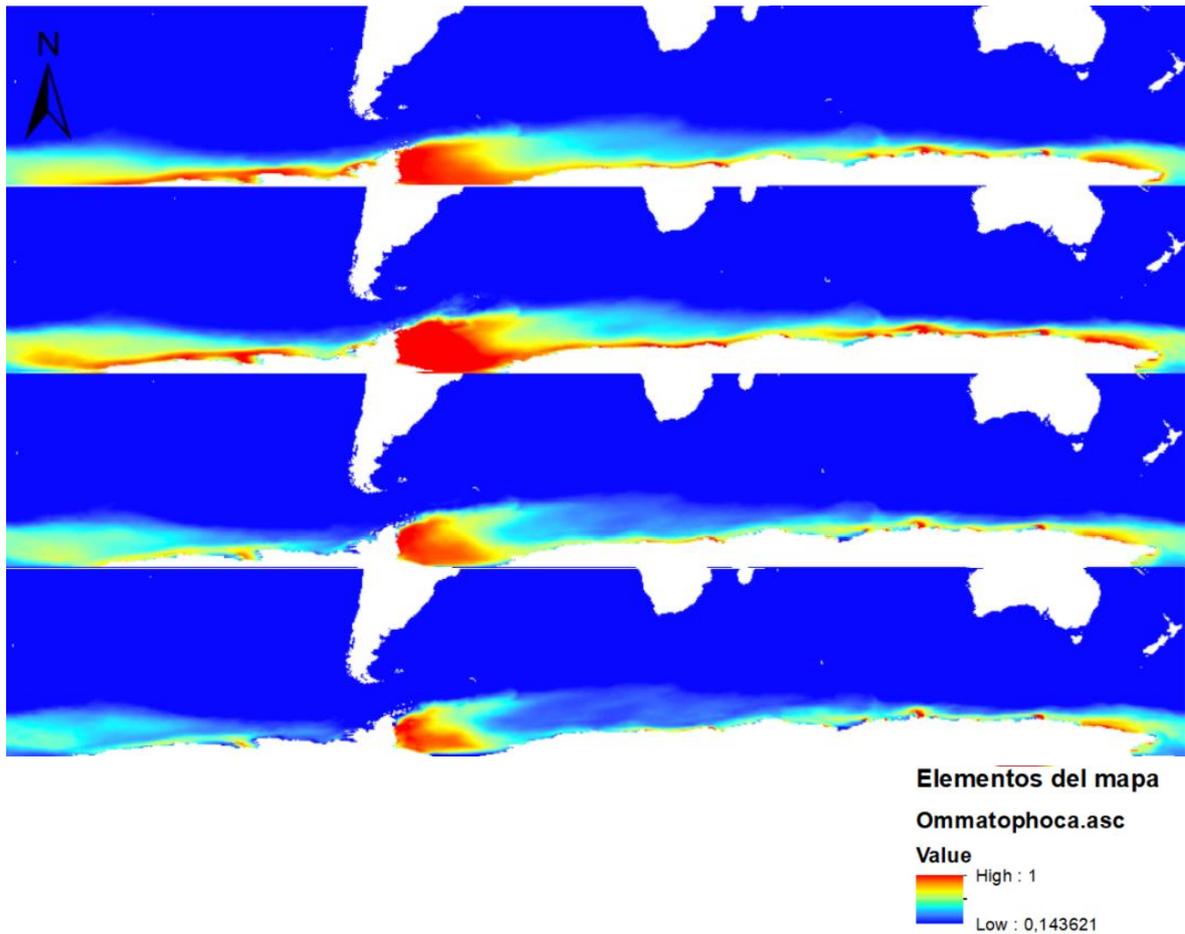


Fig. 10 En esta imagen podemos ver las proyecciones del modelo sobre diferentes años en un escenario SSP 5-8.5. La primera imagen corresponde a la actualidad, la segunda al 2040 la tercera al 2060 y la última a 2090

5. Discusión

El modelo final utilizado en este estudio demuestra ser robusto y preciso para predecir la distribución de la foca de Ross. Con un AUC superior a 0.9, el modelo nos ha permitido identificar los factores ambientales más influyentes en la distribución de la foca de Ross durante su período de cría y muda, proporcionando una visión más clara de su nicho ecológico. Este enfoque metodológico no solo permite predecir la distribución actual de la especie, sino también proyectar su distribución futura bajo distintos escenarios de cambio climático (Phillips et al., 2006).

El grosor del hielo se revela como la variable más importante en la determinación de la presencia de la foca de Ross. Este hallazgo se alinea con estudios previos que subrayan la dependencia de las focas de Ross del hielo marino para sus actividades reproductivas y de muda (Arcalís-Planas et al., 2015; Blix & Nordøy, 2007). La bibliografía existente respalda

esta dependencia, indicando que las focas de Ross utilizan áreas de hielo más grueso como hábitats seguros para la cría y muda. La presencia de hielo adecuado proporciona no solo una plataforma física para el descanso y la cría, sino también una protección contra depredadores y un acceso directo a fuentes de alimento (Wege et al., 2023). Sin hielo adecuado, las focas pueden enfrentar mayores riesgos de mortalidad y disminución de la población, como se ha observado en otras especies pagófilas.

Este fenómeno no es exclusivo de las focas de Ross. Otras especies pagófilas, como las focas de arpa (*Pagophilus groenlandicus*) y los pingüinos emperador (*Aptenodytes forsteri*), también dependen críticamente del hielo marino. Por ejemplo, Stelson et al. (2014) documentaron que las focas de arpa en el Golfo de San Lorenzo sufren altas tasas de mortalidad de crías en años de escaso hielo, lo que provoca que las hembras busquen áreas de parición más seguras y consolidadas. De manera similar, los pingüinos emperador enfrentan desafíos significativos debido a la disminución del hielo marino, lo que afecta sus ciclos de reproducción y supervivencia (Ainley et al., 2010). Los pingüinos emperador requieren hielo estable para su reproducción, y la disminución del hielo afecta la supervivencia de los polluelos y la capacidad de los adultos para encontrar alimento (Jenouvrier et al., 2012).

En cuanto al futuro de la foca de Ross, las proyecciones basadas en diferentes escenarios climáticos del IPCC presentan una perspectiva preocupante. Bajo el escenario SSP1-1.9, que asume medidas restrictivas para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, las áreas adecuadas para la especie se mantienen relativamente estables, sugiriendo que políticas estrictas de mitigación podrían ayudar a preservar su hábitat (Hausfather & Peters, 2020). Sin embargo, en escenarios más pesimistas como el SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se proyecta una significativa reducción en la extensión y calidad del hábitat adecuado debido al adelgazamiento del hielo marino. Estas proyecciones muestran una disminución continua en la idoneidad del hábitat para la foca de Ross, lo que podría llevar a una drástica reducción de la población de esta especie para finales de siglo (Peck, 2018). Estos hallazgos enfatizan la urgente necesidad de implementar y cumplir con políticas globales de mitigación del cambio climático para proteger a la foca de Ross y otras especies dependientes del hielo.

En resumen, este estudio subraya la importancia crítica del grosor del hielo para la supervivencia de la foca de Ross y la necesidad de políticas de mitigación del cambio

climático. Sin acciones inmediatas y efectivas, la foca de Ross, al igual que muchas otras especies pagófilas, podría enfrentar un futuro incierto y potencialmente sombrío

7. Conclusiones

Las conclusiones de este estudio destacan la robustez y precisión del modelo final para predecir la distribución de la foca de Ross, con un AUC superior a 0.9. Este modelo no solo identifica los factores ambientales más influyentes, como el grosor del hielo, sino que también permite proyectar la distribución futura de la especie bajo distintos escenarios de cambio climático. La dependencia crítica de la foca de Ross del hielo marino, especialmente durante los periodos de cría y muda, es un hallazgo coherente con estudios previos y resalta la vulnerabilidad de esta especie a la disminución del hielo marino. La comparación con otras especies pagófilas refuerza esta preocupación, subrayando la necesidad urgente de políticas globales de mitigación del cambio climático. Las proyecciones bajo distintos escenarios climáticos del IPCC sugieren que solo mediante medidas estrictas y efectivas se podrá preservar el hábitat adecuado para la foca de Ross, evitando así una posible drástica reducción de su población. En conclusión, la preservación del grosor del hielo es esencial para la supervivencia de la foca de Ross, y la implementación de políticas de mitigación del cambio climático es imperativa para proteger a esta y otras especies dependientes del hielo.

6. Líneas futuras de investigación

En estudios posteriores sería interesante prestar atención a si existen datos sobre posibles pariciones en áreas lejanas al hielo. Con ello se podría comprobar si en posibles desglaciaciones completas debidas al cambio climático, pueden provocar la desaparición de esta especie que, en un principio, actualmente debería estar aumentando su población frente al cambio según por la ventaja en la movilidad entre el hielo no consolidado (Wege et al, 2023) .

Por otro lado, en el trabajo de Stelson et al. (2014) se comprueba que pese a la pobre calidad del hielo la foca arpa no es capaz de cambiar su época de cría, pero el escaso conocimiento que tenemos aun sobre la foca de Ross nos impide conocer cuál es la respuesta de esta especie sobre un ambiente de estrés ambiental y el potencial de esta al cambio. Hasta hace muy poco se pensaba que la distribución de esta especie está limitada al hielo profundo y hoy se sabe que no solo no está limitado por ello si no que puede ser la foca antártica con mayores distancias recorridas. Para futuros estudios sería interesante observar si esta foca es capaz de alterar sus ciclos reproductivos para poder criar lejos de verano austral, en épocas donde la cantidad y calidad del hielo sea mejor, sobre otros meses como abril o mayo. Actualmente, no hay evidencias que descarten estos proyectos.

Referencias

- Greta T. Pecl et al., Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355, eaai9214 (2017). DOI:10.1126/science.aai9214
- Kovacs K. M., Lavigne D. M., Stewart R. E. A.. Early postnatal mortality in northwest Atlantic harp seals (*Phoca groenlandica*), *Journal of Mammalogy*, 1985, vol. 66 (pg. 556-558)
- G. B. Stenson, M. O. Hammill, Can ice breeding seals adapt to habitat loss in a time of climate change?, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 71, Issue 7, September/October 2014, Pages 1977–1986, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu074>
- Bajzak C.E., Hammill M.O., Stenson G.B., and Prinsenbergs.. 2011. Drifting away: implications of changes in ice conditions for a pack-ice-breeding phocid, the harp seal (*Pagophilus groenlandicus*). *Canadian Journal of Zoology*. 89(11): 1050-1062. <https://doi.org/10.1139/z11-081>
- Hammill M. O., Stenson G. B. , A preliminary evaluation of the performance of the Canadian management approach for harp seals using simulation studies, 2009. Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2009/093 www.dfo-mpo.gc.ca/csas
- Waller, N. L., Gynther, I. C., Freeman, A. B., Lavery, T. H., & Leung, L. K. P. (2017). The Bramble Cay melomys *Melomys rubicola* (Rodentia: Muridae): a first mammalian extinction caused by human-induced climate change?. *Wildlife Research*, 44(1), 9-21.
- IUCN. 2023. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2023-1. <https://www.iucnredlist.org>. Accessed on 15 of January 2024
- IPCC, 2019: Resumen para responsables de la formulación de políticas. En: Informe especial del IPCC sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. En prensa.
- Clucas, G., Dunn, M., Dyke, G. et al. A reversal of fortunes: climate change ‘winners’ and ‘losers’ in Antarctic Peninsula penguins. *Sci Rep* 4, 5024 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep05024>
- Arcalís-Planas, A., Sveegaard, S., Karlsson, O. et al. Limited use of sea ice by the Ross seal (*Ommatophoca rossii*), in Amundsen Sea, Antarctica, using telemetry and remote sensing data. *Polar Biol* 38, 445–461 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1602-y>

- Thomas JA; Rogers T, 2009, 'The Ross seal, *Ommatophoca rossii*', in Perrin WF; Wursig B; Thewissen JGM (ed.), *Encyclopedia of Marine Mammals*, Academic Press, San Diego, pp. 988 – 990
- Blix, A.S., Nordøy, E.S. Ross seal (*Ommatophoca rossii*) annual distribution, diving behaviour, breeding and moulting, off Queen Maud Land, Antarctica. *Polar Biol* 30, 1449–1458 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00300-007-0306-y>
- J. D. Skinner; N. T. W. Klages (1994). On some aspects of the biology of the Ross seal *Ommatophoca rossii* from King Haakon VII Sea, Antarctica. , 14(7), 467–472. doi:10.1007/bf00239051
- Steig, E., Schneider, D., Rutherford, S. et al. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457, 459–462 (2009). <https://doi.org/10.1038/nature07669>
- Tewari, K., Mishra, S. K., Salunke, P., & Dewan, A. (2022). Future projections of temperature and precipitation for Antarctica. *Environmental Research Letters*, 17(1), 014029. DOI 10.1088/1748-9326/ac43e2
- Andrew Shepherd et al. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 2018, vol. 558, no 7709, p. 219-222. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
- GBIF.org (22 April 2024) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.2wdw9y>
- Ocean Biodiversity Information System. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. obis.org. <https://datasets.obis.org/downloads/0e9b3374-1df6-4dc1-ac49-ac55cd5b4424.zip>
- Solyanik, I. G. (1964). Observations on the Ross Seal, *Ommatophoca rossii*, in the Sandwich Islands. *Soviet Antarctic Expedition Transactions*, 1, 174–176.
- Wege, M., Bornemann, H., & Bester, M. N. (2023). The nightlife of a Ross seal: diving and haul-out behaviour from the eastern Weddell Sea. *Antarctic Science*, 35(1), 31–42. doi:10.1017/S0954102022000438
- King, J. (1983). The Ross seal (*Ommatophoca rossii*) in the Antarctic. *Australian Journal of Zoology*, 31(1), 123-136.
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E. A. & De Clerck, O. (2017) Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 277–284.

- Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F. & De Clerck, O. (2012). Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modeling. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2), 272–281.
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). RCP8. 5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 27791-27792.
- Booth, G.D., Niccolucci, M.J. & Schuster, E.G. (1994) Identifying proxy sets in multiple linear regression: an aid to better coefficient interpretation. Intermountain Research Station, USDA Forest Service, Ogden, Utah, USA.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. et al. (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293.
- Hannah L, Midgley G, Andelman S, Araújo M, Hughes G, Martinez-Meyer E, Pearson R, Williams P (2007) Protected area needs in a changing climate. *Front Ecol Environ* 5:131–138
- Lauriano, G., Pirotta, E., Joyce, T., Pitman, R. L., Borrell, A., & Panigada, S. (2020). Movements, diving behaviour and diet of type-C killer whales (*Orcinus orca*) in the Ross Sea, Antarctica. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 30(12), 2428-2440.
- Southwell, C., Bengston, J., Bester, M., Blix, A. S., Bornemann, H., Boveng, P., ... & Trathan, P. (2012). A review of data on abundance, trends in abundance, habitat use and diet of ice-breeding seals in the Southern Ocean. *Ccamlr Science*, 19, 49-74.
- McCarty, J. P. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation biology*, 15(2), 320-331.
- Smith, R. C., D. Ainley, K. Baker, E. Domack, S. Emslie, B. Fraser, J. Kennett, A. Leventer, E. Mosley-Thompson, S. Stammerjohn & M. Vernet. 1999. Marine ecosystem sensitivity to climate change. *Bioscience* 49: 393–404.
- Taylor, R. H. & P. R. Wilson. 1990. Recent increase and southern expansion of Adelle Penguin populations in the Ross Sea, Antarctica, related to climatic warming. *New Zealand Journal of Ecology* 14: 25–29.
- Fraser, W. R., W. Z. Trivelpiece, D. G. Ainley & S. G. Trivelpiece. 1992. Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming? *Polar Biology* 11: 525–531.

- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). "Impacts of climate change on the future of biodiversity." *Ecology Letters*, 15(4), 365-377
- Kiestler, B. (2011). Genetic Analysis of Stranded and By-Caught Harp Seals (*Pagophilus groenlandicus*) in the Northwest Atlantic (Doctoral dissertation, Duke University).
- Hammill M. O., Stenson G. B., Doniol-Valcroze T., Mosnier A., Estimating carrying capacity and population trends of Northwest Atlantic harp seals, 1952–2012, 2012 Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2012/148pg. iii + 31 pp www.dfo-mpo.gc.ca/csas
- Zhao, L., Castellini, M.A., Mau, T.L. et al. Trophic interactions of Antarctic seals as determined by stable isotope signatures. *Polar Biol* 27, 368–373 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00330-004-0598-0>
- Bester, M.N., Wege, M., Oosthuizen, W.C. et al. Distribución de la foca de Ross en el mar de Weddell: realidad y falacia. *Polar Biol* 43, 35–41 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00330-019-02610-4>
- Wege, M., Bornemann, H., Blix, A. S., Nordøy, E. S., Biddle, L., & Bester, M. N. (2021). Distribution and habitat suitability of Ross seals in a warming ocean. *Frontiers in Marine Science*, 8, 659430.
- Southwell, C. (2005). "Diving behavior and prey selection by Ross seals (*Ommatophoca rossii*) in Antarctic waters." *Polar Biology*, 28(8), 652-660.
- Yi, Y. J., Cheng, X., Yang, Z. F., & Zhang, S. H. (2016). Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H. riparia* Lour) in Yunnan, China. *Ecological Engineering*, 92, 260-269.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Oritsland T (1970) Sealing and seal research in the south-west Atlantic pack ice, September–October 1964. In: Holdgate M (ed) *Antarctic Ecology* Vol. 1, Academic Press, London, pp 367–376
- Bengtson, J. L., & Stewart, B. S. (1997). Diving patterns of a Ross seal (*Ommatophoca rossii*) near the eastern coast of the Antarctic Peninsula. *Polar Biology*, 18, 214-218.
- Hindell, M. A., Reisinger, R. R., Ropert-Coudert, Y., Hückstädt, L. A., Trathan, P. N., Bornemann, H., ... & Raymond, B. (2020). Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems. *Nature*, 580(7801), 87-92.
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697.

- Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009.
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Ainley, D. G., Russell, J., Jenouvrier, S., Woehler, E., Lyver, P. O'B., Fraser, W. R., & Kooyman, G. L. (2010). Antarctic penguin response to habitat change as Earth's troposphere reaches 2°C above preindustrial levels. *Ecological Monographs*, 80(1), 49-66.
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions – the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618-620.
- Jenouvrier, S., Caswell, H., Barbraud, C., Holland, M., Strøve, J., & Weimerskirch, H. (2012). Effects of climate change on an emperor penguin population: analysis of coupled demographic and climate models. *Global Change Biology*, 18(9), 2756-2770.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Peck, L. S. (2018). Antarctic marine biodiversity: adaptations, environments and responses to change. *Oceanography and Marine Biology*. Wege, M., Labuschagne, K., & De Bruyn, P. J. N. (2023). Ross seals in a changing climate: Distribution and future threats. *Polar Biology*, 46(1), 123-138.
- Cao, Y., DeWalt, R. E., Robinson, J. L., Tweddale, T., Hinz, L., & Pessino, M. (2013). Using Maxent to model the historic distributions of stonefly species in Illinois streams: the effects of regularization and threshold selections. *Ecological Modelling*, 259, 30-39.