

MODELO DE OPTIMIZACION NO LINEAL CON CRITERIOS MULTIPLES
APLICADO AL MANEJO Y CONTROL DE UNA PESQUERIA TROPICAL:
EL CASO DEL PULPO (Octopus maya) DE LA PLATAFORMA
CONTINENTAL DE YUCATAN

por

Antonio Jesús Díaz de León Corral

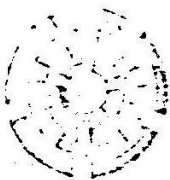
TESIS

que presenta como requisito
parcial para optar al grado de

Maestro en Ciencias en el Departamento de Recursos del Mar
Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del I.P.N.

Unidad Mérida

Marzo de 1989



Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN
Unidad Mérida

Carrilera Antigua a Progreso Km. 6 Tels. 26 02-12 y 26 02 99

C. P. 97210 A.P. 73 "Cordónex" Yucatán, México

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Mérida, Yuc., a 17 de

de 19 89

C. Dra. Norma Patricia Muñoz Sevilla

Coordinador Académico

Departamento de Recursos

P R E S E N T E

Los que suscriben, integrantes de la Comisión nombrada para examinar el manuscrito de Tesis titulado: **MODELO DE OPTIMIZACION NO LINEAL CON CRITERIOS MULTIPLES APLICADO AL MANEJO Y CONTROL DE UNA PESQUERIA TROPICAL: EL CASO DEL PULPO (*Octopus maya*) DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE YUCATAN.**

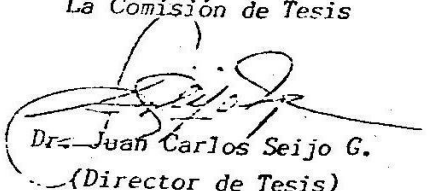
que presenta el Candidato al Grado Académico de Maestro en Ciencias con especialidad en Biología Marina

Señor: Antonio Jesús Díaz de León Corral

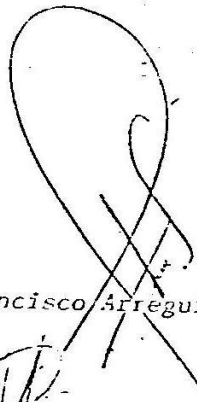
reunidos para el efecto en esta fecha, después de intercambiar opiniones, manifiestan su aceptación a dicho trabajo en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias y que se han hecho las correcciones que cada uno en particular consideró pertinentes para su prestación.

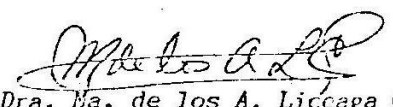
A T E N T A M E N T E

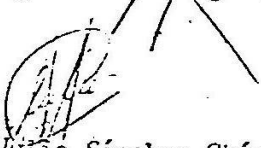
La Comisión de Tesis

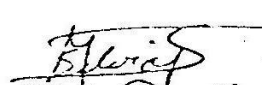

Dr. Juan Carlos Seijo G.

(Director de Tesis)


M. en c. Francisco Arreguín S.


Dra. Ma. de los A. Liccaga Correa


M. en c. Julio Sánchez Chávez


M. en C. Silvia Galas Márquez

RESUMEN

MODELO DE OPTIMIZACION NO LINEAL CON CRITERIOS MULTIPLES APLICADO AL MANEJO Y CONTROL DE UNA PESQUERIA TROPICAL:

EL CASO DEL PULPO (Octopus maya) DE LA PLATAFORMA

CONTINENTAL DE YUCATAN

Antonio Jesús Díaz de León Corral

Uno de los principales problemas en el aprovechamiento inteligente de los recursos pesqueros se refiere a la estimación de combinaciones de estrategias de manejo de dichos recursos renovables que satisfagan objetivos biológicos, económicos y sociales de las pesquerías regionales. Para contribuir a resolver este problema en el caso de la pesquería tropical de pulpo (Octopus maya) de la Plataforma Continental de Yucatán, se aplicó al modelo bioeconómico dinámico de la pesquería, un procedimiento de optimización no lineal que enfrenta simultáneamente las no linealidades y la estocasticidad del sistema. Se aplicó el procedimiento mín-máx que iterativamente minimiza la diferencia entre los niveles deseados en las variables bioeconómicas de interés y los calculados por el modelo dinámico de la pesquería hasta cumplir con el requisito de pareto-optimalidad. Los resultados muestran que es posible solucionar este problema de estimación usando la teoría de control óptimo ante escenarios que simulan la pesquería en temporada "normal" y ante el impacto de fenómenos naturales como el huracán "Gilberto". Se presentan algunas

recomendaciones en relación a esfuerzos futuros de investigación y en relación al manejo de recursos pesqueros, en especial los tropicales. Este ejercicio fué desarrollada en una microcomputadora IBM-PC, teniendo su solución valor didáctico y de entrenamiento sobre el manejo y control de recursos pesqueros.

DEDICATORIA

Un 21 de septiembre de 1988 regresé a Mérida a escribir lo que sería esta tesis. Pensaba que era cuestión de un par de meses, después de los que me uniría -algo más crecido- con mi familia, para así continuar juntos recorriendo el camino que día a día hemos decidido construir.

Casi seis meses han pasado desde aquel regreso de los que sólo un par de semanas han sido nuestras.

Este trabajo se ha desarrollado en ese tiempo. No puedo negar que su elaboración ha llevado horas de lectura, de escritura pero sobre todo de elaboración y de ardua discusión con los colegas. Durante este tiempo mi humor osciló entre dos extremos: el optimismo y el abatimiento.

Lo anterior es poco comparado con la ausencia. Ausencia de vivir y convivir con Emma, compañera de la vida, mujer de aspiraciones miles, con su olor y su color, con su pelo, con su aliento, su coraje y su intelecto. Pero sobre todo con su amor. Dos estrellas han estado presentes día y noche de este largo caminar: mis pequeñas y grandes hijas, Alejandra y Daniela. Mis lindas mestizas del Mayab.

Por su coraje, su entereza, por su impulso, por su entrega y sobre todo por todo lo que para ellas ha significado. Este trabajo, este esfuerzo, este tiempo, no admite otra dedicatoria: a

Emma, Alejandra y Daniela.

Primavera de 1989

CUADRO DE CONTENIDOS

	Página
Lista de Cuadros.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
CAPITULO I INTRODUCCION.....	1
La Pesquería de Pulpo (<u>Octopus maya</u>) en la Península de Yucatán.....	6
Objetivo del Estudio.....	11
Enfoque de la Investigación.....	12
CAPITULO II REVISION DE LA LITERATURA.....	14
Biología, Ecología, Cultivo y Dinámica de la población del Pulpo (<u>Octopus maya</u>) de la Plataforma Continental de Yucatán.....	14
Biología.....	14
Morfología externa.....	15
Neurofisiología.....	16
Reproducción.....	17
Madurez Sexual.....	17
Apareamiento, Fecundación y Eclosión.....	17
Fecundidad.....	19
Crecimiento.....	20
Alimentación y Digestión.....	22
Enfermedades y Parásitos.....	23
Ecología.....	23
Hábitat, Distribución Espacial y Temporal.....	23
Factores Determinantes de la Distribución y Abundancia.....	24
Abióticos.....	24
Bióticos.....	25
Posición Trófica.....	25
Comportamiento Social.....	25
Cultivo.....	26
Importancia del Cultivo.....	28
Limitaciones del Cultivo.....	29
Dinámica de la Población.....	29
Teoría de Control Optimo y su aplicación en Pesquerías..	38
El Control Optimo en Ecología.....	38
El Problema Fundamental de Control Optimo.....	39
Aplicación de la Teoría de Control Optimo a la Administración de Recursos Pesqueros.....	40
Modelos continuos.....	41
Modelos discretos.....	43
Otras aplicaciones.....	45
Teoría del Bienestar Económico y su Importancia en Pesquerías.....	50
El concepto de Pareto-Optimalidad.....	50
Condiciones necesarias y suficientes para llegar a un nivel de bienestar Pareto-Optimo.....	52
Supuestos que sustentan una condición Pareto-Optima.....	54
Derivación de eficiencia a partir de	

conceptos gráficos.....	55
Máximo Bienestar Social.....	60
Condiciones necesarias y suficientes para arribar al Máximo Bienestar Social.....	61
Teoría Normativa de Análisis de Recursos Pesqueros...	63
Eficiencia como criterio.....	63
Acercamiento a partes proporcionales.....	64
Pareto-Seguridad.....	65
Máximo Bienestar Social.....	66
Máximo valor del Producto Social.....	67
Criterios compuestos.....	68
La Ineficiencia en Pesquerías de Acceso Abierto.....	69
 CAPITULO III METODOS DE INVESTIGACION.....	71
Modelo General Conceptual.....	71
El Modelo de la Pesquería o el Sistema Pesquero.....	72
La Función Objetivo y su Tratamiento.....	74
El Complex y la Búsqueda del Optimo Global.....	77
M-OPTSIM.....	80
Recolección de Datos.....	81
Escenarios de Manejo o Administración.....	82
 CAPITULO IV RESULTADOS DE INVESTIGACION.....	84
Estimación de los parámetros de manejo y sus holguras...	84
Resultado de las corridas base de simulación.....	86
Preferencias ú objetivos de manejo del administrador pesquero.....	88
Resultados de optimización de los escenarios propuestos.	
Optimización del escenario 1a:	
temporada normal 1988.....	90
Impacto dinámico de las estrategias optimizadas.....	93
Optimización del escenario 2a:	
impacto del huracán "Gilberto" en la pesquería de pulpo (Q. <u>maya</u>).....	105
Impacto dinámico de la estrategia optimizada.....	106
Optimización del escenario 3a:	
impacto del huracán "Gilberto" en la pesquería de pulpo (Q. <u>maya</u>) con ampliación de temporada al 31 de diciembre de 1988.....	117
Impacto dinámico de la estrategia optimizada.....	118
 CAPITULO V DISCUSION.....	129
Estimación de los parámetros de manejo y sus holguras...	130
Resultado de las corridas base de simulación.....	131
Preferencias ú objetivos de manejo del administrador pesquero.....	136
Optimización de escenarios.....	141
Una Aproximación al Problema Científico de la Administración de Recursos Pesqueros.....	145
 CAPITULO VI CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS..	152
Conclusiones.....	152
Recomendaciones y sugerencias.....	155

LITERATURA CITADA.....	162
APENDICE A: MODELO DE COMPUTADORA ACOPLADO.....	174
APENDICE B: RESULTADOS DE OPTIMIZACION.....	191

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Tamaño y Composición de la Flota Pesquera Yucateca en 1988 (Antes del 15 de Septiembre).....	84
2	Efecto del Huracán "Gilberto" en la Flota pesquera Yucateca.....	85
3	Parámetros de Control Iniciales y Holguras ante los Escenarios Propuestos.....	86
4	Corridas Base. Resultado en las Variables Bioeconómicas de Interés en los distintos Escenarios de Manejo.....	88
5	Preferencias del Administrador Pesquero ante los Escenarios Propuestos.....	89
6	Resultados de Optimización del Escenario 1a. Efecto en las Variables Bioeconómicas.....	91
7	Resultados de Optimización del Escenario 1a. Combinación de Estrategias de Manejo.....	93
8	Resultados de Optimización del Escenario 2a. Efecto en las Variables Bioeconómicas.....	105
9	Resultados de Optimización del Escenario 2a. Combinación de Estrategias de Manejo.....	106
10	Resultados de Optimización del Escenario 3a. Efecto en las Variables Bioeconómicas.....	117
11	Resultados de Optimización del Escenario 3a. Combinación de Estrategias de Manejo.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Composición de la Captura en el Estado de Yucatán por Especie.....	8
2 Areas de Operación de las Flotas Pesqueras de la Plataforma Continental de Yucatán.....	10
3 Contenido de la Caja de Edgeworth de Producción y la Derivación de los Puntos de Eficiencia en la Producción.....	56
4 Curva Eficiente de Posibilidades de Producción.....	56
5 Mapas de Indiferencia.....	57
6 Derivación de los Puntos de Eficiencia en el Consumo.....	57
7 Curva de Posibilidades de Utilidad dada una Mezcla de Productos.....	58
8 Curvas de Posibilidades de Utilidad y la Curva de Utilidad Global.....	58
9 Mezcla Eficiente de Productos, Distribución de Bienes y Tasas de Precios de los Bienes.....	60
10 Mapa de Indiferencia Social.....	61
11 Maximización del Bienestar Social.....	62
12 Eficiencia como Criterio.....	63
13 Porciones Proporcionales Constantes.....	64
14 Pareto-Seguridad.....	65
15 Máximo Bienestar Social.....	66
16 Máximo Valor del Producto Social.....	67
17 Criterio Compuesto.....	69
18 Diagrama de Bloques de la Optimización Iterativa Mín-Máx.....	71
19 Conjunto de Valores Factibles y Soluciones Pareto-Optimas.....	76
20 El Complex.....	78
21 Complex Inicial Representativo. La Solución de Optimos Múltiples.....	79
22 Escenario 1a. Biomasa de Pulpo.....	94
23 Escenario 1a. Captura Total de Pulpo.....	95
24 Escenario 1a. Captura de Pulpo por la Flota Artesanal.....	96
25 Escenario 1a. Captura de pulpo por la Flota Moderna.....	97
26 Escenario 1a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Artesanal.....	98
27 Escenario 1a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Moderna.....	99
28 Escenario 1a. Empleos Directos Generados.....	100

29	Escenario 1a. Disponibilidad de Alimento en la Costa.....	101
30	Escenario 1a. Dinámica de la Flota Artesanal...	102
31	Escenario 1a. Dinámica de la Flota Moderna.....	103
32	Escenario 1a. Estructura Poblacional.....	104
33	Escenario 2a. Biomasa de Pulpo.....	107
34	Escenario 2a. Captura Total de Pulpo.....	108
35	Escenario 2a. Captura de Pulpo por la Flota Artesanal.....	109
36	Escenario 2a. Captura de pulpo por la Flota Moderna.....	110
37	Escenario 2a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Artesanal.....	111
38	Escenario 2a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Moderna.....	112
39	Escenario 2a. Empleos Directos Generados.....	113
40	Escenario 2a. Disponibilidad de Alimento en la Costa.....	114
41	Escenario 2a. Dinámica de la Flota Artesanal...	115
42	Escenario 2a. Dinámica de la Flota Moderna.....	115
43	Escenario 2a. Estructura Poblacional.....	116
44	Escenario 3a. Biomasa de Pulpo.....	119
45	Escenario 3a. Captura Total de Pulpo.....	120
46	Escenario 3a. Captura de Pulpo por la Flota Artesanal.....	121
47	Escenario 3a. Captura de pulpo por la Flota Moderna.....	122
48	Escenario 3a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Artesanal.....	123
49	Escenario 3a. Retornos Netos Acumulados por la Flota Moderna.....	124
50	Escenario 3a. Empleos Directos Generados.....	125
51	Escenario 3a. Disponibilidad de Alimento en la Costa.....	126
52	Escenario 3a. Dinámica de la Flota Artesanal...	127
53	Escenario 3a. Dinámica de la Flota Moderna.....	127
54	Escenario 3a. Estructura Poblacional.....	128

AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo del presente esfuerzo de investigación, yo he servido de vehículo. Esta contribución es producto de un ambiente académico y de condiciones específicas de trabajo que solo he conocido en el Cinvestav...y creo que conozco. De mi arribo en 1986 a estas fechas, he visto como el Centro ha crecido en cantidad, pero sobre todo en calidad. Estoy claro como algunos, que falta mucho por hacer en la búsqueda de la madurez académica, afortunadamente para mí, para la ciencia y para el país, hoy hacia allá se orientan los esfuerzos. Ante esto, mucho tengo que agradecer a todos los que han contribuido a crear este ambiente y estas condiciones. A los investigadores y sus ayudantes, a los trabajadores de apoyo administrativo en especial las secretarias del Departamento, a las compañeras bibliotecarias, a los muchachos del taller, a los del servicio de fotocopiado, a los de limpieza y jardinería, a los de vigilancia y a las muchachas del comedor. Para mi fortuna, de todos ellos de alguna forma, he recibido apoyo que mucho valoro y agradezco.

Especial mención merece el Dr. Juan Carlos Seijo G. Mismo que me introdujo a la ciencia de sistemas y al análisis bioeconómico en pesquerías. De él he tratado de aprender lo más posible. Falta mucho aún. Mucho valoro su papel como Director de esta tesis. De él recibí consejos y sugerencias para mejorar el trabajo; supo escuchar y respetar mi opinión y actuó como un verdadero guía de investigación.

Francisco Arreguín-Sánchez y Julio Sánchez-Chávez, jóvenes Maestros pero viejos compañeros de batalla, me han apoyado desde siempre. Su más reciente contribución ha sido la de ser revisores de esta tesis. Mucho se los agradezco. A la Dra María de los Angeles Liceaga y la M. en C. Silvia Salas Márquez también les agradezco su esfuerzo de revisión.

Manuel Solís-Ramírez apoyó fuertemente este trabajo al revisar lo relativo a la biología del recurso. Asimismo le agradezco el haberme facilitado los muestreos de 1987.

A Raúl Diego Rivera y a Carlos Rihani del CRIP el primero y de la Delegación Federal de Pesca el segundo, así como a la Oficina de Informática de ésta, por su apoyo a lo largo de este proceso. Asimismo a las autoridades del INP de la Secretaría de Pesca por todas las facilidades para que realizara los estudios y esta investigación. Al SUTSP, ya que mis estudios son la consecuencia de esa lucha. Seguiré.

De Nelly Gongora son los dibujos. Gracias !

A mis compañeras Silvia Salas, Paty Arceo y Minerva Arce del grupo de Modelación Bioeconómica de la sección Pesquerías del Departamento de Recursos del Mar con quienes conté en la cotidianidad del ejercicio. Asimismo a mis compañeros de estudio quienes con sus preguntas ingenuas o sus críticas agudas me hicieron poner los pies en el suelo.

A mis amigos Gerardo Gold, Héctor Rodríguez, Carlos Ruíz, Rafael Solana y Gabina Villagrán, varios puntos de vista de como hacer ciencia crítica, por las horas de discusión y aprendizaje. Asimismo a los de la mesa uno.

A todos los que permitieron que creara un directorio "Antonio o Chanín" en sus computadoras. A Luis Abarca, a Francisco Arreguín, a Gustavo de la Cruz, a Flavio Reyes y a Juan Carlos Seijo. Después del 15 de abril me pueden borrar.

Del Dr. Juan Luis Peña recibí todo tipo de facilidades durante el desarrollo de este ejercicio, haciéndome la vida mas fácil al permitirme trabajar en su IBM-AT.

Todos estos meses fui huésped de mis amigos Esther Romo y Gerardo Gold. Mi mas grato agradecimiento...por todo.

Finalmente a todos los que involuntariamente no menciono pero que contribuyeron de alguna u otra forma a la realización de este trabajo.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El llevar a cabo análisis cuantitativo de pesquerías demersales tropicales no es un asunto trivial dadas las complejidades inherentes a las mismas. Entre éstas, tenemos la gran diversidad de especies que se presentan en las capturas (Munro 1982 y Larkin 1982), las interdependencias biológicas que se presentan entre especies, el hecho de que las comunidades, si bien son relativamente constantes, son inestables (Sale 1982) y más complejas que en los mares templados (May 1984). Asimismo en la mayoría de los casos las componentes poblacionales se encuentran en grados diferentes de explotación (Cushing 1983), respondiendo de manera distinta ante cambios en la explotación (Munro 1982) y ante la marcada variabilidad ambiental (Simpson 1982). Por lo general, son pesquerías artesanales (Larkin 1982), generadoras de gran cantidad de empleo (Rothschild 1983), muchas veces con una importante flota tecnificada, con una gran diversidad de artes y con una gran diversidad de especies objetivo a las que se la aplica un esfuerzo de pesca estacional (Gulland y Garcia 1984). Lo anterior genera, la existencia de interdependencias de caracter tecnológico (Anónimo 1978, Anderson 1977, Anónimo 1986). Aunado a esto, las estadísticas de pesca son limitadas (Larkin 1982) o de mala calidad (Rothschild 1983) y por lo general son pocos o inciertos los recursos disponibles para la investigación (Kesteven 1983).

El aprovechamiento inteligente de estos recursos renovables es un proceso complejo en el que hay que tomar en consideración: (1) elementos de la biología básica del recurso y de los factores que determinan la dinámica de la estructura poblacional (2) los costos y beneficios involucrados en el esfuerzo y la captura, generados por las flotas artesanal y tecnificada ucuarias de estos recursos tropicales y (3) los posibles impactos en la captura, en la biomasa de los recursos y en la generación de ingresos, empleos y divisas, resultante de estrategias alternativas de manejo de la pesquería.

En este último aspecto, los primeros esfuerzos de investigación y modelación enfatizaban el impacto que la intervención del hombre tenía sobre las características vitales de las poblaciones de peces, así como la adecuación de las poblaciones a dicha intervención (Schaefer 1954, Beverton y Holt 1957, Ricker 1954 y 1958, Pella y Tomlinson 1969 y Fox 1970). Al explicar la realidad de manera incipiente, los modelos anteriores han sido complementados con elementos económicos, constituyendo el cuerpo de los llamados modelos bioeconómicos estáticos (Gordon 1954, Anderson 1977, Hannesson 1978, Villamar et al. 1979, Cato y Prochaska 1980, Arreguín-Sánchez 1985 y Clark 1985). Al incorporarse el elemento tiempo en las ecuaciones matemáticas, estos se convirtieron en los llamados modelos bioeconómicos dinámicos (Smith 1969 y Chavez 1981).

Chávez (1981) hace explícita una versión muy difundida

en México y en América Latina en los centros de investigación y de educación superior relacionados con el aprovechamiento de los recursos pesqueros en el sentido de que las decisiones de manejo de existir, son tomadas por los políticos o administradores de recursos en base a "buenos deseos" o intuición, muchas veces al margen de las opiniones científicas sobre el estado biológico de los recursos; sugiriendo que estas decisiones, deben de estar basadas en un buen conocimiento de las procesos involucrados en la dinámica de las poblaciones y las interdependencias bioeconómicas inherentes a la pesquería.

En el mismo año, Hansen (1981) reconoce que la administración sólida de recursos pesqueros, requiere de modelos matemáticos que enlacen los diferentes subsistemas que intervienen en la pesquería: el biológico, el bioeconómico y el industrial.

Asimismo, Gates (1984) y Sissenwine (1984), advierten las incertidumbres asociadas a las operaciones de pesca, al comportamiento de los recursos y a los factores ambientales (abióticos) que condicionan su distribución y abundancia, expresando la necesidad de modelarla explícitamente.

Anderson (1984), añade otro elemento de suma importancia: la incertidumbre generada por el comportamiento del administrador en relación a sus decisiones de manejo de la pesquería.

Recientemente, ante la necesidad de representar adecuadamente el conjunto de factores que intervienen en la

pesquería y utilizando el enfoque de sistemas, se han desarrollado modelos holísticos de simulación también denominados modelos 'integrales o comprehensivos' (Ervik et al. 1981, Grant et al. 1981, Allen y Mc Glade 1986, Richardson y Gates 1986, Seijo 1986, Seijo et al. 1987 y Seijo y Chapelle 1988).

Estos modelos, permiten al administrador de un recurso, conocer apriori, el impacto en el tiempo que diversas estrategias de manejo tienen sobre los elementos de las componentes biológica, económica y social del sistema pesquero.

La intervención del estado -que afecta el uso de un recurso pesquero- incide, fundamentalmente, en la regulación del esfuerzo de pesca; presentándose dicha intervención de la siguiente manera (Gordon 1954, Gulland 1974, Anderson 1977, Sissenwine y Kirkley 1982, Pope 1983, Troadec 1983, Beddington y Rettig 1984, y Clark 1985):

- (1) Asignando derechos de propiedad sobre el recurso a grupos o naciones.
- (2) Regulando la composición de la captura (control de la selectividad del arte y estableciendo vedas en áreas y tiempos).
- (3) Regulando el tamaño de la captura. (Limitación del ingreso a nuevos barcos, controlando la selectividad del arte de pesca, estableciendo cuotas de captura, restringiendo áreas de pesca e incidiendo sobre los impuestos y subsidios a la pesca).

- (4) Impulsando programas de educación y extensión sobre la conservación del recurso entre los usuarios.

Obtener la combinación óptima de estrategias de manejo ha sido un problema que tradicionalmente el administrador de recursos pesqueros ha abordado de tres maneras, que a continuación se enumeran en orden de uso:

- (1) En base a sus preferencias e intuición.
- (2) En base a sus preferencias y apoyándose en modelos matemáticos coincidentes con el enfoque y grado de avance de la ciencia en el país en cuestión, ya sea por medio de los que representan el subsistema biológico de la pesquería, los subsistemas biológico y económicos o en base a modelos holísticos de simulación.
- (3) En base a la información que los diferentes métodos de optimización le han brindado, convirtiéndose estos últimos en herramientas poderosas para la toma de decisiones o para la formulación de hipótesis iniciales de manejo (Holling 1978).

Dentro de los que utilizan modelos de optimización, los trabajos reportados corresponden por lo general a mares templados, tal es el caso de Anónimo (1964), Brown et al. (1973), Hilborn et al. (1976), Siegel et al. (1979), Garrod y Shepherd (1981), Flamm y Storoy (1982), Murawski et al. (1983b), Overholtz (1985), Bing-Hwang y Williams (1986), Murawski y Finn (1986), Wallace y Brekke (1986) y Huppert y Squires (1987). Los anteriores autores parten de condiciones

de linealidad en las funciones objetivo y en las restricciones funcionales asociadas, hecho que ha sido criticado por Bojórquez (1982) en relación a la idealización y simplificación al considerar o suponer que los fenómenos naturales se presentan en forma lineal y por Shepherd y Garrod (1980) en relación a los riesgos inherentes a la utilización de este tipo de procedimientos.

El trabajo de Drynan y Sandiford (1985) involucra la utilización de objetivos múltiples en la función objetivo y modelos de optimización no lineal con fines de manejo son utilizados por Shepherd y Garrod (1980) y Kennedy y Watkins (1986).

Sin embargo no se conocen trabajos en el área de análisis de pesquerías que combinen la optimización no lineal, con funciones de criterios múltiples producto de un modelo holístico de simulación, cuyo objetivo sea el encontrar combinaciones óptimas del vector de estrategias de manejo que minimicen la diferencia entre los valores deseados en las variables de interés especificadas por el administrador y los generados por el modelo matemático de la pesquería.

La Pesquería de Pulpo (*Octopus maya*) en la Península de Yucatán.

La pesquería de pulpo *Octopus maya* en la península de Yucatán es una actividad que data de 1949, cuando se capturaron 50 toneladas de ese molusco en el puerto de Campeche (Solís-Ramírez y Chávez 1986). Hacia 1955, se

pescaban alrededor de 71 toneladas, ascendiendo a 306 por el año de 1960. En 1965 interviene la empresa paraestatal Puerto Pilóto Pesquero de Alvarado, Veracruz, iniciando su actividad como comprador al adquirir 260 toneladas en ese año y 450 el siguiente. Estos volúmenes correspondieron al 30 y 39% de la captura de esos años (Solís-Ramírez 1967b y Solís-Ramírez y Chávez 1986). De esa forma se inicia -a raíz de la intervención de la empresa estatal- la regulación del precio, mismo que hasta esos años era definido por la oferta y la demanda del molusco en el mercado. Hacia 1970, ante el abatimiento de las capturas en las costas Campechanas, los pescadores incursionan en aguas Yucatecas cercanas a Celestún, iniciándose lo que para Solís-Ramírez y Chávez (1986) es el establecimiento en Yucatán de la pesca de pulpo en escala comercial cuando se capturan 304 toneladas (Arreguín-Sánchez et al. 1987). Hasta 1973, Celestún era el principal puerto yucateco de desembarque, incorporándose el resto de los puertos paulatinamente como respuesta a la labor de difusión y promoción que se desarrolló en el estado, existiendo actualmente descargas de la pesquería en la totalidad de los puertos yucatecos. Las capturas han aumentado con el desarrollo de la pesquería (Figura 1), siendo ésta, la segunda -después de la del mero- en importancia en el estado, contribuyendo en 1987 con un 28% de la captura total del estado (6168.5 tons), con un valor cercano a 14,391 millones de pesos (Secretaría de Pesca, 1988). El pulpo se congela y se destina casi en su totalidad

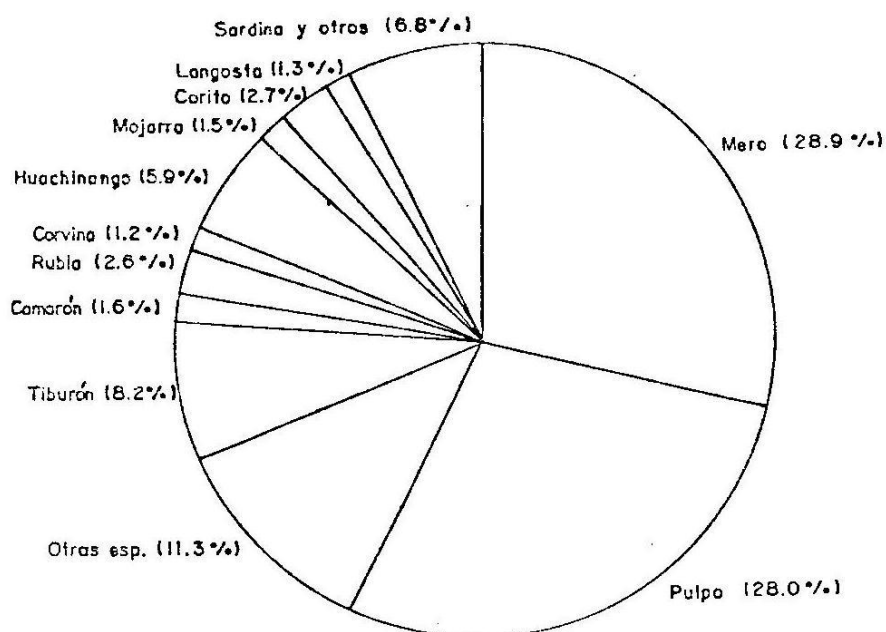


Figura 1 Composición de la captura en el Estado de Yucatán por especie (Secretaría de Pesca, 1987). Tomado de Arreguín-Sánchez et al. (1987).

al mercado nacional, aunque las exportaciones se han incrementado en los últimos años hacia los E.U.

La pesquería inicia el primer día del mes de agosto, incorporándose durante ese mes en todos los puertos la flota artesanal, misma que está compuesta por lanchas de madera o de fibra de vidrio de 18 a 24 pies de eslora con motor fuera de borda y vela. Estas, funcionan como nodrizas de uno o dos "alijos", que son pequeñas lanchas o "pangas" de 11 pies de eslora. El esfuerzo pesquero de esta flota se aplica fundamentalmente en aguas cercanas a la costa que es donde se encuentran los juveniles (Seijo y Chapelle 1988), durando el viaje de pesca entre 6 y 10 horas. Es a fines de agosto y principios de septiembre cuando empieza a incorporarse parte de la flota mecanizada o moderna, misma que hasta esos días

pesca principalmente mero, pero ante los bajos rendimientos, cambia de especie objetivo hacia el pulpo. Esta flota que inició la pesca del pulpo O. maya en 1982, emplea entre 4 y 8 "alijos" por barco, actuando en aguas más profundas hasta las 40 brazas (100 m aprox) en las que se encuentra la otra especie de pulpo Octopus vulgaris. Su viaje de pesca dura entre 6 y 14 días. La pesquería finaliza el 15 de diciembre de cada año, por lo que la temporada de pesca dura 4 meses y medio.

En la Figura 2 se presentan las áreas de operación de las flotas artesanales y mecanizada o moderna que inciden en la pesquería del pulpo yucateco.

El método de pesca se denomina gareteo y consiste en dejar la embarcación a la deriva, desplazándose ésta por efecto del viento y las corrientes, arrastrando las líneas o cordeles que encarnados atraen en el fondo a los pulpos. Estos atrapan la carnada y son capturados. La carnada consiste en diversas especies de jaibas y cangrejos, mismos que se atan al extremo de cada línea. Estas a su vez, están atadas a unas pértigas o "jimbas" de bambú que se encuentran instaladas a proa y popa de las lanchas y los "alijos", variando el tamaño de las "jimbas" y el número de líneas según el tipo de embarcación. Normalmente, las lanchas usan "jimbas" de 4 a 5 metros y de 16 a 25 líneas. Los "alijos" emplean "jimbas" de 2 a 3 metros con 6 a 8 líneas (Solis-Ramirez y Chávez 1986).

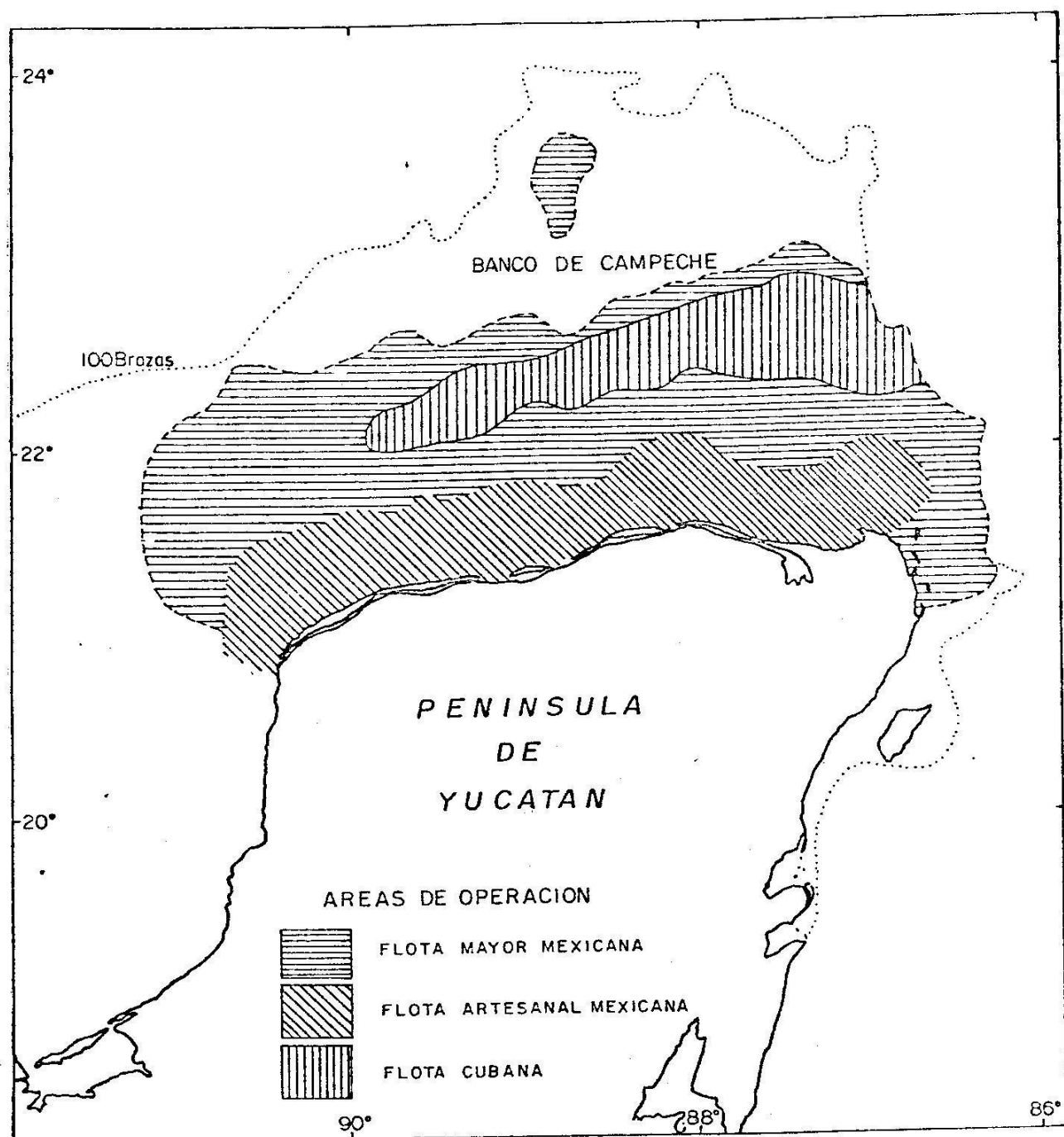


Figura 2 Areas de operación de las flotas pesqueras de la Plataforma Continental de Yucatán. Tomado de Arreguín-Sánchez et al. (1987).

La pesquería se encuentra regulada por medio de una veda que se inicia el 16 de diciembre y finaliza el 31 de julio del siguiente año; aunado a esto, se ha reglamentado la talla mínima legal de captura que es de 110 mm de longitud de manto (cabeza) y la prohibición de buceo y gancho como método de extracción (Diario Oficial, citado por Arreguín-Sánchez et al. 1987).

Hay indicios que evidencian dada la combinación de esfuerzos pesqueros de las flotas y el régimen de pesca actual, ligera sobreexplotación de O. maya, y subexplotación de O. vulgaris, sin embargo, se desconoce la magnitud de este último recurso (Arreguín-Sánchez et al. 1987).

Objetivo del Estudio.

El objetivo principal del presente estudio, consiste en la estimación de la combinación óptima de estrategias de manejo en la pesquería del pulpo de la Plataforma Continental de Yucatán, que satisfagan las preferencias preestablecidas por el manejador del recurso ante diversos escenarios de manejo.

Para lograr el objetivo principal, los esfuerzos de investigación involucran: (1) La optimización de un modelo de simulación de la pesquería del pulpo (O. maya) de la Plataforma Continental de Yucatán (Seijo et al. 1987), mismo que especifica elementos biológicos, económicos e institucionales que pueden determinar el funcionamiento de la pesquería en el tiempo, y (2) La definición de los escenarios

deseados en términos de variables o criterios de funcionamiento tales como:

- (1) La biomasa acumulada en el tiempo.
- (2) La captura total y por flota (artesanal y mecanizada o moderna) acumulada en el tiempo.
- (3) Los retornos netos por flota acumulados en el tiempo
- (4) Los empleos directos totales acumulados en el tiempo
- (5) La contribución de alimento en la zona costera acumulado en el tiempo.

Enfoque de la Investigación.

Para alcanzar los objetivos anteriormente citados, el enfoque de la investigación utilizado en este estudio involucra las siguientes actividades:

- (1) Revisión de la literatura sobre la biología, la ecología y el cultivo de (O. maya) y las implicaciones en su dinámica poblacional en las costas mexicanas del Golfo de México.
- (2) Revisión de la literatura sobre la teoría de control óptimo y su aplicación en el manejo de recursos pesqueros.
- (3) Revisión de la literatura relacionada con la teoría del bienestar económico aplicada a pesquerías.
- (4) Revisión de los esquemas regulatorios utilizados en el manejo de recursos pesqueros.
- (5) Acoplamiento conceptual del modelo de la dinámica de la pesquería con el modelo de optimización especificando sus interrelaciones.

- (6) Entrevista con los responsables de administrar los recursos pesqueros de la Secretaría de Pesca en Yucatán para identificar sus objetivos y explorar sus opciones de manejo.
- (7) Colecta de información de fuentes primarias y secundarias.
- (8) Acoplamiento y adaptación de los programas de computadora de los modelos de simulación y optimización.
- (9) Corridas del modelo ante varios escenarios de manejo y revisión de su funcionamiento.
- (10) Análisis de los resultados de la estimación.
- (11) Derivación de conclusiones y recomendaciones.

Las actividades anteriormente citadas son discutidas con mas detalle en los capitulos II, III, IV, V y VI correspondientes a revisión de la literatura, métodos de investigación, resultados, discusión y conclusiones y recomendaciones.

Finalmente, estos resultados pueden ser de interés para la comunidad académica interesada en la modelación matemática de recursos renovables. Asimismo proveen de información relevante a los responsables de tomar desiciones respecto al aprovechamiento y conservación de los recursos pesqueros regionales.

CAPITULO II

REVISION DE LA LITERATURA

En este capítulo se analiza la literatura relevante sobre la Biología, la Ecología, el cultivo y la dinámica de la población del pulpo (Octopus maya) de la Plataforma Continental de Yucatán, así como la relativa a la Teoría de Control Optimo y la Teoría del Bienestar aplicadas a la administración de recursos pesqueros.

Biología, Ecología, Cultivo y Dinámica de la Población del Pulpo (O. maya) de la Plataforma Continental de Yucatán.

Biología.

El pulpo Octopus maya es un molusco cefalópodo endémico de los mares someros que rodean la península de Yucatán. Es un invertebrado superior, béntico o demersal, que se distribuye desde 20 km al sur de Punta Zacatal Campeche, hasta Puerto Morelos Quintana Roo. Es común encontrarlo cercano a la costa, sin embargo, se han llegado a encontrar organismos hasta los 50 m de profundidad (Anónimo 1985).

Hasta 1965 se la confundía con Octopus vulgaris, organismo que habita en la misma zona de distribución que O. maya pero en mayor abundancia hacia aguas más profundas hasta los 100 metros. Sin embargo, al existir la duda (Fuentes et al. 1965) la descripción de la especie se llevó a cabo por Voss y Solis en 1966 (Solís-Ramírez 1967b).

Su ubicación sistemática es la siguiente:

Phylum Mollusca

Clase Cephalopoda (Cuvier 1798)

Subclase Colloidea (Bather 1888)

Orden Octopoda (Leach 1818)

Suborden Incirrata (Grimpe 1916)

Familia Octopodidae (Orbigny 1845)

Subfamilia Octopodinae (Grimpe 1921)

Género Octopus (Lamarck 1798)

Especie Octopus maya (Voss y Solís 1966)

Basada en Roper et al. (1983) citado por Amaratunga (1983) y adaptada por el autor.

Morfología externa.

Son individuos que alcanzan grandes tallas en comparación con otras especies. Esta aseveración se basó en individuos que midieron hasta 123 mm de longitud de manto (Solís-Ramírez 1967b).

Para este autor, dos son las principales diferencias con otras especies, siendo éstas:

- (1) "La presencia en todos y cada uno de los ejemplares machos y hembras, de un par de manchas redondeadas oscuras (en forma de lunar) ú ocelos situados por debajo de los ojos, entre éstos y la base del segundo y tercer brazos... aumentando a dos el número de pulpos ocelados del Atlántico Occidental ...
- (2) La forma particular del hectocotilo o brazo

copulador del macho. Este presenta un surco espermatofórico a todo lo largo del brazo, siendo profundo con sus pliegues vueltos hacia adentro ocultando el calamus. La lígula bien desarrollada."

El mismo autor describe al manto como fuerte, oval y grueso; al sifón largo, tubular en forma de W; la cabeza estrecha y con ojos pequeños; los brazos largos, robustos y adelgazándose hacia las puntas o extremos; la corona branquial es masiva, fuerte y bien desarrollada, presentando en la membrana interbranquial escotaduras de profundidad media y entre 9 y 10 laminillas branquiales. Asimismo, la superficie de los brazos, cabeza y porción dorsal es granular presentando numerosas papilas cubriendo la cabeza y la porción dorsal del manto. La porción ventral es lisa. Finalmente, presenta el tercer brazo derecho modificado para el apareamiento.

Su coloración en condiciones normales es café oscuro, sin embargo cuando se irrita, pasa a café rojizo con fondo blanco. La coloración varía acorde a las características de medio ambiente circundante (Solís-Ramírez 1967b). Cowdry en 1911 (citado por Solís-Ramírez 1967b) la atribuye a cromatóforos, mismos que son más abundantes en organismos que habitan en aguas someras.

Neurofisiología.

Para Solís-Ramírez (1967b), contribuyen al esclarecimiento de muchos problemas neurofisiológicos, dado el tamaño que alcanzan sus fibras nerviosas.

Reproducción.

Fuentes et al. en 1965, sugieren que a mediados del mes de septiembre se inicia la reproducción, culminando en marzo del siguiente año; siendo la talla aproximada de los reproductores cercana a los 70 cm de longitud total.

Madurez sexual.

Entre septiembre y noviembre es cuando las hembras alcanzan su máxima madurez sexual, cercanas a los 10 meses (Solís-Ramírez y Chávez 1986). Es entonces cuando el ovario se percibe por su transparencia a través del manto (Solís-Ramírez 1967b).

Apareamiento, Fecundación y Eclosión.

Existe una clara diferenciación sexual entre el macho y la hembra. El primero, cuenta con el tercer brazo derecho como vehículo copulatorio. Este es más largo que su homólogo y se le denomina hectocotilo. La fecundación es interna al introducir el macho, el hectocotilo bajo la cavidad del manto de la hembra, en la hendidura que tiene ésta entre el tercer y cuarto brazo derecho, depositando así los espermatozoides (Purchon 1977). El aparato reproductor de la hembra consta de un gran ovario en posición posterior con su glándula intermedia grande, redondeada y de color oscuro (Solís-Ramírez 1967b).

Un mes después del apareamiento es cuando se presenta la oviposición, al fijar las hembras fecundadas racimos de huevecillos en el techo de las oquedades, grietas o cuevas en las que se refugian (Solís-Ramírez 1967b, Boletzky 1986,

obs. pers).

Morales y Solís-Ramírez (1987) encontraron que es noviembre el mes de máximo desove y oviposición.

Los huevecillos son blancos lechosos, periformes aproximadamente de 15 mm de largo y 4.5 mm de diámetro. Cada racimo contiene alrededor de 60 huevecillos. A simple inspección se pueden distinguir los huevos y su estado. Estos se retraen al ser tocados, siendo muy apreciados por los peces (Solís-Ramírez 1967b).

El área del desove corresponde a aguas de poca profundidad entre 1 y 5 brazas (Fuentes et al. 1965, Solís-Ramírez 1967).

Una vez fijados los huevecillos, la hembra inicia el cuidado de los mismos, limpiándolos constantemente con los brazos y por medio de chorros de agua que impulsa a través del sifón. Asimismo asume una actitud defensiva hasta que, entre los 30 y 40 (Fuentes et al. 1965) llegando incluso a 60 días posteriores a la oviposición (Solís-Ramírez 1967b), la eclosión se inicia. La hembra presenta en estos momentos, evidentes signos de debilidad y flacidez así como poca resistencia, muriendo posteriormente (Fuentes et al. 1965). A partir de experimentos en laboratorio, Fuentes et al. (1965) sugieren que el avivamiento se presenta por el extremo distal y no por el lateral. La mayoría de los nuevos organismos, han absorbido el saco vitelino o lo absorben inmediatamente. Dado que el desarrollo embrionario es directo, no cuentan con fase larvaria, presentándose los

nuevos organismos con las características de un adulto pero en pequeño; nadan con gran vitalidad y se adhieren y reptan por las paredes de las cuevas, iniciando así, su vida bentónica. Es en este momento cuando adquieren su coloración. También se esconden y tiran chorros de tinta ante el peligro (Fuentes et al. 1965), asimismo cuentan con brazos hábiles para atrapar el alimento (Solís-Ramírez y Chávez 1986).

Fecundidad.

Fuentes et al. (1965) llevaron a cabo el conteo de una puesta de huevecillos de un pulpo obteniendo como resultado 1236 huevecillos, bajo la consideración que los contados representaban el 60% de la puesta concluyen que la fecundidad absoluta es de 2060 huevecillos. En el mismo sentido Solís-Ramírez (1967b) cuenta el total de la puesta de otro individuo, resultando 1324, por lo que la fecundidad absoluta la estima en 2207, misma que se encuentra ligeramente fuera del intervalo de estimación que considera (1500-2000 huevecillos).

Posteriormente, Van Heukelem (1976, 1977) y Van Heukelem (1983, citado por Morales y Solís-Ramírez 1987), bajo condiciones de cultivo estima una fecundidad de hasta 5000 huevecillos.

Morales y Solís-Ramírez (1987) analizan 57 ovarios maduros de O. maya de Campeche y Yucatán estimando una fecundidad promedio de 1516 huevecillos por individuo con un intervalo de 632 a 2606. La fecundidad relativa es en este caso de 0.95 huevecillos por gramo de individuo.

Dada la variabilidad inherente en el trabajo de los anteriores autores, Seijo et al. (1989) toman los resultados anteriores a manera de muestra piloto para determinar el tamaño de muestra (1466 gonadas) y así estimar con niveles deseados de precisión y confianza, la fecundidad promedio. Posteriormente desarrollan una simulación Montecarlo y estiman la media de la fecundidad (1585 huevos/gonada) e intervalos de confianza para el estimador (1423-1746).

Crecimiento.

El crecimiento del pulpo Octopus maya fué cuantificado por Solís-Ramírez y Chávez (1986) para el año de 1980. Lo anterior se hizo utilizando métodos indirectos en todo caso acorde al modelo de crecimiento de Von Bertalanffy. Encuentran que es una especie con crecimiento muy rápido y ciclo de vida corto. Los estimadores de los parámetros del modelo son: $L_{\infty}=229.5$ mm; $W_{\infty}=2864$ gr; $k=0.2628$ y $t_0=-0.0381$ siendo la relación Peso total-Longitud de manto igual a:

$$P = 0.0034 L^{2.51}$$

Posteriormente Díaz de León (1988) a través de 3 métodos indirectos utilizando muestreos de 4 temporadas de pesca de 1983 a 1986 (13996 individuos) que cubrieron todos los meses de pesca y con organismos de todas las tallas extraídas, encuentra que los resultados de la estimación son divergentes en los 3 casos. Ante esto, revisa los resultados de crecimiento de Octopus maya cultivado por Van Heukelem (1976, 1977) comparándolos con los de Solís-Ramírez y Chávez (1986) y concluyendo que la curva estimada por estos autores, no

representa de manera adecuada o parecida a los datos observados por el primer autor, sobreestimando los pesos durante los 6 primeros meses de vida y subestimandolos del 7 al 9. Igual comportamiento tiene la comparación en longitud. Ante esto, Díaz de León (1988) busca representar los resultados del autor norteamericano por medio de 3 modelos adicionales:

- (1) Modelo polinomial de 4to orden.
- (2) Modelo de Gompertz.
- (3) Modelo Logístico.

Encontrando que el último modelo, es el que mejor representa los datos experimentales. Los parámetros de la curva son $g=1.1$ y $t_0=6.5$ (mismos de temporalidad mensual).

Forsythe y Van Heukelem (1987) discuten la facilidad en el uso de la ecuación de Von Bertalanffy (V.B) para representar el crecimiento. Reconocen la amplitud de su uso en pesquerías de vertebrados por la flexibilidad en su uso dentro de las ecuaciones de rendimiento (Caddy 1983), sin embargo consideran que la bondad para describir el crecimiento de cefalópodos es cuestionable. Sugieren que el supuesto básico de la ecuación de V.B. no ha sido demostrado para ningún cefalópodo (excepto Nautilus spp.) y que además no describe adecuadamente el crecimiento inicial de los octópodos.

Rodríguez-Sánchez (com.pers) basado en una sugerencia de Solís-Ramírez (1967b), ha iniciado la búsqueda de estructuras rígidas (otolitos) en Octopus maya que permitan acercamientos

al problema de la edad y el crecimiento.

Alimentación y digestión.

El pulpo es un cazador béntico que emerge de su cueva o guarida para atrapar cangrejos que merodean por las cercanías. Se arrastra por las rocas por medio de las ventosas de sus brazos, atacando objetos pequeños que se mueven tales como cangrejos, abalanzándose sobre sus víctimas y envolviéndolas con la membrana que une la base de los brazos. El cangrejo es mordido, matado y llevado a la cueva donde es consumido. El exoesqueleto y los restos de la víctimas se acumulan en los alrededores de la cueva (Purchon 1977). El mismo autor plantea que la duración de la digestión de sus víctimas es de aproximadamente 18 horas.

Los primeros estudios nacionales, sugieren que Octopus maya se alimentaba de moluscos y crustáceos (Fuentes et al. 1965). Posteriormente, Solís-Ramírez (1967b) analizó cualitativamente el contenido del tracto intestinal de 47 individuos, observando que predominaban diversos tipos de crustáceos además de escamas de peces, no encontrando restos de moluscos. Sin embargo encuentra conchas vacías de bivalvos tapizando la entrada de las guaridas (Solís-Ramírez y Chávez 1986). Entre los más frecuentemente observados, encuentra a Codakia orbicularis, Arca zebra, Modiolus americanus, Trachycardium y como ejemplo de gasterópodo a Sinum perspectivum. Munro (1974) y Gracia y Kensler (1980) sugieren al pulpo como depredador de langosta y fuerte competidor por espacio.

Estudios del factor de condición, muestran que en 1966 los valores más altos de éste, se presentaban entre septiembre y octubre iniciando inmediatamente un decaimiento (Solís-Ramírez 1967b). Veintiún años después, Morales y Solís-Ramírez (1987) encuentran que este índice de robustez alcanza su valor máximo en noviembre, con un decaimiento inmediato hacia valores mínimos en diciembre. Lo anterior sugiere una estrecha relación entre este parámetro y el estado de madurez gonádico.

Enfermedades y parásitos.

No existen evidencias en la literatura consultada, sobre estudios de enfermedades que afecten a Octopus maya.

Solís-Ramírez (1967b) no encontró parásitos en el tracto digestivo, sin embargo sugiere la posible existencia de mesozoa en hígado, aunque en su estudio reconoce no haberlo revisado.

Ecología.

Habitat, distribución espacial y temporal.

Es una especie béntica de ciclo de vida corto (1 año), habita en fondos rocosos cubiertos de algas, arena u oquedades, muchas veces asociados a comunidades de pastos marinos como Thalasia testudinum (Fuentes et al. 1965, Solís-Ramírez 1967b, Solís-Ramírez y Chávez 1986, Anónimo 1985). Normalmente habita en aguas someras, sin embargo se ha reportado su presencia hasta profundidades cercanas a los 100 metros (Anónimo 1985). Al no contar con fase larvaria, la población está constituida por juveniles y adultos,

presentándose estos últimos cercanos a la costa durante los meses de reproducción (Anónimo 1985). Los juveniles se encuentran desde la costa hasta los 30 metros (Seijo y Chapelle 1988), distribuyéndose posteriormente hacia la profundidad (Solís-Ramírez y Arreguín-Sánchez 1984 y Anónimo 1985).

Factores determinantes de la distribución y abundancia.

Abióticos.

El intervalo de temperatura tolerable por los organismos se encuentra entre los 20°C y los 28°C correspondientes a invierno y verano, con una temperatura media de 24°C (Fuentes et al. 1965 y Anónimo 1985). A bajas temperaturas los organismos tienen poca actividad y a altas cercanas a 32 C mueren (Fuentes et al. 1965). La temperatura óptima que establece este autor es de 27°C. Asimismo, plantea la existencia de fototropismo negativo.

El intervalo de salinidades en las que se encuentra está entre las 34.4%. y 38.2%. concentraciones típicas de mares tropicales (Fuentes et al. 1965).

Se dice entre los pescadores que su presencia masiva en la zona costera está asociada y es posterior al primer "Norte", escaramuza de tormenta, producto de frentes fríos polares que avanzan a todo lo largo de la costa del Golfo de México de norte a sur en los meses posteriores al verano, por lo que es de pensarse que el reclutamiento a la costa esté asociado a la reproducción y a la mayor presencia de refugios como resultado del meteoro.

Bióticos.

Poco se conoce de sus competidores por espacio o alimento, pudiendo pensarse que los organismos competidores, son los que se ubican en hábitats similares, con igual posición dentro de la trofodinámica del ecosistema.

Entre los depredadores más activos del pulpo, Solís-Ramírez (1967b) menciona a varias especies de espáridos, serranidos, lutjanidos y tiburones entre los que contamos a Lagodon rhomboides, Centropristes sp., Lutjanus sp., Sphaeroides maculatus, mismos que se alimentan de huevecillos del pulpo (O. maya), mientras que Epinephelus morio, Scomberomorus maculatus y Rizhoprionodon sp., depredan sobre la fase juvenil del pulpo (Solís-Ramírez 1967b).

Posicion trófica.

Por sus antecedentes alimenticios cualitativos, se puede identificar al pulpo como un carnívoro voraz, incluso llegando a depredar sobre peces, por lo que se le ubica como un consumidor terciario.

Comportamiento social.

Son solitarios y crípticos, con un área territorial bien definida. Expelen tinta cuando son agredidos y muestran sus habilidades miméticas (Solís-Ramírez 1967b y Anónimo 1985). Su agregación es fundamentalmente reproductiva. Las hembras cuidan de sus huevecillos con especial cuidado, comportándose defensivamente ante cualquier tipo de perturbación (Fuentes et al. 1965, Solís-Ramírez 1967b y Anónimo 1985).

La muerte de las hembras, sobreviene posteriormente a la

eclosión de los huevos, una vez cumplido el ciclo de vida. Los machos mueren un poco después.

Para contar con información de carácter general sobre la biología, ecología y el comportamiento de los octópodos, se pueden consultar los trabajos de Purchon (1977), Wells (1978) y Caddy (1983).

Cultivo.

Las observaciones que Fuentes et al. (1965) y Solís-Ramírez (1967b) hacen en condiciones "in vivo" en laboratorio han ayudado a esclarecer aspectos de la biología reproductiva y el comportamiento del pulpo O. maya, sin embargo, no constituyen un esfuerzo de cultivo en condiciones controladas. Justo es el reconocer que muchos de los resultados obtenidos por los autores mexicanos a pesar de sus limitaciones, han venido a ser corroboradas y ampliadas por los estudios que 10 años después iniciaría Van Heukelem (1976, 1977) en condiciones apropiadas de cultivo.

Van Heukelem (1976, 1977) se considera el pionero en el cultivo de O. maya, cuando durante 37 meses consecutivos, cultiva 4 generaciones en sistemas abiertos y cerrados de agua de mar en la Universidad de Hawaii.

Sus principales resultados fueron los siguientes:

Longitud de huevo (mm)	11-17
Peso húmedo individuo recién nacido (mg)	100
Longitud del manto de individuo recién nacido (mm)	7.0
Número de huevos por puesta	300-5000

Duración del desarrollo del huevo (días)	45 a 25°C
Ciclo de vida estimado (meses)	8 a 12
Generaciones por año	1 a 2
Eficiencia de conversión alimenticia (%)	40
Tasa relativa de crecimiento diario (% de peso corporal por día)	4.1
Peso máximo en la naturaleza (g.)	2000
Peso máximo en cultivo (g.)	5700

De hecho este cultivo, demuestra que los cefalópodos (calamares y pulpos) que producen huevos telolecíticos y juveniles bentónicos grandes cuyo desarrollo es directo sin tener estadios larvarios, son razonablemente fáciles de cultivar (Forsythe y Hanlon 1980) incluso en condiciones de sistemas cerrados.

Las ventajas del cultivo de octópodos que oviposicionan huevos grandes -incluido O. maya- son descritas por Hanlon y Forsythe (1985), siendo éstas:

- (1) El desarrollo es directo sin estadios larvarios o planctónicos.
- (2) Los nuevos individuos son grandes y completamente desarrollados.
- (3) Los nuevos individuos se alimentan inmediatamente de presas relativamente grandes.
- (4) Los nuevos individuos tienen existencia béntica después del nacimiento y buscan refugio inmediato.
- (5) Su crecimiento es muy rápido con un ciclo de vida relativamente corto.

- (6) Son fuertes y adaptables al ambiente de laboratorio.
- (7) Estas especies se reproducen en cautiverio.
- (8) Además que en el caso de O. maya hay un 90% de éxito en el avivamiento (Hanlon 1987).

Importancia del cultivo.

La importancia biomédica (Hanlon y Forsythe 1985) justifica el esfuerzo de cultivo en estas especies. Esta reside en la existencia de un sistema circulatorio cerrado, un cerebro altamente vascularizado cuyos lóbulos son separables y su alta susceptibilidad para estudiar y hacer correlaciones entre su comportamiento y su sistema nervioso. En etología, los pulpos son importantes en experimentos de aprendizaje, ya que su comportamiento es similar al de los vertebrados; se adaptan a experimentos de castigo-recompensa y cuentan con memoria de corto y largo plazo. Los estudios que se llevan a cabo actualmente sobre pulpo, incluyen aquellos de barreras en sangre-cerebro, neurotransmisores, pigmentos sanguíneos, activación enzimática vía calmodulina, mecanismos inmunológicos, fototransducción, regeneración de córneas, control de cromatóforos a través de sistema nervioso, toxicología ambiental, sistemas receptores de aceleración angular, ontogenia del aprendizaje y la memoria y control hormonal de la reproducción.

Asimismo, al apoyar a la ciencia pesquera, al poder llevar a cabo observaciones y estudios que en el campo serían difíciles o imposibles como es el caso de la determinación de edad. Finalmente la creciente demanda de individuos a través

de la industria de los acuarios, son algunas de las razones que justifican para Hanlon (1987) su cultivo.

Limitaciones del cultivo.

Las limitaciones según Hanlon (1987) son las siguientes: que los individuos son carnívoros y por lo general requieren de organismos vivos para su alimentación; que hasta la fecha en el cultivo (Hanlon 1987) y en la pesquería (Solís-Ramírez 1967b) la alimentación artificial o con individuos muertos ha sido infructuosa; que ante la maduración sexual precoz, el ciclo de vida se acorta y la muerte sobreviene más rápido, aunado al que en condiciones de hacinamiento puede presentarse comportamiento agresivo (Hanlon y Forsythe 1985, Hanlon 1987) y que no pueden sobrevivir a bajas salinidades, bajos niveles de oxígeno disuelto o por abajo de pH's inferiores a 7.5 (Hanlon y Forsythe 1985).

Dinámica de la Población.

El primer trabajo que se conoce sobre la dinámica de la población de pulpo O. maya es el de Solís-Ramírez y Chávez (1986). En éste, analizan la pequería en 1980 basándose en la estructura de los grupos de edades presentes. Asimismo, desarrollan análisis bioeconómico. Sus principales hallazgos muestran en la parte biológica que la relación peso-longitud para ambos sexos es $P=0.00343 L^{2.51}$; que partiendo del papel probabilidad -método de Cassie- se identifican 5 grupos de edad cuando se analizan los sexos separadamente y 6 cuando se analizan en conjunto, que no hay en apariencia diferencias sexuales en la tasa de crecimiento, estiman para cada uno de

los tres meses que analizan, parámetros para machos, hembras y ambos sexos del modelo de Von Bertalanffy, observan que la madurez sexual se presenta entre los 6 y los 7 meses de edad y que su longevidad es de 18 meses. Identifican a partir de la captura por unidad de esfuerzo dos períodos de reclutamiento, el primero a principios de agosto y el segundo a fines de octubre, duplicando el segundo al primero en cuanto a su magnitud. Finalmente, estiman las mortalidades (Z, F, M) por grupo de edad así como la tasa de explotación.

La parte económica se basa en el muestreo de 67 embarcaciones, obteniendo que la pesquería genera una captura de 7169 tons (1980) con un esfuerzo de pesca igual a 153512 viajes, generando este 5000 empleos directos (3841 en Yucatán), siendo el valor de la captura en playa igual a 609.4 millones de pesos y el costo de explotación de 573.5, por lo que la relación Beneficio/Costo por pescador equivale a 1.17, mientras que por permisionario es de 3.05, siendo la primera la relación más baja de todas las pesquerías de la entidad.

Evaluaciones del rendimiento óptimo les indica que éste se encuentra en 4500 tons. Ligeramente sobreexplotado, con posibilidades de soportar incrementos del 6% en la intensidad de explotación si se evalúa a partir de la generación 5. Si se analiza a partir de las generaciones 1 a 4, el recurso está sobreexplotado, mismo que requeriría una limitación en el esfuerzo cercano al 30%. Sin resolver este punto, sugieren -dado que la pesquería gravita casi sobre individuos

subadultos que no han tenido oportunidad de reproducirse- la regulación de la intensidad de pesca mediante la reducción de la duración de la temporada a 4 meses, controlar la mortalidad total mensual (Z) en valores equivalentes a 1.06, estableciendo una talla mínima de 120 mm de longitud de manto o un peso mínimo de 450 g. Finalmente, sugieren el semicultivo y el cultivo intensivo como una forma de rehabilitar la población.

Solís-Ramírez y Arreguín-Sánchez(1984), analizan 4 temporadas de pesca a partir de los datos de captura y esfuerzo, utilizando la base teórica de los modelos de producción excedente modificados para tomar en cuenta tanto aproximaciones al equilibrio como la variabilidad del reclutamiento (Walter 1975); asimismo desarrollan análisis bioeconómico del tipo beneficio/costo, presentando alternativas de administración. Sus resultados indican que los niveles de captura máxima de equilibrio y de esfuerzo pesquero óptimo están cercanos a 8300 tons y a 219700 viajes por temporada. El análisis bioeconómico muestra que la pesquería opera sobre el nivel de equilibrio bioeconómico, a pesar de que en las recientes temporadas la relación se invierte. Presentan el acercamiento a las máximas utilidades (REM o MEY) vía la reducción del esfuerzo hasta 196700 viajes por temporada. Encuentran que el valor óptimo del cociente B/C es de 1.3 mismo que se obtiene con los anteriores viajes de pesca. Estiman los parámetros del modelo de reclutamiento de Ricker(1954,1958), siendo alfa igual a 11.6 y beta igual a

3.09×10^{-6} , con los que estiman tasas de reclutamiento máximas y mínimas. Presentan 5 estrategias para regular la administración del recurso, mismas que son: (1) No tomar acción alguna manteniendo la situación actual, (2) obtener la captura máxima de equilibrio, (3) buscar la relación B/C máxima, (4) obtener utilidades máximas y (5) garantizar la rentabilidad de la explotación considerando su mínimo nivel de reclutamiento. Concluyen que es evidente la sobreexplotación, más no tienen elementos para cuantificar la gravedad de esta. Recomiendan la limitación y de ser posible la reducción del esfuerzo de pesca, mientras se hacen estudios mismos que se enfocarían a conocer más de la estructura poblacional y de la relación parentela-progenie.

En 1986 Walter (1986), desarrolla un procedimiento para obtener estimaciones aproximadas de las curvas de equilibrio aplicable a pesquerías en que las poblaciones están apartadas del equilibrio. Genera un concepto denominado "síndrome de incremento rápido en la explotación de la población (RIPE SYNDROME) y entre los ejemplos en los que lo aplica, se encuentra el de la pesquería del pulpo O. maya de 1979 a 1982, mostrando que mientras los tres primeros años se encontraban sobre el equilibrio y el último por abajo, de seguirse presentando las mismas tasas de explotación, la captura podía decaer, pudiendo presentarse el síndrome anteriormente citado.

Arreguín-Sánchez (1987 y 1988), presenta trabajos sobre alternativas de administración de la pesquería del pulpo (O.

maya) al adicionar dos temporadas de captura y esfuerzo a su anterior contribución (Solís-Ramírez y Arreguín-Sánchez 1984) y analizarla a la luz de los tiempos de recuperación a condiciones anteriores, apoyado por la teoría de Schaefer (1954). Encuentra que para 1984, la población representaba el 26.9 % de la población máxima y que para alcanzar niveles equivalentes al 50 % de la población máxima, se necesitarían 2 años bajo la ausencia de pesca y 5 años si se limitara el esfuerzo a los niveles de 1984.

Seijo et al. (1987) y Seijo y Chapelle (1988) han elaborado un esfuerzo de integración de la biología y la ecología del recurso con factores económicos y sociales que determinan el comportamiento de los usuarios del recurso y de los responsables de su administración al desarrollar -bajo la metodología de sistemas- un modelo de simulación que permite modelar la naturaleza dinámica, no lineal y estocástica de la pesquería del pulpo (O. maya). Llevan a cabo diversos experimentos de simulación buscando observar el impacto de diversas estrategias de manejo del recurso en variables de interés tales como:

- (1) Biomasa de la especie.
- (2) Rendimiento de la pesquería.
- (3) Generación de empleos.
- (4) Retornos netos por tipo de flota.
- (5) Contribución a la disponibilidad de alimento en las zonas costeras.

Asimismo, determinan también los puntos de equilibrio

bioeconómico para la pesquería y los máximos rendimientos económicos por flota.

Los resultados de la simulación para 1986 muestran:

Biomasa. Esta empieza a incrementarse a partir del 15 de febrero, alcanzando su máximo después del 15 de julio. Al comenzar la temporada de pesca, inicia su decaimiento, alcanzando el mínimo por la tercera quincena del siguiente año. La biomasa acumulada para ese año fue calculada en 73000 tons (Seijo et al. 1987).

Rendimiento o captura. La diferencia entre la captura total real y la captura total simulada es de aproximadamente un 3.8%, presentándose las capturas máximas durante el mes de octubre en la flota artesanal y durante noviembre en la flota de mediana altura.

Retornos netos por flota. El máximo rendimiento económico, es alcanzado por la flota artesanal durante la segunda quincena de septiembre (2829 tons), mientras que la flota de mediana altura, lo alcanza durante la segunda quincena de noviembre (2433 tons). Por otra parte, el equilibrio bioeconómico ($PT=CT$), se presenta entre las quincenas 21 y 22 para la flota artesanal, mientras que para la flota de mediana altura, éste no se alcanza ya que opera a niveles de esfuerzo menores.

Cuatro estrategias de administración son simuladas, siendo los resultados de los impactos los siguientes:

- (1) Incremento de flotas en un 20%. La biomasa decrece 20.8%, la captura aumenta 17.7%, los retornos netos

- acumulados decrecen 12.9% para la flota artesanal y aumentan 3% para la de mediana altura. Los empleos directos aumentan 20% y la disponibilidad de alimento en la zona costera aumenta 19.4%.
- (2) Ampliación en un mes la veda. La biomasa aumenta 21.1%, la captura se reduce en 0.3%. Los retornos netos aumentan 13.5% en la flota artesanal y decrecen 11.3% en la flota de mediana altura. Los empleos decaen 0.15% y la disponibilidad alimenticia costera también en 24.5%.
- (3) Respeto de la talla mínima. La biomasa aumenta 6.7%, la captura decrece 0.13%, los retornos netos acumulados aumentan 1.4 y 0.9% para las flotas artesanales y de mediana altura, no existiendo efectos significativos en la generación de empleos y en la contribución a la disponibilidad alimenticia costera.
- (4) Combinación de las estrategias (1) y (2). Biomasa y captura aumentan 4.3% y 1.9%. Los retornos netos acumulados de la flota artesanal aumentan en 17.5% y los de la flota de mediana altura decrecen a 3%. Finalmente, los empleos aumentan 19.8% y la disponibilidad de alimento decrece a 9.9%.

Posteriormente Díaz de León (1988), analiza el crecimiento de O. maya durante 4 temporadas de pesca (83-86) a la luz de métodos indirectos (ELEFAN de Brey y Pauly 1986) é intentando hacer uso del sentido común, también estima

relaciones peso-longitud y lo que considera la mejor ecuación de crecimiento. Estima, la estacionalidad del parámetro de crecimiento (k), la mortalidad natural (M), asimismo hace análisis de cohortes por longitudes y desarrolla la simulación bioeconómica con lo que considera sus mejores estimaciones para los parámetros de 1986. Sus resultados indican que las metodologías en cuestión (ELEFAN y procedimientos estacionarios) presentan problemas (óptimos múltiples, cambios bruscos en los estimadores ante cambios en los intervalos de talla, etc.) cuando se intentan aplicar a poblaciones que no crecen de acuerdo al modelo de Von Bertalanffy, que el mejor modelo que describe el crecimiento en pulpo es el modelo logístico, como ya ha sido comprobado por los colegas que lo han cultivado (Forsythe y Hanlon 1980, Hanlon y Forsythe 1985 y Hanlon 1987), que la estacionalidad de k estimada por los anteriores autores de ser cierto V.B. es mensual sobre la base de un ciclo de vida cuya temporalidad es de 12 meses y que actualizando la ecuación de crecimiento para 1986 en el modelo de simulación, los resultados no variaron sensiblemente. Asimismo se plantea la necesidad de utilizar procedimientos que permitan hacer ajustes logísticos a partir de información de campo de frecuencia de longitudes y la necesidad de contar con procedimientos para validar la edad ya sea por medio de la búsqueda de marcas en los estatolitos, en alguna estructura rígida o a través de cultivos experimentales.

Finalmente Arreguín-Sánchez et al. (1987), sugieren la

modificación del actual período de veda de manera que abarque del 1º de enero al 31 de agosto con lo que se limitaría la captura de juveniles, estimulando la construcción de embarcaciones artesanales de mayor autonomía para aliviar la presión de pesca sobre juveniles al incidir las capturas sobre el recurso adulto que se encuentra fuera de la zona costera.

Teoría de Control Óptimo y su aplicación en Pesquerías.

En esta sección se discute la relación entre administración de recursos y la teoría de control óptimo en ecología, posteriormente se explica el problema fundamental del control óptimo y finalmente se describen las principales aplicaciones de éste a la administración de recursos pesqueros.

El Control Óptimo en Ecología.

El control óptimo aparece en ecología como una opción para casos en donde las condiciones son complejas, contando entre éstas a las siguientes: (1) cuando existen entradas y salidas múltiples, (2) restricciones en las variables de estado, de entrada o de control, (3) cuando los sistemas son estocásticos con parámetros que varían con el tiempo, y (4) en sistemas con retrasos en el tiempo o en el caso de sistemas con parámetros distribuidos (Cohen 1987).

El principal propósito de la administración o manejo de recursos es el de tomar buenas decisiones sujetas a restricciones realistas. Lo anterior conduce a un problema de optimización matemática. Dado que los ecosistemas son sistemas dinámicos, la herramienta apropiada para la formulación de estrategias óptimas es la teoría de control óptimo (Goh 1979).

Las decisiones de estrategias de control óptimo a partir de modelos analíticos, presuponen que dichos modelos simplificados, contienen en esencia, los mecanismos que gobiernan el sistema, por lo que se supone que esas

estrategias óptimas estén cerca del óptimo en la realidad (Hilborn 1979) hecho que a veces requiere de más fé que de razón (Cohen 1987).

El Problema Fundamental del Control Optimo.

El problema fundamental del control óptimo se define así: dada una ecuación que describe el estado de un sistema y un conjunto de condiciones de frontera en las variables de estado a tiempos iniciales y finales, determinar controles admisibles de tal forma que el índice (escalar) de funcionamiento del sistema (función objetivo que contiene tanto las variables de estado como los controles) bajo un horizonte de tiempo, sea minimizado o maximizado. De existir dichos controles, se denominan de control óptimo (Clark 1976, 1985).

Los enfoques teóricos al diseño de sistemas de control óptimo han utilizado el cálculo de variación, el principio del valor máximo (Clark 1976), la programación dinámica (Watt 1968, Hilborn et al. 1976, Walters 1981, Smith y Walters 1981 y Charles y Reed 1985) y la programación matemática, sin embargo para los problemas más triviales, las soluciones más sencillas a través del cálculo, son casi imposibles considerandose las soluciones numéricas de alto grado de dificultad. El principio del valor máximo tambien nos lleva a problemas de tipo analítico y numérico. La programación dinámica es una alternativa atractiva, pero requiere excesiva capacidad de memoria de computación, restringiéndose a

sistemas pequeños de pocas variables (Clark 1985). La programación matemática, trata con restricciones en desigualdades a costos bajos de memoria computacional, maneja bien los sistemas no lineales en sistemas grandes, por lo que se piensa que es el método más atractivo para solucionar problemas de control óptimo. Sin embargo, presenta problemas cuando existen funciones no-lineales, no-convexas (Tabak y Fuo 1971, citado por Goh 1979 y Cohen 1987). Asimismo tiene desventajas similares a la simulación, ya que son difíciles de derivar conclusiones generales, siendo particulares las soluciones existentes.

Aplicación de la Teoría de Control Óptimo a la Administración de Recursos Pesqueros.

Según Cohen (1987), la teoría de pesca óptima de poblaciones monoespecíficas, está bien desarrollada, existiendo soluciones para el modelo logístico (Goh 1969 y 1970, Clark 1973, Cliff y Vincent 1973), el modelo parentela progenie sin generaciones superpuestas (Moran 1950, Ricker 1954; Hassel 1975; Goh y Agnew 1978), el modelo de Beverton y Holt (Beverton y Holt 1957 y Clark 1976), así como para pesquerías de estacionalidad limitada (Clark 1976, y Goh 1979) y pesquerías con retraso en el reclutamiento (Clark 1976b).

La opción entre el uso de modelos en tiempo continuo y tiempo discreto es a menudo plantada como un problema de definición entre uno u otro tipo de modelación. Lo anterior es desafortunado desde que modelos mixtos o de ecuaciones

mixtas (Watt 1968), son de extremada utilidad. Sobre todo en el caso de poblaciones de peces en las que se presentan algunos eventos (reproducción) que ocurren estacional o anualmente, mientras que otros (mortalidad natural o por pesca) se presentan continuamente (Clark 1976, 1985). Para fines de claridad en la exposición, se presentan como dos estrategias para abordar estos problemas.

Modelos continuos.

Los modelos continuos son generalmente descritos por ecuaciones diferenciales de primer orden (Goh 1979), con dos variables de las que una es la de control teniendo en los casos más complejos, retraso en el tiempo. Cuando la variable de control es lineal dentro de la función objetivo, la solución de control óptimo es de "bang-bang" (Manetsh 1985) o singular (Clark 1976). La primera se refiere a una solución que hace que el control oscile entre dos valores, el máximo y el mínimo. El segundo caso se presenta cuando el criterio de optimización es igual a cero.

Estas soluciones normalmente consideran un horizonte temporal finito o infinito. Para que exista optimalidad en el largo plazo, la condición de punto focal debe ser satisfecha. Cuando el horizonte de tiempo es infinito, la función objetivo (índice o criterio de funcionamiento) se convierte en infinita. Para solucionar este problema, se puede introducir un factor de descuento (Clark 1985), se puede hacer un cambio en la temporalidad, iniciando con un horizonte finito que cambia a infinito en el tiempo terminal

o puede minimizarse una función objetivo promedio.

Cliff y Vincent (1973) demuestran que para una población que tiene un comportamiento logístico, la administración pesquera vía la regulación del esfuerzo, da como resultante una pesquería estable, no siendo así cuando se regula por medio de la cuota de pesca.

Por otra parte Goh (1979), para la misma población bajo condiciones estacionarias encuentra la solución óptima para la densidad y la tasa de extracción, misma que es $N^* = K/2$, y $u^* = rK/4$ (Donde N^* es la densidad de la población, u^* es la tasa de extracción o captura, r es la tasa intrínseca de crecimiento poblacional y K es la capacidad de porte del sistema). Al llevar a cabo análisis de estabilidad se percata de que: (1) cuando se aplica una estrategia de extracción constante equivalente al rendimiento máximo sostenible $u^* = rK/4$, se obtiene un equilibrio inestable, (2) que cuando $u_{\max} > rk/4$, el control oscila entre 0 y $u_{\max}$ y (3) cuando $u_{\max} < rk/4$, la estrategia óptima da como resultado una densidad poblacional estable o inestable dependiendo de las condiciones iniciales. Este autor sugiere que es mejor la utilización de una estrategia de esfuerzo constante $v = r/2$ en cuyo caso el modelo es globalmente estable.

A partir del modelo de Beverton y Holt (1957) definido en términos del valor presente de los retornos netos, Clark (1976) deriva por medio de optimización dinámica, valores óptimos de la mortalidad por pesca que maximizan el valor presente, tanto para una como para varias cohortes de peces.

Los límites óptimos de tallas para el modelo de Beverton y Holt (1957), fueron derivados por Goh (1980a), dependiendo la solución de la función de crecimiento y de la mortalidad natural.

Modelos discretos.

Ante los problemas que presentan las ecuaciones diferenciales para modelar realmente un ecosistema, las ecuaciones en diferencia se han presentado como una alternativa, siendo la teoría de control óptimo en tiempo discreto el procedimiento que nos brinda estrategias óptimas para la administración de un ecosistema representado por ecuaciones en diferencia (Goh 1979 y Singh 1979).

Para muchos estudiosos de la teoría de control de la década de los 60's ha sido obvio que el problema del control óptimo en tiempo discreto es un problema de programación no lineal con una estructura especial (Clark 1976). Desafortunadamente bajo este enfoque un problema de control óptimo de bajo orden, con un horizonte de planeación amplio, se ha convertido en un problema de programación no lineal con muchas variables, llevando lo anterior a un gran número de dificultades computacionales (Goh 1979).

Los modelos discretos tienen las siguientes ventajas sobre los modelos continuos: (1) el hecho de que muchas poblaciones se reproducen en intervalos discretos de tiempo y algunas con generaciones que no se superponen, (2) que la manipulación de las poblaciones es normalmente estacional y por consiguiente representable por eventos discretos, (3) que

muchas poblaciones involucran retrasos en el tiempo en su dinámica lo que presenta problemas para la solución a través de la optimización en tiempo continuo (Goh 1979), (4) que los algoritmos para resolver estos problemas de control óptimo son discretos, (5) que la programación matemática y los problemas de control óptimo en tiempo discreto son similares, (6) que los problemas de control singular poseen poca dificultad en tiempo discreto y que las anomalías pueden ser resueltas utilizando dos o más unidades de tiempo.

Las principales desventajas de los modelos discretos son las siguientes (Cohen 1987): (1) que la teoría sobre regiones finitas de atracción y estabilidad global es limitada, (2) la dificultad para construir funciones de Liapunov para tales modelos y que los modelos que utilizan ecuaciones diferenciales son normalmente más reveladores y menos complejos para poblaciones con generaciones que se superponen (Nisbet y Gurney 1982, citado por Cohen 1987).

Clark (1976), hace uso del principio del valor máximo para derivar una fórmula que encuentra soluciones óptimas de equilibrio a través de un modelo pesquero no lineal en tiempo discreto en cuya función objetivo están presentes los retornos netos, bajo un horizonte de tiempo infinito.

Goh (1979) optimiza el modelo de Beverton y Holt (1957) en tiempo discreto considerando que se podía explotar cada clase anual por separado. Sus resultados indican que la estrategia óptima es la que especifica el tamaño mínimo óptimo, mismo que representa la longitud a la edad óptima,

maximizando a su vez el rendimiento bajo esfuerzo fijo.

A través de esta modelación Goh (1980a) demuestra que cuando la estrategia de captura es de cuota constante, el rendimiento máximo sostenible es inestable y cuando es una fracción constante, el índice es localmente estable. Asimismo Clark (1976b) y Goh (1980a) derivan soluciones óptimas estacionarias que maximizan el rendimiento cuando los individuos de las poblaciones tardan varios años en alcanzar la madurez sexual.

Otras aplicaciones.

Poco se conoce acerca de estrategias pesqueras óptimas en modelos que incorporan la estructura de edades. La forma tradicional ha sido a través del modelo de la matriz de Leslie, sin embargo algunos autores (Beddington y Taylor 1973 y Mendelsohn 1976 citados por Clark 1976), creen que su valor es limitado.

Parece ser que cuando hay consideraciones individuales respecto a la estructura de edades que son incluidas en los modelos de pesca tradicionales, la estrategia óptima es diferente. Siendo ésta la pesca a pulsos cuando no hay selectividad y la captura constante bajo selectividad (Clark 1976).

Hilborn (1979) por medio de simulación, compara 7 formas de estimación paramétrica del modelo de Shaefer (1954), utilizando el modelo original en forma discreta y la modificación de Schnute para forma continua. Utiliza dos poblaciones con distinta estrategia de crecimiento bajo 3

escenarios de control (limitación de esfuerzo de retroalimentación, control de cuota y esfuerzo de equilibrio). Sus resultados indican que en general las formas de estimación fallan en proveer estimaciones razonables del sistema, atribuyendo la falla al insuficiente contraste de las variables independientes en la estimación del esfuerzo y la captura por unidad de esfuerzo. Nota que es preferible aplicar esfuerzo de equilibrio que una estrategia "bang-bang". Asimismo indica que la cuota es peligrosa cuando la población ha estado sujeta a fuerte explotación con parámetros inciertos, de otra forma produce resultados similares a la regulación del esfuerzo.

Shepherd y Garrod (1980), modelan la respuesta de la flota pesquera inglesa ante circunstancias cambiantes por medio de un modelo cauto de optimización no lineal, mismo que a partir de información de capturas, del valor de la misma y de información de esfuerzo, de biomasa y de las cuotas de captura, así como de ponderaciones que indican sus preferencias, asigna número óptimo de barcos por categoría.

Goh (1980a) argumenta que para especies con alta fecundidad y grandes fluctuaciones en el reclutamiento, los modelos determinísticos de parentela-progenie deben ser abandonados, no justificándose el regreso a éstos después de haber usado modelos estocásticos realistas. Además, de que el concepto de rendimiento máximo sostenible ya no es válido, siendo la mejor estrategia, el seguir una serie de lineamientos cuyo objetivo sea el prevenir el colapso de las

pesquerías. Para una estrategia óptima que maximice la biomasa, estos lineamientos definen el tamaño límite óptimo. Este enfoque admite la inexistencia de la dinámica de la población de peces a largo plazo. Por otro lado, para especies de baja fecundidad (ballenas), cuando la población es grande, dado que la relación entre fecundidad y parentela está bien definida, se pueden usar modelos de población determinísticos y las herramientas de la teoría de control óptimo pueden ser aplicados para derivar estrategias de control óptimas.

Walters (1981) utiliza programación dinámica estocástica para determinar estrategias de control óptimo tomando en cuenta incertidumbre en los parámetros modelados de un modelo parentela-progenie, sugiriendo que éstas pueden implicar pruebas activas o experimentación.

La idea de que se puede comparar el funcionamiento de estrategias adaptativas, en la maximización del rendimiento pesquero a largo plazo, frente a la incertidumbre en la dinámica de una población representada por un modelo parentela-progenie, lleva a Smith y Walters (1981) a desarrollar un rango de estrategias adaptativas apoyados en la teoría de control óptima estocástica.

El desarrollo de un modelo bioeconómico para determinar la óptima ubicación de captura de dos flotas que pescan un recurso secuencialmente ha sido llevado a cabo por Charles y Reed (1985). Por medio de programación dinámica y con apoyo del principio máximo discreto, optimizan un modelo de la

pesquería de salmón (representado por el valor presente de los retornos netos), encontrando expresiones para la población óptima y los niveles de escape en equilibrio en las áreas de operación de ambas flotas, mostrando que los niveles óptimos de escape por área, determinan para cada flota la estrategia social óptima. Que la exclusión o coexistencia competitiva de las flotas depende de los precios relativos de los recursos extraídos por ambas y de la composición de la estructura de edades de estos recursos. Discuten como a través de la regulación pesquera se puede optimizar la explotación en este tipo de pesquería bajo la condición de acceso abierto.

Ludwig y Walters (1985) comparan dos procedimientos para estimar esfuerzo de pesca óptimo por medio de simulación: una sencilla y la otra mas realista y elaborada, encontrando que la forma simple por lo general presenta iguales o mejores resultados que la forma realista. Sugieren que la mejor opción depende del grado de contraste en los datos históricos de los datos de captura y esfuerzo más que del conocimiento previo de que estructura de modelo es biológicamente más realista.

Bjorndal (1988), desarrolla el tema del manejo óptimo del arenque del mar del norte a través del uso de un modelo bioeconómico dinámico en tiempo discreto, siendo el objetivo la maximización de los retornos netos sujetos a cambios en la población y contando con la pesca como variable de control. Estima el nivel óptimo de la población y la forma de arribar

a él, mostrando que el acceso abierto puede causar extinción en la población.

Teoría del Bienestar Económico y su Importancia en Pesquerías.

Hannesson (1978) establece que en "una pesquería en la que exista acceso abierto en equilibrio se puede extraer una cantidad determinada de pescado a costos diferenciales de extracción, algunas veces bajos, otras altos. Presentándose en este último caso, un desperdicio de recursos productivos". Sugiere que ante ésto, otro tipo de situación diferente al acceso abierto sería preferible. Es en este contexto en el que la Teoría del Bienestar se presenta intentando proveer de un marco de referencia para la evaluación de estrategias alternativas de administración de recursos pesqueros.

Dentro de este marco uno de los criterios propuestos para evaluar el funcionamiento del mercado ha sido la eficiencia económica. Existen sin embargo otros criterios como el máximo bienestar social, el acercamiento a partes proporcionales, el del máximo valor del producto social y otros mas é incluso combinaciones de ellos (Randall 1981).

El concepto de Pareto-Optimalidad.

El postulado básico de la teoría del bienestar en el caso de la pesca es que la maximización del bienestar social es el objetivo final de la política pesquera (Hannesson 1978). Es una condición en la que la sociedad alcanza su máximo bienestar, dada una base de recursos naturales (en este caso los pesqueros), su tecnología (de captura y transformación) y los gustos y preferencias de sus miembros.

En un sentido general, el bienestar social es de alguna forma la suma del bienestar de los individuos que componen la sociedad, siendo un elemento importante de ese bienestar individual, la satisfacción o utilidad derivados del consumo de bienes y servicios (Hannesson 1978).

El postulado básico de la teoría económica acerca del comportamiento del consumidor es que cada individuo utiliza su presupuesto para maximizar su utilidad o satisfacción. Sin embargo, si la utilidad individual es un concepto subjetivo y poco medible, ¿cómo podría ser maximizada?

Problemas fundamentales se han presentado cuando se trata de hacer algún tipo de maximización del bienestar social. Primero en lo relacionado con la subjetividad de la utilidad o satisfacción y posteriormente si de alguna forma se diera el caso de que se pudiera cuantificar, los resultados de la maximización de la suma de utilidades serían altamente controvertidos (Hannesson 1978).

Es ante este tipo de problemas que el concepto Pareto-Optimo es relevante. Si fuera posible redistribuir bienes y servicios y alterar los programas de producción en la economía costera sin restricción alguna en los costos considerando cambios en la distribución de bienes o en los programas de producción, se dice que un cambio satisface el criterio de Pareto de aumento del bienestar social, si permite aumentar el nivel de utilidad de alguien, sin disminuir el nivel de utilidad de otro. Cuando las posibilidades de hacer dichos cambios se han agotado, se dice

que la economía ha llegado a un estado Pareto-Optimo. Este concepto es el fundamento de 'la Teoría Neoclásica del Bienestar Económico' (Seijo com. pers.).

La relevancia de este concepto radica en que para que exista una distribución aceptable de utilidades entre individuos, la situación debe mejorarse de tal forma que la mejoría de un individuo no implique el empeoramiento de otro. Por lo anterior Hanneesson (1978) sostiene que una condición de Pareto-Optimalidad, identifica cual es la ubicación eficiente de recursos en áreas en las que la opción entre una multitud de alternativas es política.

Condiciones necesarias y suficientes para llegar a un nivel de bienestar Pareto-Optimo.

Las condiciones necesarias son las siguientes:

- (1) Que exista eficiencia en la producción.

Se presenta cuando la tasa marginal de sustitución entre el trabajo y el capital para producir el bien X es igual a la tasa marginal de sustitución entre el trabajo y el capital para producir el bien Y, e igual al cociente de precios relativos entre el trabajo y el capital para todas las firmas.

$$(TMST_{L,K})_X = (TMST_{L,K})_Y = P_L/P_K \quad (1)$$

Donde:

TMSTC es la tasa marginal de sustitución.

L es el Trabajo invertido para producir.

K es el capital invertido para producir un bien.

X es el bien X.

Y es el bien Y.

P_L es el precio del trabajo.

P_K es el precio del capital.

(2) Que exista mezcla eficiente de productos.

La tasa marginal de transformación de productos de cualquier par de bienes debe ser igual para cada firma que los produce, e igual al cociente de los precios de los bienes.

$$(TMTP_{X,Y})_1 = (TMTP_{X,Y})_2 = P_X/P_Y \quad (2)$$

Donde:

TMTP es la tasa marginal de transformación de productos.

X es el bien X.

Y es el bien Y.

1 firma 1.

2 firma 2.

P_X es el precio del bien X.

P_Y es el precio del bien Y.

(3) Eficiencia en el consumo.

Se obtiene cuando la tasa marginal de sustitución para consumir X y Y bienes por la persona a, es igual a la tasa marginal de sustitución para consumir los mismos bienes por la persona b y al cociente de precios relativos entre X y Y.

$$(TMSC_{X,Y})_A = (TMSC_{X,Y})_B = P_X/P_Y \quad (3)$$

Donde:

TMSC es la tasa marginal de sustitución en el consumo de productos.

X es el bien X.

Y es el bien Y.

A consumidor 1.

B consumidor 2.

P_x es el precio del bien X.

P_y es el precio del bien Y.

(4) Combinación óptima de bienes.

Al combinar las condiciones 2 y 3 se obtiene esta última condición. En este caso la tasa marginal de sustitución para cualquier par de bienes debe ser igual para todos los consumidores e igual a la tasa marginal de transformación de los mismos dos bienes para todas las firmas, e igual al cociente de precios de los bienes.

$$(TMSC_{x,y})_A = \dots = (TMTP_{x,y})_1 = \dots = P_x/P_y \quad (4)$$

La condición suficiente se refiere a que todas las isocuantas y las curvas de indiferencia no deberan ser concavas en los rangos relevantes.

Supuestos que sustentan una condicion Pareto-Optima.

Los supuestos en los que se apoya el planteamiento anterior son:

- (1) Los precios se determinan en competencia perfecta.
- (2) Las partes en las transacciones aseguran todos sus beneficios y pagan todos sus costos, por lo que no

existen externalidades.

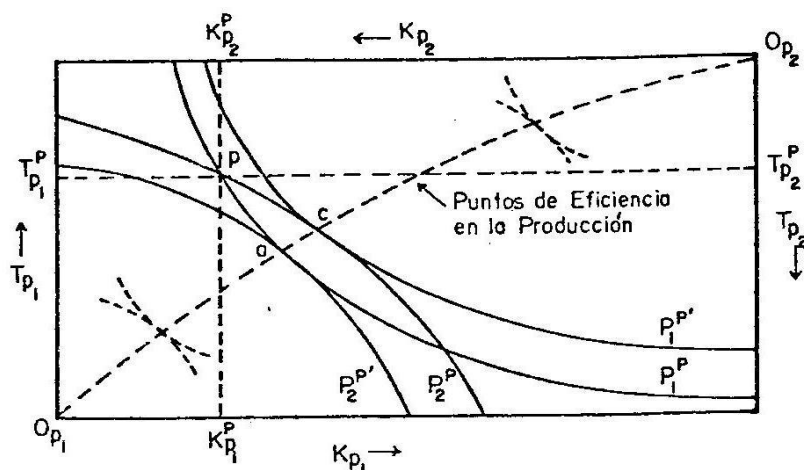
- (3) La distribución es irrelevante. Un punto en la curva de utilidad global es tan eficiente como cualquier otro.
- (4) Los agentes económicos son los jueces del bienestar y por lo tanto, los valores que ellos asignan a sus bienes y a sus recursos son los únicos que cuentan.
- (5) El bienestar de la sociedad es la suma del bienestar de cada individuo.

Derivación de eficiencia a partir de conceptos gráficos.

Para presentar con mayor claridad la exposición, y arribar al objetivo que en principio es definir el concepto de eficiencia como es entendido en la teoría económica del bienestar, se hace necesario plantear como se derivan algunos términos. Tratamientos especializados y de mucho detalle se pueden encontrar en los trabajos de Hannesson (1978) y Randall (1981).

La curva de posibilidades de producción se deriva cuando se obtiene un grafico con todos los puntos de la curva de eficiencia en la producción desde su espacio de insumos, hacia su espacio de bienes o productos. (Figuras 3 y 4)

La curva de posibilidades de utilidad, se obtiene de graficar la curva de eficiencia en el consumo de su espacio de productos -enmarcada por la curva de posibilidades en la producción- en su espacio de utilidad. (Figuras 5, 6, 7 y 8).



T_{P1} y K_{P1} Trabajo y Capital para producir $P1$
 T_{P2} y K_{P2} Trabajo y capital para producir $P2$
 $P1^P$ Es la isocuenta de pescado 1 que pasa por P
 $P2^P$ Es la isocuenta de pescado 2 que pasa por P
 O_{P1} y O_{P2} Origenes de pescado 1 y pescado 2
 a y c son puntos de combinaciones de pescado 1 y
 pescado 2 mas eficientes que la combinación en P

Figura 3 El contenido de información de una Caja de Producción de Edgeworth y la derivación de los Puntos de Eficiencia en la Producción. (Randall 1981)

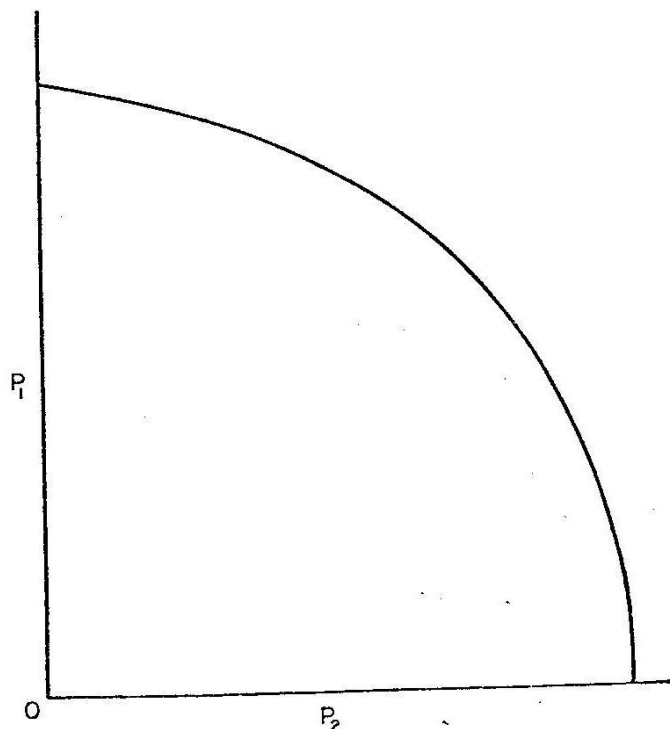


Figura 4 Curva de posibilidades de producción. Randall(1981).
 $P1$ es la cantidad de pescado 1 producido
 $P2$ es la cantidad de pescado 2 producido.

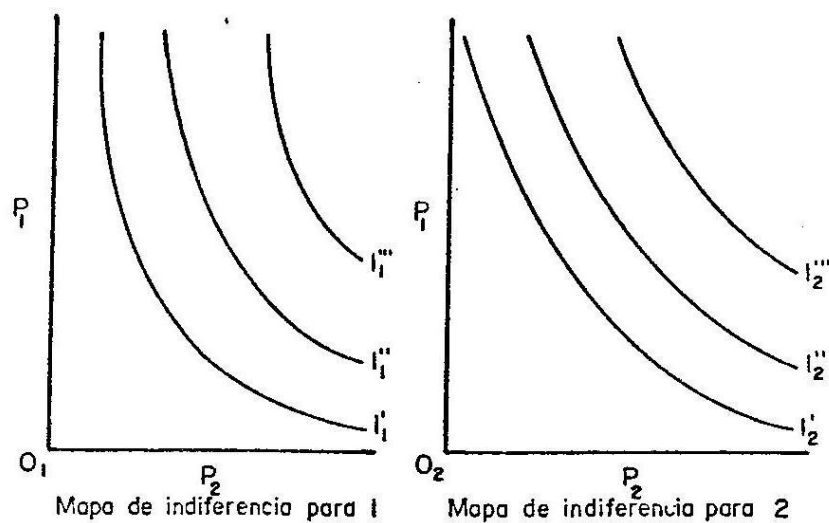


Figura 5 Mapas de indiferencia de dos individuos en el consumo de dos pescados producidos. Randall (1981).

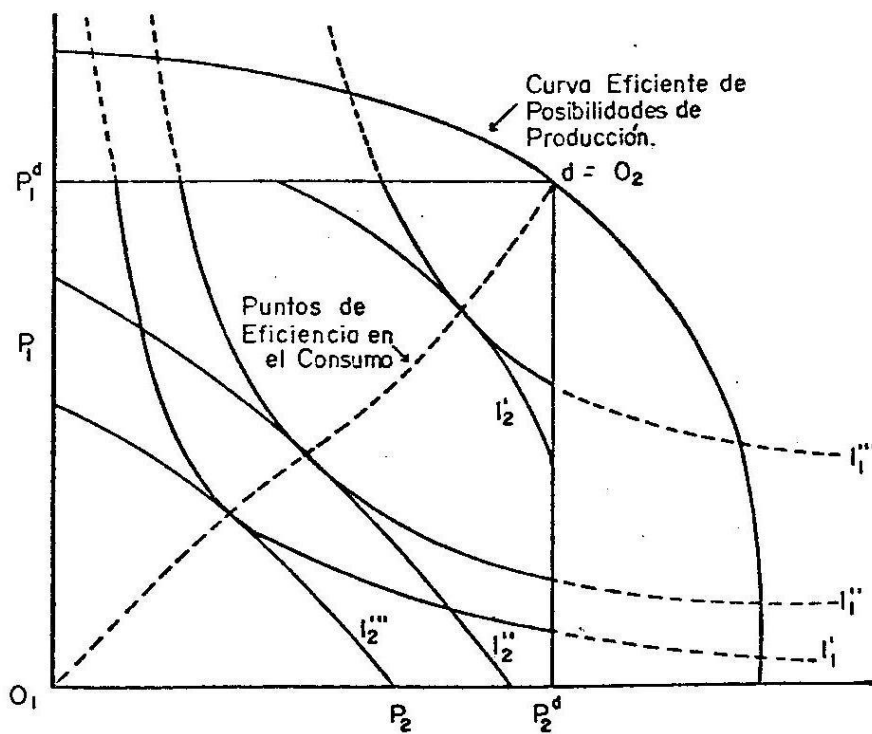


Figura 6 Derivación de la curva de eficiencia en el consumo. Tomada de Randall (1981).

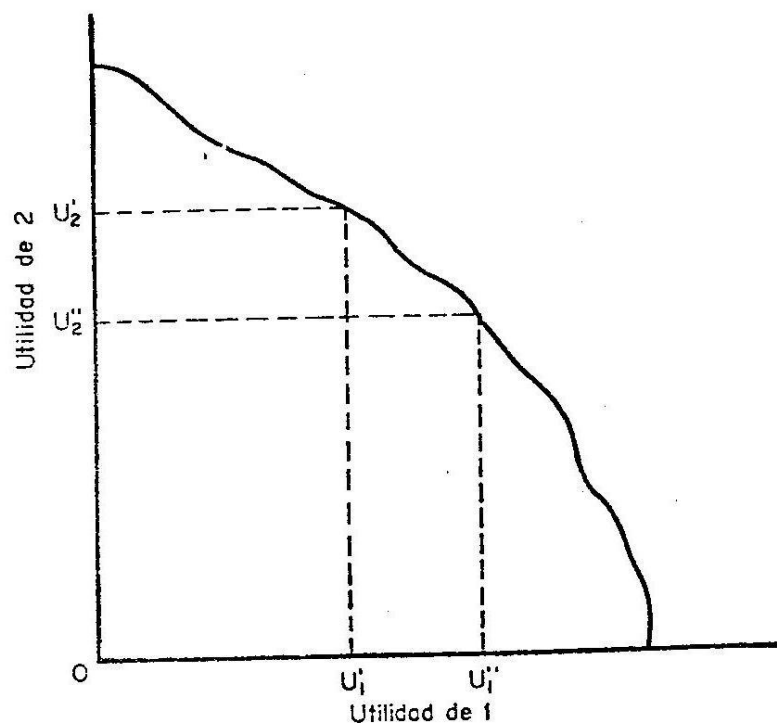


Figura 7 Curva de posibilidades de utilidad dada la mezcla de productos P_1^d y P_2^d . Tomada de Randall (1981).

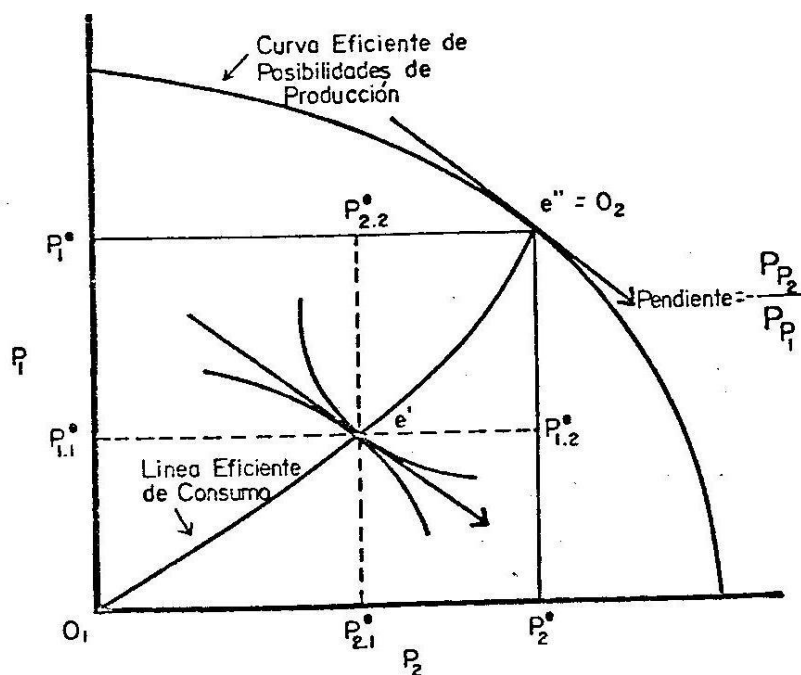


Figura 8 Mezcla eficiente de productos, distribución de bienes y tasas de precios de los bienes. Randall (1981).

Cuando todos los posibles puntos de la curva de posibilidades de producción son considerados, se generan un número infinito de curvas de posibilidades de utilidad.

La línea que une los segmentos mas alejados del origen de este número infinito de curvas de posibilidades de utilidad se denomina curva de utilidad global (Figura 9), misma que es pareto eficiente u óptima en todos sus puntos ya que:

- (1) Elimina todos los puntos que no caen en la curva de eficiencia en la producción.
- (2) Elimina todas las distribuciones de bienes que no caen en la curva de eficiencia en el consumo.
- (3) Elimina todos los segmentos de la curva de eficiencia en el consumo que no caen en la curva de utilidad global.

Por lo que:

- (i) En cualquier punto de la curva de utilidad global, es imposible reorganizar la economía de tal forma que un individuo mejore sin hacer que simultáneamente otro empeore.
- (ii) En cualquier punto de la curva de utilidad global, existirá una única y eficiente ubicación de recursos, de mezcla de productos, de distribución de bienes y de cocientes de precios.
- (iii) Cualquier punto no solo es eficiente sino Pareto eficiente o Pareto óptimo de acuerdo a las condiciones necesarias y suficientes para arribar a

ese estado mencionadas anteriormente.

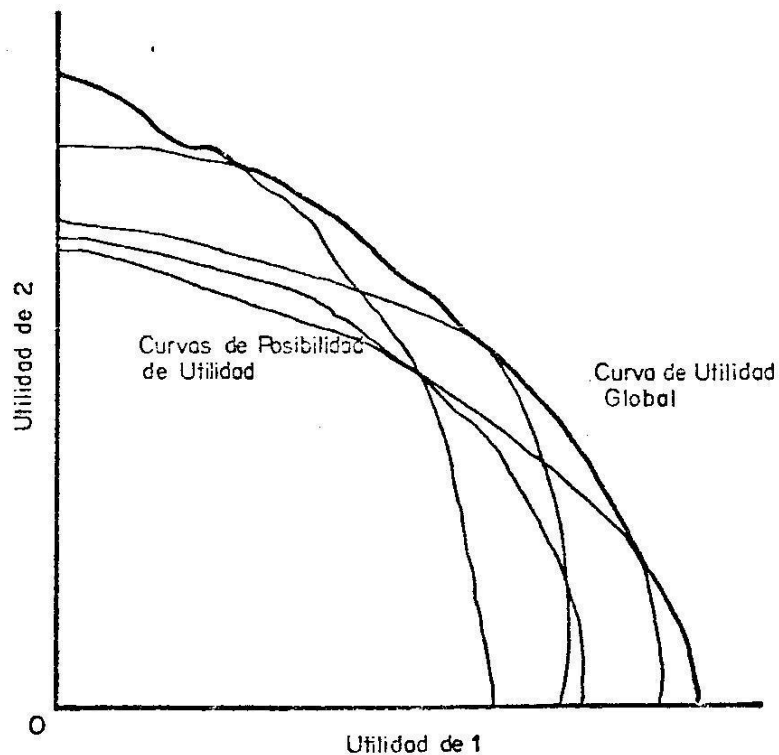


Figura 9 Curvas de posibilidades de utilidad y la Curva de utilidad global. Tomado de Randall (1981).

Es a partir de la obtención de esta curva que se puede conocer lo relacionado al máximo bienestar social y las formas de arribar a él.

Máximo Bienestar Social.

De existir una función de bienestar social que considere que de alguna manera se puede desarrollar consenso en la sociedad de como la utilidad, satisfacción o beneficios se pueden distribuir entre los individuos, expresando la función este consenso, se puede construir un mapa de indiferencia social expresado en ejes de utilidad. Este mapa reflejará las preferencias de la sociedad (Figura 10).

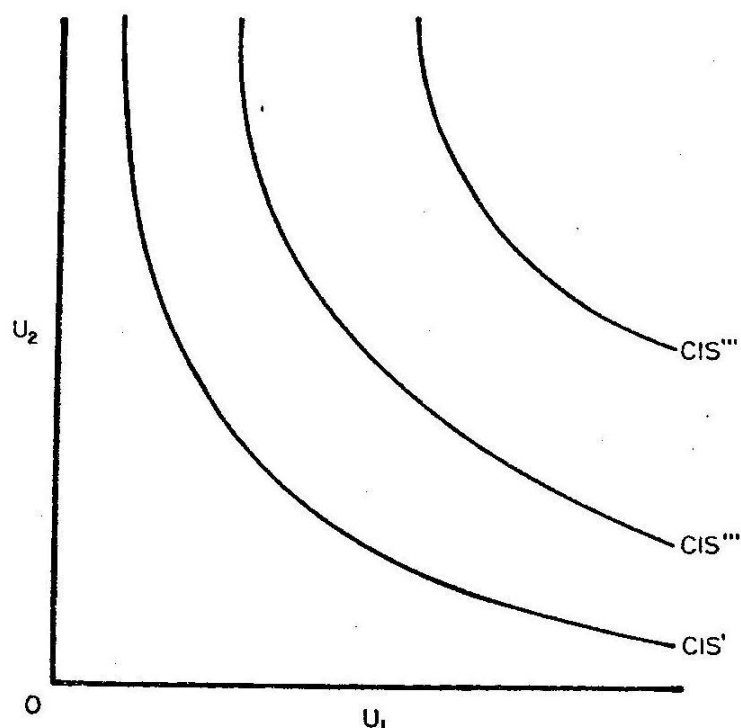


Figura 10 Mapa de indiferencia social para 2 individuos expresado en ejes de utilidad. Randall (1981).

Si sobreponemos este mapa a la curva de utilidad global, el punto tangente entre esta curva y una curva de indiferencia social, será el punto de máximo bienestar social (Figura 11).

Condiciones Necesarias y Suficientes para arribar al
Máximo Bienestar Social.

Dos son las condiciones necesarias, la primera relacionada con la existencia de pareto eficiencia. La segunda con la existencia de un punto tangente entre la curva de utilidad global y la curva de indiferencia social. La condición suficiente radica en la existencia de una única tangente verdadera entre la curva global de utilidad y la curva de indiferencia social.

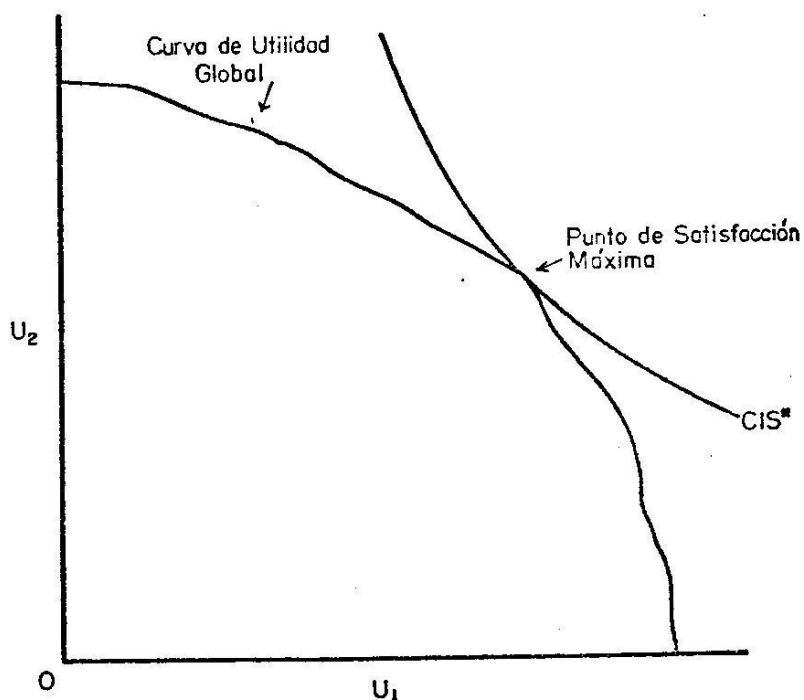


Figura 11 El máximo bienestar social para dos individuos expresado en ejes de utilidad. Randall (1981).

Kenneth Arrow, premio nobel en economía, ha desarrollado una prueba matemática en la que plantea que una función de bienestar social no puede existir en una sociedad democrática (Randall 1981). Seijo (com. pers.) plantea que la existencia de dicha función, depende del tamaño del grupo social del que se intente inferir.

Ante la posible inexistencia de la función de bienestar social, misma que nos ayudaría a identificar el máximo bienestar social, se hace necesario revisar algunos de los criterios de política económica para arribar a niveles sociales deseados de bienestar.

Teoría Normativa de Análisis de Recursos Pesqueros.

Dado de que la curva de utilidad global presenta un número infinito de soluciones pareto-eficientes, se presenta como el punto de partida para la derivación de criterios de política pesquera. Sin embargo, para fines del análisis, se hace necesario cambiar los ejes de la curva de utilidad global, esto es, la variable utilidad por la de ingreso, mismo que es mas relevante en el mundo real.

Eficiencia como criterio.

Es a través de este criterio que se elimina la ineficiencia (desperdicio), sin presentar elementos para juzgar entre soluciones alternativas también eficientes. Este criterio por lo tanto no resuelve la condición de pareto eficiencia, al intentar acercarse a la curva de utilidad global a toda costa, pudiendo presentarse el hecho de que la mejoría de un pescador sea en perjuicio de otro (Figura 12).

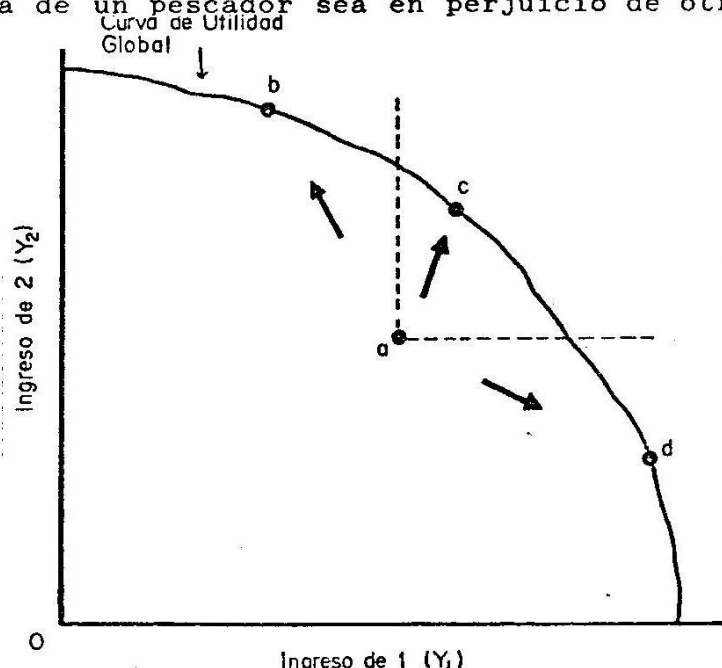


Figura 12 Eficiencia como criterio. Tomado de Randall (1981).

La limitación de este criterio es que parte de la dotación inicial de riqueza y en consecuencia promueve el status quo.

Acercamiento a partes proporcionales constantes.

Este criterio hace que el acercamiento hacia la curva de utilidad global se presente a partir de el ingreso inicial de cada pescador a partes proporcionales constantes. Este criterio, permite encontrar soluciones que benefician a todos simultáneamente, no permitiendo el daño económico. Sin embargo el hecho de que se parta de la dotación inicial hace que unos tengan mayores beneficios que otros, por lo que se dice que no es neutral en cuanto a la distribución del ingreso; no permitiendo que los pescadores que cuentan con una muy mala dotación inicial, mejoren sustancialmente como resultado de las estrategias utilizadas (Figura 13).

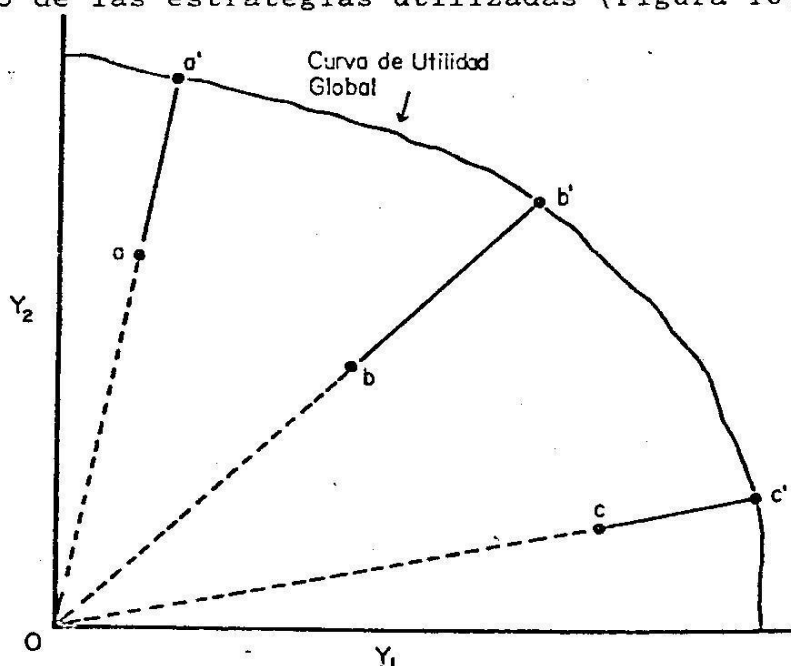
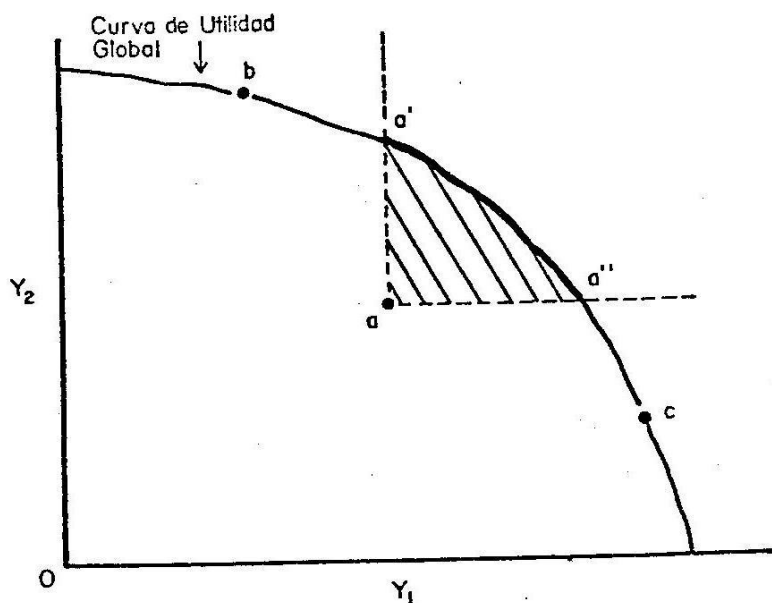


Figura 13 Partes proporcionales constantes. Dada una dotación inicial a , b y c ; moverse hacia la curva de utilidad global implica mejoría. Randall (1981).

Pareto-seguridad.

Este criterio presenta como una mejoría cualquier cambio que incremente el ingreso de al menos un pescador, sin reducir o perjudicar el de otros. Normalmente es la región noreste del gráfico donde la condición se presenta y su correspondiente segmento de la curva de utilidad global (Figura 14). Se piensa que una estrategia implica una mejoría, si resulta en un movimiento dentro de la región hacia la curva de utilidad global. Este criterio, al menos parcialmente, maneja y refuerza patrones pasados de deterioro económico.



- Figura 14 Pareto Seguridad. Dada una dotación inicial a , moverse hacia el segmento de la CUG dentro de la región sombreada permite mejoría de al menos un individuo sin perjuicio de otro. Randall (1981).

Máximo bienestar social.

Se presenta al sobreponer a la gráfica en la que se presenta la curva de utilidad global, las curvas de indiferencia social, delimitando la zona comprendida entre la tangente y la secante formada por las curvas de indiferencia social con la curva de utilidad global (Figura 15). El óptimo se presenta cuando hay movimiento dentro de la zona hacia el punto en el que las dos curvas son tangentes. Este criterio permite deterioro económico, pero dentro de los límites marcados por la curva de indiferencia social. El deterioro económico de los pescadores es permitido en tanto que la acción represente una mejoría en el bienestar social. En el discurso de política pesquera, muchas veces el concepto interés público intenta reflejar la noción de función de bienestar.

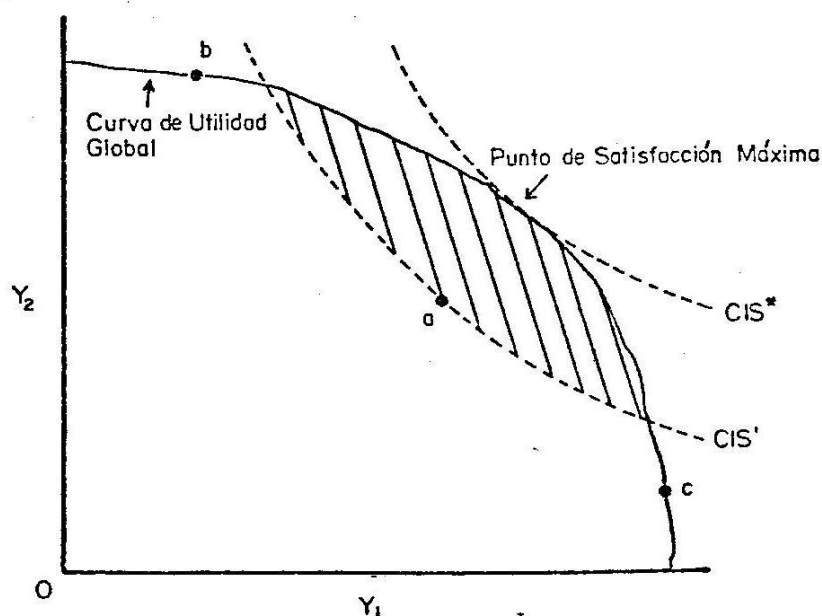


Figura 15 Máximo Bienestar Social. La dotación inicial es a .
Tomada de Randall (1981).

Máximo valor del producto social.

Con este criterio, se trata de maximizar el bienestar de la sociedad. Se presenta al sobreponer a la gráfica de la curva de utilidad global, las curvas de indiferencia social, delimitando la zona comprendida entre la tangente y la secante formada por las curvas de indiferencia social con la curva de utilidad global. Sin embargo en este caso, las curvas de indiferencia son rectas que unen los dos ejes, con pendiente -1 (Figura 16). Esta forma, valora igual al dinero independientemente de a quien se destine. Siendo preferida la política que resulte en el máximo del producto social. El óptimo se presenta cuando el acercamiento se ubica en el punto tangente entre las dos curvas.

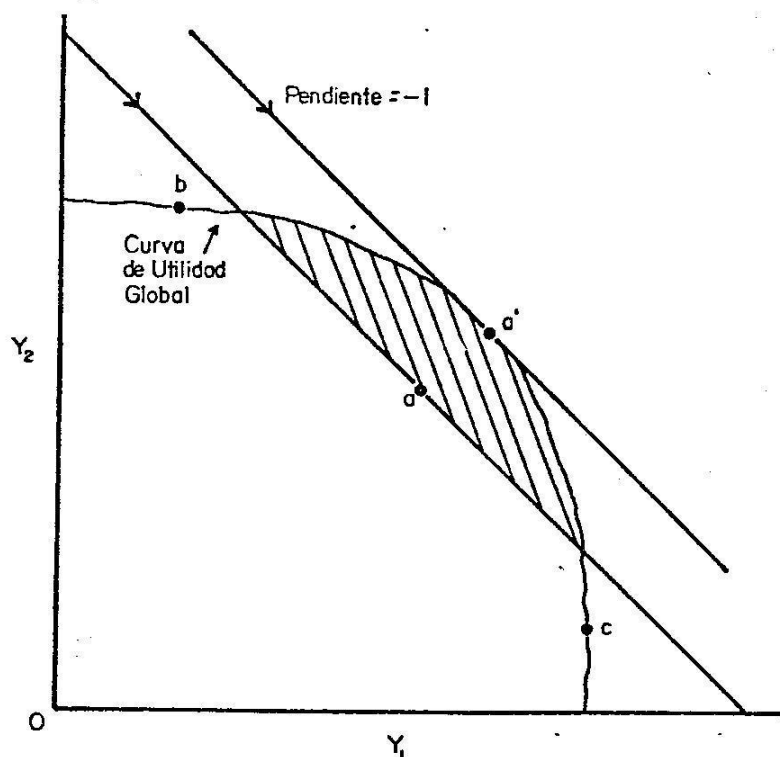


Figura 16 Máximo Valor del Producto Social. La dotación inicial es a . Tomada de Randall (1981).

Esta estrategia es neutral en cuanto a la distribución del ingreso y el deterioro económico es permisible en tanto la suma de los beneficios de los ganadores sea mayor que las pérdidas del resto de los que pescan.

Criterios compuestos (algunas posibilidades).

Ya que los criterios normativos anteriormente descritos, no son por si mismos completamente satisfactorios dado que hay objeciones de caracter ético, filosófico, pragmático o combinaciones de éstas, se ha sugerido el uso de criterios compuestos múltiples. Estando entre éstos, el valor máximo del producto social sujeto a pareto-seguridad para el pescador más pobre, o políticas de manejo de recursos que:

- (1) No reduzcan el valor máximo del producto social.
- (2) No incremente el ingreso del usuario del recurso de mayor ingreso.
- (3) Que hagan que la redistribución posible no exceda el punto de igualdad.
- (4) Que la política óptima sea aquella que al satisfacer las condiciones 1 a 3 nos de como resultado el nivel máximo del producto social (Figura 17).
- (5) Otros...

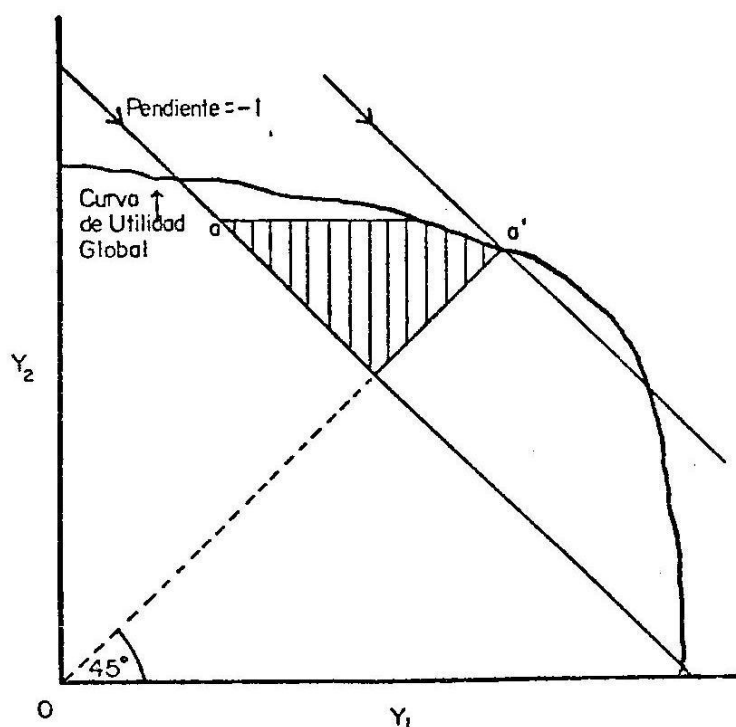


Figura 17 Criterio Compuesto. Tomado de Randall (1981).

La Ineficiencia en Pesquerías de Acceso Abierto.

Hannesson (1978) demuestra que, para una pesquería en la que existe acceso abierto, no se puede lograr eficiencia económica ya que se viola el cuarto principio de optimalidad. Este principio establece que la tasa marginal de sustitución en el consumo de dos bienes debe de ser igual a la tasa marginal de transformación de los mismos bienes lo que implica que el beneficio social marginal de la pesca deba ser igual al costo social marginal de la misma. En la pesquería, la primera tasa es el resultado del cociente entre el producto promedio del esfuerzo de pesca aplicado a la extracción de recurso y el producto marginal de ese esfuerzo cuando se usa para otros propósitos. La segunda es el

resultado del cociente entre el producto marginal del esfuerzo para pescar y el producto marginal del esfuerzo cuando se usa para otros propósitos distintos a la pesca. Dado que el producto promedio es mayor que el producto marginal, la consecuencia es que la tasa marginal de sustitución es mayor que la tasa marginal de transformación. Por lo tanto el costo social marginal de cualquier cantidad de pescado capturado será mayor que el precio de equilibrio que los consumidores estarían dispuestos a pagar por una oferta adicional de pescado, a excepción de cuando es negativo dada la existencia de sobreexplotación. La conclusión de lo anterior es que el acceso abierto en la pesquería es el culpable del fracaso del mercado debido a deseconomías externas, ya que los precios de mercado no indican a las firmas inmersas en este sector de la economía, como lograr una ubicación eficiente de recursos o por que se presenta competencia imperfecta posibilitando a un solo decisor influencia sobre el precio del mercado.

Es por todo lo anterior, que el estado juega un papel fundamental como administrador en la regulación de las pesquerías al ser el que define los derechos de propiedad y criterios de política económica y pesquera, mismos con los que a la luz de la Teoría Normativa de Análisis de Recursos, se puede tender hacia la eficiencia económica.

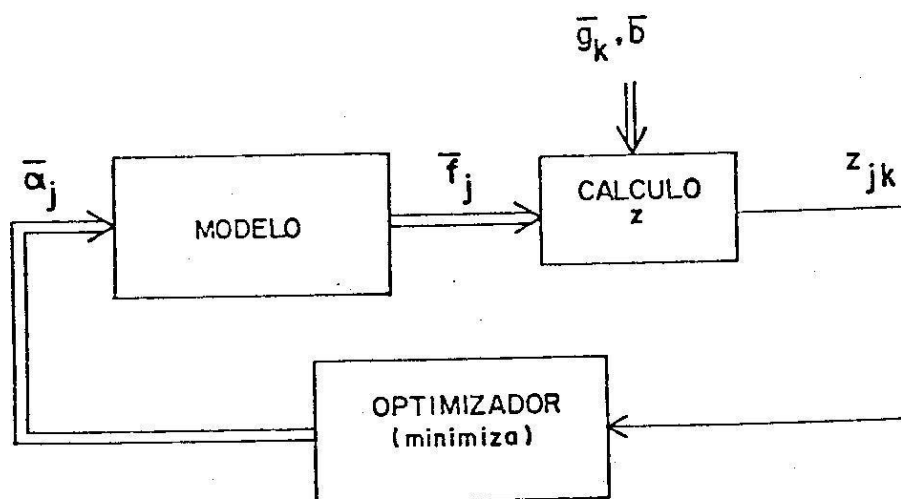
CAPITULO III

METODOS DE INVESTIGACION

La combinación óptima de estrategias de manejo en la pesquería del pulpo (*O. maya*), que satisfagan las preferencias preestablecidas por el administrador pesquero en las variables bioeconómicas del sistema, es un problema de control óptimo. Su solución se llevó a cabo de la siguiente manera:

Modelo General Conceptual.

Se utilizó un modelo general conceptual que acopla al modelo de la dinámica de la pesquería un modelo de optimización (Figura 18).



$$(\bar{\alpha}_j \rightarrow \bar{\alpha}_j^*), \quad (\bar{f}_j \rightarrow \bar{f}_j^*)$$

Figura 18 Diagrama de Bloques de la Optimización Iterativa Min-Max. (Según Manetsch 1985).

El modelo consta de tres grandes bloques. El primero es el modelo de la pesquería, el segundo es un apartado en el que se genera la función objetivo multicriterio y el tercero es el modelo de optimización que al incidir sobre la función objetivo genera la combinación óptima -óptimo global- de parámetros o estrategias de manejo de la pesquería.

El Modelo de la Pesquería o el Sistema Pesquero.

Seijo et al. (1987) y Seijo y Chapelle (1988) han modelado la pesquería del pulpo (*O. maya*) de la Plataforma Continental de Yucatán. El modelo es bioeconómico, holístico, diseñado bajo el enfoque de simulación de sistemas. Es un modelo dinámico, que representa los procesos de desove y eclosión, así como el ingreso a la pesquería de una flota artesanal y otra mecanizada o moderna por medio del método de retraso distribuido. La estructura de la población es modelada analizando la supervivencia de cohortes. Incluye funciones de producción no lineales estocásticas para ambas flotas. Finalmente generan ecuaciones de costos marginales dinámicas para ambas flotas, modelando también la incertidumbre inherente a la pesquería. El modelo permite analizar el impacto que diversas estrategias de manejo tienen en la biomasa del recurso, el rendimiento de la pesquería, los beneficios netos por tipo de flota, los empleos directos generados y la disponibilidad de alimento costero.

En este caso se seleccionaron como estrategias de manejo o parámetros de control, el tiempo de inicio de la temporada de pesca, el tamaño de la flota artesanal y el tamaño de la

flota moderna o mecanizada. Manetsch (1985) ha sugerido que estas estrategias sean escogidas sobre la base de la eficacia, elemento muy relacionado al concepto de control del sistema. Asimismo la factibilidad o accesibilidad para instrumentar una estrategia dada en el contexto del problema, es otro elemento que debe intervenir en la selección.

La evaluación del funcionamiento del sistema se llevó a cabo por medio de los siguientes criterios:

- (1) Biomasa acumulada en el año (toneladas).
- (2-4) Captura total y por tipo de flota acumulada en la temporada de pesca (toneladas).
- (5-6) Retornos netos por flota acumulados en la temporada (millones de pesos).
- (7) Empleos directos generados durante la temporada (número).
- (8) Contribución de la pesquería a la disponibilidad de alimento costero acumulado en la temporada de pesca (toneladas).

El modelo simula la dinámica de la pesquería al partir de la estructura de la población existente al final del año anterior, presentando resultados quincenales desde la primera quincena del año, terminando su operación en la quincena 23, correspondiente a el 15 de diciembre que es cuando termina la temporada de pesca. Lo anterior debido a que la longevidad de la especie es de aproximados 12 meses y que la temporalidad de la pesquería es de 4.5 meses, iniciándose ésta el primero de agosto y terminando el 15 de diciembre del mismo año.

La Función Objetivo y su Tratamiento.

Dado que hay mas de un criterio relevante para evaluar el funcionamiento de la pesquería, el proceso de optimización es inherentemente complejo. Aunado a lo anterior, los administradores pesqueros tienen que hacer balances entre criterios competitivos o conflictivos (biomasa, capturas, beneficios, empleo, disponibilidad de alimento, etc.) que hacen que existan contradicciones entre el funcionamiento de un sistema (pesquería) y el costo que tiene el situarlo en ese nivel de funcionamiento.

En esta situación la búsqueda de soluciones Pareto-óptimas ayuda a encontrar los mejores balances y compromisos posibles en este problema de decisión multicriterio. Con este propósito la estrategia de optimización "min-max" (Osyczka 1984) converge a soluciones Pareto-óptimas. Ahora bien Manetsch (1985) define que si existe un modelo M de un sistema, tal que:

$$\bar{f}_j(T) = M(\bar{a}_j, T) \quad (1 \leq j \leq J) \quad (5)$$

donde

$\bar{f}_j(T) \in E^n$ Es el vector de valores de salida del modelo correspondientes a la j -ésima estrategia evaluada sobre el horizonte temporal $(0, T)$.

$\bar{a}_j(T) \in E^n$ Es el vector de parámetros de decisión o control correspondientes a la j -ésima estrategia.

$(0, T)$ Es el horizonte de tiempo de interés.

Es posible acoplar al modelo anterior el optimizador "min-

max", obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Z_{ijk} = \frac{(g_{ik} - f_{ij})}{|b_i| I \text{ SGN}(g_{ik} - b_i)} \quad \begin{matrix} (1 \leq i \leq I) \\ (1 \leq j \leq J) \\ (1 \leq k \leq K) \end{matrix} \quad (6)$$

tal que

$$Z_{jk} = \text{MIN}(\text{MAX}_i(Z_{ijk})) \quad (7)$$

donde

g_{ik} Es el objetivo o valor de la i-esima variable deseada en el k-esimo conjunto de objetivos (g_k es el vector de valores que corresponden a el k-esimo conjunto de objetivos).

f_{ij} Es el valor de la i-esima variable de salida del modelo correspondiente a la j-esima estrategia.

b_i Es el valor en la corrida "base" de la i-esima variable.

La idea consiste en encontrar $\bar{a}_j^*$, que es el vector de parámetros de control que resulta al encontrar los óptimos "min-max" Z_{jk}^* y $\bar{f}_j^*$.

La variable Z_{ijk} representa la desviación normalizada -por su base- del valor de la i-esima variable de salida del modelo y el valor de la i-esima variable deseada en la j-esima estrategia del k-esimo conjunto de objetivos. La función $\text{SGN}(\)$ en el denominador, cambia el signo de Z_{ijk} para aquellos objetivos que son menores que los valores "base". Es de esta forma como los valores Z_{ijk} para cada una de las variables asociadas a cada una de las estrategias y a

cada uno de los objetivos, son comparables entre si.

El procedimiento es iterativo encontrando la desviación normalizada mayor y minimizandola. Posteriormente encuentra la siguiente mayor y la minimiza, operando sobre todas las desviaciones hasta que no es posible mejorarlas. El resultado es un vector de parámetros optimizados. Implícita en la regla que detiene el proceso es la condición de que sea imposible obtener nuevos intercambios o balances entre las desviaciones de objetivos que tiendan a reducir la desviación máxima. Por lo tanto, el método "mín-máx" tiende a encontrar soluciones Pareto-óptimas al problema de optimización con criterios múltiples.

El obstáculo principal a este enfoque es la posibilidad real de obtener soluciones múltiples, algunas Pareto-inferiores a otras (Figura 19).

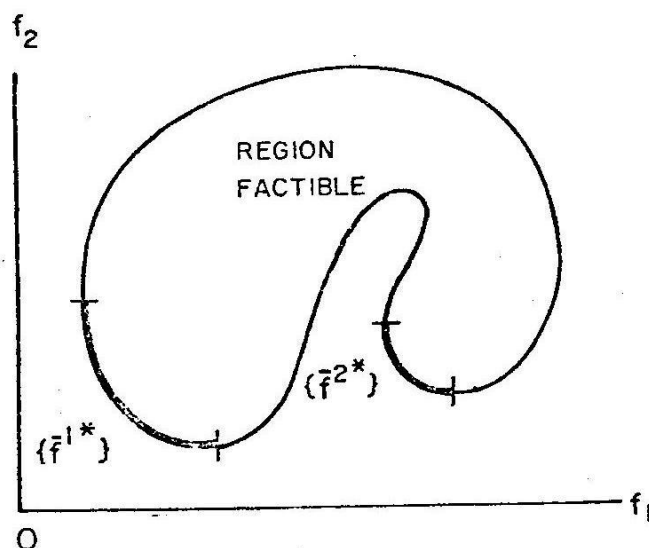


Figura 19 Conjunto de valores factibles y soluciones Pareto-óptimas. Según Manetsch (1985).

Ante esto, se hace necesario encontrar un método de búsqueda para la optimización que por si mismo tienda a óptimos globales. Este método es el "Complex".

El Complex y la Búsqueda del Optimo Global.

Este método de optimización fué desarrollado por Box (1965), siendo discutido por Kuester y Mize (1973) y aplicado en forma mejorada a problemas de criterios múltiples por Manetsch (1985 y 1986). Su propósito es encontrar el máximo o mínimo de una función no lineal multivariada, sujeta a restricciones que se presentan como desigualdades no lineales.

$$\text{Max } F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{ns}) \quad (8)$$

$$\text{sujeta a } G_i \leq X_i \leq H_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, ns, \dots, k. \quad (9)$$

Donde las variables implícitas $X_{ns+1}, \dots, X_k$ son funciones dependientes de las variables independientes explícitas $X_1, X_2, \dots, X_{ns}$ y las restricciones superiores e inferiores H_i y G_i pueden ser constantes o funciones de las variables independientes.

El método es una tecnica de búsqueda secuencial que tiende a encontrar máximos o mínimos globales, dado que el conjunto inicial de puntos se encuentran "dispersos" aleatoriamente dentro de la región factible para valores de X . Cada uno de estos conjuntos de valores (1, 2, ...nv) corresponde al vértice de una figura geométrica o "complex" generada en el espacio de búsqueda ns-dimensional (Figura-20).

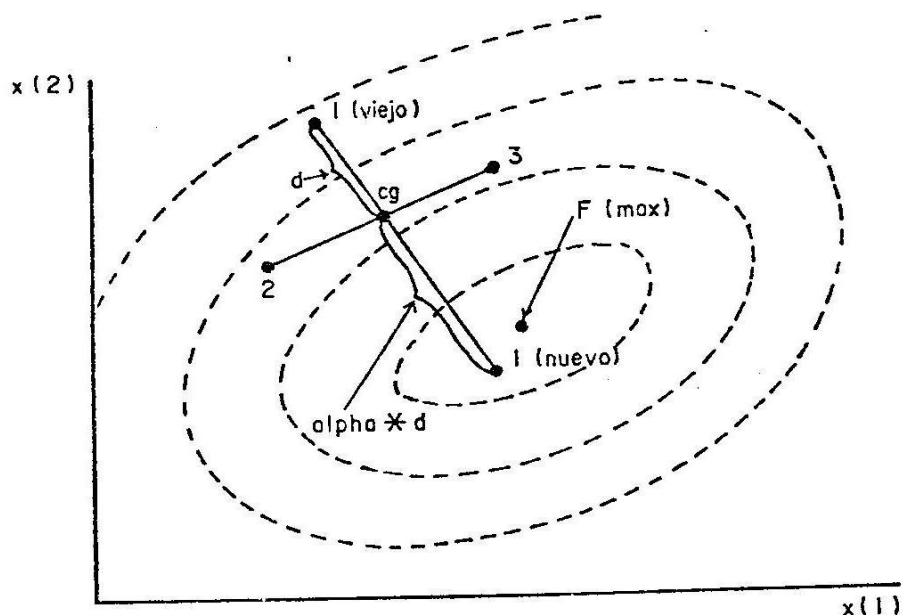
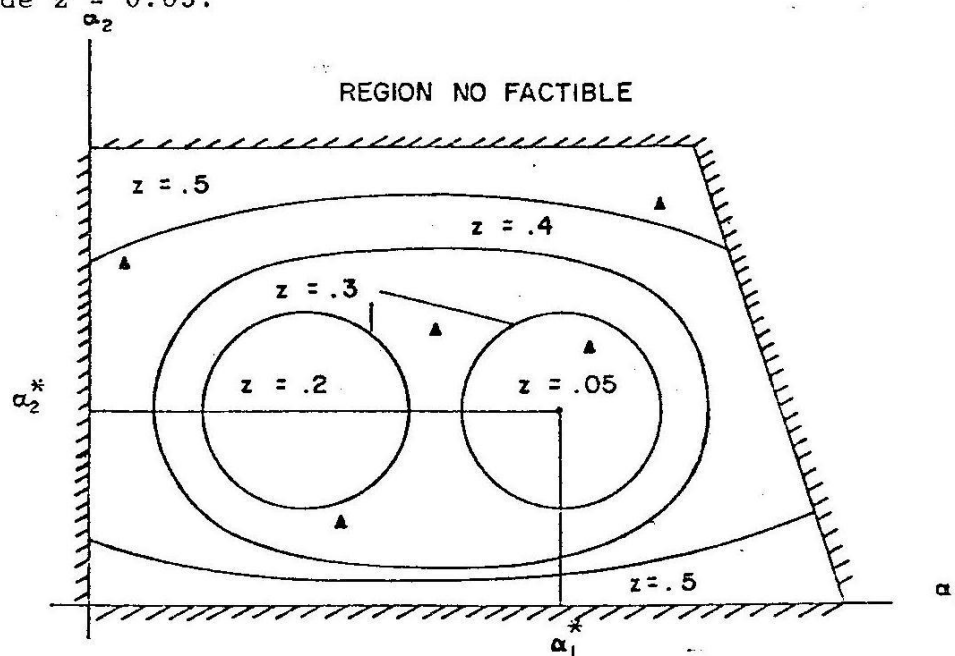


Figura 20 El Método de Optimización Compleja. cg es el centro de gravedad. Según Manetsch 1986.

Asociado a cada vértice de la función geométrica se encuentra un valor de la función F calculado a partir del modelo de simulación. El método entonces converge moviéndose hacia el mejor óptimo que encuentra, encogiéndose hacia una pequeña región de convergencia alrededor de ese punto (Manetsch 1985). El mismo autor en un trabajo posterior (Manetsch 1986) sugiere que el método identifica el vértice inferior, localizando un nuevo punto a lo largo de la línea que une este punto y el centro de gravedad de los restantes, localizando un nuevo vértice "1" a una distancia $\alpha * d$ mas allá del centroide, tal como se indica en la figura 20. El vértice anterior es remplazado por el nuevo si no se presenta

como el peor vértice y no viola las restricciones. Kuester y Mize (1973) sugieren que la convergencia se alcanza cuando los valores de la función objetivo en cada punto se encuentran dentro de BETA unidades para GAMMA iteraciones consecutivas. Entendiendo como una iteración, los cálculos necesarios requeridos para seleccionar un nuevo punto que satisfaga las restricciones, no repitiéndose como el de menor valor de la función.

La Figura 21 muestra un "complex" inicial generado por el procedimiento para resolver el problema de optimización de un modelo de dos dimensiones cuando existen óptimos múltiples. En este caso, el procedimiento (minimización) convergerá hacia $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*)$ correspondiente a un valor de $z = 0.05$.



▲ -- Vértices del complex inicial

Figura 21 Complex inicial representativo. La solución de óptimos múltiples. Según Manetsch 1985.

M-OPTSIM.

El acoplamiento de las tres partes integrantes del modelo general (Figura 18) se llevó a cabo en M-OPTSIM (Manetsch 1986). Este es un programa para microcomputadora que lleva a cabo simulación de sistemas y optimización. Es un ambiente interactivo para desarrollar simulaciones discretas o continuas con o sin un módulo de optimización activo. Asimismo, cuenta con 21 subrutinas para apoyar al investigador en el proceso de modelación. La versión que se utilizó fué la desarrollada en QUICKBASIC ((c) Microsoft Corporation), compilador que permite programación estructurada, interacción en tiempo real, accesibilidad a gráficas y que en un futuro estará disponible universalmente en todos los sistemas (Manetsch 1986).

La solución del problema se dió desde el módulo de optimización, usando al modelo de optimización y a la estructura "mín-máx", como una subrutina del mismo. El problema se presentó como una optimización no lineal con criterios múltiples para determinar soluciones Pareto-óptimas.

La optimización se llevó a cabo en una microcomputadora IBM-PC ((c) IBM Trade Mark) con 512 Kbytes en RAM y un disco duro de 30 Megabytes, acoplada a un impresor de 120 cps. Sin embargo puede llevarse a cabo en una microcomputadora compatible (PC, XT o AT) con 256 Kbytes en RAM y dos unidades de lectura y escritura (I/O) de 360 Kbytes, dado que el programa ocupa 32.8 Kbytes.

M-OPTSIM.

El acoplamiento de las tres partes integrantes del modelo general (Figura 18) se llevó a cabo en M-OPTSIM (Manetsch 1986). Este es un programa para microcomputadora que lleva a cabo simulación de sistemas y optimización. Es un ambiente interactivo para desarrollar simulaciones discretas o continuas con o sin un módulo de optimización activo. Asimismo, cuenta con 21 subrutinas para apoyar al investigador en el proceso de modelación. La versión que se utilizó fué la desarrollada en QUICKBASIC ((c) Microsoft Corporation), compilador que permite programación estructurada, interacción en tiempo real, accesibilidad a gráficas y que en un futuro estará disponible universalmente en todos los sistemas (Manetsch 1986).

La solución del problema se dió desde el módulo de optimización, usando al modelo de optimización y a la estructura "mín-máx", como una subrutina del mismo. El problema se presentó como una optimización no lineal con criterios múltiples para determinar soluciones Pareto-óptimas.

La optimización se llevó a cabo en una microcomputadora IBM-PC ((c) IBM Trade Mark) con 512 Kbytes en RAM y un disco duro de 30 Megabytes, acoplada a un impresor de 120 cps. Sin embargo puede llevarse a cabo en una microcomputadora compatible (PC, XT o AT) con 256 Kbytes en RAM y dos unidades de lectura y escritura (I/O) de 360 Kbytes, dado que el programa ocupa 32.8 Kbytes.

Recolección de Datos.

Se muestrearon 4770 organismos durante la temporada 1987 (Agosto 1- Diciembre 15) por el personal del programa pulpo del Centro Regional de Investigación Pesquera-Yucalpetén en los puertos de Celestún, Sisal, Progreso, Chicxulub, Dzilam de Bravo, Rio Lagartos, San Felipe y El Cuyo. Estos muestreos se realizaron semanalmente en cada puerto yucateco. Solo se muestreó la captura de la flota artesanal. Las estadísticas y datos sobre captura para el año de 1987, fueron obtenidos de la Delegación Federal de Pesca de Yucatán. De éstos y de la proporción de captura por flota producto de la simulación de 1987 (Seijo et al 1987), se estimó la captura de la flota de mediana altura, misma que se distribuyó de acuerdo a la estructura de edades de 1986, y que al dividirse por el peso individual promedio de cada grupo de edad, se obtuvo el rendimiento por grupo de edad. Con la composición por tallas de la captura de ambas flotas se desarrolló un análisis de cohortes (Pope 1972, Jones 1984) para conocer la estructura de la población a finales de 1987. La información sobre fecundidad, se obtuvo de Seijo et al. (1987). Los datos sobre mortalidad natural y por pesca que se utilizaron se basaron en los reportados por Solís-Ramírez y Chávez (1986). El número de lanchas y barcos por flota para 1988 se obtuvo de la Delegación Federal de Pesca en Yucatán. La información sobre costos y beneficios de los dos tipos de embarcaciones se obtuvieron de Seijo et al.(1987). Necesario es mencionar que ya que el trabajo de Seijo et al. (1987) está basado en

el muestreo de más de 20,000 individuos y apoyado por encuestas directas de campo, se consideró de gran confiabilidad por lo que nuestro trabajo se apoyó en este ultimo de manera fundamental.

Escenarios de Manejo o Administración.

Después de visitar al administrador de los recursos pesqueros en el estado de Yucatán -Delegado Federal de Pesca de la Secretaría de Pesca- para conocer sus preferencias respecto a los criterios deseados en la optimización del modelo de simulación así como su idea con respecto a la posible holgura de las restricciones funcionales asociadas a los parámetros de control -tiempo de inicio de la temporada de pesca y número de lanchas y barcos por tipo de flota que intervienen en la pesquería- se generaron seis escenarios posibles de manejo o administración, mismos que se clasificaron en tres grupos.

El primero (1a) es aquel en el que se planea una holgura de mas menos 20% en los parámetros de control, considerando la actual composición de las capturas, es decir sin cambios en la legislación vigente sobre la talla mínima legal y su correspondiente limitada aplicación.

En el segundo (1b) se toma en cuenta la misma holgura que en el primero, sin embargo se considera que existe estricto respeto a la talla mínima de captura.

El tercero (2a) es aquel en el que se reconoce la existencia del huracán "Gilberto" mismo que por su magnitud - grado 5- es considerado el más devastador del siglo. Ante

esto, se consideró el 21 de Septiembre como la fecha de inicio de la temporada y la composición numérica de las flotas existentes -no dañadas- después al paso del huracán, como las cotas iniciales de estos parámetros de control, situando las restricciones en flota mas menos 20% alrededor de esta cota. No así la restricción asociada al inicio de la temporada, misma que tiene solo una holgura positiva posterior al inicio de la temporada. En este escenario, se considera que la composición de la captura de pulpo es la actual acorde a la limitada aplicación de la legislación vigente.

El cuarto escenario (2b) solo se diferencia del tercero, en la consideración de que a partir del meteoro existe estricto respeto a la talla mínima legal.

El quinto (3a) es igual que el tercero (2a), diferenciándose en el final de la temporada de pesca, considerando que la temporada culmina la quincena 24 en lugar de la 23.

El sexto y último escenario (3b) es igual al cuarto (2b) con la diferencia de que la temporada de pesca culmina el día último del año.

En el siguiente capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en las optimizaciones de los escenarios antes mencionados.

CAPITULO IV

RESULTADOS DE INVESTIGACION

El propósito de este capítulo es el de presentar los principales resultados de investigación obtenidos en esta tesis. Estos resultados se presentan en las siguientes secciones: (1) estimación de los parámetros o estrategias de manejo iniciales y sus respectivas holguras en los diversos escenarios, (2) resultado de las corridas base de simulación, (3) preferencias u objetivos del administrador pesquero en relación a las variables bioeconómicas de la pesquería de pulpo (O. maya) en 1988 y (4) resultado de la optimización de los escenarios propuestos.

Parámetros de Control iniciales asociados a los distintos

Escenarios de manejo y sus respectivas Holguras.

Según información de la Secretaría de Pesca (Delegación Federal de Pesca en Yucatán) al inicio de la temporada de pesca de pulpo en 1988, estaban registradas 2377 embarcaciones pesqueras, de las cuales el 86.2% (2050) correspondía a lanchas asociadas a la flota artesanal mejor conocida como flota menor, correspondiendo el restante 13.8% (327) a la flota moderna o flota mayor (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tamaño y composición de la flota pesquera yucateca en 1988 (antes del 15 de septiembre).

FLOTA	Nº	%
ARTESANAL	2050	86.2
MODERNA O MECANIZADA	327	13.8
TOTAL	2377	100.0