

Simulación de fluctuaciones interanuales de la jaiba (*Callinectes sapidus*): relaciones entre el stock, el reclutamiento y la variabilidad ambiental

Enrique Morales-Bojórquez¹

CICIMAR-IPN. Playa El Conchalito s/n. La Paz, B.C. Sur. CP 23000.

MORALES-BOJÓRQUEZ, E. 1995. Simulación de fluctuaciones interanuales de (*Callinectes sapidus*) relaciones entre el stock, el reclutamiento y la variabilidad ambiental. *INP.SEMARNAP. México. Ciencia Pesquera No. 11. (Nueva Época)*

En este estudio se propone el uso del análisis estadístico multivariado para simular fluctuaciones de la población de la jaiba *Callinectes sapidus*. Los resultados muestran cómo la fracción adulta es sensible a las bajas temperaturas del Invierno, mientras que la porción de reclutas es afectada por el promedio de energía radiante mensual, el flujo de la corriente anual, el promedio anual de la salinidad y los cambios en la temperatura media anual del agua. Se presentan las ecuaciones finales de simulación para calcular el posible reclutamiento con base en los parámetros ambientales empleados, y se discute esta innovación metodológica en comparación con algunos modelos de stock y reclutamiento.

This paper proposes the utilization of multivariate statistical analysis, developing simulations of fluctuations of *Callinectes sapidus*. The results show a relationship between the adult fraction and the Winter temperature; the recruitment is affected by average monthly radiant energy, annual stream flow, annual average salinity and annual average water temperature. The simulation equations to estimate the possible recruitment based on environmental parameters are showed, as well as a comparison of this metodologic innovation to some stock and recruitment models.

Introducción

La teoría general de la relación entre la población y el reclutamiento considera una función según la cual el reclutamiento depende de un determinado tamaño de la población y asocia coeficientes de mortalidad densodependiente y densoindependiente (según Ricker, 1975; Beverton y Holt, 1957; Larrañeta, 1986, Gómez-Muñoz, 1986; Csirke, 1980; Tang, 1985; Hilborn y Walters, 1992). Estos modelos plantean la interacción entre la población y su ambiente, lo que hace suponer que el proceso de mortalidad natural (M) se encuentra estrechamente relacionado con hechos y variables que afectan el reclutamiento final (Smith, *et al.*, 1992). Quienes tratan de explicar el comportamiento de la progenie sin considerar las fluctuaciones ambientales, niegan la posibilidad de una interpretación adecuada de cualquier modelo en los términos de sus mismas constantes. En cambio, relacionando las fluctuaciones del reclutamiento y la población con las variaciones ambientales es posible unificar los fragmentos de experiencia disponibles y explicar

mejor las estrategias de reproducción y su respectivo éxito, en las cuales los hábitos junto con las características ambientales reflejen mecanismos causales importantes que explican la relación stock-reclutamiento (Bakun, 1985). Precisamente con el fin de explicar las fluctuaciones de la población de la jaiba azul (*Callinectes sapidus* Rathbun) se desarrolla este modelo de simulación basado en el análisis multivariado de los componentes ambientales y poblacionales de esa especie, lo que permite una adecuada interpretación y comprensión de las fluctuaciones a través de los efectos ambientales sobre el reclutamiento a pequeña, mediana y gran escala.

Material y métodos

Se utilizó la información de Tang (1985) de 1960 a 1979, que comprendió cálculos del tamaño de la población (TS) y el reclutamiento (TR) de *C. sapidus*, así como los siguientes factores ambientales: (PERM) Promedio de Energía Radiante Mensual ($\times 10^5 \text{ kJ m}^{-2}$), (FCA) Flujo de Corriente Anual (fc s^{-1}), (PAS) Promedio Anual de Salinidad (‰), (TMAI) Temperatura Mínima del Agua en Invierno (°C) y (TPAA) Temperatura Promedio Anual del Agua (°C).

¹ Trabajo premiado por el estado de Baja California Sur en el Certamen Nacional de Ciencia y Tecnología de 1994, "Dr. Ruy Pérez Tamayo".

Con las variables anteriores se hizo un Análisis de Componentes Principales (ACP) con base en lo siguiente (Afifi y Clark, 1990; Kope y Botsford, 1990):

$$C_j = \sum_j B_{ij} * (X_j - \bar{X}_j) * S_j^{-1}$$

Donde B_{ij} es el eigenvector j -ésimo del componente principal coordinado C_j , que representa la contribución de cada variable ambiental X_j con media \bar{X}_j y varianza S_j^2 .

De los componentes principales C_j los que explicaron un alto porcentaje de la variabilidad total en términos de su varianza total se graficaron en las agrupaciones respectivas, considerando solamente altos y bajos reclutamientos con base en el siguiente modelo:

$$\text{Reclutamiento} = a_0 + \sum a_i * C_i$$

Esto permitió determinar niveles altos y bajos de reclutamiento, independientemente del tamaño de la población, pues se consideró que los pre-reclutas y reclutas son más sensibles a los procesos de mortalidad natural (M) (Smith *et al.*, 1992); además, los niveles de agrupación propuestos consideraron el efecto de la variabilidad ambiental interanual en cada fracción de la población. Esto fue especialmente útil, ya que en función de los niveles determinados se asignaron categorías que se emplearon después para crear simulaciones con base en los parámetros ambientales manejados.

Para el proceso de simulación se emplearon las clasificaciones previas por el ACP, considerando estas agrupaciones dentro de un Análisis de Funciones Discriminantes (AFD) según la ecuación:

$$D_j = d_{j1} Z_1 + d_{j2} Z_2 + \dots + d_{jp} Z_p$$

Donde D_j es la función discriminante que se obtiene al multiplicar el valor estandarizado de cada predictor (Z) con su coeficiente de función discriminante (d_i) a los cuales se les añade el producto de todos los predictores (Z_p).

Luego se obtuvieron las ecuaciones básicas de clasificación de cada uno de los agrupamientos del ACP, como sigue:

$$C_j = c_{j0} + c_{j1} X_1 + c_{j2} X_2 + \dots + c_{jp} X_p$$

Donde C_j es la función de clasificación del grupo j , es decir, el producto de cada predictor (X) por su coeficiente de función asociado c_j ; y c_{j0} es la constante de predicción (Tabachnick y Fidell, 1989). La significación de los grupos de simulación se evaluó por el respectivo coeficiente de correlación canónico, el porcentaje de agrupación relativo por cada grupo, incluyendo la prueba de X^2 modificada por Bartlett (1941).

Resultados

Dentro del ACP (Fig. 1) se determinaron las dos categorías de asociación de reclutamientos altos y bajos con un porcentaje de varianza acumulada del 86.27% (Tabla 1).

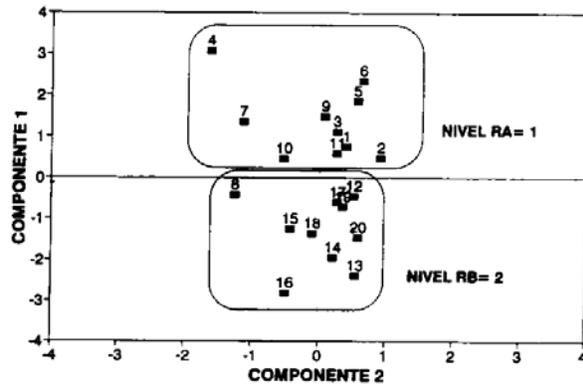


Fig. 1. Análisis de componentes principales de *Callinectes sapidus*.

Tabla 1. Resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) de las siete variables empleadas.

COMPONENTE NUMERO	PORCENTAJE DE VARIANZA	VARIANZA ACUMULADA
1	51.56	51.56
2	20.24	71.81
3	14.46	86.27
4	7.93	94.21
5	3.28	97.49
6	1.91	99.41
7	0.58	100.00

El punto medio del componente 1 (valor 0) se utilizó para crear el nivel de clasificación deseado, asignando respectivamente uno (1) a los reclutamientos altos (RA) y dos (2) a los bajos (RB). Con base en el análisis multivariado propuesto, tanto la temperatura mínima del agua en invierno como la temperatura media anual fueron los que mostraron menor variación en relación con la jaiba *C. sapidus*. Previamente, Rotschild y Mullen (1985) habían propuesto cuatro divisiones dentro del diagrama de dispersión de stock y reclutamiento; sin embargo, estas divisiones parten de un criterio no paramétrico que sólo considera la mediana de cada fracción poblacional, sin la influencia ambiental sobre la población, creando una simulación estocástica basada en funciones markovianas (Ross, 1989). En este estudio, con el Análisis de Componentes Principales se identificaron dos niveles de reclutamiento y se lograron clasificaciones en las cuales se obtuvo una predicción satisfactoria sin sobreposición de ambos grupos (Tabla 2).

Tabla 2. Predicción de grupos para el análisis de funciones discriminantes.

GRUPO ACTUAL	PREDICCIÓN DE GRUPOS		TOTAL	AGRUPADOS
	1	2		
1	100%	0	100%	11
2	0	100%	100%	9

Esto se debió principalmente al éxito de las agrupaciones entre las fracciones de la población y las variables ambientales empleadas, que explican así la interacción de todos los elementos que afectan el reclutamiento final y establecen que éste no depende directamente de determinado tamaño de población, ya que, en principio, se consideró a la fracción del reclutamiento como la que más se afecta por los procesos de mortalidad natural (M). Así, las fluctuaciones poblacionales en gran escala se presentaron principalmente por el efecto negativo de los procesos ambientales, que tienden a disminuir la sobrevivencia de pre-reclutas y afectan la estabilidad poblacional y su magnitud en el período siguiente.

Las ecuaciones obtenidas para determinar los respectivos niveles de reclutamiento fueron:

$$\text{Reclutamientos bajos} = -3530.2 + (4.2 \cdot \text{PERM}) + (4.1 \cdot \text{FCA}) + (22.8 \cdot \text{PAS}) + (-44.6 \cdot \text{TMAI}) + (326.3 \cdot \text{TPAA}) + (3 \cdot \text{TS})$$

$$\text{Reclutamientos altos} = -3675.6 + (4.3 \cdot \text{PERM}) + (4 \cdot \text{FCA}) + (24.6 \cdot \text{PAS}) + (48.3 \cdot \text{TMAI}) + (332.5 \cdot \text{TPAA}) + (3.5 \cdot \text{TS})$$

El éxito de las agrupaciones de simulación fue evaluado por un coeficiente de correlación canónico de 0.92 y un porcentaje relativo del 100%. De igual forma, la prueba de X^2 modificada por Bartlett (1941) determinó la significación de las agrupaciones propuestas con $X^2 = 27.04$ (gl = 7 y $p < 0.05$).

Este proceso se presentó así porque el ambiente no influye de igual forma sobre todos los adultos de *C. sapidus*. A través de este análisis se encontró que la fracción reproductora de la población es afectada por la temperatura del agua en el invierno. El análisis de simulación mostró que a niveles de población entre 16 y 30 t se obtienen reclutamientos bajos (entre 109 y 131 t), ya que solamente en el caso de la temperatura mínima del agua en Invierno se observó una fuerte influencia sobre el posible tamaño de la población de reclutas de *C. sapidus*. El nivel de recuperación estuvo afectado por todas las variables ambientales empleadas en este análisis, pero se encontró que para que haya reclutamientos altos (entre 127 y 169 t) el nivel de la población debe permanecer entre 27 y 43 t. La simulación de las magnitudes del

reclutamiento en relación con el tamaño de la población y las variables ambientales demostró que la fracción adulta de la población muestra niveles altos de reclutamiento cuando el promedio anual de salinidad es superior a 15 ‰, e incluso en condiciones en que predomina el reclutamiento bajo éste se incrementa al aumentar solamente la salinidad. El efecto es mejor si el promedio mensual de energía radiante es superior a 375 ($\times 10 \text{ KJ m}^{-2}$). De igual forma, es posible que a niveles de población demasiado altos ($T/S = 50 \text{ t}$) aunados a niveles máximos de temperatura mínima del agua invernal ($\text{TMAI} = 3^\circ\text{C}$), promedio anual de salinidad ($\text{PAS} = 13 \text{ ‰}$) y flujo de corriente anual ($\text{FCA} = 70$) se consigan reclutamientos bajos. El promedio mensual de energía radiante no influye sobre el nivel del reclutamiento, por lo que el intervalo de las variables anteriores impide que el reclutamiento sea alto y esto puede sugerir una caracterización ambiental adversa para los reclutas y probablemente un incremento en la tasa de mortalidad natural de los adultos.

Discusión

Hilborn y Walters (1992) mencionan que, durante el proceso de mortalidad densoindependiente, la cantidad de huevos producidos por unidad de población reproductora tiene una probabilidad demasiado variable de sobrevivencia hasta el momento del reclutamiento, por lo que precisamente esta probabilidad es totalmente independiente del tamaño de la población. Esto se observa mejor cuando se intenta establecer una relación directa entre la variabilidad ambiental y el reclutamiento, en donde el manejo de las relaciones lineales no explican la totalidad del fenómeno. Un ejemplo de ello es el trabajo de Clark (1992), quien analizó la influencia de las corrientes sobre el tamaño de la población y el reclutamiento del timalo (*Thymallus arcticus* Rathbun), con la hipótesis de que las corrientes provocan desplazamientos de las larvas hacia zonas de baja abundancia alimenticia, o bien que las bajas temperaturas de estas corrientes afectan el proceso metabólico de las larvas y provocan disminución en sus tasas de crecimiento y de sobrevivencia; aunque, finalmente, la relación entre el tamaño de la población y el reclutamiento con una variable ambiental explica parcialmente el reclutamiento en función de las corrientes.

Por su parte, Hannah (1993) analizó la influencia de algunos factores ambientales sobre el reclutamiento del camarón oceánico (*Pandalus jordani* Rathbun). Por medio de un análisis de correlación lineal múltiple demostró que existe una alta influencia de la temperatura sobre el reclutamiento de *P. jordani*. Asimismo, niveles de surgencia moderados provocan que el transporte frente a la zona costera no sea excesivo, lo cual no modifica la disponibilidad alimenticia en la zona. Sin embargo, las relaciones propuestas sólo proveen una explicación empírica, ya que un punto importante involucra no sólo el impacto de la mortalidad natural

sobre la parte recluta, sino también los niveles de la población que, además, están sometidos a mortalidad por pesca (F).

En el trabajo de Gómez (1986) los resultados obtenidos a través del modelo general no consideran del todo el efecto negativo del ambiente, por lo que la mortalidad densoindependiente resulta difícil de evaluar. En este sentido, el análisis de simulación permite evaluar el efecto entre el reclutamiento, la población y su respuesta a los cambios ambientales, en donde los niveles altos o bajos de población no necesariamente son recíprocos al reclutamiento.

Koslow (1992) menciona que la mortalidad natural (M) actúa exponencialmente sobre el reclutamiento, el cual resulta bastante sensible a los cambios de M. Esto se relaciona directamente con el coeficiente de mortalidad densoindependiente, en donde los cambios mínimos se reflejan en una alta variabilidad del reclutamiento. En el caso de este trabajo es posible que la mortalidad por pesca (F) pueda considerarse de manera indirecta en el análisis de simulación a través de las funciones discriminantes empleadas; ya que dentro de la estimación de la abundancia de la población y el reclutamiento es posible incorporar un valor de F, si el método empleado es por análisis de población virtual. Aunque el efecto final de F resulte difícil de evaluar, es sencillo suponer que el éxito de desoves que proporcionen buenas expectativas de reclutamiento elevado dependan directamente de la cantidad de reproductores, agregando el efecto multivariado del ambiente, que presenta tendencias de M a aumentar o disminuir en los estadios tempranos; y a pesar de que una medición precisa del efecto de F sería de especial interés, la simulación sólo se empleó para analizar el efecto densoindependiente (como una medida indirecta de M) que afecta de manera determinante a los reclutas, intentando así analizar los efectos ambientales que expliquen los cambios en las magnitudes interanuales de los reclutamientos de *C. sapidus*.

Agradecimientos

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas y al Programa Institucional de Formación de Investigadores, del Instituto Politécnico Nacional, así como al CONACYT (Padrón de Excelencia Académica), por el apoyo económico para la realización del presente trabajo. De igual forma al M. C. Victor Manuel Gómez Muñoz por su interés en el desarrollo del trabajo.

Referencias bibliográficas

- APIFI, A.A. and V. Clark. 1990. Computer-aided Multivariate analysis. 2^a ed. Van Nostrand Reinhold. New York, USA. p 371-392.
- BAKUN, A. 1985. Comparative studies and the recruitment problem: searching for generalizations. *Calif. Coop. Fish. Inv. Rep.* 26:30-40.
- BARTLETT, M. S. 1941. The statistical significance of canonical correlations. *Biometrika*, 32:29-38.
- BEVERTON, R.J.H. and S.J. Holt. 1957. On the dynamics of exploited fish population. U.K. Min. Agric. Fish., *Fish. Invest.* (ser 2) 19:533 p.
- CLARK, R.A. 1992. Influence of stream flows and stock size on recruitment of Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) in the Chena River, Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49:1027-1034.
- CSIRKE, J. 1980. Recruitment in the peruvian anchovy and its dependence on the adult population. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.* 177:307-313.
- GÓMEZ, M.V.M. 1986. A general model of stock and recruitment. *Inv. Pesq.* 50(3):420-425.
- HANNAH, R.W. 1993. Influence of environmental variation and spawning stock levels on recruitment of ocean shrimp (*Pandalus jordani*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50:612-622.
- HILBORN, R. and C.J. Walters. 1992. Quantitative fisheries stock assessment. Choice, dynamics and uncertainty. *Chapman and Hall*. New York, USA. p 241-298.
- KOPE, G. R. and L. W. Botsford. 1990. Determination of factors affecting recruitment of chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha* in Central California. *Fish. Bull.* 88:257-269.
- KOSLOW, J.A. 1992. Fecundity and the stock-recruitment relationship. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49:210-217.
- LARRAÑETA, M.G. 1986. Relaciones entre los parámetros de las curvas de generaciones II. Modelo de Beverton y Holt. *Inv. Pesq.* 50(1):37-42.
- RICKER, W.E. 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 191:382 p.
- ROSS, M. S. 1989. Introduction to probability models. 4th ed. *Academic Press, Inc.* San Diego, CA. pp 135-200.
- ROTSCHILD, B.J. and A.J. Mullen. 1985. The information content of stock and recruitment data and its non-parametric classification. *J. Cons. int. Explor. Mer.* 42:116-124.
- SMITH, P.E., N. Chyan-Huei Lo and J.L. Butler. 1992. Life-stage duration and survival parameters as related to interdecadal population variability in pacific sardine. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Rep.* 33:41-49.
- TABACHNICK, B.G. and L.S. Fidell. 1989. Using multivariate statistics. 2nd ed. *Harper Collins*. New York, USA. p 192-234.
- TANG, Q. 1985. Modification of the Ricker stock recruitment model to account for environmentally induced variation in recruitment with particular reference to the blue crab fishery in Chesapeake Bay. *Fish. Res.* 3:13-21.