



## Distribution and abundance of the Pacific hake, *Merluccius productus*, and relationship with the environment in the Gulf of California, Mexico

## Distribución y abundancia de la merluza del Pacífico, *Merluccius productus*, y su relación con el ambiente en el golfo de California, México

[Eduardo Alvarez-Trasviña](#)<sup>1</sup>, [Dana I Arizmendi-Rodríguez](#)<sup>2</sup>, [Emigdio Marín-Enríquez](#)<sup>3</sup>, [Luis A Salcido-Guevara](#)<sup>1\*</sup>, [Rebeca Sánchez-Cárdenas](#)<sup>1</sup>, [Guillermo Rodríguez-Domínguez](#)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, 82017 Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura, Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera-Guaymas, 85400 Guaymas, Sonora, Mexico.

<sup>3</sup> Cátedras CONACYT-Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, 82000 Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

\* Corresponding author. E-mail: [lsalcido@uas.edu.mx](mailto:lsalcido@uas.edu.mx)

**ABSTRACT.** Climate and oceanic conditions determine the Pacific hake (*Merluccius productus*) distribution pattern. The present work aimed to identify the spatiotemporal relationship between the distribution and abundance of Pacific hake and the environment in the Gulf of California. Information obtained from 6 research cruises carried out between 2014 and 2019 was analyzed. The results showed that the Gulf of California hake reaches a total length of 105 cm, exhibiting sexual dimorphism at total lengths >73 cm. The highest resource biomass (68,260.37 t) was found in February 2019 at depths between 200 and 300 m and the lowest was found in October 2016 (6,917.80 t) at depths between 100 and 150 m. These centers of abundance were located at bottom temperatures between 13 and 14 °C, north of Ángel de la Guarda Island and between the great islands (Tiburón Island and Ángel de la Guarda Island). After adjusting generalized additive models between seasonal hake catches and different environmental, spatial, and temporal variables, bottom temperature was found to be the variable that best described these centers of abundance.

**Key words:** Gulf of California, bottom temperature, depth, research cruises, generalized additive models.

**RESUMEN.** Las condiciones climáticas y oceánicas determinan el patrón de distribución de la merluza del Pacífico (*Merluccius productus*). El presente trabajo tuvo como objetivo conocer la relación espaciotemporal entre la distribución y la abundancia de la merluza del Pacífico y el ambiente en el golfo de California. Se analizó la información obtenida de 6 cruceros de investigación realizados entre 2014 y 2019. Los resultados mostraron que la merluza del golfo de California alcanza tallas de 105 cm de longitud total y presenta dimorfismo sexual a tallas >73 cm de longitud total. La mayor biomasa del recurso (68,260.37 t) se encontró en febrero de 2019 entre los 200 y 300 m de profundidad, y la menor, en octubre de 2016 (6,917.80 t) a profundidades de 100–150 m. Los centros de abundancia se localizaron a temperaturas de fondo de entre 13 y 14 °C, al norte de la isla Ángel de la Guarda y entre las grandes islas (isla Tiburón e isla Ángel de la Guarda). Al ajustar modelos aditivos generalizados entre las capturas de merluza de cada estación y distintas variables ambientales, espaciales y temporales, se encontró que la temperatura de fondo fue la variable que mejor describió estos centros de abundancia.

**Palabras claves:** golfo de California, temperatura de fondo, profundidad, cruceros de investigación, modelos aditivos generalizados.



## INTRODUCTION

The Pacific hake, *Merluccius productus* (Ayles, 1855), is distributed along the coasts of Canada and the United States of America and along the coast of Mexico down to the Gulf of Tehuantepec, even in the Gulf of California (Lloris et al. 2005). It is a demersal species whose habitat extends from the continental shelf down to 1,000 m depth (FAO 1995). Considering its population structure, more than 3 stocks have been identified throughout its distribution range: the first, called the coastal stock, is distributed from southern California to Queen Charlotte Strait, Canada; the second is found in the south-central portion of Puget Sound, United States of America; and the third is located in the Strait of Georgia, Canada (Iwamoto et al. 2004). In the California Current hake show migratory movements, to the north for feeding and to the south for reproduction (Bailey et al. 1982). These movements are associated with anomalies in subsurface temperature, the intensity of the northbound subsurface current, and changes in the distribution of their prey during warm and cold years (Smith et al. 1990, Dorn 1995).

Swartzman (1997) used generalized additive models to analyze the relationship between hake schools and bottom temperature along the coast of the United States of America and observed a latitudinal spatial pattern, where aggregations in northern latitudes were located at greater depths and far from the coast. Similarly, Benson et al. (2002) explored the relationship between ocean conditions and mature hake biomass in Canadian waters using linear regressions and found an inverse relationship between biomass and upwelling anomalies, which explained 77% of the variance of such biomasses. Using a geostatistical regression model, Agostini et al. (2006, 2008) found a significant relationship between hake migratory movements and the subsurface current and depth.

In the Gulf of California there are 4 water masses with circulation patterns that are related to the local wind system and tidal currents, which generate constant upwelling and high productivity (Torres-Orozco 1993, Alvarez-Borrego 2007). Consequently, the Gulf of California is the most important fishing region in Mexico (Lluch-Cota et al. 2007), and numerous investigations and explorations have been carried out in it over decades. As a result, in the beginning of the 1970s, the presence of hake was documented in the gulf, with preferential habitat north of Tiburón Island, Sonora, and maximum peak abundances in the winter and spring months (Mathews et al. 1974, Padilla-García 1981, Grande-Vidal 1983, Nevárez-Martínez et al. 2007). Hake distribution in the gulf is associated with the largest catches of the resource (INAPESCA 2020) and the reproductive maximum, which indicates that fishing activities are done on reproductive aggregations (Denton-Castillo 2018).

In general, biological knowledge on the Pacific hake inhabiting the Gulf of California is scarce considering that this resource has the potential for fishing development (DOF 2018) and that climatic and oceanic conditions affect

## INTRODUCCIÓN

La merluza del Pacífico, *Merluccius productus* (Ayles, 1855), se distribuye a lo largo de Canadá y Estados Unidos de América, y en México hasta el golfo de Tehuantepec e incluso el golfo de California (Lloris et al. 2005). Es una especie demersal cuyo hábitat se extiende desde la plataforma continental hasta los 1,000 m de profundidad (FAO 1995). A lo largo de su distribución y considerando su estructura poblacional, se tienen identificadas más de 3 unidades de manejo (*stocks*): la primera, llamada stock costero, se distribuye desde el sur de California hasta el estrecho de la Reina Carlota, Canadá; la segunda, en la parte centro-sur del estrecho de Puget, Estados Unidos de América; y la tercera, en el estrecho de Georgia, Canadá (Iwamoto et al. 2004). En la corriente de California, la merluza presenta movimientos migratorios, hacia el norte para alimentarse y hacia el sur para reproducirse (Bailey et al. 1982). Estos movimientos son asociados a anomalías en la temperatura subsuperficial, la intensidad de la corriente subsuperficial hacia el norte y los cambios en la distribución de sus presas durante los años cálidos y los fríos (Smith et al. 1990, Dorn 1995).

Swartzman (1997) analizó la relación entre los cardúmenes de merluza y la temperatura de fondo en las costas de los Estados Unidos de América, mediante modelos aditivos generalizados y observó un patrón espacial latitudinal, donde las agregaciones en las latitudes norteadas se localizaron a mayor profundidad y alejadas de la costa. En este mismo sentido, Benson et al. (2002) exploraron la relación entre las condiciones del océano y la biomasa de merluzas maduras en aguas canadienses a partir de regresiones lineales y encontraron una relación inversa de la biomasa con las anomalías de surgencias, las cuales explicaron el 77% de la varianza de dichas biomosas. Agostini et al. (2006, 2008), a través de un modelo de regresión geoestadística, encontraron una relación significativa entre los movimientos migratorios de la merluza y la corriente subsuperficial y la profundidad.

El golfo de California alberga 4 masas de agua cuyo patrón de circulación está relacionado al sistema de vientos locales y a las corrientes de marea, lo cual genera surgencias constantes y alta productividad (Torres-Orozco 1993, Alvarez-Borrego 2007). Es por ello que el golfo de California es la región pesquera más importante de México (Lluch-Cota et al. 2007), y en él se han realizado numerosas investigaciones y exploraciones durante décadas. Derivado de estas, a principios de la década de los setenta, se documentó la presencia de la merluza en el golfo, con un hábitat preferencial al norte de la isla Tiburón, Sonora, y con picos máximos de abundancia en los meses de invierno y primavera (Mathews et al. 1974, Padilla-García 1981, Grande-Vidal 1983, Nevárez-Martínez et al. 2007). La distribución de la merluza en el golfo está asociada a las mayores capturas del recurso (INAPESCA 2020), así como al máximo reproductivo, lo cual indica que la actividad pesquera se realiza sobre agregaciones reproductivas (Denton-Castillo 2018).

its distribution and abundance patterns during its ontogeny (Hammel et al. 2015). This is the first study that relates the spatiotemporal patterns of distribution and abundance of *M. productus* with environmental variables in the Gulf of California.

## MATERIALS AND METHODS

### Data collection

Biological material was collected in the central and northern regions of the Gulf of California during exploratory fishing research cruises (Fig. 1), which were carried out in February and April–May 2014, December 2015, October–November 2016, April 2018, and February 2019. In total, 142 fishing sets and 127 CTD sets were made; the CTD sets were made at the end of the fishing set. Cruises were carried out aboard the National Institute of Fisheries and Aquaculture (Mexico) FRV *XI*, which was equipped with a demersal trawl net (33.8-m headrope, 6-inch mesh size in the body and 3.5-inch mesh size in the codend, metal otter boards) that was cast from the stern. The sampling plan included the survey along the coast from 27.5° N to 31.5° N and between 110.0° W and 114.5° W (Fig. 1), which included the coasts of Sonora and the Baja California Peninsula, down to the 500-m isobath. Trawling was done at an mean speed of 3 knots.

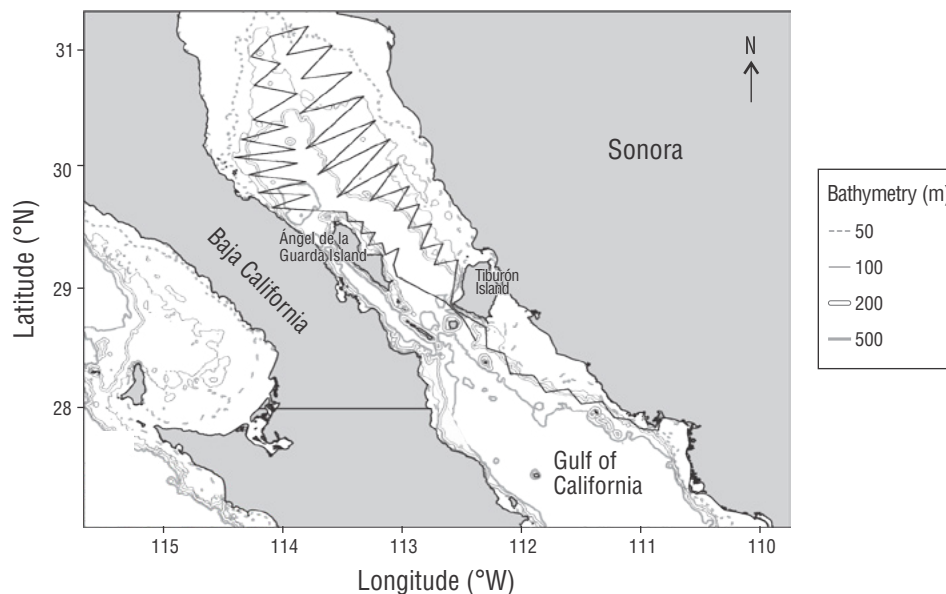
The total catch in each set was placed on the deck of the boat and it was weighed after separating the organisms into taxonomic groups (mollusks, crustaceans, bony fish, and cartilaginous fish). Pacific hake specimen identification was corroborated using the diagnostic characters described by

De manera general, el conocimiento biológico de la merluza del Pacífico que habita en el golfo de California es escaso considerando que es un recurso con potencial de desarrollo pesquero (DOF 2018) y que las condiciones climáticas y oceánicas afectan su patrón de distribución y abundancia durante su ontogenia (Hammel et al. 2015). Este es el primer trabajo que relaciona de manera espaciotemporal el patrón de distribución y abundancia de *M. productus* con las variables ambientales en el golfo de California.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Recolección de datos

El material biológico se recolectó durante cruceros de investigación de pesca exploratoria en las regiones central y norte del golfo de California (Fig. 1), realizados en febrero y abril–mayo de 2014, diciembre de 2015, octubre–noviembre de 2016, abril de 2018 y febrero de 2019. En total se realizaron 142 lances de pesca y 127 lances con CTD; estos últimos se realizaron al término del lance de pesca. Los cruceros se realizaron a bordo del BIP *XI* del Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (México), equipado con una red de arrastre demersal (33.8 m de relinga superior, luz de malla de 6 pulgadas en el cuerpo y 3.5 pulgadas en el copo, tablas de metal) que era largada por la popa. El plan de muestreo incluyó la prospección a lo largo de la costa desde los 27.5° N hasta los 31.5° N y entre 110° W y 114.5° W (Fig. 1), lo que incluyó la costa de Sonora y la de la península de Baja California, hasta la isóbata de los 500 m. Los arrastres se realizaron a una velocidad promedio de 3 nudos.



**Figure 1.** Track of the cruises (thick solid line) carried out from 2014 to 2019 to sample Pacific hake in the Gulf of California.

**Figura 1.** Derrotero de los cruceros (línea sólida gruesa) realizados de 2014 a 2019 para muestrear merluza del Pacífico en el golfo de California.

Robertson and Allen (2002). Each sample consisted of 100 individuals that were measured (total length, TL;  $\pm 1$  cm) with an ichthyometer and weighed (body mass or total weight, henceforth TW for the purpose of the study;  $\pm 1$  g) with a Torrey scale. Each organism was eviscerated from the ventral part to macroscopically identify the sex.

### Size structure and weight

Pacific hake size structure was analyzed by sex after grouping TL into 2-cm intervals and TW into 200-g intervals. Normality was evaluated with a Shapiro–Wilks test, and size differences between sexes were evaluated with the Kolmogorov–Smirnov test.

### Biomass estimates

Biomass was calculated using 2 methodologies. The first used the swept area method (Pierce and Guerra 1994, Hernández-Herrera et al. 1998, Nevárez-Martínez et al. 2000, Rivera-Parra 2001). Biomass (kg) was estimated with the following formula:

$$B_T = \sum_{i=1}^n \left( Y_i \times \frac{A_i}{a_i} \right) , \quad (1)$$

with variance

$$\hat{V}(B_i) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i^2 \times n_i \times s_i^2}{a_i^2} \right) , \quad (2)$$

where  $Y_i$  is the total catch in the  $i$ -th stratum,  $A_i$  is the total area in the  $i$ -th stratum,  $a_i$  is the area swept in the  $i$ -th stratum,  $s_i^2$  is the variance of the catch in the  $i$ -th stratum,  $n_i$  is the number of fishing sets in the  $i$ -th stratum, and  $\hat{V}(B_i)$  is the variance of total biomass.

In order to increase precision in biomass estimation, the stratified random method was applied as a second option (Schaeffer 1987, Nevárez-Martínez et al. 2000) using a bathymetric criterion. The number of strata was defined using Sturges' rule (1926):

$$N_i = 1 + (3.3 \times \log n) , \quad (3)$$

and interval size (IS) was estimated as follows:

$$IS = \frac{pmax - pmin}{N_i} , \quad (4)$$

where  $n$  is the number of stations,  $pmax$  is maximum depth by station, and  $pmin$  is minimum depth by station.

### Spatial distribution

The initial geographic location (start) was recorded for each fishing set. This information was used to determine

La captura total de cada lance se colocó sobre la cubierta del barco y se pesó separando a los organismos en grupos taxonómicos (moluscos, crustáceos, peces óseos y peces cartilagosos). La identificación de los especímenes de merluza del Pacífico se corroboró empleando los caracteres diagnósticos descritos por Robertson y Allen (2002). Cada muestra consistió de 100 ejemplares que fueron medidos (longitud total, LT;  $\pm 1$  cm) con un ictiómetro y pesados (masa corporal o peso total, en adelante PT para el propósito del estudio;  $\pm 1$  g) con una báscula marca Torrey. Cada organismo fue eviscerado por la parte ventral para identificar macroscópicamente el sexo.

### Estructura de talla y peso

La estructura de tallas de la merluza del Pacífico se analizó por sexo agrupando la LT en intervalos de 2 cm y el PT en intervalos de 200 g. Se evaluó la normalidad con una prueba Shapiro-Wilks, y las diferencias en tallas entre sexos se evaluaron con la prueba Kolmogorov-Smirnov.

### Estimaciones de biomasa

La biomasa se calculó empleando 2 metodologías. La primera se realizó a través del método de área barrida (Pierce y Guerra 1994, Hernández-Herrera et al. 1998, Nevárez-Martínez et al. 2000, Rivera-Parra 2001). La estimación de biomasa (kg) se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$B_T = \sum_{i=1}^n \left( Y_i \times \frac{A_i}{a_i} \right) , \quad (1)$$

con varianza

$$\hat{V}(B_i) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i^2 \times n_i \times s_i^2}{a_i^2} \right) , \quad (2)$$

donde  $Y_i$  es la captura total en el  $i$ -ésimo estrato,  $A_i$  es el área total en el  $i$ -ésimo estrato,  $a_i$  es el área barrida en el  $i$ -ésimo estrato,  $s_i^2$  es la varianza de la captura en el  $i$ -ésimo estrato,  $n_i$  es el número de lances de pesca en el  $i$ -ésimo estrato y  $\hat{V}(B_i)$  es la varianza de la biomasa total.

Con la finalidad de incrementar la precisión en la estimación de la biomasa, como segunda opción se aplicó el método aleatorio estratificado (Schaeffer 1987, Nevárez-Martínez et al. 2000) utilizando un criterio batimétrico. El número de estratos se definió utilizando la regla de Sturges (1926):

$$N_i = 1 + (3.3 \times \log n) , \quad (3)$$

mientras que el tamaño del intervalo (TI) se estimó como sigue:

$$TI = \frac{pmax - pmin}{N_i} , \quad (4)$$

the spatial distribution and mean size distribution of Pacific hake. Graphic representations were made with the QGIS 3.6.1 software.

**Selection of environmental variables**

To analyze the abundance and size distribution patterns for Pacific hake in the Gulf of California in relation to the environment, the Swartzman (1997) criterion was considered for variable selection. The coordinates of the initial geographic position of each fishing set (latitude, longitude) were considered spatial variables. Bottom temperature, salinity, and depth, obtained from the CTD sets at the end of the fishing sets, were considered environmental variables. In addition, month and year were used as time variables (Table 1).

**Model elaboration**

To evaluate the environmental characteristics of Pacific hake occurrence areas in the Gulf of California, generalized additive models (GAMs) were built. This methodology has the advantage of modeling nonlinear relationships between response variables and predictor variables by using covariate smoothing functions (*s*) (Kainge et al. 2017). The following is the general equation of a GAM:

$$g(\mu_i) = \mu + \sum_{j=1}^p f_j(X_i) \quad , \quad (5)$$

where *g* is the monotonic link function;  $\mu_i$ , the fitted value;  $X_i$ , the predictor variable; and  $f_j$ , a smoothing function with Gaussian distribution, an identity type link, and a thin plate basis, which has shown good performance when not very large databases are used (Zuur et al. 2009). First, the catch (kg) in each fishing set was used as response variable, for which the natural logarithm was used to stabilize the mean/variance ratio, and as a first approach, the environmental variables (bottom temperature and salinity), spatial variables (latitude, longitude, and depth), and time variables (month and year) were used as predictor variables.

donde *n* es el número de estaciones, *pmax* es la profundidad máxima por estación y *pmin* es la profundidad mínima por estación.

**Distribución espacial**

Se registró la ubicación geográfica inicial (largada) en cada lance de pesca. Dicha información se utilizó para conocer la distribución espacial y la distribución por talla promedio de la merluza del Pacífico. Las representaciones gráficas se realizaron con el software QGIS 3.6.1.

**Selección de variables ambientales**

Para analizar el patrón de distribución de la abundancia y las tallas de la merluza del Pacífico en el golfo de California en relación con el ambiente, se consideró el criterio de Swartzman (1997) para la selección de las variables. Como variables espaciales, se consideraron las coordenadas de la posición geográfica inicial de cada lance de pesca (latitud, longitud). Para las variables ambientales, se consideró la temperatura de fondo, la salinidad y la profundidad, obtenidas a través de los lances de CTD al finalizar los lances de pesca. De manera adicional, se utilizó la temporalidad a través de las variables mes y año (Tabla 1).

**Elaboración de los modelos**

Para evaluar las características ambientales de las áreas de ocurrencia de merluza del Pacífico en el golfo de California se construyeron modelos aditivos generalizados (MAG). Esta metodología tiene la ventaja de modelar relaciones no lineales entre las variables de respuesta y las variables predictoras mediante el uso de funciones de suavizado de las covariantes (*s*) (Kainge et al. 2017). La fórmula general de un MAG es la siguiente:

$$g(\mu_i) = \mu + \sum_{j=1}^p f_j(X_i) \quad , \quad (5)$$

**Table 1.** Explanatory variables that were explored for predicting hake abundance in the Gulf of California.  
**Tabla 1.** Variables explicativas exploradas para predecir la abundancia de la merluza en el golfo de California.

Variable	Unit	Description
Latitude, longitude	Degrees and decimal degrees	Geographic position at the start of a fishing set.
Month	Days	Month in which the survey took place; abundance seasonality assessment.
Year	Months	Year in which the survey took place.
Bottom temperature	Degrees Celsius	Bottom temperature obtained from each CTD set.
Salinity		Bottom salinity obtained from each CTD set.
Depth	Meters	Bottom depth obtained from each CTD set.

A second GAM was then created, where the response variable was mean size in each fishing set and the predictor variables were the same variables used in the previous approach.

### Selection of the best model

GAMs were constructed using a stepwise approach, that is, adding one variable at a time to evaluate the degree of contribution of each covariate. For this, the likelihood ratio test and the Akaike information criterion (AIC) were used. Variables that resulted in a significant contribution ( $P < 0.05$ ) and caused an AIC decrease of more than 2 units were retained in the final model (Burnham and Anderson 2002). The spatial and temporal distribution of the model residuals were explored visually with an autocorrelation function. Because using variables that are highly correlated with each other can generate errors in the modeling process, a concavity test was performed in each step of the model construction process. Concavity can be interpreted as a nonlinear extension of multicollinearity (Wood 2006). The entire modeling process was done using the functions in the *mgcv* package (Wood 2006) of the R environment (R Core-Team 2018).

## RESULTS

### Size structure and weight

Of the 142 stations, 126 were positive for Pacific hake presence (88.7%) and 16 were negative (11.3%). In total, 2,795 organisms were captured, 1,254 of which were males (44.4%), 1,396 females (49.9%), and 145 indeterminate (5.2%). The recorded length interval ranged from a minimum size of 12.0 cm TL, for a male captured during the October–November 2016 cruise, to a maximum size of 105.0 cm TL, for a female captured in the February 2019 survey, with a mean size of 42.0 cm TL. In females, size fluctuated between 16.0 and 105.0 cm TL, with a mean size of 44.6 cm TL; the minimum length prevailed in February 2014, December 2015, and October–November 2016, and the maximum size in February 2019. In males, lengths ranged from 12.0 to 79.0 cm TL, with a mean size of 34.8 cm TL; the minimum length was found in December 2015, and the maximum in February 2014. Significant differences were observed only in the February and December cruises (Kolmogorov–Smirnov:  $P < 0.05$ ). Total weight ranged from 9.8 to 7,500.0 g; the lightest weight corresponded to a male captured in December 2015, and the heaviest to a female captured in February 2014. Total weight in females ranged from 21.0 to 7,500.0 g; in males, from 9.8 to 4,200.0 g. The heaviest females and males were observed during the month of February in 2014 and 2019, respectively (Table 2). In general, males reached smaller lengths and weights compared to females.

donde  $g$  es la función monótonica de enlace,  $\mu_i$  es el valor ajustado,  $X_i$  es la variable predictora y  $f_j$  es una función de suavizado con una distribución gaussiana, un enlace (*link*) tipo identidad (*identity*) y una base tipo placa delgada (*thin plate*), la cual ha demostrado buen desempeño cuando se utilizan bases de datos no muy grandes (Zuur et al. 2009). Primero, se utilizó como variable de respuesta la captura (kg) de cada lance de pesca, a la cual se le aplicó el logaritmo natural para estabilizar la razón media/varianza, y como primera aproximación, se utilizaron las variables ambientales (temperatura de fondo y salinidad), las variables espaciales (latitud, longitud y profundidad) y las variables temporales (mes y año) como variables predictoras. Luego, se generó un segundo MAG, donde la variable de respuesta fue la talla promedio en cada lance de pesca y las variables predictoras fueron las mismas variables de la aproximación anterior.

### Selección del mejor modelo

La construcción de los MAG se realizó con el enfoque paso a paso (*stepwise*), es decir, añadiendo una variable a la vez para evaluar el grado de aporte de cada una de las covariables. Para esto, se utilizó la prueba del cociente de verosimilitud (*likelihood ratio test*) y el criterio de información de Akaike (CIA). Las variables que resultaron en un aporte significativo ( $P < 0.05$ ) y causaron un decremento del CIA de más de 2 unidades fueron retenidas en el modelo final (Burnham y Anderson 2002). Se exploró de manera visual la distribución espacial y la distribución temporal de los residuales del modelo con una función de autocorrelación. Debido a que al utilizar variables que estén altamente correlacionadas entre sí se puede generar errores en el proceso de modelación, se aplicó una prueba de concavidad en cada paso de la construcción del modelo. La concavidad puede interpretarse como una extensión no lineal de la multicolinealidad (Wood 2006). Todo el proceso de modelación se efectuó utilizando las funciones del paquete *mgcv* (Wood 2006) del ambiente R (R Core-Team 2018).

## RESULTADOS

### Estructura de tallas y peso

De las 142 estaciones realizadas, 126 resultaron positivas a la presencia de la merluza del Pacífico (88.7%) y 16 fueron negativas (11.3%). En total, se capturaron 2,795 organismos, de los cuales 1,254 fueron machos (44.4%), 1,396 hembras (49.9%) y 145 indeterminados (5.2%). El intervalo de longitudes registrado osciló desde una talla mínima de 12.0 cm LT, para un macho capturado durante el crucero de octubre–noviembre de 2016, hasta una talla máxima de 105.0 cm LT, para una hembra capturada en la prospección de febrero de 2019, con una talla promedio de 42.0 cm LT. En las hembras, la talla fluctuó entre 16.0

## Biomass estimates

According to biomass estimates obtained with the swept area method, the lowest biomass corresponded to the October 2016 cruise ( $6,887.40 \pm 127.30$  t), and the highest to the February 2019 cruise ( $64,823.80 \pm 1,287.00$  t). The lowest coefficient of variation (CV) was obtained in the April 2014 cruise (CV = 2.5), and the highest in the February 2014 cruise (CV = 7.2). Using the stratified method, the highest biomasses occurred between 200 and 300 m depth, except for the October–November 2016 cruise, when the highest biomass occurred at depths between 350 and 400 m (Table 3). The December 2015 and April 2018 cruises were not taken into account because the surveyed area was less than 50%.

## Spatial distribution

The stations with the lowest catches were those close to the coast of Sonora, where the predominant mean sizes of Pacific hake ranged from 25.0 to 50.0 cm TL (Fig. 2). The stations with the highest catches were located near the coast of the Baja California Peninsula, to the north of Ángel de la Guarda Island, and to the north of Tiburón Island (Fig. 2), where the organisms with the smallest (<25.0 cm TL) and largest (>50.0 cm TL) mean sizes were found (Fig. 3).

## Statistical modeling

The covariates used in the GAM showed concurrency values of less than 0.3, that is, little collinearity between the variables used. Visual exploration of the spatial distribution of model residuals did not show a clear pattern (Fig. S1). Regarding the temporal analysis, the autocorrelation function showed that there was no correlation with time; that is, data

and 105.0 cm LT, con una talla promedio de 44.6 cm LT; la longitud mínima prevaleció en febrero de 2014, diciembre de 2015 y octubre–noviembre de 2016, y la talla máxima, en febrero de 2019. En los machos, la longitud varió de 12.0 a 79.0 cm LT, con una talla promedio de 34.8 cm LT; la longitud mínima se encontró en diciembre de 2015, y la máxima, en febrero de 2014. Solo en los cruceros de febrero y diciembre existió diferencia significativa (Kolmogorov-Smirnov:  $P < 0.05$ ). El peso total varió de 9.8 a 7,500.0 g; el menor peso correspondió a un macho capturado en diciembre de 2015, y el máximo, a una hembra capturada en febrero de 2014. El peso total en las hembras varió de 21.0 a 7,500.0 g, y en los machos, de 9.8 a 4,200.0 g. Los organismos de mayor peso, tanto para las hembras como para los machos, se observaron durante el mes de febrero de 2014 y 2019, respectivamente (Tabla 2). De manera general, se observó que los machos alcanzaron longitudes y pesos menores, a diferencia de las hembras.

## Estimación de biomasa

A partir de las estimaciones de biomasa por el método de área barrida, la menor biomasa se estimó para el crucero de octubre de 2016 ( $6,887.40 \pm 127.30$  t), y la mayor, para el de febrero de 2019 ( $64,823.80 \pm 1,287.00$  t). El menor coeficiente de variación (CV) se obtuvo en el crucero de abril de 2014 (CV = 2.5), y el mayor, en el crucero de febrero de 2014 (CV = 7.2). A partir del método estratificado, se encontró que las mayores biomásas ocurrieron entre los 200 y 300 m de profundidad, a excepción del crucero octubre–noviembre de 2016, cuando la mayor biomasa se encontró a profundidades de entre 350 y 400 m (Tabla 3). Los cruceros de diciembre de 2015 y abril de 2018 no fueron considerados, ya que el área prospectada fue menor que el 50%.

**Table 2.** Numerical summary of weight (body mass or total weight; TW) and size (total length; TL) of hake individuals caught during scientific cruises from 2014 to 2019. Min., minimum; Max., maximum.

**Tabla 2.** Resumen numérico del peso (masa corporal o peso total; TW, por sus siglas en inglés) y la talla (longitud total; TL, por sus siglas en inglés) de los individuos de merluza capturados durante los cruceros científicos de 2014 a 2019. Min., mínimo; Max., máximo.

	February 2014				April–May 2014				December 2015			
	Males		Females		Males		Females		Males		Females	
	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)
Min.	16.1	24.0	16.0	23.0	16.4	25.0	16.5	25.0	12.5	9.8	16.0	21.1
Mean	45.0	841.9	50.9	1,379.3	39.8	501.8	49.9	789.4	22.2	81.2	42.0	996.8
Max.	85.5	4,200.0	99.5	7,500.0	73.0	1,920.0	93.2	5,100.0	68.1	1,878.5	96.0	5,446.3
	October–November 2016				April 2018				February 2019			
	Males		Females		Males		Females		Males		Females	
	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)	TL (cm)	TW (g)
Min.	17.1	25.8	16.0	21.2	23.0	75.0	23.1	75.0	17.8	29.3	18.3	32.0
Mean	26.1	106.3	30.4	173.8	32.6	253.3	41.7	516.6	43.1	614.3	52.5	1,219.0
Max.	41.4	402.1	48.4	653.4	47.0	750.0	59.1	1,400.0	75.5	2,586.4	105.0	7,190.4

**Table 3.** Biomass estimates by cruise and standard error (SE) for hake in the Gulf of California. CV, coefficient of variation.**Tabla 3.** Estimaciones de biomasa por crucero y error estándar (SE) para la merluza en el golfo de California. CV, coeficiente de variación.

Year	Cruise	Estimated biomass (t)	SE	Stratification (t)	SE	CV
2014	February	47,642.60	1,448.00	48,131.11	1,080.60	7.20
2014	April–May	41,431.99	1,393.00	40,019.65	139.05	2.50
2016	October	6,887.40	127.30	6,917.80	50.60	3.10
2019	February	64,823.80	1,287.00	68,260.37	547.38	3.65

were independent of each other (Fig. S2). Bottom temperature (13–14 °C optimal range) was the most important environmental variable for the abundance of this resource, since it described 20.6% of total variability, followed by the time variable (month = February), which described 15.1%, and the spatial variable (longitude = 13–14° W), which described 11.5%. The GAM described 38.8% of total variability (Fig. 4, Table 4). Regarding the effect of environmental conditions on the size distribution of Pacific hake in the Gulf of California, no single covariate described this relationship significantly, but the interaction of bottom temperature and month explained 51.1% of the variation and the interaction of length and depth explained 21.5% of the variation (Fig. 5, Table 4).

## DISCUSSION

### Size structure and weight

Located in the northwestern Pacific coast of Mexico, the Gulf of California is a highly productive area that sustains 2 of the most important fisheries in Mexico, the Shrimp fishery and the Small Pelagics fishery (Lluch-Cota et al. 2007). However, in recent years, Pacific hake has gained importance because of its catch volumes and its biological characteristics, such as attainable sizes. In the present study, we found organisms with maximum lengths of 105.0 cm TL, which is close to the maximum size of 112.0 cm TL reported by Nevárez-Martínez et al. (2007) for the Gulf of California but different from the maximum size of 27.5 cm standard length (32.5 cm TL) reported by Salinas-Mayoral (2018) for the western coast of the Baja California Peninsula.

For the coasts of the United States of America, Saunders and McFarlane (1997), Dark (1974), and Best (1962) reported maximum mean sizes of 46.3, 61.8, and 80.0 cm TL, respectively. Regarding maximum lengths, when comparing size by sex for each cruise, we found that females predominated at sizes >73.0 cm TL, whereas males reached smaller sizes. Our results suggest that the Pacific hake inhabiting the Gulf of California exhibits sexual dimorphism. This characteristic was reported by Best (1962) for *M. productus* and for *Merluccius hubbsi*, with asymptotic sizes of 90.0 cm for

### Distribución espacial

Las estaciones con menores capturas fueron las cercanas a la costa de Sonora, donde las tallas promedio de merluza del Pacífico predominantes fluctuaron de 25.0 a 50.0 cm LT (Fig. 2). Las estaciones con mayores capturas fueron aquellas cerca de la costa de la península de Baja California, al norte de la isla Ángel de la Guarda y al norte de la isla Tiburón (Fig. 2), área donde se encontraron los organismos de menor (<25.0 cm LT) y mayor (>50.0 cm LT) talla promedio (Fig. 3).

### Modelación estadística

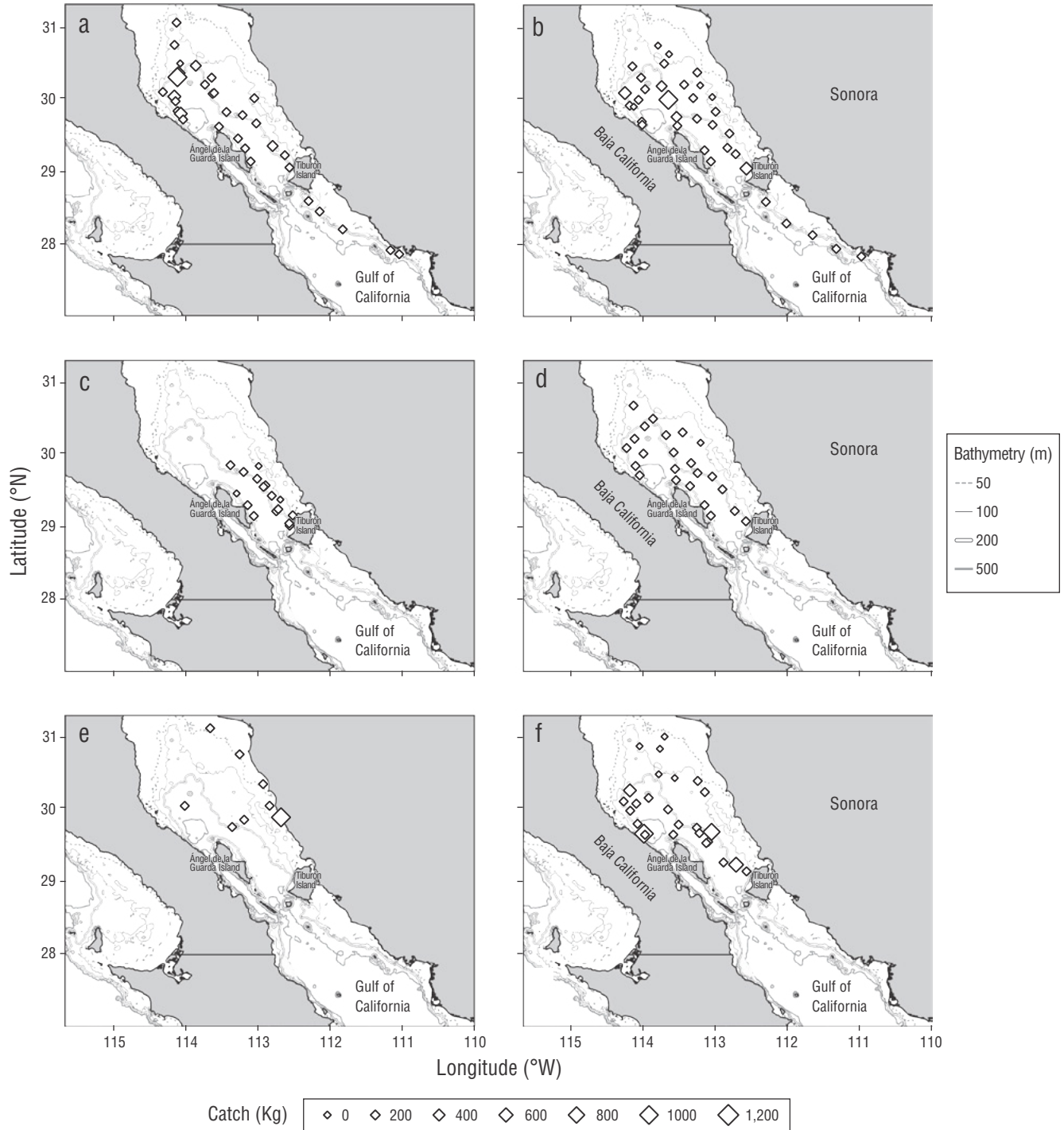
Las covariables utilizadas en el MAG presentaron una concurvatura menor que 0.3, es decir, poca colinealidad entre las variables utilizadas. La exploración visual de la distribución espacial de los residuales del modelo no mostró un patrón claro (Fig. S1). Con lo que respecta al análisis temporal, la función de autocorrelación mostró que no existió correlación con el tiempo; es decir, no depende un dato de otro (Fig. S2). La temperatura de fondo (intervalo óptimo de 13–14 °C) fue la variable ambiental más importante para la abundancia de este recurso, ya que describió el 20.6% de la variabilidad total, seguida de la variable temporal (mes = febrero), que describió el 15.1%, y la variable espacial (longitud = 13–14° W), que describió el 11.5%. El MAG describió el 38.8% de la variabilidad total (Fig. 4, Tabla 4). En cuanto al efecto que tienen las condiciones ambientales en la distribución de tallas de la merluza del Pacífico en el golfo de California, se encontró que ninguna covariable por sí sola describió significativamente dicha relación, pero se observó que la interacción de la temperatura de fondo con la variable mes explicó el 51.1% de la variación y la interacción de la longitud con la profundidad explicó el 21.5% de la variación (Fig. 5, Tabla 4).

## DISCUSIÓN

### Estructura de tallas y peso

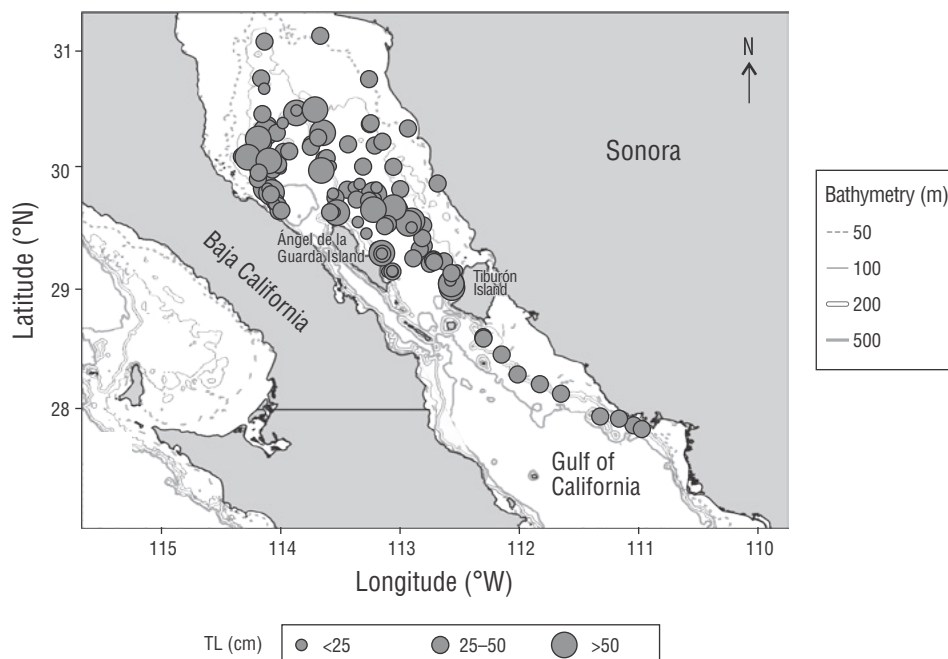
En la costa noroccidental mexicana del Pacífico se localiza el golfo de California, un área altamente productiva que sustenta 2 de las pesquerías más importantes en México, la de





**Figure 2.** Catch distribution during research cruises carried out in February 2014 (a), April–May 2014 (b), December 2015 (c), October 2016 (d), April 2018 (e), and February 2019 (f).

**Figura 2.** Distribución de las capturas durante los cruceros de investigación realizados en febrero de 2014 (a), abril-mayo de 2014 (b), diciembre de 2015 (c), octubre de 2016 (d), abril de 2018 (e) y febrero de 2019 (f).



**Figure 3.** Mean size (total length, TL) distribution during the research cruises carried out from 2014 to 2019.

**Figura 3.** Distribución de la talla promedio (longitud total, TL) durante los cruceros de investigación realizados de 2014 a 2019.

females and 60.0 cm for males (Lorenzo and Defeo 2015). In addition, visually, females were more robust (round) compared to males, and those measuring  $>73.0$  cm TL weighed more than males.

### Biomass estimates

Pacific hake biomass in the Gulf of California has been estimated from a series of fishery survey cruises since the 1970s and 1980s. Mathews et al. (1974) and Grande-Vidal (1983) reported volumes between 4,000.0 and 28,000.0 t and between 22,000.0 and 35,600.0 t, respectively. These estimates were lower than those obtained in this work, which fluctuated between 6,887.1 and 64,823.8 t, but were similar to those reported by Nevárez-Martínez et al. (2007), except for the estimate for April 2006, which was 145,000.0 t; this last biomass maximum was the result of Nevárez-Martínez et al. (2007) making 20 more fishing sets. Given the above, the Pacific hake population in the Gulf of California has notably been exploited in a sustainable way, and it has been classified as a resource with development potential (DOF 2018, INAPESCA 2020).

Regarding the centers of abundance of Pacific hake in this study, the concentration of organisms was higher at the stations of 3 cruises (Fig. 2a, b, f) where bottom temperature was 13.2 to 14.1 °C and depth was 176–216 m. Mathews et al. (1974) and Nevárez-Martínez et al. (2007) reported the same pattern, with the largest volumes at similar depths (184–366 m and 138–275 m, respectively). In the October 2016 cruise the centers of abundance occurred at stations with a bottom

Camarón y la de Pelágicos menores (Lluch-Cota et al. 2007). Sin embargo, en los últimos años, la merluza del Pacífico ha cobrado importancia por sus volúmenes de captura y sus características biológicas, como las tallas que alcanza. En el presente estudio encontramos organismos con longitudes máximas de 105.0 cm LT, talla máxima cercana a la reportada por Nevárez-Martínez et al. (2007) de 112.0 cm LT para el golfo de California, pero diferente a la reportada por Salinas-Mayoral (2018) de 27.5 cm de longitud patrón (32.5 cm LT) para la costa occidental de la península de Baja California.

Para las costas de Estados Unidos de América, Saunders y McFarlane (1997), Dark (1974) y Best (1962) reportaron tallas promedio máximas de 46.3, 61.8 y 80.0 cm LT, respectivamente. En lo referente a las longitudes máximas, al comparar en cada crucero las tallas por sexo, encontramos que las hembras predominaron a tallas  $>73.0$  cm LT, mientras que los machos alcanzaron tallas menores. Nuestros resultados sugieren que la merluza del Pacífico que habita en el golfo de California presenta dimorfismo sexual. Esta característica fue reportada por Best (1962) para *M. productus* y para *Merluccius hubbsi*, con tallas asintóticas para hembras de 90.0 cm y para machos de 60.0 cm (Lorenzo y Defeo 2015). Además, de manera visual, las hembras fueron más robustas (redondas) en comparación con los machos, y aquellas con tallas  $>73.0$  cm LT pesaron más que los machos.

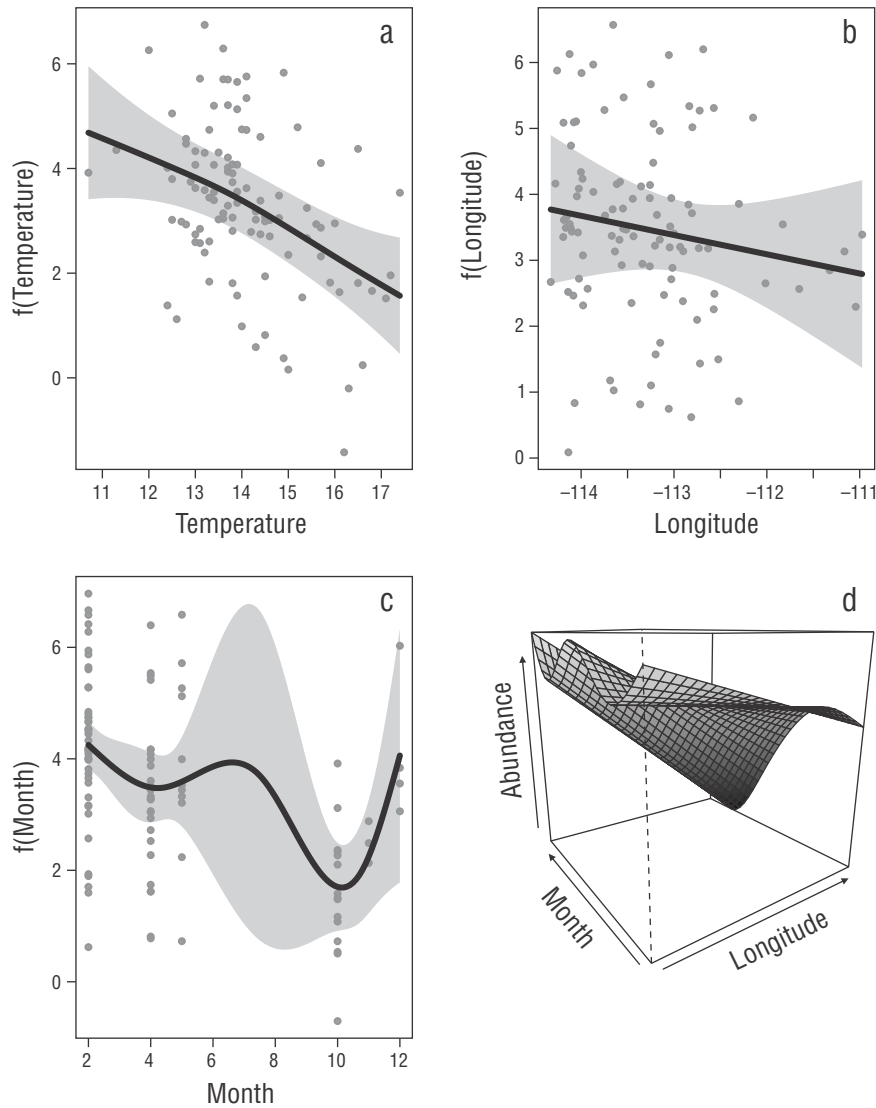
### Estimación de biomásas

La biomasa de la merluza del Pacífico del golfo de California ha sido estimada a partir de una serie de cruceros

temperature of 12.8 °C and greater depth (350–462 m). Something similar was reported by Nevárez-Martínez et al. (2007), who found that the highest biomass occurred at 413 m depth in November 2006. In this respect, Acevedo-Cervantes et al. (2009) reported the presence of Pacific hake at depths of 360–450 m in September 2004.

During the October–November 2016 cruise, the centers of abundance shifted to depths greater than 300 m. Acevedo-Cervantes et al. (2009) mentioned that in the Gulf of California there are 2 fish communities, the first formed by coastal species and the second by typical deep-water species, with the latter being characterized as not very diverse

de prospección pesquera desde las décadas de los setenta y los ochenta. Mathews et al. (1974) y Grande-Vidal (1983) reportaron volúmenes de entre 4,000.0 y 28,000.0 t y entre 22,000.0 y 35,600.0 t, respectivamente. Estas estimaciones fueron menores que las obtenidas en este trabajo, las cuales fluctuaron entre 6,887.1 y 64,823.8 t, pero fueron similares a las reportadas por Nevárez-Martínez et al. (2007), a excepción de la estimación para abril de 2006, que fue de 145,000.0 t; este último máximo de biomasa se debió a que Nevárez-Martínez et al. (2007) realizaron 20 lances de pesca más. Por lo anterior, es notable que la población de merluza del Pacífico en el golfo de California ha sido explotada de



**Figure 4.** Generalized additive model response plots showing the effect of the significant functions on describing the spatial, environmental, and temporal distributions of hake in the Gulf of California. Temperature (a), longitude (b), month (c), and month/longitude interaction (d). The y-axis represents the effect of the covariate with respect to abundance. The gray area represents the 95% confidence intervals.

**Figura 4.** Gráficas de respuesta del modelo aditivo generalizado que muestran el efecto de las funciones significativas para describir las distribuciones espacial, ambiental y temporal de la merluza en el golfo de California. Temperatura (a), longitud (b), mes (c) e interacción mes/longitud (d). El eje y representa el efecto de la covariante con respecto a la abundancia. El área gris representa los intervalos de confianza al 95%.

**Table 4.** Generalized additive models for Pacific hake in the Gulf of California. AIC, Akaike information criterion.  
**Tabla 4.** Modelos aditivos generalizados para la merluza del Pacífico en el golfo de California. AIC, criterio de información de Akaike.

Abundance model without interaction	Explained deviance (%)	AIC	<i>P</i>
+s(Temperature)	20.60	402.20	<0.01
+s(Salinity)	2.98	416.80	0.08
+s(Latitude)	9.57	413.20	0.06
+s(Longitude)	11.50	408.20	<0.01
+s(Depth)	7.39	414.60	0.10
+s(Month)	18.80	404.00	<0.01
+s(Year)	0.21	419.69	0.64
Abundance model with interactions	Explained deviance (%)	AIC	<i>P</i>
+s(Temperature)	20.60	402.20	<0.01
+s(Month)	18.80	403.00	<0.01
+s(Longitude)	11.50	408.20	<0.01
+te(Longitude, month)	32.50	387.90	<0.01
Total	39.30		
Size model without interactions	Explained deviance (%)	AIC	<i>P</i>
+s(Temperature)	0.11	869.21	0.73
+s(Salinity)	4.63	864.26	0.02
+s(Latitude)	3.39	865.64	0.05
+s(Longitude)	1.66	867.54	0.18
+s(Depth)	3.53	865.49	0.05
+s(Month)	34.90	823.46	<0.01
+s(Year)	0.35	868.47	0.80
Size model with interactions	Explained deviance (%)	AIC	<i>P</i>
+s(Longitude, depth)	21.50	863.80	<0.01
+te(Temperature, month)	51.10	814.70	<0.01
Total	61.70		

but very abundant. These authors considered the Pacific hake as part of the second community because they found it at depths greater than 360 m, which is consistent with the vertical distribution of abundances found in the surveys analyzed from the October–November 2016 cruise.

### Spatial distribution

The north–central region of the Gulf of California has different topographic and bathymetric characteristics that are suitable for the distribution of Pacific hake. Tiburón Basin is located in the central region, between Ángel de la Guarda Island and Tiburón Island, and Delfín Basin is located to the north of Ángel de la Guarda Island; both basins have nearly flat seafloors and depths of 500 and 900 m, respectively (Arrellano-Peralta and Medrano-González 2013). In addition, the north–central region of the Gulf of California

manera sostenible, y ha sido catalogada como un recurso con potencial de desarrollo (DOF 2018, INAPESCA 2020).

En lo que respecta a los centros de abundancia de la merluza del Pacífico en este estudio, la concentración de organismos fue mayor en estaciones de 3 cruceros (Fig. 2a, b, f) donde la temperatura de fondo fue de 13.2 a 14.1 °C, y la profundidad, de 176–216 m. Este mismo patrón fue reportado por Mathews et al. (1974) y Nevárez-Martínez et al. (2007), quienes encontraron los mayores volúmenes a profundidades similares (184–366 m y 138–275 m, respectivamente). En el crucero de octubre de 2016, los centros de abundancia ocurrieron en estaciones con temperatura de fondo de 12.8 °C y mayor profundidad (350–462 m). Algo similar fue reportado por Nevárez-Martínez et al. (2007), quienes encontraron que la mayor biomasa ocurrió a profundidades de 413 m en noviembre de 2006. En este mismo sentido, Acevedo-Cervantes et al. (2009) reportaron la presencia de la merluza

is characterized by high productivity, with enrichment in the water column originating from the intense mixing of water masses due to strong tidal currents (Lluch-Cota and Arias-Aréchiga 2000).

In this study we found that the range of Pacific hake is wide, from 50 to 500 m depth. However, the concentration of organisms was higher in areas with depths between 200 and 300 m and bottom temperatures between 13 and 14 °C (Fig. 4a). These depth and temperature ranges are optimal for locating the centers of abundance of this species in the north-central region of the Gulf of California, and this is consistent with the depth at which the hake fleet operates in the gulf (110–330 m) (EDF 2017). Another variable worth considering is seasonality, as the centers of abundance were recorded at the beginning of the year (Fig. 4c), and this is consistent with peak catch dates for the resource (INAPESCA 2020).

### Statistical modeling

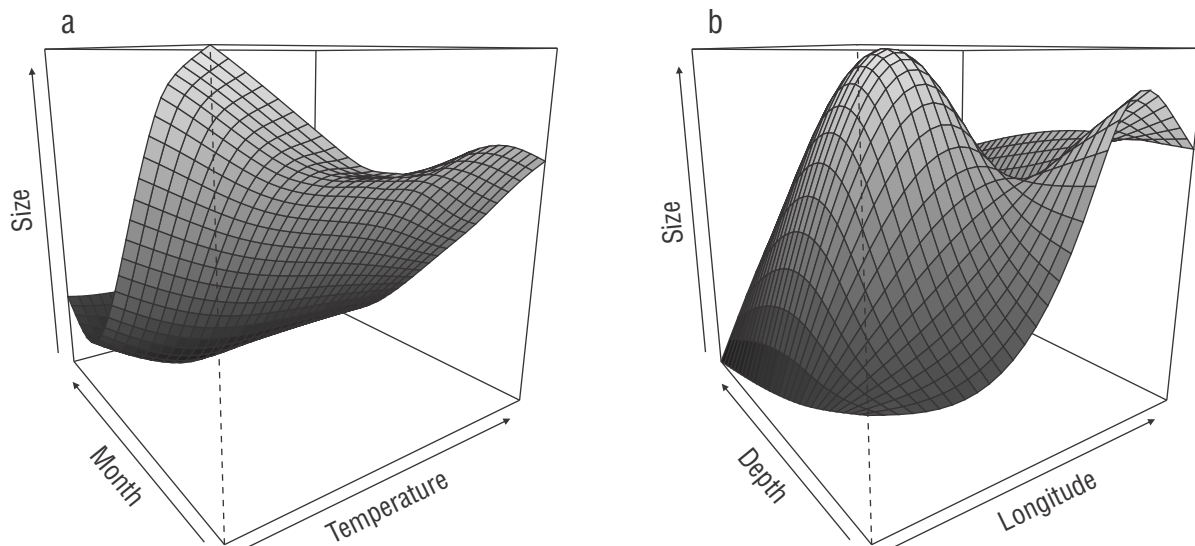
GAMs evaluate nonlinear relationships and have the ability to relate data using smoothing functions (Wood 2006). In this sense, Swartzman (1997) used a GAM to evaluate the effect of the environment on the biomass of Pacific hake schools in the north-central region of the Pacific coast of the United States of America; in that study, Swartzman (1997) found that schools were larger and had higher biomasses in the north than in the south and that the maximum biomass occurred at temperature of 7 °C. Our model indicated that bottom temperature (optimal range 13–14 °C), time (February), and longitude (113–114 °W) were, in that order, the most important

del Pacífico a profundidades de 360 a 450 m en septiembre de 2004.

Durante el crucero de octubre-noviembre de 2016, los centros de abundancia se desplazaron a profundidades mayores que 300 m. Acevedo-Cervantes et al. (2009) mencionaron que en el golfo de California existen 2 comunidades de peces, la primera formada por especies costeras y la segunda por especies típicas de aguas profundas, y esta última se caracteriza por ser poco diversa pero muy abundante. Estos autores consideraron a la merluza del Pacífico como parte de la segunda comunidad, ya que la encontraron a profundidades mayores que 360 m, lo cual coincide con la distribución vertical de las abundancias encontradas en las prospecciones analizadas en el crucero de octubre-noviembre de 2016.

### Distribución espacial

La región centro-norte del golfo de California presenta diferentes características topográficas y batimétricas apropiadas para la distribución de la merluza del Pacífico. En la región central se ubica la cuenca Tiburón, entre la isla Ángel de la Guarda y la isla Tiburón, y la cuenca Delfín se ubica al norte de la isla Ángel de la Guarda; ambas cuencas presentan un fondo casi plano y profundidades de 500 y 900 m, respectivamente (Arrellano-Peralta y Medrano-González 2013). Además, la región centro-norte del golfo de California se caracteriza por ser altamente productiva, y el enriquecimiento en la columna de agua se origina por el proceso de mezcla intensa de masas de agua debido a las fuertes corrientes de marea (Lluch-Cota y Arias-Aréchiga 2000).



**Figure 5.** Partial effect of the month–temperature (a) and depth–length (b) interactions in the generalized additive model that used the mean sizes of hake in the Gulf of California.

**Figura 5.** Efecto parcial de las interacciones mes/temperatura (a) y profundidad/longitud (b) en el modelo aditivo generalizado que utilizó las tallas promedio de la merluza en el golfo de California.

variables explaining the centers of abundance of Pacific hake in the Gulf of California. Ressler et al. (2007) indicated that temperature determines Pacific hake population dynamics, with 2 possible effects: current advection and active swimming in response to environmental signals. Agostini et al. (2006) reported that abundance distribution of adult Pacific hake in the California Current is more closely related to the subsurface current flow than to temperature range.

Some studies have associated the environment with biological aspects of resources. For example, Kainge et al. (2017) associated the environment (temperature, oxygen, depth, and geographic position) with the size structure of *Merluccius capensis* and *Merluccius paradoxus* in Namibia, Africa, and found that small-sized organisms inhabited shallow areas, unlike large individuals. In this sense, the present study showed that large specimens of Pacific hake in the Gulf of California showed affinity for low temperatures (13.2–14.0 °C).

In general, in the Gulf of California, *M. productus* exhibits sexual dimorphism, and females reach greater sizes (105.0 cm TL) and weights (7,500.0 g) than males. The highest abundances were recorded during the February cruises (47,642.0 and 64,823.8 t) and the center of abundance was located near the coast of the Baja California Peninsula, at depths between 200 and 300 m and temperatures between 13.2 and 14.0 °C. Since the most significant environmental variable that affected hake distribution was bottom temperature, it is important to continue monitoring this resource to detect changes in its distribution associated with changes in the environment. This study is the first to report on the relationship between distribution and abundance and the habitat of Pacific hake in the Gulf of California.

## ACKNOWLEDGMENTS

EAT thanks the National Council for Science and Technology (CONACYT, for its acronym in Spanish, Mexico) for the scholarship granted for postgraduate studies. We thank the National Institute of Fisheries and Aquaculture (Mexico) for financing the *Merluza* project, which provided the database used here. EME thanks CONACYT for support granted through the “cátedras” program (project no. 2137). LASG is grateful to the UAS-PTC-131 project (DSA 511-6/17-7679) for support with infrastructure and equipment. The authors appreciate the opinions of 3 anonymous reviewers, which helped improve the quality of our manuscript.

English translation by Claudia Michel-Villalobos.

## REFERENCIAS

Acevedo-Cervantes A, López-Martínez J, Herrera-Valdivia E, Rodríguez-Romero J. 2009. Análisis de la abundancia, dominancia y diversidad de la comunidad de peces demersales de profundidad de 90 a 540 metros en el Golfo de California, México = Abundance, dominance and diversity analysis of the demersal fish community analysis at 90 to 540 meters of depth in the Gulf of California, Mexico. *Interciencia*. 34(9):660–665.

En este estudio encontramos que la distribución de la merluza del Pacífico es amplia, desde 50 hasta 500 m de profundidad. Sin embargo, la concentración de los organismos fue mayor en áreas con profundidades de entre 200 y 300 m y temperaturas de fondo de entre 13 y 14 °C (Fig. 4a). Estos intervalos de profundidad y temperatura son los óptimos para localizar los centros de abundancia de esta especie en la región centro-norte del golfo de California, lo cual concuerda con la profundidad (110–330 m) a la que opera la flota merluquera en el golfo (EDF 2017). Otra variable a considerar es la temporalidad, ya que los centros de abundancia se registraron a inicios de año (Fig. 4c), lo cual coincide con las fechas de las mayores capturas del recurso (INAPESCA 2020).

## Modelación estadística

Los MAG evalúan relaciones no lineales y tienen la capacidad de relacionar los datos mediante funciones de suavizado (Wood 2006). En este sentido, Swartzman (1997) utilizó un MAG para evaluar el efecto del ambiente sobre la biomasa de los cardúmenes de merluza del Pacífico en la región centro-norte de la costa del Pacífico de Estados Unidos de América; en su estudio, encontraron cardúmenes más grandes y con mayor biomasa en el norte que en el sur, y el máximo de biomasa lo encontraron a temperaturas de 7 °C. Nuestro modelo indicó que la temperatura de fondo (intervalo óptimo 13–14 °C), la temporalidad (febrero) y la longitud (113–114 °W) fueron, en ese orden, las variables más importantes para explicar los centros de abundancia de merluza del Pacífico en el golfo de California. Ressler et al. (2007) mencionaron que la temperatura determina la dinámica poblacional de la merluza del Pacífico, con 2 posibles efectos, la advección de corriente y el nado activo en respuesta a señales ambientales. Agostini et al. (2006) reportaron que la distribución de la abundancia de merluzas del Pacífico adultas en la corriente de California tiene mayor relación con el flujo de la corriente subsuperficial que con un intervalo de temperatura.

Existen trabajos que han relacionado el ambiente con aspectos biológicos del recurso. Por ejemplo, Kainge et al. (2017) relacionaron el ambiente (temperatura, oxígeno, profundidad y posición geográfica) con la estructura de tallas de *Merluccius capensis* y *Merluccius paradoxus* en Namibia, África, y encontraron que los organismos de tallas pequeñas habitaron zonas someras, a diferencia de los individuos grandes. En este sentido, el presente estudio mostró que los especímenes grandes de merluza del Pacífico en el golfo de California presentaron afinidad a temperaturas bajas (13.2–14.0 °C).

De manera general, en el golfo de California, *M. productus* presenta dimorfismo sexual, y las hembras alcanzan tallas (105.0 cm LT) y pesos (7,500.0 g) mayores que los machos. Las mayores abundancias se registraron durante los cruceros de febrero (47,642.0 y 64,823.8 t) y el centro de abundancia se localizó cerca de la costa de la península de Baja California, a profundidades de entre los 200 y 300 m y temperaturas de

- Agostini VN, Francis RC, Hollowed AB, Pierce SD, Wilson C, Hendrix AN. 2006. The relationship between Pacific hake (*Merluccius productus*) distribution and poleward subsurface in the California Current System. *Can J Fish Aquat Sci.* 63(12):2648–2659.  
<https://doi.org/10.1139/F06-139>
- Agostini VN, Hendrix AN, Hollowed AB, Wilson CD, Pierce SD, Francis RC. 2008. Climate–Ocean variability and Pacific hake: A geostatistical modeling approach. *J Mar Sys.* 71(3–4):237–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.01.010>
- Alvarez-Borrego S. 2007. Oceanografía de la región de las Grandes Islas [Oceanography of the Grandes Islas región]. In: Danemann GD, Ezcurra E (eds.), Bahía de los Ángeles: Recursos naturales y comunidad. Línea Base 2007 [Bahía de los Ángeles Natural Resources and Community Baseline 2007]. San Diego (CA): Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Pronatura Noroeste, San Diego Natural History Museum. p. 45–65.
- Arrellano-Peralta VA, Medrano-González L. 2013. Mamíferos marinos en el golfo de California. Macroecología, impacto humano [Marine mammals in the Gulf of California. Macroecology, human impact]. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México. 256 p.
- Bailey KM, Francis RC, Stevens PR. 1982. The life history and the fishery of Pacific Whiting, *Merluccius productus*. *CalCOFI Rep.* 23:81–98.
- Benson AJ, Trites AW. 2002. Ecological effects of regime shifts in the Bearing Sea and eastern North Pacific Ocean. *Fish and Fish.* 3(2):95–113.  
<https://doi.org/10.1046/j.1467-2979.2002.00078.x>
- Best EA. 1962. Contribution to the biology of the Pacific hake, *Merluccius productus* (Ayres). *CalCOFI Rep.* (9):51–56.
- Burnham KP, Anderson DR. 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A practical Information-Theoretic Approach. 2nd ed. Berlin (Germany): Springer-Verlag. 488 p.
- Dark TA. 1974. Age and growth of Pacific Hake, *Merluccius productus*. *Fish Bull.* 73(2):336–355.
- Denton-Castillo J. 2018. Agregaciones y Aspectos reproductivos de la merluza *Merluccius productus* (Ayres, 1855) en el centro y norte del Golfo de California [Aggregations and reproductive aspects of the Pacific hake *Merluccius productus* (Ayres, 1855) in the central and northern Gulf of California] [MSc thesis]. [Sinaloa (Mexico)]: Universidad Autónoma de Sinaloa. 108 p.
- [DOF] Diario Oficial de la Federación. 2018 Jun 11. Carta Nacional Pesquera 2017. Mexico City: Secretaría de Gobernación. 106 p.
- Dorn MW. 1995. The effects of age composition and oceanographic conditions on the annual migration of Pacific whiting, *Merluccius productus*. *CalCOFI Rep.* 36:97–105.
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1995. Pacifico Centro-Oriental. Guía FAO para la Identificación de Especies para los Fines de la Pesca. Rome (Italy): FAO. 1813 p.
- Grande-Vidal JM. 1983. Evaluación biotecnológica de los recursos demersales vulnerables a redes de arrastre de fondo en el Golfo de California 1978-1980 [Biotechnological assessment of demersal resources vulnerable to bottom trawls in the Gulf of California 1978-1980]. *Ciencia Pesquera.* 4:97–125.
- Hamel OS, Ressler PH, Thomas RE, Waldeck DA, Hicks AC, Holmes JA, Fleischer GW. 2015. Biology, fisheries, assessment and management of Pacific hake (*Merluccius productus*). In: Arancibia H (ed.), Hakes-Biology and Exploitation. United Kingdom: John Wiley and Sons. p. 234–262.  
<https://doi.org/10.1002/9781118568262.ch9>
- entre 13.2 y 14.0 °C. Debido a que la variable ambiental más significativa que afectó la distribución de la merluza fue la temperatura de fondo, es importante continuar el monitoreo de este recurso para poder detectar cambios en su distribución relacionados con los cambios en el ambiente. Este trabajo es el primer reporte que aborda la distribución y la abundancia en relación con el hábitat de la merluza del Pacífico en el golfo de California.

## AGRADECIMIENTOS

EAT Agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) la beca otorgada para realizar estudios de posgrado. Se agradece al Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (México) el financiamiento al proyecto *Merluza*, del cual se obtuvo la base de datos utilizada. EME agradece al CONACYT el apoyo otorgado a través del programa “cátedras” (proyecto no. 2137). LASG agradece al proyecto UAS-PTC-131 (DSA 511-6/17-7679) el apoyo de infraestructura y equipo. Los autores agradecen la opinión de 3 revisores anónimos, las cuales ayudaron a mejorar la calidad de nuestro manuscrito.

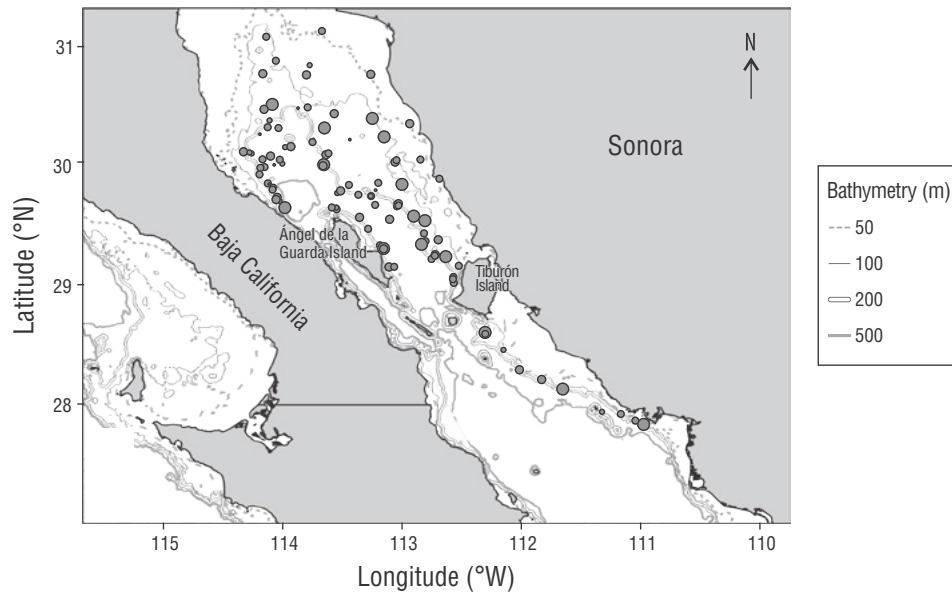
- Hernández-Herrera A, Morales-Bojórquez E, Cisneros-Mata MA, Nevárez-Martínez MO, Rivera-Parra GI. 1998. Management strategy for the giant squid (*Dosidicus gigas*) fishery in the Gulf of California Mexico. *CalCOFI Rep.* 39:212–218.
- [INAPESCA] Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. 2020. Informe técnico sobre la merluza del Pacífico (*Merluccius productus*), en aguas marinas del Golfo de California = Technical report on Pacific hake (*Merluccius productus*) in marine waters of Gulf of California. Guaymas (Sonora): CRIAP-INAPESCA. 23 p. Technical report CRIAP-GMAS/Merluza-008/2020; 22 may 2020.
- Iwamoto E, Ford MJ, Gustafson RG. 2004. Genetic population structure of Pacific hake, *Merluccius productus*, in the Pacific Northwest. *Environ Biol Fishes.* 69:187–199.  
<https://doi.org/10.1023/B:EBFI.0000022895.10683.c5>
- Kainge P, Van der Plas AK, Bartholomae CH, Wieland K. 2017. Effects of environmental variables on survey catch rates and distribution by size of shallow and deep-water Cape hakes, *Merluccius capensis* and *Merluccius paradoxus* off Namibia. *Fish Oceanogr.* 26(6):680–692.  
<https://doi.org/10.1111/fog.12227>
- Lloris D, Matallanas J, Oliver P. 2005. Hakes of the World (Family Merlucciidae): an annotated and illustrated catalogue of hake species know to date. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO Species Catalogue for Fishery Purposes; No. 2). 57 p.
- Lluch-Cota SE, Aragón-Noriega EA, Arreguín-Sánchez F, Auriolles-Gamboa D, Bautista-Romero JJ, Brusca RC, Cervantes-Duarte R, Cortés-Altamirano R, del Monte-Luna P, Esquivel-Herrera A, et al. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Prog Oceanogr.* 73(1):1–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.01.013>

- Lorenzo MI, Defeo O. 2015. The biology and fishery of hake (*Merluccius hubbsi*) in the Argentinean-Uruguayan common fishing zone of the southwest Atlantic Ocean. In: Arancibia H (ed.), Hakes: Biology and Exploitation. United Kingdom: John Wiley and sons Ltd. p. 185–210.  
<https://doi.org/10.1002/9781118568262.ch7>
- Mathews CP, Granados JL, Arvizu J. 1974. Results of the exploratory cruises of the Alejandro de Humboldt in the Gulf of California. México. CalCOFI Rep. 17:101–111.
- Nevárez-Martínez MO, Balmori-Ramírez A, Santos-Molina JP, Cervantes-Valle C, López-Martínez J, Méndez-Tenorio JF, Anguiano-Carrasco ML, Acevedo-Cervantes A, Miranda-Mier E, Morales-Azpeitia R, et al. 2007. Prospección de merluza y bacalao: distribución, tamaño poblacional e ictiofauna asociada en el Golfo de California = Prospecting for hake and cod: distribution, population size and ichthyofauna in the Gulf of California. Clave: SAGARPA-2003-C01-047.
- Nevárez-Martínez MO, Hernández-Herrera A, Morales-Bojórquez E, Balmori-Ramírez A, Cisneros-Mata MA, Morales-Azpeitia R. 2000. Biomass and distribution of the jumbo squid (*Dosidicus gigas*; d'Orbigny, 1835) in the Gulf of California, Mexico. Fish Res. 49(2):129–140.  
[https://doi.org/10.1016/s0165-7836\(00\)00198-3](https://doi.org/10.1016/s0165-7836(00)00198-3)
- Padilla-García MA. 1981. Biomasa de sardina *Sardinops sagax* y merluza *Merluccius productus* [Biomass of sardine *Sardinops sagax* and hake *Merluccius productus*]. Ciencia Pesquera. 1:35–43.
- Pierce GJ, Guerra A. 1994. Stock assessment methods used for cephalopod fisheries. Fis Res. 21:255–285.  
[https://doi.org/10.1016/0165-7836\(94\)90108-2](https://doi.org/10.1016/0165-7836(94)90108-2)
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna (Austria). URL. <https://www.R-project.org/>.
- Ressler HP, Holmes JA, Fleischer GW, Thomas RE, Cooke KC. 2007. Pacific hake, *Merluccius productus*, Autoecology: A timely review. Mar Fish Rev. 69(1–4):1–24.
- Rivera-Parra GI. 2001. La pesquería del calamar gigante *Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835) en el Golfo de California, México [The fishery of squid giant *Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835) in the Gulf of California, Mexico] [dissertation]. [Colima (Mexico)]: Universidad de Colima. 90 p.
- Robertson DR, Allen GR. 2002. Peces costeros del Pacífico oriental Tropical: Un sistema de información. Balboa (Panamá): Instituto Smithsonian de investigaciones Tropicales.
- Salinas-Mayoral CA. 2018. Dinámica poblacional de la merluza del Pacífico *Merluccius productus* (Ayres, 1855), en la Costa Occidental de BCS, México [Population dynamics of the Pacific hake *Merluccius productus* (Ayres, 1855) on the West coast of BCS, Mexico] [MSc thesis]. [La Paz (Baja California)]: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. 84 p.
- Saunders MW, McFarlane GA. 1997. Observations on the spawning distribution and biology of offshore pacific hake (*Merluccius productus*). CalCOFI Rep. 38:147–157 p.
- Schaeffer RL, Mendenhall W, Ott L. 1987. Elementos de muestreo = Elementary Survey Sampling. México City: Editorial Iberoamérica. 321 p.
- Smith BD, McFarlane GA, Saunders MW. 1990. Variation in Pacific hake (*Merluccius productus*) summer length-at-age near southern Vancouver Island and its relationship to fishing and oceanography. Can J Fish Aquatic Sci. 47(11):2195–2211.  
<https://doi.org/10.1139/f90-244>
- Sturges HA. 1926. The choice of a class interval. JSTOR. 21(153):65–66.  
<https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Swartzman G. 1997. Analysis of the summer distribution of fish schools in the Pacific Eastern Boundary Current. ICES J Mar Sci. 54(1):105–116.  
<https://doi.org/10.1006/jmsc.1996.0160>
- Torres-Orozco E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua en el Golfo de California [Volumetric analysis of water bodies in the Gulf of California] [MSc thesis]. [Ensenada (Baja California)]: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 80 p.
- Wood SN. 2006. Generalized Additive Models: An Introduction with R. 1st ed. Florida (USA): Chapman and Hall/CRC. 410 p.
- Zamora García OG, Stavrinsky Suárez A, Márquez-Farías J, Parra Alaniz JC. 2017. Resultados del programa de técnicos a bordo de la pesquería de merluza en el alto golfo de California: primeros tres años de estudio (2015-2017) = Results of the technician program aboard the hake fishery in the upper Gulf of California: first three years of study (2015-2017). Mexico: Environmental Defense Fund de México. 63p.
- Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM. 2009. Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. New York: Springer. 563 p.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>

Received February 2021,  
 accepted May 2021.



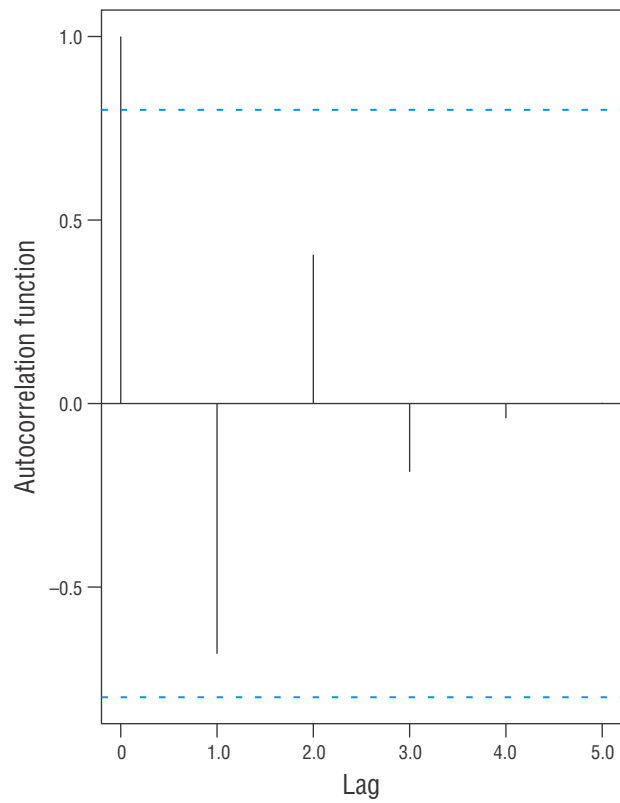
SUPPLEMENTARY MATERIAL



**Figure S1.** Distribution of residuals from the generalized additive model.

**Figura S1.** Distribución de los residuales del modelo aditivo generalizado.

## SUPPLEMENTARY MATERIAL



**Figure S2.** Temporal analysis of the generalized additive model.

**Figura S2.** Análisis temporal del modelo aditivo generalizado.