

DOCUMENTO SAC-13-08

MODELO ESPACIOTEMPORAL DE MERCADO PARA EL BARRILETE EN EL OPO

Tobias K. Mildenerger, Anders Nielsen, Mark Maunder

ÍNDICE

1. Resumen .....	1
2. Introducción .....	1
3. Datos .....	2
3.1 Datos de mercado .....	2
3.2 Datos ambientales.....	3
4. Modelo de desplazamiento .....	3
5. Resultados preliminares.....	4
6. Próximos pasos .....	4
7. Agradecimientos .....	5
8. Referencias.....	5

**1. RESUMEN**

Históricamente, la evaluación del atún barrilete (*SKJ, Katsuwonus pelamis*) en el Océano Pacífico oriental (OPO) ha sido problemática debido a la falta de un índice fiable de abundancia relativa, a la posibilidad de una selectividad en forma de domo y a la falta de datos de composición por edad, provocando así que su ordenación sostenible se vea afectada. Un modelo espaciotemporal de población que utilice los datos de mercado disponibles podría permitir la estimación del tamaño de la población, su distribución y sus niveles de extracción sostenibles para el barrilete en el OPO. Como primer paso, este modelo estima el desplazamiento del barrilete como un proceso de advección-difusión. El proceso de advección se puede basar en una función espaciotemporal de preferencia de hábitat dependiente de capas ambientales, tales como mapas batimétricos o de temperatura, tal como lo describen Thorson *et al.* (2021). Las tasas instantáneas de desplazamiento se transforman en probabilidades de desplazamiento y distribución por medio de la exponencial de la matriz. Los resultados preliminares son prometedores e indican que la temperatura y la profundidad de la capa mixta probablemente contienen información sobre la preferencia de hábitat del barrilete en el OPO.

**2. INTRODUCCIÓN**

Históricamente, la evaluación del atún barrilete (*SKJ, Katsuwonus pelamis*) en el Océano Pacífico oriental (OPO) ha sido problemática debido a la falta de un índice fiable de abundancia relativa, a la posibilidad de una selectividad en forma de domo y a la falta de datos de composición por edad (Maunder, M.N. y Harley,

S.J. 2005), provocando así que su ordenación sostenible se vea afectada. Por otro lado, la información disponible de múltiples eventos de marcado podría servir como base para un modelo espaciotemporal de población que permita estimar la abundancia y las tasas explotación del barrilete ([SAC-12-06](#)). Una parte central de este modelo es el modelo espaciotemporal de marcado que con base en las marcas recuperadas (y no recuperadas) describe los patrones de desplazamiento más probables del barrilete en el OPO. En este documento describimos el enfoque utilizado para el modelo espaciotemporal de marcado que estima el desplazamiento del barrilete en el OPO y presentamos los resultados preliminares.

### **3. DATOS**

El modelo espaciotemporal de marcado requiere información de marcas convencionales recuperadas (y no recuperadas) así como de datos ambientales.

#### **3.1 Datos de marcado**

Se dispone de datos de marcado de cuatro eventos de marcado para el barrilete en el OPO. Hasta ahora, hemos utilizado las marcas convencionales de los últimos dos eventos que tuvieron lugar en el periodo de 2000 a 2006 y del evento aún en curso que comenzó en 2019; sin embargo, excluimos los datos de los otros dos eventos de marcado que tuvieron lugar de 1955 a 1964 y de 1979 a 1981. Mientras que los seis cruceros de marcado de atunes en el periodo de 2000 a 2006 se enfocaron en el atún patudo, 3425 barriletes fueron marcados y liberados con marcas de dardo plásticas de las cuales se recuperaron 563 marcas. Por el contrario, el Programa Regional de Marcado de Atunes multianual de la CIAT (PRMA-OPO 2019-2022, Proyecto E.4.a), que inició en 2019, se centró en el barrilete. Dicho programa incluyó dos cruceros de marcado en 2019 y 2020 y un tercero que se pospuso y que se encuentra actualmente en curso (primavera de 2022). Se marcaron 6259 barriletes con marcas de dardo plásticas durante los dos primeros cruceros, de las cuales se recuperaron 1619 al momento de la redacción de este informe. Los atunes marcados durante estos dos eventos se liberaron desde 49 ubicaciones únicas (triángulos amarillos en la Figura 1).

Después de aplicar un filtro de velocidad y excluir las marcas no fiables, quedó un total de 9625 marcas, de las cuales se utilizaron las marcas recuperadas en 2007 para el análisis presentado aquí (flechas negras en la Figura 1). Las dimensiones espaciales de la región del modelo se definieron dentro del límite de ordenación occidental en 150°O y la costa de Norteamérica y Suramérica en el este, así como en 30°S y 35°N (área azul en la Figura 1).

#### **3.2 Datos ambientales**

El modelo de marcado del barrilete requiere datos ambientales para informar la preferencia de hábitat del barrilete. Una gama de covariables ambientales potenciales podrían ser relevantes para informar la preferencia de hábitat y, por lo tanto, el desplazamiento del barrilete en el OPO. Hasta ahora, hemos explorado la temperatura superficial del mar, la profundidad de la capa mixta, la clorofila a, así como los datos batimétricos como covariables potenciales que informan la preferencia de hábitat del barrilete. Los datos ambientales se agrupan para corresponder al respectivo tamaño de la grilla (por ejemplo, tamaños de celdas de 5° o 2.5°) e intervalo temporal (por ejemplo, trimestral o mensual).

### **4. MODELO DE DESPLAZAMIENTO**

El desplazamiento del barrilete en el OPO se describe por un proceso de advección-difusión que utiliza una función de preferencia de hábitat para definir el proceso de advección (Thorson *et al.* 2021). El

desplazamiento se calcula por medio de la exponencial de la matriz de las tasas instantáneas de advección-difusión. Esto permite la parametrización de la tasa instantánea de desplazamiento entre celdas vecinas en lugar de entre todas las celdas (Thorson *et al.* 2017).

$$M(t) = e^{(A^*+D^*)\Delta t}$$

donde  $M(t)$  es la matriz de desplazamiento por intervalo temporal y  $A^*$  y  $D^*$  son las tasas instantáneas de advección-difusión, respectivamente. La tasa instantánea de advección se define por

$$A^*(g_2, g_1, t) = \begin{cases} h(g_2, t) - h(g_1, t) & \text{si } g_1 \text{ y } g_2 \text{ son adyacentes} \\ - \sum_{g' \neq g_1} A^*(g', g_1, t) & \text{si } g_1 = g_2 \\ 0 & \text{si de otro modo,} \end{cases}$$

donde  $g$  y  $t$  corresponden a la celda y al intervalo temporal, respectivamente, y  $h(g, t) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i(g, t), k_i)$  describe la función de preferencia de hábitat como la suma de las funciones suaves  $f_i$  de la  $i$ ésima capa ambiental  $x_i(g, t)$  con el vector de nudo  $k_i$  y los valores de parámetros  $\alpha_i$  correspondientes. Por lo tanto, la tasa de advección se define por las diferencias locales en la preferencia de hábitat que se basa en las funciones suavizadas de cualquier cantidad de capas ambientales. La tasa instantánea de difusión sin covariables ambientales se define por

$$D^*(g_2, g_1, t) = \begin{cases} e^{2\beta} & \text{si } g_1 \text{ y } g_2 \text{ son adyacentes} \\ - \sum_{g' \neq g_1} D^*(g', g_1, t) & \text{si } g_1 = g_2 \\ 0 & \text{si de otro modo,} \end{cases}$$

donde el parámetro  $\beta$  es el parámetro de difusión.

Dado que múltiples marcas recuperadas están vinculadas a las mismas ubicaciones de liberación (pero a diferentes tiempos de recuperación), los cálculos se optimizan para la velocidad de cálculo y la asignación de memoria mediante la estimación de las matrices de desplazamiento que dependen de las ubicaciones de liberación únicas. El modelo espaciotemporal de marcado se implementa en el Template Model Builder (TMB; Kristensen *et al.* 2016) y la optimización de los parámetros se realiza en R 4.0.2 (R Core Team 2020).

## 5. RESULTADOS PRELIMINARES

De los diversos modelos probados hasta ahora, el modelo espaciotemporal de marcado que utiliza la profundidad de la capa mixta y la temperatura superficial del mar como capas ambientales fue uno de los modelos más robustos. Los resultados preliminares del modelo con 12 intervalos de tiempo por año indican una alta preferencia de hábitat alrededor de la línea ecuatorial con los valores más altos alrededor de 130° a 80°O (gráfica de la izquierda en la Figura 3). Otras dos regiones con altos niveles de preferencia de hábitat se encuentran alrededor de 20°N, así como en la esquina inferior izquierda de la región del modelo (alrededor de 30°S y 145°O). Por lo tanto, el desplazamiento dirigido estimado (aquí: advección) apunta hacia estos hábitats con niveles de preferencia más altos (gráfica de la derecha en la Figura 3). En este modelo, se estimó que la difusión era una tasa constante independiente del espacio y del tiempo.

Con base en los *splines* naturales de tres nudos para cada capa ambiental, el modelo estimó que el barrilete prefería una profundidad baja de la capa mixta con una preferencia continuamente decreciente

por una profundidad creciente de la capa mixta y temperaturas superficiales del mar intermedias de alrededor de 24°C (Figura 3). La escala de la preferencia de hábitat correspondiente a las dos capas ambientales se encuentra en el mismo orden de magnitud que indica una ponderación similar de las dos capas y, por lo tanto, una contribución a la preferencia de hábitat del barrilete en el OPO (Figura 3).

Aunque estos resultados preliminares fueron consistentes para un modelo con una grilla más fina con celdas de 2.5° y 4 intervalos de tiempo por año, las relaciones fueron dependientes del tipo e implementación de los *splines*, como el número y la posición de los nudos o el número de bases para el *spline* B. Además, se asignará trabajo para comparar diferentes tipos e implementaciones de *splines* y para identificar relaciones robustas entre el desplazamiento del barrilete y las capas ambientales pertinentes.

## 6. DISCUSIÓN

Estos resultados iniciales son prometedores y muestran que las tasas de desplazamiento pueden estimarse y sugieren que la temperatura y la profundidad de la capa mixta pueden aportar información sobre la preferencia de hábitat del barrilete en el OPO. Se han realizado análisis preliminares que incorporan los datos de esfuerzo y las marcas no recuperadas e indican que las tasas de mortalidad por pesca y mortalidad natural también pueden estimarse. Estas cantidades podrían utilizarse para proporcionar asesoramiento de ordenación o para mejorar el asesoramiento de ordenación actual mediante su integración en la evaluación provisional de la población ([SAC-13-07](#)).

## 7. PRÓXIMOS PASOS

Con respecto al desarrollo futuro del enfoque aquí esbozado hacia un modelo de población que estime la abundancia y la tasa de explotación del barrilete en el OPO, se considerarán los siguientes pasos a corto y a largo plazo.

Pasos a corto plazo:

- Utilizar las marcas archivadoras para informar mejor el desplazamiento del barrilete
- Incluir marcas convencionales no recuperadas
- Minimizar la resolución espacial y temporal
- Explorar y comparar varias capas ambientales y tipos e implementaciones de *splines*

Pasos a largo plazo:

- Utilizar datos espaciotemporales de captura y esfuerzo para estimar las tasas de mortalidad por pesca y mortalidad natural
- Establecer un modelo de abundancia espacialmente explícito informado por las matrices de desplazamiento estimadas
- Estimar los niveles de referencia para la extracción sostenible
- Determinar cómo los resultados se pueden integrar a la evaluación provisional ([SAC-13-07](#)).

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la CIAT. Agradecemos las importantes contribuciones de Kurt Schaefer y Dan Fuller al programa de marcado en general y a este proyecto en específico. Agradecemos los datos ambientales proporcionados por COPERNICUS (<https://www.copernicus.eu/en>) y a todos los involucrados en el marcado del barrilete en el OPO y en la recuperación de estas marcas.

## 8. REFERENCIAS

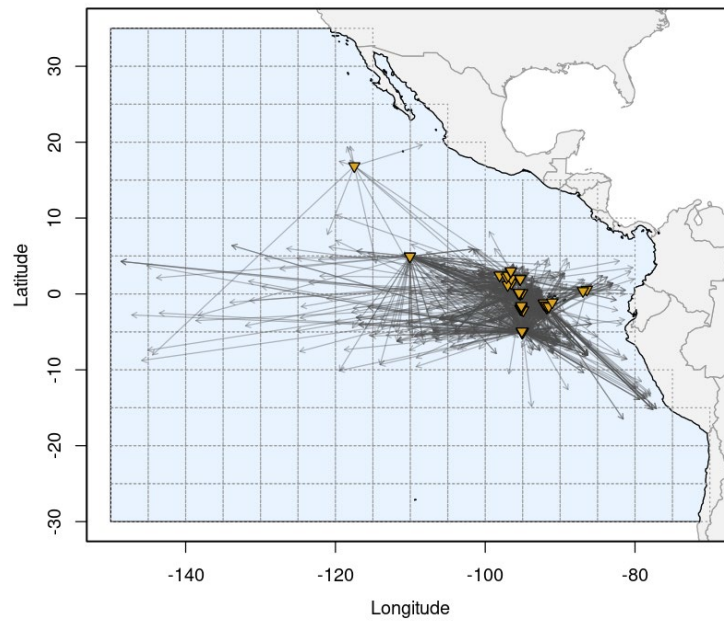
Kristensen, K., Nielsen, A., Berg, C.W., Skaug, H., Bradley M. and Bell, B.M. 2016. TMB: Automatic Differentiation and Laplace Approximation. *Journal of Statistical Software*, 70(5), 1-21. doi:10.18637/jss.v070.i05

Maunder, M.N. and Harley, S.J. 2005. Status of skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean in 2003 and outlook for 2004. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Stock Assess. Rep. 5*: 109-167.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

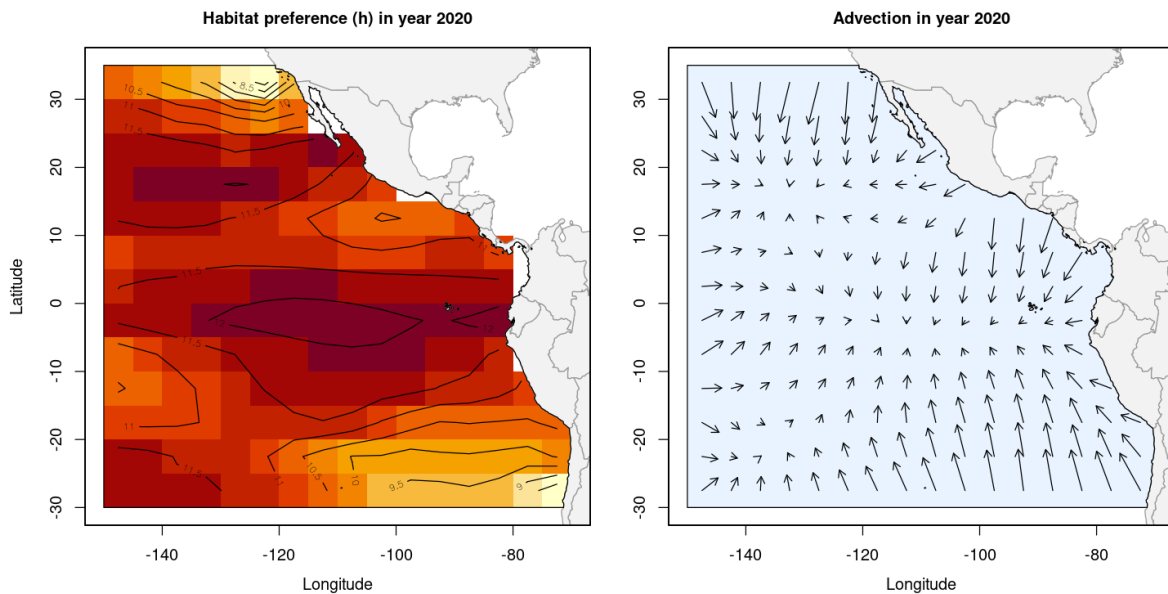
Thorson, J.T., Jannot, J., and Somers, K., 2017. Using spatio-temporal models of population growth and movement to monitor overlap between human impacts and fish populations. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 577-587.

Thorson, J.T., Barbeaux, S.J., Goethel, D.R., Kearney, K.A., Laman, E.A., Nielsen, J.K., Siskey, M.R., Siwicke, K. and Thompson, G.G., 2021. Estimating fine-scale movement rates and habitat preferences using multiple data sources. *Fish and Fisheries*, 22(6), pp.1359-1376.



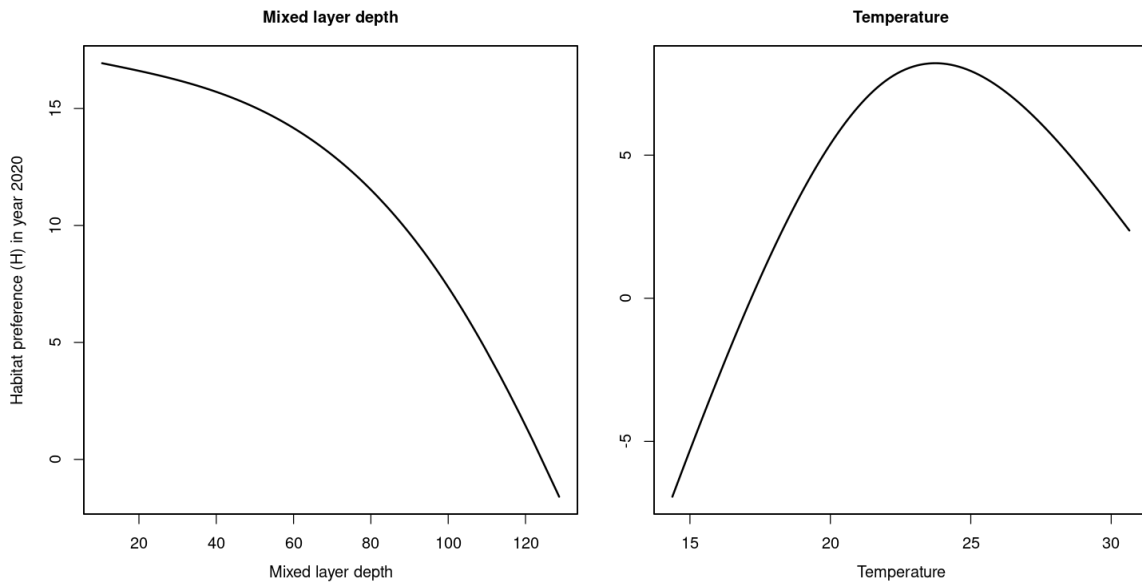
**FIGURE 1.** Spatial dimensions of the EPO model region arranged in two grids of 5° cell sizes. Black arrows connect the release and recapture location of SKJ with conventional tags from the two most recent tagging events. Yellow triangles indicate the 49 unique release locations.

**FIGURA 1.** Dimensiones espaciales de la región del modelo del OPO dispuestas en dos grillas de celdas de 5°. Las flechas negras conectan la ubicación de liberación y recaptura de SKJ con las marcas convencionales de los dos eventos de marcado más recientes. Los triángulos amarillos indican las 49 ubicaciones de liberación únicas.



**FIGURE 2.** Estimated habitat preference and advection in 2020 based on a 5° grid, 12 time steps per year, and two environmental layers: mixed layer depth and sea surface temperature.

**FIGURA 2.** Preferencia de hábitat y advección estimadas en 2020 con base en una grilla de 5°, 12 intervalos temporales por año y dos capas ambientales: profundidad de la capa mixta y temperatura superficial del mar.



**FIGURE 3.** Relationship between habitat preference in 2020 and the two environmental layers estimated based on natural splines with three knots.

**FIGURA 3.** Relación entre la preferencia de hábitat en 2020 y las dos capas ambientales estimadas con base en los *splines* naturales de tres nudos.