

SIMULADOR HIPERESPECTRAL PARA ECOSISTEMAS MARINOS.

E. Zafra, J. Piera

Institute Marine Sciences (ICM-CSIC)
Physical and Technological Oceanography Department
Pg. Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003, Barcelona, Spain

ABSTRACT

Las observaciones ópticas hiperespectrales y el desarrollo de nuevas estrategias de procesado son clave para el mejor entendimiento de los ecosistemas marinos y la distribución espacio-temporal de los parámetros ecológicos asociados. En este artículo se recogen las metodologías para implementar un simulador que resuelve información óptica hiperespectral correspondiente a ecosistemas marinos altamente dinámicos. El simulador se basa en el acoplamiento de varios modelos, de transferencia radiativa y modelos hidrodinámicos Lagrangianos, el cual está organizado en cuatro bloques básicos: un modelo hidrodinámico, un modelo de seguimiento de partícula (particle tracking model), una función de transformación y finalmente modelos que resuelven la ecuación de transferencia radiativa (R.T.E. models). La función de transformación es necesaria para adaptar la salida del modelo de tracking (ofrece el número de partículas por unidad de volumen) a concentración en masa, expresándose así, de una forma adecuada para el modelo de transferencia radiativa.

El simulador finalmente es sometido a un testeo, considerando como caso de estudio la bahía de Alfacs (NW Mediterranean Sea). En este caso de estudio, se analiza la dependencia radiativa debida a los desplazamientos verticales y el "self shading effects", que son las variaciones de luz debido a la sombra que puede provocar masas de fitoplancton circundantes. Se examina la evolución temporal de la intensidad de luz.

Index Terms—Modelos Eulerianos, Modelos hidrodinámicos, Modelos Lagrangianos, óptica oceánica, modelos radiativos, Modelos de seguimiento de partículas.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen numerosos modelos matemáticos que resuelven problemas relacionados con procesos atmosféricos, espaciales u oceánicos..., es de interés social, el conocer la conducta y los cambios de los patrones asociados a los componentes que conforman estos sistemas. Este tipo de herramientas nos ayudan a predecir un futuro previo y por lo tanto nos permite adaptarnos ante cualquier evento imprevisto.

En el caso de los ecosistemas acuáticos, hay un gran interés en profundizar y entender su dinámica particularmente en los ecosistemas costeros, mayormente porque confluyen varios intereses en común científicos y económicos (ej. la pesca y el turismo).

El estudio de estos ecosistemas es complejo. A menudo tienen dinámicas muy altas y no siempre se tiene la posibilidad de tener acceso a mediciones continuadas (tanto en el espacio como en el tiempo). Una de las aproximaciones que se utiliza frecuentemente es la de evaluar cambios en el ecosistema (como variaciones en la concentración de sedimentos en suspensión, o mayor o menor presencia de organismos planctónicos) a través de cambios en las propiedades ópticas del agua.

Para entender los cambios en las propiedades ópticas es necesario: 1) Entender cómo la luz interactúa con las partículas y material disuelto en el agua y 2) como los procesos de transporte modifican la distribución de estas partículas y material disuelto.

La mayoría de los modelos de ecosistemas acuáticos usan tratamientos hidrodinámicos muy sofisticados para obtener el campo de velocidades asociadas a los procesos de transporte, por otra parte también se están incrementando los esfuerzos en los modelos biológicos, que por ejemplo calculan la producción primaria usando muchos grupos fitoplanctónicos, y empleando múltiples variables. En el caso de los tratamientos ópticos, en la mayoría de ellos, son

muy simplificados, la componente óptica de estos modelos a veces sólo usan una simple ecuación para caracterizar la irradiación escalar o PAR (photosynthetically available radiation, es la parte de la luz que utiliza la fotosíntesis), además se ha demostrado que en lugares como en el océano abierto esta aproximación ya falla, si además pensamos en la costa, donde el ambiente es mucho más dinámico, se pueden obtener errores significativos[3].

Por lo tanto, las observaciones ópticas hiperespectrales, donde diferenciamos los espectros de onda y no integramos una cantidad, como comentábamos anteriormente (PAR), y el desarrollo de nuevas estrategias, son clave para el entendimiento del complejo ecosistema marino y su distribución de los parámetros ecológicos en el espacio y el tiempo.

La llegada de sensores hiperespectrales de bajo costo y su eficiencia energética han planteado nuevas expectativas para varias aplicaciones de investigación en el ámbito bio-óptico-marino. Al respecto, el desarrollo de nuevos algoritmos se ha convertido esencial para la interpretación de este tipo de datos ópticos con el fin de mejorar nuestra capacidad de monitorizar ópticamente componentes activos de agua y eventos tales como floraciones de algas nocivas o los derrames de petróleo.

En particular, hay una necesidad de probar de si el enfoque hiperespectral que ha demostrado ser útil en escenarios estáticos, (por ejemplo aplicaciones de satélite para el control del cultivo en campos), también pueden ser eficaz para los algoritmos enfocados sobre la discriminación de la comunidad de fitoplancton en ambientes marinos altamente dinámicos[1, 2]. Por ejemplo hay aplicaciones terrestres que hacen uso de estos datos sintéticos y que gracias al diseño de algoritmos sustituyen en gran medida el esfuerzo humano que hay que implicar en el campo. Sin embargo, en entornos marinos los patrones ópticos son controlados por procesos dinámicos que redistribuyen las partículas o componentes activos ópticamente a un ritmo mucho más rápido que en escenarios terrestres. Este hecho implica que se necesitan herramientas de simulación donde la resolución de los datos ópticos sea capaz de reproducir datos sintéticos altamente dinámicos. Por lo tanto, hay una compensación entre la generación realista de los datos y los requisitos del equipo o el consumo de recursos del sistema para obtenerla.

En el caso de la atmósfera y océano, el comportamiento está regido por las ecuaciones asociadas a la dinámica de fluidos y otros procesos físicos como la interacción entre la materia y radiación, la microfísica de nubes, etc. En general, estas

ecuaciones se expresan como ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución futura de las diferentes variables relevantes en función de los valores de las distintas variables en el presente. El modelo matemático consiste en estas ecuaciones junto con los valores de parámetros y condiciones de frontera (por ejemplo, las características topográficas de la Tierra, la cantidad de energía emitida por el Sol, etc.). Si conociéramos el estado de la atmósfera y/o océano en un momento dado, podríamos en principio resolver las ecuaciones de los modelos matemáticos para determinar los estados futuros de estos (salvo por limitaciones en predictabilidad). En la práctica, sin embargo, las ecuaciones son tan complejas que esto es imposible hacerlo en forma "analítica" (o sea, con papel y lápiz) por lo cual es necesario resolver las ecuaciones en forma aproximada usando métodos numéricos y usando computadoras. Los programas computacionales que resuelven estas ecuaciones aproximadas son comúnmente conocidos como "modelos numéricos"[4, 5].

Un ejemplo de los primeros intentos para desarrollar simuladores de bajo coste que pueda presentar características como las comentadas, lo podemos encontrar en [3,6], donde se aplican modelos Eulerianos hidrodinámicos. Hay dos tipos de modelos en oceanografía que ofrecen distintas características. En este caso el modelo hidrodinámico es acoplado a un modelo óptico y biológico, que nos permite obtener la evolución de la irradiancia a través de la columna de agua, por otra parte, como comentábamos, los modelos eulerianos ofrecen información sobre la concentración de partículas, pero su trayectoria y posición son desconocidas, además la resolución espacial que se consigue en estos modelos es muy baja y perdemos la posibilidad de identificar procesos localizados en pequeñas áreas (como pueden ser blooms algales en zonas muy localizadas, o derrames de contaminantes, petróleo o cualquier otro componente químico).

Un enfoque alternativo para modelar la dinámica de un ecosistema marino, es utilizar modelos hidrodinámicos Lagrangianos. Con estos modelos, las variaciones de la luz debido a cambios de los componentes activos (componentes que reaccionan con la luz) que experimenta cada partícula puede ser simulada y seguida. El comportamiento de cada partícula se puede modelar individualmente, añadir efectos de flotabilidad o movimiento natatorio que algunas especies lo poseen, en cambio en modelos Eulerianos no es posible. Otra característica importante es que puedes conocer el "historial" de cada partícula y formular predicciones a raíz del estudio del "big data". En nuestro caso, hemos implementado un modelo Lagrangiano que añade a cada

partícula una cantidad de componente activo (por ejemplo clorofila en el caso del plancton), que lo calcula en función de una relación encontrada en la naturaleza entre el biovolumen celular y la concentración de clorofila ver [7].

Hasta el presente, existen modelos por separado: 1) modelos ópticos (conocidos como modelos de transferencia radiativa), que permiten obtener "fotografías" de un escenario óptico y 2) modelos hidrodinámicos que permiten simular los procesos de transporte. El desarrollo de estas herramientas nos darán soporte en un futuro a simuladores más sólidos que nos permitan conocer con mayor resolución los fenómenos que surgen en nuestra naturaleza.

En este artículo se presenta y testea los pasos para desarrollar un simulador hiperspectral de bajo coste computacional basado en modelos Lagrangianos.

Con este objetivo, un modelo hidrodinámico es acoplado a un software de seguimiento de partículas para obtener las trayectorias de las mismas. Con el modelo radiativo se computa la interacción de la luz con la evolución de la dispersión de partículas. Por otra parte, para adaptar la salida (n° de partículas por unidad de volumen) del modelo hidrodinámico al modelo de transferencia radiativa (concentración por unidad de volumen) se utiliza la función de transformación.

El simulador es finalmente testado simulando similares condiciones a aquellas encontradas en el sitio de estudio seleccionado, la bahía de Alfacs (al Noroeste del Mar Mediterráneo). Finalmente, se obtiene la variación de las distribuciones de la radiancia en función de los desplazamientos verticales y el "self shading effect"

El conjunto del simulador y las técnicas de procesado están concebidas como una herramienta preliminar, por otra parte se están desarrollando varios modelos que aporten complejidad, así como eventos de cambios de flotabilidad, cambios en sus características ópticas por procesos naturales, movimientos natatorios..etc

La Sección II de este artículo describe los cuatro bloques básicos necesarios para implementar el simulador, aborda la función de transformación y por último se expone la metodología que apoya los resultados expuestos en la última parte.

En la Sección III se analiza la dependencia radiativa (energy download E_d (W/m^2)) con respecto a los cambios del coeficiente de extinción, K_d , considerando la dinámica del fitopláncton como el factor más influyente en esta variabilidad, se presenta los modelos simplificados,

para luego añadir complejidad al nuevo modelo sugerido, añadiendo K_d hiperspectrales y la dinámica del fitoplancton ("self shading").

2. METODOLOGÍA

La figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso por bloques necesario para implementar el simulador. En el primero paso, mediante un modelo hidrodinámico tridimensional se obtiene el campo vectorial de velocidades asociados a un ecosistema marino en particular, SI3D[3]. Después esta información se usa en el software de tracking de partículas para computar la distribución espacial a lo largo del tiempo de un grupo inicial de partículas. Cada partícula representa una población de varias células fitoplanctónicas, ya que resultaría de un coste computacional muy elevado considerar cada célula independiente como una partícula. Para tal fin, se computa el número de partículas por unidad de volumen (N/m^3) para cada uno de esos volúmenes, obteniendo la distribución del número de partículas.

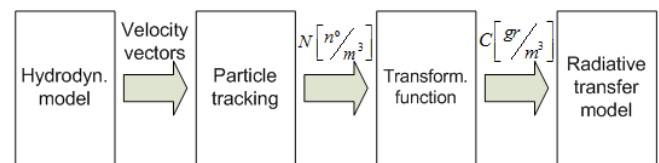


Fig. 1. Flow chart of the processing techniques to implement the simulator.

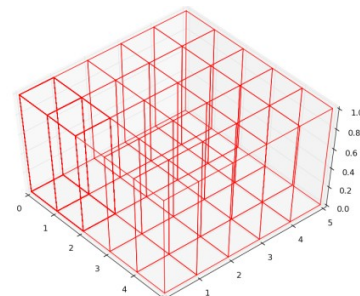


Fig. 2. Grid division proposed for the marine volumes.

En el último paso, el modelo de transferencia radiativa, ej. Hydrolight-Ecolight[6], necesita valores expresados en concentración de componentes activos ópticamente (clorofila, materia en suspensión, etc.). Se han propuesto varios modelos para estimar la salida de los valores de concentración de los modelos Lagrangianos, desde los basados en la distribución de partículas (modelos de trayectoria), o los modelos basados en la dispersión

Gaussiana dentro de cada partícula, finalmente se ha elegido estos últimos y se obtienen campos de concentración como superposición de estas distribuciones Gaussianas (puff models). Con el fin de ahorrar coste computacional de estos métodos e inspirándonos por la relación no lineal entre la concentración y biovolumen de fitopláncton [7], la estimación de los campos de concentración se ha simplificado y se calcula como una función de ley de potencia del número de partículas por unidad de volumen. Esta transformación no trata de reproducir la realidad, sino que trata de dar resultados fiables con un bajo coste computacional. La función de la ley de potencia se puede describir como:

$$C(N) = a \cdot N^b, \quad (1)$$

donde C es la concentración de masa en gr / m³, N es el número de partículas por unidad de volumen (número de partículas por m³), y a y b son los coeficientes que determinan las características de la curva (con b en el intervalo (0,1)). Más información en [8].

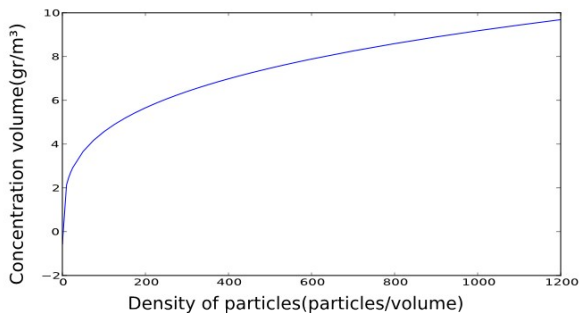


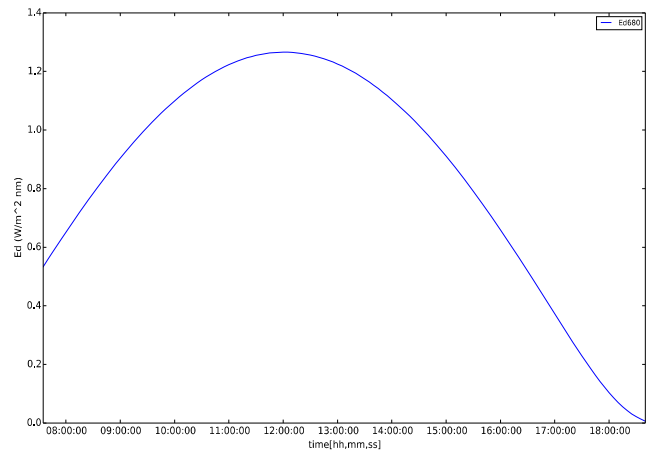
Fig. 6. Nonlinear relationship between mass concentration and number of particles per unit volume.

La mayoría de enfoques numéricos que modelizan la dinámica de los procesos ópticos usan parámetros de espectro integrado. Por ejemplo, la atenuación de luz vertical, basada en la ley de Beer-Lambert-Boguer, es comúnmente basada en la integración de la radiación fotosintética disponible. La atenuación difusa vertical, K_{dpar}, es normalmente estimada a partir de la concentración de clorofila y otros parámetros como el angular solar. En este sentido, un enfoque hiperespectral proporciona la oportunidad para mejorar la caracterización de la atenuación

de la luz, considerando la contribución espectral de diferentes componentes en la columna de agua.

La atenuación difusa vertical, K_{dpar}, es normalmente estimada a través de

$$E_{PAR} = E_{O_{PAR}} * e^{-K_{d_{PAR}} * z}$$



Ejemplo de energy download (Ed) expresado como (w²/m² nm) a largo del tiempo

En la siguiente sección se expondrán dos ejemplos de dos trayectorias de partículas similares, observando los cambios de Ed, con K_{dpar} constante, y K_d variable influenciado por la dinámica del fitoplancton (“self shading”).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Se ha simulado la dependencia de la luz debido a los procesos de mezcla vertical y self-shading, se han introducido 2000 partículas, similar a otros estudios [1]. De la misma forma, se ha realizado otra simulación con una única partícula. Por último, se estudia la trayectoria seguida por la partícula para observar los cambios de intensidad de luz en ambas simulaciones.

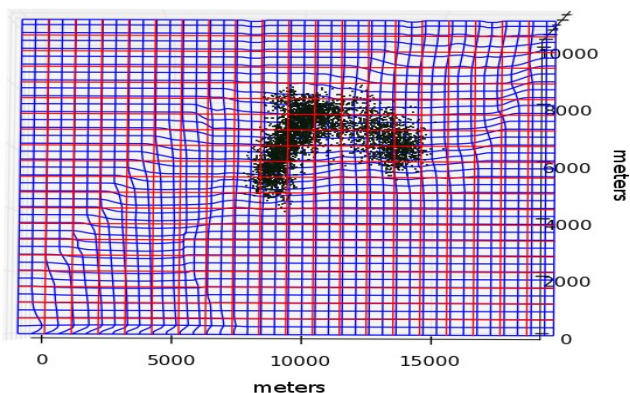
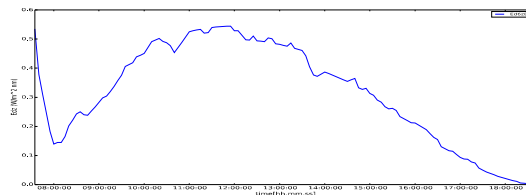


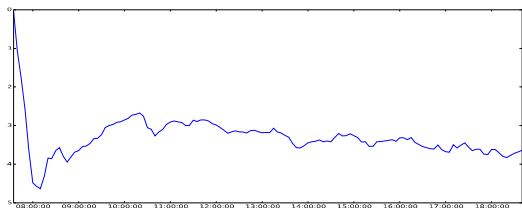
Fig. 3. Distribución de partículas de la Bahía de Alfacos para un instante dado.

Un ejemplo sencillo, de cómo se considera la energy download (E_d) en la mayoría de los casos, integrando los componentes espectrales que afectan a la fotosíntesis:



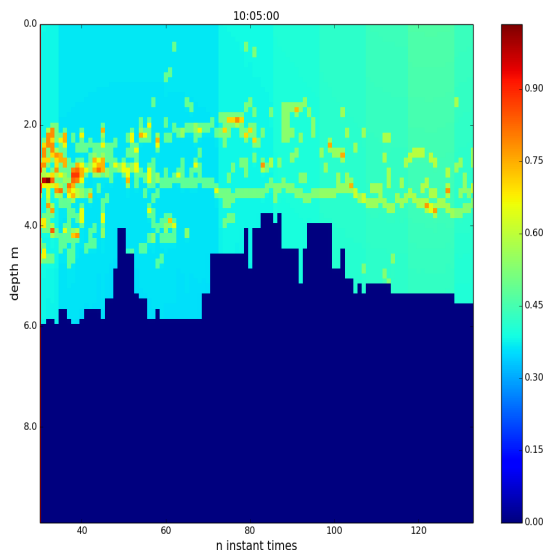
La figura muestra la evolución hiperespectral $E_d(\lambda,t)$ de la trayectoria de la partícula asociada al gráfico anterior. Los cambios de E_d están relacionados con el desplazamiento vertical.

Pero si consideramos el K_d como variable, reconociendo también solo la evolución de la dispersión de las partículas circundantes a la misma trayectoria. En la siguiente figura se muestra los cambios de K_d que puede sufrir una partícula a lo largo de su trayectoria considerando los cambios de K_d influenciados por sus partículas vecinas.

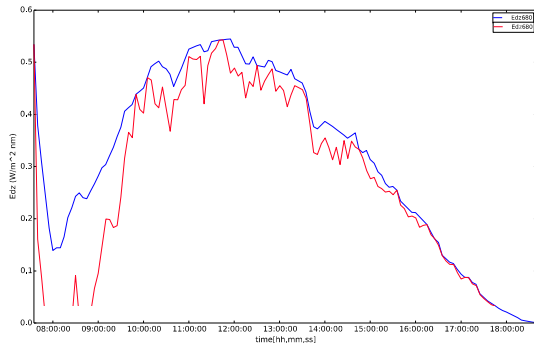


Muestra el desplazamiento vertical de una partícula a lo largo del tiempo

Durante mucho tiempo la importancia de la caracterización del K_d ha sido reconocida para evaluar la variabilidad en la irradiancia de luz debido a procesos verticales, que a su vez afecta a la precisión de las estimaciones de la fotosíntesis in situ [3].



Si consideramos la gráfica de energy download anterior, con Kd constante, con los resultados de la nueva Ed, podemos observar cómo existe una caída de la curva debido a que la Kd es variable y hay puntos donde ahora se extingue más la luz porque en este caso se está considerando las partículas circundantes que crean zonas de sombras.



Distribución del kd (profundidad m) a lo largo del tiempo.

La figura muestra los cambios de Ed relacionados con el movimiento vertical de una sola partícula considerando Kdz como constante (Línea azul), la otra línea corresponde a valores de Kd variables considerando la dinámica de fitopláncton, podemos observar cómo la señal es más débil debido a los procesos de absorción de luz que interactúan con las partículas de alrededor.

Por lo tanto, considerando un enfoque hiperespectral y la dinámica del fitopláncton, podemos reescribir de nuevo la fórmula de la siguiente forma:

$$E(\lambda, t) = E_0(\lambda, t) * e^{-Kd(\lambda, t) * z}$$

4. CONCLUSIONS

En este estudio los resultados preliminares obtenidos apoyan el potencial de estas herramientas de modelado dinámico para la monitorización de eventos oceánicos en el ecosistema. Sin embargo, se trata de una primera aproximación que necesita mejorar para considerarse una herramienta más robusta y fiables que permita simular escenarios complejos del ecosistema marino.

Por otra parte, han sido descritas y testeadas las metodologías para implementar un simulador hiperespectral para ecosistemas marinos basado en modelos hidrodinámicos Lagrangianos. Se ha hecho especial énfasis en describir y contextualizar el trabajo en la primera parte, y se ha hablado del desarrollo de los métodos para acoplar modelos Lagrangianos a modelos de transferencia radiativa, también, se ha explicado la motivación de mejorar las metodologías de interpretación de datos ópticos, en este caso la importancia de valorar coeficientes de extinción, Kd en función del tipo de onda (enfoque hiperespectral) y en función de la dinámica de los componentes activos ópticamente (ej. Plancton), esta variabilidad comentada, pueden afectar a la valoración de índices fotosintéticos que se utilizan actualmente.

Se ha presentado una herramienta de simulación hiperespectral preliminar, la cual se espera que alcance la capacidad de modelar procesos complejos, así como cambios de flotabilidad, capacidad natatoria, cambios en las características ópticas de los componentes activos, etc.

5. REFERENCES

- [1] E. Torrecilla, D. Stramski, R.A. Reynolds, E. Millán-Núñez and J. Piera, "Cluster analysis of hyperspectral optical data for discriminating phytoplankton pigment assemblages in the open ocean", *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, 10, pp. 2578-2593, 2011.
- [2] K.R. Thorp, G. Wang, A.L. West, M.S. Moran, K.F. Bronson, J.W. White and J. Mon, "Estimating crop biophysical properties from remote sensing data by inverting linked radiative transfer and ecophysiological models", *Remote Sensing of Environment*, vol. 124, pp. 224-233, 2012.
- [3] Mobley, Curtis D., et al. "Impact of improved light calculations on predicted phytoplankton growth and heating in an idealized upwelling-downwelling channel geometry." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120.2 (2015): 875-892.
- [4] P.E. Smith, "A three-dimensional, finite-difference model for estuarine circulation", Ph.D. dissertation, Univ. of California, 1997.
- [5] F.J. Rueda, "A three-dimensional hydrodynamic and transport model for lake environments", PhD thesis, University of California, Davis, 2001.
- [6] C.D. Mobley and L. Sundman, *HydroLightEcLight 5.0 User's Guide*. Mercer Island, Washington: Sequoia Scientific Inc, 2008.

[7] M. Felip and J. Catalan, "The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima", *Journal of Plankton Research*, vol. 22, pp. 91–105, 2000.

[8] E.Zafra, et al., 7 Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing. IEEE-Whispers (2014).