

Numeric simulation of fishing effort and strategies (stochastic and cartesian) using cellular automata

Simulación numérica de la dinámica del esfuerzo pesquero y estrategias de pesca (estocásticos y cartesianos) con autómatas celulares

MJ Dreyfus-León^{1,2*}, R Martínez-Olvera², R Hernández-Walls²

¹ Instituto Nacional de la Pesca, Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de El Sauzal, Km. 97.5 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

² Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 103 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada 22860, Baja California, México.

* Corresponding author. E-mail: dreyfus@cicese.mx

ABSTRACT. A cellular automaton (CA) model is developed to analyze the behavior of fishermen in terms of belonging to a group that exchanges information on fishing and the personal aspect of decision making, defining the fishermen as cartesian or stochastic. This model aims to be the generic structure for a subsequent specific model suitable for a real fishery, and shows how the previously described behavior can be represented in a CA. The results show that, in a simulated world, positive effects are observed in terms of capture or rate of capture, the grouping, and the stochastic behavior in the event of resource scarcity. Also shown is how the behavior of including an explorer has the potential of generating benefits, as well as being risky. If the fishing is good, an independent boat benefits more than the group explorer when sharing this information with the other members of the group (cooperation-competition effect); however, in an adverse situation, the group explorer is not as affected as the independent boat.

Key words: cellular automaton, fleet dynamics, stochastic behavior, cartesian behavior, information exchange between fishermen.

RESUMEN. Se desarrolla un modelo de autómatas celulares (AC) para analizar el comportamiento de los pescadores en términos de pertenencia a un grupo que intercambia información de la pesca y el aspecto personal de la toma de decisiones, donde se define a los pescadores como cartesiano o estocástico. Este modelo pretende ser la estructura genérica para un posterior modelo específico adecuado a una pesquería real, y muestra cómo se puede representar el comportamiento descrito anteriormente en un AC. Los resultados muestran que, en un mundo simulado, se observan efectos positivos en términos de captura o tasa de captura, de la agrupación y del comportamiento estocástico ante la escasez del recurso. Además, se muestra como el comportamiento de incluir un explorador tiene el potencial de generar beneficios, al igual de ser arriesgado. En caso de generar buena pesca, una embarcación independiente se beneficia más que el explorador en grupo cuando éste último comparte información con los demás integrantes del grupo (efecto cooperación-competencia). Sin embargo, en una situación adversa, el explorador en grupo no se ve tan afectado como la embarcación independiente.

Palabras clave: autómatas celulares, dinámica de flota, comportamiento estocástico, comportamiento cartesiano, intercambio de información entre pescadores.

INTRODUCTION

Traditionally, fisheries have been studied from a biological perspective, and fishing effort has been incorporated into models as a control or management variable in stock assessment studies. However, the spatial distribution of fishing effort is related to human behavior as well as to the spatial distribution of fish. This spatial distribution is an important component of the dynamic behavior of the fishing fleets that should have a fundamental role in fishery research (Hilborn 1985).

Fishing effort is a measure of the intensity of fishing operations. The definition of effort depends on the type of fishery and fishing gear, and frequently on the type and amount of information available. This involves any human

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, las pesquerías han sido estudiadas desde un punto de vista biológico, y el esfuerzo de pesca ha sido incorporado en los modelos como una variable de manejo o de control en la evaluación de los estudios de las poblaciones. Sin embargo, la distribución espacial del esfuerzo pesquero se relaciona con el comportamiento humano y también con la distribución espacial de los peces. Esta distribución espacial es un componente importante del comportamiento dinámico de las flotas pesqueras que deben ser parte fundamental de la investigación pesquera (Hilborn 1985).

El esfuerzo de pesca es una medida de la intensidad de las operaciones de pesca. La definición del esfuerzo depende del

activity related to fishing. When conducting fishing activities, material and economic resources are used, which in turn implies the expenditure of energy and time. Thus, fishing effort is identified by the capture systems employed and how these systems are used in space and time (Ehrhardt 1981).

Fishing effort is used to estimate the abundance and assess the exploitation status of stocks (Polacheck 1988). Developing effective strategies and regulatory systems for the use and management of resources requires not only biological knowledge about the fishery resources but also knowledge of fishers' behavior. Information on how fishers distribute fishing effort in space is essential for understanding the development of a fishery (Hilborn and Walters 1987). Fishers generally operate where they believe there are fish, and fishing effort is not randomly distributed but rather concentrated in areas considered "ideal" for fishing. This pattern is apparent in larger fisheries, such as the tuna fishery (Gulland 1964, Paloheimo and Dickie 1964, Bannerot and Austin 1983), where catch per unit effort (CPUE) continues to be an index of abundance, commonly used for stock assessment diagnosis and by international fishery agencies (Gaertner and Dreyfus-León 2004).

Establishing the dynamics of a fishing fleet is useful for analyzing and understanding the effect of fishery management and decision making, since the spatial and temporal distribution of effort in turn affects the capture and abundance of the resource (Botsford *et al.* 1983). The magnitude and distribution of fishing effort are closely related to fishing mortality (Mangel and Clark 1983) and fleet dynamics. Fishing effort is a key component of fishery stock assessment methods (Mangel and Clark 1983).

In many fisheries, especially the oceanic ones, the flow of information between vessels affects the dynamics of the fleet and exploitation of the resource. Current research is increasingly focused on fishers' behavior, trying to determine where and how they assign effort in order to assess the effect of decision making on fishing fleets (Little *et al.* 2004). For example, the flow or exchange of information relative to the quality of the fishing grounds can influence the group or other groups of fishers' decision regarding where to direct their effort (Palmer 1991, Little *et al.* 2004). This aspect of the fishers' behavior is rarely analyzed or modelled (Dreyfus-León 2006).

Studies on the spatial distribution of fishing effort range from qualitative human observations to quantitative and simulation models. In these models, effort and space are generally represented as aggregate variables (Mangel and Clark 1983, Allen and McGlade 1986, Hilborn and Walters 1987, Gillis and Peterman 1998).

The spatial allocation of fishing effort is an important component of fleet dynamics; however, spatial models are generally too basic regarding the spatial dynamics of fishing effort due to the complexity of human behavior, the lack of tools, and also probably the tendency of placing greater

tipo de pesquería y arte de pesca, y con frecuencia, del tipo y la cantidad de información disponible. Esto involucra cualquier actividad de índole humana que se relacione con la pesca. Al realizarse estas actividades, se hace uso de recursos materiales y económicos, que a su vez implica un gasto de energía y tiempo. De esta forma, el esfuerzo de pesca se identifica con los sistemas empleados para capturar y la manera en que estos sistemas se aplican en el tiempo y en el espacio (Ehrhardt 1981).

El esfuerzo de pesca se utiliza para estimar la abundancia y para evaluar el estatus de explotación de las poblaciones (Polacheck 1988). No es suficiente tener sólo el conocimiento biológico de los recursos pesqueros para desarrollar estrategias de manejo y esquemas regulatorios eficaces para la administración y el aprovechamiento de los recursos, sino que también se debe considerar el comportamiento de los pescadores. Contar con el conocimiento de cómo los pescadores distribuyen el esfuerzo de pesca en el espacio es esencial para comprender el desarrollo de una pesquería (Hilborn y Walters 1987). Generalmente el pescador opera donde él considera que están localizados los cardúmenes, y su esfuerzo de pesca no está distribuido al azar, más bien está concentrado en las zonas que son "ideales" para la pesca. Este patrón se presenta comúnmente en las pesquerías mayores, como la pesquería del atún (Gulland 1964, Paloheimo y Dickie 1964, Bannerot y Austin 1983), donde la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) permanece como un índice de abundancia, que es empleado en el diagnóstico de las poblaciones y comúnmente por las agencias internacionales en pesquerías (Gaertner y Dreyfus-León 2004).

Establecer la dinámica de una flota pesquera ayuda a analizar y a comprender el efecto de la toma de decisiones y la administración pesquera, ya que la distribución del esfuerzo espaciotemporal, a su vez, tiene un efecto en la captura y abundancia del recurso (Botsford *et al.* 1983). La magnitud y distribución del esfuerzo de pesca están estrechamente relacionadas con la mortalidad de pesca (Mangel y Clark 1983) y la dinámica de las flotas. El esfuerzo pesquero es un componente clave del sistema pesquero para la evaluación de estudios de las poblaciones (Mangel y Clark 1983).

En muchas pesquerías, sobre todo en las oceánicas, el flujo de información entre las embarcaciones afecta la dinámica de la flota y la explotación del recurso. Hoy en día, el interés en enfocar las investigaciones hacia el comportamiento del pescador va en aumento; se trata de responder dónde y cómo el pescador asigna su esfuerzo para evaluar los efectos de la toma de decisiones en las flotas pesqueras (Little *et al.* 2004). Por ejemplo, el flujo o intercambio de información con respecto a la calidad de las zonas de pesca puede llegar a influenciar al grupo u otros grupos de pescadores en la toma de decisiones de hacia donde dirigir su esfuerzo (Palmer 1991, Little *et al.* 2004). Este aspecto del comportamiento del pescador raramente es analizada o modelada (Dreyfus-León 2006).

emphasis on modeling a resource (Dreyfus-León 2006). Some tools have been adapted for this purpose. In particular, studies of artificial neural networks, which include learning as an adaptation mechanism, focus on analyzing activity of individual fishers and independent fishing units. That is, information is assigned to an artificial fisher so that he can develop and learn a spatial search strategy for prey, designating a space where the fisher conducts his search and adapts to the environment by learning. Gaertner and Dreyfus-León (2004) and Dreyfus-León and Gaertner (2006) analyzed the non-linear relationship between CPUE and abundance in a pelagic fishery, by simulating these two variables to understand the effect of fishing fleet dynamics on the interpretation of CPUE and the decision-making process used by fishers while searching for the resource. These studies apply fishing strategies and compare capture success between fishers who fish individually and those who fish in groups. The spatial allocation of fishing effort is an important component of fleet dynamics, especially for understanding the cause of the non-linear relationship between CPUE and abundance.

Millischer and Gascuel (2006) developed another type of multiagent system based on the individual (individual-based modeling) for modeling fishing strategies and efficiency using simulated data. Few individual-based simulation models include alternatives that help to better understand, in modelling processes, the interactions between fishers, adaptive behavior, and persistence of complex fishing-related problems (Grimm *et al.* 1999). Dreyfus-León (2006) used cellular automata to model the interaction between fishers in order to spatially distribute fishing effort.

Cellular automata (CA) are discrete dynamic systems based on local interactions, similar to many continuous systems defined by partial differential equations (Toffoli and Margolus 1987). The universe is an N-dimensional matrix that is modified in parallel based on the rules governing local interactions. With this type of modeling it is possible to develop models without having to use heavy mathematical formalism (Hill and Coquillard 1997).

This study uses and improves the model developed by Dreyfus-León (2006). It includes two well-studied decision-making behaviors of fishers (Allen and McGlade 1986): cartesian and stochastic (those that make more high-risk decisions). The model is assessed using synthetic data for a fictitious fishery.

METHODOLOGY

Tackling a problem such as the decision making of fishers based solely on the information available is quite complicated. Nonetheless, this problem can be simplified by using a CA modelling approach. For this, a virtual ocean is considered, represented by a matrix of 100×100 toroid cells (i.e., without vertical and horizontal edges).

The initial allocation of both the resource units (RUs) and the fishing fleet within the matrix is random. An initial

Los trabajos sobre la distribución espacial del esfuerzo pesquero incluyen desde observaciones humanas cualitativas hasta modelos de simulación y cuantitativos. En estos modelos, generalmente el esfuerzo y el espacio están representados como variables agregadas (Mangel y Clark 1983, Allen y McGlade 1986, Hilborn y Walters 1987, Gillis y Peterman 1998).

La asignación espacial del esfuerzo de pesca es un componente importante de la dinámica de las flotas; sin embargo, los modelos espaciales en pesquerías, en general, son demasiado elementales cuando se considera la dinámica espacial del esfuerzo de pesca, debido a la complejidad del comportamiento humano, la falta de herramientas y también, probablemente, la tendencia de dar mayor énfasis en modelar un recurso (Dreyfus-León 2006). Algunas herramientas se han adecuado para este propósito. En particular, los estudios sobre redes neuronales artificiales, que incluye al aprendizaje como mecanismo de adaptación, se enfocan en analizar la actividad de pescadores individuales y de las unidades de pesca independientes. Es decir, se le asigna información a un pescador artificial para que desarrolle y aprenda una estrategia de búsqueda espacial para sus presas, y se le designa un espacio donde pueda realizar su búsqueda y adaptarse al entorno por aprendizaje. Gaertner y Dreyfus-León (2004) y Dreyfus-León y Gaertner (2006) analizaron la relación no lineal entre la CPUE y la abundancia de una pesquería pelágica, mediante la simulación de estas dos variables para entender el efecto de la dinámica de las flotas pesqueras en la interpretación de la CPUE y el proceso de la toma de decisión por el propio pescador mientras busca el recurso. Estos trabajos aplican estrategias de pesca, y comparan el éxito de captura entre aquellos que pescan de manera individual contra los que realizan la pesca en grupo. La asignación espacial del esfuerzo de pesca es un componente importante de la dinámica de una flota, especialmente para entender la causa de la relación no lineal entre la CPUE y la abundancia.

Millischer y Gascuel (2006) desarrollaron otro tipo de sistema multiagente centrado en el individuo (*individual-based modeling*) para modelar las estrategias y eficiencia de pesca con datos simulados. Existen pocos modelos de simulación centrados en el individuo que incluyan alternativas que auxilien a entender mejor, en los procesos de modelación, las interacciones entre los pescadores, la adaptación del comportamiento y la persistencia de problemas complejos relacionados con la pesca (Grimm *et al.* 1999). Dreyfus-León (2006) utilizó autómatas celulares para modelar las interacciones entre los pescadores con el propósito de distribuir espacialmente el esfuerzo de pesca.

Los autómatas celulares (AC) son sistemas discretos dinámicos basados en relaciones o interacciones locales, como muchos sistemas continuos definidos por ecuaciones diferenciales parciales (Toffoli y Margolus 1987). El universo es una matriz de N dimensiones que se modifica en paralelo con base en las reglas que rigen las interacciones locales. Este tipo de modelación permite desarrollar modelos

population of 2500 RUs distributed in the cell matrix is used, such that one cell can contain only one RU (or none). This rule is also applied to the vessels. The simulation consists of 1000 units of time spent fishing by vessels. If one vessel occupies the same cell as a RU, this is considered as capture and the RU thus disappears from the scenario. On the other hand, vessels are allowed to perform 10 search movements in a certain area before deciding whether to remain or move on to another place to continue searching. The decision depends on the type of vessel, that is, its initial attributes (does it or does it not belong to a group and is it considered cartesian or explorer). Here it is necessary to use a dynamic neighborhood, taken to be a grouping of cells of certain characteristics (Dreyfus-León 2006), which also defines the search area and neighboring areas. If the fisher decides to move from the area, the vessel moves to the middle of the chosen space.

Each vessel is located in the center of its neighborhood and has local knowledge or perception of the fishing area, where its dynamics depends on fishing success. The neighborhood of the automaton used to develop the traditional dynamics is the Moore neighborhood modified according to the dynamic neighborhood proposed by Dreyfus-León (2006) for the decisions taken by vessels relative to the possible change of fishing area (fig. 1). For this, the vessel is located in the center of the neighborhood (supercell of 11×11) and the neighborhood is not a fixed space in the simulated world but rather is shaped according to the vessel's position. The

sin la necesidad de utilizar formalismos matemáticos pesados (Hill y Coquillard 1997).

El presente trabajo utiliza y mejora el modelo desarrollado por Dreyfus-León (2006). Se incluyen dos comportamientos muy estudiados en la toma de decisiones de los pescadores (Allen y McGlade 1986): cartesiano y estocástico (aquellos que más se arriesgan al tomar una decisión). El modelo se evalúa con datos sintéticos de una pesquería ficticia.

METODOLOGÍA

Abordar un problema como la toma de decisiones de los pescadores únicamente a partir de la información disponible es bastante complicado. Sin embargo, este problema se puede simplificar mucho si se contempla modelar con un AC. Para ello, se considera un océano virtual, representado por una matriz de celdas de 100×100 de tipo toroidal (i.e., sin bordes verticales ni horizontales).

La asignación inicial tanto de las unidades del recurso (UR) como de la flota pesquera dentro de la matriz es aleatoria. Se usa una población inicial de 2500 UR distribuidas en la matriz de celdas, de tal forma que una celda sólo pueda contener una UR (o ninguna). También se aplica esta regla a las embarcaciones. La simulación consiste de 1000 unidades de tiempo de pesca realizada por las embarcaciones. Si un barco está posicionado en la misma celda que una UR, esto se considera como captura y, por lo tanto, la UR desaparece del escenario. Por otro lado, a las embarcaciones se les permite realizar 10 movimientos de búsqueda local en un área determinada antes de decidir si permanecen o se mueven a otro lado para seguir explorando. La decisión depende del tipo de embarcación, es decir, de sus atributos iniciales (pertenece o no a un grupo y se considera cartesiana o exploradora). Aquí es necesario usar un vecindario dinámico, entendido como la agrupación de celdas con ciertas características (Dreyfus-León 2006), lo que también define el área de búsqueda y las áreas vecinas. Si el pescador decide moverse de área, el barco se mueve al centro del espacio elegido.

Cada barco está localizado en el centro de su vecindario y cuenta con una percepción o conocimiento local del área de pesca, donde su dinámica está en función del éxito de captura. El vecindario del autómata que se usa para desarrollar la dinámica tradicional es el vecindario de Moore modificado según el vecindario dinámico de Dreyfus-León (2006) para las decisiones de las embarcaciones relativas al posible cambio de área de pesca (fig. 1). Para esto último, el barco se encuentra en el centro del vecindario (super celda de 11×11) y el vecindario no es un espacio fijo en el mundo simulado, sino que se conforma según la posición de la embarcación. La interacción entre los barcos del vecindario es la base del AC. Esta interacción es considerada como un cambio de información al realizar la captura (Dreyfus-León 2006). En cada vecindario todas las embarcaciones participan para definir el estado o la calidad del vecindario en términos de

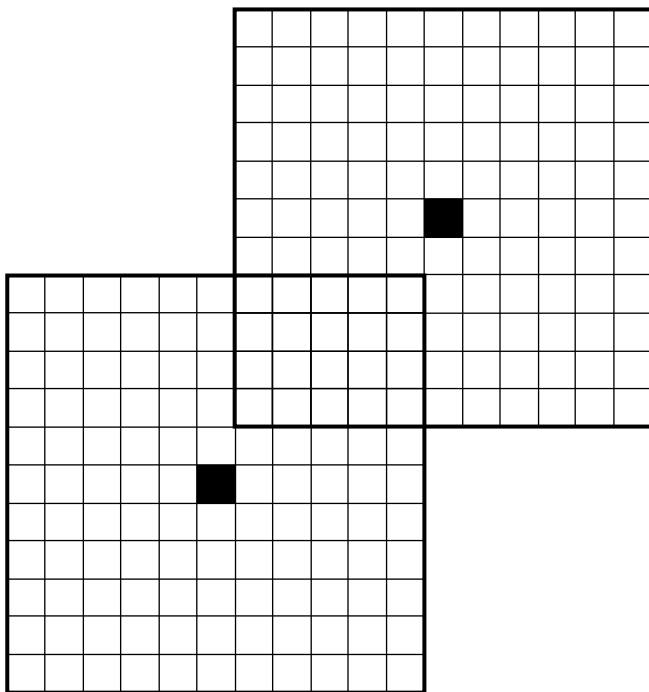


Figure 1. Dynamic neighborhood according to Dreyfus-León (2006).

Figura 1. Vecindario dinámico de acuerdo con Dreyfus-León (2006).

interaction among the neighborhood vessels is the base of the CA. This interaction is taken to be an exchange of information when the catch is made (Dreyfus-León 2006). In each neighborhood all the vessels participate in defining the status or quality of the neighborhood in terms of resource abundance. The opinion of the quality of the cells depends on the catch made by the vessels.

Rules of movement

Resource units

To simulate the population dynamics of the RUs (fish schools as units in the model), certain rules have been defined (table 1). These rules were originally defined as “life rules” by John Conway in 1970, in which each cell can adopt two states depending on the state of the eight adjacent cells.

According to these rules, the population changes of the resource are implicitly represented: recruitment, mortality, assemblages, and group movements. The changes are made every 10 units of time.

Vessels and search strategies

In the neighborhood, all cell conditions are defined and simple rules of movement included in the dynamics of the CA for 20 vessels are followed:

1. In each unit of time, the presence of fish schools is determined in the Moore neighborhood (8 primary neighboring cells).
2. Vessels move only if they have the possibility of making a catch (using a clockwise criterion to conduct the search).
3. The extended and dynamic neighborhood is activated every 10 units of time, equivalent to a supercell of 11 × 11 cells of the automaton, in which the vessel is located in the center, and the Moore neighborhood is now formed by 8 supercells.
4. If a vessel belongs to a group (10 vessels), its neighborhood and supercell (11 × 11) are assessed based on the communication with its partners. If a better fishing area arises based on the CPUE information obtained by the partners in the neighborhood (catch per 10 units of time), the vessel moves there.
5. In the case of independent agents (10 vessels), instead of exchanging information about the extended neighborhood with other vessels, only the presence and number of other vessels are detected in the supercell, using as criterion to decide to move, the movement to the supercell with the most number of vessels. If there are no other vessels they remain in their supercell.
6. Independent or group explorers randomly move to an empty neighboring area if there are no other vessels or if there is no contact with other group vessels in the extended neighborhood, respectively. Cartesian also

abundancia del recurso. La opinión de la calidad de las celdas está en función de la captura que hayan obtenido los barcos.

Reglas de movimiento

Unidades de recurso

Para simular la dinámica poblacional de las UR (cardúmenes como unidades en el modelo), se han definido ciertas reglas (tabla 1). Estas reglas se definieron originalmente como “reglas de vida” por John Conway en 1970, donde cada celda puede adoptar dos estados dependiendo del estado de las ocho celdas adyacentes.

Según estas reglas, los cambios poblacionales del recurso se representan de manera implícita: reclutamiento, mortalidad, agregaciones y movimientos en grupo. Los cambios se realizan cada 10 unidades de tiempo.

Embarcaciones y estrategias de búsqueda

En el vecindario, todas las condiciones de las celdas están definidas y se siguen unas simples reglas de traslado, puestas en la dinámica del AC para 20 embarcaciones, que a continuación se describen:

1. En cada unidad de tiempo, se busca la presencia de peces en el vecindario de Moore (8 celdas primarias vecinas).
2. Las embarcaciones se mueven sólo si tienen la posibilidad de capturar. Los movimientos de búsqueda se hacen en el sentido de las manecillas del reloj.
3. Cada 10 unidades de tiempo entra en acción el vecindario extendido y dinámico, que equivale a una supercelda de 11 × 11 celdas del autómat, en la cual el barco se encuentra en el centro, con un vecindario de Moore conformado ahora por 8 superceldas.
4. Si un barco pertenece a un grupo (10 barcos), su vecindario y su supercelda (11 × 11) se evalúan con base en la comunicación con sus compañeros de grupo solamente. Si existe una zona de pesca mejor, según la información de la CPUE recabada por sus compañeros en el

Table 1. Life rules used in the model. A value of 1 and a value of 0 indicate the presence and absence, respectively, of a resource unit in the cell.

Tabla 1. Reglas de vida utilizadas en el modelo. Los valores 1 y 0 indican, respectivamente, la presencia y ausencia de una unidad de recurso en la celda.

State of the central cell	Number of resource units in neighborhood	State in the subsequent generation
1	6 or 7	1
1	≤5	0
1	8	0
0	>2	1

have this option after a wait of 50 units of time (five contact opportunities in the dynamic neighborhood).

According to these simple decision-making rules, the fisher's movement to the center of the new neighborhood is instantaneous.

The model was developed using a C-language program.

RESULTS

In figure 2 we show, as an example, the cumulative catch of group vessels and independent vessels, together with the abundance of fish schools for one of the model runs. As can be seen, the cumulative catches of the group vessels exceeded, at the end of the time series, the catch of the independent vessels when the abundance of the RUs decreased.

The exploitation rate (capture as a function of abundance) is shown in figure 3. The exploitation rate of both types of vessels was similar until half-way through the time period, after which the group vessels had, in general, a higher exploitation rate.

The catch obtained by group vessels (vessels 1–10) and independent vessels (vessels 11–20) in two runs with explorers for both groups is shown in figure 4. As can be seen, the vessels having the exploring option obtained higher catches. In the first example (fig. 4a), only two group vessels (1 and 2) and two independent vessels (19 and 20) were explorers. In the second example (fig. 4b), three group vessels (1, 2, and 3) and three independent vessels (18, 19, and 20) were explorers. In general, vessels that were able to communicate obtained higher catches than those that worked independently. Moreover, the explorers of both types of vessels had better fishing success. These calculations were made for the second half of the run, when the abundance of RUs is lower.

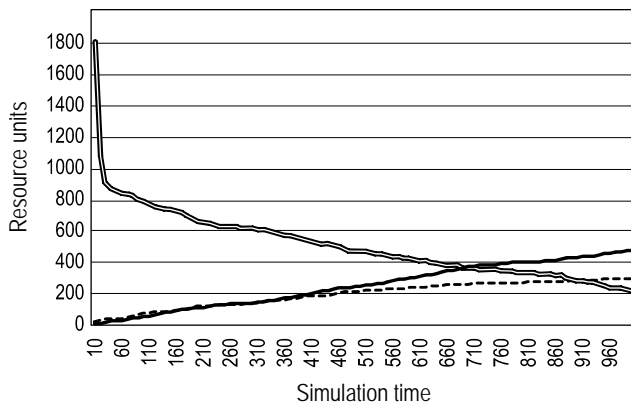


Figure 2. Abundance of fish schools (double line), and cumulative catches of group vessels (black line) and independent vessels (dotted line).

Figura 2. Abundancia de cardúmenes (línea doble) y capturas acumulativas de barcos en grupo (línea negra) y barcos independientes (línea punteada).

vecindario (captura por cada 10 unidades de tiempo), el barco se traslada a ella.

5. En el caso de los agentes independientes (10 barcos), en lugar de intercambiar información sobre el vecindario extendido con otros barcos, detectan sólo la presencia y el número de otros barcos en cada supercelda, y utilizan como criterio de decisión de movimiento el traslado a la supercelda con mayor cantidad de barcos. Si no hay más barcos, permanecen en su supercelda.
6. Las embarcaciones exploradoras independientes o en grupo se mueven aleatoriamente a una zona vecina vacía en caso de no existir otras embarcaciones o contacto con otras embarcaciones en grupo en el vecindario extendido, respectivamente. Los cartesianos también tienen esta opción después de una espera de 50 unidades de tiempo (cinco oportunidades de contacto en el vecindario dinámico).

Según estas simples reglas de decisión, el movimiento del pescador al centro del nuevo vecindario es instantáneo.

El modelo se realizó con un programa en lenguaje C.

RESULTADOS

En la figura 2 se muestra, como ejemplo, la captura acumulativa de barcos en grupo y barcos independientes, y la abundancia de cardúmenes de una de las corridas del modelo. Se observa que las capturas acumulativas de los barcos en grupo sobrepasan, al final de la serie de tiempo, la captura de los barcos independientes cuando la abundancia de las UR se reduce.

La tasa de explotación (captura en función de la abundancia) se muestra en la figura 3. La tasa de explotación de los dos tipos de embarcaciones fue similar hasta la mitad del periodo de tiempo; después, los barcos en grupo produjeron, en general, una tasa de explotación más alta.

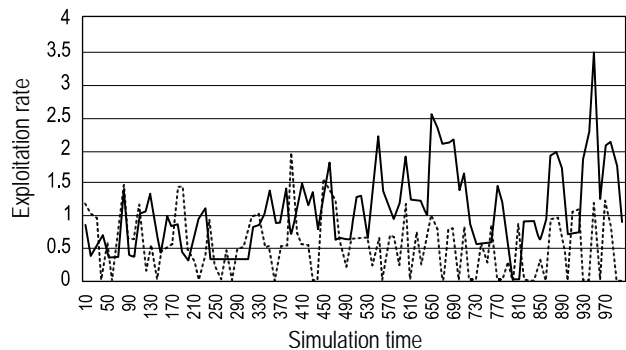


Figure 3. Example of the exploitation rate of group vessels (continuous line) and independent vessels (broken line).

Figura 3. Ejemplo de la tasa de explotación de embarcaciones en grupo (línea continua) y embarcaciones independientes (línea discontinua).

Statistical tests were performed for the comparison of means with 30 repetitions using Student's *t*-test. Highly significant ($P < 0.01$) differences were observed between group vessels and independent vessels, between group explorers and independent explorers, and for the comparison of cartesian vessels.

DISCUSSION

This study does not aim to represent a real fishery. Emphasis is placed on the methodology and on showing the benefits it has in the process of modelling fishery systems. We decided to use simulated information because of the lack of real information available to model and show the possible effects of simulated human behavior.

The resource is presented very simply because we were not attempting to represent a particular fishery. The goal was to develop a general model that can be used to study and analyze some behaviors of the actors (fishers) and their effects on fishing efficiency. To adapt it to a real fishery, it would be necessary to consider the spatiotemporal dynamics of the resource under study.

All the effort dynamics generated is based on local knowledge, defined as a two-level neighborhood, in which

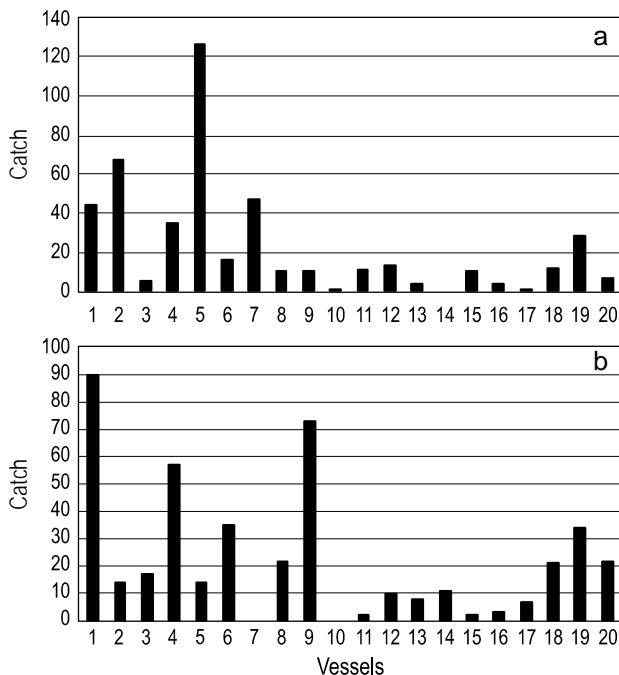


Figure 4. Catch during the second part of the simulation. Vessels 1–10 are the group vessels and vessels 11–20 the independent vessels. The explorer vessels are 1, 2, 19, and 20 in (a), and 1, 2, 3, 18, 19, and 20 in (b).

Figura 4. Captura durante la segunda parte de la simulación. Los barcos 1–10 son los barcos en grupo y los barcos 11–20 son los barcos independientes. Los barcos 1, 2, 19 y 20 en (a), y 1, 2, 3, 18, 19 y 20 en (b) son exploradores.

La captura obtenida por los barcos trabajando en grupo (barcos 1–10) y los barcos independientes (11–20) en dos corridas con exploradores para ambos grupos se presenta en la figura 4. Se observa que las unidades con opción de exploración obtuvieron capturas más altas. En el primer ejemplo (fig. 4a), sólo dos barcos en grupo (1 y 2) y dos barcos independientes (19 y 20) fueron exploradores. En el segundo caso (fig. 4b), tres barcos en grupo (1, 2 y 3) y tres barcos independientes (18, 19 y 20) fueron exploradores. En general, la captura obtenida por los barcos con posibilidad de comunicación fue mayor que la de aquellos que trabajaron independientemente. Por otro lado, los exploradores de ambos tipos de barcos obtuvieron mayor éxito en la pesca. Estos cálculos se hicieron para la segunda mitad de la corrida, cuando la abundancia de la UR es menor.

Se realizaron las pruebas estadísticas de comparación de medias con 30 repeticiones y mediante la prueba *t* de Student. Se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre barcos en grupo y barcos independientes, entre exploradores en grupo y exploradores independientes, y para la comparación de embarcaciones cartesianas.

DISCUSIÓN

Este trabajo no pretende representar una pesquería real. El énfasis está en la metodología y en mostrar las bondades que ésta tiene en el proceso de modelación de sistemas pesqueros. Se optó por utilizar información simulada debido a la falta de información real para modelar y mostrar los posibles efectos del comportamiento humano simulado.

El recurso se representa de manera muy sencilla porque no se pretendió representar a una pesquería en particular. El objetivo fue desarrollar un modelo general que permitiera estudiar y analizar algunos comportamientos de los actores (pescadores) y sus efectos en la eficiencia de pesca. Para adaptar el modelo a una pesquería real, se debe considerar la dinámica espaciotemporal del recurso en cuestión.

Toda la dinámica del esfuerzo se genera con base en un conocimiento local, definido como vecindario en dos niveles, donde no se permite la comunicación o visualización de agentes alejados. Es decir, ese aspecto no se considera en este trabajo. El trabajo se enfoca en analizar algunos comportamientos específicos y excluye el conocimiento de áreas de pesca (memoria, experiencia, aprendizaje). Con base en lo aprendido en este trabajo, en los trabajos futuros se puede plantear un modelo de AC que involucre algunos de estos aspectos, además de considerar aspectos económicos (costo-beneficio), que son los que impulsan las pesquerías.

Todo el conocimiento que se utiliza es “instantáneo”, referente al momento particular en dos niveles del AC. En el caso de utilizar esta metodología, el tamaño de la celda o su representación estaría en función de la cobertura espacial de un barco por unidad de tiempo (i.e., el espacio que alcanza a cubrir con relación a la velocidad del barco). El vecindario extendido dependería del equipo a bordo (e.g., radar y sonar).

the communication or visualization of distant agents is not allowed (i.e., that aspect is not considered herein). This study focuses on analyzing some specific behaviors and excludes knowledge of fishing grounds (memory, experience, learning). Based on what we have learned here, future studies could contemplate a CA model containing some of these aspects, as well as considering economic (cost-benefit) aspects, which are what drive the fisheries.

All the knowledge that is used is “instantaneous” and refers to the particular moment in two levels of the CA. In the event of using this methodology, the size of the cell or its representation would depend on the spatial coverage of a vessel per unit of time (i.e., space covered relative to vessel speed). The extended neighborhood would depend on the equipment onboard (e.g., radar and sonar).

We tried to make the vessels that work in groups comparable to those that do not, and attempted not to design an independent vessel which, since its design, would be limited in relation to the group vessels. We therefore considered the possibility that an independent vessel or fisher could have some type of signal or keys of the quality of the spaces by detecting the presence of other vessels even though there was no communication between them.

The fishers' rules were adapted so that the system would behave as a CA. Essential characteristics included being discrete, and that changes be done in parallel and according to the neighborhood information.

In general, group vessels had higher catches but the difference was more marked when the RU was low. In other words, the advantage of belonging to a group depends on the conditions of the resource or the environment. This can be observed in the cumulative plot, which shows that when resource abundance is high, independent vessels behave similarly to group vessels, so there is no advantage in exchanging information or in being stochastic when the probability of finding the resource in any area is relatively high. When this probability decreases, however, the exploitation rate of the vessels belonging to the group maintaining communication remains the same even when the abundance decreases, whereas the independent vessels are affected. Thus, belonging to a group or exchanging information results in an adaptive advantage in situations of risk or uncertainty, and the exploratory behavior by itself also generates an advantage. In the case of a group, communication allowed the experience of stochastics to be transmitted to the other members, whereas in the case of independent vessels, only the stochastics benefited. The simulations show that the exploratory behavior can generate rewards but in some cases also losses. Independent explorers occasionally achieved relatively high catches, higher even than group explorers. The latter can be explained by two opposite effects of group membership: cooperation and competition. Cartesian vessels and explorers benefit from a successful run but at the same time can generate competition for the resource, reducing the individual benefits for both types of fishers.

Se trató de hacer comparables a las embarcaciones que trabajan en grupo con las que no lo hacen, y se intentó no diseñar un barco independiente que, desde su diseño, estuviera limitado con respecto a los barcos en grupo. Por eso, se consideró la posibilidad de que una embarcación o pescador independiente pudiera tener algún tipo de señal o claves de la calidad de los espacios con la detección de otros barcos, aunque no se comunicara con ellos.

Se ajustaron las reglas de los pescadores para que el sistema se comportara como un AC. Las características esenciales fueron ser discreto y que los cambios se realizaran en paralelo y de acuerdo con la información de los vecindarios.

En general, se observa que las embarcaciones en grupo obtuvieron capturas más altas, pero la diferencia fue más marcada cuando la abundancia de la UR fue baja. Es decir, que la ventaja de pertenecer a un grupo se da dependiendo de las condiciones del recurso o del medio ambiente. Esto se aprecia en la gráfica de captura acumulativa, donde se observa que cuando la abundancia del recurso es alta, los barcos independientes tienen un desempeño semejante a los barcos en grupo, por lo que no existe ventaja adaptativa del intercambio de información o de ser estocástico cuando la probabilidad de encontrar el recurso en cualquier zona es relativamente alta. Sin embargo, al disminuir esta probabilidad, la tasa de explotación de los barcos que conforman el grupo en comunicación se mantiene pese a la disminución de la abundancia, mientras que las embarcaciones independientes se ven afectadas. Por lo tanto, el pertenecer a un grupo o intercambiar información da una ventaja adaptativa en situaciones de riesgo o incertidumbre, y el comportamiento exploratorio por sí solo también genera una ventaja. En el caso de un grupo, la comunicación permitió transferir la experiencia de los estocásticos a los demás miembros, mientras que en el caso de los barcos independientes, sólo los estocásticos sobresalieron. Las simulaciones muestran que el comportamiento de exploración puede generar recompensas, aunque en otros casos también puede generar pérdidas. Las embarcaciones exploradoras independientes lograron, en ocasiones, capturas relativamente altas, incluso mayores que las de los exploradores en grupo. Esto último se puede explicar por dos efectos contrarios de la pertenencia a un grupo: cooperación y competencia. Los barcos cartesianos y exploradores se benefician de la embarcación exitosa y al mismo tiempo pueden generar competencia por recurso, disminuyendo los beneficios individuales para ambos tipos de pescadores.

El comportamiento estocástico se convierte en una necesidad, en un comportamiento o estrategia evolutiva estable en las situaciones de incertidumbre descritas, aunque en el caso de un grupo en comunicación, basta la existencia de algunos exploradores para que los cartesianos obtengan una ventaja, como lo menciona Batten (2006). En el caso de los barcos independientes, un comportamiento cartesiano bajo gran incertidumbre no es una estrategia evolutiva estable y sólo el estocástico tiene posibilidad de éxito.

Stochastic behavior becomes a necessity, a stable evolutionary strategy under the described situations of uncertainty, though in the case of a group maintaining communication, the presence of some explorers is enough for cartesians to gain an advantage, as mentioned by Batten (2006). In the case of independent vessels, a cartesian behavior under great uncertainty is not a stable evolutionary strategy and only the stochastics have the possibility of success.

Modeling the behavior and distribution of vessels using CA can be an alternative method for calculating the efficiency of vessels and their effects on abundance estimates, and for developing a model that can be useful for fisheries management in terms of simulating the conditions and effects of a possible fishery regulation.

The arrangement of this model resembles that of a pelagic fishery because the environment is characterized as an open ocean. Moreover, the strategies used in the model also resemble those used in a pelagic fishery, since both the group and individual search strategies and communication between vessels occur in this type of fishery.

Abundance would be another aspect to model in a different way or to adapt to the spatiotemporal dynamics of a resource to make it more comparable to a real one. A benthic fishery could also be represented, but in that case the RUs could represent individuals instead of schools, and the resource could be sessil.

The applicability of this model could be the basis for other models used to simulate conditions of regulation and conservation of resources and analyze the benefits of these measures in a simulated world. In any case, this model is generic and requires adjustments to any fishery of interest and to the specific modelling objectives.

English translation by Christine Harris.

REFERENCES

- Allen PM, McGlade JM. 1986. Dynamics of discovery and exploitation: The case of the Scotian Shelf groundfish fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 1187–1200.
- Bannerot SP, Austin CB. 1983. Using frequency distributions of catch per unit effort to measure fish-stock abundance. *Trans. Am. Fish. Soc.* 112: 608–617.
- Batten D. 2006. The uncertain fate of self-defeating systems. Chapter 4. In: Perez P, Batten D (eds.), *Complex Science for a Complex World. Exploring Human Ecosystems with Agents*. ANU E Press, Canberra, pp. 57–70.
- Botsford LW, Methot Jr RD, Johnston E. 1983. Effort dynamics of the northern California Dungeness crab (*Cancer magister*) fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 337–346.
- Dreyfus-León M. 2006. Modelling cooperation between fishermen with a cellular automaton. A framework for fishing effort spatial dynamics. *Ecol. Informatics* 1: 101–105.
- Dreyfus-León M, Gaertner D. 2006. Modelling performance and information exchange between vessels with artificial neural networks. *Ecol. Model.* 195: 30–36.
- Ehrhardt MN. 1981. Métodos de análisis de las estadísticas de captura y esfuerzo de la pesca y su aplicación en modelos globales de pesquerías. Curso sobre Biología pesquera. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, Baja California Sur, México. October 1981.
- Gaertner D, Dreyfus-León M. 2004. Analysis of non-linear relationships between catch per unit effort and abundance in a tuna purse-seine fishery simulated with artificial neural networks. *ICES J. Mar. Sci.* 61: 812–820.
- Gillis DM, Peterman RM. 1998. Implications of interference among fishing vessels and the ideal free distribution to the interpretation of CPUE. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 37–46.
- Grimm V, Wyzonirski T, Aikman D, Uchmanski J. 1999. Individual-based modeling and ecological theory: Synthesis of a workshop. *Ecol. Model.* 115: 275–282.
- Gulland JA. 1964. Catch per unit effort as a measure of abundance. *Rapp. P-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer* 155: 8–14.
- Hilborn R. 1985. Fleet dynamics and individual variation: Why some people catch more fish than others. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 2–13.
- Hilborn R, Walters CJ. 1987. A general model for simulation of stock and fleet dynamics in spatially heterogeneous fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44: 1366–1369.

- Hill DRC, Coquillard P. 1997. *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson, Paris, 273 pp.
- Little LR, Kuikka S, Punt AE, Pantus F, Davies CR, Mapstone BD. 2004. Information flow among fishing vessels modelled using a Bayesian network. *Environ. Model. Software* 19: 27–34.
- Mangel M, Clark, CW. 1983. Uncertainty, search and information in fisheries. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 41: 93–103.
- Millischer L, Gascuel D. 2006. Information transfer, behavior of vessels and fishing efficiency: An individual-based simulation approach. *Aquat. Living Resour.* 19-1: 1–13.
- Palmer CT. 1991. Kin-selection, reciprocal altruism and information sharing among Maine lobstermen. *Ethol. Sociobiol.* 12: 221–235.
- Paloheimo JE, Dickie LM. 1964. Abundance and fishing success. *Rapp. P-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer* 155: 152–163.
- Polacheck T. 1988. Analysis of the relationship between the distribution of searching effort, tuna catches and dolphin sightings with individual purse seine cruises. *Fish. Bull.* 86(3): 351-366.
- Toffoli T, Margolus N. 1987. *Cellular Automata Machines. A New Environment for Modeling*. MIT Press, 259 pp.

*Received November 2010;
accepted June 2011.*