

**INTER-AMERICAN TROPICAL TUNA COMMISSION  
COMISION INTERAMERICANA DEL ATUN TROPICAL**

Bulletin — Boletín

Vol. 17, No. 4

**TUNPOP: A SIMULATION OF THE DYNAMICS AND  
STRUCTURE OF THE YELLOWFIN TUNA STOCK AND  
SURFACE FISHERY OF THE EASTERN PACIFIC OCEAN**

**TUNPOP: UNA SIMULACION DE LA DINAMICA Y DE  
LA ESTRUCTURA DE LA POBLACION DEL ATUN ALETA  
AMARILLA Y LA PESCA EPIPELAGICA EN EL  
OCEANO PACIFICO ORIENTAL**

by — por  
**Robert C. Francis**

La Jolla, California  
1977

**CONTENTS — INDICE**  
**ENGLISH VERSION — VERSION EN INGLES**

	Page
ABSTRACT.....	215
INTRODUCTION.....	215
ACKNOWLEDGEMENTS.....	216
MODEL EVOLUTION.....	216
TUNPØP-MØD1.....	217
TUNPØP-MØD2.....	218
TUNPØP-MØD3.....	220
INITIAL PARAMETER ESTIMATION.....	223
MODEL VALIDATION.....	224
EXPERIMENTAL RESULTS.....	232
SUMMARY.....	234
<hr/>	
FIGURES — FIGURAS.....	236
TABLES — TABLAS.....	240

**VERSION EN ESPAÑOL — SPANISH VERSION**

	Página
EXTRACTO.....	246
INTRODUCCION.....	246
RECONOCIMIENTO.....	247
EVOLUCION DEL MODELO.....	248
TUNPØP-MØD1.....	248
TUNPØP-MØD2.....	249
TUNPØP-MØD3.....	251
ESTIMACION INICIAL DE LOS PARAMETROS.....	255
VALIDACION DEL MODELO.....	255
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	264
RESUMEN.....	266
<hr/>	
LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA.....	268

**TUNPØP: A SIMULATION OF THE DYNAMICS AND STRUCTURE  
OF THE YELLOWFIN TUNA STOCK AND SURFACE FISHERY  
OF THE EASTERN PACIFIC OCEAN**

by

**Robert C. Francis\***

**ABSTRACT**

Three distinct versions of TUNPØP, an age-structured computer simulation model of the eastern Pacific yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, stock and surface tuna fishery, are used to reveal mechanisms which appear to have a significant effect on the fishery dynamics. Real data on this fishery are used to make deductions on the distribution of the fish and to show how that distribution might influence events in the fishery. The most important result of the paper is that the concept of the eastern Pacific yellowfin tuna stock as a homogeneous unit is inadequate to represent the recent history of the fishery. Inferences are made on the size and distribution of the underlying stock as well as its potential yield to the surface fishery as a result of alterations in the level and distribution of the effort.

**INTRODUCTION**

Larkin (1972) aptly suggests a role for quantitative modeling of fisheries resources as a method of experimentation in new ways of managing resources for the public benefit. He goes on to explain that the object of simulation modeling "should be to explore the widest spectrum of consequences of the widest range of alternative policies," and that thereby the "aim of fisheries science becomes the maximization of understanding." In his article Larkin challenges the fisheries modeler to get away from "painfully unimaginative" extrapolations on sets of assumptions which are passé, and to consider models as extensions to the power of imagination.

It has long been evident that the quantitative techniques which have been used to assess the interaction between the eastern Pacific yellowfin tuna stock and the surface fishery over the past several decades are inadequate to describe contemporary fishery dynamics. Further, we cannot expect to improve our management policies until the biological and physical mechanisms which control both the population and fishery dynamics are more adequately investigated and more fully understood. The purpose of this paper is to employ TUNPØP, an age-structured computer simulation model of the yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, stock and surface tuna fishery of the eastern Pacific Ocean, in its varied forms to evaluate the

---

\*present address:  
Fisheries Research Division  
Ministry of Agriculture and Fisheries  
P. O. Box 19062  
Wellington, New Zealand

significance and sensitivity of our understanding of the yellowfin tuna stock of the eastern Pacific Ocean, its dynamics and structure, in predicting the effect of fishing on that stock; and to explore the consequences of a rational extension of the powers of imagination to the problem of yellowfin tuna management. Real data on this fishery are used to deduce something about the distribution of the fish and to show how that distribution might, in turn, influence events in the fishery. This modeling exercise should not be construed as an attempt to represent the physical and biological system exactly as it is but rather as an attempt to point out the apparent flaws in our contemporary thinking and to provide directions for our future research.

Three distinct versions of TUNPØP are used in this paper to reveal some of the mechanisms which appear to have a significant effect on the eastern Pacific yellowfin fishery dynamics. Therefore, it is not only the values of model parameters which are subjected to scrutiny, but the basic form of the abstraction itself. Most importantly the series of model runs presented in this paper indicate that the concept of the yellowfin stock as a homogeneous unit is inadequate to represent the recent history of the fishery.

The basic description and mathematical documentation of TUNPØP have been provided by Francis (1974a). Uses of the model are described in the IATTC Annual Reports for 1972, 1973, 1974 and 1975, Francis (1974b), Fonteneau and Francis (1975) and Sharp and Francis (1976).

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

This paper is dedicated to Gary Sharp, whose ideas and enthusiastic spirit were a major guiding force for me throughout the five years I spent with the Commission, to James Joseph who allowed me the freedom to direct the course of this project and, at the same time, subtly and tactfully helped me to gain perspective on modeling as a tool in resource assessment and management, and to Patrick Tomlinson whose sense of logic and ability to translate ecological concepts into meaningful analytic forms has been more valuable than any university education could ever be. In addition, I wish to thank W. Bayliff, J. Gulland, P. Larkin, J. Schnute and B. Shater for their helpful comments on the manuscript. Finally I wish to thank my colleagues at the Commission for their guidance and help throughout the duration of this project.

#### **MODEL EVOLUTION**

One of the principle applications of TUNPØP is to examine the potential yield of yellowfin in the eastern Pacific under alternative management schemes, many of which involve understanding the effect of re-

ducing or completely eliminating effort from various areas in which the fishery operates. It was therefore necessary to add the dimension of area to the existing form of the model in order to increase its practical resolution. In doing so two *new* forms of the model were created; the first (TUNPØP-MØD2) expanded the dimensionality of the harvest sector only, and the second (TUNPØP-MØD3) expanded the dimensionality of both the harvest sector and the underlying population sector. This section describes the analytic structure of the three versions of TUNPØP which are later used to make inferences about the fishery and underlying stock.

### TUNPØP-MØD1

The basic analytic form of the original version of TUNPØP (Francis, 1974a) is as follows:

Let

- $[t, t+1]$  = unit time period commencing at time  $t$  and ending at time  $t+1$  during which a given cohort of fish is assumed to be of age  $i$ ,
- $N_i(x)$  = number of fish of age  $i$  at time  $x \in [t, t+1]$ ,
- $q_i$  = catchability coefficient on age group  $i$ ,
- $f(t)$  = number of standard days effort during  $[t, t+1]$ ,
- $F_i(t)$  = instantaneous unit time fishing mortality on age group  $i$  during  $[t, t+1]$   
=  $q_i f(t)$
- $M_i$  = instantaneous unit time natural mortality rate on age group  $i$ ,
- $Z_i(t)$  = instantaneous unit time total mortality rate on age group  $i$  during  $[t, t+1]$
- $w_i(t)$  = average weight of an individual on entry into age group  $i$  at time  $t$ ,
- $YN_i(t)$  = catch in numbers of age group  $i$  during  $[t, t+1]$ , and
- $YW_i(t)$  = catch in weight of age group  $i$  during  $[t, t+1]$ .

Then

$$\frac{dN_i(x)}{dx} = - Z_i(t)N_i(x)$$

$$YN_i(t) = F_i(t) \int_t^{t+1} N_i(x) dx$$

$$YW_i(t) = F_i(t) \int_t^{t+1} B_i(x) dx$$

where

$$\begin{aligned}
 B_i(x) &= \text{biomass of age } i \text{ at time } x \in [t, t+1]. \\
 &= N_i(x)w_i(t)e^{G_i(t)(x-t)} \\
 G_i(t) &= \ln \left[ \frac{W_{i+1}(t+1)}{W_i(t)} \right]
 \end{aligned}$$

Thus the original version of TUNPØP, henceforth referred to as TUNPØP-MØD1, is basically two-dimensional, the dimensions being time and age. However, if one examines the size structure in the catch as a function of time and area, one can see that yellowfin of certain ages are more readily harvested in some time-area strata than in others. Figure 1 gives the relative sizes of the fish of the predominant modes in the catches of the most heavily sampled 5-degree areas in the eastern Pacific for 1969-1973. Small fish (50-80 cm) are much more vulnerable and/or available in the inshore areas than in the offshore areas of the eastern Pacific, and the reverse is true for the medium (80-110 cm) and large (110+ cm) fish. Also the predominant method of purse seining in the inshore areas (along the coastline of Central and South America) is "school fish" or "non-porpoise fish" fishing (catching yellowfin in surface schools not associated with porpoise) whereas the predominant method of purse seining for yellowfin in the offshore areas is "porpoise" fishing, (catching yellowfin in association with schools of porpoise). In the area west of the CYRA boundary yellowfin are caught almost exclusively in association with schools of porpoise, and the fish tend to be medium and large.

### TUNPØP-MØD2

The first modification to the dimensionality of TUNPØP involves the addition of the dimension of area to the harvest sector only. To effect this modification the eastern Pacific was divided into three areas within which size-specific catchability coefficients have been relatively constant from year to year. These areas (Figure 2) were selected on the basis of the examination of the predominant modes in estimates of size-specific catch by 5-degree area and quarter for 1969 through 1973. Time- and age-specific catchability coefficients were estimated for each area in the following way:

Let

$$\begin{aligned}
 YN_{ij}(t) &= \text{catch in numbers of age group } i \text{ in area } j \text{ during } [t, t+1] \\
 &= q_{ij}f_j(t)\bar{N}_i(t),
 \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
 f_j(t) &= \text{number of standard days effort in area } j \text{ during } [t, t+1], \\
 q_{ij} &= \text{catchability coefficient on age group } i \text{ in area } j, \text{ and} \\
 \bar{N}_i(t) &= \text{mean number of fish of age } i \text{ in population during } [t, t+1]
 \end{aligned}$$

$$= \int_t^{t+1} N_i(x) dx.$$

Thus

$$\begin{aligned} YN_{i.}(t) &= F_i(t)\bar{N}_i(t) = q_i(t)f(t)\bar{N}_i(t) \\ &= \sum_{j=1}^3 YN_{ij}(t) \\ &= \sum_{j=1}^3 \left[ q_{ij}f_j(t) \right] \bar{N}_i(t). \end{aligned}$$

It follows that

$$\frac{YN_{ij}(t)}{YN_{i.}(t)} = \frac{q_{ij}f_j(t)}{F_i(t)},$$

and

$$\hat{q}_{ij} = \frac{YN_{ij}(t)F_i(t)}{YN_{i.}(t)f_j(t)}.$$

Therefore the basic assumption underlying the use of this form of TUNPØP, henceforth referred to as TUNPØP-MØD2, is that the overall catchability on an age group in the population is equal to the effort-weighted mean areal catchability.

$$q_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^3 q_{ij}f_j(t)}{\sum_{j=1}^3 f_j(t)}$$

making the overall catchability of the population a function of both age and time, the time-dependence partially reflecting the distribution of effort in the three areas.

There are obvious advantages and disadvantages of employing this approach in the model. On one hand a significant reduction in effort in area 1, the inshore area, will be reflected by reduction in the catch of small fish, as one would expect. In TUNPØP-MØD1 (two-dimensional), effort is rigid in the way that it is applied across the population age structure, whereas in TUNPØP-MØD2 (three-dimensional), the age distribution and absolute magnitude of the catch are dependent on both the level and areal distribution of the effort. On the other hand, an infinite amount of effort applied in only one TUNPØP-MØD2 area over a unit of time could theoretically obliterate the entire population, hardly a realistic concept.

This is due to the fact that TUNPØP-MØD2 employs a unit population with instantaneous mixing (*i.e.* at any instant in time the population is assumed to be uniformly distributed with respect to the sampling mechanism provided by the fishery). Thus, as with any simulation model, care and good judgment must be exercised in applying any form of the model to gain new insight.

TUNPØP-MØD2, in effect, provides a mechanism whereby the fishing mortalities on different ages can be varied differentially depending on how the effort is deployed over the total fishing area. This modification of the model was designed to represent the differences in age-specific fishing mortality between the inshore and coastal fishing areas (area 1) in most of which predominantly “non-porpoise” fishing takes place, and the offshore fishing areas (areas 2 and 3) where predominantly “porpoise” fishing takes place. An extensive examination of TUNPØP-MØD2 (reported in a later section) indicates that adding the dimension of area to the harvest sector alone (without changing the values of some of the basic model parameters) does not appreciably expand the resolution of the model to account for recent changes in both the magnitude and age structure of the yellowfin catch in the eastern Pacific. It was therefore decided to restructure the population sector of TUNPØP in order to investigate the possible effect of areal heterogeneity of the underlying yellowfin population on the model resolution.

### **TUNPØP-MØD3**

The second modification of TUNPØP is an attempt to synthesize past experience and informed thought into a gross abstraction of one possible form of the yellowfin population and fishery structure. Several general concepts and hypotheses were formulated and incorporated into this restructured model:

- 1) The yellowfin fishery tends to stratify along an inshore-offshore gradient. Therefore the eastern Pacific was divided into the three areas (Figure 2) (area 1—inshore CYRA, area 2—offshore CYRA, and area 3—west of the CYRA boundary). The population and fishery dynamics of each area are represented by separate sets of differential equations.

- 2) Tagging results (Fink and Bayliff (1970), Bayliff and Rothschild (1974), Bayliff (personal communication)) indicate multi-directional movement of fish between adjacent areas. Unfortunately tagging studies do not yet give estimates of the rates of directional movement. However, there is no evidence to support the hypothesis that mixing is instantaneous and exhaustive (*i.e.* that the stock is always uniformly distributed with respect to the gear in terms of area in the eastern Pacific. Although there is evidence of genetic and age-structure heterogeneity (Sharp, personal communication), there is no conclusive evidence that different areas contain distinct



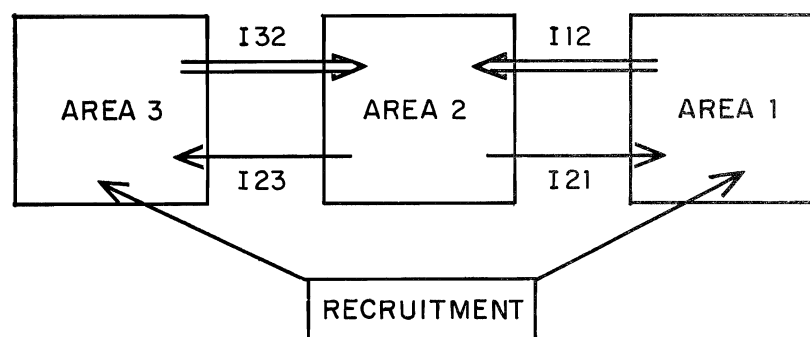
genetic subpopulations. Therefore it was decided that the possibility of migration between adjacent subareas should be built into the model with the greatest amount of flexibility possible. Thus there is a positive probability that a given fish in the population could inhabit some portion of each of the three fishery areas at some time in its post-recruitment life.

3) Estimates of natural mortality (Hennemuth (1961b), Bayliff (1971)) were made at a time when the fishery operated predominantly in area 1. Since there is subsequent evidence of migration from area 1 to area 2 (Bayliff, personal communication) it was hypothesized that the rather high estimate of natural mortality (annual  $M = 0.8$ ) was actually a reflection of the additive effects of a lower natural mortality (say  $M = 0.6$ , Hennemuth's lower limit) and a net migration from area 1 to area 2.

4) Evidence of yellowfin spawning has been inferred from data on gonad indices (Orange (1961), Knudsen (1977)) and the distribution of yellowfin larvae (Klawe (1963), Tomlinson and Suzuki (personal communication)). Though the data are restricted, they suggest that some spawning occurs throughout the eastern Pacific, with a possible subpopulation break occurring in an area surrounding the CYRA boundary (approximately  $110^{\circ}$ - $120^{\circ}$ W longitude). Therefore it was *initially assumed* in the model that recruitment occurs on the extremes of the fishery (in area 1 and area 3 only—corresponding to hypothesized eastern and central Pacific subpopulations) and that there is a net migration of post-recruit fish from the extremes to the center of the fishery (area 2).

Therefore, in contrast to TUNPØP-MØD2 where the dimensionality of the harvest sector alone is expanded, the dimensions of both the harvest and population sectors are expanded in this second modification of TUNPØP, hereafter referred to as TUNPØP-MØD3. This extended version of TUNPØP no longer requires the confining assumption of a unit population with instantaneous mixing of all individuals.

The following is a diagram of the model structure:



The model has the following analytic form. For a given unit time period  $[t, t+1]$  let

- $N_{ij}(x)$  = number of fish of age  $i$  in area  $j$  at time  $x \in [t, t+1]$ ,  
 $R_j(t)$  =  $N_{1j}(t)$  = number of fish recruited into age-class 1 in area  $j$  at time  $t$ ,  
 $*Z_{ij}(t)$  = instantaneous unit time total loss rate on age-group  $i$  in area  $j$  during  $[t, t+1]$ ,  
 $F_{ij}(t)$  = instantaneous unit time fishing mortality rate on age-group  $i$  in area  $j$  during  $[t, t+1]$ ,  
 $M_i$  = instantaneous unit time natural mortality rate on age-group  $i$ , and  
 $**IKL_i$  = instantaneous unit time migration rate on age-group  $i$ , from area  $K$  to area  $L$ .

Then for  $x \in [t, t+1]$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{i1}(x)}{dx} &= -Z_{i1}(t)N_{i1}(x) + I21_i N_{i2}(x) \\ \frac{dN_{i2}(x)}{dx} &= I12_i N_{i1}(x) - Z_{i2}(t)N_{i2}(x) + I32_i N_{i3}(x) \\ \frac{dN_{i3}(x)}{dx} &= I23_i N_{i2}(x) - Z_{i3}(t)N_{i3}(x) \end{aligned} \quad (1)$$

where

$$\begin{aligned} Z_{i1}(t) &= I12_i + M_i + F_{i1}(t) \\ Z_{i2}(t) &= I21_i + I23_i + M_i + F_{i2}(t) \\ Z_{i3}(t) &= I32_i + M_i + F_{i3}(t) \end{aligned}$$

The system of linear first-order differential equations (1) has a unique real solution of the form

$$N_{ij}(x) = p_{ij}e^{\lambda_{i1}(x-t)} + q_{ij}e^{\lambda_{i2}(x-t)} + r_{ij}e^{\lambda_{i3}(x-t)}; \\ j = 1,2,3; x \in [t, t+1].$$

where the vectors  $(\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3})$ ,  $[(p_{ij}, q_{ij}, r_{ij})]$ ;  $j = 1,2,3$  are given by Kaplan (1962).

During  $[t, t+1]$  and for a given age  $i$ , the values of  $\{\lambda_{ij}, p_{ij}, q_{ij}, r_{ij}; j = 1,2,3\}$  are functions  $[N_{ij}(t); j = 1,2,3]$  and  $\{Z_{ij}(t); j = 1,2,3\}$  (note that these refer to total loss rates from the three areas). The assumption of constant rates of growth, natural mortal-

\*In this case  $Z_{ij}(t)$  is not simply a mortality, as is the usual case, but a combination of mortality and emigration.

\*\*Note that these rates do not refer to distance traveled in the usual sense of "miles per day" but rather to the rate of emigration from one area to another in the sense of "fraction of the stock per day."

ity, catchability, migration and effort within each area during the unit time period implies constant values  $[\lambda_{ij}(t), p_{ij}(t), q_{ij}(t), r_{ij}(t); j = 1,2,3]$  during  $[t, t+1]$ , and the state variables are updated from age  $i$  at time  $t$  to age  $i+1$  at time  $t+1$  as follows:

$$N_{i+1,j}(t+1) = p_{ij}(t)e^{\lambda_{i1}(t)} + q_{ij}(t)e^{\lambda_{i2}(t)} + r_{ij}(t)e^{\lambda_{i3}(t)}; j = 1,2,3$$

The values for yield in numbers and weight are then computed in

$$YN_{ij}(t) = F_{ij}(t) \int_t^{t+1} N_{ij}(x) dx$$

and

$$YW_{ij}(t) = F_{ij}(t) \int_t^{t+1} B_{ij}(x) dx$$

where

$$B_{ij}(x) = N_{ij}(x) w_i(t) e^{G_i(t)(x-t)}.$$

It must always be kept in mind that TUNPØP-MØD3 does not attempt to describe absolute reality. It is designed to suggest what might be, given some reasonable assumptions concerning the population being modeled. TUNPØP-MØD3 is an attempt to satisfy Larkin's (1972) role for quantitative modeling of exploited populations. First, it is definitely an extension of the powers of imagination, and will perhaps serve as a guide for further understanding of the yellowfin tuna populations of the eastern Pacific Ocean. Second, it is an attempt to remove the necessity of the classical assumptions (unit population, instantaneous mixing, uniform distribution of the population relative to the fishing gear, *etc.*) which are obviously unrealistic in this context.

### INITIAL PARAMETER ESTIMATION

The initial parameter estimates for TUNPØP-MØD1 and TUNPØP-MØD2 were obtained from quarterly statistics on catch, effort and the size distribution of fish in the catch (length-frequency data) for those yellowfin cohorts recruited from 1969 through the second quarter of 1975. As in Francis (1974a), the population of yellowfin was partitioned into 18 quarterly age groups. Recruitment to the simulated fishery occurs when fish enter the youngest exploited age group near the end of their first year of life. An average recruit is assumed to weigh 1.4 kg and have a fork length of approximately 40 cm (see Figure 3). The last age group contains the oldest fish which appear in the fishery in significant numbers and for which age can be estimated by analysis of modal progressions. Thus graduation from the simulated fishery occurs when fish leave this age group in the

middle of their fifth year of life. An average graduate is assumed to weigh 61 kg and have a fork length of 145 cm.

The estimation procedure for age-specific fishing mortality ( $F_i(t)$ ) and catchability ( $q_i$ ) for TUNPØP is described by Francis (1974a). The initial TUNPØP estimates were made assuming that the instantaneous natural mortality rate ( $M_i$ ) was constant at 0.8 on an annual basis for all cohorts. The values of effort used to transform age-specific fishing mortality to age-specific catchability are given in Table 1 (standard size class 6 (>400 ton carrying capacity) purse-seine effort (Shimada and Schaefer, 1956) uncorrected for the successful set ratio and employing fishing power factors of Tomlinson (personal communication)). The resultant cohort analysis estimates of age-specific catchability for TUNPØP-MØD1 and TUNPØP-MØD2 are given in Table 2. Figure 4 gives plots of the average quarterly age-specific catchability coefficients for the three areas and for the total eastern Pacific. Assuming that the population is uniformly distributed over the eastern Pacific (underlying assumption of TUNPØP-MØD1 and MØD2), this graph gives a rough picture of size selectivity of the surface fishery in the three areas.

### MODEL VALIDATION

The process of model validation supposedly provides a systematic algorithm for selecting a model or set of model parameters which "best" satisfy the objectives of a modeling exercise. In practice it is a subjective nonsystematic pursuit which, more than anything else, establishes the integrity of the entire modeling activity. Model validation is primarily a means of displaying the modeler's intuition concerning the most suitable analytic form or parameter values for attaining specific objectives.

In the case of TUNPØP, the validation criteria are the ability of the model to mimic both the areal distribution and age distribution of the eastern Pacific yellowfin catch (surface fisheries both inside and outside of the CYRA boundary) over the years 1969-1975, a period when the annual catch varied from a low of 137 thousand short tons in 1971 to 232 thousand short tons in 1974, and when the catch west of the CYRA boundary increased from 19 thousand tons in 1969 to 50 thousand tons in 1973. Since there is no indication of any relationship between parent stock and subsequent recruitment over the level of population sizes observed to date, any projections that might be made with the model have to be made employing constant annual X- and Y-group recruitments, therefore forcing the validation of the model on constant X- and Y-group recruitment parameters. In addition, experience (IATTC; 1973, 1974, 1975, 1976) has shown that TUNPØP has a time resolution of several years, which is probably due to the fact that yellowfin recruitment and skipjack catch, the dynamics which are not accounted for in the model and have a pronounced effect on the

yellowfin fishery dynamics, vary considerably from year to year. Therefore it was decided that the validation statistics would be the mean catch in weight and average weight in the catch for the three fishery areas during the groups of years 1969-1971 and 1972-1975. Finally, in order to overcome analytic boundary problems (initial conditions) it was assumed that the average catches for 1969-1971 (the initial 3-year period of experimental overfishing within the CYRA) represented "equilibrium" values *for the modeled population*, although there is no evidence of long-term equilibrium occurring in the historical interaction between the population and the fishery.

For a given model, parameter vector and time interval  $t$ , (1969-1971) or (1972-1975), the validation criterion has the following form:

Let

$$\begin{aligned} C_o(j,t) &= \text{observed catch in weight in area } j, \\ C_s(j,t) &= \text{simulated catch in weight in area } j, \\ \bar{w}_o(j,t) &= \text{observed average weight in the catch in area } j, \text{ and} \\ \bar{w}_s(j,t) &= \text{simulated average weight in the catch in area } j. \end{aligned}$$

Then

$$\bar{D}(t) = \frac{\sum_{j=1}^3 C_s(j,t) D^*(j,t)}{\sum_{j=1}^3 C_s(j,t)}$$

where

$$D^*(j,t) = \left[ \frac{|C_o(j,t) - C_s(j,t)|}{C_o(j,t)} + \frac{|\bar{w}_o(j,t) - \bar{w}_s(j,t)|}{\bar{w}_o(j,t)} \right]$$

Thus  $D^*(j,t)$  is the sum of the relative deviations of observed from expected catches and average weights in the catch during time interval  $t$ . Notice that equal value is given to the accuracy of the measure of age structure in the catch ( $\bar{w}$ ) as to the magnitude of the catch.  $\bar{D}(t)$  is a catch-weighted mean of  $\{D^*(j,t) ; j=1,2,3\}$  for the three areas. The reason for weighting the deviations by catch is to attach the highest priority to minimizing deviations in the areas of largest catch.

In this particular instance validation is a sequential procedure. A given validation procedure requires four choices:

- 1) model — TUNPØP-MØD2 or TUNPØP-MØD3 (since TUNPØP-MØD1 did not have the resolution necessary for validation it was not employed),
- 2) natural mortality rate ( $M_i$ )
- 3) average annual recruitment ( $\bar{R}$ ) (Relative X- and Y-group recruitment was pre-determined by cohort analysis),
- 4) mixing rates between areas (TUNPØP-MØD3 only).

The algorithm then proceeds as follows:

- 1) Within an area the *relative* distribution of quarterly age-specific catchability is fixed by cohort analysis (for the given natural mortality and recruitment values) and the subsequent estimates of  $q_{ij}$  described in a previous section.
- 2) The total annual fishing mortality applied within an area is then allowed to vary until the value  $\bar{D}$  (1969-1971) for the equilibrium simulations compared with the observed 1969-1971 annual catch statistics (Table 3) is at an approximate minimum. Since the total annual effort within an area is fixed, this is done by multiplying all age-specific catchability coefficients for a given area ( $q_{ij}$  for a given  $j$ ) by a catchability multiplier for that area. The set of catchability multipliers are thus chosen so that they minimize  $\bar{D}$ (1969-1971). This is analogous to computing areal effort efficiency factors (relative fishing power). Thus the model is “tuned” to duplicate, under equilibrium, the average catches and age distributions produced during the 1969-1971 period (Table 3).
- 3) Using the average equilibrium fishery conditions for 1969-1971 to define the initial stock conditions at the beginning of 1972, and holding all parameters fixed (including the catchability multipliers), the model is then run for four years under the average effort by quarter applied across the eastern Pacific during 1972-1975. The four-year average annual output is then compared to observed 1972-1975 annual catch statistics with the “goodness of fit” criterion being  $\bar{D}$  (1972-1975) (Table 4).
- 4) Finally the catch-weighted average value of  $\bar{D}(t)$  for the two time intervals is computed and used as the ultimate criterion of validation. This statistic,  $\bar{D}_T$ , is presented in Table 5 along with the catch-weighted average values of  $[D^*(j,t); t = 1,2]$  for each area  $j$ , denoted by  $\bar{D}_T(j)$  for each  $j = 1,2,3$ .

Therefore in Table 5

$$\bar{D}_T = \frac{\sum_{t=1}^2 C_o(t) \bar{D}(t)}{\sum_{t=1}^2 C_o(t)}$$

where

$C_o(t)$  = total observed catch in weight during time interval  $t$

$$= \sum_{j=1}^3 C_o(j,t)$$

$$t = \begin{cases} 1 & \text{for 1969-1971} \\ 2 & \text{for 1972-1975} \end{cases}$$

and

$$\bar{D}_T(j) = \frac{\sum_{t=1}^2 C_o(j,t) D^*(j,t)}{\sum_{t=1}^2 C_o(j,t)}$$

All validation results are given in Tables 3, 4 and 5. In addition the 1972-1975 average stock biomasses are given for each of the validation runs in Table 5. Finally Figure 5 gives a graphical summary of the entire validation sequence.

The validation sequence started with TUNPØP-MØD2 under the most commonly used conditions of constant quarterly age-specific natural mortality  $M_i = 0.2$  (annual  $M_i = 0.8$ ) and average recruitment of  $\bar{R} = 46.4$  million ( $\bar{R}_x = 23.1$  million,  $\bar{R}_y = 23.3$  million) estimated from an analysis of the 1969-1973 X and Y cohorts. For comparative purposes the results of this run are given first (Run A) employing the age-specific catchability coefficients which resulted from the cohort analyses presented in Table 2 (untuned) and then (Run B) employing the "tuned" age-specific catchability coefficients for  $M = 0.2$  and  $R = 46.4$  million. The latter set of catchabilities is obtained from the former by employing the catchability multipliers 0.92, 1.02 and 0.86 in areas 1, 2 and 3 respectively. These runs serve as a benchmark and starting point for the validation process. It is obvious that this established set of parameters, combined with a form of the model which employs instantaneous mixing throughout the eastern Pacific, falls far short of representing the catch dynamics of recent years, in particular the significant increase in catch of large fish in the area west of the CYRA boundary (area 3).

It was next decided to hold natural mortality constant ( $M = 0.2$ ) and to search for the value of  $\bar{R}$  which minimized  $\bar{D}_r$  for TUNPØP-MØD2. The "best" results (Run C) were obtained with a 50% increase in recruitment ( $\bar{R} = 70$  million), giving a reduction in  $\bar{D}_r$  of approximately 20%. Of further interest is the fact that a 100% increase in average stock biomass (from 270 thousand tons for  $\bar{R} = 46.4$  million to 540 thousand tons for  $\bar{R} = 70$  million) resulted from the 50% increase in recruitment.

One of the purposes for contriving TUNPØP-MØD3 was to investigate the hypothesis that what appeared to be a rather high value of natural mortality in the early 1960's (annual  $M = 0.8$ —Hennemuth (1961a), Bayliff (1971)) could have been the combination of a lower natural mortality rate and a net emigration rate from the fishery area—at that time an area similar to area 1 (Figure 2). Tagging experiments (Fink and Bayliff (1970), Bayliff and Rothschild (1974), Bayliff (personal communication)) do not contradict this hypothesis. Thus the initial validation runs of TUNPØP-MØD3 were made with the following fixed parameters.

- 1) quarterly  $M_i = 0.15$  (Hennemuth's (1961a) minimum estimate)
- 2)  $I12_i - I21_i = .05$  for all  $i$   
 $I32_i - I23_i = .05$  for all  $i$ .

Those parameter values would give a net quarterly instantaneous loss rate (excluding fishing) of fish tagged in areas 1 and 3, the areas of hypothesized recruitment, of 0.2 (equal to the previously used estimate of  $M_i$  for all  $i$ ).

The first validation run of TUNPØP-MØD3 (Run D) was made with  $\bar{R} = 46.4$  million. The relative magnitude of total recruitment between areas 1 and 3 was allowed to vary in the "tuning" procedure, since it could not be estimated in any other way. As it turned out, X- and Y-group recruitment were both estimated to be 14.1 million in area 1, and 9.0 and 9.2 million for the X and Y groups respectively in area 3. Estimates of within-area relative age-specific catchability were drawn from a set of cohort analyses with quarterly  $M = 0.15$  and  $\bar{R} = 46.4$  million. A concomitant run of TUNPØP-MØD2 (Run E) was made employing the same fixed parameters as TUNPØP-MØD3. To provide as much contrast as possible to TUNPØP-MØD2, within which mixing is instantaneous on a quarterly time basis, the initial runs of TUNPØP-MØD3 were made with relatively low inter-area migration (mixing) rates.

And thus

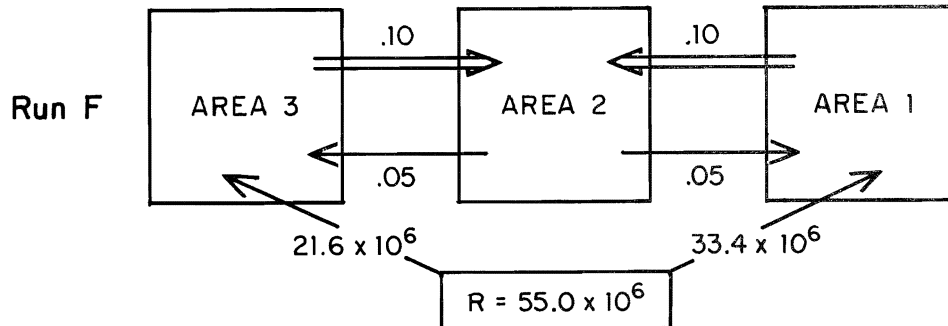
$$\left. \begin{array}{l} I12_i = I32_i = .10 \\ I21_i = I23_i = .05 \end{array} \right\} i = 1, \dots, 18.$$

The results show a minor improvement (7% decrease in  $\bar{D}_r$  when comparing Run E with Run C) for TUNPØP-MØD2 and a worsening for TUNPØP-



MØD3 (7% increase in  $\bar{D}_T$  when comparing Run D with Run C) relative to the previous run (Run C).

Next, all parameters of both models, with the exception of total recruitment, were fixed as in the previous pair of runs. Total recruitment was allowed to vary until  $\bar{D}_T$  was minimized. For TUNPØP-MØD2 an annual recruitment of  $\bar{R} = 46.4$  million (the same value as in the previous run) was optimal, whereas an average annual recruitment of 55 million was optimal for TUNPØP-MØD3 (Run F). Both models give approximately the same goodness of fit (3% difference in  $\bar{D}_T$ ). In this case, as would be theoretically expected, TUNPØP-MØD3, with low mixing, requires an average stock biomass which is almost 40% greater than that for TUNPØP-MØD2 (660 and 480 thousand tons respectively) where mixing is instantaneous. This set of TUNPØP-MØD3 parameters has the following schematic form.



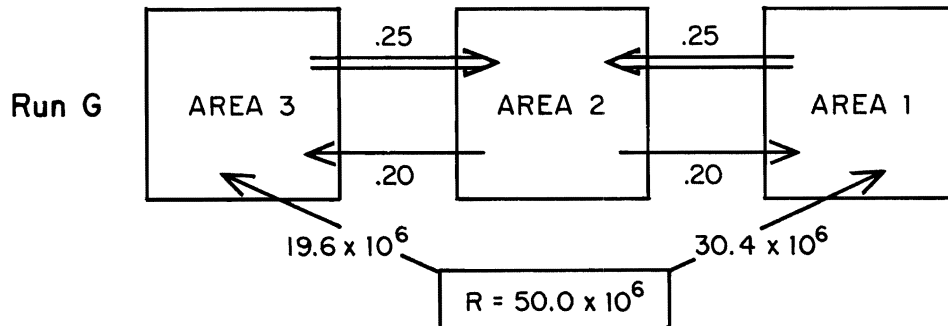
At this point in the validation sequence the optimal (in terms of the magnitude of  $\bar{D}_T$ ) set of parameters for TUNPØP-MØD2 has been arrived at, with an average annual recruitment of 46.4 million animals and an annual instantaneous natural mortality of  $M = 0.6$ . Therefore all subsequent runs in the validation sequence were concentrated on obtaining an "optimal" set of parameters for TUNPØP-MØD3. These runs were made under the overriding constraints that

- 1) natural mortality was fixed at 0.15 (Hennemuth (1961a), the lower limit on a quarterly basis)
- 2)  $I_{12_i} - I_{21_i} = 0.05$  for all  $i$ .

It was believed that these two constraints were necessary since part of the original motivation for the construction of TUNPØP-MØD3 was to test the hypothesis that early estimates of natural mortality were erroneously high due to an undetectable (at that time in the early 1960's) offshore movement of fish from area 1 to area 2 which would have resulted in  $M$  having

been over-estimated. These constraints provide one possible vehicle for the expression of this hypothesis.

In the next run (Run G) an attempt was made to find the optimal set of parameters for TUNPØP-MØD3 subject to the constraint that the instantaneous migration rates into and out of area 2 were symmetric on the inshore-offshore gradient. The set of parameters which minimize  $\bar{\bar{D}}_T$  are as follows:



Thus relative to Run F, where not only were the inter-area migration rates symmetric relative to area 2 but they were also constrained to a low level, a better fit (decrease in  $\bar{\bar{D}}_T$  of 7%) is obtained if the inter-area migration rates are allowed to increase substantially, with a corresponding decrease in annual recruitment from 55 million to 50 million.

Finally, tagging results (Bayliff, personal communication) indicate that the rates of mixing may be considerably lower between areas 3 and 2 than between areas 1 and 2. The last three validation runs were made to investigate this hypothesis. In all three runs, the four sets of inter-area migration rates were allowed to vary until an approximate minimum value of  $\bar{\bar{D}}_T$  was obtained. The first run (Run H) was made under the constraint that there is an onshore migration gradient from area 3 to area 2; thus

$$I_{32_i} - I_{23_i} = .05 \text{ for all } i,$$

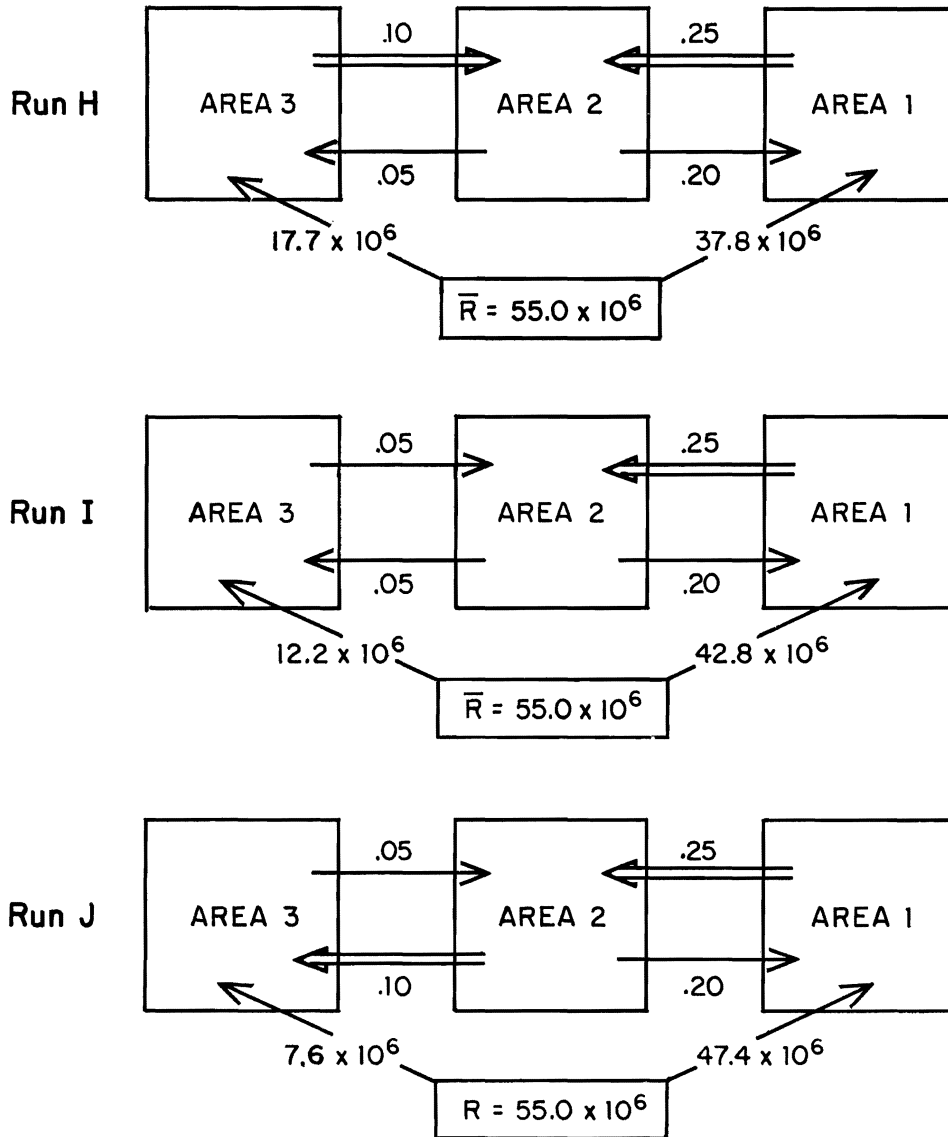
the second run (Run I) was made under the constraint of no migration gradient between area 3 and area 2; thus

$$I_{32_i} = I_{23_i} \text{ for all } i,$$

and the third run (Run J) was made under the constraint that there is an offshore migration from area 2 to area 3; thus

$$I_{23_i} - I_{32_i} = .05 \text{ for all } i.$$

The resultant parameters are as follows:



One would tend to infer from the output of these runs that the rates for interchange between areas 1 and 2 do, in fact, appear to be significantly larger than those between areas 3 and 2, regardless of the direction of the migration gradient. The results of these runs produce values of  $\bar{D}_T$  which range from 1% to 17% smaller than that for Run G, the next run up the "goodness of fit chain." A much more tenuous assertion is that if a migration gradient between areas 3 and 2 does exist, it is more likely to have an offshore (from area 2 to area 3) than an onshore direction. However the

results of Run I (no gradient) produce the same value of  $\bar{D}_r$  as that for Run J (offshore gradient), both with a value of  $\bar{D}_r$  which is 17% smaller than that for Run H (onshore gradient). It is interesting to note that as the migration gradient between areas 3 and 2 shifts in direction, the "optimal" balance in recruitment between area 1 and area 3 shifts accordingly while the magnitude of total recruitment remains constant.

In summary, a path has been traced (Figure 5) from a familiar, commonly used and established mathematical abstraction of the dynamics of the yellowfin stocks and surface fishery in the eastern Pacific to a new, highly speculative, and hopefully more realistic quantitative representation. What does it all mean? First, the initial estimates of standing stock, employing a relatively high natural mortality rate and low rate of recruitment, are likely underestimates. It seems that errors in estimates of growth (and consequently both age and recruitment) could have a similar effect (see Fonteneau and Francis (1975)). It is fairly typical for this type of modeling that if one examines a set of least-squares solutions for estimating all parameters at once, one ends up in a trough in which various combinations of parameter estimates give the same fit. However the effect of errors in the estimates of growth is not investigated in this paper. Second, it has been further substantiated that the estimate of the magnitude of the underlying population seems to depend rather heavily on the rates of mixing among the various fishery areas. The higher the rates of mixing are the smaller the underlying population needs to be in order to replicate recent levels of catch. At any rate these results indicate that the underlying population biomass is somewhere between 50% and 150% larger than was estimated from the earlier runs of TUNPØP. Third, this study demonstrates that to explain contemporary fishery dynamics, it is better to assume that the yellowfin population is not a single unit, uniformly distributed over the fishing area of the eastern Pacific, with instantaneous mixing between all areas. Finally in corroboration with tagging results (Bayliff, personal communication), it appears that the level of migration within the CYRA (between area 1 and 2) is appreciably higher than that between the offshore part of the CYRA (area 2) and the area west of the CYRA boundary (area 3).

### EXPERIMENTAL RESULTS

In the previous section the dynamics of various forms of TUNPØP were examined under historic conditions. In this section the behavior of TUNPØP is studied under extrapolated fishery conditions in which significant changes in the areal distribution of effort are manifested.

The following set of simulations is designed to examine model sensitivity to increases in effort in various combinations of the three fishery areas of the eastern Pacific (Figure 2). The scenario is as follows. Suppose

that one wishes to test the effects of adding 10,000 tons of class-6 purse-seine capacity to the eastern Pacific fleet. Using the linear relationship of Figure 6 between fleet capacity( $x$ ) and class-6 days/quarter( $y$ ) generated under non-regulated conditions based on the years 1969 through 1975, an increase in fleet capacity of 10,000 tons would (under extrapolation) result in an increase of 331 unregulated class-6 days of effort per quarter or 1,324 unregulated size class-6 days of effort per year. Using the *simulated* equilibrium conditions under the average 1972-1975 effort pattern of the previous section as a benchmark, is it "better" (in terms of total catch) to add this capacity to area 1 alone, area 2 alone, area 3 alone, or to distribute it over areas 1 and 2, areas 2 and 3, areas 1 and 3 or all three areas simultaneously? This question is investigated using the following forms of TUNPØP:

- 1) TUNPØP-MØD2 with annual recruitment of 46.4 million and an *annual* instantaneous natural mortality rate of  $M = 0.8$  (Run B of the previous section).
- 2) TUNPØP-MØD2 with annual recruitment of 46.4 million and an *annual* instantaneous natural mortality rate of  $M = 0.6$  (Run E of the previous section).
- 3) TUNPØP-MØD3 with annual recruitment of 55 million, an annual instantaneous natural mortality rate of  $M = 0.6$ , an offshore migration gradient between areas 1 and 2 and no migration gradient between areas 3 and 2 (Run I of the previous section).

Run B was selected because it closely resembles the old form of the model with high natural mortality, relatively low recruitment and instantaneous mixing over the entire fishery area. Run E contained the "best" set of parameters for TUNPØP-MØD2 and Run I the "best" set for TUNPØP-MØD3. Consequently these three forms of TUNPØP give maximum contrast in terms of model dynamics.

In each case, 1,324 days of effort are added uniformly over time to the average 1972-1975 effort for the appropriate area(s) being tested. In the cases of areas 1 and 2 effort is added uniformly over all four quarters of the fishing year, whereas in the case of area 3 effort is added uniformly over the last three quarters of the fishing year since there has never been any significant surface fishing in the first quarter west of the CYRA boundary. In the cases where the additional effort is distributed over more than one area the following relative distribution of effort (average for 1973, 1974) was used.

Quarter	A1	A2	A3
1	.39	.61	.00
2	.67	.16	.17
3	.35	.06	.59
4	.29	.36	.35

The results, given in Table 6, clearly demonstrate the effect of the rates of mixing among areas on catch dynamics. In the case of TUNPØP-MØD2, where mixing is instantaneous, the total catch always decreases as a result of increasing effort in one part of the fishery without decreasing it in another, with the decrease being more pronounced the more the additional effort is concentrated in the inshore areas. Of course this does not imply that the population was being fished at some optimal level during the period from 1972-1975. Subsequent simulations employing both model forms have indicated that a major re-distribution of effort could produce a substantial increase in catch. On the other hand, in the case of TUNPØP-MØD3 where mixing is rather slow, particularly in the offshore areas, the total catch always increases as a result of increasing effort in various parts of the fishery, with the increase being more pronounced the more the additional effort is concentrated in the offshore areas. Thus all three forms of TUNPØP indicate that with a distribution of effort similar to that found during 1972-1975, an increase of effort will "benefit" the fishery most (or "damage" the fishery least) if it is applied most heavily to the offshore areas, in particular to area 3. In other words, the fishery appears to be most capable of absorbing increases in effort due to increases in fleet capacity in the offshore areas under the management scheme of the past few years.

### SUMMARY

This paper is an attempt to employ TUNPØP in its varied forms to 1) explore the relationship between the catch and effort data of the eastern Pacific yellowfin fishery and the underlying distribution and abundance of the fish, and 2) show how that distribution might, in turn, affect events in the fishery.

The specific findings can be categorized as follows:

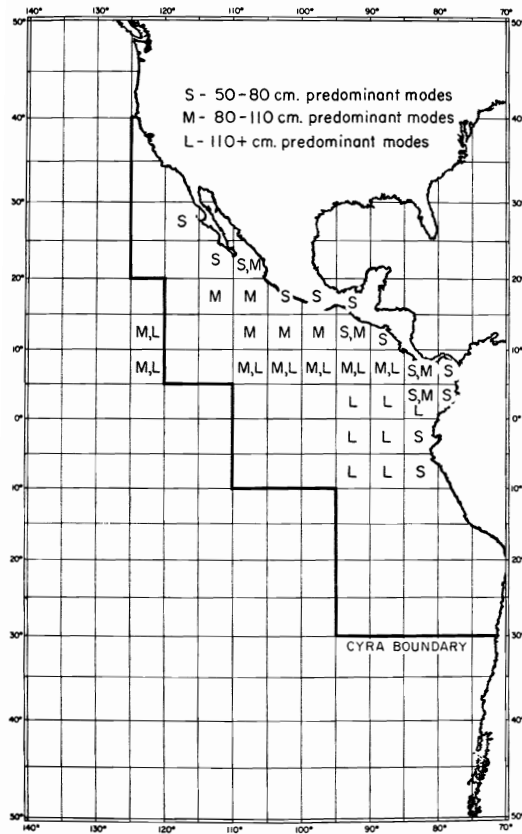
1. The concept of the yellowfin stock of the eastern Pacific as a single unit, uniformly distributed over the existing fishing area with instantaneous mixing among all areas, does not appear to represent contemporary fishery dynamics.
2. Our traditional estimates of standing stock are probably low due to an overestimate of natural mortality and underestimate of recruitment.
3. The size of the stock appears to depend on the rates of mixing among the various fishery areas.
4. The amount of mixing within the CYRA appears to be appreciably higher than that between the offshore part of the CYRA and the area west of the CYRA boundary.
5. Under the present system of management, and given that the stock

is maintained at levels which have no deleterious effect on subsequent recruitment, the yellowfin fishery appears to be most capable of absorbing increases in effort in the offshore areas.

6. A significant redistribution of effort over time and area could result in an increase in the overall yield of yellowfin, especially if the effort is shifted more heavily into the offshore areas of the fishery.

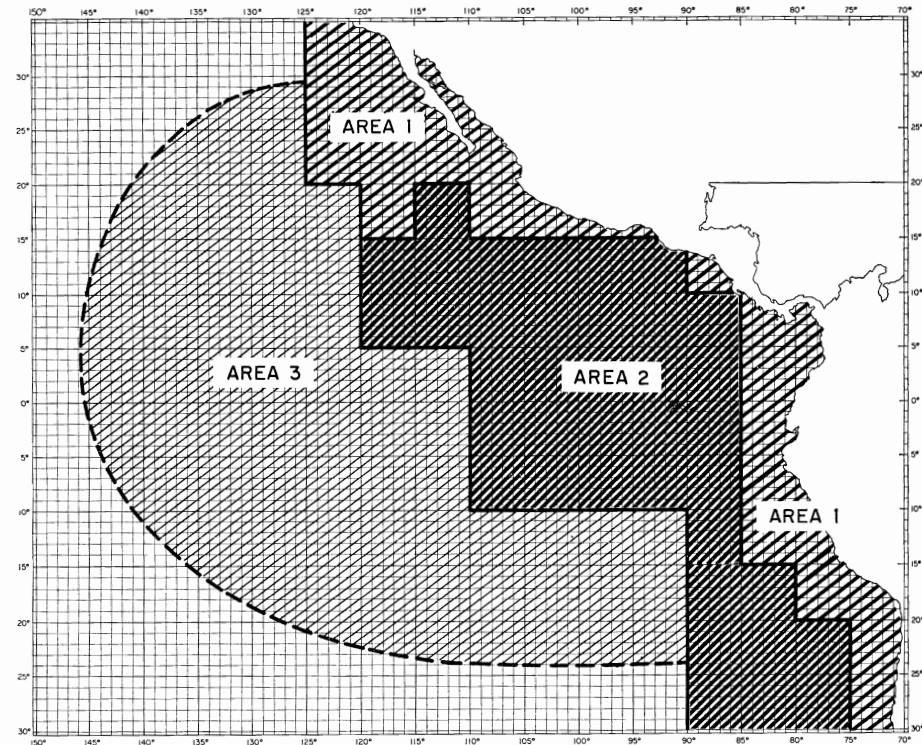
Finally it should be emphasized that TUNPØP now has the potential for exploring the consequences of various scenarios that might develop in the forthcoming era of 200-mile coastal zones.

In general it is hoped that this paper has further demonstrated a need to investigate both the biological and physical mechanisms which control the yellowfin population and fishery dynamics. These investigations should include studies on migration, natural mortality (the dynamics of natural mortality and methods of estimation, both of which seem to be lacking for tunas) and population structure. The most "realistic" forms of TUNPØP (*i.e.* those forms which best duplicate observed events) which were described in this paper should not be construed to represent the fishery dynamics exactly as they are. Rather, the results should direct us to expand our abstract conceptualization of the resource, and guide us toward the realization that the mechanisms which significantly affect the population and fishery dynamics are more numerous and complex than the assumptions of our old well-established quantitative techniques would lead us to believe. Only if we attempt to understand the system as a dynamic biological structure, interacting with its physical environment, and seek out new ways to understand the complex series of interactions which make up this system, remembering at all times that the words "average," "constant," "long-term," and "sustainable" apparently have little meaning relative to the dimensions of time and area in this situation, can we hope to increase our understanding so that we can realize our obligation "to let others know how it all works, leaving them enough options to do what they wish in the future" (Larkin, 1972).



**FIGURE 1.** Predominant modes in the yellowfin catch (1969-1973).

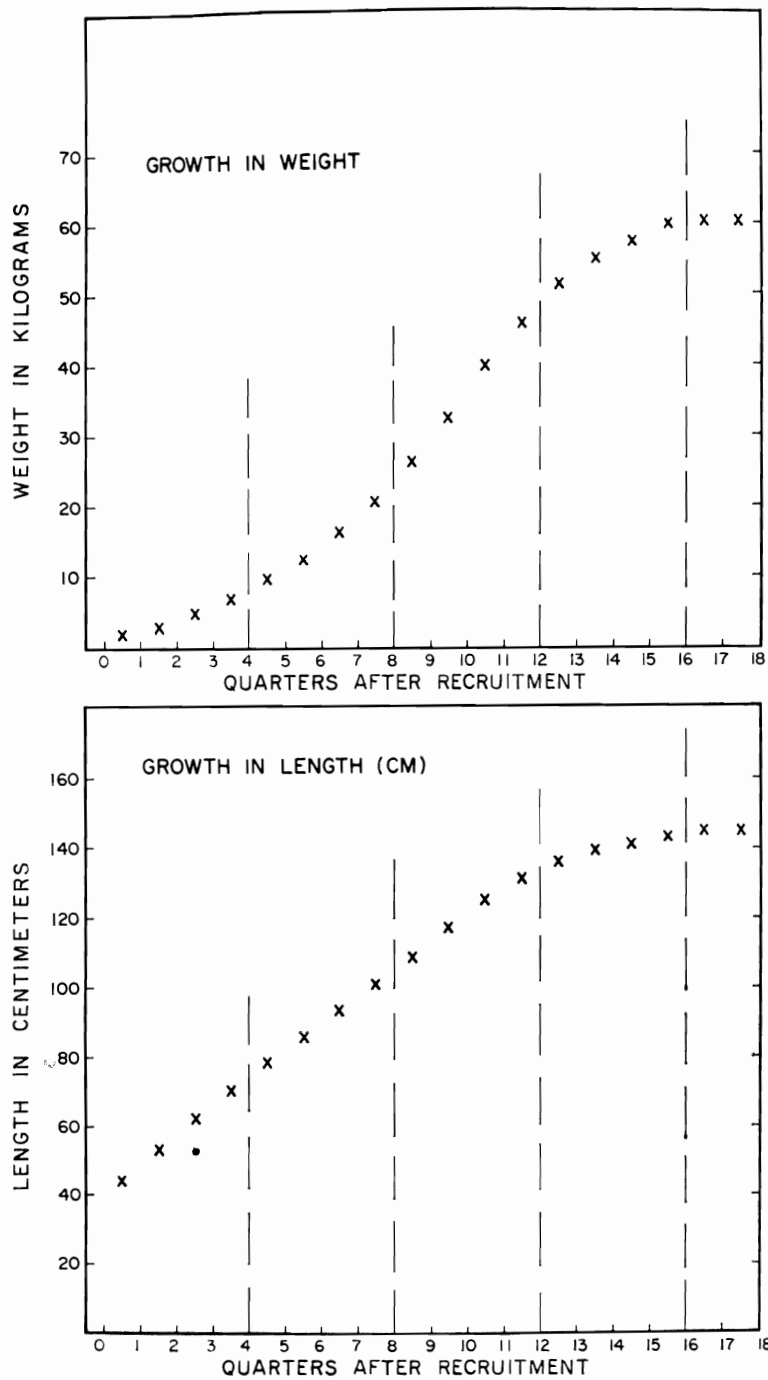
**FIGURA 1.** Modas predominantes en la captura del atún aleta amarilla (1969-1973).



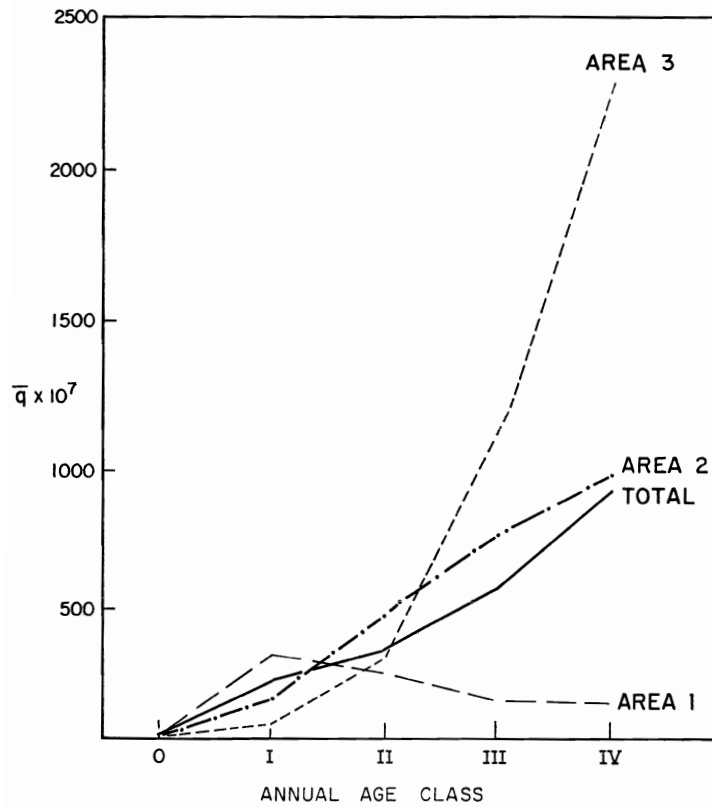
**FIGURE 2.** Areal stratification for yellowfin population simulator.

**FIGURA 2.** Estratificación por áreas de la simulación de la población del atún aleta amarilla.



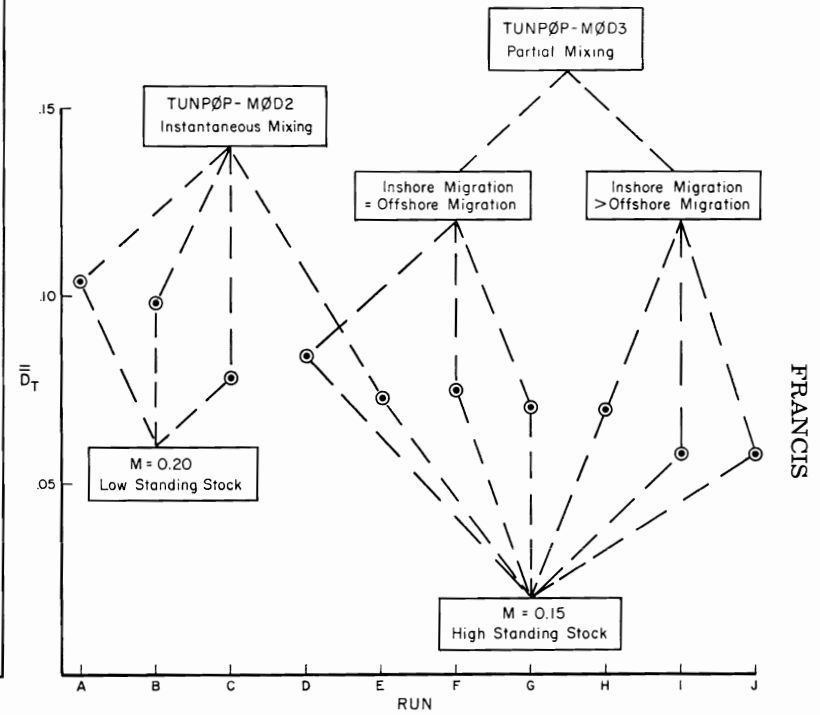


**FIGURE 3.** Age-weight and age-length relationships used in TUNPØP.  
**FIGURA 3.** Relación edad-peso y edad-talla empleadas en TUNPØP.



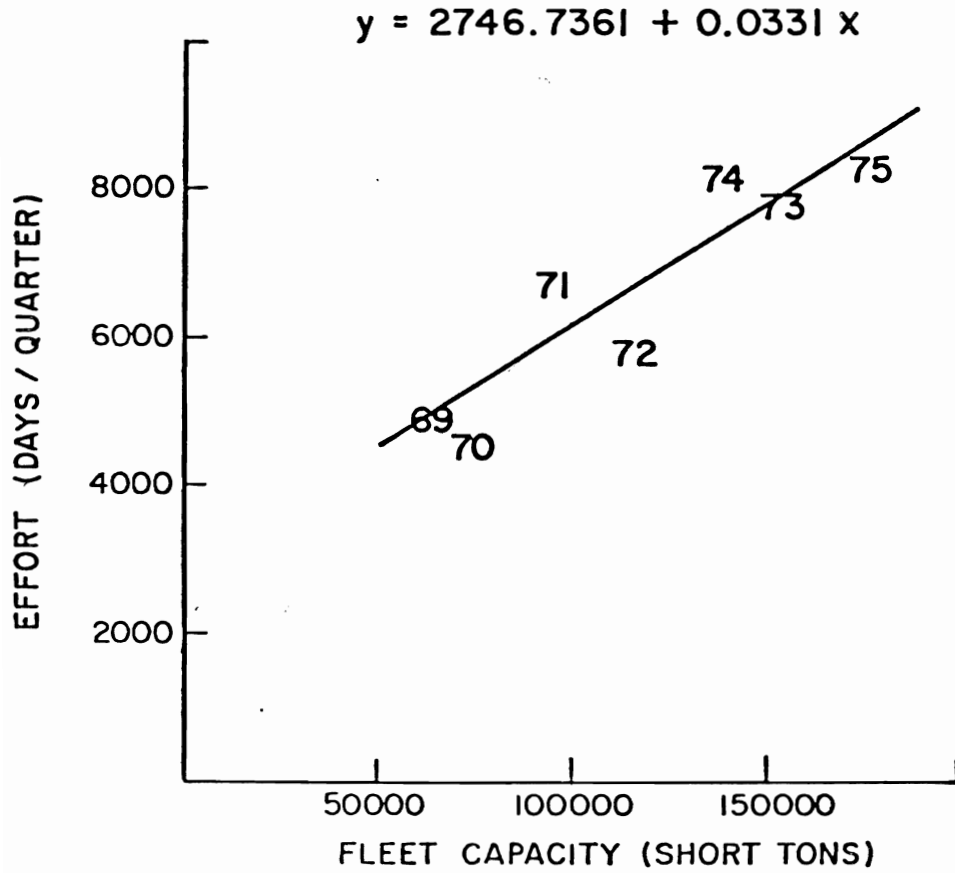
**FIGURE 4.** Average quarterly age-specific catchability coefficients for the three TUNPØP areas and the total eastern Pacific.

**FIGURA 4.** Promedio trimestral de los coeficientes de capturabilidad e edad específica de las tres zonas de TUNPØP y de todo el Pacífico oriental.



**FIGURE 5.** Summary of the validation sequence.

**FIGURA 5.** Resumen de la secuencia de la validación.



**FIGURE 6.** Estimated linear relationship between fleet capacity and non-regulated effort for the years 1969-1975.

**FIGURA 6.** Relación lineal estimada entre la capacidad de la flota y el esfuerzo sin reglamentar en los años 1969-1975.

**TABLE 1.** Estimates of effort in class-6 days for all TUNPØP validation runs.**TABLA 1.** Estimaciones del esfuerzo en días de la clase 6 de arqueo para todas las pasadas de validación de TUNPØP.

Year Año	Quarter Trimestre	Area			Total
		1	2	3	
1969	1	3,764	2,635	0	6,399
	2	2,459	1,338	68	3,865
	3	1,243	140	382	1,765
	4	1,745	86	524	2,355
1970	1	3,094	2,220	0	5,314
	2	1,870	1,591	347	3,808
	3	2,093	0	1,113	3,206
	4	1,152	565	1,115	2,832
1971	1	4,626	1,892	0	6,518
	2	2,030	2,163	200	4,393
	3	420	2,342	1,029	3,791
	4	836	126	965	1,927
1972	1	2,383	4,243	0	6,626
	2	2,300	1,378	1,100	4,778
	3	192	165	1,741	2,098
	4	576	389	650	1,615
1973	1	5,039	4,902	0	9,941
	2	4,004	841	1,244	6,089
	3	1,299	400	1,651	3,350
	4	2,178	1,627	1,204	5,009
1974	1	3,112	4,555	0	7,667
	2	4,187	3,277	486	7,950
	3	1,621	822	2,674	5,117
	4	1,707	1,732	822	4,261
1975	1	3,709	4,598	0	8,307
	2	3,546	3,745	828	8,119



**TABLE 3.** Results of model "tuning" for 1969-1971 average equilibrium fishery.**TABLA 3.** Resultados de la afinación ("tuning") del modelo para la pesca promedio equilibrada de 1969-1971.

		area 1	area 2	area 3	Total	$\bar{D}$ (1969-1971)
Observed 1969-1971	* $C$	61,532	65,997	24,109	151,638	
Observada 1969-1971	** $\bar{w}$	17.66	38.73	56.88	27.02	
Run A TUNPØP-MØD2	$C$	65,844	62,888	26,604	155,336	
$M = .2, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	17.99	38.26	62.32	27.11	
Untuned (sin ajuste)	$D^*$	.0444	.0296	.0996		.0479
Run B TUNPØP-MØD2	$C$	61,443	67,042	24,079	152,564	
$M = 2, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	18.28	39.11	64.04	27.99	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0183	.0232	.0636		.0276
Run C TUNPØP-MØD2	$C$	61,728	65,891	24,498	152,117	
$M = .2, \bar{R} = 70.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	17.17	34.78	53.15	25.56	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0155	.0576	.0409		.0378
Run D TUNPØP-MØD3	$C$	61,758	66,185	24,014	151,957	
$M = .15, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.69	38.39	54.25	23.86	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0859	.0058	.0251		.0414
Run E TUNPØP-MØD2	$C$	61,707	65,902	24,129	151,738	
$M = .15, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	17.20	34.84	55.72	25.67	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0145	.0510	.0106		.0297
Run F TUNPØP-MØD3	$C$	61,490	65,984	24,156	151,630	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	15.02	38.06	53.43	24.15	
Tuned (ajustado) Run A	$D^*$	.0752	.0010	.0313		.0359
Run G TUNPØP-MØD3	$C$	61,942	66,368	24,135	152,445	
$M = .15, \bar{R} = 50.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	15.89	34.86	51.93	24.33	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0535	.0528	.0441		.0517
Run H TUNPØP-MØD3	$C$	61,469	65,968	24,179	151,616	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	16.06	35.68	53.03	24.72	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0458	.0396	.0353		.0415
Run I TUNPØP-MØD3	$C$	61,614	66,077	24,014	151,705	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	15.36	34.29	58.15	23.89	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0660	.0580	.0132		.0542
Run J TUNPØP-MØD3	$C$	61,829	65,970	24,123	151,922	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.86	32.69	61.53	23.12	
Tuned (ajustado)	$D^*$	.0817	.0782	.0412		.0737

\*  $C$  = catch in short tons\*\*  $\bar{w}$  = average weight of an individual in the catch in pounds $D^*$  = sum of relative deviations of observed from expected catches and average weights in the catch (see p. 225).

**TABLE 4.** Results of model validation for 1972-1975 average fishery.**TABLA 4.** Resultados de la validación del modelo de la pesca promedio de 1972 a 1975.

		area 1	area 2	area 3	Total	$\bar{D}$ (1972-1975)
Observed — Observada 1972-1975	* <i>C</i> ** $\bar{w}$	70,106 14.82	98,701 28.63	44,178 59.47	212,985 23.88	
Run A TUNPØP-MØD2	<i>C</i>	65,343	84,920	30,652	180,915	
$M = .2, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	16.27	34.70	50.79	25.60	
Untuned (sin ajuste)	<i>D</i> *	.0829	.1758	.2386		.1529
Run B TUNPØP-MØD2	<i>C</i>	61,125	91,106	28,360	180,591	
$M = .2, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	16.53	35.55	52.79	26.57	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.1218	.1594	.2352		.1586
Run C TUNPØP-MØD2	<i>C</i>	65,421	103,687	40,004	209,112	
$M = 2, \bar{R} = 70.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	16.16	33.99	49.63	26.45	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.0786	.1189	.1300		.1084
Run D TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	65,949	93,341	41,296	200,586	
$M = .15, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.17	36.46	49.50	24.92	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.0516	.1639	.1165		.1172
Run E TUNPØP-MØD2	<i>C</i>	64,404	101,575	38,798	204,777	
$M = .15, \bar{R} = 46.4 \times 10^6$	$\bar{w}$	16.11	33.97	51.06	26.43	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.0842	.1078	.1316		.1049
Run F TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	66,885	99,168	43,302	209,355	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.55	37.47	49.52	25.79	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.0321	.1567	.0936		.1038
Run G TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	65,730	98,948	40,580	205,258	
$M = .15, \bar{R} = 50.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	15.23	33.78	48.62	25.40	
Tuned (adjustado)	<i>D</i> *	.0451	.0912	.1320		.0845
Run H TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	65,677	100,242	43,692	209,611	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	15.41	34.82	49.32	26.11	
Tuned (adjustado) Run C	<i>D</i> *	.0515	.1159	.0909		.0905
Run I TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	66,413	99,229	43,074	208,716	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.76	33.40	54.42	25.26	
Tuned (adjustado) Run C D	<i>D</i> *	.0284	.0860	.0550		.0613
Run J TUNPØP-MØD3	<i>C</i>	66,837	97,723	42,954	207,514	
$M = .15, \bar{R} = 55.0 \times 10^6$	$\bar{w}$	14.28	31.78	57.97	24.42	
Tuned (adjustado) Run D	<i>D</i> *	.0416	.0600	.0265		.0471

\* *C* = catch in short tons\*\*  $\bar{w}$  = average weight of an individual in the catch in pounds*D*\* = sum of relative deviations of observed from expected catches and average weights in the catch (see p. 225).

**TABLE 5.** Catch weighted average "goodness of fit" for 1969-1975.**TABLA 5.** Promedio de la "bondad del ajuste" ponderado según la captura, para 1969-1975.

		$\bar{D}_T (j)$			Overall average	Average 72-75
		area 1	area 2	area 3	$\bar{D}_T$	stock biomass tons x 10 <sup>6</sup>
				Promedio total	Promedio 72-75	
				$\bar{D}_T$	biomasa de la poblacion tons. x 10 <sup>6</sup>	
Run A	TUNPØP-MØD2, $M = .2$ $\bar{R} = 46.4 \times 10^6$ , untuned sin ajuste	.0636	.1136	.1740	.1044	270
Run B	TUNPØP-MØD2, $M = 2$ $\bar{R} = 46.4 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0699	.1017	.1564	.0986	270
Run C	TUNPØP-MØD2, $M = .2$ $\bar{R} = 70.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0480	.0951	.0962	.0787	540
Run D	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 46.4 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0682	.0983	.0829	.0845	470
Run E	TUNPØP-MØD2, $M = .15$ $\bar{R} = 46.4 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0501	.0854	.0852	.0729	480
Run F	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 55.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0527	.0945	.0713	.0753	660
Run G	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 50.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0492	.0758	.0992	.0704	546
Run H	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 55.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0487	.0856	.0711	.0699	665
Run I	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 55.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0465	.0748	.0400	.0583	652
Run J	TUNPØP-MØD3, $M = .15$ $\bar{R} = 55.0 \times 10^6$ , tuned ajustado	.0609	.0673	.0318	.0583	670



**TABLE 6.** Percent change in catch over 1972-1975 average equilibrium values as a function of the addition of 10,000 tons capacity to the fleet.**TABLA 6.** Porcentaje del cambio en la captura sobre el promedio de los valores de equilibrio de 1972-1975, como función de la agregación de 10,000 toneladas de capacidad a la flota.

		10,000 tons capacity added to area(s)	Percent change in catch			
		10,000 ton. de capacidad agregadas al área(s)	Cambio del porcentaje en la captura			
			Area 1	Area 2	Area 3	Total
TUNPØP-MØD2	Run B	1	+6	-11	-14	-6
		2	-5	-1	-16	-5
		3	-3	-10	+13	-4
		1, 2	+1	-6	-15	-5
		2, 3	-4	-4	-6	-4
		1, 3	+4	-11	-6	-5
		1, 2, 3	+0	-7	-9	-5
		72-75 Avg. Eq. catch	60,305	88,386	27,696	176,387
TUNPØP-MØD2	Run E	1	+7	-9	-11	-4
		2	-4	+2	-12	-2
		3	-3	-8	+19	-1
		1, 2	+2	-4	-12	-4
		2, 3	-3	-1	-1	-2
		1, 3	+5	-9	-2	-3
		1, 2, 3	+1	-5	-5	-3
		72-75 Avg. Eq. catch	63,856	100,302	38,482	202,640
TUNPØP-MØD3	Run I	1	+7	-4	-1	+0
		2	-1	+6	-1	+2
		3	-0	-1	+22	+4
		1, 2	+4	+1	-1	+1
		2, 3	-1	+4	+8	+3
		1, 3	+5	-3	+6	+2
		1, 2, 3	+3	+1	+5	+2
		72-75 Avg. Eq. catch	65,161	93,375	41,095	199,631

# **TUNPØP: UNA SIMULACION DE LA DINAMICA Y DE LA ESTRUCTURA DE LA POBLACION DEL ATUN ALETA AMARILLA Y LA PESCA EPIPELAGICA EN EL OCEANO PACIFICO ORIENTAL**

por

**Robert C. Francis\***

## **EXTRACTO**

Se han empleado tres versiones diferentes de TUNPØP, un modelo de simulación de la computadora (basado en la estructura de la edad) de la población y la pesca epipelágica del atún aleta amarilla, *Thunnus albacares*, del Pacífico oriental, para revelar los mecanismos que parecen tener un efecto importante en la dinámica pesquera. Se emplean los datos verdaderos de esta pesca para hacer deducciones sobre la distribución de los peces y para mostrar cómo puede influir esta distribución en los eventos de pesca. La conclusión más importante de este estudio es que el concepto de que la población del aleta amarilla del Pacífico oriental es una unidad homogénea, es inadecuado para representar la historia reciente de pesca. Se teoriza sobre la talla y distribución de la población subyacente como también sobre su producción potencial en la pesca epipelágica al cambiar el nivel y distribución del esfuerzo.

## **INTRODUCCION**

Larkin (1972) sugirió adecuadamente un papel para los modelos cuantitativos de los recursos pesqueros, como un método de experimentación en forma nueva para administrar los recursos para el bien común. Explica además que el objeto de los modelos de simulación “debe ser explorar el espectro más extenso de consecuencias en el campo más amplio de normas alternativas”, y que por lo consiguiente, el “objetivo de la ciencia pesquera sería obtener el conocimiento máximo”. En su artículo Larkin desafía a los modeladores pesqueros y les dice que se alejen de las extrapolaciones “lamentablemente sin imaginación” de las series de suposiciones que ya son anticuadas y que consideren los modelos como si fueran dimensiones paralelas al poder de la imaginación.

Desde hace mucho tiempo se ha evidenciado que las técnicas cuantitativas que se han utilizado desde hace varias décadas para determinar la interacción entre la población del atún aleta amarilla en el Pacífico oriental y la pesca epipelágica o de superficie, son inadecuadas para describir la dinámica contemporánea pesquera. Además, no podemos esperar que nuestras medidas administrativas mejoren, hasta que los mecanismos biológicos y físicos que controlan tanto la población como la dinámica pesquera sean investigados adecuadamente y sean más conocidos. El pro-

---

\*Dirección actual: Fisheries Research Division  
Ministry of Agriculture and Fisheries  
P. O. Box 19062  
Wellington, New Zealand

pósito de este estudios es emplear, en varias formas, TUNPØP, un modelo computarizado de simulación de la estructura de la edad de la población del atún aleta amarilla, *Thunnus albacares* y de la pesca epipelágica de atún en el Océano Pacífico oriental, para calcular el significado y la sensibilidad de nuestro conocimiento sobre la población del atún aleta amarilla del Océano Pacífico oriental, su dinámica y estructura, al pronosticar las consecuencias de la pesca en las poblaciones y examinar los efectos de una extensión racional del poder de la imaginación a los problemas administrativos del atún aleta amarilla. Los datos verdaderos de esta pesca se emplean para teorizar en cierto grado sobre la distribución de los peces y demostrar como esa distribución, puede a la vez, influir en los eventos de pesca. No se debe interpretar este ejercicio de modelación como si tratara de representar el sistema físico y biológico exactamente como es; más bien, se debe tratar como si fuera a indicar los defectos evidentes de nuestro pensamiento contemporáneo y orientar nuestra futura investigación.

En este estudio se utilizan tres versiones diferentes de TUNPØP con el fin de explicar algunos de los mecanismos que parecen tener un efecto en la dinámica pesquera del aleta amarilla del Pacífico oriental. Por lo consiguiente, no son solo los valores de los parámetros del modelo los que están sujetos a escrutinio, pero la forma básica, en sí misma, del pensamiento. Es muy importante observar que las pasadas de las series del modelo presentadas en este estudio indican que el concepto de la población del aleta amarilla como unidad homogénea, es inadecuado para representar la historia actual de la pesca.

La descripción básica y la documentación característica de TUNPØP han sido suministradas por Francis (1974a). En los informes anuales de la CIAT de 1972, 1973, 1974 y 1975, Francis (1974b), Fonteneau y Francis (1975) y Sharp y Francis (1976) se describe el empleo del modelo.

### RECONOCIMIENTO

Le dedico este trabajo a Gary Sharp, cuyas ideas y espíritu entusiástico constituyeron la fuerza principal que me guió durante los cinco años que estuve en la Comisión, a James Joseph quien me concedió la libertad de dirigir el curso de este proyecto y al mismo tiempo con mucho tacto y delicadeza me ayudó a obtener la perspectiva de modelación como instrumento en el avalúo del recurso y su administración, y a Patrick Tomlinson cuyo sentido sobre la lógica y habilidad en representar conceptos ecológicos en formas analíticas importantes, me han ayudado más que cualquier estudio universitario; además deseo agradecer a W. Bayliff, J. Gulland, P. Larkin, J. Schnute y B. Shafer, por sus valiosos comentarios sobre el manuscrito. Finalmente deseo agradecer a mis colegas de la Comisión por su guía y ayuda durante el curso de este proyecto.

### EVOLUCION DEL MODELO

Una de las principales aplicaciones de TUNPØP es examinar el rendimiento potencial del aleta amarilla en el Pacífico oriental bajos otros esquemas administrativos, varios de los cuales incluyen el conocimiento de las consecuencias al reducir o completamente eliminar el esfuerzo en numerosas zonas en las que maniobra la pesca. Por lo consiguiente, fue necesario agregar la dimensión de la zona a la forma existente del modelo con el fin de aumentar la resolución práctica de TUNPØP. Al hacerlo, se concibieron dos formas *nuevas* del modelo; la primera (TUNPØP-MØD2) comprendió la dimensión solo de la zona del sector de captura y la segunda (TUNPØP-MØD3) comprendió la dimensión tanto de la zona del sector de captura como el sector de la población básica. Esta sección describe la estructura analítica de las tres versiones de TUNPØP que se usan más tarde para hacer deducciones sobre la pesca y la población básica.

#### TUNPØP-MØD1

La forma básica y analítica de la versión original de TUNPØP (Francis, 1974) es la siguiente:

Permitamos que

- $[t, t+1]$  = período de la unidad de tiempo que comienza a tiempo  $t$  y termina a tiempo  $t+1$  durante el cual se supone que una generación determinada de peces es de edad  $i$ ,
- $N_i(x)$  = número de peces de edad  $i$  durante el tiempo  $x \in [t, t+1]$ ,
- $q_i$  = coeficiente de capturabilidad en el grupo de edad  $i$ ,
- $f(t)$  = número de días normales de esfuerzo durante  $[t, t+1]$ ,
- $F_i(t)$  = mortalidad instantánea por pesca (durante una unidad de tiempo) del grupo de edad  $i$  durante  $[t, t+1]$ ,  
=  $q_i f(t)$ ,
- $M_i$  = índice de la mortalidad natural instantánea (durante una unidad de tiempo) del grupo de edad  $i$ ,
- $Z_i(t)$  = índice total de mortalidad (durante una unidad de tiempo) del grupo de edad  $i$  durante  $[t, t+1]$ ,
- $w_i(t)$  = peso promedio de un individuo al entrar en el grupo de edad  $i$  durante el momento  $t$ ,
- $YN_i(t)$  = captura en cantidad del grupo de edad  $i$  durante  $[t, t+1]$ , y
- $YW_i(t)$  = captura en peso del grupo de edad  $i$  durante  $[t, t+1]$ .

Luego

$$\frac{dN_i(x)}{dx} = -Z_i(t)N_i(x)$$

$$YN_i(t) = F_i(t) \int_t^{t+1} N_i(x) dx$$

$$YW_i(t) = F_i(t) \int_t^{t+1} B_i(x) dx$$

donde

$$\begin{aligned} B_i(x) &= \text{biomasa de la edad } i \text{ durante el tiempo } x \in [t, t+1], \\ &= N_i(x) w_i(t) e^{G_i(t)(x-t)} \end{aligned}$$

$$G_i(t) = \ln \left[ \frac{W_{i+1}(t+1)}{W_i(t)} \right]$$

Así que la versión original de TUNPØP, denominada en adelante TUNPØP-MØD1, fue básicamente bidimensional, siendo las dimensiones tiempo y edad. Sin embargo, si se examina la estructura de la talla en la captura como una función de tiempo y zona, puede verse que el aleta amarilla en ciertas edades se captura más fácilmente en algunos estratos de tiempo-zona que en otros. La Figura 1 presenta las tallas relativas de los peces de modas predominantes en la captura de las zonas muestreadas de 5 grados a las que se ha dedicado más esfuerzo en el Pacífico oriental desde 1969 a 1973. Los peces pequeños (50-80 cm) son mucho más vulnerables y disponibles o accesibles en las zonas costeras que en las de alta mar del Pacífico oriental y lo contrario es verdad en cuanto a los peces de talla mediana (80-110 cm) y los grandes (110+ cm). Además el método predominante de los cerqueros en las zonas costeras (a lo largo de la costa de la América Central y del Sur) es la pesca de "cardúmenes de peces o sin delfines" (captura de aleta amarilla en cardúmenes epipelágicos no asociados con delfines), mientras que el método predominante de los cerqueros que pescan aleta amarilla en las zonas de altura es el de "la pesca con delfines" (captura de aleta amarilla asociados con cardúmenes de delfines). En la zona al oeste del límite del ARCAA se captura aleta amarilla casi exclusivamente asociado con cardúmenes de delfines y los peces tienden a ser grandes y medianos.

### TUNPØP-MØD2

La primera modificación de la dimensionalidad de TUNPØP incluye solamente la adición de la dimensión de la zona al sector de pesca. Para realizar esta modificación se dividió el Pacífico oriental en tres zonas en las que los coeficientes de capturabilidad de talla específica han sido relativamente constantes de un año a otro. Estas zonas (Figura 2) fueron seleccionadas con base al examen de las modas predominantes en estimaciones de captura de talla específica por trimestre y zonas de 5 grados desde 1969 a 1973. Se estimaron los coeficientes de capturabilidad, tiempo y edad específica para cada zona como sigue:

Permitamos

$$\begin{aligned} YN_{ij}(t) &= \text{captura en números del grupo de edad } i \text{ en la zona } j \\ &\quad \text{durante } [t, t+1] \\ &= q_{ij}f_j(t)\bar{N}_i(t), \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} f_j(t) &= \text{número de días normales de esfuerzo en la zona } j \text{ durante} \\ &\quad [t, t+1], \\ q_{ij} &= \text{coeficiente de capturabilidad del grupo de edad } i \text{ en la zona} \\ &\quad j, \text{ y} \\ \bar{N}_i(t) &= \text{media del número de peces de edad } i \text{ en la población} \\ &\quad \text{durante } [t, t+1] = \int \nu^{t+1} N_i(x) dx. \end{aligned}$$

Así que

$$\begin{aligned} YN_{i.}(t) &= F_i(t)\bar{N}_i(t) = q_i(t)f(t)\bar{N}_i(t) \\ &= \sum_{j=1}^3 YN_{ij}(t) \\ &= \sum_{j=1}^3 \left[ q_{ij}f_j(t) \right] \bar{N}_i(t). \end{aligned}$$

Se sigue que

$$\frac{YN_{ij}(t)}{YN_{i.}(t)} = \frac{q_{ij}f_j(t)}{F_i(t)},$$

y

$$\hat{q}_{ij} = \frac{YN_{ij}(t)F_i(t)}{YN_{i.}(t)f_j(t)}.$$

Por lo consiguiente, la suposición básica que apoya el uso de esta forma de TUNPØP, denominada en adelante TUNPØP-MØD2, es que la capturabilidad total de un grupo de edad en la población es igual a la media de la capturabilidad zonal, ponderada según el esfuerzo,

$$q_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^3 q_{ij}f_j(t)}{\sum_{j=1}^3 f_j(t)}$$

haciendo que la capturabilidad total de la población sea una función tanto de edad como de tiempo, reflejando parcialmente la dependencia del tiempo en la distribución del esfuerzo de las tres zonas.

Existen ventajas y desventajas al emplear este sistema en el modelo. Por una parte se reflejaría una reducción importante en el esfuerzo en la 1 zona, la zona costera, al reducirse la captura de peces pequeños, como era de esperar. En TUNPØP-MØD1 (bidimensional), el esfuerzo queda independiente al aplicarlo a través de la estructura de la edad de la población, mientras que en TUNPØP-MØD2 (tridimensional), la distribución de la edad y la magnitud absoluta de la captura dependen tanto del nivel de la distribución del esfuerzo como de la distribución por zonas. Por otra parte, una cantidad infinita de esfuerzo aplicada solamente en una zona TUNPØP-MØD2 durante una unidad de tiempo podría teóricamente exterminar toda la población, un concepto difícilmente realístico. Esto se debe a que TUNPØP-MØD2 emplea una población individual con mezcla instantánea (es decir, se supone que en cualquier momento la población se encuentra uniformemente distribuida respecto al mecanismo de muestreo provisto por la pesca). Así, que como en cualquier modelo de simulación, se debe tener cautela y buen criterio al aplicar cualquier forma del modelo con el fin de obtener una nueva perspectiva.

En realidad TUNPØP-MØD2, provee un mecanismo mediante el cual la mortalidad por pesca a distintas edades puede variar diferentemente, dependiendo de cómo se ha ejercido el esfuerzo sobre la zona total pesquera. Esta modificación del modelo se concibió principalmente para representar las diferencias de la mortalidad por la pesca a edad específica entre las zonas pesqueras de bajura y cercanas a la costa (1 zona) en las que la mayoría de la pesca que toma lugar es predominantemente de “no delfines” y las zonas (2 y 3 zona) donde se realiza predominantemente la pesca con delfines. Un extenso examen de TUNPØP-MØD2 (informado en un capítulo posterior) indica que solamente la agregación de la dimensión de la zona al sector de captura (sin cambiar los valores de algunos de los parámetros básicos del modelo) no amplió apreciablemente la resolución del modelo para tomar en cuenta los cambios recientes tanto de la magnitud como de la estructura de la edad en la captura del aleta amarilla en el Pacífico oriental. Se decidió, por lo consiguiente, volver a estructurar el sector de la población de TUNPØP, con el fin de investigar el posible efecto de la heterogeneidad zonal de la población básica del aleta amarilla en el resultado del modelo.

### **TUNPØP-MØD3**

La segunda modificación de TUNPØP trata de sintetizar la experiencia pasada y el concepto informado en una abstracción preliminar de una posible forma de la población del aleta amarilla y de la estructura de pesca. Se formularon varios conceptos generales e hipótesis y se incorporaron en este modelo reestructurado:

1) La pesca del aleta amarilla tiende a estratificarse a lo largo de un gradiente costero y de altura. Por lo consiguiente se dividió el Pacífico oriental en tres zonas (Figura 2) (1 zona—ARCAA de bajura, 2 zona—

ARCAA de altura, 3 zona—al oeste del límite del ARCAA). La dinámica de población y de la pesca en cada zona fue representada mediante series separadas de ecuaciones diferenciales.

2) Los resultados del marcado (Fink y Bayliff (1970), Bayliff y Rothschild (1974), Bayliff (comunicación personal)) indicaron desplazamientos multidireccionales de los peces entre las zonas adyacentes. Desafortunadamente, los estudios del marcado no han producido aún estimaciones de los índices del desplazamiento direccional. Sin embargo, no existe ninguna prueba que apoye la hipótesis de que la mezcla es instantánea y completa (*e.d.* que la población se encuentra uniformemente distribuida con respecto a las artes) en cuanto a las zonas del Pacífico oriental. Aunque se ha comprobado una heterogeneidad genética y de la estructura de la edad (Sharp, comunicación personal), no existe una prueba conclusiva de que las diferentes zonas tienen subpoblaciones genéticas distintas. Se decidió, por lo tanto, que la posibilidad de migración entre las subzonas adyacentes debían incorporarse con la mayor flexibilidad posible en el modelo. Así que existe la probabilidad positiva de que un pez determinado, de la población, puede vivir en cualquier parte, en cada una de las tres zonas pesqueras, durante cualquier tiempo de su vida después del reclutamiento.

3) Las estimaciones de la mortalidad natural (Hennemuth (1961b), Bayliff (1971)) se hicieron en una época en que la pesca maniobraba predominantemente en la 1 zona. Como existen pruebas subsiguientes de desplazamiento de la 1 zona a la 2 zona (Bayliff, comunicación personal) se supuso que la estimación más bien alta de la mortalidad natural ( $M = 0.8$  anual) era actualmente un reflejo de los efectos aditivos de una mortalidad natural inferior (digamos el límite inferior de Hennemuth  $M = 0.6$ ) y del desplazamiento neto de la 1 zona a la 2 zona.

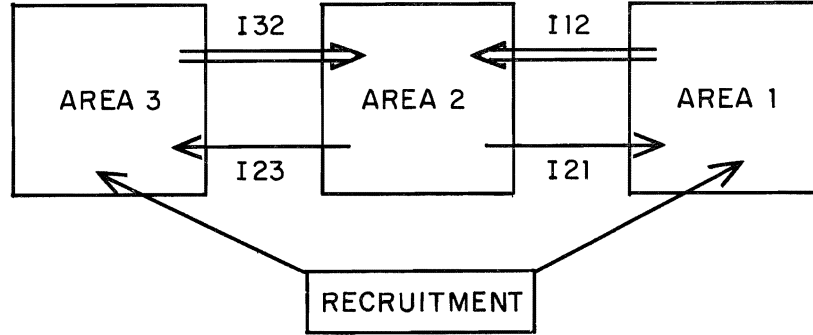
4) Se ha determinado el desove del aleta amarilla según los datos de los índices de las gónadas (Orange (1961), Knudsen (1977)) y por la distribución de las larvas de esta especie (Klawe (1963), Tomlinson y Suzuki (comunicación personal)). Aunque los datos son limitados, sugieren que ocurre algún desove en todo el Pacífico oriental apareciendo una posible interrupción de la subpoblación en una zona que rodea el límite del ARCAA (aproximadamente a los 110°-120°W longitud). Por lo consiguiente, *se supuso inicialmente* en el modelo, que el reclutamiento ocurre en los extremos de la pesquería (solamente en la 1 y 3 zona, correspondientes a las subpoblaciones hipotéticas de la región oriental y central del Pacífico) y que existe un desplazamiento neto de peces después de haber sido reclutados desde el extremo hasta el centro de la pesquería (2 zona).

Por lo tanto, en contraste con TUNPØP-MØD2 donde solo se amplía la dimensionalidad del sector de la captura, se amplían tanto las dimensiones de los sectores de captura como de población en esta segunda modificación de TUNPØP, denominada de aquí en adelante como TUNPØP-MØD3. Esta



versión aumentada de TUNPØP ya no necesita la suposición limitante de una unidad de población con mezcla instantánea de todos los individuos.

A continuación se presenta un diagrama de la estructura del modelo:



Así que el modelo tiene la siguiente forma analítica. En un período unitario de tiempo  $[t, t+1]$  permitamos

- $N_{ij}(x)$  = número de peces de edad  $i$  en la zona  $j$  a tiempo  $x \in [t, t+1]$ ,
- $R_j(t)$  =  $N_{1j}(t)$  = cantidad de peces reclutados en la generación de 1 año en la zona  $j$  a tiempo  $t$ ,
- \* $Z_{ij}(t)$  = índice de pérdida total instantánea del grupo de edad  $i$  en la zona  $j$  durante  $[t, t+1]$ ,
- $F_{ij}(t)$  = índice de la mortalidad instantánea por pesca del grupo de edad  $i$  en la zona  $j$  durante  $[t, t+1]$ ,
- $M_i$  = índice de la mortalidad natural instantánea del grupo de edad  $i$ , y
- \*\* $IKL_i$  = índice de desplazamiento instantáneo del grupo de edad  $i$  de la zona  $K$  a la  $L$ .

Luego para  $x \in [t, t+1]$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{i1}(x)}{dx} &= - Z_{i1}(t)N_{i1}(x) + I21_i N_{i2}(x) \\ \frac{dN_{i2}(x)}{dx} &= I12_i N_{i1}(x) - Z_{i2}(t)N_{i2}(x) + I32_i N_{i3}(x) \\ dN_{i3}(x) &= I23_i N_{i2}(x) - Z_{i3}(t)N_{i3}(x) \end{aligned} \tag{1}$$

donde

\*En este caso  $Z_{ij}(t)$  no es sencillamente una mortalidad, como es usualmente el caso, pero una combinación de mortalidad y desplazamiento.  
 \*\*Observe que estos índices no se refieren a la distancia del viaje en el sentido usual de "millas por día" pero más bien al índice de desplazamiento de una zona a otra en el sentido de "fracción de la población por día".

$$\begin{aligned} Z_{i_1}(t) &= I12_i + M_i + F_{i_1}(t) \\ Z_{i_2}(t) &= I21_i + I23_i + M_i + F_{i_2}(t) \\ Z_{i_3}(t) &= I32_i + M_i + F_{i_3}(t) \end{aligned}$$

El sistema de las ecuaciones lineales diferenciales de primer orden (1) tiene una solución real y única de la forma

$$N_{ij}(x) = p_{ij}e^{\lambda_{i_1}(x-t)} + q_{ij}e^{\lambda_{i_2}(x-t)} + r_{ij}e^{\lambda_{i_3}(x-t)}; \\ j = 1,2,3; x \in [t, t+1].$$

donde los vectores  $(\lambda_{i_1}, \lambda_{i_2}, \lambda_{i_3})$ ,  $[(p_{ij}, q_{ij}, r_{ij}); j = 1,2,3]$  son provistos por Kaplan (1962).

Durante  $[t, t+1]$  y para una edad determinada  $i$ , los valores de  $\{\lambda_{ij}, p_{ij}, q_{ij}, r_{ij}; j = 1,2,3\}$  son funciones de  $[N_{ij}(t); j = 1,2,3]$  y  $\{Z_{ij}(t); j = 1,2,3\}$  (observe que éstos se refieren a los índices totales de pérdida de las tres zonas). Si se suponen índices constantes de crecimiento, mortalidad natural, capturabilidad, desplazamiento y esfuerzo en cada zona durante el período unitario de tiempo, podemos suponer valores constantes  $[\lambda_{ij}(t), p_{ij}(t), q_{ij}(t); r_{ij}(t); j = 1,2,3]$  durante  $[t, t+1]$ , y las variables declaradas se actualizan de la edad  $i$  a tiempo  $t$ , a la edad  $i+1$  a tiempo  $t+1$  como sigue:

$$N_{i+1,j}(t+1) = p_{ij}(t)e^{\lambda_{i_1}(t)} + q_{ij}(t)e^{\lambda_{i_2}(t)} + r_{ij}(t)e^{\lambda_{i_3}(t)}; j = 1,2,3,$$

Los valores del rendimiento en cantidad y peso se calculan luego en

$$YN_{ij}(t) = F_{ij}(t) \int_t^{t+1} N_{ij}(x) dx$$

y

$$YW_{ij}(t) = F_{ij}(t) \int_t^{t+1} B_{ij}(x) dx$$

donde

$$B_{ij}(x) = N_{ij}(x)w_i(t)e^{G_i(t)(x-t)}.$$

Se debe siempre tener en cuenta que TUNPØP-MØD3 no trata de describir la realidad absoluta. Se ha concebido para indicar lo que puede ser dado algunas suposiciones razonables relativas a la población que se está modelando. TUNPØP-MØD3 se ha hecho con la intención de satisfacer el papel sugerido por Larkin (1972) de modelar cuantitativamente las poblaciones explotadas. Primero, es definitivamente una extensión de las fuerzas de la imaginación y puede tal vez servir como guía para comprender mejor las poblaciones de atún aleta amarilla en el Océano Pacífico oriental. Segundo, se está tratando de eliminar la necesidad de suposiciones clásicas (unidad de población, mezcla instantánea, distribución uniforme de la

población relativa a las artes de pesca, *etc.*) que evidentemente son irrealísticas en este contexto.

### ESTIMACION INICIAL DE LOS PARAMETROS

La estimación inicial de los parámetros de TUNPØP-MØD1 y TUNPØP-MØD2 se obtuvo de las estadísticas trimestrales de captura, esfuerzo y de la distribución de talla de los peces en la captura (datos frecuencia-talla) de aquellas generaciones de aleta amarilla reclutadas desde 1969, hasta el segundo trimestre de 1975. Como en Francis (1974a), la población de aleta amarilla se dividió en 18 grupos trimestrales de edad. El reclutamiento en la pesca simulada ocurrió cuando los peces entraron al grupo explotado más joven de edad, cerca al término de su primer año de vida. Se supone que un recluta promedio pese 1.4 kg y tiene una longitud de horquilla de unos 40 cm (véase Figura 3). El último grupo de edad incluye los peces más viejos que aparecen en la pesca en cantidades importantes y para los que se puede estimar la edad mediante el análisis de las progresiones modales. Así que la graduación de la pesca simulada ocurre cuando los peces abandonan este grupo de edad a mediados de los cinco años de vida. Se supone que un graduado ordinario pese 61 kg y tenga una longitud de horquilla de 145 cm.

El procedimiento para estimar la mortalidad por pesca a edad específica ( $F_i(t)$ ) y la capturabilidad ( $q_i$ ) en TUNPØP es descrito por Francis (1974a). Las estimaciones iniciales de TUNPØP se hicieron al suponer que el índice instantáneo de mortalidad natural ( $M_i$ ) fue constante a 0.8 con base anual para todas las generaciones. Los valores del esfuerzo empleados para transformar la mortalidad por pesca a edad específica, a capturabilidad por edad específica se indican en la Tabla 1 (esfuerzo de las embarcaciones con cerco de la clase 6 normal de arqueo— >400 toneladas de capacidad de acarreo (Shimada y Schaefer, 1956)— sin corregir según la proporción positiva del lance y empleando los factores potenciales de pesca de Tomlinson (comunicación personal)). Las estimaciones resultantes, según el análisis de la generación, de la capturabilidad a edad específica de TUNPØP-MØD1 y TUNPØP-MØD2 se presentan en la Tabla 2. La Figura 4 presenta los diagramas del promedio de los coeficientes de capturabilidad de la edad específica trimestral de las tres zonas y de todo el Pacífico oriental. Suponiendo que la población se encuentra uniformemente distribuida en el Pacífico oriental (suposición básica de TUNPØP-MØD1 y MØD2), este gráfico presenta un cuadro aproximado de la selectividad de talla en la pesca epipelágica de las tres zonas.

### VALIDACION DEL MODELO

El proceso de la validación del modelo provee aparentemente un algoritmo sistemático para seleccionar un modelo o una serie de parámetros

del modelo que pueda cumplir "mejor" los objetivos de un ejercicio de modelado. En la práctica es una búsqueda subjetiva no sistemática, que más que otra cosa, establece la integridad de todo el trabajo de modelado. La validación del modelo es primordialmente una manera de mostrar la intuición del investigador respecto a la forma analítica o valores de los parámetros más convenientes para obtener objetivos específicos.

En el caso de TUNPØP, el criterio de la validación es la capacidad del modelo de imitar tanto la distribución zonal como la distribución de la edad de la captura del aleta amarilla en el Pacífico oriental durante los años de 1969 a 1975, (pesca epipelágica tanto en el ARCAA como fuera de los límites de ésta) un período en el que la captura anual varió desde un mínimo de 137 mil toneladas americanas en 1971 a 232 mil toneladas en 1974 y donde la captura al oeste del límite del ARCAA aumentó de 19 mil toneladas en 1969 a 50 mil toneladas en 1973. Como no existe ningún indicio de relación entre la población madre y el reclutamiento subsiguiente en el nivel de las magnitudes de la población observadas hasta ahora, cualquier proyección que se haga con el modelo habrá que hacerla empleando reclutamientos anuales constantes de los grupos X e Y, así que la validación del modelo se basa en los parámetros constantes de reclutamiento de los grupos X e Y. Además, la experiencia (CIAT; 1973, 1974, 1975, 1976) ha demostrado que TUNPØP imita mejor la pesquería si se promedian los resultados durante varios años. Esto se debe probablemente al hecho de que tanto el reclutamiento del aleta amarilla como la captura del barrilete (dinámicas que no se consideran en el modelo) varían considerablemente de un año a otro y tienen un efecto pronunciado en la dinámica pesquera del aleta amarilla. Por lo consiguiente, se decidió que la validación de las estadísticas sería la media de la captura en peso y el peso promedio de la captura de las tres zonas de pesca durante el grupo de años de 1969-1971 y 1972-1975. Finalmente, con el fin de sobreponerse a los problemas analíticos limitantes (condiciones iniciales) se supuso que las capturas promedios de 1969-1971 (el período inicial de tres años de sobrepesca experimental en el ARCAA) representaban los valores de "equilibrio" *de la población modelada*, aunque no hay prueba de que ocurra un equilibrio a largo plazo en la interacción histórica entre la población y la pesca.

En un modelo determinado, vector de parámetro y intervalo de tiempo  $t$ , (1969-1971) o (1972-1975), la hipótesis de la validación tiene la siguiente forma:

Permitamos

- $C_o(j,t)$  = peso observado en la captura en la zona  $j$ ,
- $C_s(j,t)$  = peso simulado de la captura en la zona  $j$ ,
- $\bar{w}_o(j,t)$  = peso promedio observado en la captura en la zona  $j$ , y
- $\bar{w}_s(j,t)$  = peso promedio simulado en la captura en la zona  $j$ .

Luego

$$\bar{D}(t) = \frac{\sum_{j=1}^3 C_s(j,t) D^*(j,t)}{\sum_{j=1}^3 C_s(j,t)}$$

donde

$$D^*(j,t) = \left[ \frac{|C_o(j,t) - C_s(j,t)|}{C_o(j,t)} + \frac{|\bar{w}_o(j,t) - \bar{w}_s(j,t)|}{\bar{w}_o(j,t)} \right]$$

Así que  $D^*(j,t)$  es la suma de las desviaciones relativas entre los valores observados, los valores esperados de las capturas y los pesos promedios de la captura durante el intervalo  $t$  de tiempo. Obsérvese que se indica un valor igual a la exactitud de la medida de la estructura de la edad en la captura ( $\bar{w}$ ) como de la magnitud de la captura.  $\bar{D}(t)$  es la media ponderada según la captura de  $\{D^*(j,t); j = 1,2,3\}$  de las tres zonas. La razón por la cual se ponderan las desviaciones por la captura es para dar mayor prioridad a minimizar las desviaciones en las zonas de mayores capturas.

En este caso particular la validación es un procedimiento secuencial. Un procedimiento determinado de validación requiere cuatro decisiones:

- 1) modelo — TUNPØP-MØD2 o TUNPØP-MØD3 (como TUNPØP-MØD1 no tenía la resolución necesaria para ser válido no se empleó),
- 2) índice de mortalidad natural ( $M_i$ ),
- 3) reclutamiento promedio anual ( $\bar{R}$ ) (el reclutamiento relativo de los grupos  $X$  e  $Y$  fue predeterminado por el análisis de la generación),
- 4) índices de mezcla entre las zonas (solo TUNPØP-MØD3).

El algoritmo prosigue luego en la forma siguiente:

- 1) En una zona la distribución *relativa* de la capturabilidad a edad específica trimestral es fijada por el análisis de la generación (según los valores determinados de la mortalidad natural y del reclutamiento) y las estimaciones subsiguientes de  $q_{ij}$  descritas en un capítulo anterior.
- 2) Se permite variar la mortalidad total anual por pesca aplicada en una zona hasta que las simulaciones de equilibrio del valor  $\bar{D}$  (1969-1971) comparadas con las estadísticas anuales de captura observadas en 1969-1971 (Tabla 3) se aproximan a un mínimo.

Como el esfuerzo total anual en una zona es fijo, se hace ésto al multiplicar todos los coeficientes de capturabilidad de edad específica de una zona determinada ( $q_{ij}$  por una  $j$  determinada) por un multiplicador de capturabilidad de esa zona. Se escogen de esta manera los multiplicadores de capturabilidad para minimizar  $\bar{D}$  (1969-1971). Esto es análogo al cálculo de los factores de eficacia del esfuerzo computarizado por zonas (esfuerzo pesquero relativo). Así que el modelo se "ajusta" para duplicar, bajo el equilibrio, las capturas promedio y la distribución de edad realizadas durante el período de 1969-1971 (Tabla 3).

- 3) Al usar las condiciones promedio de la pesca equilibrada de 1969-1971, para definir las condiciones iniciales de la población al comienzo de 1972 y reteniendo todos los parámetros fijos (incluso los multiplicadores de capturabilidad), se corre luego el modelo por cuatro años bajo el esfuerzo promedio aplicado por trimestre a través del Pacífico oriental durante 1972-1975. El resultado del promedio anual de los cuatro años se compara luego con el observado en las estadísticas anuales de captura de 1972-1975 siendo  $\bar{D}$  el criterio de la "bondad del ajuste" (1972-1975) (Tabla 4).
- 4) Finalmente, el valor promedio de  $\bar{D}(t)$ , ponderado según la captura, para los dos intervalos de tiempo es computarizado y se utiliza como criterio final de la validación. Esta estadística,  $\bar{\bar{D}}_T$ , se presenta en la Tabla 5 junto con los valores promedios, ponderados según la captura de  $[D^*(j,t); t = 1,2]$  para cada zona  $j$ , indicada por  $\bar{D}_T(j)$  para cada  $j = 1,2,3$ .

Por lo consiguiente en la Tabla 5

$$\bar{\bar{D}}_T = \frac{\sum_{t=1}^2 C_o(t) \bar{D}(t)}{\sum_{t=1}^2 C_o(t)}$$

donde

$C_o(t)$  = el peso de la captura total observada durante el intervalo de tiempo  $t$

$$= \sum_{j=1}^3 C_o(j,t)$$

$$t = \begin{cases} 1 & \text{para 1969-1971} \\ 2 & \text{para 1972-1975} \end{cases}$$

$$\bar{D}_T(j) = \frac{\sum_{t=1}^2 C_o(j,t) D^*(j,t)}{\sum_{t=1}^2 C_o(j,t)}$$

Todos los resultados evaluados se presentan en las Tablas 3,4 y 5. Además, el promedio de la biomasa de la población de 1972-1975 se da para cada pasada de validación en la Tabla 5. Para concluir, la Figura 5 presenta un sumario gráfico de toda la secuencia de la validación.

La secuencia de la validación empezó con TUNPØP-MØD2 bajo las condiciones más comúnmente usadas de la mortalidad natural constante de la edad trimestral específica  $M_i = 0.2$  ( $M_i$  anual = 0.8) y el promedio del reclutamiento  $\bar{R} = 46.4$  millones ( $\bar{R}_x = 23.1$  millones,  $\bar{R}_y = 23.3$  millones) estimado según un análisis de las generaciones X e Y de 1969-1973. Para fines de comparación, los resultados de esta pasada se dan primero (Pasada A) empleando los coeficientes de capturabilidad a edad específica que resultaron de los análisis de la generación presentados en la Tabla 2 (sin ajustar) y luego (Pasada B) empleando los coeficientes de capturabilidad “ajustados” de la edad específica  $M = 0.2$  y  $R = 46.4$  millones. La última serie de capturabilidades se obtiene de la primera al emplear los multiplicadores de capturabilidad 0.92, 1.02 y 0.86 en la 1,2 y 3 zona, respectivamente. Estas pasadas sirven como punto de referencia y de partida para el proceso de validación. Es evidente que esta serie de parámetros establecidos, combinados con una forma del modelo que usa mezcla instantánea en todo el Pacífico oriental, es muy deficiente en su representación de la dinámica de captura de los últimos años, especialmente el aumento importante de captura de grandes peces en la zona al oeste del límite del ARCAA (3 zona).

Se decidió luego mantener constante la mortalidad natural ( $M = 0.2$ ) y buscar el valor de  $\bar{R}$  que redujo al mínimo  $\bar{D}_T$  en TUNPØP-MØD2. Los “mejores” resultados (Pasada C) se obtuvieron con un aumento en el reclutamiento del 50% ( $\bar{R} = 70$  millones), dando una reducción en  $\bar{D}_T$ , aproximadamente del 20%. Aún más interesante es el hecho de que un aumento del 100% en el promedio de la biomasa de la población (de 270 mil toneladas para el  $\bar{R} = 46.4$  millones a 540 mil toneladas para  $\bar{R} = 70$  millones) resultó del aumento en el reclutamiento del 50%.

Uno de los objetivos al concebir TUNPØP-MØD3 fue investigar la hipótesis de lo que parecía ser más bien un alto valor de la mortalidad natural a principios del decenio de los sesenta ( $M = 0.8$  anual — Henne-muth (1961a), Bayliff (1971)) puede haber sido la combinación de un índice de mortalidad natural bajo y un índice neto de desplazamiento de la zona de pesca — en ese tiempo la zona era similar a la 1 zona (Figura 2).

Los experimentos del marcado (Fink y Bayliff (1970), Bayliff y Rothschild (1974), Bayliff (comunicación personal)) no contradicen esta hipótesis. Así que las pasadas iniciales de la validación de TUNPØP-MØD3 se hicieron con los siguientes parámetros determinados.

- 1)  $M_i$  trimestral = 0.15 Hennemuth (1961a) estimación mínima)
- 2)  $I12_i - I21_i = 0.5$  para todos los grupos de edad  $i$   
 $I32_i - I23_i = 0.5$  para todas los grupos de edad  $i$ .

Esos valores de los parámetros darán un índice neto instantáneo de pérdida trimestral (excluyendo la pesca) de peces marcados en la 1 y 3 zona, las zonas hipotéticas de reclutamiento, de 0.2 (igual a la estimación usada anteriormente para  $M_i$  en todos los grupos de edad  $i$ ).

La primera pasada de validación de TUNPØP-MØD3 (Pasada D) se hizo con  $\bar{R} = 46.4$  millones. Se permitió variar la magnitud relativa del reclutamiento total entre la 1 y 3 zona en el procedimiento del "ajuste", ya que no podía estimarse de otra manera. Según resultó, los grupos de reclutamiento X e Y fueron ambos estimados en unos 14.1 millones en la 1 zona y 9.0 y 9.2 millones respectivamente para los grupos X e Y en la 3 zona. Las estimaciones de la capturabilidad, relativas a la edad específica en las zonas se obtuvieron de una serie de análisis de generaciones con  $M$  trimestral = 0.15 y  $\bar{R} = 46.4$  millones. Una pasada concomitante de TUNPØP-MØD2 (Pasada E) se hizo empleando los mismos parámetros fijos usados en TUNPØP-MØD3. Para darle tanto contraste como fuera posible a TUNPØP-MØD2, en el que la mezcla es instantánea con base trimestral de tiempo, las pasadas iniciales de TUNPØP-MØD3 se hicieron con índices relativamente bajos de migración (mezcla) entre las zonas.

Así que

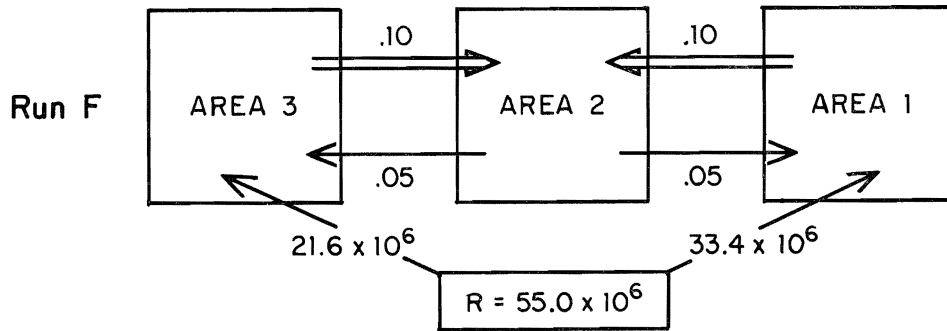
$$\left. \begin{array}{l} I12_i = I32_i = .10 \\ I21_i = I23_i = .05 \end{array} \right\} i = 1, \dots, 18.$$

Los resultados indican una pequeña mejoría (7% de reducción en  $\bar{D}_T$  cuando se compara la Pasada E con la C) de TUNPØP-MØD2 y un deterioro de TUNPØP-MØD3 (7% de aumento en  $\bar{D}_T$  cuando se compara la pasada D con la C) con relación a la pasada anterior (Pasada C).

Luego, todos los parámetros de ambos modelos, con excepción del reclutamiento total, se fijaron como en las dos pasadas anteriores. Se permitió que el reclutamiento total variara hasta que  $\bar{D}_T$  se minimizara. Para TUNPØP-MØD2 el reclutamiento anual de  $\bar{R} = 46.4$  millones (el mismo valor que el de la pasada anterior) fue óptimo, mientras que un reclutamiento promedio anual de 55 millones fue óptimo en TUNPØP-MØD2 (Pasada F). Ambos modelos dan aproximadamente la misma bondad de



ajuste (3% de diferencia en  $\bar{D}_T$ ). En este caso, como se podría esperar teóricamente, TUNPØP-MØD3, con poca mezcla, requiere un promedio de biomasa de población que es casi 40% superior al de TUNPØP-MØD2 (660 y 480 mil toneladas respectivamente) donde la mezcla es instantánea. Esta serie de parámetros de TUNPØP-MØD3 tiene la siguiente forma esquemática.

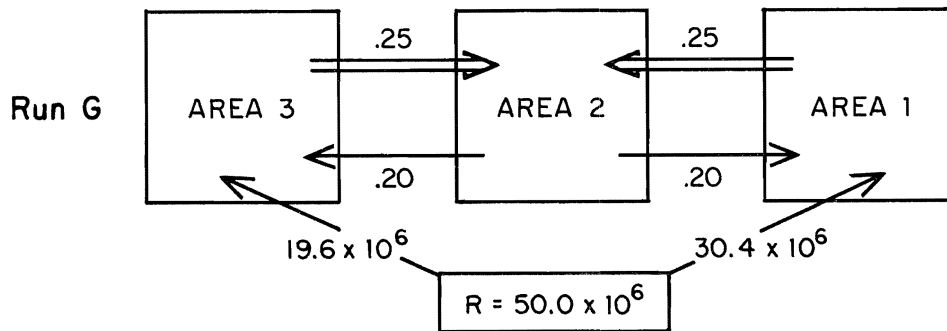


En este punto, en la secuencia de la validación, se alcanzó la serie óptima de parámetros (en términos de la magnitud de  $\bar{D}_T$ ) para TUNPØP-MØD2, con un reclutamiento promedio anual de 46.4 millones de peces y una mortalidad anual instantánea de  $M = 0.6$ . Por lo consiguiente, todas las pasadas siguientes en la secuencia de validación se concentraron en obtener una serie “óptima” de parámetros para TUNPØP-MØD3. Estas pasadas se realizaron bajo las siguientes restricciones:

- 1) se fijó la mortalidad natural a 0.15 (Hennemuth (1961a)), el límite más bajo con base trimestral,
- 2)  $I12_i - I21_i = 0.05$  para todos los grupos edad  $i$

Se creyó que estas dos restricciones eran necesarias ya que parte del motivo original para construir TUNPØP-MØD3, fue probar la hipótesis de que las primeras estimaciones de la mortalidad natural eran erróneamente altas debido a un desplazamiento de los peces a alta mar de la 1 a 2 zona que no se había descubierto (en ese tiempo a principios del decenio de los sesenta) lo que hubiera resultado en una sobreestimación de  $M$ . Estas restricciones proveen un posible guía para la expresión de esta hipótesis.

En la pasada siguiente (Pasada G) se intentó encontrar la serie óptima de parámetros para TUNPØP-MØD3, sujeta a la restricción de que los índices instantáneos de migración en la 2 zona y fuera de ella eran simétricos a lo largo del gradiente costero y de altura. La serie de parámetros que minimiza  $\bar{D}_T$  es la siguiente:



Así que con relación a la Pasada F (en que no solamente los índices de migración entre las zonas fueron simétricos con relación a la 2 zona, pero se encontraban también restringidos a un bajo nivel) se obtiene un mejor ajuste (una reducción del 7% en  $\bar{D}_r$ ) si se permite que los índices de migración entre las zonas aumenten substancialmente, con una reducción correspondiente en el reclutamiento anual de 55 millones a 50 millones.

Finalmente, los resultados del marcado (Bayliff, comunicación personal) indicaron que los índices de mezcla pueden ser considerablemente inferiores entre la 3 y 2 zona que entre la 1 y 2 zona. Las últimas tres pasadas de la validación se hicieron para investigar esta hipótesis. En todas las tres pasadas, se permitió que las cuatro series de los índices de migración entre las zonas variaran hasta obtener un valor mínimo aproximado de  $\bar{D}_r$ . La primera pasada (Pasada H) se hizo bajo la restricción de que existe un gradiente de migración hacia el litoral de la 3 a la 2 zona; así que

$$I_{32_i} - I_{23_i} = .05 \text{ para todos los grupos de edad } i,$$

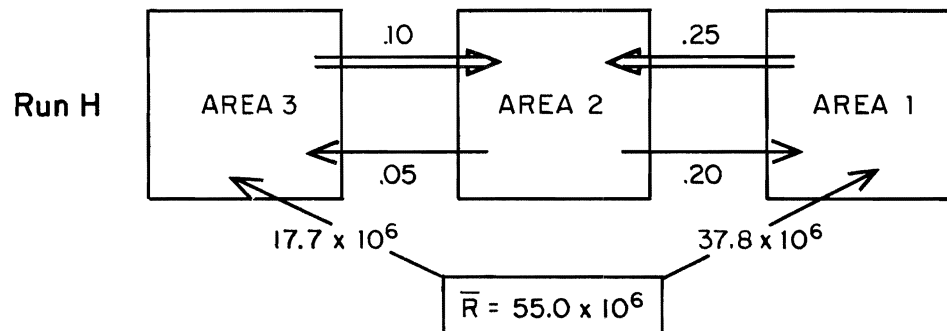
la segunda pasada (Pasada I) se realizó bajo la restricción de que no existe un gradiente de migración entre la 3 y la 2 zona, así que

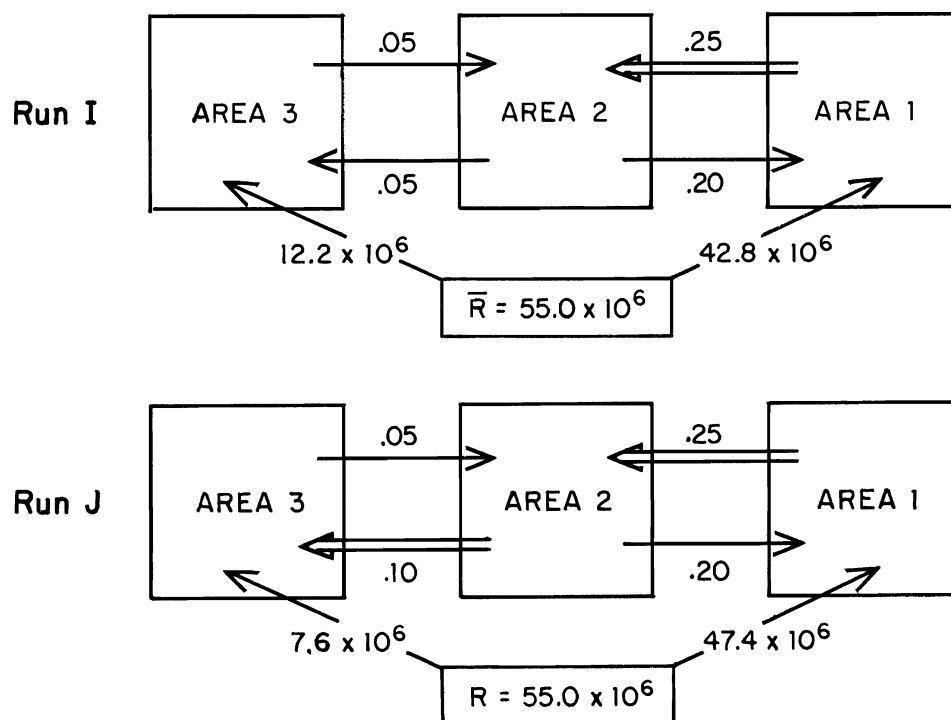
$$I_{32_i} = I_{23_i} \text{ para todos los grupos de edad } i$$

y la tercera pasada (Pasada J) se hizo bajo la restricción de que existe una migración en alta mar de la 2 a la 3 zona; así que

$$I_{23_i} - I_{32_i} = .05 \text{ para todos los grupos de edad } i.$$

Los parámetros resultantes son los siguientes:





Se podría deducir según los resultados de estas pasadas que los índices de intercambio entre la 1 y 2 zona, parecen, en realidad, ser apreciablemente superiores a aquellos entre la 3 y 2 zona; omitiendo la dirección del gradiente de migración. Los resultados de estas pasadas producen valores de  $\bar{D}_T$  que fluctúan del 1% al 17% inferiores a los de la pasada G, la próxima pasada hacia arriba en “la cadena de la bondad del ajuste”. Una aseveración mucho más débil es que si existe un gradiente de migración entre la 3 y 2 zona, es más probable que tenga una dirección hacia alta mar (de la 2 a la 3 zona) que una hacia el litoral. Sin embargo, los resultados de la Pasada I (sin gradiente) producen el mismo valor de  $\bar{D}_T$  que el de la Pasada J (gradiente de alta mar), ambos con un valor de  $\bar{D}_T$  17% inferior al de la Pasada H (gradiente costero o de bajura). Es interesante observar que a medida que el gradiente de migración entre la 3 y 2 zona cambia de dirección, el balance “óptimo” del reclutamiento entre la 1 y 3 zona cambia recíprocamente mientras la magnitud del reclutamiento total permanece constante.

En breve, se ha trazado una vía (Figura 3) desde una abstracción matemática familiar, comúnmente empleada y establecida por la dinámica de población del aleta amarilla y por la pesca epipelágica en el Pacífico oriental, a una representación cuantitativa nueva, altamente especulativa y

esperamos mucho más realística. Qué significa todo esto? Primero, las estimaciones iniciales de la población permanente, que emplean un índice relativamente alto de mortalidad natural y uno bajo de reclutamiento, son probablemente subestimaciones. Parece que los errores en las estimaciones del crecimiento (y consecuentemente tanto edad como reclutamiento) podrían tener un efecto similar (véase Fonteneau y Francis (1975)). Es bastante típico de esta clase de modelado que si se examina una serie de soluciones de mínimos cuadrados para estimar todos los parámetros a la vez, se termina con una condición en la que varias combinaciones de las estimaciones de los parámetros dan el mismo ajuste. Sin embargo, no se investigan las consecuencias de los errores en las estimaciones del crecimiento en este estudio. Segundo, se ha verificado además, que la estimación de la magnitud de la población básica parece depender más bien fuertemente de los índices de mezcla entre las varias zonas de pesca. Es necesario que cuanto más altos sean los índices de mezcla la población básica sea más pequeña con el fin de duplicar los niveles recientes de captura. Sea como fuera, estos resultados indican que la biomasa de la población básica es entre 50% y 150% superior a la estimada en las pasadas anteriores de TUNPØP. Tercero, este estudio demuestra que para explicar la dinámica contemporánea de pesca, es mejor suponer que la población de aleta amarilla no es una unidad individual, uniformemente distribuida en la región pesquera del Pacífico oriental, con mezcla instantánea entre todas las zonas. Finalmente, en corroboración con los resultados del mercado (Bayliff, comunicación personal), parece que el nivel de migración en el ARCAA (entre la 1 y 2 zona es apreciablemente superior que aquel entre la zona de alta mar del ARCAA (2 zona) y la zona al oeste del límite del ARCAA (3 zona)).

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la sección anterior, la dinámica de varias formas de TUNPØP fue examinada bajo condiciones históricas. En esta sección se estudia el comportamiento de TUNPØP bajo condiciones extrapoladas de pesca en las que ocurren cambios importantes en el área de distribución.

Se concibió la siguiente serie de simulaciones para examinar la sensibilidad del modelo correspondiente al aumento del esfuerzo en varias combinaciones de las tres zonas de pesca en el Pacífico oriental (Figura 2). El escenario es el siguiente. Supóngase que se desean probar los efectos al agregar 10,000 toneladas de capacidad a la clase 6 de arqueo de la flota cerquera del Pacífico oriental. Al emplear la relación lineal de la Figura 6 entre la capacidad de la flota ( $x$ ) y la clase-6 días/trimestre ( $y$ ) producida bajo condiciones no reglamentadas, basada en los años de 1969 a 1975, un aumento en la capacidad de la flota de 10,000 toneladas produciría (bajo extrapolación) un aumento de 331 días de esfuerzo sin reglamentar, por

trimestre, en la clase 6 de arqueo, o sean 1,324 días de esfuerzo anual sin reglamentar de esta clase. Al emplear las condiciones *simuladas* de equilibrio bajo el patrón normal de esfuerzo de 1972-1975 de la sección anterior, como punto de referencia ¿es “mejor” (en términos de la captura total) agregar esta capacidad solo a la 1 zona, solo a la 2 zona, solo a la 3 zona o distribuirla entre la 1 y 2 zona, 2 y 3 zona, 1 y 3 zona o todas las 3 zonas simultáneamente? Se está investigando esta pregunta usando las siguientes formas de TUNPØP

- 1) TUNPØP-MØD2 con un reclutamiento anual de 46.4 millones y un índice instantáneo de mortalidad natural *anual* de  $M = 0.8$  (Pasada B de la sección anterior).
- 2) TUNPØP-MØD2 con un reclutamiento anual de 46.4 millones y un índice instantáneo de mortalidad natural *anual* de  $M = 0.6$  (Pasada E de la sección anterior).
- 3) TUNPØP-MØD3 con un reclutamiento anual de 55 millones, un índice instantáneo de mortalidad natural anual de  $M = 0.6$ , un gradiente de migración hacia alta mar entre la 1 y 2 zona y no gradiente de migración entre la 3 y 2 zona (Pasada I de la sección anterior).

Se eligió la Pasada B porque era muy parecida a la forma antigua del modelo, con alta mortalidad natural, relativamente poco reclutamiento y mezcla instantánea en toda la zona pesquera. La Pasada E incluye la “mejor” serie de parámetros para TUNPØP-MØD2 y la Pasada I la “mejor” serie para TUNPØP-MØD3. Por lo consiguiente, estas tres formas de TUNPØP presentan un máximo contraste en términos de la dinámica del modelo.

En cada caso, se agregaron uniformemente con relación a la(s) zona(s) apropiada(s) que se estaba(n) probando, 1,324 días de esfuerzo, durante el período de tiempo, al esfuerzo promedio de 1972-1975. En el caso de la 1 y 2 zona se agregó uniformemente el esfuerzo a los cuatro trimestres del año pesquero, mientras en el caso de la 3 zona se agregó uniformemente el esfuerzo a los tres primeros trimestres del año pesquero, ya que nunca ha habido ninguna pesca importante epipelágica al oeste de los límites del ARCAA en el primer trimestre. En los casos en los que se distribuyó el esfuerzo adicional a más de una zona, se empleó la siguiente distribución del esfuerzo (promedio de 1973, 1974).

Trimestre	A1*	A2*	A3*
1	.39	.61	.00
2	.67	.16	.17
3	.35	.06	.59
4	.29	.36	.35

\*1 zona, 2 zona, 3 zona

Los resultados, presentados en la Tabla 6, demuestran claramente el efecto de los índices de mezcla entre las zonas en la dinámica de captura. En el caso de TUNPØP-MØD2, en el que la mezcla fue instantánea, la captura total disminuyó siempre como resultado del aumento en el esfuerzo en una parte de la pesca, sin disminuirlo en la otra, siendo la reducción más pronunciada cuanto más esfuerzo se concentraba en las zonas costeras o de bajura. Naturalmente que ésto no significa que se ha pescado la población a cierto nivel óptimo durante el período de 1972 a 1975. Las simulaciones siguientes, empleando ambas formas del modelo, han indicado que una redistribución mayor del esfuerzo podría producir un aumento substancial en la captura. Por otra parte, en el caso de TUNPØP-MØD3, en el que la mezcla es más bien lenta, especialmente en las zonas de altura, la captura total aumenta siempre como resultado del aumento en el esfuerzo en varias partes de la pesca, siendo el aumento más pronunciado en cuanto más esfuerzo se concentra en las zonas de alta mar. Así que las tres formas de TUNPØP, indican que con una distribución de esfuerzo similar a la encontrada durante 1972-1975, un aumento en el esfuerzo sería más "benéfico" para la pesca (o "perjudicaría" menos la pesca) si se aplica más fuertemente a las zonas de alta mar, especialmente en la 3 zona. En otras palabras parece que bajo el esquema administrativo de los últimos años, la pesca puede absorber mejor el aumento en el esfuerzo debido al aumento en la capacidad de la flota en las zonas de alta mar.

### RESUMEN

Este estudio se ha hecho con la intención de emplear TUNPØP en forma variada 1) para explorar la relación entre los datos de captura y esfuerzo en la pesca del atún aleta amarilla en el Pacífico oriental y la distribución básica y abundancia de los peces, y 2) indicar cómo, a la vez, puede la distribución afectar los eventos de pesca.

Los hallazgos principales pueden clasificarse en la forma siguiente:

1. El concepto de que la población de aleta amarilla del Pacífico oriental es una unidad individual, uniformemente distribuida en la región de pesca existente, con mezcla instantánea entre las zonas, no parece representar la dinámica contemporánea de pesca.
2. Nuestras estimaciones tradicionales de la población permanente, son probablemente bajas debido a una sobreestimación de la mortalidad natural y del reclutamiento.
3. La magnitud de la población parece depender de los índices de mezcla entre las varias zonas de pesca.
4. La cantidad de mezcla en el ARCAA parece apreciablemente superior que aquella entre la zona de alta mar del ARCAA y la de la zona al oeste del límite del ARCAA.

5. Parece que la pesca de aleta amarilla puede absorber aumento en el esfuerzo en las zonas de alta mar, bajo el sistema actual de administración, si se supone que la población se mantiene a niveles que no tienen efectos nocivos en el reclutamiento siguiente.
6. Una redistribución mayor del esfuerzo sobre el tiempo y la zona puede resultar en un aumento en la producción total de aleta amarilla, especialmente si el esfuerzo se cambia más intensamente a las zonas de altura de las pesca.

Finalmente, se debe destacar que TUNPØP tiene ahora el poder de explorar las consecuencias de varios acontecimientos que pueden presentarse en la era futura de las 200 millas de zonas costeras.

Se espera en general, que este estudio haya demostrado aún más la necesidad de investigar tanto las mecanismos biológicos como los físicos que controlan la población del aleta amarilla y la dinámica pesquera. Estas investigaciones deben incluir estudios sobre la migración, mortalidad natural (tanto la dinámica de la mortalidad natural como los métodos de estimación que no se tienen para los atunes) y la estructura de la población. Las formas más realísticas de TUNPØP (*e.d.* aquellas formas que duplican mejor los sucesos observados) que se describen en este escrito, *no* deben interpretarse como representantes de la dinámica pesquera exactamente como se presentan. Más bien los resultados han de ampliar nuestra conceptualización abstracta del recurso y nos ha de orientar hacia la comprensión de los mecanismos que afectan apreciablemente la población y dinámica pesquera, los cuales son mucho más numerosos y complejos de lo que las suposiciones de nuestras técnicas cuantitativas antiguas y bien establecidas nos hacen creer. Solo si tratamos de comprender el sistema como una estructura dinámica, biológica que actúa recíprocamente con su medio físico y buscamos nuevas maneras de comprender las series complejas de las interacciones que forman este sistema, recordando a cada instante que las palabras “promedio”, “constante”, “largo plazo” y “sostenible” tienen aparentemente poco significado con relación a las dimensiones de tiempo y zona, en este caso, podremos esperar aumentar nuestro conocimiento para poder realizar nuestros deberes “al dejar que otros conozcan cómo trabaja todo este sistema, dejándoles suficientes opciones para que realicen sus deseos en el futuro” (Larkin, 1972).

**LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA**

- Bayliff, W. H. 1971. Estimates of rates of mortality of yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean derived from tagging experiments (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **15**(4): 379-436.
- Bayliff, W. H. and B. J. Rothschild 1974. Migrations of yellowfin tuna tagged off the southern coast of Mexico in 1960 and 1969 (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **16**(1): 1-64.
- Fink, B. D. and W. H. Bayliff 1970. Migrations of yellowfin and skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean as determined by tagging experiments, 1952-1964 (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **15**(1): 1-227.
- Fonteneau, A. and R. C. Francis 1975. Sensitivity analysis of yellowfin tuna population fishery models of the eastern Atlantic and eastern Pacific to errors in certain basic parameters. *Doc. ICCAT SCRS/-75/38*.
- Francis, R. C. 1974a. TUNPØP, a computer simulation model of the yellowfin tuna population and the surface tuna fishery of the eastern Pacific Ocean (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **16**(3) 233-279.
- Francis, R. C. 1974b. Effects of fishing modes on estimates of fishing power, relative abundance and surplus production in the eastern Pacific yellowfin fishery. *ICCAT Workshop on Tuna Population Dynamics, Nantes, France*.
- Hennemuth, R. C. 1961a. Size and year class composition of catch, age and growth of yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean for the years 1954-1958 (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **5**(1): 1-112.
- Hennemuth, R. C. 1961b. Year class abundance, mortality and yield-per-recruit of yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean, 1954-1959 (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **6**(1): 1-51.
- IATTC. 1973. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1972. La Jolla, California.
- 1974. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1973. La Jolla, California.
- 1975. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1974. La Jolla, California.
- 1976. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1975. La Jolla, California.



- Kaplan, W. 1962. Ordinary Differential Equations. Addison-Wesley Publishing Co. Reading: 534 pp.
- Klawe, W. L. 1963. Observations on the spawning of four species of tuna (*Neothunnus macropterus*, *Katsuwonus pelamis*, *Auxis thazard* and *Euthynnus lineatus*) in the eastern Pacific Ocean, based on the distribution of their larvae and juveniles (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **6**(9): 447-540.
- Knudsen, P. F. 1977. Spawning of yellowfin tuna and the discrimination of subpopulations (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **17**(2): 117-169.
- Larkin, P. A. 1972. A confidential memorandum on fisheries science. In B. J. Rothschild (ed.) World Fisheries Policy, Multidisciplinary Views, pp. 189-197. University of Washington Press, Seattle.
- Orange, C. J. 1961. Spawning of yellowfin tuna and skipjack in the eastern tropical Pacific, as inferred from studies of gonad development (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **5**(6): 457-526.
- Sharp, G. D. and R. C. Francis 1976. An energetics model for the exploited yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, population in the eastern Pacific Ocean. Fish. Bull. U.S. Nat. Mar. Fish. Serv. **74**(1): 36-51.
- Shimada, B. M. and M. B. Schaefer 1956. A study of changes in fishing effort, abundance, and yield for yellowfin and skipjack tuna in the eastern tropical Pacific Ocean (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **1**(7): 351-469.
- Tomlinson, P. K. 1970. A generalization of the Murphy Catch Equation. J. Fish. Res. Bd. Canada **27**(4): 821-825.