

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y
DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

CONTROL OPTIMO DE UN SISTEMA BIOECONOMICO:
LA PESQUERIA DE ATUN ALETA
AMARILLA *Thunnus albacares* EN EL
OCEANO PACIFICO ORIENTAL.

T E S I S
MAESTRIA EN CIENCIAS

Michel Jules Dreyfus Leon

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, SEPTIEMBRE DE 1991.

RESUMEN de la Tesis de Michel Jules Dreyfus León
presentada como requisito parcial para la obtención del grado
de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFIA con opción en ECOLOGIA
MARINA. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de
1991.

CONTROL OPTIMO
DE UN SISTEMA BIOECONOMICO:
LA PESQUERIA DE ATUN ALETA AMARILLA
Thunnus albacares
EN EL OCEANO PACIFICO ORIENTAL

Resumen aprobado por:



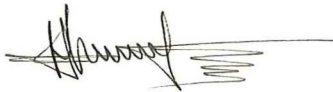
M.C. Hector G. Manzo M

Director de Tesis

Se caracterizó la función de esfuerzo de pesca óptimo que maximiza los beneficios económicos netos a valor presente de la pesquería de atún aleta amarilla, Thunnus albacares, en el Océano Pacífico Oriental. Para esto se utilizó la información de 40,000 lances de pesca de la flota atunera mexicana del período 1980-1990 con la que se estimó el esfuerzo en días normales de pesca de la flota internacional que opera en esa zona. Se modificó el modelo de Schnute (1977) y se estimó la tasa de crecimiento poblacional, la capacidad de carga del medio ambiente y el coeficiente de capturabilidad. Aplicando la Teoría de Control Óptimo se estimó el esfuerzo necesario para obtener los mayores rendimientos económicos netos en la pesquería, considerando los costos de operación, diversos precios del atún y tasas de descuento, además de los parámetros biológico-pesqueros antes mencionados. Se consideraron tres variantes en el modelo: coeficiente de capturabilidad constante, coeficiente de capturabilidad variable en función de la biomasa de atún y en función del esfuerzo de pesca. Se determina que bajo cualquier contexto el esfuerzo actual es muy elevado con respecto al óptimo económico.

TESIS DEFENDIDA POR: MICHEL JULES DREYFUS LEON

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:



M.C. HECTOR MANZO MONROY.- Director del Comité



DR. HECTOR ECHAVARRIA HERAS.- Miembro del Comité



DR. OSCAR SOSA NISHIZAKI.- Miembro del Comité



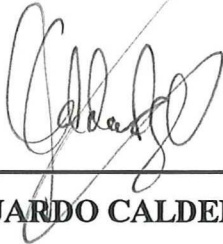
M.C. ELENA SOLANA ARELLANO.- Miembro del Comité



M.C. JESUS IBARRA VILLASEÑOR.- Miembro del Comité



M.C. GILBERTO GAXIOLA CASTRO.- Jefe Depto. Ecología Marina



DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director Estudios de Posgrado

13 DE SEPT., DE 1991

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA.

DIVISION DE OCEANOGRAFIA
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA MARINA

CONTROL OPTIMO
DE UN SISTEMA BIOECONOMICO:
LA PESQUERIA DE ATUN ALETA AMARILLA
Thunnus albacares
en el OCEANO PACIFICO ORIENTAL

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

MICHEL JULES DREYFUS LEON

Ensenada, Baja California, Septiembre de 1991.

DEDICATORIA

A mis padres, hermana

y demás familiares.

a mis amigos

AGRADECIMIENTOS

Al director de la Tesis Héctor G. Manzo M., al co-director Dr. Héctor Echavarría H., a los sinodales Dr. Oscar Sosa N., M.C. Elena Solana A., M.C. Jesús Ibarra V. por sus consejos, opiniones y revisión de este trabajo.

A la Mat. Consuelo Valle E. por su exhaustiva revisión de los cálculos matemáticos. Al M.C. René Pinet P. por sus opiniones tan valiosas, al igual que al Oc. Ricardo Troncoso de quien también recibí ayuda. A Fernando Pérez de la Serna por su ayuda en la escritura de fórmulas y tablas. También agradezco a quienes aún sin saberlo me impulsaron a terminar este trabajo.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
I INTRODUCCION	1
II OBJETIVO	13
III METODOS Y MATERIALES	14
IV RESULTADOS	25
IV.1 Estimación de parámetros	25
IV.2 Modelos bioeconómicos	30
IV.2.1 Coeficiente de capturabilidad constante	30
IV.2.2 Coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa	39
IV.2.3 Coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo	45
V DISCUSION	66
LITERATURA CITADA	77

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1. Capturas de AAA en el Océano Pacífico Oriental durante 1980-1990 y curva de capturas en equilibrio utilizando el modelo de Schnute.	29
2. Curvas de biomasa óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.	35
3. Curvas de captura óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.	36
4. Curvas de esfuerzo óptimo en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.	37
5. Curvas de biomasa óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.	42
6. Curvas de captura óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa.	43
7. Curvas de esfuerzo óptimo en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa.	44
8. Localización en el espacio fase, de los puntos en que el esfuerzo y la biomasa tienen derivada igual a cero.	49
9. Atractor elíptico en el espacio fase y trayectorias producidas por algunas condiciones iniciales. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	50

<u>Figura</u>	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	<u>Página</u>
10.	Biomasa (*) y captura (-) determinadas por el recorrido del atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	52
11.	Comportamiento de la variable control en el atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	53
12.	Biomasa (*) y esfuerzo estandarizado (-) correspondientes a sus valores en el atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	54
13.	Atractor elíptico (*) producido con la condición de que el esfuerzo mínimo es de 10,000 DNP. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	55
14.	Biomasa (*) y captura (-) determinadas de acuerdo al atractor formado con la condición de esfuerzo mínimo de 10,000 DNP. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	56
15.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro r. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	58
16.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro K. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	59
17.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro a. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	61
18.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro b. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	62

<u>Figura</u>	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	<u>Página</u>
19.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro P. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	63
20.	Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% la tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.	65

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
I. Esfuerzo, captura y captura por unidad, de esfuerzo del atún aleta amarilla en el océano Pacífico oriental 1980-1990.	26
II. Estimaciones biológico-pesqueras y estadísticos obtenidos con el modelo de Schnute modificado.	27
III. Biomasa, captura y esfuerzo óptimos determinados de acuerdo al precio por tonelada de atún y a la tasa de descuento, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.	34
IV. Variación de la biomasa óptima en función de un incremento de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad constante.	38
V. Biomasa, captura y esfuerzo óptimos de acuerdo al precio por tonelada de atún y a la tasa de descuento, considerando al coeficiente de capturabilidad variable en función de la biomasa.	40
VI. Variación de la biomasa óptima en función de un incremento de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad variable en función de la biomasa.	41

CONTROL OPTIMO
DE UN SISTEMA BIOECONOMICO:
LA PESQUERIA DE ATUN ALETA AMARILLA
Thunnus albacares
en el OCEANO PACIFICO ORIENTAL

I. INTRODUCCION

El atún aleta amarilla, Thunnus albacares, pertenece a la familia de los escómbridos que está representada por 15 géneros y 48 especies de peces oceánicos epipelágicos (Klawe, 1980). Las principales especies de túnidos explotados en el mundo son el atún aleta amarilla (AAA), el barrilete Katsuwonus pelamis, el patudo Thunnus obesus, el atún aleta azul Thunnus thynnus y la albacora Thunnus alalunga que son las más importantes desde el punto de vista comercial ya que representan alrededor del 80 % de las capturas mundiales de túnidos (Robles et al, 1988).

El AAA tiene una distribución mundial, en aguas tropicales y subtropicales de los océanos Índico, Pacífico, Atlántico y en cada uno de los mares cálidos del mundo excepto el Mediterráneo (Cole, 1980). En el Océano Pacífico su distribución aproximada va de los 40 grados latitud Norte a los 40 grados latitud Sur (Calkins 1975). La temperatura es un factor importante de la distribución horizontal del AAA que prefiere aguas ricas en alimento con temperatura superficial superior a los 20 grados centígrados (Blackburn 1969 en Cole, op cit.).

La estructura térmica del océano aparentemente influye en la distribución del AAA. Suzuki et al (1977) encontraron que las capturas de esta especie suelen ser mayores en áreas en que la termoclina es somera. Además se ha demostrado que existe una alta correlación entre la vulnerabilidad a la captura por embarcaciones cerqueras, la profundidad de la capa de mezcla y la fuerza del gradiente de temperatura en la termoclina (Green, 1967, Sharp, 1978 y Miller-Evans, 1979, de Cole, op. cit.) Aparentemente una masa de agua con marcada termoclina y concentración de oxígeno disuelto menor de 2 ml por litro debajo de ésta forman una barrera para el AAA, haciéndolo más susceptible a la captura en situaciones en que la profundidad mínima de la red se extiende por debajo de la termoclina. Otro aspecto importante en la determinación de zonas de agregación de esta especie es la disponibilidad de

alimento. En este sentido, la distribución de AAA coincide con zonas de surgencia y frentes oceánicos (en Cole, op cit).

En el Océano Pacífico se registran las mayores capturas de túnidos, en 1988 fueron capturadas 1'560,000 toneladas (70% del total mundial), de las cuales 590,000 toneladas (tons.) correspondieron a AAA (Anónimo, 1988a). Se considera que existen tres stocks o existencias en ese océano: el occidental, central y el oriental. Este último está delimitado aproximadamente por el Area Reglamentarea de la Comisión del Aleta Amarilla (ARCAA), (Suzuki et al, op. cit.) que abarca desde San Francisco, EEUU hasta Valparaíso, Chile y se extiende más de 1000 millas mar adentro desde la línea de costa en algunas latitudes, hasta los 150 grados longitud Oeste.

La pesquería del Atún en el Pacífico Oriental data de 1903 cuando se empezó a enlatar Albacora en California, EEUU. Debido al aumento de la demanda y a la presencia estacional variable de este recurso, la flota estadounidense inició la explotación del AAA y Barrilete en 1916 (Shimada y Schaefer, 1956). En ese entonces la pesca en esa zona se realizaba con barcos vareros, de poca autonomía y de manera local. No fue sino hasta 1960 con la introducción de la red de cerco y las mejoras en el sistema de refrigeración y material de las redes, que la flota casi totalmente constituida por barcos de

bandera norteamericana, se extendió en el ARCAA (Hudgins, 1986). En la actualidad casi toda la flota está constituida por barcos cerqueros con gran autonomía y con un arte de pesca que permite, con apoyo de helicóptero y satélite, obtener grandes capturas de un recurso que se encuentra en aguas superficiales en esta zona del Pacífico.

Las primeras estadísticas de captura de la flota mexicana datan de 1937 (Muhlía, 1987) y aunque México es un país en cuyas costas se concentra el Atún (Dreyfus et al, 1986), la pesquería mexicana se vió frenada hasta que una serie de acontecimientos políticos y administrativos la impulsaron, destacando entre otros:

a) El establecimiento de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) en 1949 para llevar a cabo investigación biológica y de conservación en el Océano Pacífico Oriental. Sus miembros fundadores fueron EEUU y Costa Rica, países a los que México se unió en 1964 (Anónimo, 1988a). A partir de 1969 la CIAT establece cuotas de captura por países en función de su capacidad de acarreo.

En 1978, México se retira de la CIAT argumentando que las cuotas favorecían a los países que históricamente capturaban más atún, e impedía el crecimiento de la flota de los países en desarrollo (Hudgins, op cit).

b) En 1976, México establece su zona económica exclusiva de 200 millas náuticas y comienza la construcción y compra de embarcaciones atuneras para la justificación y defensa de esa zona. Esto debido a que los excedentes no explotados por el país ribereño pueden ser reclamados para su explotación por parte de embarcaciones extranjeras de acuerdo a lo establecido en la Tercera Convención sobre la Ley del Mar de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), (Szekely, 1983). De acuerdo al tratado discutido en la ONU, los estados costeros tienen derechos soberanos para explorar, explotar, conservar y manejar los recursos naturales en la zona económica exclusiva correspondiente. Pero el artículo 64 de la misma ley, reconociendo la naturaleza especial de las especies migratorias, menciona que la conservación y explotación de estas especies debe ser materia de cooperación regional (Szekely, op. cit.). Sin embargo existe diferencia en la interpretación del mismo por parte, entre otros, de Estados Unidos y de México. El primero considera que la característica migratoria de la especie resta autoridad al país ribereño para fijar cuotas de captura y medidas de conservación, autoridad conferida en los artículos 61 y 62 de la misma ley. (Joseph, 1983). Debido a este conflicto, en 1980 dos barcos cerqueros norteamericanos fueron atrapados sin permiso de pesca en la zona exclusiva de México, situación que llevó al primer embargo atunero declarado por EEUU contra México (Hudgins, op. cit.) y que permaneció

vigente hasta 1986. Sin embargo la flota mexicana siguió creciendo, al igual que sus volúmenes de captura, abriéndose un nuevo mercado en Europa y Asia para el Atún mexicano.

Desde 1984 la pesquería del atún a nivel nacional, se ha convertido en la segunda en importancia de acuerdo a volumen de extracción y la tercera en importancia en relación a Ingresos por exportación (Anónimo, 1988b).

En lo que respecta a la pesquería Internacional en el Pacífico Oriental, México tiene la flota principal en número de embarcaciones, capacidad de acarreo, volumen de captura y eficiencia tecnológica en la región desde 1984 (Hudgins, 1986 y Dreyfus, 1988).

A pesar de esta situación favorable a México y de que el AAA no muestra signos de sobreexplotación debido en parte a los altos costos de operación de las embarcaciones atuneras (Dreyfus y Manzo, 1990), existen otras problemáticas como la de la mortalidad incidental de delfines ya que los atunes adultos de mayor tamaño se asocian en la superficie a cuatro especies de estos mamíferos principalmente: Delfín Pinto Stenella attenuata, Delfín Tornillo S. longirostris, Listado S. coeruleoalba y Común Delphinus delphis, (Robles et al, op cit) los cuales son encerrados durante las maniobras de captura de atún con red de cerco. La pesquería incide en

gran porcentaje sobre atún asociado con delfín por la mayor facilidad de su búsqueda, mayores capturas por lance y precios de atún altos de acuerdo al peso del pez. Esto crea un beneficio para la población de AAA al disminuir la mortalidad por pesca en las clases de edad menores y la posibilidad mayor que tienen de reproducirse, sin embargo la mortalidad de cetáceos es el principal problema de administración en la actualidad.

Para la protección de las poblaciones de delfines se han establecido medidas de regulación en varios países, entre ellos Estados Unidos vía el Acta de Protección a los Mamíferos Marinos de 1972, (Hofman, 1989) y en México con medidas de regulación que aparecen por primera vez en el Diario Oficial de la Federación en 1977 (Anónimo, 1988c). Estas incluyen modificaciones a las redes y a las operaciones de búsqueda y maniobras de captura. Los efectos de estas medidas en la Industria Atunera pueden ser un aumento de costos y una posible disminución de la captura.

Además este problema es una fuente potencial de confrontación entre naciones que no comparten la misma opinión en cuanto a la conservación de delfines. Los Estados Unidos, por ejemplo, tienen incorporada en su ley la prohibición de importaciones de atún (embargo) de países que no tomen las medidas "apropiadas" de protección a los

delfines (Enriquez, 1988).

A pesar de que la mortalidad anual actual de México (aproximadamente 50,000 delfines muertos en 1989) no tiene comparación con la realizada por EEUU en décadas anteriores, que en algunos años fue superior a los 500,000 delfines muertos (Smith, 1983), y a la incertidumbre existente sobre el daño a las poblaciones de estos mamíferos marinos, existe presión de grupos ecologistas norteamericanos e intereses económicos que han conseguido la aplicación de nuevos embargos atuneros hacia México en base al Acta de Protección a los Mamíferos Marinos. Esto se logró argumentando una alta mortalidad de delfines de la flota mexicana que supera estandares o límites establecidos unilateralmente por los Estados Unidos y con bases discutibles.

Por la situación conflictiva y la falta de regulación desde que México se retiró de la CIAT, ya que el programa de regulación terminó en 1979 (Enriquez, op. cit), es importante para México estar activo en todos los aspectos de administración del recurso atunero.

La suposición de que la única vía para administrar especies migratorias como el atún es a travez de una organización internacional, es aceptada casi universalmente, pero Hilborn y Sibert (1988) sugieren que si la mortalidad

natural es alta con respecto a la tasa de emigración y que si el reclutamiento es alto dentro de una zona económica exclusiva de gran extensión, como la de México, entonces el recurso se puede considerar como residente y la regulación internacional no sería indispensable. Razón de más para la administración de la pesquería por parte de México.

Sin embargo el acceso abierto a la pesquería, bajo cualquier régimen correcto de administración (nacional o internacional) no permite el uso óptimo de los recursos desde el punto de vista bioeconómico. Por el contrario, esta situación RES NULLIUS (recurso sin dueño) nos representa una situación más de la "Tragedia de los Comunes" así definida por Hardin(1968), en que al no existir un control, en este caso en la pesquería, se toman decisiones "óptimas" individuales por parte de los pescadores en cuanto a la captura del recurso a obtener. Esto conduce a la larga en forma global, al deterioro de la situación de todos los involucrados en la pesquería. Existen dos condiciones para la existencia del acceso abierto. Por un lado, el acceso irrestricto al recurso y por otro un tipo de interacción adversa entre los usuarios del recurso (externalidad) (Howe, 1979). Esta situación se traduce en una ineficiencia económica, con exceso de recursos invertidos en la pesquería, y en algunos casos en sobreexplotación biológica con capturas y niveles de abundancia del recurso por debajo del máximo

rendimiento sostenible (Gordon, 1954 y Clark, 1973).

El considerar un sistema bioeconómico a diferencia de uno biológico, aumenta la complejidad y dificultad de su estudio pero disminuye la probabilidad de escoger una política subóptima (Anderson, 1983).

La pesquería del AAA en el Océano Pacífico Oriental, como sistema bioeconómico ha sido estudiada con un modelo estático por Dreyfus y Manzo, op. cit. Pero de acuerdo al concepto de uso óptimo de los recursos es importante realizar un análisis dinámico, (Clark, 1976), que considere el beneficio económico de las capturas futuras de la pesquería en base al cambio del valor del dinero en el tiempo para definir niveles de esfuerzo de pesca adecuados para la explotación racional en el tiempo y la visión de estrategias de manejo del recurso.

Este enfoque bioeconómico debe ser enmarcado dentro de la Teoría del Capital, donde el recurso es visto como un bien de capital en que las decisiones de consumo en el presente tienen implicaciones en las opciones de consumo en el futuro, dado el impacto en los niveles de abundancia del stock. El problema en la administración del recurso se transforma en la selección de un flujo de consumo (pesca) óptimo en el tiempo, que implica a su vez la selección de un nivel óptimo del

Stock en función del tiempo (Clark y Munro, 1975).

Para cumplir este objetivo, el cálculo de variación ha sido la técnica utilizada tradicionalmente, pero la versión moderna de ésta, menos rígida, es llamada la Teoría del Control Optimo y se ha convertido en la herramienta central de la Teoría del Capital (Dorfman, 1969). La búsqueda de una función de esfuerzo de pesca en el tiempo que permita obtener las mayores ganancias en una pesquería, se puede llevar a cabo con estas técnicas. El modelo dinámico para lograr lo antes expuesto en base a algunos parámetros y consideraciones biológicas y económicas ha sido desarrollado (explicado) por Clark (1976), Beltrami (1987), Howe (op. cit.), Clark y Munro (op. cit.) y Dorfman (op. cit.) entre otros.

Es importante hacer notar que históricamente pocas pesquerías han sido administradas bajo este criterio y la mayoría no han tenido ninguna consideración económica a la hora de la toma de decisiones (Clark, 1976).

Con respecto a los modelos, éstos son representación y simplificación de la realidad por lo que analizándolos podemos encontrar muchos supuestos que no se cumplen en la realidad. Uno de los supuestos implícitos en casi todos los modelos de pesquerías (Radovich, 1973) es que una unidad estandar de esfuerzo pesquero captura una proporción (q)

constante de la población pescable. Esto implica a su vez que los peces se distribuyen al azar en el área de pesca, que el esfuerzo se distribuye al azar en las áreas de pesca y que cada unidad de esfuerzo es independiente. Existen varias razones para suponer que esto no sucede y de que una unidad de esfuerzo obtiene una proporción mayor de la población conforme ésta disminuye en abundancia. La tasa de incremento de la eficiencia del esfuerzo en función del incremento del stock depende de la naturaleza específica de la pesquería. El efecto sería mayor en recursos con distribución contagiosa y con comunicación entre pescadores. En el caso de la pesquería del AAA en el Pacífico Oriental el efecto disminuiría dada la extensión del área de pesca del recurso (Radovich, op. cit.). Varios autores han hecho estimaciones de la variación de este coeficiente (q) en función de la biomasa, Mac Call (1974) para la sardina de California y Pope y Garrod (1975) para el arenque del Mar del Norte, encontrándose una función inversa entre las dos variables que es de suponer que se da en la pesquería del atún, ya que este recurso se concentra en ciertas áreas tradicionales y que indicaría según Walters (1986) una situación de hiperestabilidad en el coeficiente de capturabilidad.

II. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es determinar tanto la función de esfuerzo de pesca óptima en el tiempo, necesaria para maximizar las ganancias de la pesquería del atún aleta amarilla en el Océano Pacífico Oriental, así como la respuesta del recurso a la explotación pesquera.

Esto se logra en base a la Teoría de Control Óptimo bajo la consideración por un lado que el coeficiente de capturabilidad pueda ser constante o bien variable, esto es de manera inversa a la abundancia del recurso o en función directa del nivel del esfuerzo de pesca.

III. METODOS Y MATERIALES

En este estudio se utilizó el banco de datos del Proyecto Pelágicos Mayores del Centro Regional de Investigación Pesquera de Ensenada. Este banco cuenta con información de 40,000 lances de pesca correspondientes a bitácoras de barcos cerqueros de la flota mexicana del período 1980-1990. Las bitácoras incluyen la fecha, localización y captura de Atún Aleta Amarilla por lance. Estos datos son los necesarios para estimar el esfuerzo de pesca y la Captura Por Unidad de Esfuerzo (U).

Se utilizó el día de pesca como unidad de esfuerzo por ser la más recomendable dado el arte de pesca empleado (Ehrhardt, 1981). Esto debido a que el tiempo de búsqueda se puede relacionar más directamente con el nivel de población y así ser utilizado en un índice de abundancia.

Las embarcaciones se dividieron en cuatro clases, de acuerdo a su capacidad de acarreo: clase 1 hasta 500 tons., clase 2 hasta 700 tons., clase 3 hasta 900 tons. y clase 4 más de 900 tons. El esfuerzo (E) se estandarizó para obtener días normales de pesca (DNP), con respecto a la categoría 4 por ser la más numerosa, la que mayores capturas logra y de

la que mayor información se tiene.

La normalización del esfuerzo se hizo de acuerdo a Ehrhardt (op. cit.) y consiste primero en el cálculo del poder relativo de pesca ρ de cada categoría de barcos con respecto a la estandar (categoría 4).

$$(1) \quad \rho_j = \frac{U_{ij}}{U_{i4}} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = \text{tiempo} \\ j = \text{clase de embarcación} \end{array}$$

El esfuerzo total estandarizado de la fracción muestreada (información del banco de datos), para cada período de tiempo se determina mediante la suma de los productos de los esfuerzos nominales totales de cada categoría por el poder de pesca relativo correspondiente a la misma

$$(2) \quad E_m = \sum_{k=1}^N \rho_k E_k \quad \text{donde } E_m = \text{esfuerzo total de la fracción muestreada}$$

El esfuerzo efectivo total se calcula a partir de conocer el esfuerzo efectivo y la captura de una porción representativa de la pesquería. De donde el esfuerzo total se calcula por una proporcionalidad entre la U total de la pesquería y de la fracción muestreada.

$$(3) \quad U_t = U_m \quad ; \quad \frac{C_t}{E_t} = \frac{C_m}{E_m}$$

donde: U_t = índice de abundancia total

U_m = índice de abundancia de la muestra

C_t = captura total

C_m = captura de la fracción muestreada

E_t = esfuerzo total

La obtención de los parámetros biológicos para el modelo bioeconómico se determinan con una mejora del modelo de producción de Schaefer, que es inválido para situaciones de no equilibrio (Walters, op. cit.), desarrollado por Schnute (1978) que usa técnicas de mínimos cuadrados para el cálculo de los estimados de la tasa de crecimiento (r), la capacidad de carga (K) y del coeficiente de capturabilidad (q).

Las ecuaciones básicas de Schnute (op. cit.) son:

$$(4) \quad S_1(\hat{r}, \hat{K}, \hat{q}) = \sum_{n=1}^N \left[\ln \left(\frac{U_n}{U_{n-1}} \right) - r + q \left(\frac{E_{n-1} + E_n}{2} \right) + \frac{r}{qK} \left(\frac{U_{n-1} + U_n}{2} \right) \right]^2$$

que representa la suma de cuadrados a minimizar para la obtención de los parámetros biológico pesqueros.

Se puede resolver la ecuación anterior de manera explícita gracias a la teoría de regresión lineal, definiendo lo siguiente (Schnute, op.cit.):

$$(5) \quad x_n = \frac{1}{2} (E_{n-1} + E_n)$$

$$(6) \quad y_n = \frac{1}{2} (U_{n-1} + U_n)$$

$$(7) \quad z_n = \ln (U_n / U_{n-1})$$

$$(8) \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$$

(con definiciones similares para $\bar{y}$ y $\bar{z}$)

$$(9) \quad S_x = \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2$$

$$(10) \quad S_{xy} = \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})$$

con definiciones similares para S_y S_z S_{xz} y S_{yz} . Entonces:

$$(11) \quad r = \frac{\bar{x}(S_{xy}S_{yz} - S_yS_{xz}) + \bar{y}(S_{xy}S_{xz} - S_xS_{yz}) + \bar{z}(S_xS_y - S_{xy}^2)}{S_xS_y - S_{xy}^2}$$

$$(12) \quad K = r \frac{(S_xS_y - S_{xy}^2)^2}{(S_{xy}S_{yz} - S_yS_{xz})(S_{xy}S_{xz} - S_xS_{yz})}$$

$$(13) \quad q = \frac{S_{xy}S_{yz} - S_yS_{xz}}{S_xS_y - S_{xy}^2}$$

Se modificaron las ecuaciones (5) y (6) para considerar la posibilidad que tanto el esfuerzo como la abundancia de alguno de dos períodos contiguos pueda tener un efecto mayor sobre el nivel de abundancia de la población futura. Además de que la media geométrica no sea la mejor medida de la abundancia a lo largo de un período de tiempo. Se prueban diferentes valores de ponderación hasta conseguir el mejor ajuste de la ecuación (4), considerando la posibilidad de que el modelo en su forma original sea el más adecuado.

$$(14) \quad x_n = p_1 E_{n-1} + p_2 E_n \quad ; \quad p_1 + p_2 = 1$$

$$(15) \quad y_n = p_3 U_{n-1} + p_4 U_n \quad ; \quad p_3 + p_4 = 1$$

donde p_1, p_2, p_3, p_4 son los coeficientes de ponderación.

Para el cálculo del esfuerzo (EE), abundancia (UE) y población (XE) en equilibrio se utilizaron las ecuaciones:

$$(16) \quad EE = \frac{r}{2q} \quad ; \quad UE = \frac{qK}{2} \quad ; \quad XE = \frac{K}{2}$$

La varianza se calculó con:

$$(17) \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-3} S_1(\hat{r}, \hat{K}, \hat{q})$$

Para la obtención de los límites de confianza de r, K, q se empleó

$$(18) \quad S_1(r, K, q) - S_1(\hat{r}, \hat{K}, \hat{q}) \leq 3\sigma^2 F_{\alpha}(3, N-3)$$

y como medida del éxito del modelo

$$(19) \quad I = \frac{S_1(\hat{r}, \hat{K}, \hat{q})}{S_z}$$

que representa la fracción de varianza no explicada de la variable z , definida en la ecuación (7).

En lo que respecta al modelo dinámico, se utilizó en principio el descrito por Clark (1976), Beltrami (op. cit.)

y Dorfman (op. cit.). El objetivo es encontrar el valor máximo de la expresión que representa el valor presente (VP) de las capturas de un período de tiempo al reconocer que las ganancias futuras tienen un valor en el presente y que puede representarse así (Clark, 1976):

$$(20) \quad VP = G e^{-\delta t}$$

donde

G = ganancia

i = tasa de interés anual

δ = tasa de descuento = $\ln(1+i)$

t = tiempo

por lo tanto la expresión a maximizar (función objetivo) es de acuerdo a Beltrami (op. cit.):

$$(21) \quad VP = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} (qPX - c) E \, dt$$

donde

q = coeficiente de capturabilidad

P = precio

c = costo por unidad de esfuerzo

X = biomasa tons.

E = esfuerzo DNP

La función Objetivo está sujeta a las siguientes condiciones

$$(22) \quad \frac{dx}{dt} = f(X) - qEX$$

$$0 \leq E(t) \leq 35,000 \text{ DNP}$$

$$0 \leq X(t)$$

donde $f(X) = rX(1-X/K)$ ecuación logística
 r = tasa instantánea de crecimiento poblacional
 K = capacidad de carga

Se consideraron tres casos distintos:

- a) coeficiente de capturabilidad constante
- b) coeficiente de capturabilidad en función inversa al nivel de población
- c) coeficiente de capturabilidad en función del nivel de esfuerzo de pesca.

De acuerdo a la Teoría del Control Óptimo, la función Objetivo (VP) es la expresión a maximizar y $E(t)$ es la función control a determinar que maximiza las ganancias de la

pesquería llevadas a valor actual.

Para esto se define el Hamiltoniano (Beltrami, op. cit.)

$$(23) \quad H(X, \lambda, E) = -\lambda_0 e^{-\delta t} (qPX - c)E + \lambda(f(X) - qEX)$$

donde λ es una función desconocida (variable adjunta) que se determinará para cumplir las dos condiciones de maximización:

$$(24) \quad \frac{\partial H}{\partial E} = 0$$

(de donde se obtiene λ y su derivada)

$$(25) \quad \frac{d\lambda}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial X}$$

Se trabajó este modelo con los parámetros biológico-pesqueros obtenidos con el modelo de Schnute (op. cit.) modificado con las ecuaciones (14 y 15) en lugar de (5 y 6) y como parámetros económicos se consideró como precio de la tonelada de atún, 800, 900 y 1000 dólares que cubren el rango de fluctuación del precio en la última década. En cuanto a los costos, se determinó un costo por día normal de pesca de 10,000 dólares que incluye un 10 por ciento como costo de oportunidad en base a estimaciones de Hudgins

(op.cit). Además se modificó la función objetivo haciendo al coeficiente de capturabilidad variar en función de la biomasa del stock por un lado y del esfuerzo de pesca por otro. La solución del sistema de ecuaciones diferenciales, integrado por la derivada de la biomasa en el tiempo y derivada del esfuerzo en función del tiempo, es obtenida por vía numérica empleando el método Predictor-Corrector con el algoritmo de Adams de cuarto orden (Hornbeck, 1975). La determinación del tipo de estabilidad de los puntos de equilibrio se hizo determinando el Jacobiano del sistema de ecuaciones diferenciales (Sacks, 1989) para después determinar los eigenvalores.

IV. RESULTADOS

IV.1 Estimación de parámetros

El proceso de estandarización del esfuerzo de pesca da por resultado la estimación del mismo en días normales de pesca de toda la flota Internacional que opera en el Océano Pacífico Oriental en el período 1980-1990. En la tabla I se presenta esta información, así como la captura y Captura Por Unidad de Esfuerzo (U) correspondientes del Atún Aleta Amarilla (AAA). Es notoria la baja de los valores de captura y U en 1982 y 1983 con el posterior aumento sustancial de los mismos y la semiestabilización del esfuerzo entre 15 y 18 mil días normales de pesca (DNP).

TABLA I

Esfuerzo, captura y captura por unidad de esfuerzo del atún aleta amarilla en el océano Pacífico oriental 1980-1990.

ANO	ESFUERZO	CAPTURA	U
1980	37567	159661	4.25
1981	23411	172779	7.38
1982	32851	125492	3.82
1983	18849	94245	5.00
1984	15746	145653	9.25
1985	18133	218323	12.04
1986	11216	218057	19.44
1987	16069	268204	16.69
1988	24942	287582	11.53
1989	18095	284861	15.74
1990	17489	294000	16.81

Al aplicar el modelo de producción de Schnute (op. cit.) modificado para considerar ponderación del esfuerzo y de la abundancia, se obtienen las estimaciones de los parámetros biológico-pesqueros r (tasa de crecimiento poblacional), K (capacidad de carga del medio ambiente), q (coeficiente de capturabilidad), Captura Máxima en Equilibrio (CME) y esfuerzo correspondiente (EE), además de algunos estadísticos que permiten estimar el grado de ajuste del modelo y rangos de confianza de los parámetros antes mencionados. (Tabla II)

TABLA II

Estimaciones biológico-pesqueras y estadísticas obtenidos con el modelo de Schnute (op. cit.) modificado.

PARAMETROS ESTIMADOS	VALORES	PARAMETROS OTRAS FUENTES
Tasa de crecimiento poblacional	$r = 1.9947 \pm 0.4$ $\alpha=0.05$	$r = 2.6$ (Schaefer, 1967)
Capacidad de carga	$K = 539896 \pm 150000$ $\alpha=0.05$	$K = 600000$ (Francis, 1976, en Cole, 1980)
Coefficiente de capturabilidad	$q = 0.000061 \pm 0.00002$ $\alpha=0.05$	$q = 0.000039$ (Anonimo, 1988a)
Esfuerzo en equilibrio	$EE = 16203$ DNP	
Captura por unidad de esfuerzo en equilibrio	$UE = 16.62$ tons/DNP	
Biomasa en equilibrio	$XE = 269948$ tons	
Captura máxima en equilibrio	$CME = 269226$ tons	
Suma de cuadrados (ecuación 4)	$S_1(r, K, q) = 0.36498$	
Varianza	$\sigma^2 = 0.1$	
Indice de ajuste	$I = 0.23$	
Factores de ponderación	$P_1 = 0.8$ $P_2 = 0.2$ $P_3 = 0.0$ $P_4 = 1.0$	

La curva de capturas en equilibrio en función del esfuerzo de pesca (figura 1) se determina al resolver la siguiente ecuación que representa el estado estacionario de la población en términos del crecimiento propio del recurso (función logística) y de la captura.

$$(26) \quad \frac{dX}{dt} = rX(1-X/K) - qEX = 0$$

En la misma figura se presentan las capturas reales y esfuerzo total estimado del período 1980-1990. Las capturas han fluctuado bajo y sobre la Captura Máxima en Equilibrio CME (269,226 tons.) pero el esfuerzo desde 1983 es cercano al esfuerzo en equilibrio correspondiente (16,203 DNP).

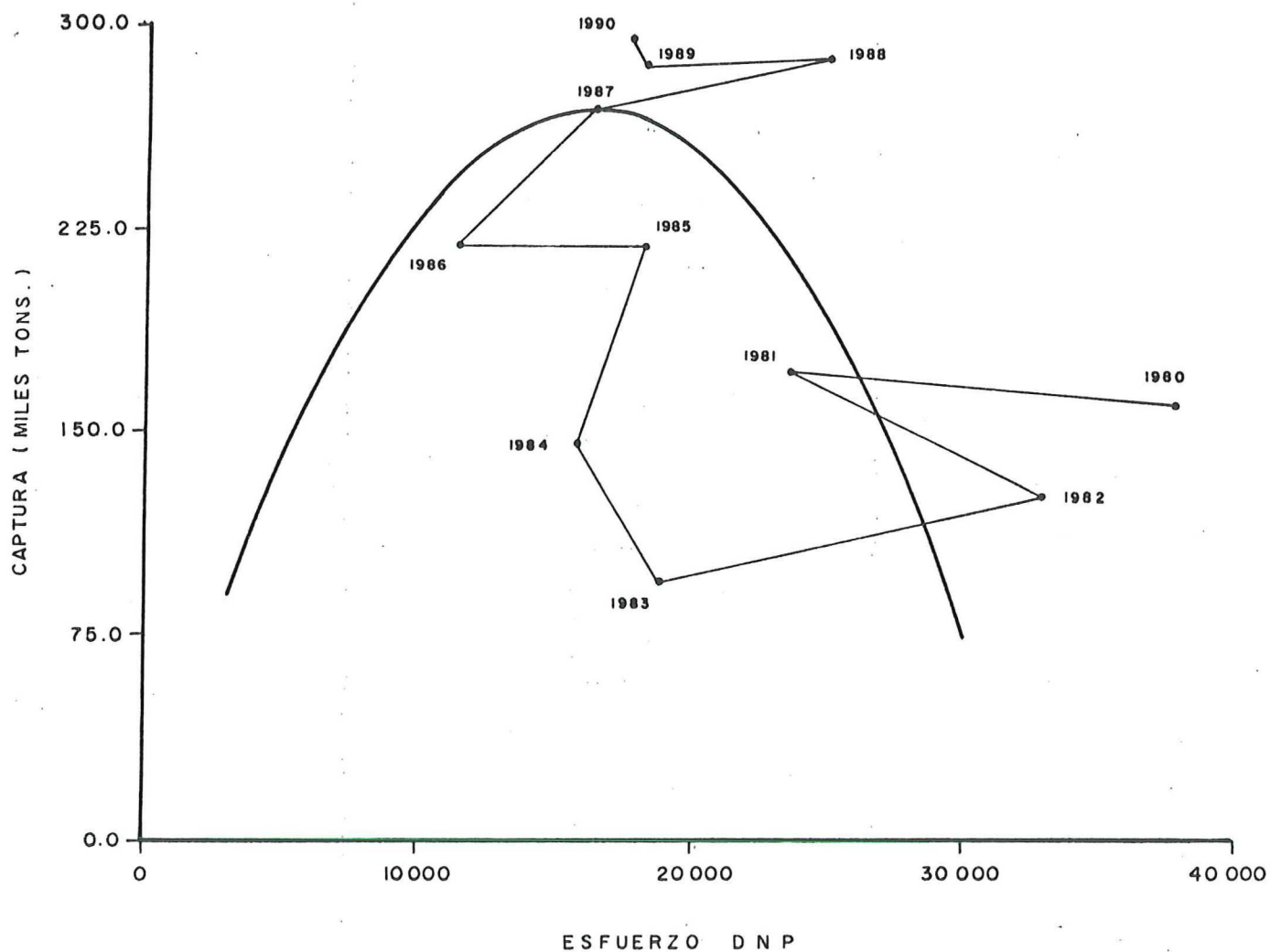


Figura 1. Capturas de AAA en el Océano Pacífico Oriental durante 1980-1990 y curva de capturas en equilibrio utilizando el modelo de Schnute.

IV.2 Modelos bioeconómicos

IV.2.1 Coeficiente de capturabilidad constante

En lo referente a este modelo, la expresión a maximizar que representa el valor presente de los réditos netos de la pesquería es:

$$(27) \quad VP = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} (qPX - c) E \, dt$$

sujeto a las siguientes condiciones

$$(28) \quad \frac{dX}{dt} = rX(1 - X/K) - qEX$$

$$0 \leq E(t) \leq 35,000 \text{ DNP}$$

$$0 \leq X(t)$$

donde:

$$r = 1.9947$$

$$K = 539,896$$

$$q = 0.000061$$

se obtiene el Hamiltoniano

$$(29) \quad H(X, \lambda, E) = -\lambda_0 e^{-\delta t} (qPX - c)E + \lambda(rX(1 - X/K) - qEX)$$

donde : $\lambda_0 = -1$ (Beltrami, op. cit.)

de acuerdo a la primera condición para encontrar el máximo (ecuación 24):

$$(30) \quad \frac{\partial H}{\partial E} = e^{-\delta t} (qPX - c) - \lambda qX = 0$$

de donde

$$(31) \quad \lambda = \frac{e^{-\delta t} (qPX - c)}{qX}$$

derivando

$$(32) \quad \frac{d\lambda}{dt} = \frac{qX(-\delta e^{-\delta t} (qPX - c) + e^{-\delta t} (qPX')) - e^{-\delta t} (qPX - c)(qX')}{q^2 X^2}$$

donde $X' = dX/dt$ (ecuación 22)

de acuerdo a la segunda condición para encontrar el máximo (ecuación 25)

$$(33) \quad \frac{d\lambda}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial X} = - \left[e^{-\delta t} qPE + \lambda \left(rX - \frac{2rX}{K} - qE \right) \right]$$

sustituyendo (31) en (33) e igualando (32) con (33) y desarrollando se obtiene

$$(34) \quad X^2 \left[- \frac{2Pr}{K} \right] + X \left[- \delta P + \frac{cr}{qK} + Pr \right] + \frac{\delta c}{q} = 0$$

ésta es una ecuación cuadrática en X cuya solución es el tamaño óptimo de población (X^*) y el esfuerzo óptimo correspondiente (E^*) se determina con

$$(35) \quad E^* = rX^*(1-X^*/K)/qX^*$$

y la captura en equilibrio correspondiente (C^*)

$$(36) \quad C^* = qE^*X^*$$

de acuerdo a Clark (1976) y Beltrami (op. cit.) la solución es de BANG-BANG, es decir que si la población se encuentra sobre X^* se debe aplicar el esfuerzo máximo y si está por debajo no debe haber explotación para llevar al recurso al nivel X^* lo más rápido posible.

$$(37) \quad E(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } X(t) < X^* \\ E_{\max} & \text{si } X(t) > X^* \\ E^* & \text{si } X(t) = X^* \end{cases}$$

En la tabla III se presenta X^* , C^* y E^* calculados para diferentes precios y tasas de descuento.

TABLA III

Biomasa, captura y esfuerzo óptimos determinados de acuerdo al precio por tonelada de atún y a la tasa de descuento, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.

δ	X^*	C^*	E^*	X^*	C^*	E^*	X^*	C^*	E^*
	PRECIO 800 dls			PRECIO 900 dls			PRECIO 1000 dls		
0.0	371491	231137	10108	360209	239133	10785	351183	244852	11327
0.1	365478	235516	10470	353585	243388	11184	344040	248950	11756
0.2	359706	239467	10816	347215	247175	11566	337159	252543	12169
0.3	354172	243024	11148	341096	250530	11933	330539	255669	12567
0.4	348871	246220	11466	335227	253489	12285	324180	258367	12949
0.5	343797	249084	11771	329603	256085	12623	318079	260674	13315
0.6	338945	251644	12062	324220	258350	12946	312235	262626	13666
0.7	334307	253929	12341	319073	260317	13255	306643	264258	14001
0.8	329879	255963	12607	314155	262012	13550	301297	265602	14322
0.9	325650	257769	12860	309460	263465	13832	296193	266688	14620
1.0	321616	259370	13102	304981	264698	14101	291324	267544	14925

Se observa que la biomasa óptima va en disminución, al aumentar la tasa de descuento y que la misma tendencia se da con un aumento de precio (figura 2). Por el contrario la C^* y el E^* , figura 3 y 4 respectivamente, van en aumento en función de un incremento tanto de la tasa de descuento como del precio.

El análisis de sensibilidad, variación porcentual de la estimación de X^* de acuerdo a la variación de cada parámetro del modelo, da por resultado (Tabla IV) que el aumento de r y de K producen un incremento del valor de X^* y lo contrario

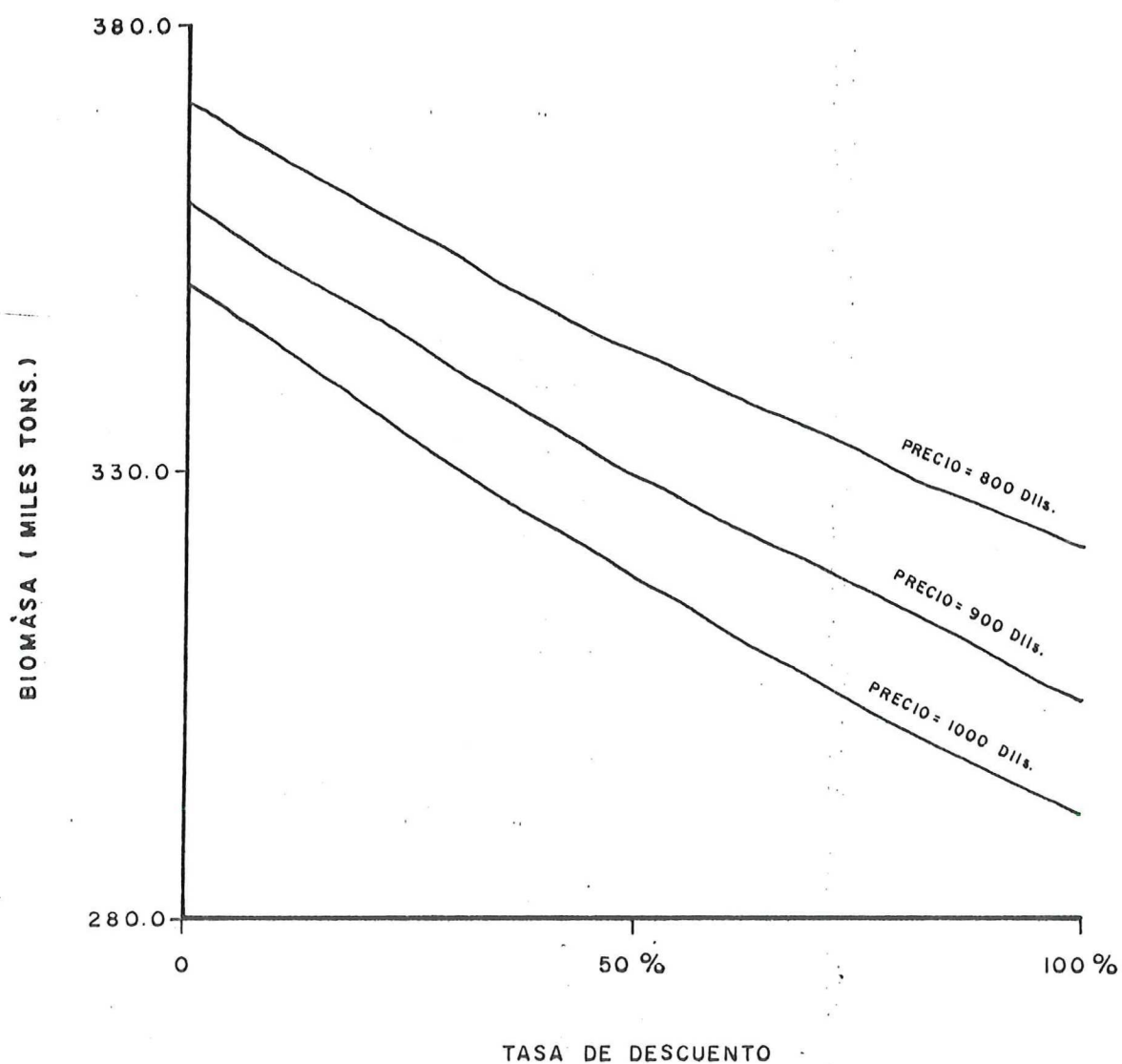


Figura 2. Curvas de biomasa óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.

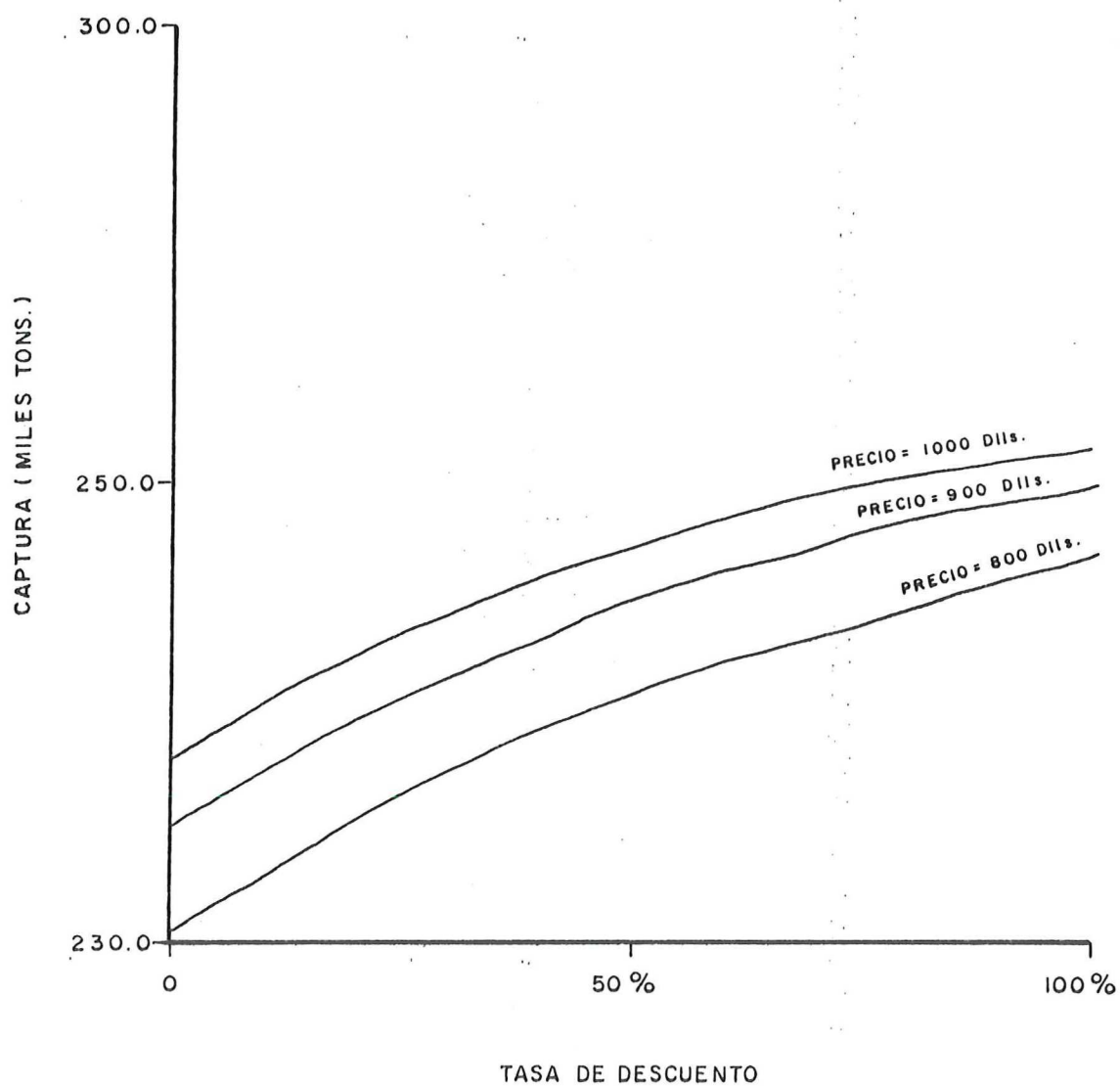


Figura 3. Curvas de captura óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.

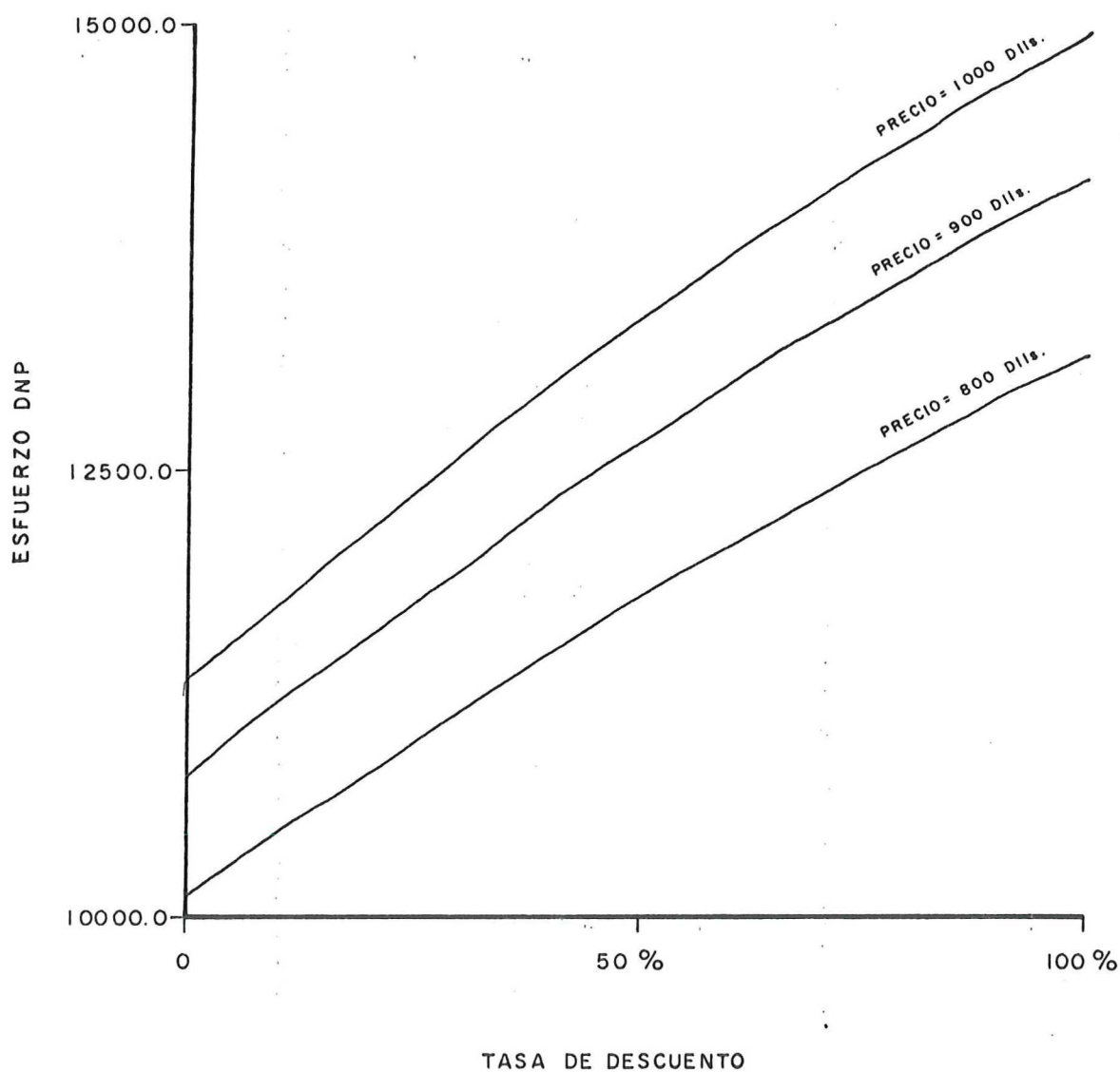


Figura 4. Curvas de esfuerzo óptimo en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.

sucede con una variación de q , del precio y de la tasa de descuento. El efecto mayor lo produce K y el menor la tasa de descuento. La respuesta o solución óptima en todos los casos responde de manera lineal a los incrementos de los parámetros considerados, aunque en la tabla solo se presentan los cambios debidos a un 10% de variación de los mismos.

TABLA IV

Variación de la biomasa óptima en función de un incremento de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad constante.

PARAMETROS	PORCENTAJE DE CAMBIO EN LA BIOMASA OPTIMA
r	+ 0.2%
K	+ 7.3%
q	- 2.6%
P	- 2.2%
δ	- 0.1%

IV.2.2 Coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa

Una solución al modelo anterior de acuerdo a Clark (1976) se obtiene resolviendo

$$(38) \quad F'(X) - \frac{c'(X)F(X)}{1-c(X)} = \delta$$

donde $F'(X)$ es la derivada de la ecuación logística y $c(X)=c/qX$ es el costo por unidad de biomasa capturada al nivel X de población.

La misma ecuación es válida cuando el coeficiente de capturabilidad es función de la biomasa solo que

$$(39) \quad c(X) = c/(X \cdot q(X))$$

donde

$$(40) \quad q(X) = a-bX = 0.00007-(0.00002/0.000000)E$$

desarrollando la ecuación, X^* es solución de

$$(41) \quad r - \frac{2rX}{K} - \left[\frac{1}{(a-bX)} \left(-\frac{c}{X^2} \right) + \frac{bc}{X(a-bX)^2} \right] \left[rX - \frac{rX^2}{K} \right] = \delta$$

$$P = \frac{c}{(a-bX)X}$$

Se obtiene X^* , C^* y E^* en función de la tasa de descuento y del precio (tabla V) a partir de las ecuaciones (41), (37) y (36) respectivamente.

TABLA V

Biomasa, captura y esfuerzo óptimos determinados de acuerdo al precio por tonelada de atun y a la tasa de descuento, considerando al coeficiente de capturabilidad en función inversa de la biomasa.

δ	X^*	C^*	E^*	X^*	C^*	E^*	X^*	C^*	E^*
	PRECIO 800 dls			PRECIO 900 dls			PRECIO 1000 dls		
0.0	389000	216867	7964	376000	227679	8650	365000	235852	9231
0.1	383500	221504	8254	369500	232616	8993	358000	240587	9600
0.2	377500	226495	8571	363600	237242	9336	351000	244961	9969
0.3	372000	230754	8861	357000	241234	9653	344500	248698	10313
0.4	366500	234790	9151	351000	244961	9969	338000	252122	10656
0.5	361500	238255	9415	345000	248421	10286	331500	255235	10999
0.6	356500	241555	9679	339500	251360	10576	325500	257831	11315
0.7	352000	244358	9917	334000	254074	10867	320000	259976	11606
0.8	347000	247297	10181	329000	256349	11131	314000	262063	11922
0.9	342500	249785	10418	324000	258438	11395	309000	263598	12186
1.0	338500	251870	10629	319000	260343	11658	303500	265073	12477

En la figura 5 se observa el decremento de X^* en función de un incremento de la tasa de descuento y del precio y lo contrario sucede con C^* y E^* (figuras 6 y 7 respectivamente).

El análisis de sensibilidad, Tabla VI, indica que un incremento de r , K y de la abscisa (a) en la función de q producen un aumento de X^* mientras que el incremento de precio, de la pendiente (b) en la función de q y de la tasa de descuento provocan lo contrario. El efecto mayor es producido por el cambio de K y de la abscisa (a) y el menor por el de la tasa de descuento. Al igual que en el caso anterior, los cambios en el valor de la biomasa óptima son lineales con respecto a los cambios de cada parámetro considerado.

TABLA VI

Variación de la biomasa óptima en función de un incremento de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad variable en función de la biomasa.

PARAMETROS	PORCENTAJE DE CAMBIO EN LA BIOMASA OPTIMA
r	+ 0.1%
K	+ 7.9%
a	- 3.7%
b	+ 0.9%
P	- 2.8%
δ	- 0.3%

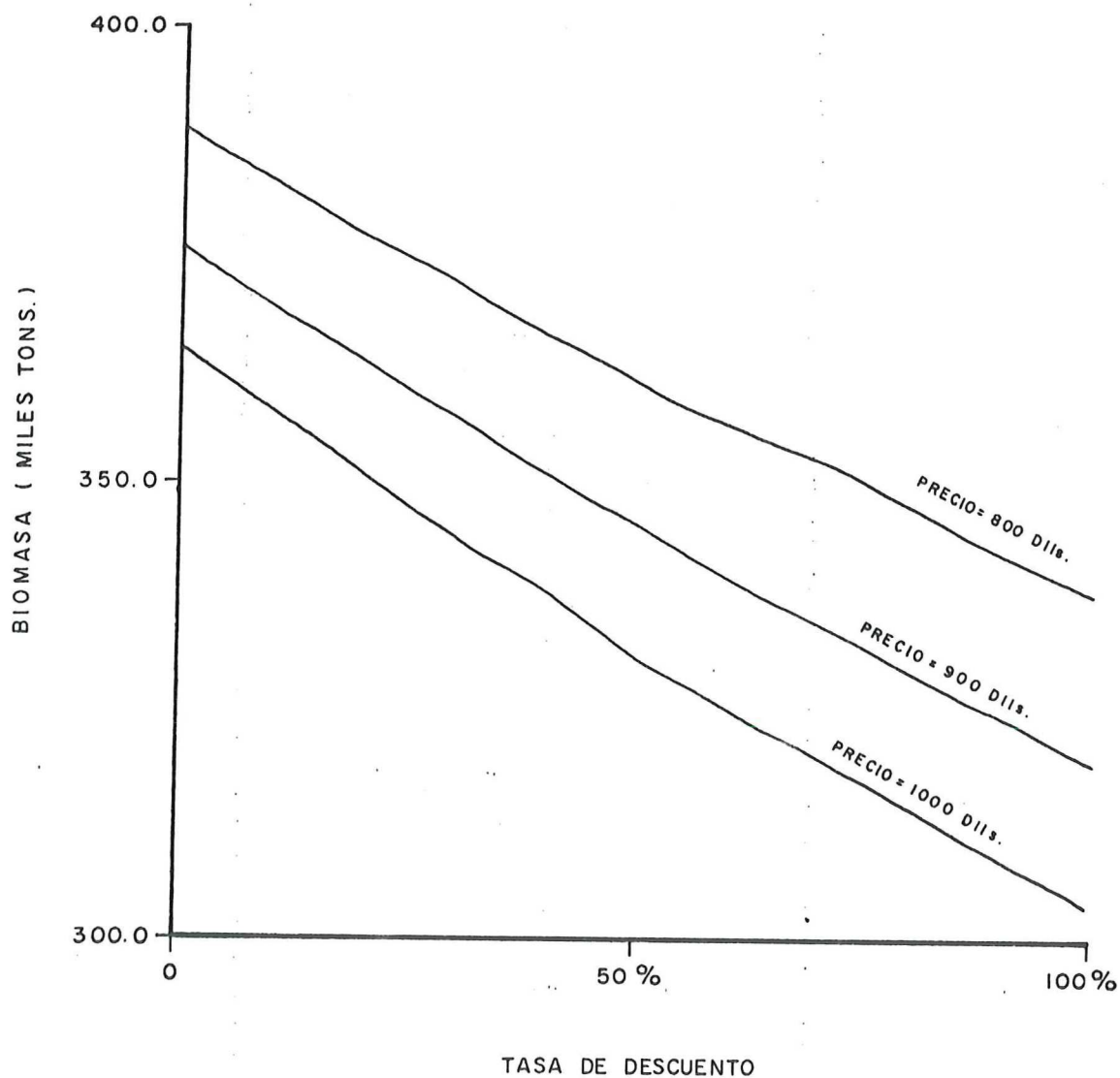


Figura 5. Curvas de biomasa óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad constante.

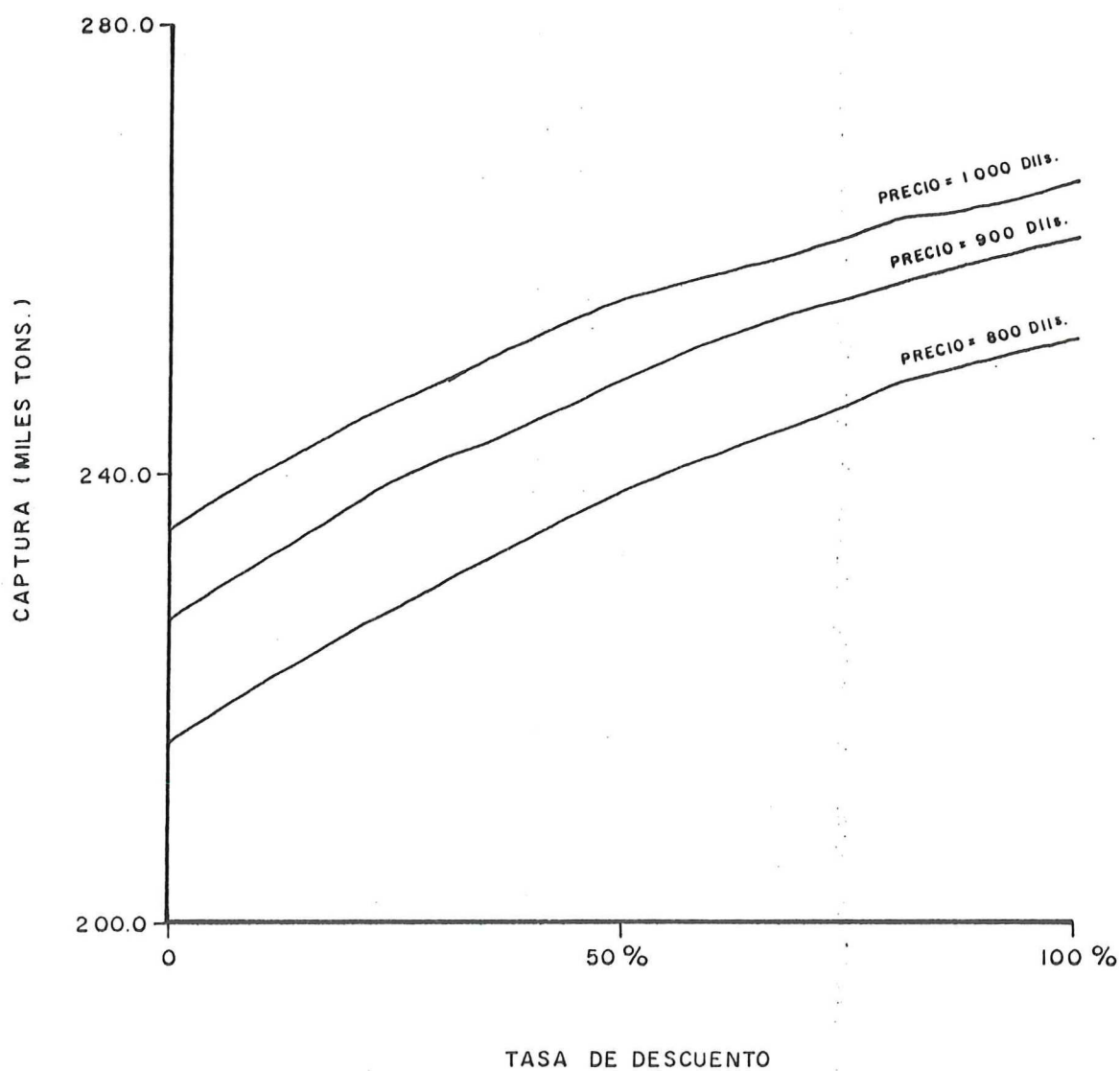


Figura 6. Curvas de captura óptima en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa.

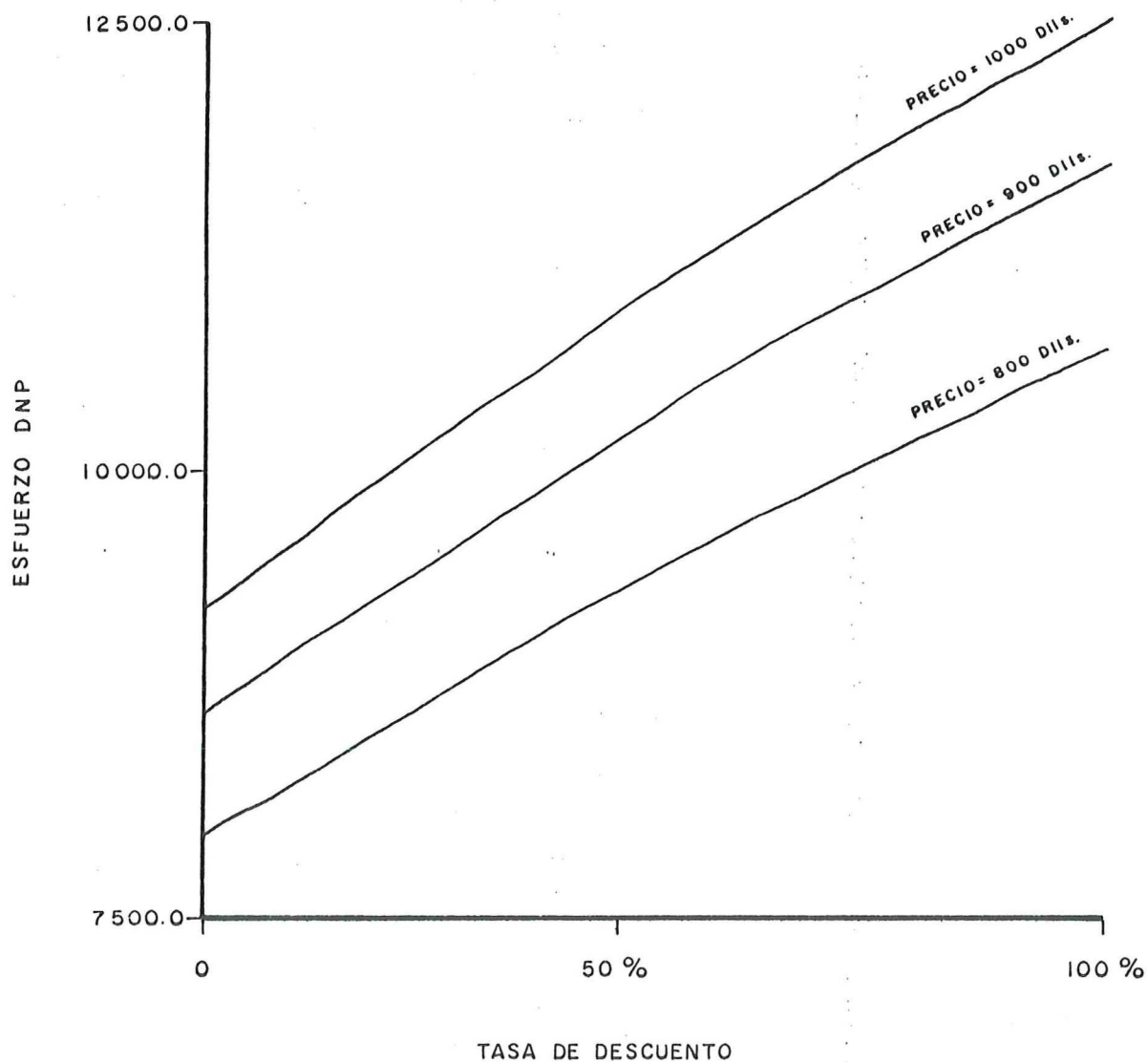


Figura 7. Curvas de esfuerzo óptimo en función de la tasa de descuento y del precio de la tonelada de AAA, considerando al coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa.

IV.2.3 Coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo

Se consideró la ecuación de una recta como la función que describe la variación del coeficiente de capturabilidad con respecto al esfuerzo de pesca, de donde la expresión a maximizar vía el control del esfuerzo de pesca es:

$$(42) \quad VP = \int_0^{\infty} e^{-st} (qPX - c)E \, dt$$

sujeto a las siguientes condiciones:

$$(43) \quad \frac{dX}{dt} = rX(1 - X/K) - qEX$$

$$0 \leq E(t) \leq 35,000$$

$$0 \leq X(t)$$

$$r = 1.9947$$

$$K = 539,896$$

$$q = a + bE = 0.00005 + (0.00002/80000)E$$

quedando el Hamiltoniano como

$$(44) \quad H(X, \lambda, E) = -\lambda_0 e^{-\delta t} (qPX - c)E + \lambda (rX(1 - X/K) - qEX)$$

donde : $\lambda_0 = -1$ (Beltrami, op. cit.)

de acuerdo a la primera condición de maximización (ecuación 24):

$$(45) \quad \frac{\partial H}{\partial E} = e^{\delta t} (qPX - c) + e^{-\delta t} EPX \frac{\partial q}{\partial E} + \lambda \left(-\frac{\partial q}{\partial E} EX - qX \right) = 0$$

de donde se obtiene

$$(46) \quad \lambda = - \frac{e^{-\delta t} (qPX - c + EPX (\partial q / \partial E))}{((- \partial q / \partial E) EX - qX)}$$

y derivando

$$(47) \quad \frac{d\lambda}{dt} = \left\{ \left[(- \partial q / \partial E) - qX \right] \left[-e^{-\delta t} (q'PX + qPX' + EPX (\partial q / \partial E) + EPX' (\partial q / \partial E) + EPX (\partial q / \partial E)' + se^{\delta t} (qPX - c + EPX (\partial q / \partial E)) \right] + e^{-\delta t} [qPX - c + EPX (\partial q / \partial E)] \dots \right. \\ \left. \left[-(\partial q / \partial E)' EX - (\partial q / \partial E) E' X - (\partial q / \partial E) EX' - q'X - qX' \right] \right\} / \left[(- \partial q / \partial E) EX - qX \right]^2$$

de acuerdo a la segunda condición de maximización (ecuación 25):

$$(48) \quad \frac{\partial H}{\partial X} = e^{-\delta t} E q P + \lambda (r - 2rX/r - qE) = 0$$

sustituyendo (46) en (48) e igualando (47) con (48) y desarrollando se obtiene

$$(49) \quad \frac{dE}{dt} = \left\{ -\delta a c + X(\delta P a^2 - a c r / K - a^2 r P) + X^2(2 a^2 P r / K) + E(2 \delta b c) + \dots \right. \\ \left. E X(-4 \delta a b P + 2 b c r / K + 4 a b r P) - E X^2(8 a b P r / K) + \dots \right. \\ \left. E^2 X(4 \delta b^2 P - 4 r b^2 P) + E^2 X^2(8 b^2 P r / K) \right\} / (-2 b c)$$

por lo tanto la solución a este problema de optimización se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales autónomas compuesto por las ecuaciones (43) y (49).

Se localizan los puntos de equilibrio para un análisis de estabilidad igualando las dos ecuaciones anteriores a cero. Existe un punto de equilibrio (intersección) en el campo de valores reales de esfuerzo y biomasa (variables control y estado respectivamente). El punto de equilibrio se localiza en un esfuerzo de 12,332 DNP y una biomasa de 362,709 tons.

Para analizar el tipo de estabilidad de este punto se obtiene el Jacobiano

$$\begin{vmatrix} -20.37 & -1.34 \\ 1.55 & -7.2 \end{vmatrix}$$

de donde la ecuación característica es

$$(50) \quad \lambda^2 + 27.57\lambda + 146.664 = 0$$

y los valores de los dos eigenvalores son reales y positivos, lo que implica un equilibrio inestable (Clark, 1976), también llamado punto repulsor (Sacks, op. cit).

Fuera del punto de equilibrio se forman cuatro regiones del espacio real en que se determina el sentido, a favor de las manecillas del reloj, del movimiento de la trayectoria de las variables en el espacio fase, esto de acuerdo al signo de las derivadas, (figura 8).

La región real del espacio fase es la cuenca de atracción hacia el atractor elíptico, (figura 9). Siendo la única diferencia, el lugar de entrada al atractor que depende de las condiciones iniciales. El esfuerzo de pesca en el

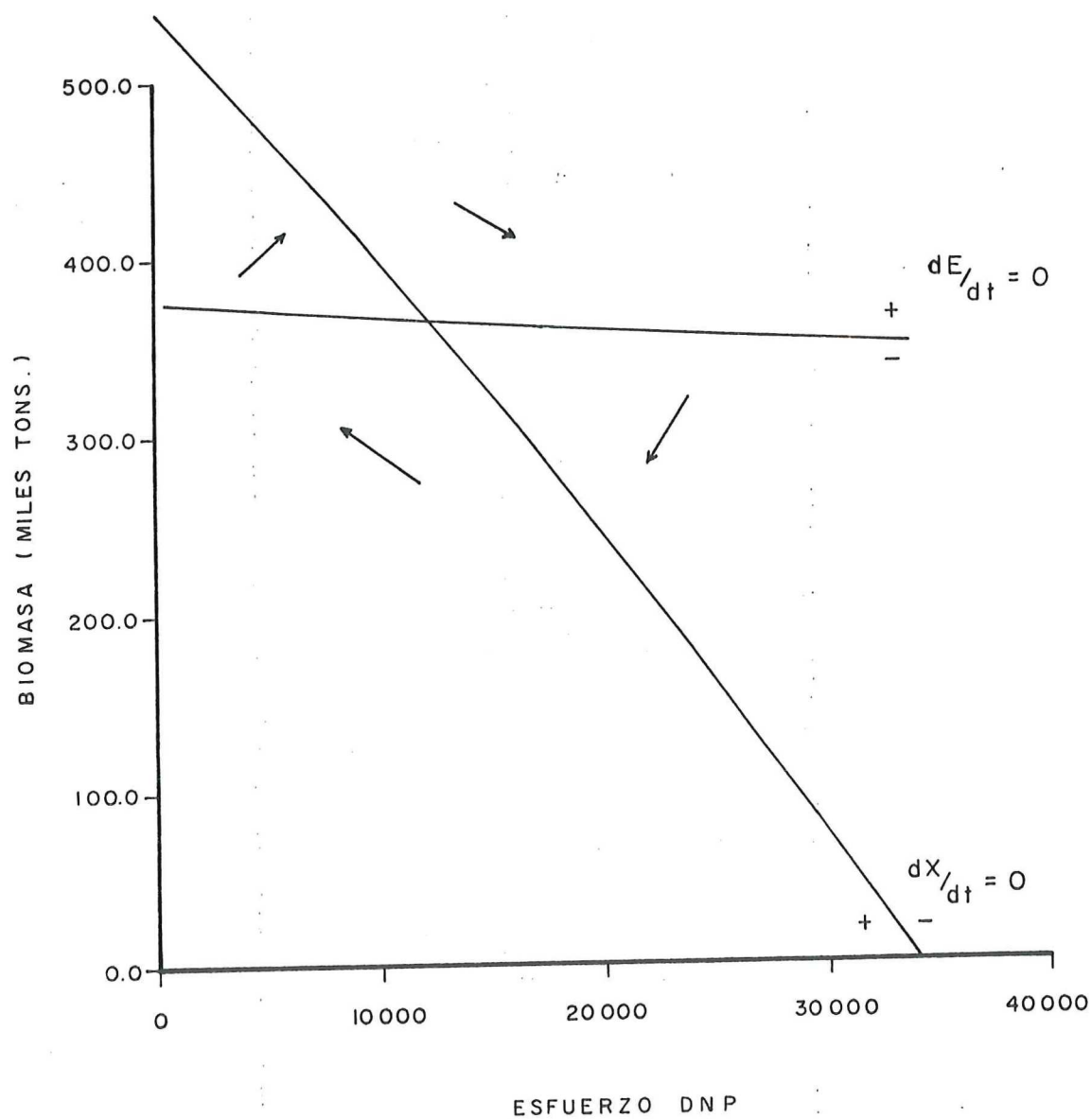


Figura 8. Localización en el espacio fase, de los puntos en que el esfuerzo y la biomasa tienen derivada igual a cero. Modelo con el coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

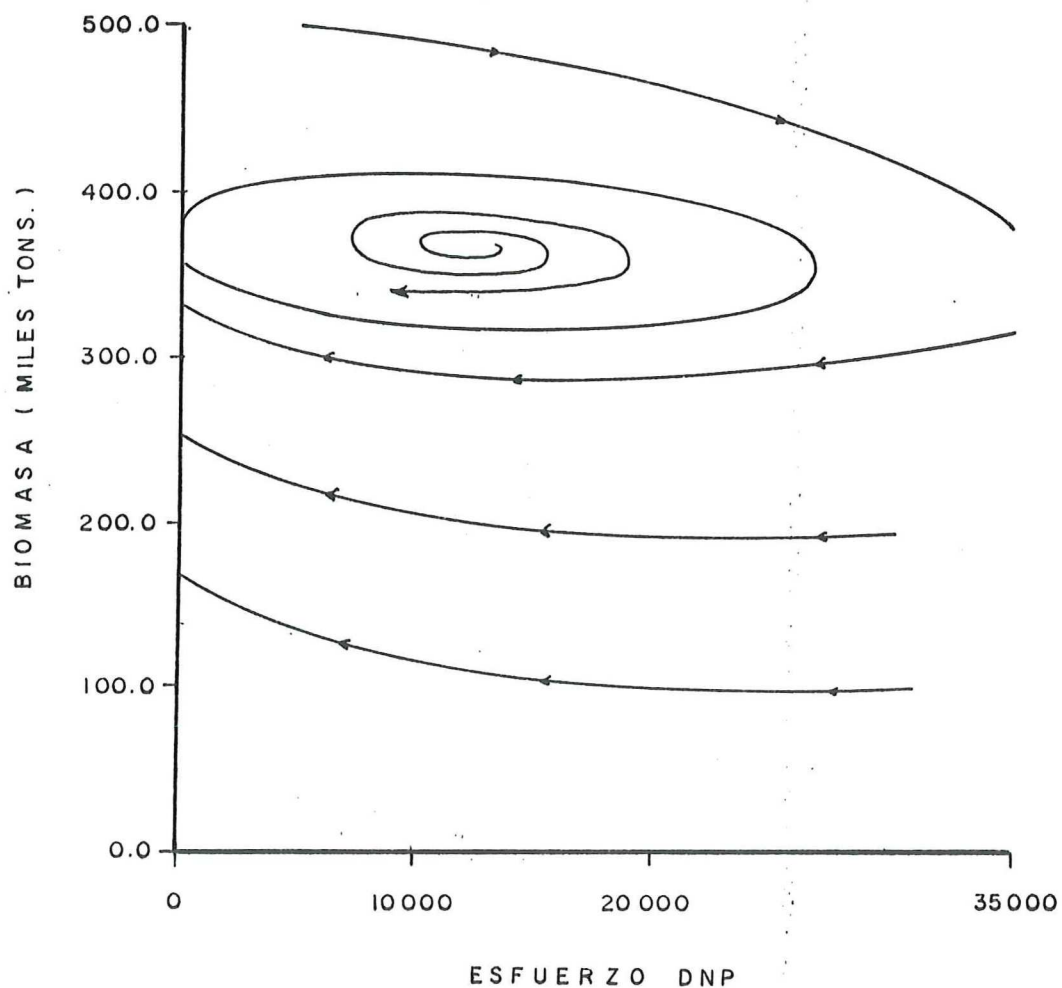


Figura 9. Atractor elíptico en el espacio fase y trayectorias producidas por algunas condiciones iniciales. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

atractor fluctúa entre 0 y 26,572 DNP mientras que la biomasa lo hace entre 313,413 y 410,636 tons. Esa misma fluctuación pero con respecto al tiempo, figuras 10 y 11, nos indica que los cambios en las variables son cíclicos y podemos apreciar en la segunda de éstas, los cambios en la captura desde 0 hasta 411,000 tons que obedecen a las fluctuaciones en el esfuerzo y nivel de abundancia del atún. Se observa, figura 12, que los máximos de esfuerzo corresponden a los puntos de inflexión del nivel de abundancia del stock y viceversa.

Si variamos la condición de esfuerzo mínimo a 10,000 DNP sin cambio en todos los demás parámetros y condiciones, se forma un elipsolde con ejes menores en comparación al anterior (figura 13). Esto implica menor variabilidad en la biomasa, entre 324,181 y 371,369 tons de acuerdo a los cambios en esfuerzo entre 10,000 y 14,738 DNP y esto implica menor fluctuación de la captura también (figura 14).

Se consideró un aumento sustancial de cada uno de los parámetros en el modelo (100 %) para distinguir cualitativamente en el espacio fase, el efecto producido por cada factor, al hacer la comparación de la trayectoria óptima ya descrita con la que se forma con las nuevas condiciones.

Se siguió la trayectoria, en todos los casos, que producen

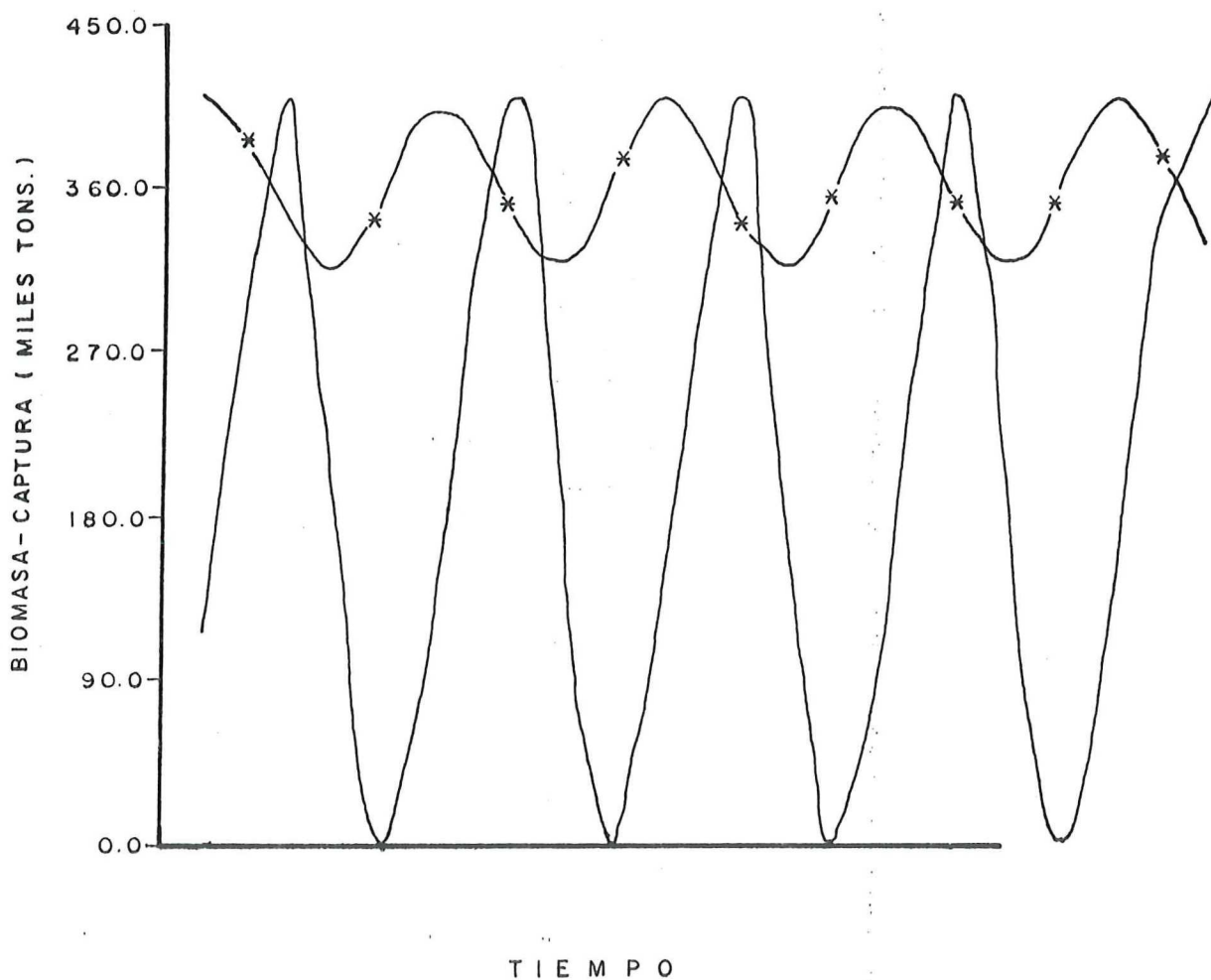


Figura 10. Biomasa (*) y captura (-) determinadas por el recorrido del atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

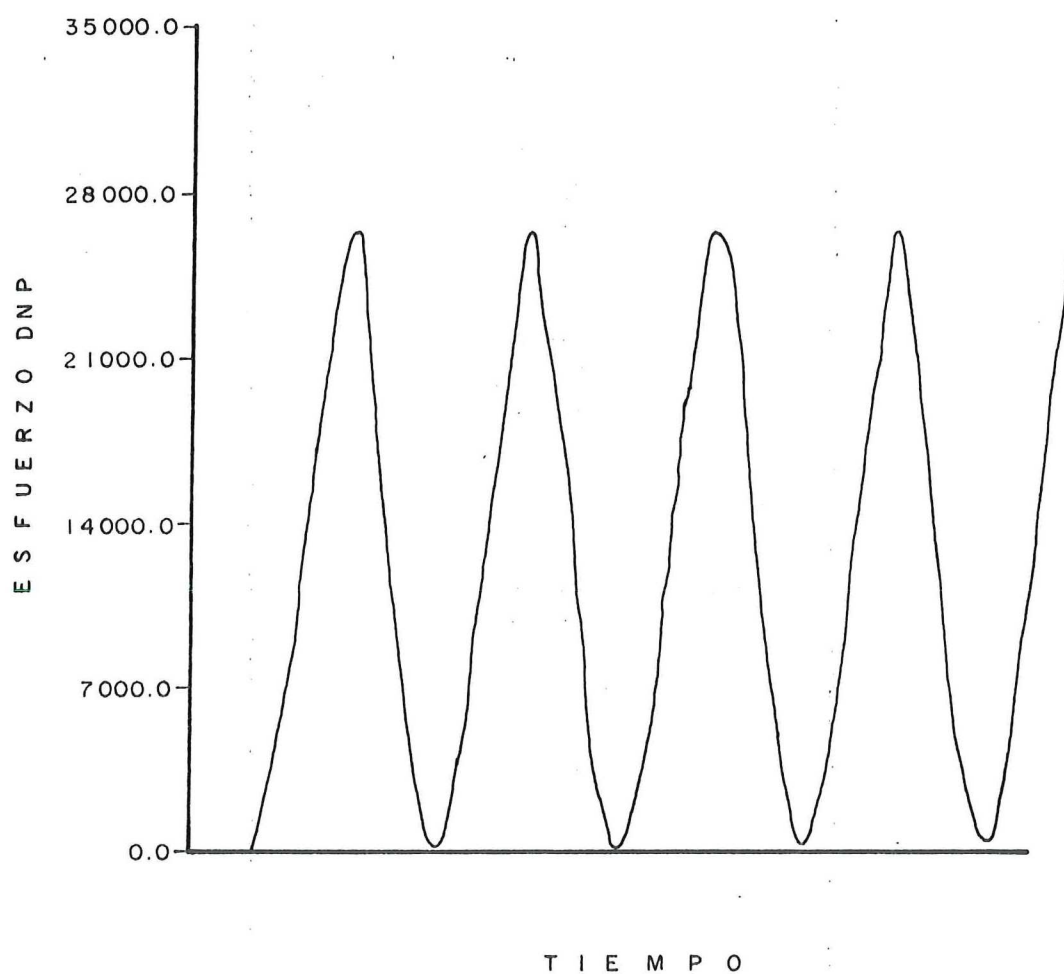


Figura 11. Comportamiento de la variable control en el atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

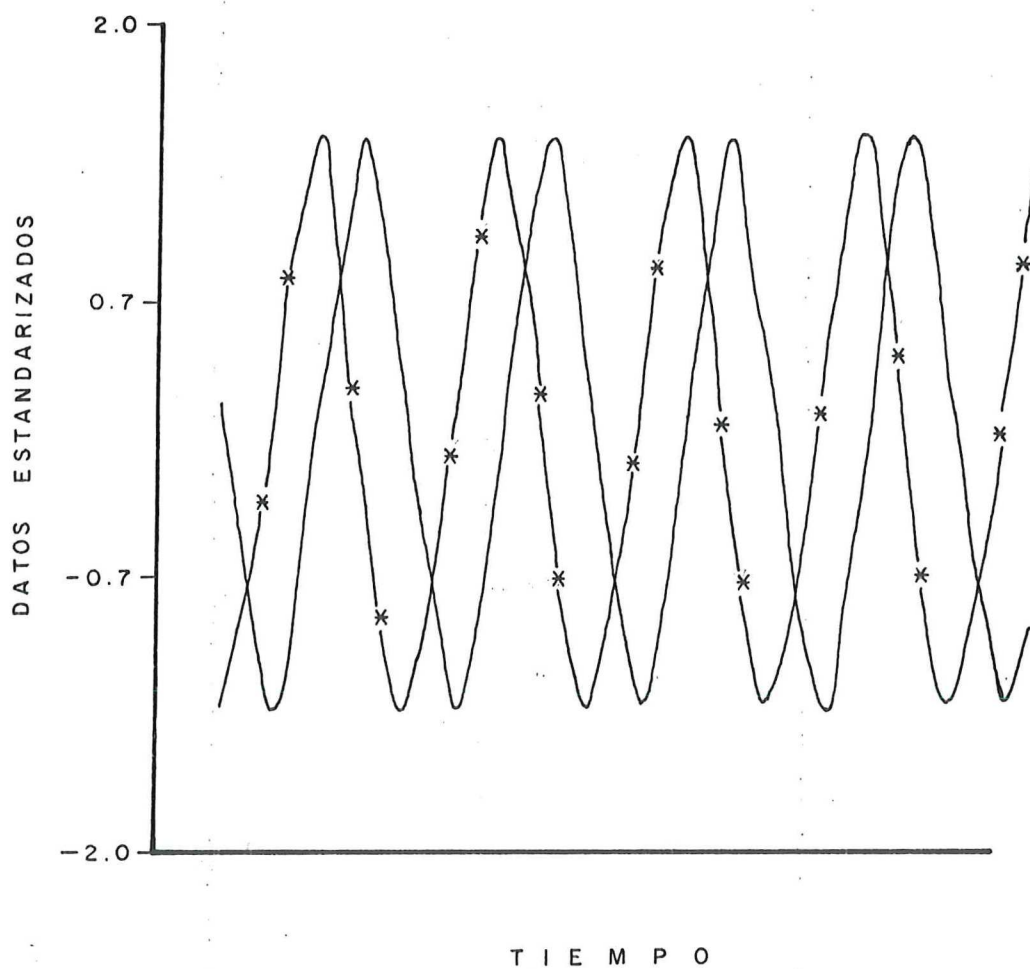


Figura 12. Biomasa (*) y esfuerzo estandarizado (-) correspondientes a sus valores en el atractor. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

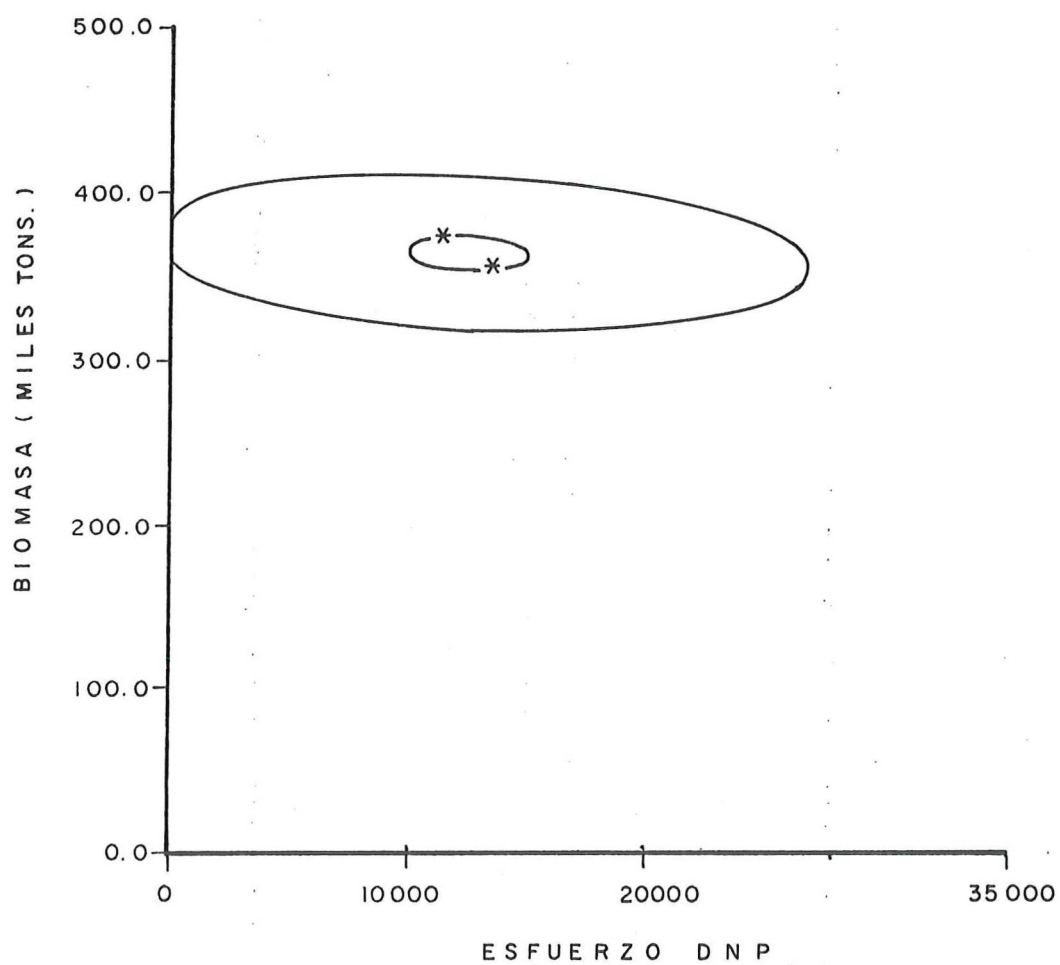


Figura 13. Atractor elíptico (*) producido con la condición de que el esfuerzo mínimo es de 10,000 DNP. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

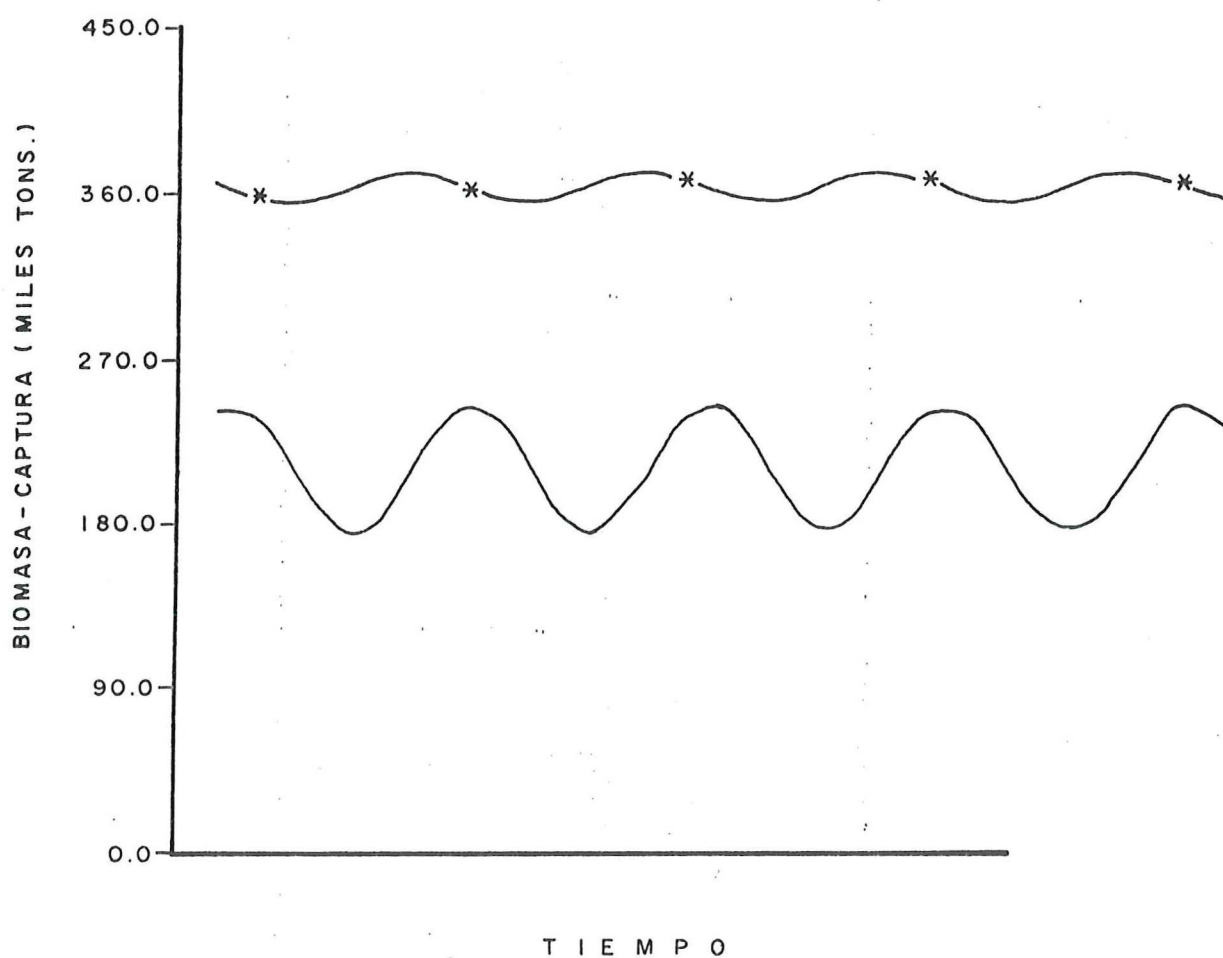


Figura 14. Biomasa (*) y captura (-), determinadas de acuerdo al atractor formado con la condición de esfuerzo mínimo de 10,000 DNP. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

las siguientes condiciones iniciales: un esfuerzo de 10,000 DNP y una biomasa de 450,000 tons.

Al aumentar de valor la tasa de crecimiento el recorrido del esfuerzo óptimo es de 13,941 hasta 35,000 DNP mientras que la biomasa responde a esos niveles de explotación en un rango de 330,239 a 382,566 tons. Este cambio en r , (figura 15), ocasiona un desplazamiento hacia la derecha en el atractor elíptico que permite esfuerzos mayores (hasta el límite fijado en las condiciones iniciales) sin modificar en gran medida los niveles de abundancia del atún.

El incremento en la capacidad de carga produce un atractor con fluctuación de 0 a 34,768 DNP y de 527,755 a 704,282 tons. en la biomasa, (figura 16). Bajo ésta nueva situación en la capacidad de carga, existe un desplazamiento alto del atractor hacia arriba y el rango de variación de la variable control alcanza prácticamente en algunas situaciones el límite máximo establecido.

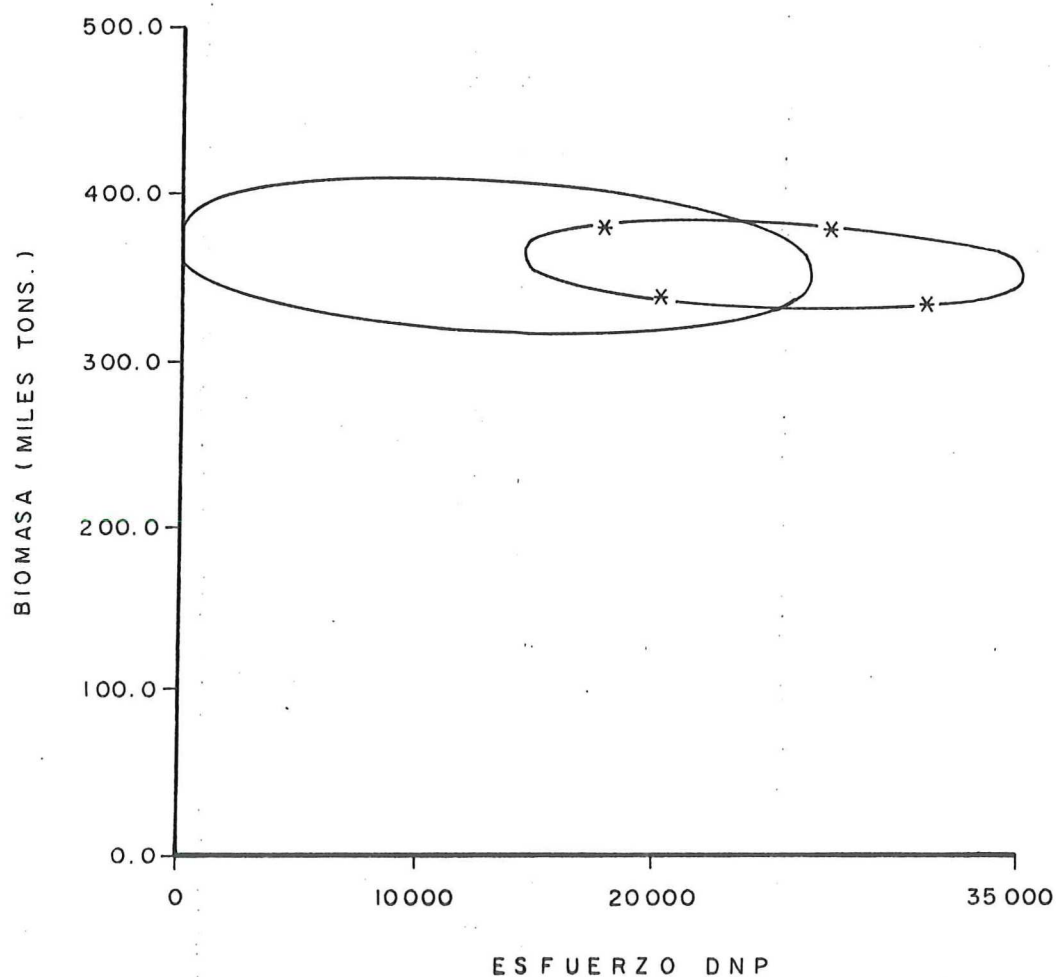


Figura 15. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro r . Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

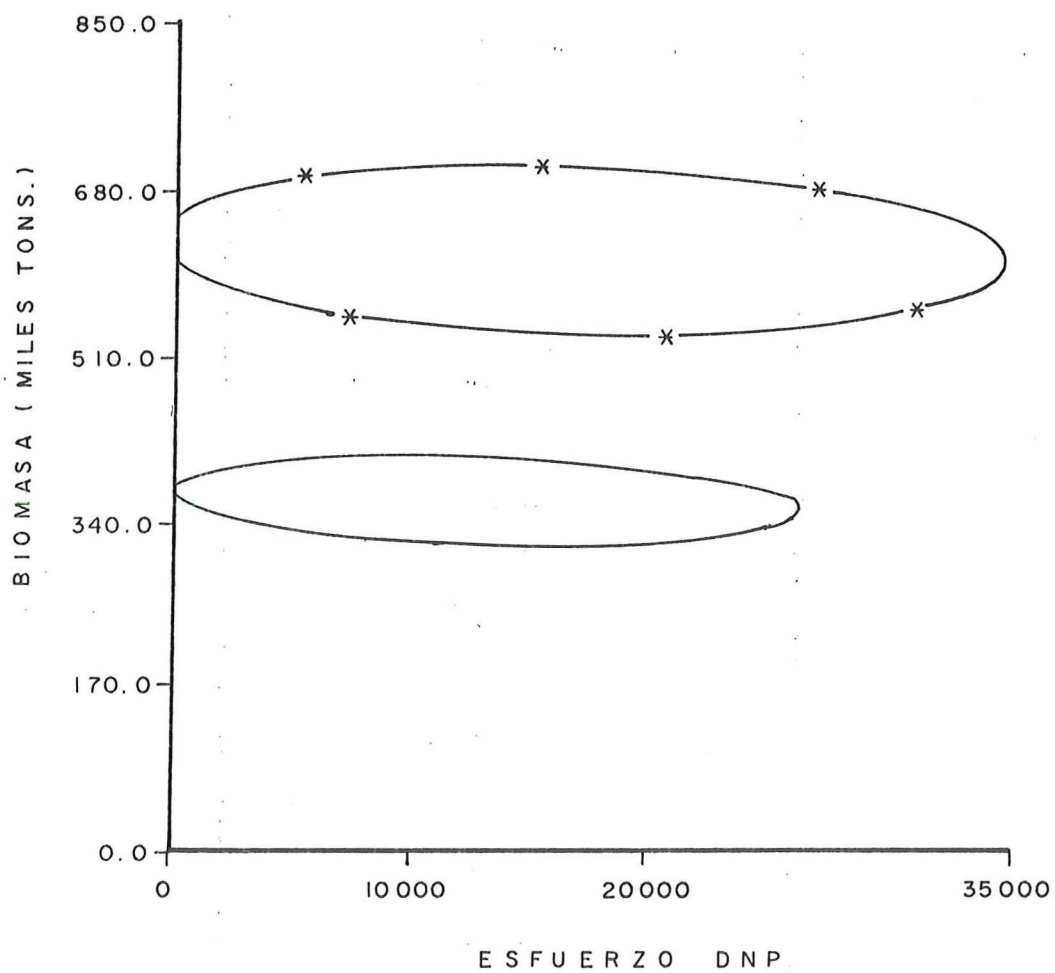


Figura 16. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro K. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

Un incremento del 100 % en la abscisa a de la función de variación del coeficiente de capturabilidad, hace fluctuar al esfuerzo entre 0 y 16,975 DNP y esto, produce una fluctuación de la biomasa de 290,538 hasta 337,775 tons. (figura 17). Se observa un decremento en los niveles de esfuerzo y de biomasa óptimos con este cambio del parámetro (a) con respecto a la situación original. Esto conforma un atractor elíptico de menor extensión.

Un incremento de 100 % en la pendiente de la recta de la misma función es causante de que el esfuerzo esté en un rango de 0 hasta 27,946 DNP y de que la biomasa varíe entre 283,178 y 419,650 tons. aunque los puntos del mismo conforman una figura elipsoidal muy semejante a la original, (figura 18).

El incremento del precio, (figura 19), produce un elipsoide en que la variable control cambia entre 0 y 34,764 DNP y la variable de estado lo hace entre 263,687 y 352,139 tons. El desplazamiento de la curva es hacia abajo con un incremento en el rango de variación del esfuerzo, que ahora puede tener el valor mínimo o máximo establecido en las condiciones del modelo.

Un aumento de la misma magnitud que en los casos anteriores, en la tasa de descuento provoca que el rango de fluctuación del esfuerzo de pesca sea de 0 hasta 27,951 DNP y

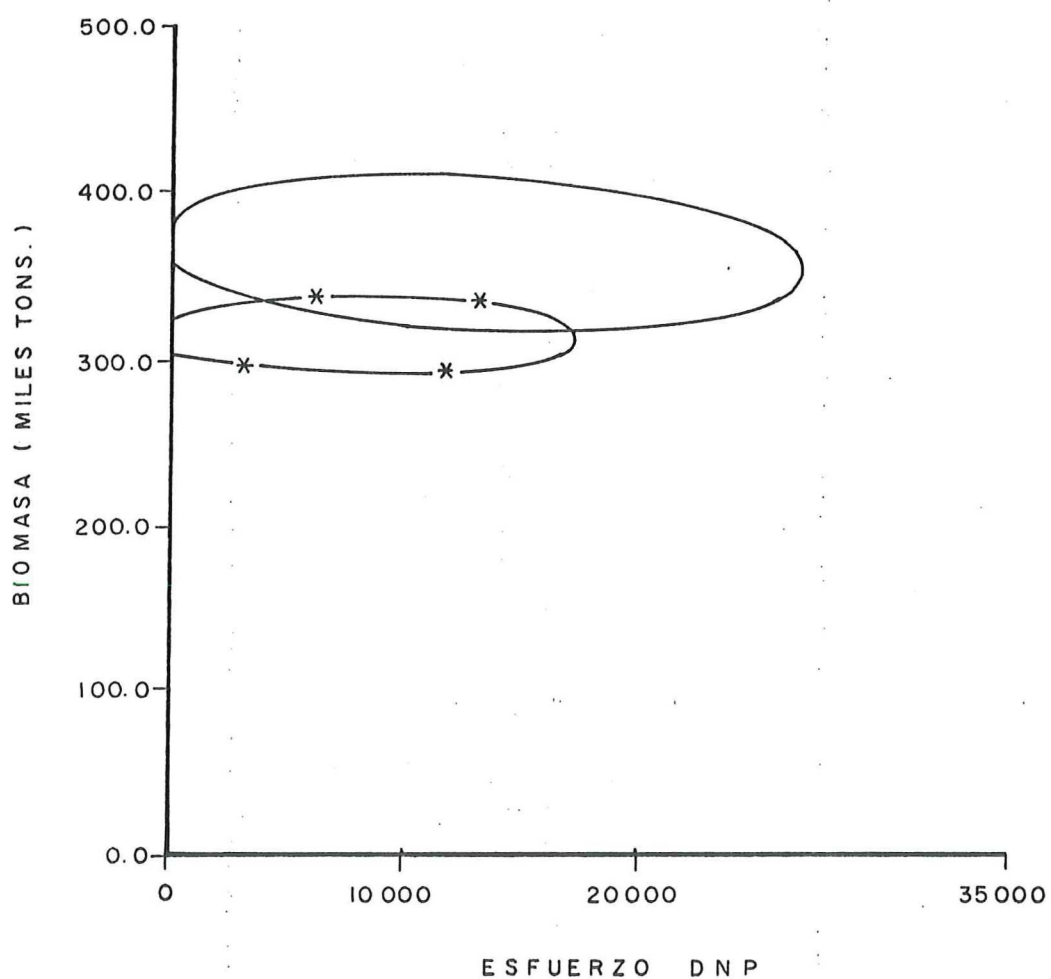


Figura 17. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro a . Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

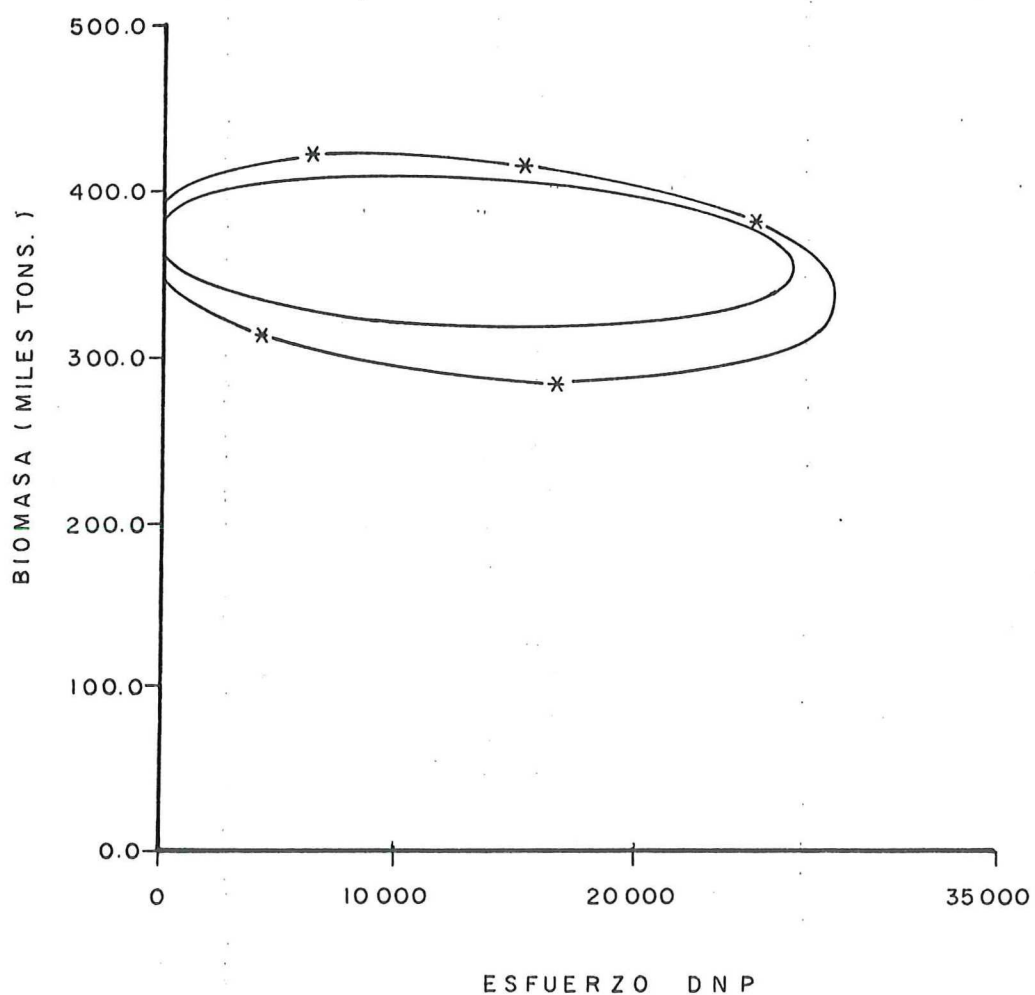


Figura 18. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro b . Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

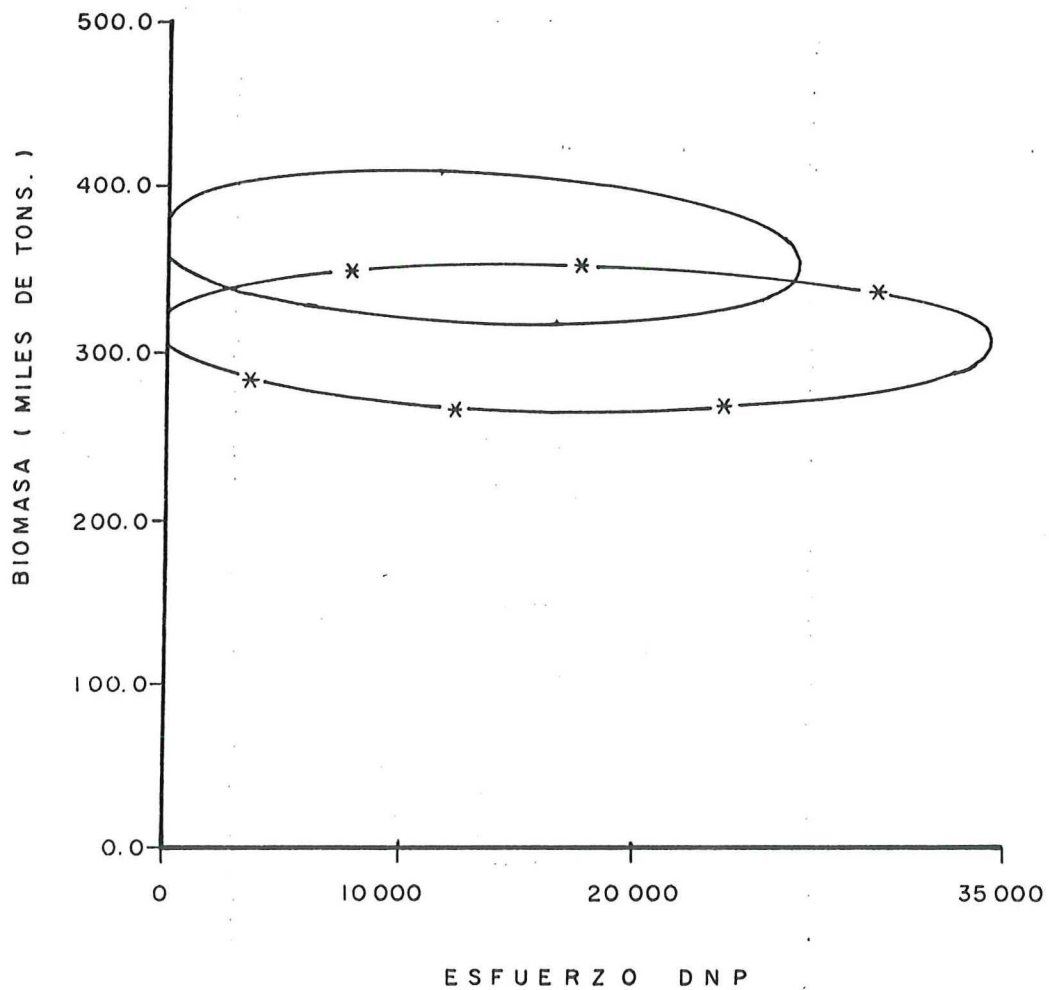


Figura 19. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% el parámetro P. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

de 304,009 hasta 406,080 tons. para la biomasa, (figura 20).
No existe un cambio notable debido al incremento del 100% en
la tasa de retorno.

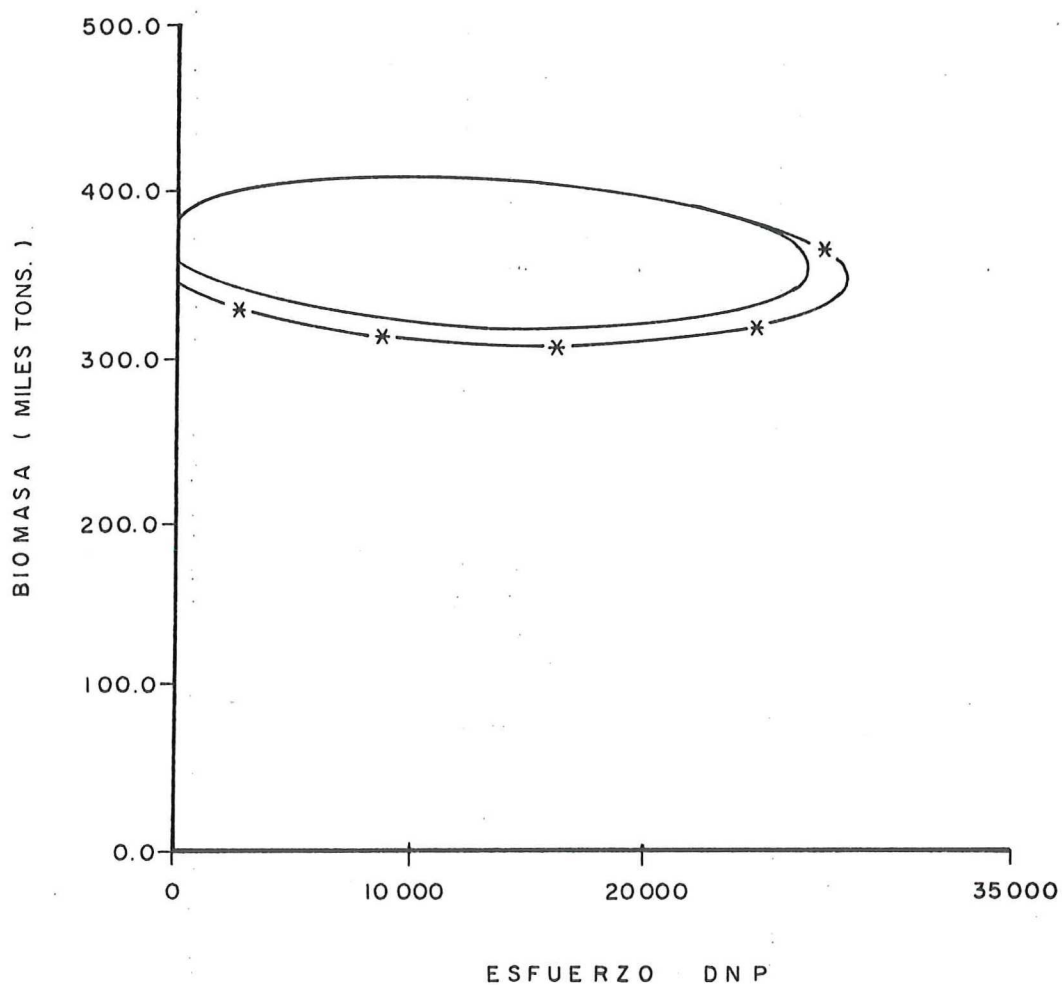


Figura 20. Atractor original (-) y atractor modificado (*) al aumentar 100% la tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo.

V. DISCUSION

Las pesquerías están sujetas a muchos cambios al encontrarse en un medio muy dinámico. Así por ejemplo se explican las bajas en captura y en captura por unidad de esfuerzo de 1982 y 1983 en que por dispersión del recurso durante el fenómeno de El Niño de ese período, se produjo baja disponibilidad del recurso (Anónimo, 1988a). Los valores altos posteriores son explicados por una sobrevivencia mayor de ciertas clases de edad que estuvieron expuestas a menor mortalidad por pesca durante el calentamiento de las aguas durante El Niño 1982-1983 y resultando en un incremento en la abundancia (Anónimo, 1988a). En contraste la estabilidad del esfuerzo desde 1983 parece coincidir o ajustarse al punto que corresponde al equilibrio de acceso abierto (PEAA) determinado con un modelo estático por Dreyfus y Manzo (op. cit.), empleando lances como medida de esfuerzo, al cual tiende una pesquería sin regulación. Se distingue así porque el PEAA por ellos determinado es cercano al punto de Captura Máxima en Equilibrio (CME) que obtienen y en este trabajo el esfuerzo en Días Normales de Pesca (DNP) desde 1983 es cercano al esfuerzo en equilibrio que corresponde a la CME determinada

en este trabajo.

La ponderación del esfuerzo y del índice de abundancia, como modificación del modelo de Schnute (op. cit.) es validado por la semejanza en los valores de los parámetros obtenidos y aquellos determinados en otras investigaciones. La estandarización del esfuerzo, considerando cuatro clases de embarcaciones, tomando como base tan solo la diferencia en capacidad de acarreo es correcta porque las demás características como velocidad, autonomía y uso de helicóptero en la búsqueda de atún están ligadas a la capacidad de bodega. Aunque tan solo dos grupos de barcos se requieren para la estandarización de acuerdo a Ortega (1988). En lo referente al coeficiente de capturabilidad (q), la estimación es mayor que la reportada por la CIAT y eso se puede deber a que la estandarización del esfuerzo en este trabajo, se hizo con respecto a la categoría más eficiente de toda la flota internacional. Por otro lado, el índice de ajuste de 0.23 es aceptable ya que entre más cercano se encuentre a cero, será mejor el ajuste (Schnute, op. cit.).

Con respecto a los modelos bioeconómicos, la solución óptima o determinación del esfuerzo de pesca que permite el beneficio económico máximo, es del tipo de BANG-BANG siempre y cuando el modelo sea lineal con respecto a la variable control (Clark, 1976). Esto sucede cuando el coeficiente de

capturabilidad es constante como cuando se le considera función de la biomasa. En ambos casos la biomasa o Stock del recurso a mantener en el océano va decreciendo conforme al aumento en la tasa de descuento. Esto se debe al hecho de que una tasa muy alta indica que las ganancias a recibir en el futuro representan menos, al ser transformadas a su valor presente (Clark, 1976 y Anderson, 1977). Esto implica que la decisión óptima es dejar menos recurso como reserva generadora de biomasa para el futuro. Se consigue lo anterior con un esfuerzo de pesca mayor, de acuerdo al aumento en la tasa de descuento, y con captura en equilibrio mayor como consecuencia.

De hecho una tasa de descuento infinita, daría como resultado que el esfuerzo óptimo fuese muy elevado porque el recurso a ser capturado en los períodos siguientes no tendría ningún valor, lo que equivaldría a situarse en el PEAA (Clark, 1976). Bajo este contexto, la misma situación sería provocada por la serie de decisiones óptimas de cada pescador, que pretenden capturar lo más posible en el presente dado que si no el beneficio va a ser para otro pescador. Es decir que dejar una reserva para futuro, no es garantía de ganancias para el pescador individual lo que convierte a la pesquería en un ejemplo más de Tragedia de los Comunes.

Al considerar en estos modelos un precio fijo mayor, la biomasa o existencias a mantener en el océano es menor por el valor económico mayor de cada unidad capturada, lo que promueve mayores capturas y un esfuerzo óptimo más elevado.

Como la tasa de descuento Internacional en dólares varía entre 6 y 10% podemos considerar a este último valor como el verdadero. De esta forma el esfuerzo óptimo estimado varía entre 10,816 y 12,169 DNP con el coeficiente q constante y entre 8,254 y 9,600 DNP con q en función de la biomasa en el rango de precios considerado. Al comparar el esfuerzo ejercido en los últimos años en esta pesquería (21306 DNP valor promedio 1984-1990) con los valores anteriores es notorio el excesivo esfuerzo aplicado a la misma que corresponde más bien al óptimo con una tasa de descuento superior al 100% y que se acerca más bien a la condición de acceso abierto en que hay demasiados recursos invertidos en la pesquería. El hecho de que el coeficiente de capturabilidad varíe de manera inversa al nivel de biomasa pone un freno al esfuerzo óptimo, determinando el mantenimiento de un stock mayor, con capturas menores que con q constante. Esto es provocado porque cada unidad de esfuerzo tiene un costo fijo, pero la captura y por lo tanto los ingresos van disminuyendo más drásticamente con el coeficiente variable que en el caso en que éste se mantenga fijo.

Existen semejanzas entre los efectos de los parámetros considerados de manera independiente en los dos modelos, siendo mayor el causado por la capacidad de carga, mientras que los de menor importancia son causados por la tasa de descuento y la tasa de crecimiento. En el sentido del cambio en el valor de la biomasa óptima para cambio de estos parámetros, es igual para el caso en que el coeficiente de capturabilidad está compuesto por dos valores (ordenada al origen o coeficiente de capturabilidad cuando la población ha sido reducida en gran medida y pendiente de la recta o tasa de cambio del coeficiente de capturabilidad con respecto a la biomasa), existen efectos opuestos entre los incrementos a ambos componentes pero no existe contradicción con el modelo con coeficiente constante ya que un incremento de éste, se ve representado por un desplazamiento hacia arriba de la recta que lo describe en función de la biomasa. Ese desplazamiento se da cuando la abscisa en el segundo modelo aumenta, y lo contrario sucede cuando tan solo se incrementa la pendiente.

Al considerar un coeficiente de capturabilidad en función del esfuerzo, queda un modelo no lineal con respecto a la variable control por lo que la solución deja de ser de BANG-BANG ya que se puede determinar la función continua de cambio del esfuerzo en el tiempo.

El cambio cíclico de X^* y de E^* con respecto al tiempo se

distingue en el espacio fase y lo mismo sucede con el desfase en el tiempo de las dos curvas. Analizando el atractor elíptico vemos que el esfuerzo máximo debe aplicarse cuando la biomasa está al nivel determinado por el eje focal de la elipse, de acuerdo a las figuras en este trabajo. El valor máximo y mínimo del esfuerzo coinciden con valores intermedios de la biomasa. A la vez, como el eje menor de la elipse tiene sus vértices en el valor máximo y mínimo de biomasa a esfuerzos intermedios, esto indica que los valores extremos de biomasa también corresponden a los puntos de inflexión de la curva de esfuerzo y por consiguiente de captura.

La forma del atractor marca el comportamiento del esfuerzo que debe ser aplicado a cada momento en la pesquería. Cuando la biomasa se encuentra bajo el eje principal, nivel medio en la trayectoria óptima de la variable de estado, el esfuerzo debe descender hasta que el recurso se recupere, alcanzando valores mayores al nivel medio. Esto permitiría aumentar gradualmente el esfuerzo y lograr capturas superiores a las 400,000 tons. en algunos años, aunque también implica que el esfuerzo debe ser nulo en algunos períodos y por consiguiente la captura. Lo antes expuesto no sería óptimo para ciertos sectores de la pesquería no considerados en el sistema, como el sector industrial, ya que no se puede parar a los pescadores y plantas de procesamiento y enlatado por un año o

más. Por supuesto al igual que se fijó en este modelo, un tope superior al esfuerzo por considerar que hay problemas para desinvertir en ésta pesquería, podemos fijar un límite inferior a la actividad de pesca mayor a cero de acuerdo al tamaño de la flota y la industria existente. Esto mantendría en actividad a un mínimo aceptable a la flota y a la industria procesadora, y esto no permitiría que las capturas óptimas fuesen tan elevadas tras un receso en la actividad pesquera, como lo indica este modelo bajo la condición de que el esfuerzo mínimo pueda ser nulo en algunos períodos.

En caso de considerar que el esfuerzo mínimo sea de 10,000 DNP, las capturas no sobrepasan a la CME con los esfuerzos óptimos correspondientes a diferencia del caso anterior. De tal forma que no se pone en riesgo al recurso si consideramos que hay un gran número de factores fuera de nuestro control que pueden hacer fluctuar al recurso y que por consiguiente el llevar a la población a niveles relativamente bajos de abundancia se puede traducir en una catástrofe.

El cambio en valor de 100% en cada parámetro permite tener una idea del efecto que tiene cada uno de éstos en el modelo. El aumento en la tasa de crecimiento implica una recuperación más rápida del recurso que permite el traslado del atractor hacia la derecha en el espacio fase. El incremento en la capacidad de carga hace posible el aplicar esfuerzos mayores

para capturar más debido a que el nivel de las existencias lo permite. Por lo tanto el movimiento del atractor es principalmente en dirección vertical. El cambio en la ordenada al origen de la línea del coeficiente de capturabilidad hace que el efecto de cada unidad de esfuerzo sobre la población sea mayor por lo que la biomasa óptima disminuye (traslado de la elipse hacia abajo) y el rango de esfuerzo óptimo decrece. Un incremento del precio hace más atractiva la pesca a niveles de abundancia menores por lo que el rango de esfuerzo óptimo se traslada a la derecha y la abundancia disminuye. El cambio en la tasa de descuento al igual que en los modelos anteriores no provoca gran transformación o movimiento en el atractor y lo mismo sucede con la pendiente de la función del coeficiente de capturabilidad aunque un valor real de la pendiente no existe.

Ninguno de los parámetros aquí considerados ha presentado en la realidad cambios de 100% o mayores si hablamos del precio del atún a valor constante en el mercado o si hablamos de la tasa de descuento bancaria cuyos cambios no provocan una modificación en las estimaciones de los modelos anteriores. Lo mismo sucede con los parámetros biológico-pesqueros si comparamos los valores límites de los rangos de confianza con respecto al valor estimado.

Para aplicar este modelo se debe contar con un buen indicador de la abundancia del recurso pero por otro lado no se debe olvidar que muchas componentes y grado de interacción de las mismas en el ecosistema en que se encuentra el atún nos son desconocidas. Es decir que aunque el esfuerzo sí ejerce un control en la biomasa, el sistema no tiene una autoregulación negativa total. Además el dinamismo del sistema biológico hace que la trayectoria del esfuerzo a seguir no sea gradual sino que más bien dé saltos en el atractor en respuesta a cambios más fuertes en la biomasa, lo que dificulta la ejecución de una política que se ajuste al modelo. Es decir que los efectos se convierten en causas y viceversa ya que cambios en la abundancia provocarían cambios en el nivel del esfuerzo.

Dada la incertidumbre existente en este sistema biológico-económico, una política o decisión adecuada puede ser la de fijar el esfuerzo al nivel medio del rango óptimo del modelo. En el caso de que el esfuerzo mínimo que mantiene en actividad al sector socio-económico de la pesca sea de 10,000 DNP, el valor promedio de esfuerzo es de 12,308 DNP y el de la captura es de 208,911 tons.

Por supuesto que ese valor mínimo para la industria pesquera debe ser definido, pero una vez determinado se puede traducir en una decisión de menor riesgo para el recurso y la

actividad económica.

La pesquería muestra síntomas del acceso abierto por el alto esfuerzo aplicado (prácticamente el doble de acuerdo a los modelos con coeficiente constante o en función de la biomasa), aunque sin una sobreexplotación del recurso ya que la pesca incide sobre los atunes de mayor tamaño y a que la captura es cercana a la CME.

La disminución del esfuerzo a valores que determinen estos modelos, simulando condiciones diversas, puede ser una herramienta de ayuda para el uso óptimo de los recursos de la sociedad aunque para esto se requiere de la cooperación Internacional.

Este modelo es una descripción de un sistema en términos matemáticos en base a algunos de los aspectos más conocidos del mismo. Es una simulación de lo que debería ser su funcionamiento o dinámica en base a ciertas condiciones. También es, como todo modelo, una simplificación de una realidad que es demasiado compleja para nuestros conocimientos y el poder predictivo es bajo si tomamos en cuenta que el óptimo no se logra tan solo aplicando los niveles de esfuerzo determinados sino logrando capturas y por ende las ganancias que ésta descripción determina, lo cual es virtualmente imposible. Sin embargo sí se logra un

diagnóstico de la pesquería y la toma de decisiones debe hacerse considerando el riesgo y la incertidumbre existentes.

VI. LITERATURA CITADA

Anderson, L.G. 1977. The Economics of Fisheries Management. The Johns Hopkins Univ. Press. Baltimore and London.

Anderson, L.G. 1983. Economics and the fisheries management development process. In: Global Fisheries. Perspectives for the 1980's. Rothschild, B.J. (ed.). Springer-Verlag, New York.

Anónimo, 1988a. Annual Report. IATTC.

Anónimo, 1988b. Anuario de pesca. SEPESCA

Anónimo, 1988c. La pesquería de los túnidos en el Pacífico Oriental y la protección de delfines incidentalmente Capturados. Ponencia ante la XIII reunión Internacional para el estudio de los mamíferos marinos. Abril 1988, La Paz, B.C.S. I.N.P.-Dir. Gral. Admon. Pesq. SEPESCA.

Beltrami, E. J. 1987. Mathematics for dynamic modeling. Ed. por Academic Press.

Calkins, T.P. 1975. Geographical distribution of yellowfin and skipjack tuna catches in the eastern Pacific Ocean, and total catch statistics, 1971-1974. IATTC, Bol.17(1):1-116.

Clark, C. W. 1973. Profit Maximization and the Extinction of Animal Species. Journal of Political Economy 81,950-961.

Clark, C. W. 1976. Mathematical Bioeconomics. Ed. John Wiley and Sons.

Clark, C. W. y G. R. Munro. 1975. Economics of fishing and modern capital theory: a simplified approach, Journal of Environmental Economics and Management 2:92-106.

Cole, J.S. 1980. Synopsis of biological data on the yellowfin tuna, Thunnus albacares (Bonnaterre, 1788), in the Pacific Ocean. In: Synopsis of biological data on eight species of scombrids. Bayliff, W.H. (ed.). IATTC Spec. Rep. (2):75-150.

Dreyfus L., M., H., Robles R., A. Villaseñor C. y M.A. González L. 1986. Análisis de la variación trimestral de la abundancia relativa del atún aleta amarilla Thunnus albacares durante el período 1981-1985 en las zonas de pesca de la

flota atunera mexicana. en: Contribuciones biológicas y tecnológico-pesqueras. CRIP. Documento técnico Informativo (3):1-15.

Dreyfus L., M. 1988. Aplicación de un modelo bioeconómico a la pesquería de Atún Aleta Amarilla Thunnus albacares en el Océano Pacífico Oriental. Tesina de especialidad en Admon. de Recursos Marinos, F.Ciencias Marinas, UABC.

Dreyfus L., M. J. y H. G. Manzo M. 1990. Aplicación de un modelo bioeconómico a la pesquería de atún aleta amarilla Thunnus albacares en el océano Pacífico oriental. Ciencias Marinas, 16(3):63-76.

Dorfman R. 1976. An economic Interpretation of Optimal Control Theory. American Economic Review.

Ehrhardt, N.M. 1981. Curso sobre métodos de evaluación de recursos y dinámica de poblaciones. Cuarta parte. La Paz, B.C.S. Julio 1981. FAO-CICIMAR.

Enriquez, R. R. 1988. Some economic considerations about the management of tropical tunas in the eastern pacific ocean: The mexican point of view. MRM 506 projects. Marine Resource Management Program. Oregon State University.

Gordon S. 1954. Economic theory of a common-property resource: the fishery. Journal of Political Econ. 62 (1954), 124-142.

Hardin, G. 1968. The Tragedy of the Commons. Science 162:1243-1247.

Hilborn, R. y J. Sibert. 1988. Is International management of tuna necessary. Marine Policy, Vol. 12 (1).

Hofman, R. J. 1989. The Marine Mammal Protection Act. A first of its kind anywhere. Oceanus Vol. 32, No. 1.

Hornbeck, R. W. 1975. Numerical Methods. Ed. Quantum Publishers.

Hudgins, L.L. 1986. Development of the mexican tuna Industry 1976-1986. Research Report Series (5). Pacific Island Development Program. Honolulu, Hawaii.

Howe, C. W. 1979. Natural Resource Economics. Ed. John Wiley and Sons.

Joseph, J. 1983. International tuna management revisited. In: Global Fisheries. Perspectives for the 1980s. Rothschild, B.J. (ed.). Springer-Verlag, New

York.;123-150.

Klawe, W. L. 1980. Classification of tunas, mackerels, billfishes, and related species, and their geographical distribution. En Synopses of Biological data on eight species of scombrids. CIAT Special Report No. 2. ed. W. H. Bayliff.

Mac Call A. D. 1974. Density Dependence of Catchability Coefficient in the California Pacific Sardine, Sardinops sagax caerulea, Purse Seine Fishery. En CALCOFI Reports Vol. 18 1976

Muhlía-Melo, A. 1987. The mexican tuna fishery. In: CALCOFI Rep. Vol. 28:37-42.

Ortega G., S. 1989. Análisis y normalización del esfuerzo de pesca de la flota atunera mexicana de cerco y vara que opera en el Pacífico oriental. Tesis de Maestría, I.P.N. CICIMAR, La Paz, B.C.S.

Pope, J. G. y D. J. Garrod. 1975. Sources of error in catch and effort quota regulations with particular reference to variations in the catchability coefficient. ICNAF Res. Bull.,11: 17-30.

Radovich, J. 1973. Catch-per-Unit-of-Effort: Fact, Fiction, and Dogma. en CALCOFI Reports Vol. 18 May 1976.

Róbles H., M. Dreyfus L., A. Villaseñor C. y M. A. González L. 1988. La pesquería del Atún. En Los Recursos Pesqueros del País. Ed. I.N.P. SEPESCA.

Sacks, E. P. 1991. Automatic analysis of one-parameter planar ordinary differential equations by intelligent numeric simulation. Artificial Intelligence 48:27-56.

Schaefer M. 1957. A study of the dynamic of the yellowfin tuna in the eastern tropical pacific ocean. ICATT Bull. Vol.II, num. 6.

Schnute J. 1977. Improved estimates from the Schaefer Production Model. Theoretical considerations. J. Fish. Res. Board Can. 34:583-603.

Smith, T.D. 1983. Changes in size of three dolphins Stenella sp. populations in the eastern Pacific. Fish. Bull. U.S. 81:1-13.

Susuki, Z., P.K. Tomlinson, y M. Honma. 1978. Estructura de la población del atún aleta amarilla del Oceano

Pacífico. CIAT Vol. 17(5):273-441.

Szekely, A. 1983. Implementing the new law of the sea: The mexican experience. In: Global Fisheries. Perspectives for the 1980s. Rothschild, B.J. (ed.). Springer-Verlag, New York.;51-72.

Walters, C. J. y R. Hilborn 1986. A Syllabus for tropical fisheries stock assessment. Preliminary Report.