

**ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS DE PESCA DEL
ATÚN ALETA AMARILLA (*Thunnus albacares*) EN EL
PACÍFICO ORIENTAL BASADO EN SIMULACIONES MONTE CARLO
DE UN MODELO DENSODEPENDIENTE**

**ANALYSIS OF THE FISHING STRATEGIES OF THE YELLOWFIN TUNA
(*Thunnus albacares*) EASTERN PACIFIC FISHERY BASED ON MONTE
CARLO SIMULATIONS OF A DENSITY-DEPENDENT MATRIX MODEL**

Juan Guillermo Vaca-Rodríguez^{1, 2}

Michel Jules Dreyfus-León^{1, 2, 3}

¹ Facultad de Ciencias Marinas

Universidad Autónoma de Baja California

Apartado postal 453, Ensenada, C.P. 22800, Baja California, México

E-mail: jvaca@faro.ens.uabc.mx

² Programa Nacional de Aprovechamiento del Atún y de Protección de Delfines

Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, campus CICESE

Ensenada, C.P. 22860, Baja California, México

E-mail: dreyfus@cicese.mx

³ Centro Regional de Investigación Pesquera de El Sauzal, INP

Km 97.5 carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México

Recibido en julio de 1998; aceptado en mayo de 2000

RESUMEN

Muchos planes de manejo de pesquerías tienen aproximaciones determinísticas, sin considerar la incertidumbre en los modelos utilizados. El efecto del esfuerzo pesquero en la estructura de edad tampoco ha sido considerado en muchos modelos. Para considerar tanto la incertidumbre como la estructura de edad, se empleó un modelo matricial densodependiente basado en la forma discreta de la ecuación logística utilizando la matriz de Leslie, con simulaciones Monte Carlo. Se estructuraron 66 diferentes escenarios de explotación para el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Pacífico oriental. El diseño experimental consistió en 400 iteraciones de diez años cada una para cada uno de los 66 escenarios de explotación, considerando las clases de edad. La incertidumbre en el modelo se consideró para la mortalidad natural, la capacidad de carga del sistema, la cantidad total de lances, la captura por lance de cada tipo (sobre delfines, brisas y palos), y el reclutamiento. La estructura de edad presentó la mayor importancia relativa en el modelo, de acuerdo con el análisis de sensibilidad. Una de las maneras de controlar la estructura de edad es dirigiendo el esfuerzo pesquero hacia los tres tipos de lances pesqueros. Las estrategias de pesca que presentaron las mayores probabilidades de éxito (porcentaje de iteraciones arriba de un nivel arbitrario) fueron aquellas con dominancia de lances sobre delfines, una pequeña cantidad de lances sobre brisas y una cantidad mínima o nula de lances sobre palos.

Las mejores estrategias de pesca obtienen altas probabilidades de éxito para las clases de edad especialmente susceptibles y para la biomasa total. Dichas estrategias de pesca aseguran altas capturas totales, mínimos descartes de atunes juveniles y bajos niveles de captura incidental. El modelo predice una diferencia del 32% en las capturas entre escenarios dominados por lances sobre delfines y los dominados por lances no asociados con delfines.

Palabras clave: estrategias de pesca, *Thunnus albacares*, Leslie, Monte Carlo.

ABSTRACT

Many fishery management plans have deterministic approaches, without considering uncertainty in the models used. The effect of the fishing effort on the age structure has not been considered in many models. To consider both uncertainty and age structure, a density-dependent matrix model based on a discrete time-form of the logistic equation using the Leslie matrix was employed, with Monte Carlo simulations. A total of 66 different fishing scenarios were structured for the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Pacific. The experimental design consisted of 400 ten-year runs for each of the 66 fishing scenarios, considering each age-class. The uncertainty was considered for natural mortality, environmental carrying capacity, total number of sets, catch per set of each type (on dolphins, schools and logs), and recruitment. The age structure had the greatest relative importance in the model, according to sensitivity analysis. One way of controlling the age structure is directing the fishing effort towards the three types of fishing sets. The fishing strategies that presented the highest success probability values (percentage of iterations above arbitrary levels) were those with dominance of dolphin-sets, a small amount of school-sets and almost no log-sets. The best fishing strategies obtain high success probabilities for the especially susceptible age-classes and total biomass. These fishing strategies assure higher total catches, minimum juvenile tuna discards and lower incidental catches. The model predicts a 32% difference in the catches between non-dolphin-sets and dolphin-sets.

Key words: fishing strategies, *Thunnus albacares*, Leslie, Monte Carlo.

INTRODUCCIÓN

Muchos planes de manejo de pesquerías tienen aproximaciones determinísticas, sin considerar la incertidumbre en los modelos utilizados. Un problema común con los resultados determinísticos es la incertidumbre debida a la variabilidad de los sistemas y a la dificultad para realizar mediciones exactas de los parámetros involucrados en las pesquerías. Hay una tendencia a reconocer que el manejo de pesquerías es una cuestión de toma de decisiones y de consideración de riesgos, incorporando la incertidumbre en las evaluaciones pesqueras (Hilborn y Walters, 1992). Las simulaciones Monte Carlo incorporan dicha incertidumbre y permiten caracterizar a

INTRODUCTION

Many fishery management plans have been done with deterministic approaches, without considering uncertainty in the models used. A common problem with deterministic results is the uncertainty due to system variability and the difficulty of making precise measurements of the parameters involved in the fishery. There is a trend to recognize that fishery management is a matter of decision-making and risk-taking, incorporating uncertainty in stock assessments (Hilborn and Walters, 1992). Monte Carlo simulations incorporate that uncertainty and the fisheries can therefore be characterized in a more comprehensible way than with other techniques that require analytical solutions.

las pesquerías de una manera más comprensible que aquellas técnicas que requieren soluciones analíticas.

También es importante que los modelos predictivos consideren el efecto que el esfuerzo pesquero tiene en la estructura de edad de las poblaciones. Una alternativa que contempla la estructura de edad es un modelo matricial densodependiente basado en la forma discreta de la ecuación logística (Jensen, 1995) utilizando la matriz de Leslie. La matriz de Leslie ha sido utilizada, *inter alia*, para las poblaciones de salmón (Browne, 1988), tortugas marinas (Crowder *et al.*, 1994) y focas grises (Zwanenburg y Bowen, 1990). Sin embargo, el modelo densodependiente no ha sido utilizado ampliamente aún. Este modelo relaciona las probabilidades de supervivencia de cada clase de edad, número de hijas por hembra adulta y la capacidad de carga ambiental. Para el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Pacífico oriental esto es relevante debido a que atunes de tamaños moderados a grandes y maduros sexualmente se asocian frecuentemente con delfines, y atunes juveniles inmaduros sexualmente se asocian con objetos flotantes o viven en cardúmenes libres (NRC, 1992; Wild, 1994). Dichas asociaciones representan las tres principales técnicas utilizadas hoy en día para la pesca del atún aleta amarilla con redes de cerco en el Pacífico oriental, y los lances se conocen como lances sobre delfines, sobre palos y sobre brisas.

En la pesquería del atún aleta amarilla en el Pacífico oriental, el esfuerzo pesquero es dirigido hacia lances sobre delfines, palos o brisas de acuerdo con las condiciones del mercado o climatológicas, distribución espacial de los tres diferentes cardúmenes y la distancia de las flotas a las áreas de pesca, entre otras razones. Sin embargo, las condiciones de mercado como las políticas “*dolphin-safe*” (libre de delfines) han dirigido el esfuerzo hacia lances no asociados con delfines. Esta tendencia en la dirección del

It is also important that predictive models consider the effect of the fishing effort on the age structure of a given population. An alternative that contemplates the age structure is a density-dependent matrix model based on a discrete time-form of the logistic equation (Jensen, 1995) using the Leslie matrix. The Leslie matrix has been used, *inter alia*, for salmon populations (Browne, 1988), sea turtles (Crowder *et al.*, 1994) and grey seals (Zwanenburg and Bowen, 1990). However, the density-dependent model has not been widely applied yet. This model relates the surviving probabilities of each age-class, number of daughters per adult female and the environmental carrying capacity. For the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Pacific this is relevant because moderate-to-large sizes of sexually mature tunas frequently associate with dolphins and non-sexually mature juvenile tunas associate with floating objects or live in free swimming schools (NRC, 1992; Wild, 1994). These associations represent the three main techniques used nowadays to fish yellowfin tunas with purse-seiners in the eastern Pacific, and the sets are known as dolphin-sets, log-sets and school-sets.

In the eastern Pacific yellowfin tuna fishery, the fishing effort is directed to dolphin-sets, log-sets or school-sets according to market and weather conditions, spatial distribution of the three different schools and distance of the fleets to the fishing grounds, among other reasons. However, market conditions such as “*dolphin-safe*” policies may direct the effort towards non-dolphin-sets. This effort direction may not be the most appropriate way of exploiting the yellowfin tuna (FAO, 1994). A mean decrease of about 25% of the yellowfin tuna catches was predicted if all the fishing effort was directed from primarily dolphin-associated schools to schools not associated with dolphins, although the catches of other associated

esfuerzo puede no ser la manera más apropiada de explotar al atún aleta amarilla (FAO, 1994). Un decremento promedio de alrededor de 25% de las capturas de aleta amarilla fue pronosticado si todo el esfuerzo pesquero fuera dirigido de principalmente cardúmenes asociados con delfines hacia cardúmenes no asociados con delfines, aunque probablemente las capturas de otros organismos asociados como el barrilete (*Katsuwonus pelamis*) se incrementarían (Punsly *et al.*, 1994).

El objetivo del presente estudio es analizar las estrategias de pesca del atún aleta amarilla y sus implicaciones cuando tanto la incertidumbre como el efecto del esfuerzo pesquero en la estructura de edad son considerados. El manejo del atún aleta amarilla podría verse beneficiado si dichos factores son considerados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio no consideró la dinámica poblacional del barrilete, aunque los barcos atuneros en el Pacífico oriental pueden capturar tanto aleta amarilla como barrilete durante el mismo lance.

Ya que hay tres diferentes tipos de lances en la pesquería del atún aleta amarilla con redes de cerco, la manera más apropiada de representar los diferentes escenarios de explotación es con un diagrama ternario. Cada vértice del diagrama representa el escenario en donde todos los lances (100%) son dirigidos hacia un tipo específico de cardumen. Para poder diseñar los diferentes escenarios de explotación se creó una malla de 66 puntos distribuidos homogéneamente dentro del diagrama ternario. Cada punto representa una combinación de porcentajes de los tres tipos de lances. Todos los diagramas contienen todas las posibles combinaciones de porcentajes de los tres tipos de lances y, por lo tanto, representan los escenarios de explotación (estrategias de pesca) de la pesquería.

organismos such as skipjack (*Katsuwonus pelamis*) would probably increase (Punsly *et al.*, 1994).

The purpose of this study is to make an analysis of the fishing strategies of the yellowfin tuna fishery in the eastern Pacific and of the implications when both the uncertainty and the effect of fishing effort on the age structure are considered. The yellowfin tuna management plans could benefit if these factors are considered.

MATERIALS AND METHODS

This study did not consider the population dynamics of the skipjack, although the tuna fishery boats in the eastern Pacific can catch both yellowfin and skipjack during the same set.

Since there are three different types of sets in the yellowfin tuna fishery, the most appropriate way to represent the different fishing scenarios is with a triangular diagram. Each vertex of the diagram represents the scenario where all (100%) of the sets are directed towards one particular type of set. To be able to design the different fishing scenarios, we created a mesh of 66 items evenly distributed inside the triangular diagram. Each one stands for a different combination of percentages of the three types of sets. All the diagrams contain all the possible combinations of the three types of sets, hence representing the fishing scenarios of the fishery.

The time horizon in which it is pertinent to run the model should not be so short that the trends of the populations caused by the fishing scenarios are not recorded or observed, neither should they be so long that it results in an unnecessary accumulation of information and the effect of the management strategies is either lost or inapplicable. We considered that a time horizon of ten years was adequate for the purpose of this study.

El horizonte de tiempo pertinente para correr el modelo no debe ser ni tan corto que las tendencias de la población causadas por los escenarios de explotación no se registren u observen, ni tan grande que resulte en una acumulación de información en donde los efectos de las estrategias de pesca se pierdan o no sean aplicables. Se consideró que un horizonte de tiempo de diez años era el adecuado para el propósito del presente trabajo.

Los datos graficados en los diagramas ternarios son líneas de contorno de probabilidad de éxito, equivalentes al porcentaje de iteraciones en las que se cumplió el criterio de éxito establecido. Los diferentes criterios de éxito se basaron en que la cantidad de organismos y la biomasa total siempre se mantuvieran, a lo largo de los diez años simulados, arriba de una cierta fracción de la cantidad inicial de organismos o de la capacidad de carga ambiental. Es decir, es la probabilidad de que nunca se encontrarán bajo esos criterios de éxito. Los niveles utilizados como criterios de éxito fueron el 50%, 25% y 10%, para todas las clases de edad y para la biomasa total. También se graficaron las capturas totales en los diagramas ternarios.

Se graficaron los diagramas ternarios para cada una de las principales clases de edad pues ellas representan el sostén biológico de la pesquería. La importancia de tener diagramas de probabilidad de éxito para cada una de las clases de edad radica en que cada tipo de lance pesquero captura, en general, un tipo de clase de edad diferente. Por ello, el monitoreo de una clase de edad en específico es importante para evaluar el desempeño de tipos de lances en particular y determinar el éxito de la pesquería en general. La biomasa total conforma una integración de todas las clases de edad, por lo que permite observar los cambios en la población total. La captura total es el resultado pesquero y es el interés principal de pescadores y manejadores de recursos. Todos los diagramas juntos

The data plotted in the triangular diagrams are success probability contour lines, equivalent to the percentage of iterations in which the established success criterion was fulfilled. The different success criteria were that the amount of organisms and total biomass were always to be maintained, throughout the ten years simulated, above a certain fraction of the initial amount of organisms or the environmental carrying capacity. That is, it is the probability that they will never be below those limits. The thresholds used as success criteria were 50%, 25% and 10%, for all the age-classes and for the total biomass. Total catches were also plotted in the triangular diagrams.

Triangular diagrams were plotted for each of the main age-classes because they represent the biological support of the fishery. The importance of having success probability diagrams for each one of them lies in the fact that each type of set catches, in general, a different age-class. Thus, the monitoring of a specific age-class is important to evaluate the performance of particular set types and to determine the success of the fishery in general. The total biomass triangular diagram contains all the age-classes and, therefore, enables us to observe the changes in the population as a whole. Total catch is the result of the fishing effort and it is the principal interest of fishermen and resource managers. All the diagrams together provide a wide spectrum of the resource and fishery "health". We considered those levels to be safety limits and representative of the "health", because they are thresholds "below which one does not want to go" (Punt, *et al.*, 1995).

Monte Carlo simulations

Due to the uncertainty related to many parameters involved in the model, we used Monte Carlo simulations. The uncertainty comes from the high variability and dynamic

presentan un amplio espectro del recurso y de la "salud" de la pesquería. Se consideraron dichos niveles como límites de seguridad y representantes de la "salud" porque son límites "bajo los cuales uno no quiere ir" (Punt *et al.*, 1995).

Simulaciones Monte Carlo

Se utilizaron simulaciones Monte Carlo debido a la incertidumbre relacionada a muchos parámetros involucrados en el modelo. La incertidumbre viene de la alta variabilidad y comportamiento dinámico del sistema, y también de la dificultad para determinar y medir con exactitud dichos parámetros. La simulación Monte Carlo consiste en la asignación de un valor aleatorio a la variable para cada simulación, de acuerdo con el intervalo de variación dado en la literatura (Sóbol, 1983). Dado el criterio de racionalidad (Levin y Kirkpatrick, 1978), se establece que en la ausencia de información contundente que confirme lo contrario, se puede suponer que en los intervalos de variación establecidos, todos los estados de la naturaleza son igualmente probables. En otras palabras, los valores tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro del intervalo de variabilidad, de tal manera que la asignación aleatoria nos permite obtener resultados con posibilidades reales. Sin embargo, en algunas ocasiones es conveniente utilizar las frecuencias relativas como indicadores de probabilidad de ocurrencia.

Siempre es recomendado tener una gran cantidad de simulaciones Monte Carlo para poder asegurar una mayor precisión en las predicciones hechas (Sóbol, 1983). Cada simulación es llamada una prueba o iteración Monte Carlo, y siempre es buena idea realizar por lo menos 100 de esas pruebas (Hilborn y Walters, 1992), pero también es adecuado comparar si hay diferencias significativas al utilizar una mayor cantidad de iteraciones.

behavior of the system, as well as the difficulty to determine and measure precisely those parameters. For each Monte Carlo simulation, a random value is assigned to the variable, according to the range given in the literature (Sóbol, 1983). Given the rationality criterion (Levin and Kirkpatrick, 1978), it is established that in the absence of any strong information confirming the contrary, one might as well assume that in the given ranges of variation, all states of nature are equally likely. In other words, the values have the same probability of occurrence within the given range; so, the random assignation allows us to obtain results with real possibilities. However, sometimes it is convenient to use the relative frequency as an indicator of the probability of occurrence.

It is always recommendable to have a big amount of Monte Carlo simulations in order to assure a greater accuracy of the predictions made (Sóbol, 1983). Each simulation is called a Monte Carlo trial or iteration, and it is always a good idea to perform at least 100 of these trials (Hilborn and Walters, 1992), but also to compare if there are significant differences when more iterations are used.

We made a preliminary study to determine the number of iterations that proved adequate to this model. A certain stability in the criteria used (success probabilities for different age-classes and fishing scenarios) was found when the number of iterations was close to 400.

Model

Jensen (1995) developed a density-dependent matrix model based on a discrete time-form of the logistic equation using the Leslie matrix. This model has been applied to age-structured populations to determine optimum harvest levels (Jensen, 1996). The model has the following form:

Se realizó un estudio preliminar para determinar el número de iteraciones adecuadas para el modelo utilizado. Se encontró una estabilidad en los criterios utilizados (probabilidades de éxito para diferentes clases de edad y escenarios de explotación) alrededor de las 400 iteraciones.

Modelo

Jensen (1995) desarrolló un modelo densodependiente basado en la forma discreta de la ecuación logística utilizando la matriz de Leslie. Este modelo ha sido aplicado a poblaciones estructuradas por edad para determinar niveles de explotación óptimos (Jensen, 1996). El modelo tiene la siguiente estructura:

$$N_{t+1} = N_t + D(N) (L - I)N_t \quad \text{y} \quad D(N) = (K - N)/K$$

donde N_t y N_{t+1} son los vectores de la estructura de edad en el tiempo t ; $D(N)$ es una función densodependiente, con K como la capacidad de carga ambiental y N como la suma de elementos de N_t ; I es la matriz de identidad; y L es la típica matriz de Leslie (Howard y Rorres, 1987):

$$\begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 & F_3 \\ P_0 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & P_1 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & P_2 & S_3 \end{bmatrix}$$

donde F_x es el número de hijas por hembra adulta (reclutamiento) de cada clase de edad x , P_x es la probabilidad de sobrevivir y pasar a la siguiente clase de edad (relacionada con la mortalidad natural y por pesca), y S_x es la probabilidad de sobrevivir y permanecer en la misma clase de edad (Crowder *et al.*, 1994).

$$N_{t+1} = N_t + D(N) (L - I)N_t \quad \text{and} \quad D(N) = (K - N)/K$$

where N_t and N_{t+1} are the age structure vectors in time t ; $D(N)$ is a density-dependent function, with K as the environmental carrying capacity and N as the sum of the elements of N_t ; I is the identity matrix; and L is the typical Leslie matrix (Howard and Rorres, 1987):

$$\begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 & F_3 \\ P_0 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & P_1 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & P_2 & S_3 \end{bmatrix}$$

where F_x is the number of daughters per adult female (recruitment), P_x is the probability to survive and grow to the next age-class (related to natural and fishing mortality), and S_x is the probability to survive and remain in the same age-class (Crowder *et al.*, 1994).

Data source

All data were obtained from the annual reports of the Inter-American Tropical Tuna Commission (CIAT for its initials in Spanish). The origin and criteria used to obtain these data are given below. From the model

$$N_{t+1} = N_t + D(N) (L - I)N_t$$

we have:

$$N_t$$

The age structure was conformed with the six different age-groups given by CIAT in the X and Y cohorts, established as ages 0, I, II, III, IV and V (CIAT, 1995). The age structure was based on the amount of organisms from both cohorts ($X + Y$) that on average had that age,

Fuente de datos

Todos los datos fueron obtenidos de los reportes anuales de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT). Los orígenes y criterios utilizados para obtener los datos se describen a continuación. Del modelo

$$N_{t+1} = N_t + D(N) (L - I)N_t$$

se tiene:

N_t

La estructura de edad se conformó con los seis diferentes grupos de edad dados por la CIAT en las cohortes X e Y , establecidas como las edades 0, I, II, III, IV y V (CIAT, 1995). La estructura de edad se basó en la cantidad de organismos de ambas cohortes ($X + Y$) que en promedio tuvieran esa edad, de 1988 a 1994. Se tomó este intervalo de años debido a que representa más o menos el estado actual de la pesquería, de acuerdo con lo estimado por la CIAT. La estructura de edad inicial utilizada fue (en miles de organismos): 59,866 de edad 0; 19,247 de edad I; 5,016 de edad II; 537 de edad III; 27 de edad IV; y 15 de edad V. El peso promedio de cada clase de edad fue 1.42, 9.82, 31.75, 64.18, 97.55 y 124.97 kg, dando un total de 472,037.3 t de biomasa total inicial.

Se utilizaron las relaciones longitud-peso y longitud-edad descritas en Wild (1994).

Se construyó un diagrama ternario para cada clase de edad excepto la 0 y para la biomasa total con todas las clases de edad incluidas. Sin embargo, los diagramas ternarios de las clases de edad IV y V no se presentan debido a que dichas clases de edad no contribuyen significativamente a las capturas de atún aleta amarilla en el Pacífico oriental.

from 1988 to 1994. This range of years was taken because it more or less represents the actual state of the fishery, according to that estimated by CIAT. The initial age structure used was (in thousand of organisms): 59,866 of age-class 0; 19,247 of age-class I; 5,016 of age class II; 537 of age-class III; 27 of age-class IV; and 15 of age-class V. The mean weights of each age-class were 1.42, 9.82, 31.75, 64.18, 97.55 and 124.97 kg, giving a total of 472,037.3 t as total initial biomass.

The length-weight and length-age relationships used are those described in Wild (1994).

We created a triangular diagram for each age class except 0, and for total biomass with all age-classes included. However, the triangular diagrams for age-classes IV and V are not presented because they do not contribute significantly to the eastern Pacific yellowfin tuna catches.

$D(N)$

Sharp and Francis (1976) determined an environmental carrying capacity of 600,000 t for an unexploited hypothesized population, constituted by organisms from 40 to 140 cm fork-length. We used the range of 540,000 \pm 150,000 t obtained by Dreyfus-León (1991) for the yellowfin tuna, and a value was assigned randomly within that range, with a uniform distribution. To make K and the model compatible, N was taken as the biomass corresponding to the sum of the age structure.

L

The Leslie matrix contains the following parameters: P_x , S_x and F_x .

1. P_x : This probability of surviving was calculated based on the natural and fishing mortalities.

D(N)

Sharp y Francis (1976) determinaron el valor de la capacidad de carga ambiental K para una población hipotética no explotada en 600,000 t, constituido por organismos entre 40 y 140 cm de longitud furcal. En el modelo se utilizó un intervalo de variación de 540,000 \pm 150,000 t obtenido por Dreyfus-León (1991) para el aleta amarilla, considerando una distribución uniforme, y se asignó un valor aleatorio dentro de dicho intervalo. Para hacer K y el modelo compatible, el valor de N se tomó como la biomasa correspondiente a la suma de la estructura de edad.

L

La matriz de Leslie contiene los siguientes parámetros: P_x , S_x y F_x .

1. P_x : Esta probabilidad de supervivencia fue calculada basada en la mortalidad natural y por pesca.
 - 1.1. Mortalidad natural: Se ha estimado el valor de M en 0.8 (Wild, 1994), aunque algunos otros autores han dicho que 0.6 es una mejor estimación. Hennemuth (1961) estimó que el valor de M fluctuaba dentro de un intervalo de 0.6 y 1.0. Hasta ahora, la CIAT ha usado un $M = 0.8$ (CIAT, 1995). Para los propósitos del modelo, la asignación del valor de M se realizó aleatoriamente con el intervalo de 0.6 a 1.0, con una distribución uniforme (utilizando el criterio de racionalidad). Debido a que el aleta amarilla en el Pacífico oriental no se encuentra en cardúmenes en donde todas las clases de edad estén igualmente representadas, sino en cardúmenes en donde las clases de edad están más o menos separadas, se asignó un valor independiente de M a cada clase de edad.

1.1. Natural mortality: M has been estimated to be 0.8 (Wild, 1994), although some authors have said that 0.6 is a better estimate. Hennemuth (1961) estimated that the value of M occurs within a range of 0.6 to 1.0. Until now, CIAT has used $M = 0.8$ (CIAT, 1995). For the purpose of the model, the assignation of the value of M was done randomly within the 0.6 to 1.0 range, with a uniform distribution (using the rationality criterion). As the yellowfin tuna in the eastern Pacific is not found in schools where all the age-classes are equally represented, but in schools where the age-classes are more or less separated, an independent M value was given to each age-class.

1.2. Fishing mortality: To determine the fishing mortality we had to perform several previous calculations and estimates. (a) A relative frequency table was estimated with the total amount of sets made from 1985 to 1994 (CIAT, 1995), to obtain the probability of occurrence. This range of years more or less represents the actual state of the international fleet in the eastern Pacific, considering fleet carrying capacity, technology and market. Based on that probability, the amount of total sets was randomly assigned. (b) Similarly, a relative frequency table was estimated for the catch per set, considering each type of set (dolphin, log or school). The probability of occurrence, from 1985 to 1994, was then calculated (CIAT, 1995). The election of the year range was due to the same reasons as for the total amount of sets described above. (c) Each kind of set catches a different amount of organisms from each age-class (CIAT, 1989; Hall, 1998). To estimate the fishing effort effect on the age structure, these proportions were calculated. (d) Once the total amount

1.2. Mortalidad por pesca: Para determinar la mortalidad por pesca se tuvieron que realizar una serie de cálculos y estimaciones previas. (a) Se estimó una tabla de frecuencias relativas con la cantidad total de lances realizados de 1985 a 1994 (CIAT, 1995) para obtener la probabilidad de ocurrencia. Dicho intervalo de años representa más o menos el estado actual de la flota internacional en el Pacífico oriental, considerando la capacidad de acarreo, tecnología y mercado. En el modelo, la cantidad de lances totales realizados se asignó aleatoriamente considerando la probabilidad de ocurrencia estimada. (b) Similarmente, se estimó una tabla de frecuencias relativas de capturas por lance, considerando cada tipo de lance (sobre delfines, palos o brisas). Posteriormente, se calculó la probabilidad de ocurrencia, de 1985 a 1994 (CIAT, 1995). La elección del intervalo de años tuvo las mismas bases que para la cantidad de lances totales. (c) Cada tipo de lance captura una cantidad diferente de organismos de cada clase de edad (CIAT, 1989; Hall, 1998). Para estimar el efecto del esfuerzo pesquero en la estructura de edad, dichas proporciones fueron calculadas. (d) Una vez que la cantidad total de lances y la captura por lance fueron asignadas al modelo a partir de las frecuencias relativas, el número de organismos capturados de cada clase de edad fue calculado.

Finalmente, ya asignado el valor de M y calculada la mortalidad ocasionada por la pesca, se estimó una estructura de edad temporal que considerara ambas mortalidades, a partir de los sobrevivientes (estructura de edad) de la operación matricial del año anterior. Se utilizó la ecuación $N_{t+1} = N_t * e(-M * t)$ para incorporar la mortalidad natural a la estructura de edad temporal, a la que se le restó el número

of sets and catch per set were chosen using the probabilities from the relative frequencies, the number of fish caught of each age-class was calculated.

Finally, once the value of M was assigned and the mortality caused by fishing was calculated, a temporary age structure considering both types of mortalities was estimated. This estimate was based on the survivals (age structure) of the matrix operation of the previous year. The equation $N_{t+1} = N_t * e(-M * t)$ was used to incorporate the natural mortality to the temporary age structure, from which the number of organisms of each age class caught was subtracted. By relating the temporary age structure obtained after considering both types of mortalities with the surviving age structure of the previous year (product of the matrix operation), the probability of surviving and growing to the next age-class was calculated for each age-class. This probability was assigned directly to the Leslie matrix.

2. S_x : The probability of surviving and remaining in the same age-class was contemplated only for the last age-class. That is, age-class V was considered to contain the organisms of age V and older. This probability of surviving was calculated with the mortalities mentioned earlier, and similarly assigned to the Leslie matrix.

3. F_x : The number of daughters per adult female was replaced by the recruitment. The relation between the biomass of the sexually mature organisms in the eastern Pacific and the recruitment to the fishery one year later has not been found (Wild, 1994; Punsly *et al.*, 1994). So, due to the relative independence of the recruitment and the adult biomass, F_x was not utilized. The recruitment was just added to the age structure after the main matrix operation was done.

de organismos capturados por cada clase de edad. Al relacionar la estructura de edad temporal resultado de considerar las dos mortalidades con la estructura de edad de sobrevivientes del año anterior (producto de la operación matricial), se calculó la probabilidad de sobrevivir y pasar a la siguiente clase de edad para cada clase de edad. Esta probabilidad fue asignada directamente a la matriz de Leslie.

2. S_x : La probabilidad de sobrevivir y permanecer en la misma clase de edad fue contemplada solamente para la última clase de edad. Es decir, se consideró que la clase de edad V contuviera a los organismos de edad V y posteriores. Esta probabilidad de sobrevivir se calculó con las mortalidades mencionadas anteriormente, y asignadas a la matriz de Leslie de manera similar.
3. F_x : El número de hijas por hembra adulta fue reemplazado por el reclutamiento. No se ha encontrado relación entre la biomasa de organismos maduros sexualmente en el Pacífico oriental y el reclutamiento a la pesquería un año más tarde (Wild, 1994; Punsly *et al.*, 1994). Así que, debido a la relativa independencia del reclutamiento y la biomasa de adultos, no se utilizó el término F_x . El reclutamiento simplemente fue agregado a la estructura de edad tras la operación matricial principal.

Para determinar el valor del reclutamiento, se utilizaron estimaciones del tamaño poblacional (cohortes X e Y) para dos periodos de años, 1976–1984 y 1985–1994, y el reclutamiento para los mismos periodos (CIAT, 1995). Se calcularon las frecuencias relativas de ocurrencia del tamaño poblacional y del reclutamiento, y se transformaron a probabilidades. Aunque no se ha encontrado relación entre ellos, se intentó relacionarlos de alguna manera básica.

To determine the value of the recruitment, we used the estimates of the population size (cohorts X and Y) for two periods of years, 1976–1984 and 1985–1994, and the recruitment for the same periods (CIAT, 1995). We calculated the relative frequencies of occurrence for both population size and recruitment, and transformed them to probabilities. Although a relation has not been found between them, we tried to link them somehow. First of all, one of the two periods of years was selected based on the population size from the matrix operations and the probabilities mentioned above. Once the period of years was chosen, the recruitment was selected using the probabilities equivalent to the relative frequencies of that period of years.

Since the fecundity-fertility factor was not used in the main matrix operations, it was not necessary to consider the fact that the Leslie matrix usually just works for the female part of the population. We therefore considered the complete yellowfin tuna population estimated in the eastern Pacific.

All the parameters involved in the model had different variation ranges depending on the inherent uncertainty. The ranges were: K (t), $540,000 \pm 150,000$ or $\pm 27.7\%$; total amount of sets, $18,500 \pm 3,500$ or $\pm 18.9\%$; catch per log-set (t), 11.5 ± 3.5 or $\pm 30.4\%$; catch per school-set (t), 10.5 ± 2.5 or $\pm 23.8\%$; catch per dolphin-set (t), 19.5 ± 2.5 or $\pm 12.8\%$; M , 0.8 ± 0.2 or $\pm 25\%$; and recruitment (millions of organisms), 85 ± 45 or $\pm 53\%$. Note that the recruitment is the parameter that has the greater variation range.

We used sensitivity analysis to establish the relative importance of each parameter involved in the model. This consisted in maintaining all the parameters fixed in average values and increasing one by one by 10% for different fishing scenarios. The relative importance was estimated by observing the percentage of change in the state variable (number of

Primero se seleccionó uno de los dos periodos de años basado en el tamaño poblacional obtenido de las operaciones matriciales y las probabilidades mencionadas anteriormente. Una vez elegido el periodo, el reclutamiento fue seleccionado utilizando las probabilidades equivalentes a las frecuencias relativas de reclutamiento del periodo elegido.

Debido a que el factor fecundidad-fertilidad no fue utilizado en las operaciones matriciales, no fue necesario considerar el hecho de que la matriz de Leslie usualmente sólo funciona para la porción femenina de la población. Por lo tanto, se consideró a la población completa de atún aleta amarilla en el Pacífico oriental.

Todos los parámetros involucrados en el modelo tuvieron diferentes intervalos de variación dependiendo de la incertidumbre inherente. Los intervalos fueron: $K(t)$, 540,000 \pm 150,000 ó $\pm 27.7\%$; cantidad total de lances, 18,500 \pm 3,500 ó $\pm 18.9\%$; captura por lance sobre palos (t), 11.5 \pm 3.5 ó $\pm 30.4\%$; captura por lance sobre brisas (t), 10.5 \pm 2.5 ó $\pm 23.8\%$; captura por lance sobre delfines (t), 19.5 \pm 2.5 ó $\pm 12.8\%$; M , 0.8 \pm 0.2 ó $\pm 25\%$; y reclutamiento (millones de organismos), 85 \pm 45 ó $\pm 53\%$. Es importante notar que el reclutamiento es el parámetro con el intervalo de variación mayor.

Se utilizó un análisis de sensibilidad para establecer la importancia relativa de cada parámetro involucrado en el modelo. Éste consistió en mantener todos los parámetros en valores medios fijos e incrementar uno por uno en un 10% para diferentes escenarios de explotación. La importancia relativa fue estimada al observar el porcentaje de diferencia en la variable de estado (número de organismos en cada clase de edad) comparado con un estándar obtenido previamente con valores medios de todos los parámetros.

En resumen, se realizaron 400 iteraciones de diez años cada una para cada una de las 66 combinaciones de tipos de lances o estrategias

organismos in each age-class) compared to a standard, previously obtained with average values.

In summary, in order to calculate the success probabilities, 400 ten-year runs were done for each of the 66 combinations of types of sets or fishing strategies. The values of K , total amount of sets and catch per set for the three types of sets were independent for each year of the ten years simulated in each of the 400 iterations, for each of the 66 fishing strategies. The value of M was also independent for each age-class.

To evaluate the performance of the model, a special run was made to compare the total biomass of the resource estimated by CIAT (1997) with the one obtained with the model. Recruitment, total amount of sets and catch per type of set were directly taken from CIAT (1997), and K was considered constant at 600,000 t according to Sharp and Francis (1976). The control variable was natural mortality, whose values were adjusted (within the 0.6–1.0 range) to reproduce the total biomass estimated by other models. The $X + Y$ cohorts of 1976 were used (CIAT, 1997). A statistical analysis was made to determine if the two biomasses, the one from the model and that estimated by CIAT, were statistically different.

RESULTS

In all the triangular diagrams obtained, the three criteria used (50%, 25% and 10%) display the same general trend, so only the diagrams of the 50% criteria are shown. As stated before, we only present the triangular diagrams of age-classes I, II and III, since they are the ones that support the fishery.

For age-classes I and II, there are greater success probabilities if the combinations of sets are strongly dominated by dolphin-sets (figs. 1, 2). Such combinations contain a minimum contribution of school-sets and almost a

de pesca, con el fin de calcular las probabilidades de éxito. El valor de K , total de lances y captura por lance para cada tipo de lance fue independiente para cada año de los diez años simulados en cada una de las 400 iteraciones para cada una de las 66 estrategias de pesca. El valor de M fue, además, independiente para cada clase de edad.

Para evaluar el desempeño del modelo, se realizó una corrida especial del modelo con el propósito de comparar la biomasa total del recurso registrada por la CIAT (1997) con la obtenida por el modelo. El reclutamiento, la cantidad total de lances y la captura por tipo de lance se tomaron directamente de CIAT (1997), y K se consideró constante en 600,000 t según Sharp y Francis (1976). La variable de control fue la mortalidad natural, cuyos valores fueron ajustados (dentro del intervalo 0.6 a 1.0) para reproducir la biomasa total estimada por otros modelos. Se utilizaron las cohortes $X + Y$ de 1976 (CIAT, 1997). Se realizó un análisis estadístico para determinar si las dos biomazas, la del modelo y la estimada por la CIAT, eran estadísticamente diferentes.

RESULTADOS

En todos los diagramas ternarios obtenidos, los tres criterios utilizados (50%, 25% y 10%) mostraron la misma tendencia general, por lo que solamente se presentan los diagramas con el criterio de 50%. Como se mencionó anteriormente, solamente se presentan los diagramas ternarios de las clases de edad I, II y III, debido a que son las que sustentan a la pesquería.

Para las clases de edad I y II, hay mayores probabilidades de éxito si las combinaciones de lances están fuertemente dominadas por lances sobre delfines (figs. 1, 2). Dichas combinaciones contienen una mínima contribución de lances sobre brisas y una contribución nula de lances sobre palos. La magnitud de las

nil contribution of log-sets. The magnitude of the success probabilities and the area covered inside the diagram differ in these two diagrams, but the common and important factor is the trend both show. The general trend is to have parallel success probability contour lines, depending on the percentage of dolphin-sets in the fishing scenario.

Figure 3 shows that the trend of the success probability contour lines for age-class III is somehow concentric. Here, the greatest success probabilities are observed when the combination of sets is again dominated by dolphin-sets. Although the absolute difference between the three vertexes is not great, attention should be focused on the weak trend, with greater success probabilities towards the vertexes, but mainly towards the 100% dolphin-sets vertex.

For total biomass (fig. 4), the general trend is to have greater success probabilities if the combinations of sets are strongly dominated by dolphin-sets. Figure 5 shows that the contour lines of the total catches have a clear trend of maximum catches towards the 100% dolphin-sets area, minimum catches towards the 100% log-sets section and intermediate catches in the 100% school-sets region.

Log-sets predominantly catch organisms of age-classes 0 and I. School-sets mainly catch organisms of age-class I and, in a lesser amount, of age-classes 0 and II. Finally, dolphin-sets primarily catch organisms of age-class II and, to a lesser extent, of age-classes I and III.

The effect of increasing 10% the value of any parameter varied greatly in one-year simulations, according to the sensitivity analysis. The effect observed in the state variable not only varies depending on the parameter chosen, but also depending on the age-class and the combination of sets. When ten-year simulations were made, the results sometimes reached great differences in some age-classes and for some combinations of sets.

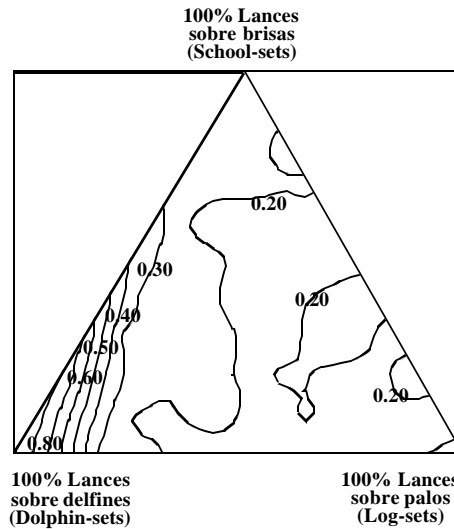


Figura 1. Líneas de probabilidad de éxito para la clase de edad I. Las probabilidades de éxito son equivalentes al porcentaje de iteraciones sobre el criterio utilizado a lo largo de los diez años simulados. El criterio fue 50% de la cantidad inicial de organismos de esta clase de edad. El diagrama ternario representa todos los posibles escenarios de explotación para la pesquería del atún aleta amarilla.

Figure 1. Success probability contour lines for age-class I. The success probability is equivalent to the percentage of iterations over the criterion used throughout the ten years simulated. The criterion was 50% of the initial amount of organisms of this age-class. The triangular diagram represents all the possible fishing scenarios for the yellowfin tuna fishery.

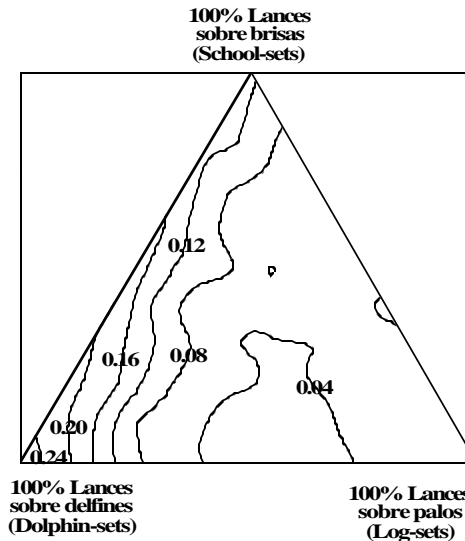


Figura 2. Líneas de probabilidad de éxito para la clase de edad II. Misma explicación que la figura 1.

Figure 2. Success probability contour lines for age-class II. Same explanation as figure 1.

probabilidades de éxito y el área cubierta dentro del diagrama ternario difiere entre estos dos diagramas, pero el factor común importante es la tendencia que ambos muestran. La tendencia general muestra líneas de contorno de probabilidades de éxito paralelas y en función del porcentaje de lances sobre delfines en el escenario de explotación.

La figura 3 muestra que la tendencia de las líneas de contorno de probabilidad de éxito de la clase de edad III es concéntrica. Aquí, las mayores probabilidades de éxito se observan cuando la combinación de lances es otra vez dominada por lances sobre delfines. Aunque la diferencia absoluta entre los tres vértices no es grande, la atención se debe enfocar en la ligera tendencia, con mayores probabilidades de éxito hacia los vértices, pero principalmente hacia el vértice de 100% lances sobre delfines.

Para la biomasa total (fig. 4), la tendencia general es a tener mayores probabilidades de éxito si las combinaciones de lances están fuertemente dominadas por lances sobre delfines. La figura 5 muestra que las líneas de contorno de las capturas totales tienen una clara tendencia de máximas capturas hacia el área de 100% lances sobre delfines, mínimas hacia la sección de 100% lances sobre palos e intermedias en la región de 100% lances sobre brisas.

Los lances sobre palos capturan predominantemente organismos de las clases de edad 0 y I. Los lances sobre brisas capturan principalmente organismos de la clase de edad I y, en menor cantidad, de las clases de edad 0 y II. Finalmente, los lances sobre delfines capturan generalmente organismos de la clase de edad II y, en menor medida, de las clases de edad I y III.

El cambio producido por el incremento en un 10% del valor de cualquier parámetro varió grandemente en las simulaciones de un año, de acuerdo con el análisis de sensibilidad. El efecto observado en la variable de estado no

In the one-year simulations, each parameter in general showed effects lower than $\pm 30\%$. A negative effect means that the amount of organisms of an age-class is lower than the standard and a positive effect, that it is higher.

The 10% increase of the recruitment did not cause any effect in the one-year simulation since it had not yet been added and interacted. However, in the ten-year simulation, changes of around +150% were commonly found.

Of all the parameters employed in the sensitivity analysis, the initial age structure is the one that presented the greater variations for all the age-classes. This is significant since the age structure is precisely the state variable where all the changes and combined effects are registered. That is, it individually causes the most notable effect (up to +21 with a 10% rise), and it is also the parameter that receives the changes of the other randomly varying parameters. This produces that the synergistic effects gain a big weight in the simulations of the suggested model.

When K was increased 10%, the effects were positive or negative depending on the age-class and the fishing scenario. In general, they were negative (median = -9%) for age-classes I and II, and positive (less than 2%) for ages III and IV.

The effects were negative for the mortality-related parameters (M , total amount of sets and catch per set of each type), with medians equal to zero for ages I and II, and negative medians (less than 5%) for the rest of the age-classes. The 10% increase of the average weights had positive variations (median = 10%) for ages I and II, and slightly less for the rest of the age-classes.

Figure 6 shows the trend of the total biomass of the yellowfin resource in the Pacific Ocean estimated by CIAT (1997), and the trend of the total biomass obtained with the model. There was no significant statistical evidence to reject the hypothesis that the biomass

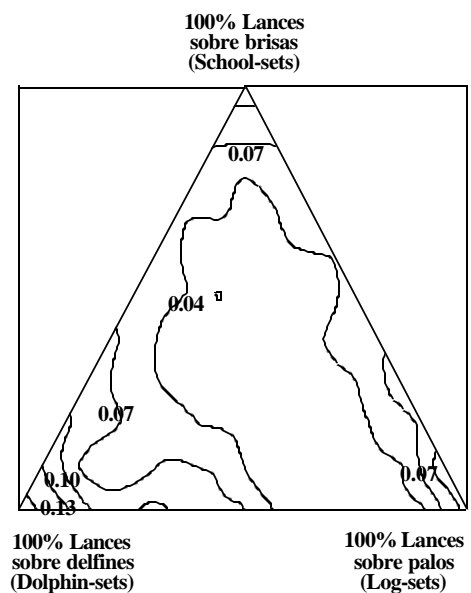


Figura 3. Líneas de probabilidad de éxito para la clase de edad III. Misma explicación que la figura 1.
Figure 3. Success probability contour lines for age-class III. Same explanation as figure 1.

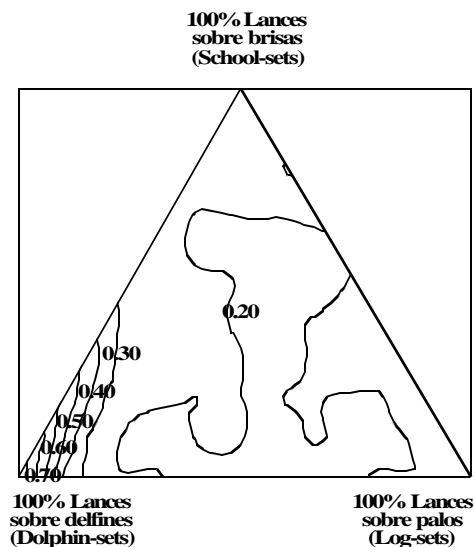


Figura 4. Líneas de probabilidad de éxito para la biomasa total. Misma explicación que la figura 1. El criterio fue 50% de la capacidad de carga ambiental de 600,000 t.
Figure 4. Success probability contour lines for total biomass. Same explanation as figure 1. The criterion was 50% of the environmental carrying capacity of 600,000 t.

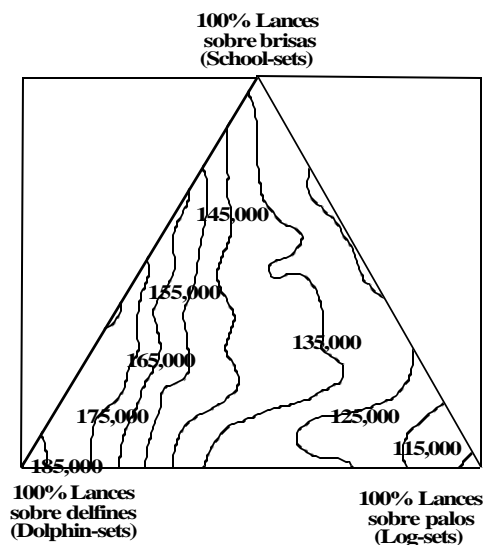


Figura 5. Líneas de contorno de captura total (toneladas) para los diferentes escenarios de explotación.
Figure 5. Total catch contour lines (tons) for the different fishing scenarios.

varía solamente dependiendo del parámetro elegido, sino también dependiendo de la clase de edad y de la combinación de lances. Cuando se realizaron simulaciones de diez años, los resultados llegaron a mostrar grandes diferencias en algunas clases de edad y para algunas combinaciones de lances.

En las simulaciones de un año, cada parámetro mostró en general variaciones menores que $\pm 30\%$. Un efecto negativo significa que la cantidad de organismos de una clase de edad es menor al estándar y un efecto positivo, que es mayor.

El incremento de 10% en el reclutamiento no causó variación en las simulaciones de un año debido a que aún no había sido añadido e interactuado. Sin embargo, en las simulaciones de diez años, fueron comunes cambios de hasta +150%.

De todos los parámetros empleados en el análisis de sensibilidad, la estructura de edad es la que presentó los mayores cambios para todas

obtenidas con el modelo fue similar a la que se estimó por el CIAT, por lo que se considera que son estadísticamente similares. El análisis se realizó con una prueba *t* de Student para muestras dependientes con un nivel de confianza del 95%.

DISCUSSION

Despite the big variation ranges of the parameters due to the existent uncertainty, a clear constant pattern can be observed in the success probability contour lines. In the natural system it is possible that after several years the parameters have a high value, or low, or a combination of the multiple existent possibilities. However, the 400 iterations done cover many, if not all, of these possibilities, and give as results success probabilities with clear trends.

The sensitivity analysis allowed us to obtain information about the behavior and relative importance of the parameters involved in

las clases de edad y de manera más consistente en todos los diagramas ternarios. Esto es significativo, ya que es precisamente la estructura de edad la variable de estado en donde se registran todos los cambios y efectos combinados de todas las demás variables. Es decir, individualmente causa el efecto más notable (mediana de hasta +21 con un incremento de 10%, consistente en la mayoría de las estrategias de pesca para casi todas las clases de edad); también es el parámetro que recibe los cambios de los otros parámetros con variación aleatoria. Esto produce que los efectos sinérgicos tengan un gran peso en las simulaciones del modelo.

Cuando K se incrementó en un 10%, las variaciones fueron positivas o negativas dependiendo de la clase de edad y del escenario de explotación. En general, fueron negativas (mediana = -9%) para las clases de edad I y II, y positivas (menores que 2%) para las clases de edad III y IV.

Los efectos fueron negativos para los parámetros relacionados con la mortalidad (M , total de lances y captura por lance para los tres tipos de lances), con medianas iguales a cero para las edades I y II, y medianas negativas (menores que 5%) para las clases de edad restantes. El incremento de 10% en los pesos promedio tuvo variaciones positivas (mediana = 10%) para las clases de edad I y II, y ligeramente menores para las restantes.

La figura 6 muestra la tendencia de la biomasa total del recurso atún aleta amarilla en el Pacífico oriental estimada por la CIAT (1997) y la tendencia de la biomasa total obtenida por el modelo. Se observó que no existen evidencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis de que la biomasa obtenida del modelo fuera igual a la estimada por la CIAT, por lo que se considera que son similares estadísticamente. El análisis se realizó con una prueba t de Student para muestras dependientes al 95% de confianza.

the model. The results suggest that the system behaves in a very complex manner when the uncertainty is involved.

Of all the parameters used in the sensitivity analysis, the age structure is the one that presented the greater variations for all the age-classes. It is precisely the age structure that is the parameter that can be somehow affected or manipulated by the fishing effort, through the combination of the three different sets. If the fishing effort is directed towards a particular set, then a particular age-class or two of them are particularly affected. So, depending on the combination of the different types of sets, the success probabilities are higher or lower for a given age-class.

Based on the triangular diagrams, in order to have greater success probability values for age-classes I, II and III, and for the total biomass, then the combination of sets must be strongly dominated by dolphin-sets. These fishing strategies assure, according to the model, that the age-classes that sustain the fishery have a certain "health" level together with the total biomass, achieving greater total catches. If the combination of sets contains a high percentage of log-sets or school-sets, then total biomass and the age-classes that sustain the fishery have low success probability values and the total catches are much lower.

If the fishing scenario has to contain a considerable percentage of non-dolphin-sets due to market, political or other circumstances, then the combination should contain school-sets rather than log-sets. A minimum amount of log-sets is recommended.

The combination of sets where dolphin-sets dominate can be justified by the argument that it is always better for a given fishery to catch older organisms. Catching older organisms means greater lengths and weights, compared to very young organisms (almost recruits). Joseph (1994) and CIAT (1995) state that fishermen should try to capture organisms

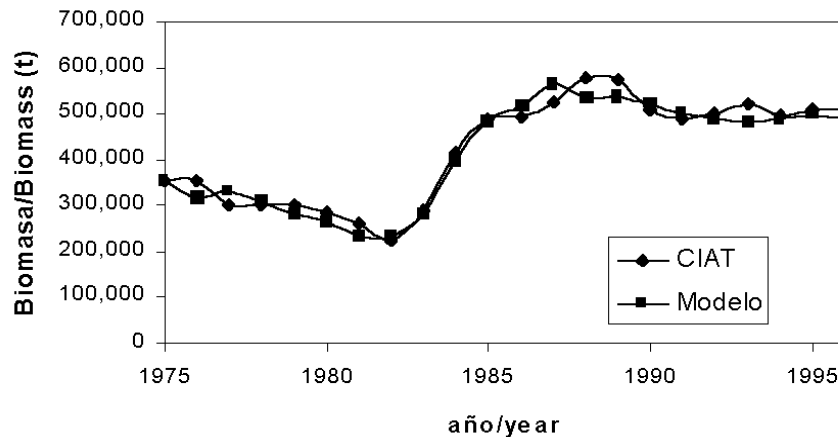


Figura 6. Biomasa total de atún aleta amarilla, según CIAT (1997) y la obtenida por el modelo.
Figure 6. Total biomass of the yellowfin tuna, according to CIAT (1997) and that obtained by the model.

DISCUSIÓN

A pesar de los amplios intervalos de variación de los parámetros debido a la incertidumbre existente, se puede observar un patrón claro y constante en las líneas de contorno de probabilidad de éxito. En el sistema natural puede ocurrir que a lo largo de varios años los parámetros tengan valores altos, bajos o una combinación de las múltiples posibilidades existentes. Sin embargo, las 400 iteraciones realizadas cubren muchas, si bien no todas, de dichas posibilidades y dan como resultados probabilidades de éxito con tendencias claras.

El análisis de sensibilidad permitió obtener información sobre el comportamiento e importancia relativa de los parámetros involucrados en el modelo. Los resultados sugieren que el sistema se comporta de una manera compleja cuando la incertidumbre está involucrada.

De todos los parámetros empleados en el análisis de sensibilidad, la estructura de edad es la que presentó las mayores variaciones para todas las clases de edad. La estructura de edad

close to the “critical size or age”, where there is a balance between the loss of biomass due to natural mortality and the gain by growth. The greatest yield per recruit can be achieved if all the fishing effort is directed almost exclusively towards dolphin-sets (Joseph, 1994).

In the model used, the social and industrial demand for the constant supply of the product (constant catches) throughout the ten years simulated was not considered. If the amount of total sets had to be increased to satisfy the product demands, the catch could be increased according to the capacity of the stock. This would lower even more the success probabilities for the fishing scenarios where the school-sets or log-sets are significantly represented. Such a probability lowering would not be so dramatic for fishing scenarios where the dolphin-sets dominate, because they themselves represent the best management strategies to guarantee a good “health” of the resource. However, a safety limit of amount of sets would have to be established to continue with the highest possible success probability values.

es precisamente el parámetro que puede ser de alguna manera afectado o manipulado por el esfuerzo pesquero, a través de la combinación de los tres tipos de lances. Si el esfuerzo pesquero es dirigido hacia un lance en particular, entonces una o dos clases de edad son especialmente afectadas. Por lo tanto, dependiendo de la combinación de los diferentes tipos de lances, las probabilidades de éxito para una clase de edad dada son mayores o menores.

Basado en los diagramas ternarios, para obtener altas probabilidades de éxito para las clases de edad I, II y III, y para la biomasa total, la combinación de lances debe estar fuertemente dominada por lances sobre delfines. Dichas estrategias de pesca aseguran, de acuerdo con el modelo, que las clases de edad que soportan a la pesquería tengan un cierto nivel de "salud", junto con la biomasa total, registrando mayores capturas totales. Si la combinación de lances contiene un alto porcentaje de lances sobre palos o brisas, entonces la biomasa total y las clases de edad que sustentan a la pesquería tienen bajas probabilidades de éxito, y las capturas totales son mucho menores.

Si los escenarios de explotación deben contener un considerable porcentaje de lances no asociados a delfines debido a cuestiones de mercado, política u otras, entonces la combinación debe contener, de acuerdo con el modelo, lances sobre brisas en lugar de lances sobre palos. Es recomendable tener una mínima cantidad de lances sobre palos.

La combinación de lances dominados por lances sobre delfines puede ser justificada por el argumento de que siempre es mejor en una pesquería la captura de organismos mayores. La captura de organismos mayores significa mayores longitudes y pesos, comparado con organismos jóvenes (casi reclutas). Joseph (1994) y CIAT (1995) mencionan que se debe tratar de capturar organismos cercanos a "la talla o edad crítica", en donde existe un balance

Punsly *et al.* (1994) predicted a decrease of about 25% of the yellowfin tuna catches if all the fishing effort was redirected towards non-dolphin-sets, compared to a scenario with almost a complete dolphin-set dominance. Our results predict at least a 38% decrease if all the effort is redirected towards log-sets, and a decrease of at least 27% if it is redirected towards school-sets, with respect to a scenario with 100% dolphin-sets. That is, a mean decrease of about 32%. Although the catches of skipjack and other related species could increase, the "health" of the yellowfin tuna would be endangered due to the very low success probability values. This is without considering that the population dynamics of the other organisms are not completely understood (Punsly *et al.*, 1994), and they themselves may be endangered as well.

There is an increasing concern with the incidental catches and discards in all fisheries worldwide. The discards in the yellowfin tuna fishery are greater in school-sets and log-sets than in dolphin-sets (Joseph, 1994). Since most catch statistics are landed catches, in fishery models discards are usually not considered. The model used the catch data from CIAT and, therefore, does not account for the loss of organisms (generally recruits or very young tunas) that have to be returned dead to the sea since they are worthless due to their minimum industrial yield. These discards actually would lower even more the success probability values for combination of sets where log-sets and school-sets predominate, endangering the resource's "health". On the other hand, log-sets and school-sets have sharks, billfishes, marine turtles, diverse fishes and many other organisms as incidental catches, whereas dolphin-sets cause the incidental death of dolphins and a few other organisms. This has brought up a controversy that questions the effect of the fishery on the ecosystem depending on the type of set performed (Alverson *et al.*, 1994; Hall, 1996).

entre la pérdida de biomasa debido a la mortalidad natural y la ganancia por crecimiento. El más alto rendimiento por recluta se puede alcanzar si todo el esfuerzo pesquero es dirigido hacia lances sobre delfines casi exclusivamente (Joseph, 1994).

En el modelo usado, no se contemplaron las demandas sociales y/o industriales de oferta constante de producto (capturas constantes) a lo largo de los diez años simulados. Si la cantidad de lances totales se tuviera que aumentar para satisfacer la demanda del producto, la captura podría aumentar de acuerdo con la capacidad del *stock*. Esto disminuiría aún más las probabilidades de éxito para los escenarios de explotación en donde los lances sobre brisas y palos están representados significativamente. Dicha disminución de las probabilidades de éxito no sería tan dramática para los escenarios de explotación dominados por lances sobre delfines, ya que éstos representan la mejor estrategia de pesca para garantizar una buena "salud" del recurso. Sin embargo, se tendría que implementar un nivel de seguridad para continuar con las más altas probabilidades de éxito posibles.

Punsly *et al.* (1994) predijeron un decremento de alrededor de 25% en las capturas de atún aleta amarilla si todo el esfuerzo pesquero fuera redirigido hacia lances no asociados con delfines, comparado con un escenario con casi completa dominancia de lances sobre delfines. Los resultados obtenidos por el modelo del presente trabajo predicen por lo menos un decremento de 38% si todo el esfuerzo fuera redirigido hacia lances sobre palos y de por lo menos 27% si fuera redirigido hacia lances sobre brisas, con respecto a un escenario de 100% lances sobre delfines. Es decir, un decremento promedio de 32%. Aunque las capturas de barrilete y otras especies relacionadas pudiesen aumentar, la "salud" del *stock* de aleta amarilla pudiera verse en peligro

According to CIAT (1995), the percentage of dolphin-sets has decreased in the last ten years and the percentage of school-sets has increased almost proportionately. Additionally, the use of FADs (fish aggregating devices) has increased enormously in the southern part of the eastern Pacific Ocean. Therefore, actual fishing practices are not located in the higher success probability areas, but are located somewhere with medium-to-low success probability values. Based on the results of the model, to have greater success probabilities and therefore higher probabilities of good "health" of the resource, current fishing strategies should revert the trend of decreasing both the amount and proportion of dolphin-sets.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author acknowledges receipt of a scholarship from the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

English translation by the authors.

debido a las bajas probabilidades de éxito. Esto es sin considerar que la dinámica poblacional de los otros organismos no es entendida completamente (Punsly *et al.*, 1994) y pudieran también verse en peligro.

Actualmente hay un creciente interés en la captura incidental y descarte en las pesquerías mundiales. Los descartes de atunes son mayores en los lances sobre brisas y palos que en los lances sobre delfines (Joseph, 1994). Debido a que las estadísticas de captura son capturas desembarcadas, en los modelos pesqueros usualmente no se consideran los descartes. El modelo utilizó información de capturas de la CIAT y, por lo tanto, no considera la pérdida de organismos (generalmente reclutas o atunes

muy pequeños) que tienen que ser regresados muertos al mar ya que no tienen valor económico debido al mínimo rendimiento industrial. Estos descartes de hecho disminuirían aún más los valores de probabilidad de éxito para las combinaciones de lances en donde los lances sobre palos o brisas predominan, poniendo en peligro la "salud" de la pesquería. Por otro lado, los lances sobre palos y brisas tienen como captura incidental a tiburones, picudos, tortugas marinas, diversos peces y otros organismos, mientras que los lances sobre delfines causan la mortalidad incidental de los delfines y otros pocos organismos. Esto ha causado la controversia que cuestiona el efecto de la pesquería en el ecosistema dependiendo del tipo de lance realizado (Alverson *et al.*, 1994; Hall, 1996).

De acuerdo con CIAT (1995), el porcentaje de lances sobre delfines ha decrecido en los últimos diez años y el porcentaje de lances sobre brisas ha incrementado proporcionalmente. Adicionalmente, se ha incrementado grandemente el uso de FADs (dispositivo agregador de peces) en la parte sur del Océano Pacífico oriental. Por lo tanto, las prácticas pesqueras actuales no se encuentran localizadas en las áreas de mayores probabilidades de éxito, sino en regiones con probabilidades de éxito entre medias y bajas. Basado en los resultados del modelo, para obtener mayores probabilidades de éxito y, por lo tanto, mayores probabilidades de buena "salud" del recurso, las estrategias pesqueras actuales deben revertir la tendencia de decremento tanto en la cantidad como en la proporción de lances sobre delfines.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca-crédito otorgada al primer autor.

REFERENCIAS

- Alverson, D.L., Freeberg, M.H., Murawski, S.A. and Pope, J.G. (1994). A global assessment of fisheries bycatch and discards. FAO Fish. Tech. Paper, 339: 189 pp.
- Browne, J. (1988). The use of Leslie matrices to assess the salmon population of the River Corrib. In: D. Mills and D. Piggins (eds.), Atlantic Salmon: Planning for the Future. Proc. Third International Atlantic Salmon Symposium, Biarritz, France, pp. 275–300.
- CIAT (Inter-American Tropical Tuna Commission/ Comisión Interamericana del Atún Tropical) (1989). Annual Rep. 1988. La Jolla, California, 288 pp.
- CIAT (Inter-American Tropical Tuna Commission/ Comisión Interamericana del Atún Tropical) (1995). Annual Rep. 1994. La Jolla, California, 296 pp.
- CIAT (Inter-American Tropical Tuna Commission/ Comisión Interamericana del Atún Tropical) (1997). Annual Rep. 1995. La Jolla, California, 334 pp.
- Crowder, L.B., Crouse, D.T., Heppell, S.S. and Martin, T.H. (1994). Predicting the impact of turtle excluder devices on loggerhead sea turtle populations. *Ecol. Appl.*, 4(3): 437–445.
- Dreyfus-León, M.J. (1991). Control óptimo de un sistema bioeconómico: La pesquería del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Océano Pacífico oriental. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, Mexico, 80 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (1994). Examen de la situación mundial de las especies altamente migratorias y las poblaciones transzonales. FAO Fish. Tech. Paper, 337: 75 pp.
- Hall, M. (1996). On bycatches. *Rev. Fish Biol. and Fisheries*, 6: 319–352.
- Hall, M. (1998). An ecological view of the tunadolphin problem: Impacts and trade-offs. *Rev. Fish Biol. and Fisheries*, 8: 1–34.
- Hennemuth, R.C. (1961). Year-class abundance, mortality and yield-per-recruit of yellowfin in

- the eastern Pacific Ocean, 1954–1959. *Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull.*, 6(1): 1–51.
- Hilborn, R. and Walters, C.J. (1992). *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty*. Chapman & Hall, New York, 570 pp.
- Howard, A. and Rorres, C. (1987). *Elementary Linear Algebra with Applications*. 1st ed. John Wiley, New York, 789 pp.
- Jensen, A.L. (1995). Simple density-dependent matrix model for population projection. *Ecol. Model.*, 77: 43–48.
- Jensen, A.L. (1996). Density-dependent matrix yield equation for optimal harvest of age-structured wildlife populations. *Ecol. Model.*, 88: 125–132.
- Joseph, J. (1994). The tuna-dolphin controversy in the eastern Pacific Ocean: Biological, economic and political impacts. *Ocean Develop. Int. Law*, 25: 1–30.
- Levin, R.I. and Kirkpatrick, C.A. (1978). *Quantitative Approaches to Management*. International Student Edition. 4th ed. McGraw-Hill International Book Co., Tokyo, 624 pp.
- NRC (National Research Council) (1992). *Dolphins and the Tuna Industry*. National Academic Press, Washington D.C., 176 pp.
- Punsly, R.G., Tomlinson, P.K. and Mullen, A.J. (1994). Potential tuna catches in the eastern Pacific Ocean from schools not associated with dolphins. *Fish. Bull.*, 92(1): 132–143.
- Punt, A.E., Butterworth, D.S. and Penney, A.J. (1995). Stock assessment and risk analysis for the south Atlantic population of albacore *Thunnus alalunga* using an age-structured production model. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 16: 287–310.
- Sharp, G.D. and Francis, R.C. (1976). An energetic model for the exploited yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, population in the eastern Pacific ocean. *Fish. Bull.*, 74(1): 36–51.
- Sóbol, I.M. (1983). *Método de Montecarlo*. Lecciones Populares de Matemáticas. 2da ed. Ed. MIR, Moscú (traducido del ruso por Carlos Vega), 79 pp.
- Wild, A. (1994). A review of the biology and fisheries for yellowfin tuna, *Thunnus albacares* in the eastern Pacific Ocean. In: R. Shomura, J. Majkowski and S. Langi (eds.). *Interactions of Pacific Tuna Fisheries*. FAO Fish. Tech. Paper, 336/2: 52–107.
- Zwanenburg, K.C.T. and Bowen, W.D. (1990). Population trends of the grey seal (*Halichoerus grypus*) in eastern Canada. In: W.D. Bowen (ed.), *Population Biology of Sealworm (Pseudoterranova decipiens) in Relation to its Intermediate and Seal Hosts*. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.*, (222): 185–197.