

ARTÍCULO



## Simulación de dispersión de las larvas de caracol pala *Strombus gigas* en la reserva de biósfera *Seaflower*, Caribe occidental colombiano

### Dispersal simulation of queen conch *strombus gigas* larvae in the *Seaflower* biosphere reserve, Colombian western Caribbean.

Fecha recepción: 2010-10-19 / Fecha aceptación: 2010-11-03

Serguei Lonin, slonin@costa.net.co

Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia

Martha C. Prada, pradamc@gmail.com

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – CORALINA; San Andrés Islas, Colombia

Erick R. Castro, pescastro@gmail.com

Gobernación de San Andrés y Providencia, Secretaría de Agricultura y Pesca, San Andrés Islas, Colombia

## RESUMEN

El caracol pala, *Strombus gigas*, endémico del Caribe es una especie con poblaciones diezgadas por lo que es objeto de protección internacional desde 2002. Los patrones de dispersión de sus larvas pueden ser una alternativa de recuperación considerando las limitaciones de movilidad de sus adultos. Sin embargo, muy poco es lo que se conoce sobre la abundancia y desplazamiento de sus larvas en los atolones de la Reserva de Biósfera (RB) *Seaflower*, una de las pocas regiones que aun tiene poblaciones abundantes. En este estudio se modeló la dinámica de dispersión larvas de caracol pala entre 78,5° y 83,5° longitud W y 10° y 17° latitud N. Las corrientes fueron calculadas con datos satelitales de las anomalías del nivel del mar, y corregidas para integrar efectos de la capa de Ekman. Datos diarios del estado de tiempo (clima en escala sinóptica) entre 2007-2009, fueron así mismo incluidos. Los resultados mostraron que en escalas de 10's km (mesoescala) los campos hidrodinámicos dependen del estado del tiempo oceánico y forman remolinos de turbulencia cuasi-geostrófica, siendo procesos no lineales. El transporte de larvas, por lo tanto, tuvo que simularse para condiciones "instantáneas" diarias, originándose teóricamente en 28 sitios de 10 atolones durante el periodo reproductivo que sucede entre abril y octubre, e ilustrados como totales mensuales.

**Palabras claves:** Caracol pala *Strombus gigas*, dinámica de larvas, Caribe occidental colombiano.

## ABSTRACT

The queen conch, *Strombus gigas*, endemic of the Caribbean is a specie with decimated populations in most sites of its distribution range, thus subjected to International protection since 2002. Larval dispersal might be an alternative for re-population considering the limited movement of their adults. However, there is little information about abundance and movement patterns of their larvae across the atolls in the *Seaflower* Biosphere Reserve (BR), one of the few regions with still abundant conch populations. In this study the dynamics of the queen conch larval

## INTRODUCTION

The western Caribbean is very active hydrodynamically, since it is affected both by the Panama - Colombia Gyre and by the mainstream of the Caribbean, thus making the entire region maintain strong oceanic conditions that manifest as eddies [1]. The Caribbean mainstream branches off the archipelago of San Andrés, Providence and Santa Catalina, separating into a north - westerly flow which continues to the Cayman Basin and a flow that turns south and enters the Panama - Colombia Gyre. This change in direction of the flow and return through the Gyre generates a unique position from the point of view of larval transport, since the models resemble their behavior as a passive tracer, which moves in the same direction as the currents of the sea surface layer [2].

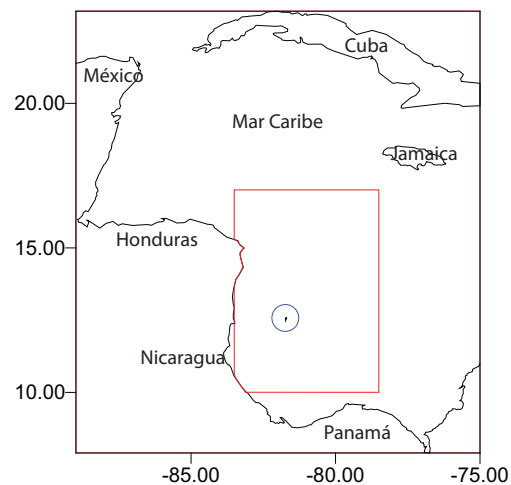
The Queen Conch *Strombus gigas* is an interesting species because of its importance in the Caribbean, where it represents the second fishery in market value after the spiny lobster [3], and its adult populations are greatly reduced. Therefore, knowledge of larval dispersal patterns from sites with still abundant populations of adults offers a choice of regional - level recovery. Through field surveys conducted between 2003 and 2007, information has been currently obtained on sites with good density of adults [4], providing thereby valuable information for the modeling of larval dispersal. Also, thanks to reproduction studies, it has been established that the reproductive period of this species occurs between April and October of each year [5].

Since weather conditions define circulation patterns and thus, the likely distribution of queen conch larvae, the dynamics of the western Caribbean dispersal can generate spatial, in a way, almost chaotic, patterns. This complex and unpredictable movement requires the use of instantaneous dynamics with quasi - continuous hydrodynamic fields, for long enough periods, so as to be comparable with the limits of survival of the larvae, and generate dispersal patterns per atoll variables (spatial scale) and relevant months (time scale).

## AREA OF STUDY

The study area or domain of the model was defined between 78.5° and 83.5° W Longitude and 10° and 17° N Latitude, i. e. including the different atolls of the Seaflower BR (figure 1).

The displacements were simulated based on a Lagrangian tracer model, by calculating the instantaneous movement of larvae from a total of 28 sites along the 10 atolls of the Seaflower BR (figure 2). The location of the originating sites was selected to match stations with high population density of adult queen conch, obtained from three scientific expeditions for the determination of the archipelago's fishing quota ([6], Erick Castro; com. pers.). Based on the values of population density and fertility rates reported for the species [7], the potential daily number of larvae was estimated for each site, accumulating them for each month as detailed in table 1.



**Figure 1.** The domain of interest for the study (red rectangle). The blue circle shows the Island of San Andrés.

dispersal was modeled between 78.5° and 83.5° W and 10° y 17° N. The currents were calculated based on sea-surface anomalies from satellite data and corrected to integrate the effects of the Ekman layer. Daily information on the sea conditions (climate synoptic scale) from 2007-2009 were also included. Results showed that at 10's km (meso-escala), hydrodynamic fields depend on the sea conditions. Larval transport was, therefore, simulated for "instant" daily conditions originated from 28 locations across 10 atolls during the reproductive season from April to October and illustrated as monthly totals.

**Key words:** Queen conch *Strombus gigas*, larvae dynamics, Colombian Western Caribbean.

## INTRODUCCIÓN

El Caribe occidental es muy activo hidrodinámicamente puesto que está afectado tanto por el Giro Panamá-Colombia como por la corriente principal del Caribe, lo que produce que toda la región mantenga fuertes condiciones oceánicas que se manifiestan como remolinos [1]. La corriente principal del Caribe se bifurca en esta área y separa el flujo nor-oeste que continua hacia las islas Caimán del flujo que gira al sur y entra al Giro Panamá-Colombia justamente en las latitudes del Archipiélago de San Andrés o la RB Seaflower. Esta variación del sentido del flujo y su retorno por el Giro, genera condiciones únicas desde el punto de vista de transporte de larvas, puesto que los modelos asemejan su comportamiento como un trazador pasivo, que se mueve en el mismo sentido que las corrientes de la capa superficial del mar [2].

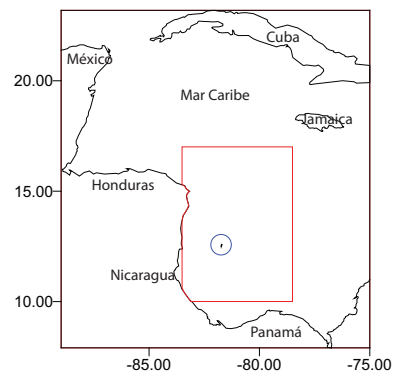
El caracol pala *Strombus gigas* es una especie de interés dada su importancia en el Caribe donde representa la segunda pesquería en valor comercial después de la langosta espinosa [3] y sus poblaciones de adultos están muy reducidas. Por lo tanto, el conocimiento de los patrones de dispersión larvaria desde sitios con poblaciones de adultos aún abundantes ofrece alternativas de recuperación a nivel regional. Gracias a monitoreos de campo llevados a cabo entre 2003 y 2007 se tiene actualmente información sobre sitios con buena densidad de adultos [4] aportando información valiosa para el modelaje de la dispersión larvaria. También gracias a estudios de reproducción se tiene establecido que el periodo reproductivo de esta especie sucede entre abril y octubre de cada año [5].

Dado que las condiciones del clima definen los patrones de circulación y, por ende, la probable distribución de larvas de caracol pala, la dinámica del Caribe occidental pueden generar patrones de dispersión espaciales de cierto modo caóticos. Esta compleja y poco predecible circulación requiere la utilización de dinámicas "instantáneas" que tengan campos hidrodinámicos continuos, durante suficientes periodos de tiempo, para que sean comparativos con los límites de sobrevivencia de las larvas, y generar patrones variables de dispersión por atolón (escala espacial) y por meses de interés (escala temporal).

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio o dominio del modelo estuvo definido entre las longitudes 78,5° y 83,5° W y las latitudes 10° y 17° N, es decir incluyendo los diferentes atolones de la RB Seaflower (figura 1).

Los desplazamientos se simularon con base en un modelo lagrangiano de trazadores calculando el movimiento instantáneo de larvas desde un total de 28 sitios a lo largo de los 10 atolones de la RB Seaflower (figura 2). La localización de los sitios origen fueron seleccionados coincidiendo con estaciones de alta densidad poblacional de adultos de caracol pala obtenidos de tres expediciones científicas realizadas para la determinación de la cuota de pesca del archipiélago [6], (Erick Castro; com pers). Con base en los valores de densidad poblacional y tasas de fecundidad reportadas para la especie [7] se estimó el número potencial diario de larvas de cada sitio, acumulándolos para cada mes según lo detallado en la tabla 1.



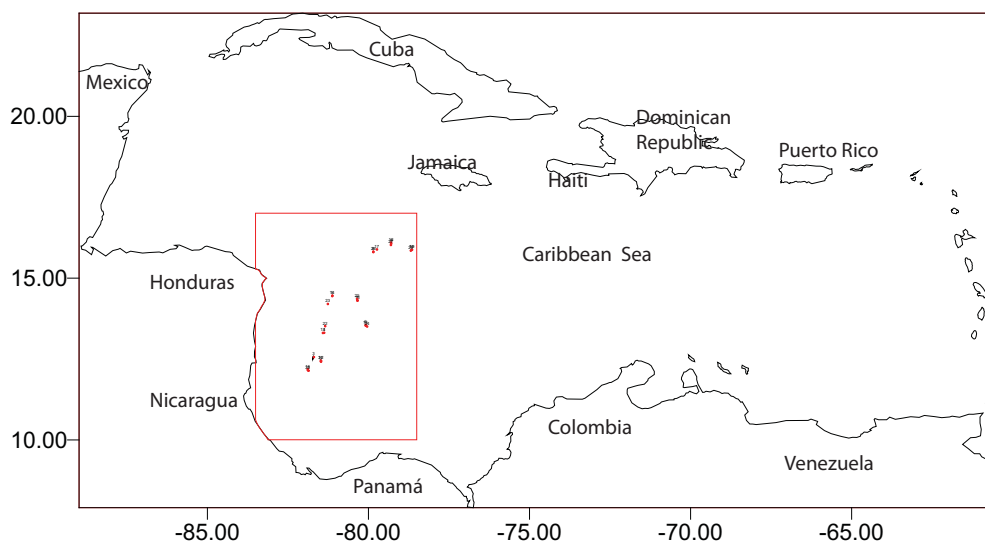
**Figura 1.** El dominio de interés para el estudio (rectángulo rojo). En el círculo azul aparece la Isla de San Andrés.

**Table 1.** Approximate number of snail larvae released per atoll and per month in the archipelago of San Andrés, Providence and Santa Catalina.

Atolón	April	May	June	July	August	September	October
South-South-West	66260220	6626022	6626022	6626022	6626022	587020200	6626022
East-South-East	157295040	15729504	15729504	15729504	15729504	1393526400	15729504
San Andres	55545600	5554560	5554560	5554560	5554560	492096000	5554560
Providencia	161046998	16104699,8	16104699,8	16104699,8	16104699,8	1426766180	16104699,8
Quitassueño	1,6264E+10	1626424875	1626424875	1626424875	1626424875	1,4409E+11	1626424875
Roncador	1538587872	153858787	153858787	153858787	153858787	1,3631E+10	153858787
Serrana	2,0013E+10	2001302918	2001302918	2001302918	2001302918	1,773E+11	2001302918
Serranilla	5128500000	512850000	512850000	512850000	512850000	4,5435E+10	512850000
Alicia	641062500	64106250	64106250	64106250	64106250	5679375000	64106250
Nuevo	1282125000	128212500	128212500	128212500	128212500	1,1359E+10	128212500

**Table 2.** Geographical location of the sites with highest release of snail larvae for the different banks which form the archipelago. See figure 2.

Atolón	ID	Longitude 1	Latitude 1	Longitude 2	Latitude 2	Longitude 3	Latitude 3
South-South-West	1	81,85831	12,13965	81,88339	12,18369	81,88174	12,15261
East-South-East	2	81,47234	12,42036	81,47244	12,44955	81,47878	12,43561
San Andres	3	81,69453	12,55875	-	-	-	-
Providencia	4	81,37321	13,312004	81,41455	13,30656	81,341702	13,515871
Quitassueño	5	81,11927	14,46108	81,12161	14,44531	81,261	14,20245
Roncador	6	80,08388	13,55334	80,08848	13,53447	80,04133	13,50504
Serrana	7	80,34072	14,30332	80,34012	14,31128	80,35045	14,35588
Serranilla	8	79,8482734	15,8208515	79,7350911	15,8864284	79,8469543	15,8037831
Alicia	9	79,2938564	16,0673467	79,2983429	16,0984283	79,3037648	16,0262038
Nuevo	10	78,6619704	15,8701733	78,6468942	15,880323	78,6855539	15,8524752

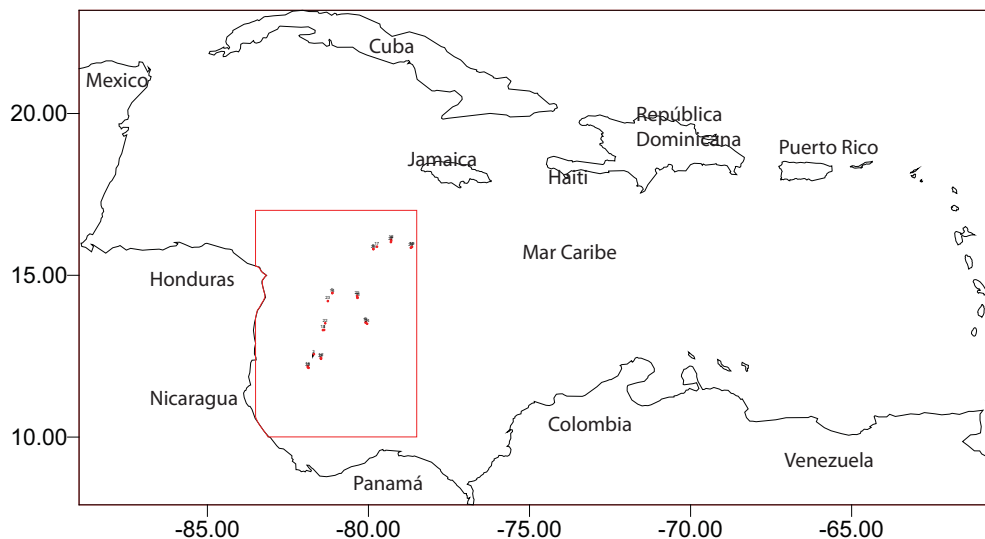
**Figure 2.** Sites of increased release of larvae (28 points) considered for this study.

**Tabla 1.** Número aproximado de larvas de caracol liberadas por atolón y por mes en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Atolón	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
South-South-West	66260220	6626022	6626022	6626022	6626022	587020200	6626022
East-South-East	157295040	15729504	15729504	15729504	15729504	1393526400	15729504
San Andrés	55545600	5554560	5554560	5554560	5554560	492096000	5554560
Providencia	161046998	16104699,8	16104699,8	16104699,8	16104699,8	1426766180	16104699,8
Quitasueño	1,6264E+10	1626424875	1626424875	1626424875	1626424875	1,4409E+11	1626424875
Roncador	1538587872	153858787	153858787	153858787	153858787	1,3631E+10	153858787
Serrana	2,0013E+10	2001302918	2001302918	2001302918	2001302918	1,773E+11	2001302918
Serranilla	5128500000	512850000	512850000	512850000	512850000	4,5435E+10	512850000
Alicia	641062500	64106250	64106250	64106250	64106250	5679375000	64106250
Nuevo	1282125000	128212500	128212500	128212500	128212500	1,1359E+10	128212500

**Tabla 2.** Localización geográfica de los sitios de mayor liberación de larvas de caracol para los diferentes bancos que integran el archipiélago. Ver mapa figura 2.

Atolón	ID	Longitud 1	Latitud 1	Longitud 2	Latitud 2	Longitud 3	Latitud 3
South-South-West	1	81,85831	12,13965	81,88339	12,18369	81,88174	12,15261
East-South-East	2	81,47234	12,42036	81,47244	12,44955	81,47878	12,43561
San Andrés	3	81,69453	12,55875	-	-	-	-
Providencia	4	81,37321	13,312004	81,41455	13,30656	81,341702	13,515871
Quitasueño	5	81,11927	14,46108	81,12161	14,44531	81,261	14,20245
Roncador	6	80,08388	13,55334	80,08848	13,53447	80,04133	13,50504
Serrana	7	80,34072	14,30332	80,34012	14,31128	80,35045	14,35588
Serranilla	8	79,8482734	15,8208515	79,7350911	15,8864284	79,8469543	15,8037831
Alicia	9	79,2938564	16,0673467	79,2983429	16,0984283	79,3037648	16,0262038
Nuevo	10	78,6619704	15,8701733	78,6468942	15,880323	78,6855539	15,8524752

**Figura 2.** Sitios de mayor liberación de larvas (28 puntos) considerados en este estudio.

## METHODOLOGY

In order to determine the flow patterns, it is necessary to determine the oceanic climate; it was obtained from the application of the POM (Princeton Ocean Model) developed by Blumberg & Mellor [8], adjusted to the conditions of the Caribbean by Lonin [9], with a spatial resolution from units to tenths of kilometers. Oceanic weather information was obtained in its synoptic component; i. e. with a resolution of  $0,17^\circ$  from the OCCAM (Altimetry and Ocean Circulation Model) taken from Coast Watch, Caribbean Node (<http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/>), based on the anomalies of the mean sea level calculated from the Jason satellite with daily temporal resolution between April the 1st, 2007 and October the 31st, 2008. In order to adjust surface currents with wind drift, it was assumed that the interaction between these currents is weak and therefore the fields can be aggregated in an additive manner.

The model calculates the Ekman layer based on the thermodynamic unidimensional (vertical), non-stationary equations and with a turbulence block with 2,5 - closure level, according to the classification of Mellor and Yamada and were taken from the climatology of Da Silva & Levitus (ICOADS files). With the aforementioned setup, a scale is achieved which is detailed enough as to characterize the movement of larvae [10].

The total volume of larvae was characterized by a number  $N$  of infinitesimal particles under a uniform influence of the marine environment, and with speed deterministic horizontal speed components  $\langle u(x, y, z, t) \rangle$ ,  $\langle v(x, y, z, t) \rangle$  and their turbulent fluctuations,  $u'(x, y, z, t)$ ,  $v'(x, y, z, t)$ . Here,  $u$  and  $v$  are the current speed components in the  $x$  and  $y$  plane directions, respectively.

Transport is calculated using a method of Lagrangian tracers. The coordinates of the markers are defined at each time step as follows:

$$\frac{dX_k}{dt} = \langle u \rangle + u'_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = \langle v \rangle + v'_k, \quad (1)$$

where  $\langle v \rangle$  and  $\langle u \rangle$  are sought in the hydrodynamic model (OCCAM model with Ekman effects) by interpolation of the  $U$  and  $V$  velocities in the nodes of the

respective mesh. The  $u'_k$  and  $v'_k$  fluctuations can be calculated using the "random walk" technique; thus:

$$u'_k = V' \xi \sin(2\pi\xi), \quad v'_k = V' \xi \cos(2\pi\xi), \quad (2)$$

Where  $\xi$  is the Gaussian standard "white noise" (zero mean and unit deviation);  $V'$  is the r. m. s. value of the stochastic turbulent fluctuations of horizontal velocity.

The last value depends on the time scale ( $\Delta t$ ) and is related to the horizontal diffusion  $A_h$  through the following ratio:

$$V' = \sqrt{c' A_h / \Delta t}, \quad (3)$$

where  $c'$  is a constant. The numerical experiments carried out in Lonin [12] showed that the value of this constant is very close to 2. The value of  $A_h$  is determined in the turbulence block of the hydrodynamic model.

In the simulation, 1/30 of the larvae predetermined monthly total is released on the first day (table 1); these particles are then subjected to the influence of daily flows and a 2D turbulent diffusion (kinetic energy of subscale eddies in the domain), whose intensity was estimated according to Richardson [1] for the western Caribbean.

At each site, the particles run until reaching any of the open borders of the domain and, when they cross the border, the calculation of this portion of particles released stops, initiating thereby the release of another 1/30 of the particles of the month from the second day of the relevant month. This procedure is repeated 30 times, thus evenly spreading larval productivity during the month, bearing in mind the fact that productivity values are known in a monthly average.

Upon finishing a month of calculation, all the particles in the space of a mesh are counted with an arbitrary resolution of 0.05 by 0.05 degrees of latitude/longitude.

No function is considered in this work as yet so as to include mortality of larvae, which in accordance with the literature is estimated between 20 and 30 days [11], as it has not yet been defined.

## METODOLOGÍA

Para la determinación de los patrones de corrientes es necesario determinar el clima oceánico, el cual se obtuvo de la aplicación del modelo POM (*Princeton Ocean Model*) desarrollado por Blumberg and Mellor [8] ajustado a las condiciones del Caribe por Lonin (2004) y con una resolución espacial de décimas de kilómetros. La información del clima oceánico fue obtenida en su componente sinóptica, es decir, con resolución de 0,17° a partir del modelo OCCAM (*Ocean Circulation and Altimetry Model*) tomado de *Coast Watch, Caribbean Node* (<http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/>) basado en la anomalía del nivel medio del mar calculado de los satélites de la NOAA con resolución temporal diaria entre 1 de abril 2007 y 31 de octubre 2008. Para acoplar las corrientes superficiales con las de deriva de viento, se asumió que la interacción entre estos factores es débil y por consiguiente se pueden sumar los campos de manera aditiva.

El modelo calcula la capa de Ekman basado en las ecuaciones termodinámicas unidimensionales (vertical), no estacionarias y con un bloque de turbulencia con clausura del nivel 2,5 según la clasificación de Mellor y Yamada y fueron tomados de la climatología de Da Silva & Levitus (archivos ICOADS). Con este ajuste se logra una escala lo suficientemente detallada para caracterizar el movimiento de larvas [10].

El volumen total de larvas, se caracterizó mediante una cantidad  $N$  de partículas infinitesimales bajo una influencia homogénea del medio marino y con componentes horizontales determinísticas de velocidad  $\langle u(x, y, z, t) \rangle$ ,  $\langle v(x, y, z, t) \rangle$  y sus fluctuaciones turbulentas,  $u'(x, y, z, t)$ ,  $v'(x, y, z, t)$ . Aquí,  $u$  y  $v$  son las componentes de velocidad de corrientes en las direcciones del plano  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Su transporte se calcula según un método de trazadores lagrangianos. Las coordenadas de los trazadores se definen en cada paso de tiempo como:

$$\frac{dX_k}{dt} = \langle u \rangle + u'_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = \langle v \rangle + v'_k, \quad (1)$$

donde  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$  se buscan en el modelo hidrodinámico (el modelo OCCAM con efectos de Ekman) mediante interpolación de las velocidades  $U$  y  $V$  en los nodos de la

respectiva malla. Las fluctuaciones  $u'_k$  y  $v'_k$  se pueden calcular aplicando la técnica de "random walk", así que

$$u'_k = V' \xi \sin(2\pi\xi), \quad v'_k = V' \xi \cos(2\pi\xi), \quad (2)$$

donde  $\xi$  es el "ruido blanco" estándar gaussiano (desviación unitaria y promedio nulo);  $V'$  es el valor r.m.s. de las fluctuaciones estocásticas turbulentas de la velocidad horizontal.

El último valor depende de la escala de tiempo ( $\Delta t$ ) y está relacionado con la difusión horizontal  $A_h$  a través de la siguiente relación:

$$V' = \sqrt{c' A_h / \Delta t}, \quad (3)$$

donde  $c'$  es una constante. Los experimentos numéricos efectuados en Lonin [12] mostraron que el valor de esta constante es muy cercano a 2. El valor de  $A_h$  se determina en el bloque de turbulencia del modelo hidrodinámico.

En la simulación, en el primer día de cada mes se libera 1/30 del total mensual de larvas predeterminado (tabla 1), estas partículas se someten entonces a la influencia de las corrientes diarias y una difusión turbulenta 2D (energía cinética de los remolinos de subescala en el dominio), cuya intensidad fue estimada de acuerdo con Richardson [1] para el Caribe occidental.

Para cada sitio, las partículas corren hasta alcanzar cualquiera de las fronteras abiertas del dominio y cuando cruzan la frontera, el cálculo de esta porción de partículas liberadas se detiene arrancando la liberación de otra 1/30 parte de las partículas del mes a partir del día dos del respectivo mes. Este procedimiento se repite 30 veces, distribuyendo así la productividad de larvas uniformemente durante el mes, teniendo en cuenta que los valores de productividad se conocen en promedio mensual.

Al terminar un mes de cálculo, se realiza el conteo de las partículas en el espacio en una malla con una resolución arbitraria de 0,05 por 0,05 grados de latitud/longitud.

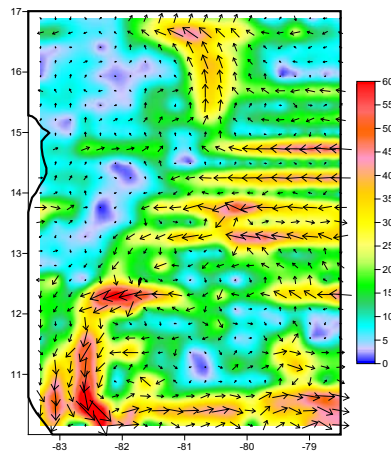
En este trabajo aun no se considera una función para incluir la mortalidad de larvas estimada según la literatura entre 20 y 30 días [11] toda vez que aun no se ha definido.

## RESULTS

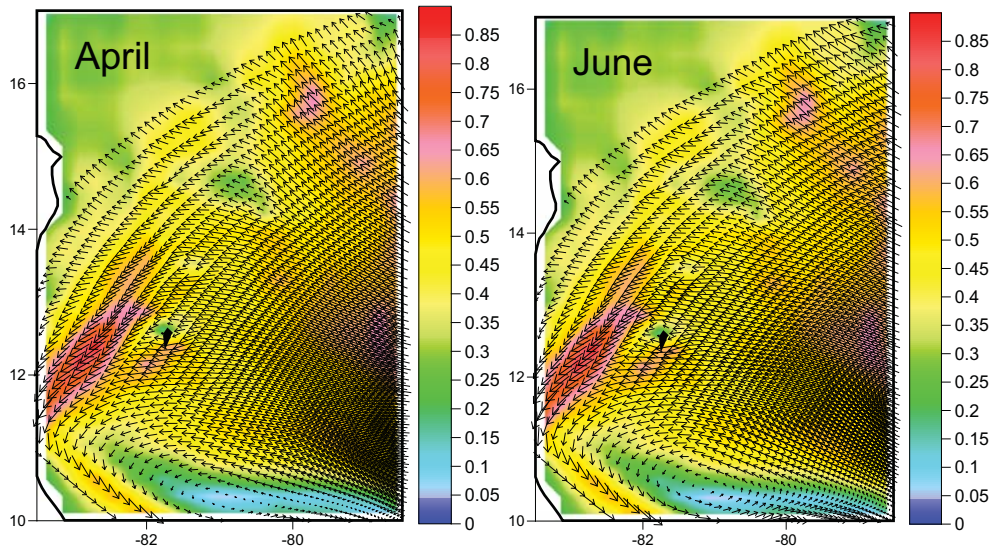
### Dynamics of the sea

Figure 3 illustrates the average currents as per the OCCAM model for the two years under consideration (2007 and 2008), whereas figure 4 shows the dynamics of the sea surface according to the POM model, with ad-

justments for wind climatology and heat fluxes [9]. This dynamics includes drift currents, but removes synoptic disturbances. Currents reach an intensity of 85 - 90 cm/s.



**Figure 3.** Average speed of surface currents (cm / s) corresponding to the 2007-2008 season, between April the 1st and December the 10th (OCCAM model output without wind-driven currents).



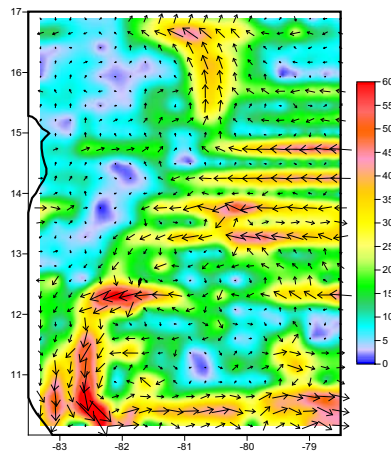


## RESULTADOS

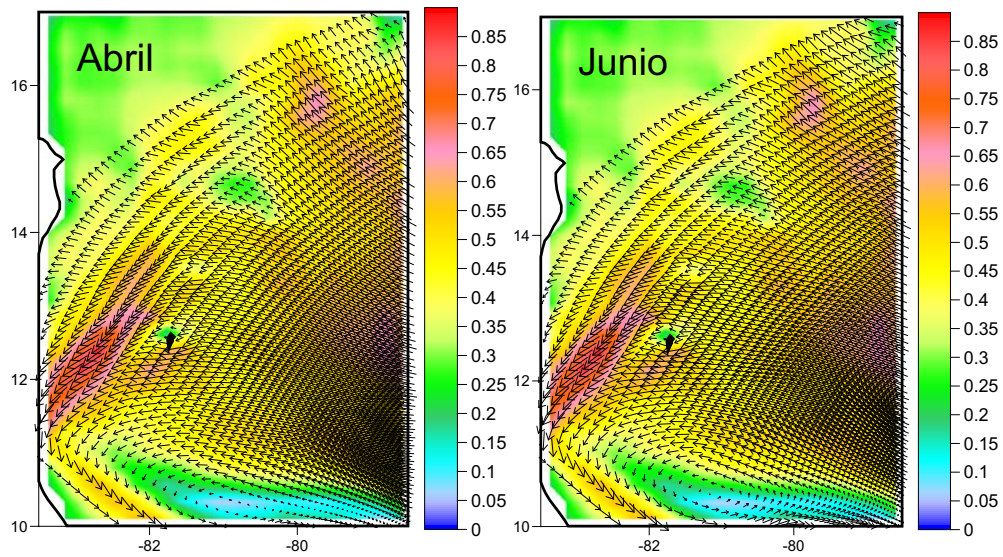
### Dinámica del mar

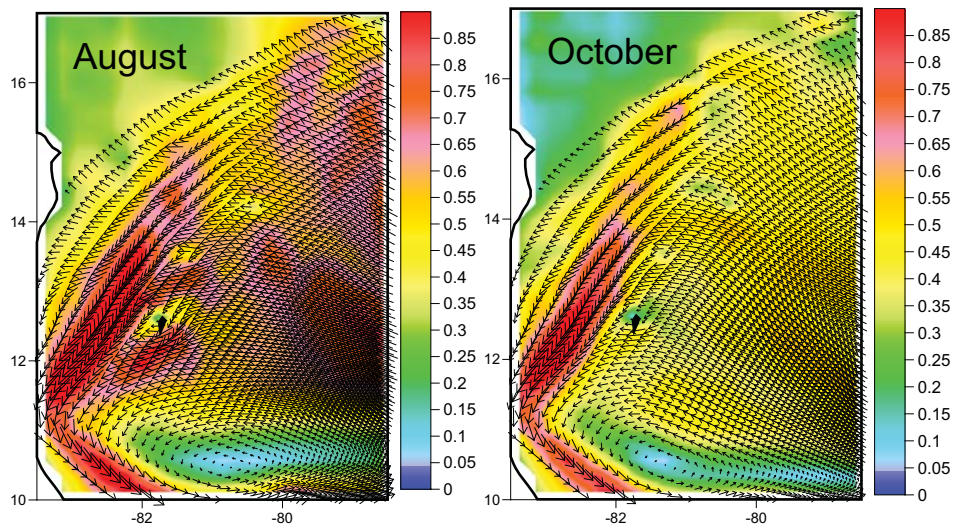
La figura 3 ilustra las corrientes promedio según el modelo OCCAM para los dos años en consideración (2007 y 2008), mientras que la figura 4 presenta la dinámica de la superficie del mar según el modelo POM con

los ajustes de climatología de vientos y flujos de calor [9]. Esta dinámica incluye las corrientes de deriva, pero elimina las perturbaciones sinópticas. Las corrientes alcanzan una intensidad de 85-90 cm/s.



**Figura 3.** Velocidad promedio de las corrientes superficiales (cm/s) correspondiente al período 2007 - 2008, entre el 1 de abril y el 10 de diciembre (salidas del modelo OCCAM sin corrientes de deriva).





**Figure 4.** Average speed of surface currents (m/s) with climatological fields according to the POM model outputs for the period from April to October of the climatological year.

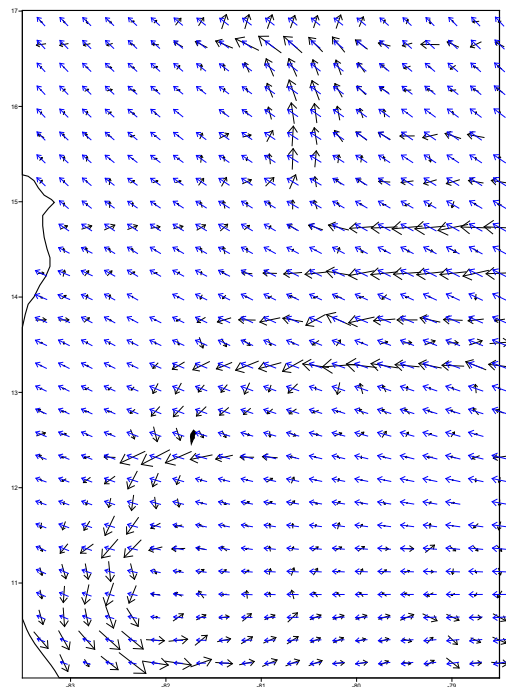
The processes in an annual or monthly scale in figures 3 and 4 show clearly how, in the study area, there is a bifurcation in the Caribbean current. However, these mesoscale results cannot be directly related to larvae drift, since this is presented in detailed scales (days) and with adjustments within the Ekman layer.

An example of the OCCAM model output with daily variations and thermohaline currents needed to define the probabilities of movement of larvae is shown in figure 5, whereas figure 6 illustrates the daily variability of the currents in the area of interest and proves the fact that the behavior of these processes is extremely non-linear, where the coherent structures (vortexes or eddies) self-organize in accordance with the 2D quasi-geostrophic turbulence theory [13]. Therefore, no current average field can be regarded as representative as to define the actual dynamics of larvae, forcing thereby the need for the estimation of instantaneous values.

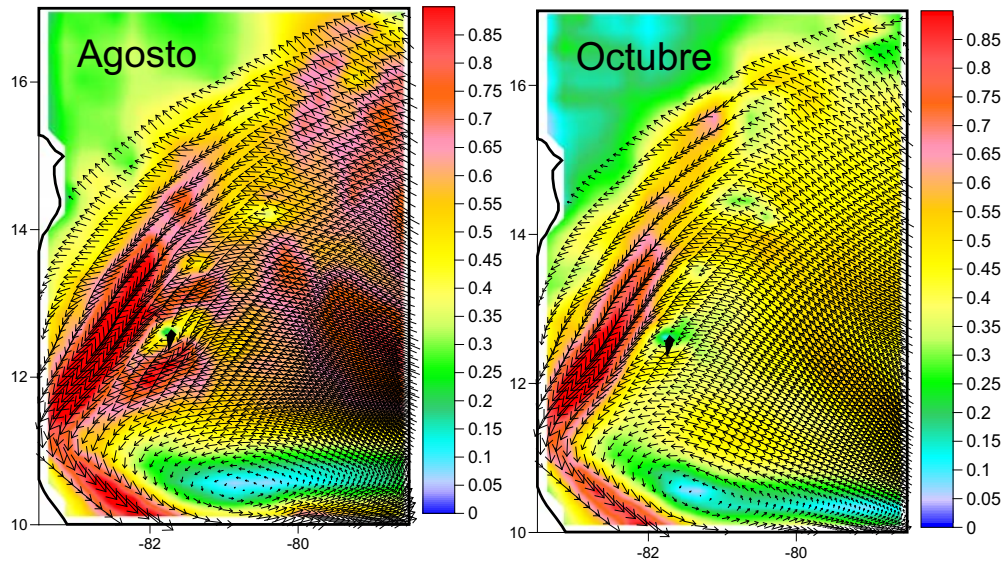
In a nonlinear process, the average product of two arbitrary variables (X and Y) is not equal to the product of the average values of each; i. e.  $\langle XY \rangle \neq \langle X \rangle \langle Y \rangle$ , but

$$\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle + R_{XY} \sigma(X) \sigma(Y),$$

where  $\langle \dots \rangle$  means a statistical average;  $R_{XY}$  is the correlation between X e Y;  $\sigma(X)$  y  $\sigma(Y)$  are their respective standard deviations.



**Figure 5.** Example of vector overlapping of drift currents (blue arrows) and thermohaline currents (black arrows) corresponding to the month of April.



**Figura 4.** Velocidad promedio de las corrientes superficiales (m/s) con campos climatológicos según las salidas del modelo POM para el período abril-octubre del año climatológico.

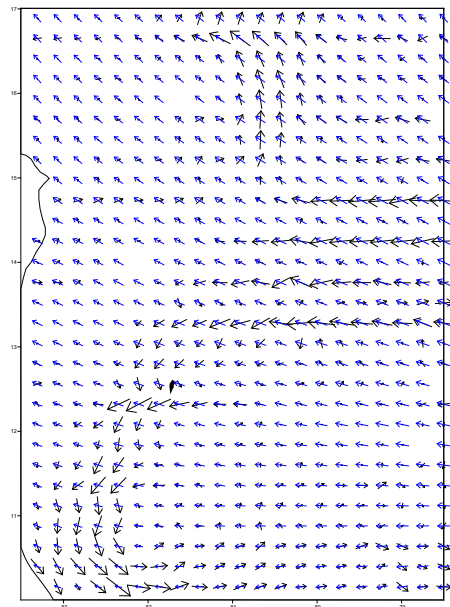
Los procesos en escala anual o mensual de las figuras 3 y 4 muestran claramente como en el área de estudio se presenta una bifurcación de la corriente del Caribe. Sin embargo, estos resultados a mesoescala no pueden relacionarse directamente con la deriva de larvas puesto que ésta se presenta en escalas más detalladas (días) y con ajustes de la capa de Ekman.

Un ejemplo de la salida del modelo OCCAM con variaciones diarias y corrientes termohalinas necesarios para definir las probabilidades del movimiento de larvas se presenta en la figura 5, mientras que la figura 6 ilustra la variabilidad diaria de las corrientes en la zona de interés y comprueban que el comportamiento de estos procesos son supremamente no lineales donde las estructuras coherentes (remolinos o *eddies*) se auto-organizan según lo considera la teoría de la turbulencia cuasi-geostrofica 2D [13]. Por lo tanto, ningún campo promedio de corrientes puede considerarse representativo para determinar la dinámica real de larvas obligando la estimación de los valores instantáneos.

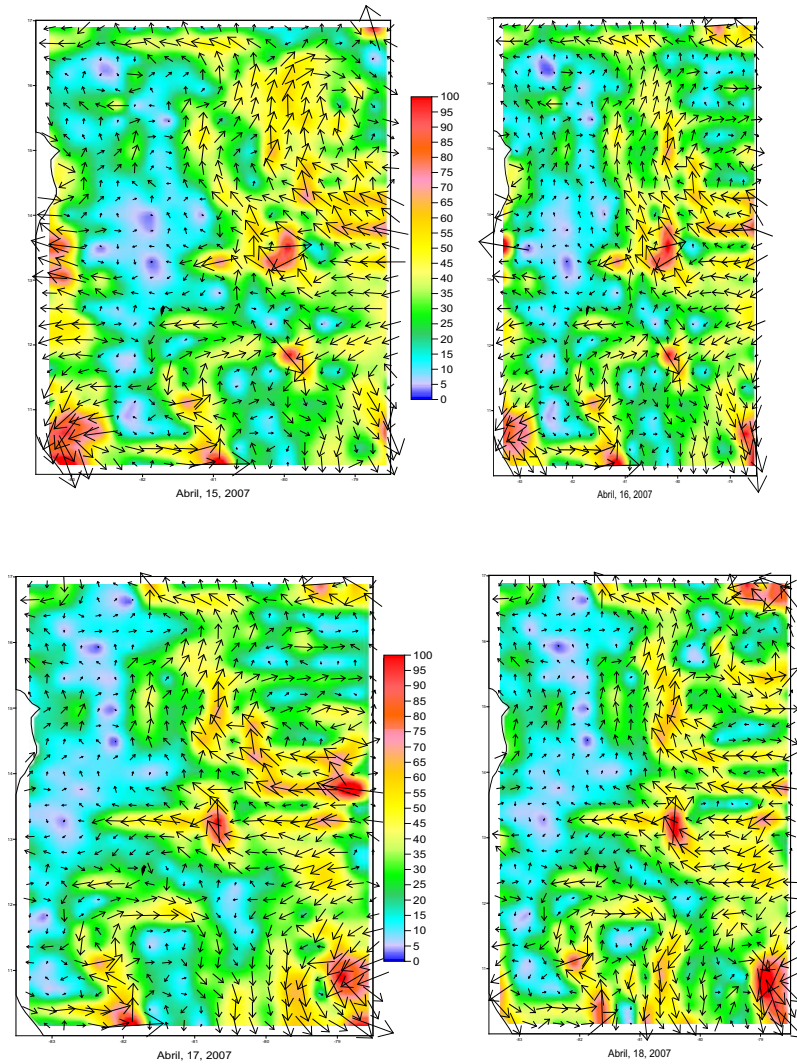
En un proceso no lineal, el promedio de un producto de dos variables arbitrarias ( $X$  e  $Y$ ) no es igual al producto de los valores promedios de cada una, es decir,  $\langle XY \rangle \neq \langle X \rangle \langle Y \rangle$ , sino

$$\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle + R_{XY} \sigma(X) \sigma(Y),$$

donde  $\langle \dots \rangle$  significa un promedio estadístico;  $R_{XY}$  es la correlación entre las variables  $X$  e  $Y$ ;  $\sigma(X)$  y  $\sigma(Y)$  son sus respectivas desviaciones estándares.



**Figura 5.** Ejemplo de superposición de los vectores de las corrientes de deriva (flechas azules) y termohalinas (flechas negras) correspondientes al mes de abril.

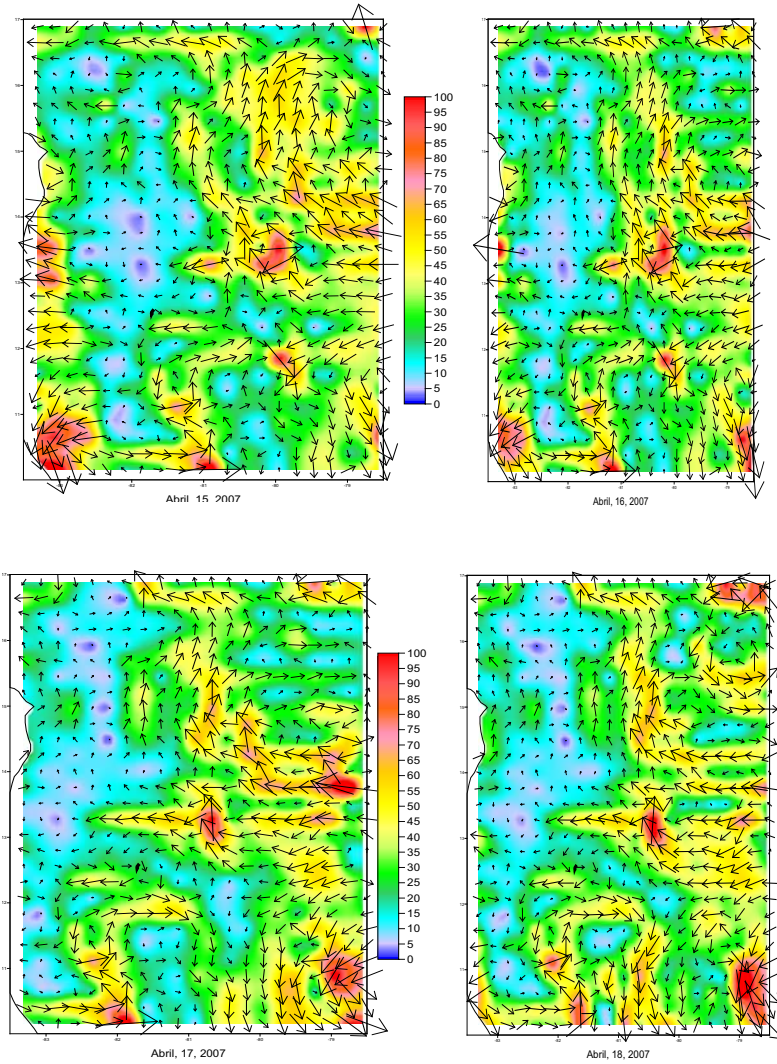


**Figure 6.** Fragments of synoptic fields for the four days of April 2007 as an example of the database formed on surface currents including wind drift (velocity in cm/s).

### Modeling larval transport

The speed of larval dispersal in (3) was estimated according to the level of horizontal turbulence of  $400 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , following a path as shown in figure 7 for a single journey and only for one site. It was also found that larvae

leave the domain within less than 30 days. Hence, it is assumed that mortality of larvae did not have a significant impact on these results.

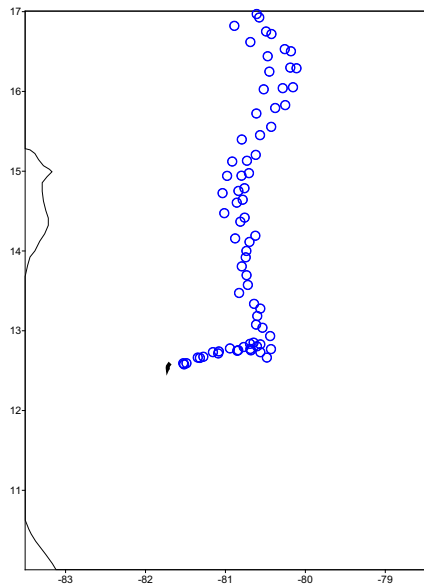


**Figura 6.** Fragmentos de los campos sinópticos para los cuatro días del mes de abril de 2007 en calidad de ejemplo de la base de datos conformada sobre las corrientes superficiales incluyendo la deriva de viento (velocidad en cm/s).

### Modelaje del transporte de larvas

La velocidad de dispersión de las larvas en (3) fue estimada de acuerdo con el nivel de energía de turbulencia de  $400 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , siguiendo una trayectoria como se ilustra en la figura 7 correspondiente a un solo tra-

yectorio y para un solo sitio. Además se encontró que las larvas abandonan el dominio en menos de 30 días. Por lo anterior se supone que la mortalidad de las larvas no afecta de manera significativa a actuales resultados.



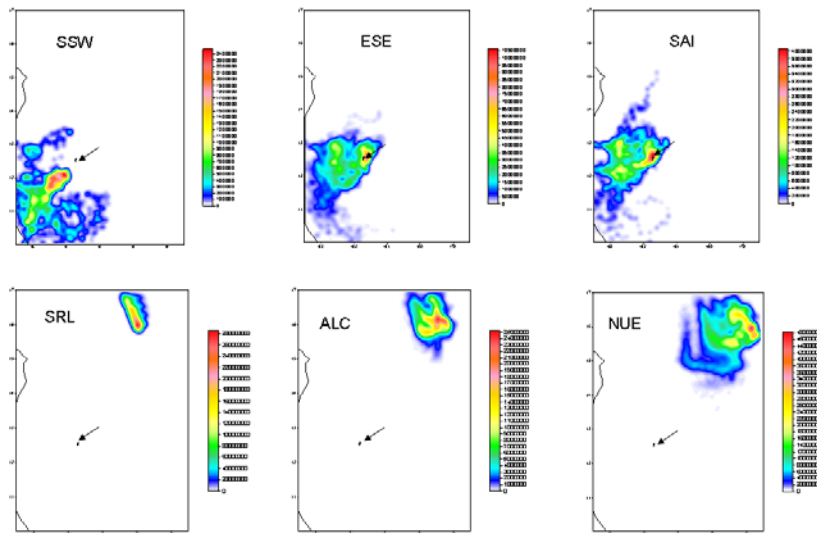
**Figure 7.** Example of the trajectory of a queen conch larva at the time of the April 1st release from San Andres Island. The larva remains in the domain for 24 days.

### Analysis per atoll

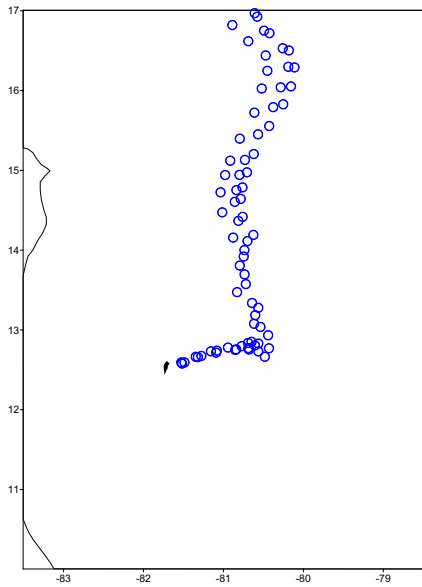
The monthly results for the ten atolls in the study, emphasizing the two peaks of reproduction for the months of April and September, initially allow the inference of general patterns of connectivity between them as follows:

- a. The three southern patterns shown connectivity amongst them in the two years of simulation, regardless of the reproductive peak.
- b. Connectivity extends south to Providence (central atoll), especially in the month of September, i. e. the second reproductive peak. For this same period, the atoll also seems to receive larvae from Roncador and, to a lesser extent, from Serrana.
- c. The three following northern atolls, Quitasueño, Serrana and Roncador, showed a potential to maintain larvae flows between amongst them in both reproductive peaks, being apparently more conspicuous between Serrana and Roncador. In contrast, there was no flow between these atolls and the southern atolls.
- d. Finally, the northernmost atolls of the archipelago, Serranilla, Alicia and Nuevo, seem to have flows amongst themselves which are not as consistent as the patterns listed above.

In general, it can be observed that the larvae of the northern atolls of the domain move towards the Cayman Basin, whereas the Southern atolls stay in the Panama Colombia Gyre (figure 8).



**Figure 8.** Dispersal patterns of queen conch larvae in the atolls of the northern and southern ends of the Seaflower BR corresponding to the month of April 2008. The arrow indicates the location of the island of San Andres for spatial reference.



**Figura 7.** Ejemplo de la trayectoria de una larva de caracol pala al momento de liberación del 1 de abril desde San Andrés Isla. La larva permanece en el dominio 24 días.

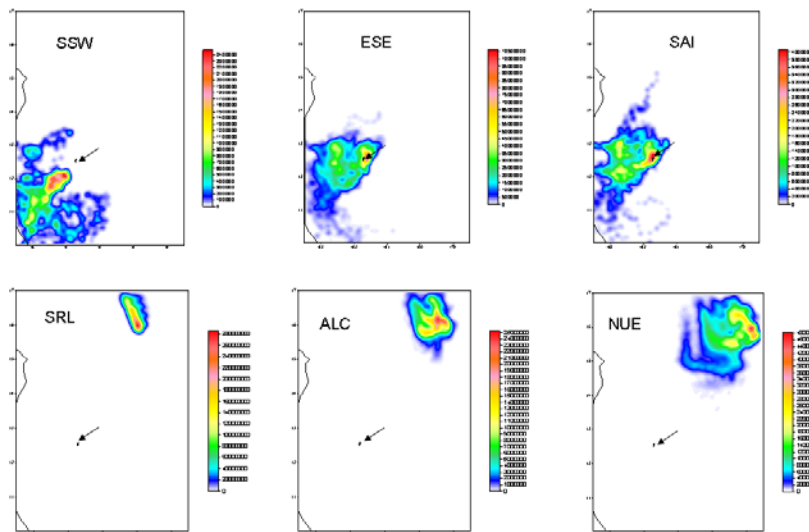
### Análisis por atolón

Los resultados mensuales para los diez atolones en estudio, haciendo énfasis en los dos picos de reproducción correspondientes a los meses de abril y septiembre, permiten inferir inicialmente patrones generales de conectividad entre ellos así:

- Los tres del sur muestran conectividad entre ellos en los dos años de simulación, independientemente del pico reproductivo.
- La conectividad del sur se extiende hasta Providencia (atolón del centro) especialmente en el mes de septiembre es decir el segundo pico reproductivo. Para este mismo periodo, el atolón también parece recibir larvas desde Roncador y en menor proporción de Serrana.
- Los siguientes tres atolones del norte, Quitasueño, Serrana y Roncador, mostraron mantener potencialidad de flujos de larvas entre sí en ambos picos reproductivos, siendo aparentemente más conspicuo entre Serrana y Roncador. En contraste, no hubo flujo entre estos atolones y los del sur.

- Por último, los atolones del extremo norte del archipiélago, Serranilla, Alicia y Nuevo, parecen tener flujos entre sí que no son tan consistentes como los notados anteriormente.

De manera general se nota que las larvas de los atolones del norte del dominio se mueven hacia la Cuenca Caimán, mientras que en los del sur se quedan en el Giro de Panamá-Colombia (figura 8).



**Figura 8.** Patrones de dispersión de larvas de caracol pala en los atolones de los extremos sur y norte de la RB Seaflower correspondientes al mes de abril de 2008. La flecha indica la localización de la isla de San Andrés para referencia espacial.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was done under contract 210/2009 between OCEANMET and CORALINA (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina). Its funding came from the funds of the project "Implementation of recovery integrated actions of populations of queen conch (*Strombus gigas*) in two reef complexes of the Seaflower Biosphere Reserve", co-funded by the National Hydrocarbons Agency (ANH from its original Spanish language initials - Agencia Nacional de Hidrocarburos), CORALINA, the Government of San Andrés, ICA, SENA and Universidad Nacional de Colombia. The authors thank Dr. Joaquin Triñanes, from the CoastWatch Caribbean Node, NOAA, for his support in data acquisition from the OCCAM model.

## BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- [1] Richardson PL. Caribbean currents and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research II*. 2005; 429-463.
- [2] Paris CB, Cherubin LM and RK Cowen. Surfing, spinning, or diving from reef to reef: effects on population connectivity. *Marine Ecology Progress Series*, 2007; 285-300.
- [3] Theile S. Queen conch fisheries and their Management in the Caribbean. Review of significant trade in specimens of appendix II species. Traffic report to CITES. 2001; 95p.
- [4] Prada MC, Casto ER, Taylor EJ, Puentes V, Appeldoorn RS and Daves N. Non detriment findings for the queen conch (*Strombus gigas*) in Colombia. San Andres Island. 2009; 51p.
- [5] Chiquillo E, Ospina J y Gallo J. Aspectos biológicos del caracol de pala *Strombus gigas* (Linnaeus 1758) en el departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Caribe colombiano). Informe final. 1997; 17 p.
- [6] Appeldoorn RS, Arango L, Cabeza F, Castro-González ER, Glazer R, Marshak T and Peñaloza G. Queen Conch Distribution and Population Assessment of the Northern Banks of the San Andrés Archipelago, Colombia. Unpublished Technical Report. CORALINA, San Andrés Island. 2003; 36p.
- [7] McCarthy K. A Review of Queen Conch (*Strombus gigas*) Life-history. NOAA SEDAR 14 DW 4. 2007; 8p.
- [8] Blumberg AF y Mellor GL. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-Dimensional-Coastal-Ocean-Model*. 1987. *Heaps American Geophysical Union*. Washington, D. C., 1987; 4: 1-16.
- [9] Lonin SA. Empleo de los datos de la NOAA-NODC-WOA en el modelo hidrodinámico del Caribe. *Boletín Científico CIOH*, 2004; (22):45-55.
- [10] Lonin SA, Hernández JL, Palacios DM. Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southern Caribbean. *J. Geophys. Res.* 2010; 115: 17p. doi:10.1029/2008JC005100.
- [11] Davis. M. 1994. Short-term competence in larvae of queen conch *Strombus gigas*: shifts in behavior, morphology and metamorphic response. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*104:101-108.
- [12] Lonin SA. Lagrangian model for oil spill diffusion at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1999; 5:331-336.
- [13] Monin AS and Yaglom AM. *Statistical Fluid Mechanics*, Lumley, JL (Ed.) Volume 2: Mechanics of turbulence. Cambridge, Mass. MIT Press. 1971;874p.



## AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue realizado mediante contrato 210/2009 entre OCEANMET y CORALINA (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina). Su financiación provino de los fondos del proyecto "Implementación de acciones integradas de Recuperación de poblaciones de caracol pala (*Strombus gigas*) en dos complejos arrecifales de la Reserva de Biosfera Seaflower", co-financiado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, CORALINA, Gobernación de San Andrés, ICA, SENA y Universidad Nacional de Colombia. Los autores agradecen al Dr. Joaquín Triñanes del CoastWatch Caribbean Node, NOAA, por su apoyo en adquisición de los datos del OCCAM.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Richardson PL. Caribbean currents and eddies as observed by surface drifters. Deep-Sea Research II. 2005; 429-463.
- [2] Paris CB, Cherubin LM and RK Cowen. Surfing, spinning, or diving from reef to reef: effects on population connectivity. Marine Ecology Progress Series, 2007; 285-300.
- [3] Theile S. Queen conch fisheries and their Management in the Caribbean. Review of significant trade in specimens of appendix II species. Traffic report to CITES. 2001; 95p.
- [4] Prada MC, Casto ER, Taylor EJ, Puentes V, Appeldoorn RS and Daves N. Non detriment findings for the queen conch (*Strombus gigas*) in Colombia. San Andres Island. 2009; 51p.
- [5] Chiquillo E, Ospina J y Gallo J. Aspectos biológicos del caracol de pala *Strombus gigas* (Linnaeus 1758) en el departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Caribe colombiano). Informe final. 1997; 17 p.
- [6] Appeldoorn RS, Arango L, Cabeza F, Castro-González ER, Glazer R, Marshak T and Peñalosa G. Queen Conch Distribution and Population Assessment of the Northern Banks of the San Andrés Archipelago, Colombia. Unpublished Technical Report. CORALINA, San Andrés Island. 2003; 36p.
- [7] McCarthy K. A Review of Queen Conch (*Strombus gigas*) Life-history. NOAA SEDAR 14 DW 4. 2007; 8p.
- [8] Blumberg AF y Mellor GL. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three -Dimensional-Coastal-Ocean-Model. 1987. *Heaps American Geophysical Union*. Washington, D. C., 1987; 4: 1-16.
- [9] Lonin SA. Empleo de los datos de la NOAA-NODC-WOA en el modelo hidrodinámico del Caribe. Boletín Científico CIOH, 2004; (22):45-55.
- [10] Lonin SA, Hernández JL, Palacios DM. Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southern Caribbean. J. Geophys. Res. 2010; 115: 17p. doi:10.1029/2008JC005100.
- [11] Davis. M. 1994. Short-term competence in larvae of queen conch *Strombus gigas*: shifts in behavior, morphology and metamorphic response. Mar. Ecol. Prog. Ser.104:101-108.
- [12] Lonin SA. Lagrangian model for oil spill diffusion at sea. Spill Science & Technology Bulletin, 1999; 5:331-336.
- [13] Monin AS and Yaglom AM. Statistical Fluid Mechanics, Lumley, JL (Ed.) Volume 2: Mechanics of turbulence. Cambridge, Mass. MIT Press. 1971;874p.