

**PRODUCTION MODEL ANALYSIS OF YELLOWFIN TUNA IN THE  
EASTERN PACIFIC OCEAN**

by

**Patrick K. Tomlinson**

**CONTENTS**

Introduction.....	320
The model and data.....	321
Results.....	324
Discussion.....	325
Figures.....	326
Tables.....	329
References.....	340

**INTRODUCTION**

When a stock of fish has not been exposed recently to a fishery it is at the maximum size that the environment permits. Lack of food, lack of suitable living space, presence of predators, *etc.*, prevent the stock from growing beyond that maximum. When, over the long run, gains to the stock by recruitment and growth are balanced by losses due to natural mortality the stock is said to be in equilibrium. There may be years of especially favorable environmental conditions, when the stock is greater than average, and years of especially poor environmental conditions, when the stock is less than average, but these can often be ignored when looking at long-term trends. One model that has been used to represent this type of system is called the production model or surplus production model. It has been studied and described by Schaefer (1954 and 1957) and Pella and Tomlinson (1969).

If one or more fishing boats began to fish on a stock the catch per unit of effort (CPUE) (catch per day of searching, for example), which is assumed to be proportional to the size of the stock, would initially be relatively high, as the stock would be at its maximum. The gains to the stock would still be due to recruitment and growth, but the losses to the stock would be due not only to natural mortality, but also to fishing mortality. Thus the stock would be reduced. In response to the reduction in stock the rates of recruitment, growth, and/or natural mortality would change, the gains from the first two exceeding the losses from the third. If the boats stopped fishing this net gain would cause the stock to increase gradually to its original size. As the stock approached that size the rates of recruitment, growth, and/or natural mortality would gradually approach their previous levels until they were the same as before the fishery began. The stock would thus be restored to equilibrium at its maximum size. If the boats continued to fish at the same rate, however, the stock would eventually come into equilibrium with different rates of recruitment, growth, and/or natural mortality and a stock size which was less than the original stock size. The CPUE would still be proportional to the stock size. If there were only a few boats the stock size would be only slightly reduced and the CPUE would be relatively high, but if there were many boats the stock would be considerably reduced and the CPUE would be much lower.

The total catch would be the product of the CPUE and the total effort. If the fishing effort were relatively low modest increases in effort would more than offset the corresponding decreases in CPUE, resulting in greater catches, but at greater levels of effort such would not be the case. At some intermediate level of effort the product would be at its maximum. If the objective of management is to obtain the average maximum sustainable yield (AMSY) of fish the fishing effort should be maintained at that level. If the object is maximum profit the effort should be somewhat less (assuming that the price remains constant), and if the object is maximum employment of fishermen the effort should be somewhat greater. If the effort is less than whatever optimum is selected, the stock is said to be underfished, and if the effort is

greater than that optimum, the stock is said to be overfished. The objective of the IATTC is to maintain the stock at levels capable of producing the AMSYs.

It is easiest to consider the interrelationships of effort, catch, and CPUE for equilibrium conditions, but it must be recognized that such conditions rarely exist. For example, if the stock is at equilibrium near its maximum and the effort is suddenly increased the CPUE will gradually decrease for a period before a new equilibrium point with a lesser CPUE is reached. The catches will be greater during the period of transition than at the new point of equilibrium. Likewise, if the stock is at equilibrium at a low level, due to excessive effort, and the effort is suddenly decreased the CPUE will gradually increase for a period before a new equilibrium point is reached with a greater CPUE. The catches will be less during the period of transition than at the new point of equilibrium.

It is appropriate at this point to examine the applicability and usefulness of production models for the yellowfin resource of the eastern Pacific Ocean (EPO). The previous discussion has dealt with "a stock of fish." None of the stock assessment models would be applicable to the EPO stock unless there is little or no exchange of yellowfin between the EPO and the regions to the west of it. Prior to 1990 production modeling was done only for the Commission's Yellowfin Regulatory Area (CYRA; Figure 1), but, as mentioned by Anonymous (1990: page 48), the staff has decided to carry out analyses based on the assumption that the catches made in the EPO (east of 150°W) come from a single stock. This stock may be a complex mixture with respect to spawning fidelity, but it is assumed that all segments of the stock have the same rates of recruitment, growth, and mortality.

The applicability of production models can be assessed only if (1) there are catch and effort or catch and CPUE data available for a wide range of levels of fishing effort, preferably including periods of both underfishing and overfishing, and (2) the perturbations caused by fluctuations in environmental conditions are not so great as to mask the changes in apparent abundance caused by fluctuations in fishing effort. It will be seen below that data from the EPO are available for a wide range of levels of fishing effort over a long period of time. The effects of environmental conditions have been studied and reviewed in IATTC Annual Reports for previous years. These effects usually balance out over fairly short periods of time, although there is some evidence, which will be discussed later, that the productivity of yellowfin in the EPO has increased in recent years.

## **THE MODEL AND DATA**

The IATTC staff maintains a system of collecting unloading reports for vessels that fish in the EPO, which provide data on the surface catches of tunas, and also abstracts information on catches and effort from the vessel bridge logs, which provides data on where, when, and how these catches were made. It also collects similar statistics from countries whose vessels fish in the EPO but unload their fish in ports where the IATTC does not have offices. Nearly all of the longline catches are in this latter category. The catch data for 1968-1999 are summarized in Table 1. The various data sets can be combined to provide estimates of the total yellowfin catch during each quarter of each year. There was a major shift in the fishing methods starting in 1959, and a substantial increase in the fishing area starting in 1967. For these two reasons, only annual and quarterly catch data for all gears combined for 1968 to 1999 (Table 2) are utilized in this report.

As mentioned above, it is assumed that the CPUE is proportional to the size of the stock. Studies have shown that the CPUE of purse-seine vessels with carrying capacities greater than 363 metric tons (Class-6 PS) satisfies this assumption reasonably well. Using the bridge logs, the catch per day of fishing (CPDF) for Class-6 PS was estimated for each quarter of the 1968-1999 period (Table 3). The quarterly CPDF values are the ratios of quarterly total logged catch of Class-6 PS to the quarterly total logged days of fishing. During some quarters the fishery was regulated, so CPDF data for those quarters were not used in fitting the model. The CPDF values shown in Table 1 were obtained from the total of all usable unregulated Class-6 PS trips within the year. Since the data in Tables 2 and 4 were expanded to the estimated total catch and effort by quarter, and then summed over the year to compute the annual CPDFs in

Table 3, the annual CPDFs in Table 1 differ slightly from those in Table 3. Also, when the CPDF for a quarter was considered to be an unreliable measure of abundance, due to regulations, the effort in Table 4 was estimated with the model. Other time periods, such as months, could have been used, but quarters appear to be adequate for the yellowfin data.

Therefore, there are 32 years of quarterly data, or 128 catch intervals. To clarify the discussion, let

- $ny = 32 =$  number of years of catch data;
- $nq = 4 =$  number of quarters in a year;
- $i = 1, 2, 3, \dots ny;$
- $j = 1, 2, \dots nq;$
- $C_i =$  total annual catch for all gears combined (Table 2) in year  $i$ ;
- $C_{ij} =$  total quarterly catch for all gears combined (Table 2) in year  $i$ , quarter  $j$ ;
- $c_{ij} =$  total logged catch for Class-6 PS in year  $i$ , quarter  $j$ ;
- $d_{ij} =$  total logged days of fishing for Class-6 PS in year  $i$ , quarter  $j$ ;
- $u_{ij} = c_{ij} \div d_{ij} =$  CPDF for Class-6 PS (Table 3) in year  $i$ , quarter  $j$ ;
- $D_{ij} = C_{ij} \div u_{ij} =$  total standardized days fishing (Table 4) in year  $i$ , quarter  $j$ ;
- $t = 0.25$  of a year = length of each quarterly catch interval.

The production model used to represent the yellowfin fishery of the EPO is given by the differential equation

$$dP_t/dt = KP_t^m (P_{max}^{1-m} - P_t^{1-m}) - dC_t/dt \dots \dots \dots (1)$$

where

- $P_t =$  population size at time  $t$ ;
- $P_{max} =$  maximum population size possible (a parameter in the model);
- $K =$  parameter relating to how fast a population grows toward the maximum;
- $m =$  parameter that determines the shape of the growth curve;
- $dP_t/dt =$  growth rate per unit of time at a population size of  $P_t$ ;
- $dC_t/dt =$  catch rate per unit of time at time  $t$  (population size  $P_t$ ).

Equation 1 cannot be used to estimate the unknown parameters, since the catch rate,  $dC_t/dt$ , cannot be measured. However, an approximation to  $dC_t/dt$  can be made by creating catch intervals that are very short in time. The new equation, which approximates Equation 1 sufficiently closely if the catch interval is short enough, is

$$\Delta P_t/\Delta t = KP_t^m (P_{max}^{1-m} - P_t^{1-m}) - \Delta C_t/\Delta t \dots \dots \dots (2)$$

$\Delta C_t = \Delta C_{ij} = C_{ij} \div W =$  a small fraction of the quarterly catch in year  $i$ , quarter  $j$ ;

$\Delta t = t \div W =$  some small fraction of time in year  $i$ , quarter  $j$ .

where  $W =$  some divisor, such as 10, 50, or 100 (the analyses presented in this document used  $W = 10$  for 1968 through 1999).

If  $l = 1, 2, 3, \dots (32)(4)(W) =$  subinterval index, then  $P_l =$  the population size at the beginning of the  $l$ th subinterval,  $\Delta C_l$  the catch during the  $l$ th subinterval, and  $P_f$  is the population size at the end of 1999 [ $f = (128)(W) + 1$ ]. Rewriting Equation 2 in terms of the index  $l$ , the equations for estimating the change in size and the new size are

$$\Delta P_l = [KP_l^m (P_{max}^{1-m} - P_l^{1-m}) - \Delta C_l/\Delta t] \Delta t \dots \dots \dots (3)$$

$$P_{l+1} = P_l + \Delta P_l, l = 1, 2, 3, \dots (128)(W) + 1 \dots \dots \dots (4)$$

If the value of  $P_1$  (population size at the beginning of 1968), and also the parameters  $K$ ,  $m$ , and  $P_{max}$ , were known, then all the other  $P_l$  values could be calculated with Equations 3 and 4. However, these parameter values will not be known. If guesses are made for each parameter, including  $P_1$ , and Equations 3 and 4 are applied, the time series of values of  $P_l$  could be compared to the  $u_{ij}$  (remembering that one of the assumptions is that  $u_{ij}$  is proportional to  $P_{ij}$ ). If one more parameter ( $q$ ) is introduced, the average population size during each quarter is calculated as follows:

$$v = (i - 1)(4W) + (j - 1)(W) + 1 = \text{value of } l \text{ in year } i, \text{ at the beginning of quarter } j;$$

$$z = v + W = \text{value of } l \text{ in year } i, \text{ at the end of quarter } j.$$

$$\bar{P}_{ij} = \sum_v^z P_l \div (W + 1) \dots \dots \dots (5)$$

Then let

$q$  = probability that any given unit of effort will catch any given unit of  $P$ ;

$$\hat{u}_{ij} = (q)(\bar{P}_{ij}) = \text{expected CPDF during year } i, \text{ quarter } j \dots \dots \dots (6)$$

$$\hat{D}_{ij} = C_{ij} \div \hat{u}_{ij} = \text{expected number of days of fishing during year } i, \text{ quarter } j \dots \dots \dots (7)$$

The criterion for deciding which set of guesses of the parameters to use is the minimum sum of squares between the estimated effort ( $D_{ij}$ ) and the expected effort ( $\hat{D}_{ij}$ ) squared. That is,

$$S = \sum_{i=1}^{ny} \sum_{j=1}^{nq} (D_{ij} - \hat{D}_{ij})^2 = \text{minimum} \dots \dots \dots (8)$$

As mentioned earlier, there are quarters in which the  $D_{ij}$  are not reliable. In those cases, the  $D_{ij}$  were set equal to the  $\hat{D}_{ij}$ , which means they did not contribute to  $S$ .

Such a procedure of trial and error would not be possible without a fast computer and a good searching technique. The IATTC staff uses GENP, a FORTRAN program, to do the searching. Pella and Tomlinson (1969) list a FORTRAN program that uses a different criterion for fitting, but there is a sub-routine in that program called MIN that is the same as the routine used in GENP to find a minimum on a surface ( $S$  for different sets of guesses forms a surface of four dimensions, one for each of the parameters  $K$ ,  $q$ ,  $m$ , and  $P_{max}$ ). In practice, it can be very difficult to estimate the parameter  $m$ . Studies of age-structured data have provided an independent estimate of the shape of the production curve (equilibrium catch plotted against number of days of fishing) and the value of  $m = 0.8$  was chosen so that the production curve for the fitted model would have the same shape as the one from the age-structured analysis (Anonymous, 2000). (The value for  $m = 0.8$  is not the same as the value of  $M = 0.8$  which the IATTC staff uses as the natural mortality rate for yellowfin tuna.)

Since the management goal is to achieve the AMSY, and this is equivalent to keeping the effort (number of Class-6 PS days) at some optimum level, it is essential to have equations for obtaining these values from the four parameters given in Equations 1 and 5. The assumptions for the production model imply that the catch can always be kept at a particular value (equilibrium catch) if the effort is kept constant (equilibrium effort). When the equilibrium effort is low, the equilibrium catch will be low. If the equilibrium effort is increased, the catch will increase to some point and then begin to decline. If these equilibrium catches are plotted on the y-axis against the equilibrium efforts on the x-axis, a simple dome-shaped curve will result. The highest point on the dome corresponds to the AMSY and the optimum effort. The equations, in terms of the four estimated parameters, and  $D_e$  = equilibrium effort, are

$$C_e = q D_e P_{max} [K \div (q D_e + K)]^x, \text{ where } x = 1 \div (1 - m) \dots\dots\dots(9)$$

$$D_{opt} = K (1 - m) \div (m q) = \text{optimum number of days (Class-6) fishing} \dots\dots\dots(10)$$

When  $D = D_{opt}$  then  $C_e$  is  $C_{max}$  (the AMSY). Also, the population size will be in equilibrium if  $D$  is in equilibrium, in which case the equation is

$$P_e = P_{max} [K \div (q D_e + K)]^x = \text{population in equilibrium at } D_e \dots\dots\dots(11)$$

When there is no fishing ( $dC_t/dt = 0$ ), and the growth of the population can be calculated by integrating Equation 1. The result is

$$P_t = [P_{max}^{1 - m} - (P_{max}^{1 - m} - P_l^{1 - m}) e^{-K(1 - m)t}]^{1/m} \dots\dots\dots(12)$$

where  $P_l$  = the population size at the beginning,  $x = 1 \div (1 - m)$ , and  $t$  = elapsed time. This is useful for calculating the change in population size from the beginning of an interval with no catch (closed season) to the beginning of the next interval with catch, without using Equations 3 and 4.

### RESULTS

A symmetrical production model ( $m = 2.0$ ) was first applied by Schaefer (1957) with catch, effort, and baitboat CPUE data for the 1934-1955 period, which included a wide range of effort on the underfishing side of the curve. Those data indicated that, for the stock being fished, within the levels of fishing effort for which information was available, the model was useful in predicting the relationship between catch and effort. In 1960 and 1961, for the first time, the effort was greater than the predicted optimum, and in the ensuing years CPUEs and catches were lower, which gave further indication that the model was applicable. The parameters were re-estimated in 1969, using the data for 1934-1967, Class-4 baitboat CPDF, and  $m = 1.3, 1.4,$  and  $2.0$  (Pella and Tomlinson, 1969), and then in 1970 the model was first fitted using Class-3 PS CPDF (Anonymous, 1970). The IATTC staff continued to use Class-3 PS CPDF until 1976, when Class-6 PS CPDF was compared to Class-3 PS (Anonymous, 1976), and since then Class-6 PS CPDF has been used. A variety of values for  $m$  have been utilized in different years, with  $m = 2.0$  and  $m = 0.8$  being compared since 1982 (Anonymous, 1982). CPDF for Class-3 PS was not used after 1982.

The CPDFs for Class-6 PS shown in Table 3 and Figure 2 indicate that the abundance of yellowfin in 1986 was the greatest for any year of the 1968-1999 period. The increase during the mid-1980s was expected, due to the low catches in 1982, 1983, and 1984 that permitted the stock to increase. The decline from 1986 to 1998 was probably due to increasing fishing effort and greater dependence of the fishery on small fish. The CPDFs for 1985-1999 have been even greater than what would have been expected (Figure 2) from the results (Table 5) of an analysis based on data for the earlier period (1968-1983), however. Therefore, new parameters were calculated for the later period (1983-1999). The difference between the two periods was probably caused by (1) above-average recruitment and (2) an increase in fishing on schools of yellowfin associated with dolphins, resulting in larger fish in the catch, which increased the yield per recruitment (YPR).

The following table was calculated for the 63rd meeting of the IATTC, which took place in June 1999, from analyses of age-structured data. These numbers may no longer be the best estimates, but they are indicative of why the parameters estimated by the production model did not remain constant.

Period	Average re- cruitment in millions of fish	Average weight in kilograms	Average YPR in kilograms	Potential catch (EPO) in thousands of metric tons	Average catch (EPO) in thousands of metric tons
1967-1975	66	11.1	2.5	165	167
1976-1984	76	6.9	2.4	182	179
1985-1998	92	11.4	3.0	276	271

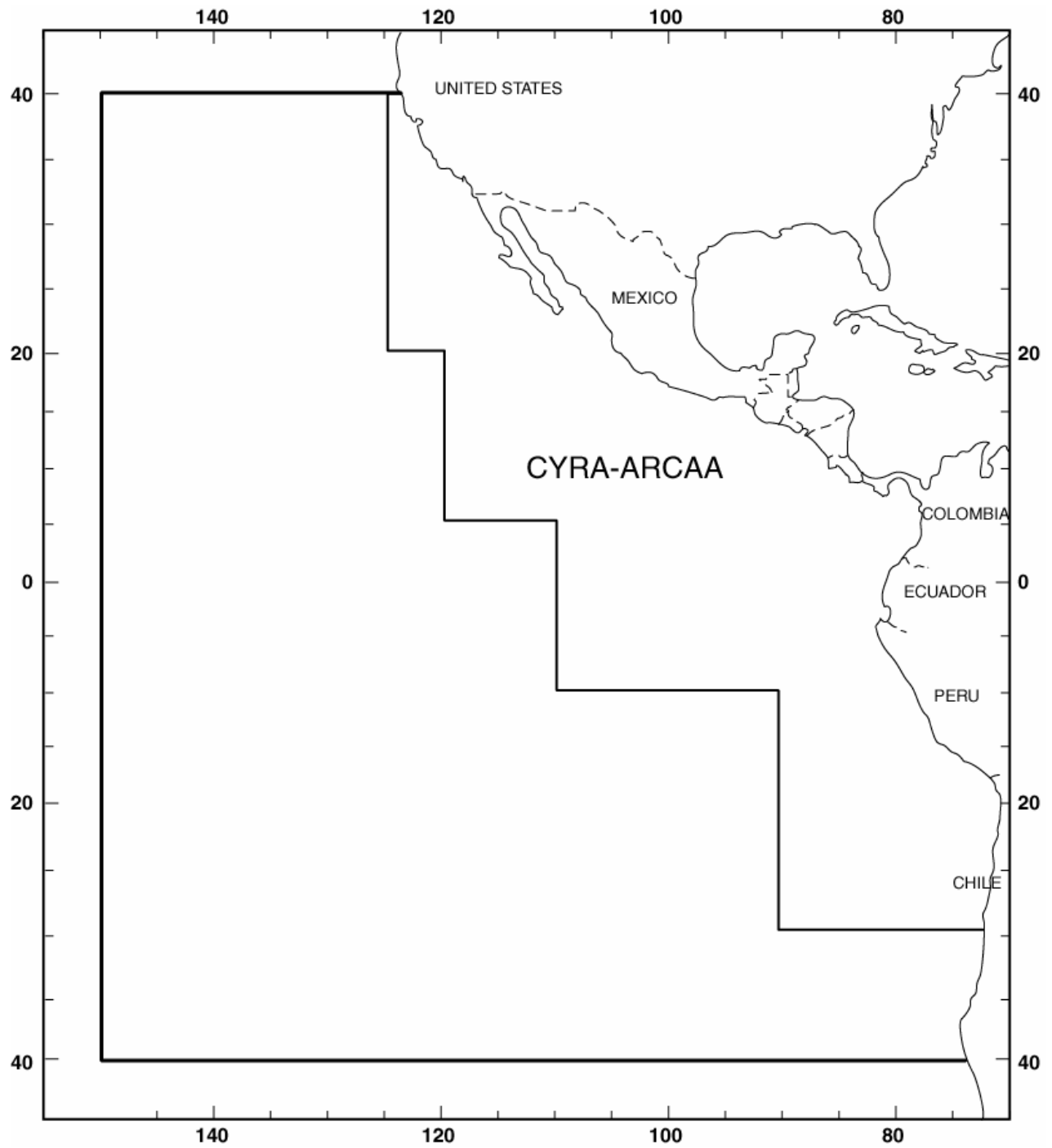
The lesser average YPR during the 1976-1984 period, as compared to that of 1967-1975, was offset by greater average recruitment, and the potential catch remained about the same. During the 1985-1998 period, however, both the average YPR and the average recruitment were greater than in previous years, resulting in increased stock production. Since the average catches during the first two periods were roughly the same, fitting the production model to the catch and effort data for 1968-1983 can be accomplished without difficulty. As both the recruitment and the YPR increased during the last period, however, it has become impossible to explain the relationship between catch and effort by assuming that the stock parameters (Table 5) for the late period remained unchanged relative to the early period.

In Figure 2, the observed CPDFs are compared to the expected CPDFs computed from the model, using  $m = 0.8$  and fitting the data for the two different time periods. It can be seen that they have corresponded fairly well, on average, over most of the years shown, except where the expected values for the early period are extended to 1987. In specific years there are wide divergences, but since the production model is essentially a regression model that assumes average conditions it will not reflect the effects of large, short-term changes in growth rates.

Based on the estimation for the late period, the current level of about 26 thousand Class-6 PS days exceeds that which will produce the AMSY, which is closer to 20 thousand days. The catch and effort data for 1987 to 1999 contain very little variation, with the effort averaging 22 thousand days and catch averaging 276 thousand metric tons. These numbers are both close to the optimum, but with so little range in the level of effort it is certain that the parameter estimates are not very precise.

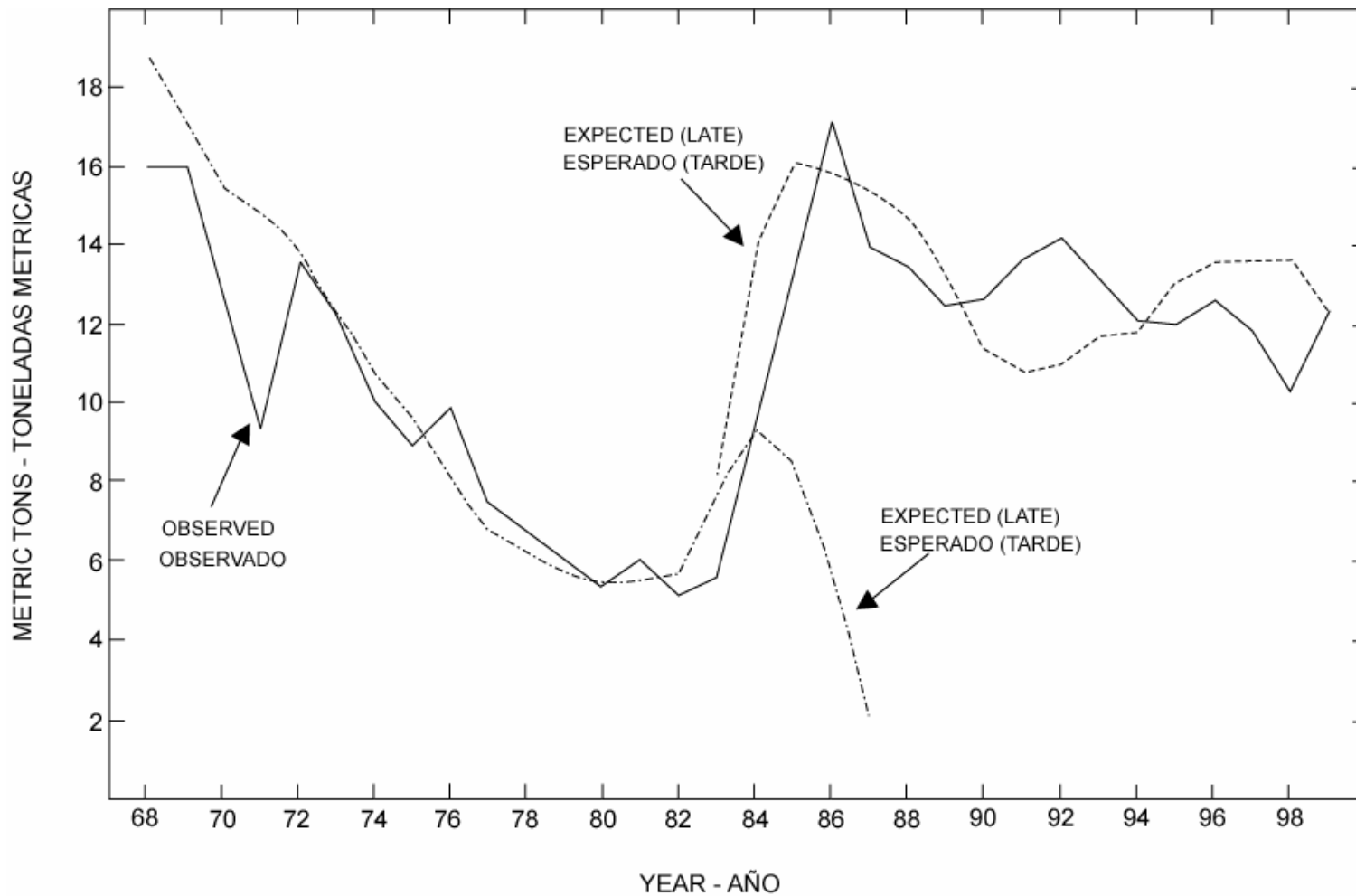
## DISCUSSION

A great deal of caution should be exercised when it comes to using a production model for interpreting the relationship between current effort and the stock's potential for sustaining a certain catch. Yellowfin are highly segregated into groups that are not randomly distributed over the range of the stock. First, they are schooling fish that have demonstrated a tendency to school by size (or age) and the areal distributions of the schools of fish of different sizes are not uniform. These different aggregations are vulnerable to different fishing strategies, such as looking for fish associated with dolphins (large fish), fish associated with floating objects (small fish), or fish in unassociated schools (small to medium fish). The relative abundances of the various types of schools will influence the fishermen's searching strategy. Also, the price received for fish of different sizes will have an impact on the method of fishing. The size of fish caught, as well as the total level of effort, will determine the YPR. The production model curve of catch *versus* effort depends only on the level of effort. Therefore, as abundance and price vary, the production curve should vary, and a simple model, which does not take into account the size distribution of the fish caught, will fail. It does, however, give a reasonably simple method to judge whether the effort level is in the vicinity of the optimum. For example, Table 5 demonstrates the possibility that the AMSY increased by about 50 percent between the early period and the late period, while optimum effort declined. Considering the shape of the curves in Figure 3, it is not obvious that the optimum effort changed, but quite easy to imagine that the AMSY did indeed increase.



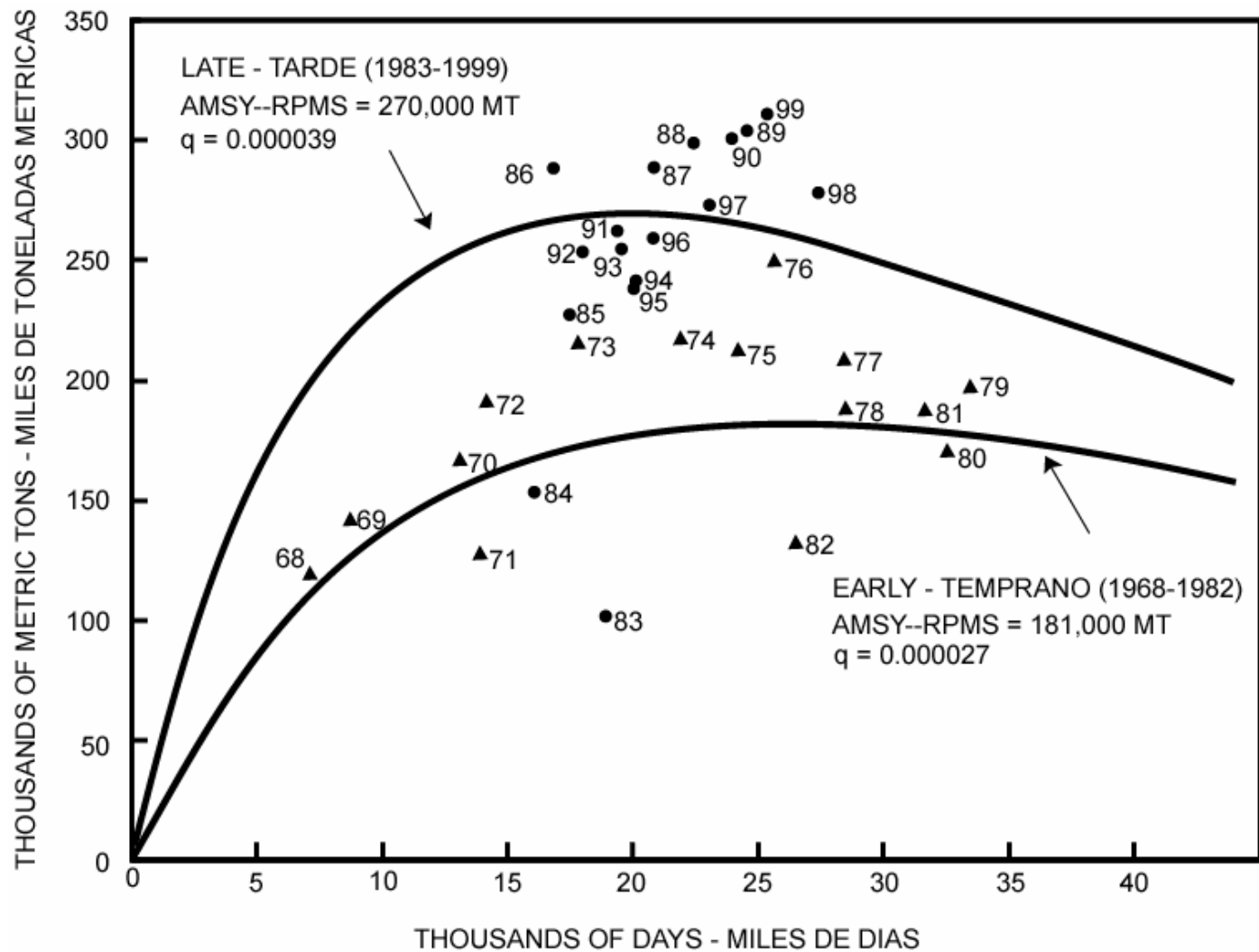
**FIGURE 1.** The eastern Pacific Ocean (EPO) and the Commission's Yellowfin Regulatory Area (CYRA).

**FIGURA 1.** El Océano Pacífico oriental (OPO) y el Area Reglamentaria de la Comisión para el Aleta Amarilla (ARCAA).



**FIGURE 2.** Observed and predicted catches per day of fishing (CPDFs) of yellowfin in the EPO during 1968-1999, for the generalized stock production (asymmetrical) model with  $m$  set at 0.8.

**FIGURA 2.** Capturas por día de pesca (CPDPs) observadas y predichas de aleta amarilla en el OPO durante 1968-1999, para el modelo generalizado de producción (asimétrico) con  $m$  fijado en 0,8.



**FIGURE 3.** Relationship between catch and effort for yellowfin in the EPO during 1968-1999 with  $m$  set at 0.8.  
**FIGURA 3.** Relación entre captura y esfuerzo para aleta amarilla en el OPO durante 1968-1999 con  $m$  fijado en 0,8.

**TABLE 1.** Quotas, catches, and catches per day of fishing (CPDFs) (unregulated Class-6 purse seiners) for yellowfin in the EPO. The quotas and catches are expressed in thousands of metric tons and the CPDFs in metric tons per day. The quotas apply only to the Commission's Yellowfin Regulatory Area (CYRA).

**TABLA 1.** Cuotas, capturas, y capturas por día de pesca (CPDP) (cerqueros de la Clase 6 no reglamentados) para el aleta amarilla en el OPO. Se expresan las cuotas y las capturas en miles de toneladas métricas y las CPDP en toneladas métricas por día. Las cuotas se aplican al Area Reglamentaria de la Comisión para el Aleta Amarilla (ARCAA) solamente.

Year	CYRA		EPO			CPDF
	Quota	Surface catch	Surface catch	Longline catch	Total catch	
Año	ARCAA		OPO			CPDP
	Cuota	Captura de superficie	Captura de superficie	Captura palangrera	Captura total	
1968	84.4	100.9	102.0	16.5	118.5	14.9
1969	108.9	111.4	128.9	18.0	146.9	16.5
1970	108.9	127.8	155.6	14.0	169.6	13.3
1971	127.0 + (2 x 9.1) <sup>1</sup>	102.2	122.8	8.0	130.8	9.5
1972	108.9 + (2 x 9.1) <sup>1</sup>	136.5	177.1	16.3	193.4	14.1
1973	117.9 + (3 x 9.1) <sup>1</sup>	160.3	205.3	12.9	218.1	12.1
1974	158.8 + (2 x 9.1) <sup>1</sup>	173.2	210.4	10.0	220.3	9.8
1975	158.8 + (2 x 9.1) <sup>1</sup>	158.8	202.1	13.4	215.5	8.8
1976	158.8 + (2 x 9.1) <sup>1</sup>	190.2	236.3	15.9	252.3	9.7
1977	158.8 + (18.1 + 13.6) <sup>1</sup>	182.7	198.8	12.4	211.2	7.8
1978	158.8 + (18.1 + 13.6) <sup>1</sup>	166.0	180.6	10.6	191.2	6.7
1979	158.8 + (18.1 + 13.6) <sup>1</sup>	175.9	189.7	10.3	200.0	5.9
1980	149.7 + (total of 40.8) <sup>2</sup>	132.0	159.4	13.2	172.6	5.3
1981	149.7 + (3 x 13.6) <sup>2</sup>	157.7	181.8	8.4	190.2	6.0
1982	145.1 + (2 x 13.6) <sup>2</sup>	106.9	125.1	9.8	134.8	5.1
1983	154.2 + (2 x 13.6) <sup>2</sup>	82.0	94.3	10.3	104.6	5.5
1984	147.0 + (2 x 13.6) <sup>2</sup>	128.6	145.1	10.5	155.5	9.6
1985	157.9 + (18.1 + 9.1) <sup>2</sup>	192.5	217.0	12.6	229.6	13.1
1986	158.8 + (2 x 13.6) <sup>2</sup>	228.1	268.3	22.5	290.8	17.1
1987	None--Ninguna	248.2	272.2	18.9	291.1	14.0
1988	172.4 + (2 x 27.2) <sup>2</sup>	267.6	288.4	13.1	301.5	13.4
1989	199.6 + (2 x 27.2) <sup>2</sup>	242.3	289.4	16.7	306.0	12.4
1990	181.4 + (5 x 18.1) <sup>2</sup>	226.5	273.3	30.0	303.3	12.6
1991	190.5 + (4 x 18.1) <sup>2</sup>	219.5	239.1	25.4	264.5	13.6
1992	190.5 + (4 x 18.1) <sup>2</sup>	221.3	239.8	16.1	255.9	14.2
1993	226.8 + (4 x 22.7) <sup>2</sup>	213.3	232.1	24.6	256.6	13.1
1994	226.8 + (4 x 22.7) <sup>2</sup>	197.1	219.3	24.7	244.0	12.0
1995	213.2 + (3 x 18.1) <sup>2</sup>	196.2	223.8	16.9	240.7	11.9
1996	213.2 + (3 x 18.1) <sup>2</sup>	218.0	250.1	11.9 <sup>4</sup>	262.0 <sup>4</sup>	12.7 <sup>4</sup>
1997	220.0 + (3 x 15.0) <sup>2</sup>	213.3	256.8	15.2 <sup>4</sup>	273.0 <sup>4</sup>	11.8 <sup>4</sup>
1998	210.0 + (3 x 15.0) <sup>1,3</sup>	238.4	266.2	14.6 <sup>4</sup>	280.8 <sup>4</sup>	10.2 <sup>4</sup>
1999	225.0 + (3 x 15.0) <sup>1,3</sup>	268.7 <sup>4</sup>	298.3 <sup>4</sup>	14.9 <sup>4</sup>	313.2 <sup>4</sup>	12.3 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> indicates increments to be added at the discretion of the Director--señala incrementos que pueden ser añadidos a discreción del Director

<sup>2</sup> approved, but not implemented--aprobada, pero no puesta en vigor

<sup>3</sup> only one of the three increments was implemented--solamente uno de los tres incrementos entró en vigor.

<sup>4</sup> preliminary estimates--estimaciones preliminares

**TABLE 2.** Estimated catches of yellowfin, in metric tons, for all fishing methods combined.**TABLA 2.** Captura estimada de aleta amarilla, en toneladas métricas, por todos los métodos de pesca combinados.

Year	Quarter 1	Quarter 2	Quarter 3	Quarter 4	Total
Año	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Total
1967	33571.8	35381.7	15200.9	7102.4	91256.8
1968	36407.4	49917.6	19165.3	13008.9	118499.2
1969	58066.6	49484.3	20336.8	19003.5	146891.2
1970	79100.3	46528.5	26801.1	17180.9	169610.8
1971	60332.4	30975.3	20454.3	19063.9	130826.0
1972	86114.8	46265.2	35786.6	25253.3	193419.8
1973	74162.6	75582.5	35282.6	33093.0	218120.6
1974	71083.5	71890.4	39620.8	37721.6	220316.2
1975	70252.9	62530.2	40573.8	42184.3	215541.2
1976	71798.1	77976.6	58761.7	43723.9	252260.3
1977	45031.6	81552.0	55440.1	29226.5	211250.2
1978	53876.9	64617.3	37030.5	35652.9	191177.6
1979	61542.5	48903.5	44942.4	44586.1	199974.5
1980	56756.9	49876.8	39756.9	26193.3	172583.9
1981	45745.9	52658.5	48852.5	42982.4	190239.3
1982	44215.5	35944.7	27610.5	27069.4	134840.1
1983	19796.9	29110.2	22295.0	33353.4	104555.5
1984	23117.6	38855.0	34560.7	59004.5	155537.8
1985	51384.0	65947.9	54869.6	57399.0	229600.5
1986	90071.0	79593.3	69800.8	51336.5	290801.6
1987	70719.2	82857.1	77418.1	60121.7	291116.1
1988	64523.8	84573.5	67378.9	85001.1	301477.3
1989	73017.1	80724.9	71727.9	80569.4	306039.3
1990	82362.6	91595.0	73801.5	55546.5	303305.6
1991	68861.5	80060.2	60610.1	54963.3	264495.1
1992	62239.0	81531.6	58756.3	53373.5	255900.4
1993	58971.4	70006.2	62613.8	65057.9	256649.3
1994	77747.8	62336.4	52688.6	51189.1	243961.9
1995	57774.5	79668.9	50065.5	53163.9	240672.8
1996 <sup>1</sup>	79360.1	70757.8	62519.7	49340.2	261977.8
1997 <sup>1</sup>	81972.2	82187.1	61917.9	46953.4	273030.6
1998 <sup>1</sup>	71093.1	83555.4	74263.6	51906.5	280818.6
1999 <sup>1</sup>	87610.3	97760.4	78312.1	49543.6	313226.4

<sup>1</sup> preliminary estimates--estimaciones preliminares

**TABLE 3.** Estimated catch per day of fishing (CPDF) for Clase-6 purse seiners.**TABLA 3.** Captura por día de pesca (CPDP) por cerqueros de la Clase-6.

Year	Quarter 1	Quarter 2	Quarter 3	Quarter 4	Annual
Año	Trimestre	Trimestre	Trimestre	Trimestre	Anual
1968	16.2	14.8	18.1 <sup>1</sup>	18.2 <sup>1</sup>	16.0
1969	13.5	19.7	16.6 <sup>1</sup>	16.7 <sup>1</sup>	16.0
1970	15.3	13.3	14.7	6.2	12.8
1971	10.5	8.4	11.9	6.7	9.3
1972	16.6	12.7	12.1	10.0	13.5
1973	10.1	14.9	13.3	11.3	12.1
1974	9.8	10.0	9.0	11.8	10.0
1975	9.9	6.6	10.0	11.2	8.9
1976	9.4	8.9	10.8	11.3	9.8
1977	5.6	11.5	8.3	4.3	7.4
1978	6.0	7.3	6.7	6.9	6.7
1979	6.5	5.4	5.3	6.9	6.0
1980	6.7	5.1	5.2	4.0	5.3
1981	5.2	6.0	7.1	5.8	6.0
1982	6.0	5.1	4.8	4.2	5.1
1983	4.0	5.8	4.5	8.3	5.5
1984	7.3	8.6	9.4	12.1	9.6
1985	13.5	13.8	13.1	11.9	13.0
1986	20.9	16.3	15.7	15.3	17.1
1987	17.6	16.1	13.7	9.8	13.9
1988	12.5	14.3	11.6	15.0	13.4
1989	11.4	15.5	11.6	11.6	12.4
1990	12.9	14.7	12.7	9.9	12.6
1991	13.5	17.4	14.2	10.0	13.6
1992	14.0	17.5	12.3	12.6	14.1
1993	13.4	13.7	11.6	13.5	13.0
1994	12.8	11.6	11.2	12.4	12.0
1995	10.9	15.2	10.5	10.9	11.9
1996	16.5	14.0	11.9	8.5	12.5
1997	14.5	13.7	10.8	8.1	11.8
1998	9.5	11.4	9.9	10.0	10.2
1999	11.9	13.4	12.0	11.5	12.3

<sup>1</sup> estimated from the model--estimado del modelo

**TABLE 4.** Estimated days of fishing, standardized to Class-6 purse seiners.**TABLA 4.** Días de pesca estimados, estandarizados a cerqueros de la Clase 6.

Year	Quarter 1	Quarter 2	Quarter 3	Quarter 4	Total
Año	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Total
1968	2243.2	3377.4	1056.8 <sup>1</sup>	715.2 <sup>1</sup>	7392.6
1969	4314.0	2506.8	1228.3 <sup>1</sup>	1139.2 <sup>1</sup>	9188.3
1970	5159.8	3498.4	1824.4	2753.3	13235.9
1971	5762.4	3700.8	1723.2	2841.1	14027.5
1972	5190.8	3648.7	2955.1	2522.8	14317.4
1973	7306.7	5059.1	2662.8	2926.0	17954.6
1974	7290.6	7203.4	4382.8	3204.9	22081.7
1975	7074.8	9445.6	4049.3	3783.3	24353.0
1976	7670.7	8761.4	5466.2	3862.5	25760.8
1977	8027.0	7116.2	6655.5	6749.8	28548.5
1978	9039.7	8851.7	5543.5	5174.6	28609.5
1979	9526.7	9089.9	8495.7	6480.5	33592.8
1980	8522.1	9818.3	7704.8	6631.2	32676.4
1981	8814.2	8791.1	6861.3	7347.4	31814.0
1982	7369.3	7075.7	5692.9	6491.5	26629.4
1983	4999.2	5027.7	4987.7	4018.5	19033.1
1984	3153.8	4491.9	3680.6	4872.4	16198.7
1985	3814.7	4768.5	4182.1	4831.6	17596.9
1986	4315.8	4871.1	4440.3	3359.7	16986.9
1987	4013.6	5162.4	5638.6	6134.9	20949.5
1988	5166.0	5918.4	5803.5	5674.3	22562.2
1989	6382.6	5218.2	6167.5	6933.7	24702.0
1990	6399.6	6222.5	5820.3	5639.2	24081.6
1991	5104.6	4603.8	4280.4	5512.9	19501.7
1992	4442.5	4669.6	4788.6	4222.6	18123.3
1993	4404.1	5102.5	5374.6	4815.5	19696.7
1994	6069.3	5392.4	4704.3	4118.2	20284.2
1995	5276.2	5234.5	4763.6	4886.4	20160.7
1996	4795.2	5072.2	5258.2	5791.1	20916.7
1997	5668.9	5990.3	5738.5	5761.2	23158.9
1998	7475.6	7361.7	7471.2	5206.3	27514.8
1999	7343.7	7295.6	6536.9	4323.2	25499.4

<sup>1</sup> estimated from the model--estimado del modelo

**TABLE 5.** Parameters for two time periods.

**TABLA 5.** Parámetros para dos períodos.

Parameter	Early period (1968, 1st quarter through 1983, 2nd quarter)	Late period (1983, 3rd quarter through 1999, 4th quarter)
Parámetro	Período anterior (1968, 1 <sup>er</sup> trimestre hasta 1983, 2 <sup>do</sup> trimestre)	Período posterior (1983, 3 <sup>er</sup> trimestre hasta 1999, 4 <sup>to</sup> trimestre)
$P$ maximum— $P$ máxima <sup>1</sup>	813,205.6	1,084,356.5
initial $P$ — $P$ inicial <sup>2</sup>	727,710.1	205,494.4
$K$	2.723117	3.045044
$m$	0.8	0.8
$q$	0.000027	0.000039
optimum effort—esfuerzo óptimo <sup>3</sup>	25,121.0	19,519.5
maximum catch—captura máxima <sup>4</sup>	181,409.1	270,493.3

<sup>1</sup> average maximum population size, in metric tons, with no fishing--tamaño promedio máximo de la población, en toneladas métricas, sin pesca

<sup>2</sup> population size, in metric tons, at the beginning of the period--tamaño de la población, en toneladas métricas, al principio de período

<sup>3</sup> effort, in Class-6 PS days, that would produce the maximum catch--esfuerzo, en días de Clase 6 PS, que produciría la captura máxima

<sup>4</sup> average maximum sustainable yield, in metric tons, with effort at the optimum—rendimiento promedio máximo sostenible, en toneladas métricas, con el esfuerzo óptimo

# ANALISIS DE MODELO DE PRODUCCION DEL ATUN ALETA AMARILLA EN EL OCEANO PACIFICO ORIENTAL

por

Patrick K. Tomlinson

## INDICE

Introducción .....	334
El modelo y los datos .....	335
Resultados .....	338
Discusión .....	339
Figuras .....	326
Tablas .....	329
Referencias .....	340

## INTRODUCCION

Un stock de peces que no ha sido expuesto recientemente a la pesca está a la magnitud máxima permitida por las condiciones ambientales; su mayor desarrollo se ve impedido por los depredadores, por falta de alimento o de espacio vital adecuado, etcétera. Se dice que el stock está en equilibrio cuando el incremento por reclutamiento y crecimiento es compensado a la larga por las pérdidas causadas por la mortalidad natural. Es posible que ocurran años con condiciones ambientales particularmente favorables, en los que la magnitud del stock es superior al promedio, y años con condiciones ambientales particularmente pobres, en los que será inferior al mismo, pero generalmente se puede hacerles caso omiso al analizar las tendencias a largo plazo. Un modelo usado para representar este tipo de sistema es llamado el modelo de producción o de producción excedente. Fue estudiado y descrito por Schaefer (1954 y 1957) y Pella y Tomlinson (1969).

Si una o más embarcaciones pesqueras comenzaran a explotar el stock, la captura por unidad de esfuerzo (CPUE; por ejemplo, la captura por día de búsqueda), que se supone ser proporcional a la magnitud del stock, sería bastante elevada al principio, ya que el stock estaría en su punto máximo. El incremento del stock seguiría siendo debido al reclutamiento y crecimiento, pero las pérdidas se deberían no sólo a la mortalidad natural sino también a la mortalidad por pesca, y por consiguiente disminuiría el stock. En reacción a esta disminución, las tasas de reclutamiento, crecimiento, y/o mortalidad natural cambiarían, y la ganancia lograda por los dos primeros factores excedería la pérdida provocada por el último. Si se dejara de pescar, la ganancia neta haría que el stock recuperara paulatinamente su magnitud original. A medida que el stock se aproximase a esa magnitud, las tasas de reclutamiento, crecimiento, y/o mortalidad natural volverían gradualmente a los niveles anteriores, hasta acabar iguales a lo que eran antes de comenzar la pesca. En esta forma, el stock recuperaría el equilibrio en su magnitud máxima. Sin embargo, si se continuara a pescar al mismo nivel, el stock llegaría eventualmente a equilibrarse, pero con tasas de reclutamiento, crecimiento, y/o mortalidad natural diferentes, y sería de magnitud inferior a la original. La CPUE seguiría proporcional a la magnitud del stock. Si hubiera pocos barcos explotando el recurso, la magnitud del stock se reduciría levemente y la CPUE sería relativamente elevada, pero si hubiera muchos, el stock se reduciría considerablemente y la CPUE sería mucho menor.

La captura total sería el producto de la CPUE y el esfuerzo de pesca total. Si el esfuerzo fuera relativamente bajo, un incremento moderado del mismo compensaría de sobra la reducción correspondiente de la CPUE y produciría capturas mayores, pero esto no sucedería si el nivel de esfuerzo fuera más elevado. En algún nivel intermedio de esfuerzo el producto se encontraría en su punto máximo. Si el objetivo de la administración es obtener el rendimiento promedio máximo sostenible (RPMS) de pescado, el esfuerzo de pesca debería ser mantenido a ese nivel. Si el objetivo es obtener la ganancia económica máxima, el esfuerzo debería ser algo menor (suponiendo un precio constante), y si es lograr el mayor empleo posible de pescadores, debería ser algo mayor. Si el esfuerzo es inferior al grado óptimo selecciona-

do, se dice que el stock está subexplotado, mientras que si es mayor al óptimo, se dice que está sobreexplotado. El objetivo de la CIAT es mantener el stock a niveles capaces de producir el RPMS.

Es más fácil analizar la interrelación entre el esfuerzo, la captura, y la CPUE en condiciones de equilibrio, pero es necesario reconocer que rara vez existen estas condiciones. Por ejemplo, si el stock se encuentra en equilibrio cerca de su punto máximo y súbitamente se incrementa el esfuerzo, la CPUE disminuirá paulatinamente durante un tiempo hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio con una CPUE menor. Durante el período de transición las capturas serán mayores que en el nuevo punto de equilibrio. De manera similar, si el stock se encuentra en equilibrio a un nivel bajo, debido a un esfuerzo excesivo, y el esfuerzo disminuye repentinamente, la CPUE aumentará gradualmente durante un tiempo antes de alcanzar un nuevo punto de equilibrio con una CPUE mayor. Durante el período de transición las capturas serán menores a las que se lograrán en el nuevo punto de equilibrio.

Es oportuno examinar ahora la aplicabilidad y utilidad de los modelos de producción para el atún aleta amarilla del Océano Pacífico oriental (OPO). Hasta ahora se ha hablado de "un stock de peces." Ninguno de los modelos de evaluación de stocks es aplicable al stock del OPO a menos que haya poco o ningún intercambio de aletas amarillas entre el OPO y las regiones más al oeste. Antes de 1990 se realizó el modelado de producción solamente para el Área de Regulación de la Comisión para el Aleta Amarilla (ARCAA; Figura 1), pero (tal como se explica en la página 233 del Informe Anual de la CIAT de 1989) se decidió realizar análisis basados en la suposición de que las capturas realizadas en el OPO (al este de 150°O) provienen de un solo stock. Este stock puede ser una mezcla compleja con respecto a fidelidad de desove, pero se supone que todos los segmentos del stock tienen las mismas tasas de reclutamiento, crecimiento, y mortalidad.

Se puede evaluar la aplicabilidad de los modelos de producción solamente si (1) existen datos de captura y esfuerzo o de captura y CPUE de un amplio rango de niveles de esfuerzo de pesca, que de preferencia incluyan períodos de subexplotación y sobreexplotación, y (2) las perturbaciones causadas por la fluctuación de las condiciones ambientales no alcanzan a ocultar los cambios en la abundancia aparente provocados por las variaciones en el esfuerzo de pesca. Se observará más adelante que sí existen datos sobre un amplio rango de niveles de esfuerzo de pesca a lo largo de un período extendido. Se analizaron los efectos de las condiciones ambientales en los Informes Anuales de la CIAT de años anteriores. Estos efectos suelen compensarse en períodos relativamente cortos, aunque existen algunos indicios, comentados más adelante, de que ha aumentado la productividad del aleta amarilla en el OPO en los últimos años.

## EL MODELO Y LOS DATOS

El personal de la CIAT mantiene un sistema de recolectar informes de descarga para los buques que pescan en el OPO, del cual se obtienen datos sobre las capturas de superficie de atunes, y también recopila de los cuadernos de bitácora de los buques información sobre capturas y esfuerzo, obteniendo así datos sobre dónde, cuándo y cómo se capturó el pescado. Obtiene estadísticas similares de países cuyos buques pescan en el OPO pero que descargan sus capturas en puertos donde la CIAT no tiene oficinas. Casi todas las capturas palangreras quedan en esta segunda categoría. En la Tabla 1 se resumen los datos de captura de 1968-1999. Se pueden combinar los varios conjuntos de datos para calcular estimaciones de la captura total de aleta amarilla durante cada trimestre de cada año. Ocurrió un cambio importante en los métodos de pesca a partir de 1959, y un incremento sustancial en la zona de pesca a partir de 1967. Por estos dos motivos, se utilizan en este informe solamente datos de capturas anuales y trimestrales para todas las artes combinadas desde 1968 hasta 1999 (Tabla 2).

Tal como se notó, se supone que la CPUE es proporcional al tamaño del stock. Estudios anteriores han demostrado que la CPUE de buques cerqueros de más de 363 toneladas métricas de capacidad de acarreo (Clase 6 PS) satisface este supuesto bastante bien. A partir de los cuadernos de bitácora de puente, se estimó la captura por día de pesca (CPDP) para la Clase 6 PS para cada trimestre del período de 1968-1999 (Tabla 3). Los valores trimestrales de la CPDP son los cocientes de la captura trimestral total registrada de Clase 6 PS y los días de pesca totales trimestrales registrados. Durante algunos trimestres la

pesquería estuvo reglamentada; no se usaron los datos de esos trimestres al ajustar el modelo. Se obtuvieron los valores de CPDP presentados en la Tabla 1 del total de todos los viajes de Clase 6 PS no reglamentados utilizables en el año. Ya que se ampliaron los datos en las Tablas 2 y 4 a la captura y esfuerzo totales estimados por trimestre, y luego se sumaron por año para computar las CPDP anuales en la Tabla 3, las CPDP anuales en la Tabla 1 son algo diferentes de las de la Tabla 3. Además, cuando se consideró que la CPDP de un trimestre era una medida poco fiable de la abundancia, a raíz de la reglamentación, se estimó el esfuerzo en la Tabla 4 con el modelo. Se podría haber usado otro período de tiempo, tal como mes, pero trimestres parecen ser adecuados para los datos de aleta amarilla.

Hay por lo tanto 32 años de datos trimestrales, o 128 intervalos de captura. Para aclarar la discusión:

- $ny = 32 =$  número de años de datos de captura;
- $nq = 4 =$  número de trimestres en un año;
- $i = 1, 2, 3, \dots ny;$
- $j = 1, 2, \dots nq;$
- $C_i =$  captura anual total para todas las artes combinadas (Tabla 2) en el año  $i$ ;
- $C_{ij} =$  captura trimestral total para todas las artes combinadas (Tabla 2) en el año  $i$ , trimestre  $j$ ;
- $c_{ij} =$  captura total registrada para la Clase 6 PS en el año  $i$ , trimestre  $j$ ;
- $d_{ij} =$  total de días de pesca registrados para la Clase 6 PS en el año  $i$ , trimestre  $j$ ;
- $u_{ij} = c_{ij} \div d_{ij} =$  CPDP para Clase 6 PS (Tabla 3) en el año  $i$ , trimestre  $j$ ;
- $D_{ij} = C_{ij} \div u_{ij} =$  total de días estandarizados de pesca (Tabla 4) en el año  $i$ , trimestre  $j$ ;
- $t = 0,25$  de un año = duración de cada intervalo trimestral de captura.

Se expresa el modelo de producción usado para representar la pesquería de aleta amarilla del OPO con la ecuación diferencial

$$dP_t/dt = KP_t^m (P_{max}^{1-m} - P_t^{1-m}) - dC_t/dt \dots \dots \dots (1)$$

donde

- $P_t =$  tamaño de la población en el momento  $t$ ;
- $P_{max} =$  tamaño máximo posible de la población (un parámetro en el modelo);
- $K =$  parámetro relacionado con la velocidad con la cual una población crece hacia el máximo;
- $m =$  parámetro que determina la forma de la curva de crecimiento;
- $dP_t/dt =$  tasa de crecimiento por unidad de tiempo con un tamaño de población  $P_t$ ;
- $dC_t/dt =$  tasa de captura por unidad de tiempo en tiempo  $t$  (tamaño de población  $P_t$ ).

No se puede usar la Ecuación 1 para estimar los parámetros desconocidos, ya que la tasa de captura,  $dC_t/dt$ , no puede ser medida. Sin embargo, se puede aproximar  $dC_t/dt$  creando intervalos de captura de muy corta duración. La nueva ecuación, que aproxima la Ecuación 1 suficientemente bien si el intervalo de captura es suficientemente corto, es

$$\Delta P_t/\Delta t = KP_t^m (P_{max}^{1-m} - P_t^{1-m}) - \Delta C_t/\Delta t \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta C_t = \Delta C_{ij} = C_{ij} \div W = \text{una pequeña fracción de la captura trimestral en el año } i, \text{ trimestre } j;$$

$$\Delta t = t \div W = \text{alguna pequeña fracción de tiempo en el año } i, \text{ trimestre } j.$$

donde  $W =$  algún divisor, tal como 10, 50, ó 100 (los análisis presentados en este documento usaron  $W = 10$  para 1968-1999).

Si  $l = 1, 2, 3, \dots (32)(4)(W) =$  índice de subintervalos, entonces  $P_l =$  tamaño de la población al principio del  $l$ -ésimo subintervalo,  $\Delta C_l$  la captura durante el  $l$ -ésimo subintervalo, y  $P_f$  es el tamaño de la población al fin de 1999 [ $f = (128)(W) + 1$ ]. Al escribir la Ecuación 2 de nuevo en términos del índice  $l$ , las ecuaciones

ciones para estimar el cambio en tamaño y el nuevo tamaño son

$$\Delta P_l = [KP_l^m (P_{max}^{1-m} - P_l^{1-m}) - \Delta C_l / \Delta t] \Delta t \dots \dots \dots (3)$$

$$P_{l+1} = P_l + \Delta P_l, l = 1, 2, 3, \dots (128)(W) + 1 \dots \dots \dots (4)$$

Si se supiese el valor de  $P_1$  (tamaño de la población al principio de 1968), y también de los parámetros  $K$ ,  $m$ , y  $P_{max}$ , entonces sería posible calcular todos los demás valores de  $P_l$  con las Ecuaciones 3 y 4, pero no se saben. Si se usan conjeturas para cada parámetro, incluyendo  $P_1$ , y se aplican las Ecuaciones 3 y 4, se podría comparar la serie de tiempo de valores de  $P_l$  con el  $u_{ij}$  (teniendo presente que uno de los supuestos es que  $u_{ij}$  es proporcional a  $P_{ij}$ ). Si se introduce un parámetro más ( $q$ ), se calcula el tamaño medio de la población durante cada trimestre de la forma siguiente

$$v = (i - 1)(4W) + (j - 1)(W) + 1 = \text{valor de } l \text{ en el año } i, \text{ al principio del trimestre } j;$$

$$z = v + W = \text{valor de } l \text{ en el año } i, \text{ al fin del trimestre } j.$$

$$\bar{P}_{ij} = \sum_v^z P_l \div (W + 1) \dots \dots \dots (5)$$

Entonces que

$q$  = probabilidad que cualquier unidad de esfuerzo dada capture cualquier unidad dada de  $P$ ;

$$\hat{u}_{ij} = (q)(\bar{P}_{ij}) = \text{CPDP esperada durante el año } i, \text{ trimestre } j \dots \dots \dots (6)$$

$$\hat{D}_{ij} = C_{ij} \div \hat{u}_{ij} = \text{número de días de pesca esperado durante el año } i, \text{ trimestre } j \dots \dots \dots (7)$$

El criterio para decidir cuál conjunto de conjeturas de los parámetros usar es la suma de cuadrados mínimos entre el esfuerzo estimado ( $D_{ij}$ ) y el esfuerzo esperado ( $\hat{D}_{ij}$ ) cuadrado. Es decir,

$$S = \sum_{i=1}^{ny} \sum_{j=1}^{nq} (D_{ij} - \hat{D}_{ij})^2 = \text{mínimo} \dots \dots \dots (8)$$

Se comentó previamente que hay trimestres para los cuales  $D_{ij}$  no es fiable. En esos casos se fijó  $D_{ij}$  igual a  $\hat{D}_{ij}$ , lo cual significa que no contribuye a  $S$ .

Este procedimiento empírico sería imposible sin una computadora rápida y una buena técnica de búsqueda. El personal de la CIAT usa GENP, un programa de FORTRAN, para realizar las búsquedas. Pella y Tomlinson (1969) mencionan un programa de FORTRAN que usa un criterio diferente para el ajuste, pero hay una subrutina en ese programa llamada MIN que es la misma que se usa en GENP para encontrar una mínima en una superficie ( $S$  para distintos conjuntos de conjeturas forma una superficie de cuatro dimensiones, una para cada uno de los parámetros  $K$ ,  $q$ ,  $m$ , y  $P_{max}$ ). En la práctica, puede ser muy difícil estimar el parámetro  $m$ . Estudios de datos estructurados por edad han proporcionado una estimación independiente de la forma de la curva de producción (captura de equilibrio graficada contra número de días de pesca) y se seleccionó el valor de  $m = 0,8$  para que la curva de producción para el modelo ajustado tuviese la misma forma que la del análisis estructurado por edad (Anónimo, 2000). (El valor de  $m = 0,8$  no es lo mismo que el valor de  $M = 0,8$  usado por el personal de la CIAT como tasa de mortalidad natural para el atún aleta amarilla.)

Ya que el objetivo de la administración es conseguir el RPMS, y eso es equivalente a mantener el esfuerzo (número de días de Clase 6 PS) en algún nivel óptimo, es esencial tener ecuaciones para obtener esos valores de los cuatro parámetros dados en las Ecuaciones 1 y 5. Los supuestos del modelo de producción implican que se puede mantener siempre la captura en un valor particular (captura de equilibrio)

si se mantiene constante el esfuerzo (esfuerzo de equilibrio). Cuando el esfuerzo de equilibrio es bajo, la captura de equilibrio será baja. Si se aumenta el esfuerzo de equilibrio, la captura se incrementará hasta algún punto y luego comenzará a disminuir. Si se grafican estas capturas de equilibrio en el eje  $y$  contra el esfuerzo de equilibrio en el eje  $x$ , resultará una sencilla curva en forma de domo. El ápice de la curva corresponde al RPMS y el esfuerzo óptimo. Las ecuaciones, en términos de los cuatro parámetros estimados, y  $D_e$  = esfuerzo de equilibrio, son

$$C_e = q D_e P_{max} [K \div (q D_e + K)]^x, \text{ donde } x = 1 \div (1 - m) \dots \dots \dots (9)$$

$$D_{opt} = K (1 - m) \div (m q) = \text{número óptimo de días de pesca (Clase 6)} \dots \dots \dots (10)$$

Cuando  $D = D_{opt}$  entonces  $C_e$  es  $C_{max}$  (el RPMS). Además, el tamaño de la población estará en equilibrio, si  $D$  está en equilibrio, en cual caso la ecuación es

$$P_e = P_{max} [K \div (q D_e + K)]^x = \text{población en equilibrio en } D_e \dots \dots \dots (11)$$

Cuando no hay pesca ( $dC_t/dt = 0$ ), y se puede calcular el crecimiento de la población integrando la Ecuación 1. El resultado es

$$P_t = [P_{m a x}^{1 - m} - (P_{m a x}^{1 - m} - P_i^{1 - m}) e^{-K(1 - m)t}]^{1/m} \dots \dots \dots (12)$$

donde  $P_i$  = el tamaño de la población al principio,  $x = 1 \div (1 - m)$ , y  $t$  = tiempo transcurrido. Esto es útil para calcular el cambio en el tamaño de la población desde el principio de un intervalo sin captura (temporada de veda) hasta el principio del próximo intervalo con captura, sin usar las Ecuaciones 3 y 4.

## RESULTADOS

Un modelo de producción simétrico ( $m = 2,0$ ) fue aplicado primero por Schaefer (1957) con datos sobre la captura, esfuerzo, y CPUE de barcos de carnada del período de 1934-1955, los que incluían un amplio rango de esfuerzo en el lado de la curva que corresponde a la subexplotación. Estos datos indicaron que, para el stock explotado, en los niveles de esfuerzo de pesca para los que se disponía de información, el modelo era útil para predecir la relación entre captura y esfuerzo. En 1960 y 1961, por primera vez, el esfuerzo superó el nivel óptimo predicho, y en los años subsiguientes las CPUE y las capturas fueron bajas, otra indicación de que el modelo era aplicable. En 1969 se estimaron de nuevo los parámetros, usando datos de 1934-1967, CPDP de barco de carnada de Clase 4, y  $m = 1,3, 1,4$ , y  $2,0$  (Pella y Tomlinson, 1969), y en 1970 se ajustó el modelo por primera vez usando CPDP de Clase 3 PS (Anónimo, 1970). El personal de la CIAT siguió usando CPDP de Clase 3 PS hasta 1976, cuando se compararon CPDP de Clase 6 PS y CPDP de Clase 3 PS (Anónimo, 1976), y desde entonces se ha usado CPDP de Clase 6 PS. Se ha usado una variedad de valores de  $m$  en distintos años, con  $m = 2,0$  y  $m = 0,8$  comparados desde 1982 (Anónimo, 1982). No se usó CPDP de Clase 3 PS después de 1982.

Las CPDP de la Clase 6 PS en la Tabla 3 y la Figura 2 indican que la abundancia de aleta amarilla en 1986 fue la mayor de cualquier año del período de 1968-1999. El aumento a mediados de los años 1980 fue esperado, debido a las bajas capturas en 1982, 1983, y 1984 que permitieron al stock aumentar. La disminución desde 1986 hasta 1998 se debió probablemente a un aumento en el esfuerzo de pesca y una mayor dependencia de peces pequeños por parte de la pesquería. Las CPDP de 1985-1999 han sido mayores de lo que se esperaría (Figura 2) de los resultados (Tabla 5) de un análisis basado en datos de un período anterior (1968-1983), sin embargo. Se calcularon por lo tanto nuevos parámetros para el período posterior (1983-1999). La diferencia entre los dos períodos fue causado probablemente por (1) reclutamiento mayor al promedio y (2) un aumento en la pesca sobre aletas amarillas asociados con delfines, resultando en pescados más grandes en la captura, lo que incrementaría el rendimiento por reclutamiento (RPR).

Se calculó la tabla siguiente para la 63ª reunión de la CIAT, celebrada en junio de 1999, de análisis de datos estructurados por edad. Estas cifras podrían ya no ser las mejores estimaciones, pero son indicativas de porqué los parámetros estimados por el modelo de producción no permanecieron constantes.

Período	Reclutamiento medio (millones de peces)	Peso medio (kg)	RPR medio (kg)	Captura potencial (OPO) (miles de toneladas)	Captura media (OPO) (miles de toneladas)
1967-1975	66	11,1	2,5	165	167
1976-1984	76	6,9	2,4	182	179
1985-1998	92	11,4	3,0	276	271

El RPR medio menor durante el período de 1976-1984, comparado con aquél de 1967-1975, fue compensado por el mayor reclutamiento medio, y la captura potencial permaneció más o menos igual. Durante el período de 1985-1998, sin embargo, tanto el RPR medio como el reclutamiento medio fueron mayores que en años previos, resultando en una mayor producción del stock. Ya que las capturas medias durante los dos primeros períodos fueron aproximadamente iguales, se puede ajustar el modelo de producción a los datos de captura y esfuerzo para 1968-1983 sin dificultad. Sin embargo, ya que tanto el reclutamiento como el RPR aumentaron durante el último período, se ha vuelto imposible explicar la relación entre captura y esfuerzo suponiendo que los parámetros del stock (Tabla 5) para el período posterior no cambiaron con respecto al período anterior.

En la Figura 2, se comparan las CPDP observadas con las esperadas computadas del modelo, usando  $m = 0,8$  y ajustando los datos de los dos períodos diferentes. Se puede ver que corresponden bastante bien, en promedio, en la mayoría de los años presentados, excepto cuando se extienden a 1987 los valores esperados del período anterior. En años específicos hay divergencias grandes, pero ya que el modelo de producción es esencialmente un modelo de regresión que supone condiciones normales, no reflejará los efectos de cambios grandes a corto plazo en las tasas de crecimiento.

La estimación del período posterior indica que el nivel actual de esfuerzo de unos 26 mil días de Clase 6 PS rebasa el nivel necesario para producir el RPMS, más cercano a 20 mil días. Los datos de captura y esfuerzo de 1987-1999 contienen muy poca variación, con un esfuerzo promedio de 22 mil días y una captura media de 276 mil toneladas. Estas cifras son cercanas al nivel óptimo, pero con tan poca variación en el nivel de esfuerzo es seguro que las estimaciones de los parámetros no son muy precisas.

## DISCUSION

Se debe ser muy cauteloso al usar un modelo de producción para interpretar la relación entre esfuerzo actual y el potencial del stock de sostener una cierta captura. El atún aleta amarilla está altamente segregado en grupos que no se encuentran distribuidos al azar en la zona de distribución del stock. En primer lugar, la especie demuestra una tendencia de formar cardúmenes por tamaño (o edad) y las distribuciones por zona de los cardúmenes de peces de distintos tamaños no son uniformes. Estas distintas agregaciones son vulnerables a distintas estrategias de pesca: peces grandes a la pesca sobre delfines, peces pequeños a la pesca sobre objetos flotantes, y peces pequeños a medianos a la pesca sobre cardúmenes no asociados. La abundancia relativa de los distintos tipos de cardumen afecta la estrategia de búsqueda de los pescadores. Además, el precio que se paga por pescado de distintos tamaños afecta el método de pesca. El tamaño del pescado capturado, junto con el nivel total de esfuerzo, determina el RPR. La curva del modelo de producción de captura *versus* esfuerzo depende solamente del nivel de esfuerzo. Por lo tanto, ya que la abundancia y el precio varían, la curva de producción debería variar, y un modelo sencillo que no tome en cuenta la distribución por tamaño del pescado capturado no funcionará. No obstante, brinda un método relativamente sencillo para juzgar si el nivel de esfuerzo está cercano al óptimo. Por ejemplo, la Tabla 5 demuestra la posibilidad de que el RPMS aumentó en un 50% entre el período anterior y posterior, mientras que el esfuerzo óptimo disminuyó. A partir de la forma de las curvas en la Figura 3, no es evidente que el esfuerzo óptimo cambió, pero fácil imaginar que la RPMS sí aumentó.

## REFERENCES--REFERENCIAS

- Anonymous. 1970. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1969: 117 pp.
- Anonymous. 1976. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1975: 176 pp.
- Anonymous. 1982. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1981: 303 pp.
- Anonymous. 1990. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1989: 270 pp.
- Anonymous. 2000. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1998: 357 pp.
- Pella, Jerome J., and Patrick K. Tomlinson. 1969. A generalized stock production model. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*, 13 (3): 419-496.
- Schaefer, Milner B. 1954. Some aspects of the dynamics of the populations important to the management of commercial marine fisheries. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*, 1 (2): 25-56.
- Schaefer, Milner B. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*, 2 (6): 245-285.