

Modelado del éxito reproductivo del pingüino de Magallanes mediante R e imágenes satelitales: un enfoque multinomial desde el Parque Nacional Monte León, Argentina

Samanta Dodino^{1,2,3}, María Eugenia Lopez^{1,3,4}, Érica Schlaps^{2,3}, Lucía Rodríguez-Planes^{3,4}

¹ Centro Austral de Investigaciones Científicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

² Instituto de Desarrollo Económico e Innovación, Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

³ Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

⁴ Dirección Regional Patagonia Austral, Administración de Parques Nacionales.

Las aves marinas, y en particular los pingüinos, son sensibles a las variaciones ambientales que afectan su éxito reproductivo y, en consecuencia, la dinámica poblacional. En esta presentación describimos el uso de R para desarrollar un flujo de trabajo reproducible que integra datos de campo y variables satelitales para analizar el éxito reproductivo del pingüino de Magallanes (*Spheniscus magellanicus*) en el Parque Nacional Monte León, Argentina, una de las colonias más importantes de la especie, conocida por su tamaño (43764 nidos activos, IC95% 36,9-51,2) y su rol en la dinámica poblacional.

El éxito reproductivo se definió como el número de pichones que llegan a emplumar por nido (0, 1 o 2), lo que permite modelarlo como una variable categórica ordinal, más informativa que una métrica binaria o continua, ya que refleja gradientes de productividad. Durante 15 temporadas (2010–2024) se monitorearon nidos activos, y se analizaron conjuntamente con variables ambientales derivadas de imágenes satelitales.

Seleccionamos temperatura superficial del mar (SST), anomalías térmicas (SSTA), clorofila-a (Chla) y el índice SAM (Southern Annular Mode) porque estas variables están ampliamente documentadas en la literatura como indicadores de disponibilidad de alimento y condiciones oceánicas que afectan la reproducción de aves marinas (Sandvik et al. 2012, Dehnhard et al. 2013, Boersma & Rebstock 2014, Agnew et al. 2015), y cuentan con series temporales satelitales de acceso abierto y resolución adecuada. Para incorporar estas variables ambientales procesamos imágenes MODIS (resolución de ~4 km) y NOAA (resolución de ~5 km) utilizando el paquete ‘terra’. Se calcularon promedios estacionales durante el período de cría de pichones (noviembre a enero) en un radio de 50 km alrededor de la colonia, basado en la distancia máxima de forrajeo registrada para la especie en esa etapa (Raya Rey et al. 2010, Boersma et al. 2013, Rosciano et al. 2018).

Previo al modelado se evaluó la correlación entre variables (función `cor.test()`). Se modelaron combinaciones de las variables que no estuvieron correlacionadas. Implementamos modelos de regresión ordinal con el paquete ‘MASS’ (función `polr()`) y el paquete ‘ordinal’ (función `clm()`), incorporando relaciones no lineales mediante funciones spline. Las funciones spline (2 a 3 grados de libertad) se incorporaron para capturar relaciones no lineales entre las variables ambientales y la respuesta biológica, dado que los efectos de la temperatura, productividad o forzantes climáticas sobre la reproducción de aves marinas suelen mostrar umbrales o respuestas óptimas intermedias. Este enfoque permite una representación flexible de la forma funcional sin sobreajustar los datos.

Los resultados mostraron que SAM y SSTA fueron predictores significativos ($p < 0.05$). Se revelaron respuestas no lineales en los efectos spline:

- la relación con SAM resultó ser no lineal, y la probabilidad de éxito máximo (2 pichones) fue mayor a valores intermedios
- la relación con SSTA fue lineal (spline de orden 2 resultó no significativo) y directa: la probabilidad de éxito de dos pichones fue mayor a valores mayores de SSTA.

Todo el flujo de trabajo, desde el preprocesamiento de rásteres (paquete ‘terra’), la manipulación y visualización de datos (paquetes ‘tidyverse’, ‘ggplot2’) hasta la exploración de efectos (paquete ‘ggeffects’), fue automatizado en R.

Este enfoque demuestra el potencial de R como una herramienta flexible, estandarizada y transparente para integrar monitoreo ecológico y datos satelitales, contribuyendo a mejorar la comprensión de los factores ambientales que regulan el éxito reproductivo de los pingüinos y a fortalecer estrategias de manejo y conservación frente al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Agnew P, Lalas C, Wright J, Dawson S (2015) Variation in breeding success and survival of little penguins *Eudyptula minor* in response to environmental variation. *Mar Ecol Prog Ser* 541.
- Boersma PD, Frere E, Kane O, Pozzi L, Pütz K, Raya Rey A, Rebstock G, Simeone A, Smith J, Van Buren A, Yorio P, Garcia Borboroglu P (2013) Magellanic Penguin (*Spheniscus magellanicus*). In: *Penguin biology*. Borboroglu PG, Boersma PD (eds) University of Washington Press, Seattle, USA, p 232–263
- Boersma PD, Rebstock GA (2014) Climate Change Increases Reproductive Failure in Magellanic Penguins. *PLOS ONE* 9:e85602.
- Dehnhard N, Poisbleau M, Demongin L, Ludynia K, Lecoq M, Masello JF, Quillfeldt P (2013) Survival of rockhopper penguins in times of global climate change. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 23:777–789.
- Raya Rey A, Bost C, Schiavini A, Pütz K (2010) Foraging movements of Magellanic penguins *Spheniscus magellanicus* in the Beagle Channel, Argentina, related to tide and tidal currents. *J Ornithol* 151:933–943.
- Rosciano NG, Pütz K, Polito MJ, Raya Rey A (2018) Foraging behaviour of Magellanic Penguins during the early chick-rearing period at Isla de los Estados, Argentina. *Ibis* 160:327–341.
- Sandvik H, Erikstad KE, Sæther B-E (2012) Climate affects seabird population dynamics both via reproduction and adult survival. *Mar Ecol Prog Ser* 454:273–284.