

ARTÍCULO

Simulación de la deriva de larvas de langosta en aguas oceánicas adyacentes a la plataforma suroccidental de Cuba: Aplicación del modelo biofísico LADIM

Simulation of lobster larvae drift in oceanic waters adjacent to the southwest Cuba shelf: Application of LADIM biophysical model

Heriberto Martín¹, Abel Betanzos-Vega¹, Jacqueline Simanca², Rafael Puga¹,
Frode Vikebø³, Jon Albertsen³ y Arturo Tripp-Quezada^{4*}

¹Centro de Investigaciones Pesqueras, Calle 246 # 503 e/ 5ta y Mar, Santa Fé, Playa, La Habana, Cuba

²Instituto de Oceanología, Calle 184e/ 1ra y 3ra, Rpto. Flores, Playa, La Habana, Cuba

³Institute of Marine Research, N-5817, Bergen, Noruega

⁴Instituto Politécnico Nacional, Unidad Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Col. Playa Palo Santa Rita, Ap. 592, La Paz, México.*atripp@ipn.mx

Abstract. The pelagic larval stage of the common Caribbean lobster *Panulirus argus*, takes place during 6-8 months in ocean waters away of shelf. Predicting larval recruitment and identify the areas of arrival and settlement, and assess the quality of their breeding habitats, have been permanent necessity in studies of population dynamics of this fishery resource. The purpose of this work was to determine the potential percentage of self-recruitment larvae to the southwest Cuba shelf, and to identify the main areas of arrival or settlement of puerulus. The simulation, using particles released in a major period of spawning and larval recruitment, using the numerical model LADIM developed in the Institute of Marine Research in Norway. The percentage of self-recruited larvae was 33.8%. The zones of arrival and greater density of particles, according to modeling, coincided with the areas that by *in situ* studies have shown greater settlement of puerulus and have been classified as natural nurseries of post-larvae and juveniles. This suggests that hydrodynamics ocean-shelf connectivity in the southwest region of Cuba, it is decisive to the success of recruitment and distribution of lobster larvae, in the final stage.

Key words: Biophysical model, lobster larval drift, Cuba

Resumen. La etapa larval pelágica de la langosta común del Caribe *Panulirus argus*, transcurre durante 6-8 meses en aguas oceánicas alejadas de la plataforma. Predecir el reclutamiento larval e identificar las zonas de arribo y asentamiento, así como evaluar la calidad de sus hábitats naturales de cría, ha sido una necesidad permanente en los estudios y evaluaciones del recurso langosta. Este estudio tuvo como objetivo determinar el porcentaje potencial de auto reclutamiento de larvas de langosta a la plataforma suroccidental de Cuba, a partir de su modelación. La simulación, con el modelo numérico LADIM del Instituto de Investigaciones Marinas de Noruega, se inició con partículas liberadas en marzo, mes de máximos de reproducción y desove, completando un ciclo larval de unos 7 meses. Las partículas mostraron movimientos de dispersión, con periodos de retención, en función de los diferentes mecanismos hidrodinámicos, culminando con un 33,8% de larvas auto-reclutadas a la plataforma suroccidental de Cuba. Las zonas de arribo y de mayor densidad de partículas, según modelación, coincidieron con las zonas que por estudios *in situ* han mostrado mayor asentamiento de puerulus y han sido clasificadas como criaderos naturales de post-larvas y juveniles; esto sugiere que la conectividad hidrodinámica océano-plataforma, influye en el éxito del reclutamiento y distribución de las larvas de langosta, en estadio final, a la plataforma suroccidental de Cuba.

Palabras clave: Modelo biofísico, deriva larval de langosta, Cuba

INTRODUCCIÓN

La complejidad del ciclo de vida de la langosta común del Caribe *Panulirus argus* (Latreille, 1804), con un periodo larval estimado de entre 6 y 8 meses de vida oceánica (Cruz *et al.* 1991, Cruz 1999), dificulta predecir el reclutamiento de puerulus (estadio considerado de transición entre su vida pelágica y bentónica) a las áreas de plataforma, donde se inicia su ciclo de vida bentónico y donde se produce la captura comercial de

la especie. La etapa larval pelágica de la langosta *P. argus* transcurre en aguas oceánicas, estando expuesta a numerosas fuentes de mortalidad por depredación y otros factores biológicos y ambientales, pudiendo ser transportadas por las corrientes, dispersadas o retenidas (Cruz *et al.* 1990, Alfonso *et al.* 1991, Butler *et al.* 2011).

Las variaciones en la abundancia del reclutamiento de puerulus a la plataforma, además de depender en gran medida del stock desovante y de otros factores biológicos (Cruz *et al.* 2001, Ehrhardt & Fitchett 2010), dependerá de los procesos hidroclimáticos que se presenten en su extenso ciclo de vida larval, expresándose, que el mayor o menor número de puerulus que logran arribar a las zonas de plataforma, depende de las variaciones estacionales del régimen de vientos y del patrón de corrientes marinas superficiales, entre otros factores que actúan de forma sincronizada (Pearce & Phillips 1994, Butler *et al.* 2011). Sin embargo, las correlaciones obtenidas para demostrar estos niveles de asociación, han sido relativamente débiles o han producido resultados contradictorios (Cruz 1999, Jeffs *et al.* 2005), debido a que en ocasiones se tiende a considerar a las larvas como partículas pasivas a merced de las corrientes marinas, cuando realmente el movimiento de los puerulus hacia la costa es más que un proceso de dispersión o de azar (Acosta *et al.* 1997, Jeffs *et al.* 2005, Butler *et al.* 2008¹, 2011).

El objetivo de este trabajo fue determinar el porcentaje de autoreclutamiento larval a la plataforma suroccidental de Cuba, a partir de la simulación de la deriva de las larvas filosomas de langosta *P. argus*, utilizando el modelo numérico LADIM, e identificar áreas potenciales de asentamiento de los puerulus, a partir de las zonas de arribo de las partículas al final de la modelación.

MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se eligió para la modelación de la deriva larvaria las aguas oceánicas alrededor de Cuba, incluyendo parte del Mar Caribe occidental; seleccionando el borde exterior de la plataforma suroccidental o Golfo de Batabanó como área de salida o liberación de partículas (Fig. 1), que simulan larvas recién eclosionadas o en estadio I (Alfonso *et al.* 1995, Hernández *et al.* 1995).

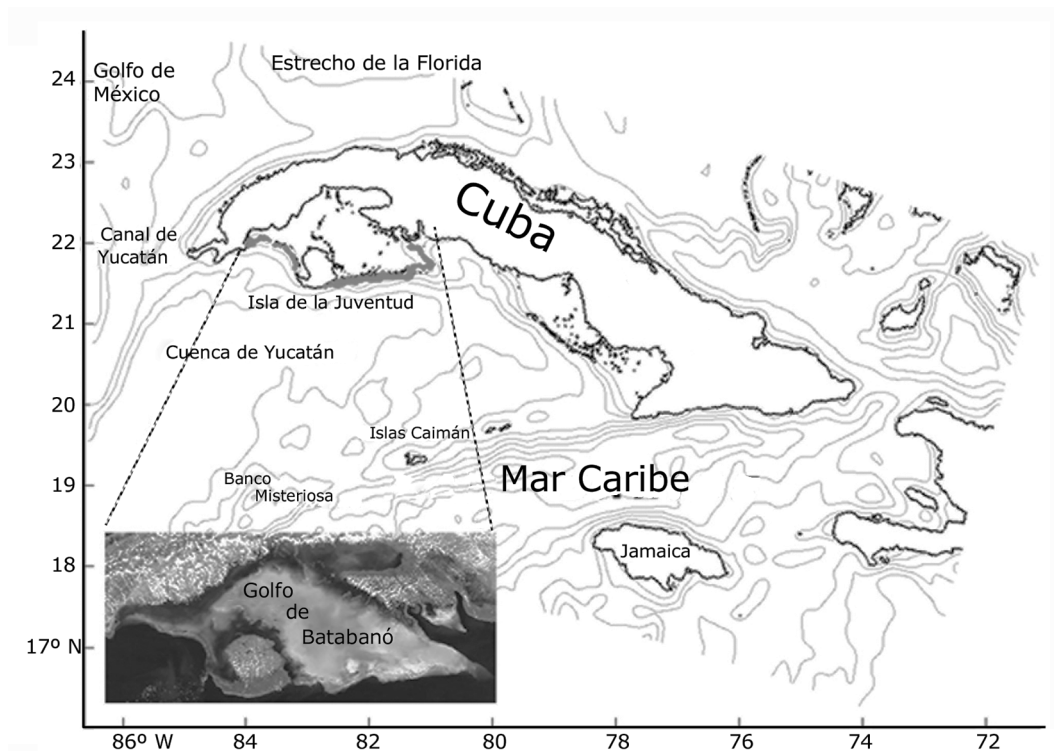


Figura 1. Área del dominio cubano utilizado para la simulación. Se muestran las zonas de liberación de partículas, en el borde exterior de la plataforma suroccidental de Cuba, Golfo de Batabanó / Area of Cuban domain used for the simulation. Areas particle release is on the outside edge of the southwestern shelf of Cuba, Gulf of Batabanó

¹Butler MJ, R Cowen, C Paris, H Matsuda & J Goldstein. 2008. Long PLDs, larval behavior, and connectivity in Spiny Lobster. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, July 7-11, 2008 Fort Lauderdale. [Abstract] p. 123

Se utilizó el modelo biofísico de advección y difusión lagrangeano, [*Lagrangian Advection and Diffusion Model*] (LADIM), desarrollado en el Instituto de Investigaciones Marinas de Noruega (IMR). Este tipo de modelo permite estudiar los efectos de los factores físicos y biológicos en la dinámica del zooplancton e ictioplancton (North *et al.* 2009, Vikebø *et al.* 2011, Paris *et al.* 2013). Los datos de fuerza para la simulación del transporte o deriva de partículas, se obtuvieron del Regional Ocean Modeling System (ROMS). El seguimiento de las partículas se ajustó para un intervalo de 6 h por día, en un periodo de 210 días (7 meses), que suman un total de 840 ciclos; combinado con una salida de ROMS para un dominio de 2 x 2 km de resolución espacial.

Al modelo biofísico LADIM se le acopló información oceanográfica del dominio cubano, de la base de datos ROMS, correspondiente al periodo de modelación (3 de marzo al 30 de septiembre 2012). La información oceanográfica espacio-temporal, transferida desde ROMS al modelo biofísico, brindó los datos para simular la deriva, a diferentes profundidades, según componentes horizontales (u y v) de la velocidad de las corrientes marinas, resultante de las variables hidrometeorológicas que incidieron en sus variaciones. Los datos de ROMS, para esta simulación experimental, se combinaron en el modelo LADIM con los siguientes datos relacionados con la especie: (1) áreas de mayor actividad reproductiva y desove (Cruz *et al.* 1990, Cruz 1999, De León 2005), para definir la zona de salida de

las partículas y las fechas de liberación, seleccionando el mes de marzo debido a la combinación de incrementos de temperatura del agua y fotoperiodo largo en ese mes, que potencian la maduración y desove (Dávila *et al.* 2007); (2) 7 meses como tiempo medio de duración de la fase de vida pelágica (Cruz *et al.* 1990, Alfonso *et al.* 1991); (3) debido a que las corrientes oceánicas difieren frecuentemente en dirección o velocidad con la profundidad (Paris *et al.* 2013) se le programó una profundidad a las partículas en función de la migración vertical ontogenética (MVO), según estadios larvales (Alfonso *et al.* 1995, 2000), y según variación mensual de la profundidad de inicio de la termoclina, debido al criterio de que en muy pocas ocasiones se han encontrado larvas por debajo de la termoclina (García *et al.* 1991, Hernández & Piñeiro 2003).

La liberación de las partículas/larvas se simuló para diferentes días (3, 15 y 27 de marzo 2012). Se liberaron 21.927 partículas cada 12 días, para una salida total de 65.781 partículas. Sólo se liberaron partículas en marzo, para simular la trayectoria y reclutamiento resultante de un sólo mes de desove; sin interrupción de otros desoves sucesivos, como ocurre de forma natural. El 30 de septiembre 2012 fue la fecha final de la simulación, completando un periodo que se inició en marzo, mes de mayor actividad reproductiva de la langosta *P. argus* en Cuba, y parte del periodo, agosto-septiembre, de mayor reclutamiento larval a la plataforma (Cruz *et al.* 1990, 1991; De León 2005).

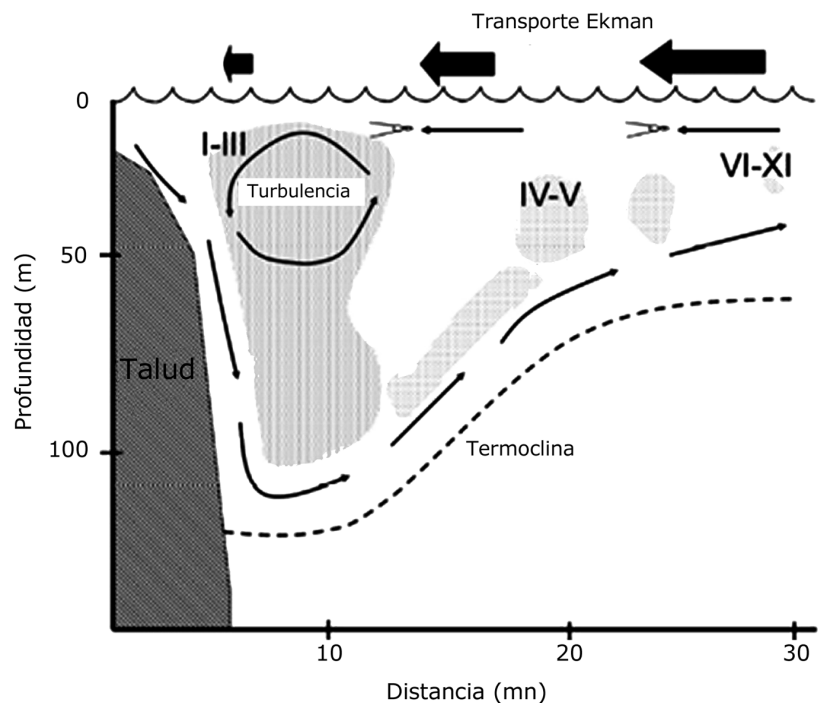


Figura 2. Esquema hipotético del mecanismo oceanográfico al sur de la plataforma suroccidental de Cuba. Se muestra una estimación de la distribución horizontal y vertical de los estadios larvales (I-XI). Tomado de Pérez-Santos (2011), modificado de Alfonso *et al.* (1995) y Hernández *et al.* (1995) / Hypothetical schematic of oceanographic mechanism south of the southwestern shelf of Cuba. An estimate of the horizontal and vertical distribution of larval stages (I-XI) is displayed. Taken from Pérez-Santos (2011), as amended by Alfonso *et al.* (1995) and Hernández *et al.* (1995)

Para la liberación, las partículas se colocaron en el borde exterior de la plataforma suroccidental, en la isobata de 40 m, debido al criterio de que en ese periodo el mayor desove ocurre entre los 20 y 50 m de profundidad, y que las larvas recién eclosionadas son arrastradas a mayor profundidad por el hundimiento de las aguas más densas (efecto 'cascada'), que se produce en el talud (Fig. 2), para posteriormente ser desplazadas hacia el océano por la turbulencia que se genera en los bordes de la plataforma (Alfonso *et al.* 1995, 2000; Hernández *et al.* 1995, Hernández & Piñeiro 2003). Durante marzo y abril, se asumió que las partículas liberadas equivaldrían a larvas filosomas en estadios I-III (Alfonso *et al.* 1995), y a medida que transcurrió el tiempo de la modelación, la distribución vertical de las partículas fue programada para diferentes niveles de profundidad, a partir de la 'edad' de las partículas, en correspondencia con la ubicación vertical de las larvas según fases del ciclo de vida pelágico (Alfonso *et al.* 1995, 2000). Según edad virtual de las partículas, a partir de los 60 días y hasta los 180 días (mayo-agosto), las partículas se reubicaron a la profundidad de 25 m, profundidad promedio en un ciclo diurno, según distribución vertical de las larvas filosomas en estadios larvales del IV a IX, (Baisre 1976, Alfonso *et al.* 1995, 2000). A partir de 180 días (septiembre) el programa localizó las partículas (estadio larval final XI), a una profundidad de 1 m, según la profundidad estimada de arribo de los puerulus a la plataforma (Cruz *et al.* 1991, Pearce & Phillips 1994, Cruz 1999).

La salida concluyente de la simulación, es un mapa con la distribución final de las partículas según densidad (partículas km⁻²).

RESULTADOS

Durante la simulación del primer desove, se observaron núcleos de mayor concentración de partículas a una distancia de entre 15 y 25 millas náuticas (mn), al SE y SW de la Isla de la Juventud, respectivamente (Fig. 3a); al SW de la Isla de la Juventud y al norte de la Cuenca de Yucatán, una ramificación de partículas fue transportada hacia el Canal de Yucatán. Durante la segunda liberación, las partículas mostraron una mayor dispersión con direcciones dispares por toda la región (Fig. 3b); observándose un núcleo de retención al SW de la Cuenca de Yucatán, y un transporte continuo de partículas hacia el Canal de Yucatán. Durante los primeros estadios larvales (entre 10 y 30 días de iniciada las liberaciones), algunas partículas liberadas al este de la plataforma mostraron un movimiento hacia el oeste, con desplazamiento hacia las zonas bajas del golfo de Batabanó; estas partículas detuvieron su movimiento al adosarse a la costa o bien se mantuvieron girando dentro del golfo.

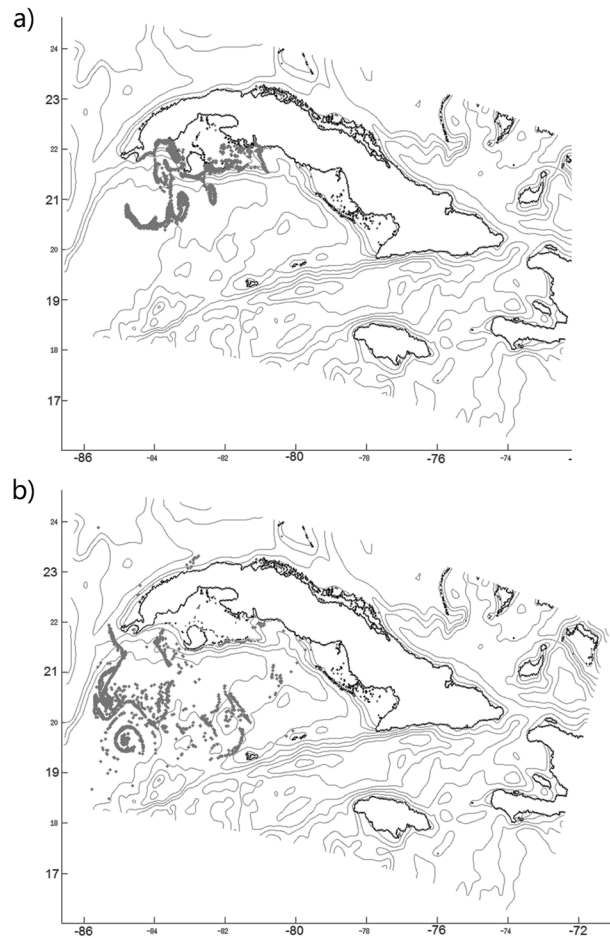


Figura 3. Simulación de deriva larvaria en la capa de 40 m. a) 12 días de la primera liberación (14 de marzo 2012); b) 24 días de la primera liberación (26 de marzo 2012) / Simulation of larval drift layer 40 m deep. a) 12 days after the first release (March 14, 2012); b) 24 days from the first release (March 26, 2012)

La difusión de partículas liberadas al sur de la plataforma suroccidental de Cuba, continuaron su movimiento hasta unas 150 mn al sur. Cercano a los bancos Misteriosa y Rosario, al este de Gran Caimán, y adyacente a la Península de Yucatán (Fig. 4a), se reconocieron 2 núcleos relacionados con remolinos de meso-escala (eddies), y se mantuvo un flujo continuo de partículas con dirección al Canal de Yucatán. Después de 60 días de la salida inicial, con todas las partículas transferidas a la profundidad de 25 m, el flujo de partículas se extendió hasta unas 200 mn al sur de la zona de liberación, disminuyendo el transporte hacia el Canal de Yucatán (Fig. 4b).

Desde finales de mayo, entre los 90 y 100 días después de la liberación inicial, ocurre una mayor dispersión por toda la región de la Cuenca de Yucatán, con núcleos esporádicos de

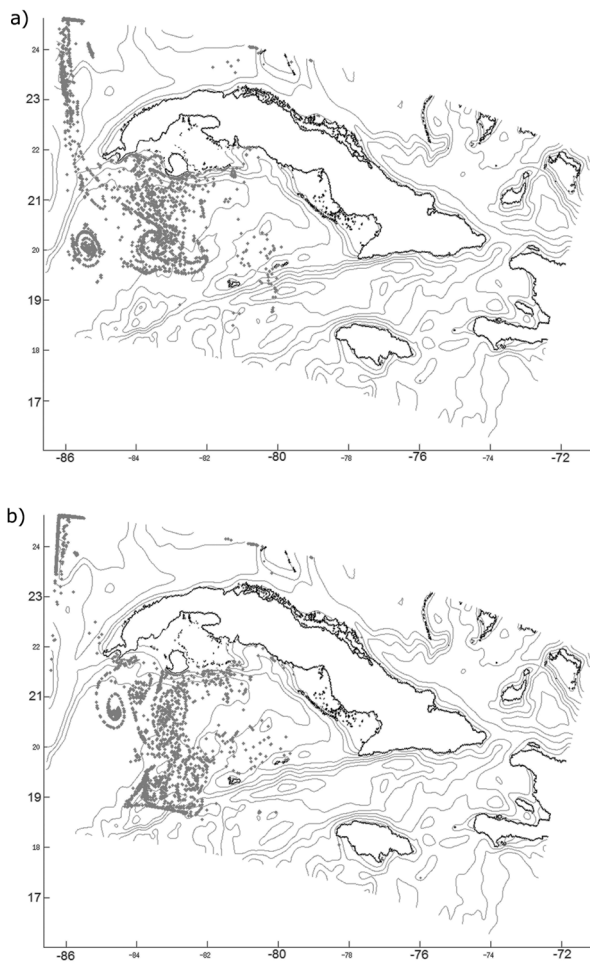


Figura 4. Simulación de deriva larvaria. a) 48 días de la primera liberación (19 de abril 2012), simulación de la deriva en la capa de 40 m; b) 60 días de la primera liberación (1 de mayo 2012), simulación de la deriva en la capa de 25 m / Simulation of larval drift. a) 48 days after the first release (April 19, 2012) simulation of drift in the layer of 40 m; b) 60 days after the first release (May 1, 2012) simulation of drift in the layer of 25 m

retención y dispersión que desde la Cuenca de Caimán mantienen un transporte hacia el oeste. El flujo de partículas hacia el Canal de Yucatán (Fig. 5a) continuó entre los 100 y 150 días post-liberación inicial; mientras que, desde el vórtice de un núcleo de retención de menor extensión, *cuasi* permanente a unas 15 millas al SE de la Isla de la Juventud, se inició una advección y difusión de partículas con rumbo norte. A los 180 días de iniciada la simulación, reubicadas todas las partículas en la capa de 1 m de profundidad, el modelo mostró un incremento en el flujo o deriva hacia la plataforma suroccidental de Cuba, interior del Golfo de Batabanó (Fig. 5b); adonde las partículas fueron arribando secuencialmente. Para esa etapa, 6 meses después de la liberación inicial, fue evidente la disminución

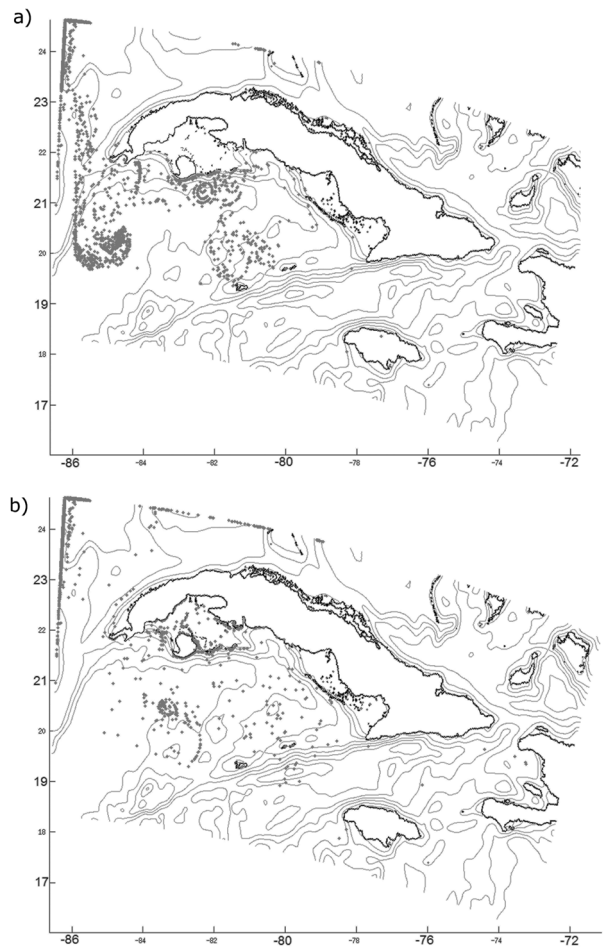


Figura 5. Simulación de la deriva larvaria. a) 100 días después de la primera liberación (10 de junio 2012), simulación de la deriva en la capa de 25 m; b) 183 días de la primera liberación (2 de septiembre 2012), simulación de la deriva superficial (1 m de profundidad) / Simulation of larval drift. a) 100 days after the first release (June 10, 2012), simulation of drift in the layer of 25 m; b) 183 days of the first release (September 2, 2012), simulation of surface drift (1 m deep)

de partículas en el Caribe noroccidental y hacia el Canal de Yucatán; y según datos de ROMS modelados, desde finales de agosto se observó una menor presencia de remolinos de meso-escala (eddies) en el Caribe noroccidental.

De 65.781 partículas liberadas, 1.860 partículas no experimentaron movimiento relacionado con factores de error en el tratamiento o blanqueo de la línea de tierra, y 3.153 liberadas en el talud al este de la plataforma, fueron transportadas hacia el interior del golfo de Batabanó, descontándose un total de 5.013 partículas de la simulación. Al final de la modelación, la cantidad de partículas que arribaron (auto-reclutadas) a la plataforma suroccidental, fue de 26.580, para un 33,82% de auto-reclutamiento.

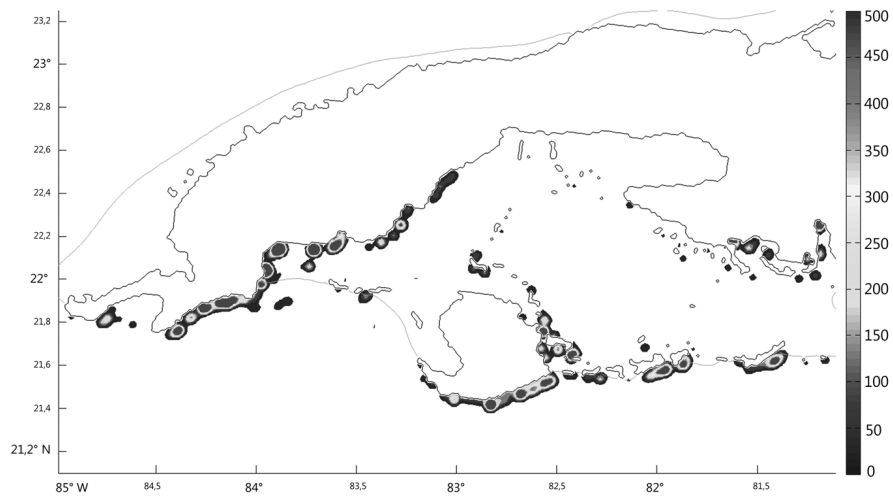


Figura 6. Ubicación final o asentamiento de las partículas liberadas según densidad, cantidad de partículas km^{-2} / Final location or settling of particles released as density, number of particles km^{-2}

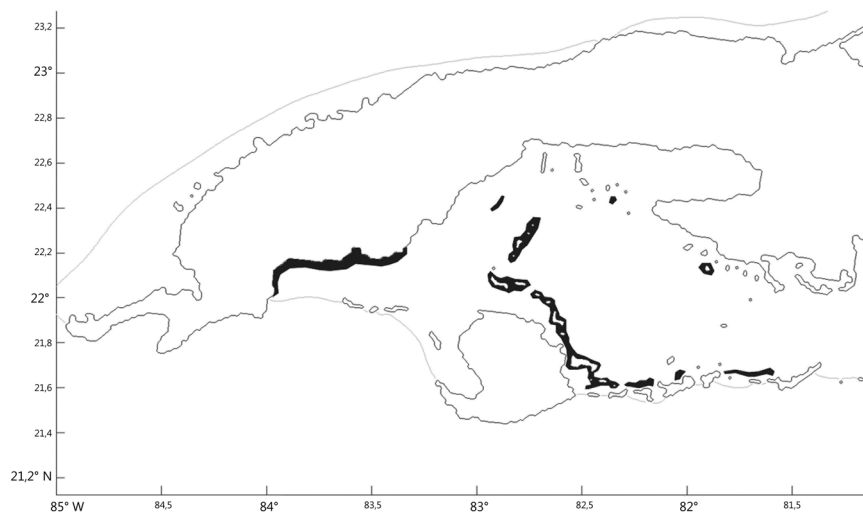


Figura 7. Zonas de criaderos naturales de post-larvas de langosta *P. argus* en la plataforma suroccidental de Cuba, Golfo de Batabanó (Tomado de Cruz *et al.* 1990) / Areas of natural nurseries of *P. argus* in the southwestern shelf of Cuba, Gulf of Batabanó (Taken from Cruz *et al.* 1990)

El mapa de densidad (Fig. 6), mostró la posición final de las partículas en las rejillas que corresponden al Golfo de Batabanó y el borde exterior de la plataforma. Las áreas de mayor densidad se localizaron en: zonas costeras bajas (< 5 m) al suroeste de la provincia de Pinar del Río; al SE de la Isla de la Juventud; en zonas bajas desde la ensenada de Bocas de Alonso

al E de la Isla de la Juventud hasta cayo de la Cruz al NE de la Isla de la Juventud; y al sur de los cayos Cantiles y Rosario en el Archipiélago de los Canarreos, cayos de borde al SE del Golfo de Batabanó. La localización final de las partículas, mostró una fuerte coincidencia con las zonas tradicionales de criaderos naturales de langosta (Fig. 7).

DISCUSIÓN

La simulación resultante reflejó una mayor deriva hacia dos regiones principales: (1) desde la parte sur y oeste de la plataforma suroccidental de Cuba se generó un flujo de partículas hacia el suroeste y oeste, que mantuvo un transporte casi constante de partículas hacia el Canal de Yucatán, con trayectorias estimadas hacia el Golfo de México y Estrecho de la Florida; y (2) desde el sur y este de la plataforma suroccidental, se generó otro flujo con rumbo sureste y sur, respectivamente, hacia la Cuenca de Yucatán, formando núcleos esporádicos de retención y dispersión al sur de la Isla de la Juventud, asociados a giros ciclónicos y anticiclónicos *cuasi* residentes.

Según Pérez-Santos (2011), a partir de diferentes experimentos de simulación de deriva de larvas de langosta para la misma región y en un periodo similar, del 1 de marzo al 20 de septiembre, se produce un movimiento continuo de partículas hacia el Golfo de México por el Canal de Yucatán, que según sus resultados se incrementó a partir de abril hasta el final de la simulación, cuando casi la totalidad de las partículas terminaron su recorrido en las aguas del Golfo de México y el Estrecho de la Florida. El resultado de esta simulación tiene puntos de encuentro con los obtenidos por Pérez-Santos (2011), pero a diferencia del resultado final obtenido por este autor, en esta simulación se observó una propagación importante de partículas hacia el sur, Cuenca de Yucatán y norte de las Islas Caimán, desde fines de abril y hasta junio, probablemente apoyado por la Contra Corriente Cubana (García *et al.* 1991).

Independientemente de la dispersión y transporte de partículas por el Caribe noroccidental, la simulación culminó con un desplazamiento intermitente de partículas con direcciones oeste y noroeste, hacia la Península de Yucatán, y que de forma secuencial fueron arribando a la zona Caribe del Canal de Yucatán, donde ocurrió una bifurcación de la corriente; una rama continuó por el Canal de Yucatán con rumbo norte; y la otra, tomó rumbo noreste y este, bordeando la plataforma suroccidental de Cuba, recibiendo un aporte de partículas por la parte cubana del Canal de Yucatán, retornadas por la Corriente de Lazo y la Contra Corriente Cubana.

Según análisis de los datos oceanográficos obtenidos de ROMS para el periodo simulado, fue evidente el efecto combinado de un giro anticiclónico al suroeste de la plataforma suroccidental de Cuba y un giro ciclónico al sureste de la Isla de la Juventud, que para mediados de julio generaron un núcleo de alta retención de partículas y de dispersión desde sus vórtices, a una distancia entre 15 y 25 millas al sur, y que a

partir de agosto propició una advección horizontal con arribo secuencial de partículas hacia la plataforma suroccidental de Cuba. La formación de estos núcleos adyacentes a la plataforma SW de Cuba, se han asociado a los remolinos de meso-escala, originados por el encuentro de la Corriente del Caribe (Richardson 2005), con la Contra Corriente Cubana (García *et al.* 1991, Pérez-Santos 2011). Se afirma que estos remolinos de meso-escala (eddies), combinado con el patrón de vientos y su efecto en el transporte de aguas superficiales (transporte de Ekman) hacia la costa, inciden en el arribo de los puerulus a las zonas de plataforma (Hernández *et al.* 1995, Yeung *et al.* 2001, Goldstein & Butler 2009).

El tiempo medio estimado desde la liberación (desoves virtuales), hasta que se inició el mayor arribo de partículas a la plataforma suroccidental de Cuba (auto-reclutamiento), fluctuó entre los 170 y 200 días (de 5,7 a 6,6 meses). Esto es coincidente con resultados obtenidos a escala de cultivo, con un rango de tiempo desde la eclosión hasta su transformación de larva en estadio final a puerulus, de entre 140 y 198 días, con un promedio de 174 días, 5,8 meses (Goldstein *et al.* 2008). Estos mismos autores concluyeron, por bioensayo, que el puerulus puede permanecer en ese estadio durante 7 a 28 días en dependencia de la temperatura del agua y de la presencia de un sustrato adecuado para su asentamiento y metamorfosis en organismo bentónico. Un periodo similar (7 a 21 días) ha sido estimado en condiciones naturales (Acosta *et al.* 1997, Lipcius *et al.* 1997, Cruz 1999, Jeffs *et al.* 2005). Esto permite aseverar que su arribo y asentamiento en las áreas poco profundas de la plataforma, aunque depende en gran medida de la hidrodinámica, no culmina con éxito si no encuentra el sustrato adecuado que garantice su vida post-larval.

Del total de partículas liberadas en el talud de la plataforma SW de Cuba, 47,24% fueron trasladadas por el Canal de Yucatán, hacia el Golfo de México y noroeste de Cuba; 33,82% arribaron a la plataforma suroccidental de Cuba (auto-reclutamiento), 11,32% quedaron dispersas en las aguas del Caribe noroeste y 7,62% no participó en toda la simulación por error en el tratamiento o blanqueo de la línea de tierra o porque desde el inicio derivaron hacia zonas bajas costeras, interrumpiendo su movimiento.

En sentido general el derrotero de las partículas, según la simulación realizada con el modelo, LADIM tiene convergencias con los resultados de las simulaciones de Pérez-Santos (2011), Gutiérrez *et al.* (2012) y Butler (2014)². El porcentaje de auto-reclutamiento, relativamente alto, casi un 34%, refuerza la hipótesis de que la hidrodinámica de la región

²Butler MJ IV. 2014. Toward a truly sustainable Caribbean lobster fishery: Consideration of the science on larval connectivity, PaV1 Disease, and Maximum Size Limits. Western Central Atlantic Fishery Commission (WECAFC). Taller sobre la evaluación de stock y manejo de la langosta espinosa (*Panulirus argus*), 21-24 de octubre 2014, Ciudad Panamá.

y el comportamiento de las larvas, sostiene o aumenta el reclutamiento local (Hernández *et al.* 1995, Almany *et al.* 2007, Cudney-Bueno *et al.* 2009). Sin embargo, la dispersión observada al finalizar la simulación, con más de 47% de partículas esparcidas por el Mar Caribe y el Canal de Yucatán, refuerza también el criterio de conectividad demográfica extendida, que pudiera ser más significativa ante eventos climáticos extremos, como los huracanes, que según Briones-Fourzan *et al.* (2008) pudieran sostener poblaciones distantes; o afectar el auto-reclutamiento ante la dispersión o transporte de larvas hacia otras regiones (Alzugaray 2015).

La mayor relevancia y novedad en esta modelación, respecto a otras simulaciones con datos de la región (Pérez-Santos 2011, Gutiérrez *et al.* 2012), resultó en las zonas de arribo final y alta densidad de partículas, no solo al coincidir mayoritariamente con las áreas costeras de plataforma reconocidas *in situ* como de máximo asentamiento de puerulus y criaderos naturales de la langosta (Cruz *et al.* 1990, 2001), sino que además, a partir de la identificación de las áreas de recalada y de alta densidad de partículas, se pueden definir nuevas zonas de monitoreo *in situ* de la especie. Este resultado permite aseverar, que las zonas de cría no solo constituyen áreas de criaderos naturales porque cumplen con los requerimientos ambientales de la especie para esa etapa de su ciclo de vida, sino además porque la deriva y áreas de arribo está condicionada a la dinámica y conectividad entre las aguas oceánicas y las de plataforma. Esto refuerza el criterio de que cualquier evento natural o antropogénico que incida de forma negativa sobre la hidrodinámica o calidad ambiental de estas áreas, estaría incidiendo negativamente en el éxito del reclutamiento; lo que ha sido tomado como argumento, adicional a otros factores, para explicar la disminución de la abundancia y captura de langosta en la región (Ehrhardt *et al.* 2010, Puga *et al.* 2010).

Se demostró la viabilidad del uso combinado del modelo biofísico LADIM y el sistema de modelación oceánica ROMS, para simular la deriva de larvas de la langosta; considerando, que el periodo analizado en la simulación (marzo-septiembre), de máximo desove y reclutamiento, y el haber incluido datos de comportamiento, como la distribución en la vertical según datos promedios de profundidad por estadios larvales, pudo ser una de las causas en la diferencia con los resultados de Pérez-Santos (2011) y Gutiérrez *et al.* (2012), para la misma región, que han utilizado la profundidad constante (1 m) durante toda la simulación.

Derivado de esta investigación, es recomendable desarrollar otros métodos y algoritmos numéricos para mejorar la exactitud de la modelación, e incluir otros datos biológicos en el modelo tales como estimaciones del stock desovante según meses de máxima actividad reproductiva y mortalidad natural durante el

ciclo de vida pelágico. Así como combinar el uso del modelo LADIM con estudios mensuales *in situ* de oceanografía y recolecta de larvas de langosta para poder utilizarlo con mayor acierto como modelo predictivo.

AGRADECIMIENTOS

A los especialistas del Instituto de Investigaciones Marinas de Noruega <www.imr.no>, de la estación Flødevigen de Arendal, muy especialmente nuestra sincera gratitud por su apoyo al Dr. Erlend Moksness, proyecto COLLABORATE Noruega-Cuba. Al Instituto Politécnico Nacional de México a través de los programas, EDI, COFFA. A los árbitros anónimos por sus criterios, siempre a favor de mejorar la publicación.

LITERATURA CITADA

- Acosta CA, TR Matthews & MJ Butler. 1997.** Temporal patterns and transport processes in recruitment of spiny lobster, *Panulirus argus*, postlarvae to south Florida. *Marine Biology* 129: 79-85.
- Alfonso I, MP Frías, JA Baisre & A Campos. 1991.** Distribución y abundancia de larvas de la langosta *Panulirus argus* en aguas alrededor de Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas* 12(1-3): 5-19.
- Alfonso I, MP Frías, JA Baisre & B Hernández. 1995.** Distribución vertical de filosomas de langosta (*Panulirus argus*) y su relación con algunos factores hidroclimáticos al sur del golfo de Batabanó. Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 19(1): 3-9.
- Alfonso I, MP Frías & JA Baisre. 2000.** Distribución larval de la langosta comercial *Panulirus argus*, en relación con algunos factores hidrometeorológicos, al Sur de Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas* 21(1-3): 23-32.
- Almany GR, ML Berumen, SR Thorrold, S Planes & GP Jones. 2007.** Local replenishment of coral reef fish populations in a marine reserve. *Science* 316: 742-744.
- Alzugaray R. 2015.** Efectos de los ciclones tropicales sobre el reclutamiento de la langosta *Panulirus argus* (Latreille, 1804) en el golfo de Batabanó, Cuba. Tesis de Maestría, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. <<http://hdl.handle.net/1834/8386>>
- Baisre J. 1976.** Distribución de las larvas de *Panulirus argus* y *Scyllarus americanus* Crustacea, Decapoda) en aguas alrededor de Cuba. *Revista de Investigaciones del Instituto Nacional de la Pesca de Cuba* 2(3): 277-297.
- Butler MJ IV, CB Paris, JS Goldstein, H Matsuda & RK Cowen. 2011.** Behavior constrains the dispersal of long-lived spiny lobster larvae. *Marine Ecology Progress Series* 422: 223-237.
- Cruz R. 1999.** Variabilidad del reclutamiento y pronóstico de la pesquería de langosta (*Panulirus argus*, Latreille 1804) en Cuba. Tesis Doctoral, Universidad de la Habana, La Habana, 99 pp.

- Cruz R, JA Baisre, E Díaz, R Brito, C García & C Carrodegua. 1990.** Atlas biológico-pesquero de la langosta en el archipiélago cubano. Publicación Especial de la Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras & Revista Mar y Pesca, 125 pp.
- Cruz R, ME de León, E Díaz, R Brito & R Puga. 1991.** Reclutamiento de puerulus de langosta (*Panulirus argus*) a la plataforma cubana. Revista de Investigaciones Marinas 12(1-3): 66-75.
- Cruz R, E Díaz, M Báez & R Adriano. 2001.** Variability in recruitment of multiple life stages of the Caribbean spiny lobster, *Panulirus argus*, in the Gulf of Batabano, Cuba. Marine and Freshwater Research 52: 1263-1271.
- Cudney-Bueno R, MF Lavin, SG Marinone, PT Raimondi & WW Shaw. 2009.** Rapid effects of marine reserves via larval dispersal. PLoS ONE 4: e4140. <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004140>>
- Dávila D, R Cruz, E Perera & G Saavedra. 2007.** Apareamiento y desove de la langosta *Panulirus argus* (Latreille, 1804) en cautiverio en Cuba. Revista de Investigaciones Marinas 28(1): 29-41.
- De León ME. 2005.** Variabilidad temporal de los parámetros poblacionales de la langosta espinosa del Caribe *Panulirus argus* (Latreille, 1804) en aguas de Cuba. Tesis de Doctoral, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, México, 71 pp.
- Ehrhardt N & M Fitchett. 2010.** Dependence of recruitment on parent stock of the spiny lobster, *Panulirus argus*, in Florida. Fisheries Oceanography 19(6): 434-447.
- Ehrhardt N, R Puga & MJ Butler IV. 2010.** Implications of the ecosystem approach to fisheries management in large ecosystems: The Caribbean spiny lobster, *Panulirus argus*, fisheries as a case. In: Fanning L, R Mahon & P McConney (eds). Towards marine ecosystem-based management in the Wider Caribbean, pp, 157-175. Amsterdam University Press, Amsterdam.
- García C, A Chirino & J Rodríguez. 1991.** Corrientes geostróficas en la Z.E.E al sur de Cuba. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras 12(1-3): 29-38.
- Goldstein JS, H Matsuda, T Takenouchi & MJ Butler IV. 2008.** The complete development of larval Caribbean spiny lobster *Panulirus argus* (Latreille, 1804) in culture. Journal of Crustacean Biology 28: 306-327.
- Goldstein J & MJ Butler IV. 2009.** Not all those who wander are lost: Phyllosoma behavior may help unravel connectivity in the Caribbean spiny lobster, *Panulirus argus*. The Lobster Newsletter 22(1): 9-12.
- Gutiérrez AR, J Baisre & A Álvarez. 2012.** Dispersión de larvas de langosta en el Caribe basada en simulaciones numéricas. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras 29(1): 67-76.
- Hernández B, R Puga, R Piñeiro, A Peñate, I Alfonso & J Baisre. 1995.** Transport, turbulence and hypothetical ocean-shelf coupling mechanism in Punta del Este, southwestern Cuba. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras 19(1): 67-72.
- Hernández B & R Piñeiro. 2003.** Hundimiento de las aguas al sur de Cuba. Investigaciones Marinas 31(1): 33-49.
- Jeffs AG, JC Montgomery & CT Tindle. 2005.** How do spiny lobster post-larvae find the coast? Marine and Freshwater Research 39: 605-617.
- Lipcius RN, WT Stockhausen, DB Eggleston, LS Marshall Jr & B Hickey. 1997.** Hydrodynamic decoupling of recruitment, habitat quality and adult abundance in the Caribbean spiny lobster: source-sink dynamics? Marine and Freshwater Research 48: 807-815.
- North EW, A Gallego & P Petitgas. 2009.** Manual of recommended practices for modelling physical-biological interactions during fish early life history. ICES Cooperative Research Report 295: 1-111.
- Paris CB, J Helgers, E van Sebille & A Srinivasan. 2013.** Connectivity modeling system: A probabilistic modeling tool for the multi-scale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean. Environmental Modeling & Software 42: 47-54
- Pearce AF & BF Phillips. 1994.** Oceanic processes, puerulus settlement and recruitment of the western rock lobster *Panulirus cygnus*. In: Sammarco P & M Heron (eds). The bio-physics of marine larval dispersal, pp. 279-303. American Geo Physical Union, Washington.
- Pérez-Santos I. 2011.** Variabilidad espacio-temporal del viento superficial en la Cuenca de Yucatán, Mar Caribe y sus implicaciones dinámicas: observaciones y modelos numéricos. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Chile. 157 pp.
- Puga R, R Piñeiro, S Cobas, ME de León, N Capetillo & R Alzugaray. 2010.** La pesquería de la langosta espinosa, conectividad y cambio climático en Cuba. En: Hernández-Zanuy A & PM Alcolado (eds). La biodiversidad en ecosistemas marinos y costeros del litoral de Iberoamérica y el cambio climático. I. Memorias del Primer Taller de la Red CYTED BIODIVMAR, La Habana, julio, 2010. Instituto de Oceanología, La Habana. [CD-ROM]
- Richardson PL. 2005.** Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. Deep-Sea Research 52: 429-463.
- Vikebø FB, B Adlandsvik, J Albretsen, S Sundby, EK Stenevik, G Huse, E Svendsen, T Kristiansen & E Eriksen. 2011.** Real-time ichthyoplankton drift in northeast Arctic cod and Norwegian spring-spawning herring. PLoS ONE 6(11): e27367. <[doi:10.1371/journal.pone.0027367](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027367)>
- Yeung C, DL Jones, MM Criales, TL Jackson & WJ Richards. 2001.** Influence of coastal eddies and counter-currents on the influx of spiny lobster, *Panulirus argus*, postlarvae into Florida Bay. Marine and Freshwater Research 52: 1217-1232.

Recibido el 3 de junio de 2016 y aceptado el 13 de abril de 2017

Editor: Claudia Bustos D.