

Aproximación Metodológica para el Cálculo del Tiempo de Renovación en Áreas Portuarias

Aina García, Andrés García, José A. Revilla, Bárbara Ondiviela, Itxaso Carranza, Xabier Guinda, César Álvarez, José A. Juanes.

Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria. Av. De los Castros s/n, 39005 Santander, Cantabria. aina.gomez@unican.es, andres@emisarios.unican.es, revillaj@unican.es, ondiviela@unican.es, xabi@emisarios.unican.es, itxascarranza@hotmail.com, alvarezc@unican.es, juanesj@unican.es

RESUMEN

El tiempo de renovación es uno de los descriptores seleccionados en la ROM 5.1-05 sobre calidad de las aguas litorales en áreas portuarias para la clasificación tipológica de las masas de agua portuarias. Esta variable se define como el tiempo medio en el que el volumen de agua contenido en un espacio determinado permanece en el sistema. Dada la diversidad de métodos aplicados, hoy en día, a la cuantificación de esta variable, la Recomendación propone como metodología estándar de referencia mediante el modelado matemático de la evolución de un trazador conservativo introducido de forma homogénea en una masa de agua. En el presente artículo se analizan las posibles fuentes de incertidumbre en la aplicación de dicha metodología y se discuten algunos aspectos relacionados con la implementación práctica del método propuesto.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con lo establecido en la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE), la gestión de los sistemas acuáticos requiere la tipificación y delimitación de espacios de características estructurales y funcionales homogéneas, denominados “masas de agua” que representan las unidades básicas en las que se aplican diferentes instrumentos de gestión ambiental (evaluación de riesgos, vigilancia y control ambiental, programas de medidas, etc.). En la Recomendación de Obras Marítimas

sobre calidad de aguas litorales en áreas portuarias ROM 5.1-05 (en lo sucesivo ROM 5.1), la tipificación de dichas masas de agua representa el proceso mediante el cual el medio acuático de la Zona de Servicio Portuario se clasifica en diferentes tipos de masas de agua homogéneas. Para ello, establece un primer procedimiento mediante el cual diferenciar aquellos espacios acuáticos portuarios que, debido a las alteraciones hidromorfológicas a las que se ven sometidos, se clasifican como “masas de agua modificadas”. Definidas en la DMA como masas de agua superficial que han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana.

De acuerdo con estas peculiaridades hidromorfológicas, la ROM 5.1 establece que la tipificación de las masas de agua modificadas se llevará a cabo mediante la combinación de un descriptor físico, como es el tipo de sustrato dominante (rocoso/sedimentario), y un descriptor hidromorfológico, como es el tiempo de renovación. Este último representa, además, un factor representativo de los procesos de transporte de la masa de agua y, por lo tanto, está directamente relacionado con los procesos químicos y biológicos que inciden en su calidad como por ejemplo la reducción de oxígeno y la eutrofización (Gómez-Gesteira y otros, 2003; Rasmussen y Josefson, 2002).

Según diferentes autores (Rasmussen y Josefson, 2002; Wang y otros, 2004), el tiempo de renovación de un sistema acuático concreto es el tiempo medio que el volumen de agua permanece en dicho sistema antes de abandonarlo definitivamente. Si toda el agua existente en un sistema es “etiquetada” en un instante determinado, inevitablemente parte de ésta saldrá fuera del sistema instantáneamente, mientras que otra permanecerá durante un período largo de tiempo. Este fenómeno es debido a que el tiempo de renovación depende, principalmente, de las corrientes hidrodinámicas, de las descargas debidas a las aportaciones fluviales (en el caso de que existan) y en menor medida de la circulación inducida por la densidad.

Para el cálculo del tiempo de renovación Wang y otros (2004) introducen en la zona de estudio un trazador conservativo uniformemente distribuido y estudian su transporte en el tiempo a partir de la utilización de modelos numéricos, herramientas

matemáticas que permiten el estudio de los procesos que se llevan a cabo en el medio acuático de una forma teórica.

El transporte de masa es el resultado de la acción conjunta de tres procesos físicos diferenciados: advección, difusión y reacción. Por una parte, la advección es el transporte de la sustancia debido a la propia velocidad de desplazamiento del fluido, en el que se halla inmersa, por efecto de las corrientes hidrodinámicas. La dispersión o difusión turbulenta es el fenómeno físico por el que se establece un flujo másico de sustancia entre dos zonas próximas provocado por la existencia en ambas de diferentes niveles de concentración de esa sustancia (García, 2004). Por último, la reacción puede modificar los niveles de concentración de una de sustancia fruto de una transformación química, aunque en este caso no ha lugar debido a que la sustancia es un trazador conservativo pasivo.

En la ROM 5.1 se adopta la metodología descrita por Wang y otros (2004) utilizando los valores medios de los agentes dispersivos más significativos: la marea y el viento. Al aplicarse el modelado a un escenario particular de un sistema específico como es una masa de agua, a todos los segmentos dentro de ésta se les confiere una concentración uniforme de trazador conservativo en un instante en el cual el volumen de dicha masa es máximo. Mientras el modelo procesa, el trazador se dispersa gradualmente bajo la influencia de las fuerzas físicas. La distribución espacial del trazador restante en la masa de agua objeto de estudio se utiliza para calcular la masa residual del trazador en un tiempo determinado.

Teóricamente, el modelado podría realizarse hasta que la masa residual de trazador conservativo, en la masa de agua, alcanzara el valor cero. En la mayoría de situaciones, este hecho podría conllevar a tiempos infinitos, por ello, de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de tests de sensibilidad, Wang y otros (2004) establecen que el límite, en estuarios, debe ser el 0.1% de la masa residual. En el caso de la ROM 5.1., debido a que el cálculo del tiempo de renovación se efectúa en masas de agua modificadas, sometidas a alteraciones hidromorfológicas que no permiten una renovación semejante a la de un estuario, se ha establecido como límite un 10% de la masa residual.

Además, se hace necesario abordar el establecimiento de un criterio que precise la valoración de este descriptor. En la ROM 5.1. se ha considerado que siete días es un tiempo aceptable para que una masa de agua modificada renueve su volumen. Por este motivo, se lleva a cabo la ejecución del modelo numérico de transporte durante una semana, calculándose la masa residual del trazador conservativo. Si al cabo de ese tiempo el porcentaje de masa residual es inferior al 10% se considera que la tasa de renovación es aceptable, por el contrario, si el porcentaje es superior al 10% se considera que la tasa de renovación es baja.

Con el fin de normalizar las condiciones iniciales de transporte del trazador conservativo, la simulación de las corrientes generadas por efecto de la marea astronómica se inicia en cuadratura de fase, estimando los dos armónicos principales de marea. Por otro lado, para las corrientes generadas por el viento se considera el régimen medio anual. Por último, se tiene en cuenta el caudal medio anual de las aportaciones fluviales.

El procedimiento metodológico establecido para el cálculo del tiempo de renovación se basa en las siguientes hipótesis que pretenden ser corroboradas en este estudio:

- El tiempo de renovación es independiente de la concentración inicial de trazador conservativo introducida en la región objeto de estudio.
- El tiempo de renovación es dependiente del volumen de la masa de agua de la región objeto de estudio.

Por un lado, en la metodología propuesta en la ROM 5.1. no se establece como condición inicial para el transporte del trazador conservativo una concentración inicial concreta. Este hecho es debido a considerar como hipótesis válida que al tratarse de un trazador conservativo el tiempo de renovación debería ser independiente de la concentración inicial. Esta hipótesis se valida en el presente artículo mediante el cálculo del tiempo de renovación variando la concentración inicial en una misma zona.

Por otro lado, se sugiere que cuanto mayor es el volumen de la masa de agua, es decir, a mayor masa inicial del trazador, mayor es también su tiempo de renovación. Para corroborar esta hipótesis, se calcula el porcentaje de masa residual presente

transcurridos siete días suponiendo zonas de estudio similares, pero con volúmenes iniciales diferentes.

Con este artículo se pretende que el procedimiento metodológico establecido pueda ser utilizado en la futura aplicación de la ROM 5.1. en los diferentes puertos de interés general. Por ello, el objetivo principal es la definición de un procedimiento estandarizado que permita el cálculo del tiempo de renovación de las masas de agua modificadas de forma sencilla y robusta. Haciendo especial hincapié en el cálculo del régimen medio anual, debido a la aleatoriedad inherente del efecto del viento sobre los resultados del cálculo del tiempo de renovación.

MATERIAL Y MÉTODOS

MODELOS Y METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico aquí descrito se basa en las aportaciones científicas realizadas por diversos autores, pero especialmente en el método establecido por Wang y otros (2004), utilizando modelos numéricos desarrollados en el seno de la Universidad de Cantabria validados en numerosos estudios realizados hasta la fecha.

En primer lugar, deben obtenerse las corrientes generadas tanto por la acción de la marea como del viento, lo que constituye la hidrodinámica de la zona de estudio. Las corrientes de la onda media de marea se obtienen a partir de un modelo hidrodinámico promediado en profundidad (Modelo H2D) (Revilla y otros,1995) haciendo uso del “método de mallas anidadas”. Esta técnica consiste en la ejecución del modelo en un campo geográfico más amplio para obtener resultados en líneas concretas, que posteriormente constituyen el contorno de una malla más pequeña y de mayor detalle.

Las velocidades generadas por efecto del viento se consideran que constituyen un movimiento de trayectoria plana, cuyo campo de velocidad inducido debe ser variable en profundidad, por ello, se utiliza un modelo cuasitridimensional (Modelo H2DZ) (Revilla y otros,1995). En este caso, se obtienen las velocidades generadas

en las ocho direcciones de viento significativas (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) para dos intensidades de viento representativas de la zona de estudio, **por ejemplo** 5 m/s y 10m/s. Para el estudio de la evolución del trazador conservativo, debido a la aleatoriedad de las corrientes generadas por el viento, el régimen medio anual de viento se obtiene mediante la aplicación del método de Monte Carlo considerando situaciones de viento constante de 8 horas de duración, de acuerdo con los datos de probabilidad de presentación de los vientos, según los datos recogidos en la ROM 0.4-95 de Acciones Climáticas II: Viento.

A partir de la hidrodinámica marina calculada, información base de partida, se modela el transporte del trazador conservativo a través de un modelo matemático bidimensional en continuo (RENOVA, 2006). Por una parte, el refluo de las mareas y las descargas de los ríos (si los hubiera) desplazan al trazador de la masa de agua, mientras que las mareas de inundación devuelven parte del trazador que habría sido transportado durante el refluo.

La distribución del trazador conservativo se calcula ininterrumpidamente hasta que la mayoría de dicho trazador es eliminado de la zona de estudio. Los resultados se utilizan para calcular la masa residual en un tiempo determinado y el tiempo de renovación según las siguientes expresiones:

$$\text{Masa residual:} \quad M(t) = \int c(t) dv \quad (1)$$

$$\text{Tiempo de renovación:} \quad T_r = \frac{1}{M(0)} \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dM(t)}{dt} \right] dt \quad (2)$$

Donde t es el tiempo, M es la masa total del trazador conservativo que permanece en la masa de agua modificada, c es la concentración del trazador, v es el volumen y T_r es el tiempo de renovación.

Una vez modelado el transporte del trazador conservativo el modelo proporciona los siguientes resultados:

- Masa total inicial en las celdas.
- Masa total residual en las celdas a los siete días.
- Porcentaje de masa residual respecto a la masa inicial a los siete días.

Con el fin de observar mejor los fenómenos del transporte del trazador conservativo, se hace uso también de un modelo lagrangiano (AM_PART, 2002) que permite estudiar la evolución de partículas situadas en diferentes puntos del interior de una masa de agua durante un período determinado de tiempo.

ZONA DE ESTUDIO

El estudio se ha realizado en dos puertos de interés general situados en el litoral del Mar Cantábrico, el Puerto de Santander y el Puerto de Gijón. Por un lado, en el Puerto de Santander se realizan los estudios sobre el efecto de la concentración inicial y del volumen inicial en el tiempo de renovación. Por otro, en el Puerto de Gijón se justifica el efecto que tiene el viento como variable aleatoria dependiendo del conjunto de sucesos de vientos que se escojan a través del método de Monte Carlo.

El Puerto de Santander se encuentra en el interior de la Bahía de Santander, que se constituye en uno de los estuarios más importantes del Norte de España, con una extensión total de 22.5 km². La Zona de Servicio Portuario de Santander se caracteriza por sus condiciones hidrodinámicas, controladas por un régimen de marea semidiurna y 3 metros de rango medio de marea, interactuando con entradas de agua dulce procedentes en mayor medida del río Miera y descargas menores a través de las rías de Boo, Tijero y Solía (Puente y otros, 2002).

El estudio de la variación de la concentración inicial se lleva a cabo, concretamente, en la Dársena de Maliaño, zona confinada en dársenas que se encuentra resguardada de la acción de las corrientes hidrodinámicas y que, por tanto, puede considerarse como masa de agua modificada. Debido a que es una de las zonas menos afectadas por las corrientes de marea, cabría esperar que el tiempo de renovación fuera uno de los más elevados en el Puerto de Santander. Sin embargo, para el estudio de la variación del volumen inicial de la masa de agua se ha escogido la Dársena Norte de Raos, dársena con una alta homogeneidad en términos de calado y geometría (Fig. 1).

El Puerto de Gijón se encuentra inmerso dentro de la ciudad de Gijón, en el tramo costero central de Asturias, abierto al mar en una bahía ubicada entre la península Cimadevilla al este y el Puerto de El Musel al oeste. La hidrodinámica en esta zona resulta condicionada fundamentalmente por la acción combinada de una marea astronómica semidiurna y un régimen de viento con una dirección reinante del oeste. El estudio se realiza en la masa de agua modificada correspondiente al Puerto de El Musel, zona con alteraciones hidromorfológicas significativas (Fig. 1).



Figura 1. Localización de las zonas de estudio: (A) Puerto de Santander y (B) Puerto de Gijón.

A continuación se detallan los aspectos concretos que se tienen en cuenta para cada uno de los estudios específicos llevados a cabo en este artículo: efecto de la concentración inicial, efecto del volumen inicial y efecto del régimen de viento.

EFEECTO DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL

Para la realización de este estudio no se considera el efecto de las corrientes producidas por el viento, estimando que las corrientes generadas por este fenómeno son menos determinantes que las generadas por la marea y podrían provocar ruido de fondo en las conclusiones del estudio. Tampoco se tienen en cuenta los datos de los aportes fluviales debido a que se localizan en la margen derecha de la Bahía de Santander y se cree que afectan de forma inapreciable a los resultados del tiempo de renovación.

Respecto a la onda de marea se dispone de los campos vectoriales de corriente y escalares de niveles de la superficie libre obtenidos por aplicación del modelo

bidimensional (H2D) en la zona de estudio. La onda de marea en el Puerto de Santander utilizada para la simulación es de tipo reflejante, con una amplitud de 1'4 metros, un periodo de 12 horas y una fase de 270° (pleamar). El modelado de la evolución del trazador conservativo se inicia en pleamar, cuando el volumen es máximo.

La batimetría utilizada se obtiene a partir de una malla de 199x253 celdas de 51.03333 metros de lado, cubriendo toda la superficie de la Bahía de Santander (Fig. 2).

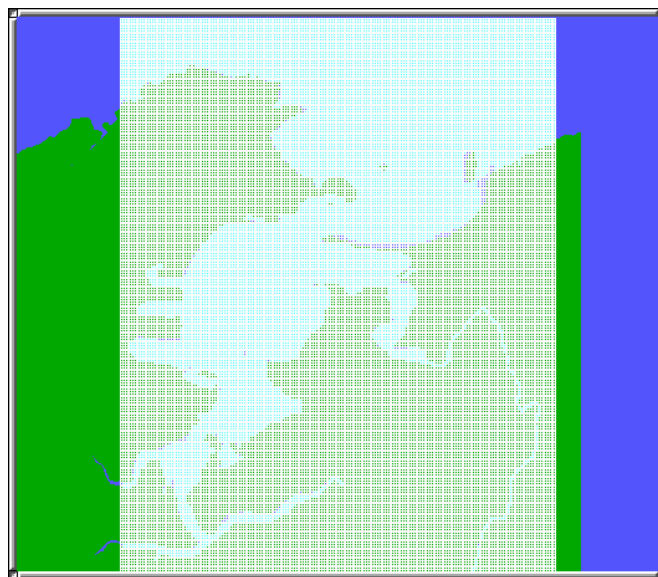


Figura 2. Malla de la zona de estudio.

Para la realización de este estudio se han considerado dos supuestos: el Supuesto 1 se corresponde con la parte interior de la Dársena de Maliaño y el Supuesto 2 se corresponde con toda la Dársena de Maliaño. La zona del Supuesto 1 es conocida como Barrio Pesquero, con una dimensión aproximada de tres hectáreas que en la malla se representan por 6 celdas. El Supuesto 2, Dársena de Maliaño, tiene una superficie de unas veinticuatro hectáreas representadas por un total de 84 celdas (Fig. 3).

A las celdas que ocupan una zona concreta (Barrio Pesquero o toda la Dársena de Maliaño) se les introduce una concentración inicial homogénea para poder estudiar su evolución en el transcurso de siete días. Para establecer que la concentración inicial y el tiempo de renovación son independientes, se ha considerado oportuno

ejecutar, para cada uno de los supuestos, cuatro simulaciones diferentes con concentraciones iniciales de 1, 10, 100 y 1000 mg/l de trazador conservativo.

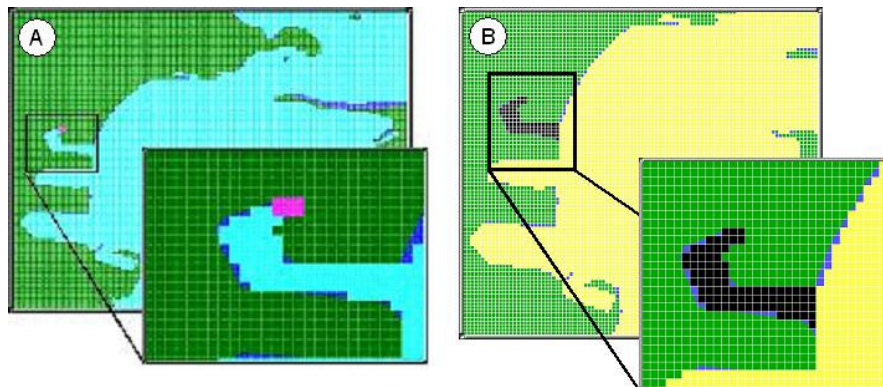


Figura 3. Celdas correspondientes a: (A) Supuesto 1 y (B) Supuesto 2.

Con el fin de confirmar esta independencia se ubican dos puntos de control, uno en el interior de la Dársena de Maliaño (P1) y otro justo en la salida de la mencionada dársena (P2), obteniéndose en estos puntos datos de concentración cada 10 minutos (Fig. 4). Para que el tiempo de renovación sea independiente de la concentración inicial el comportamiento, en un punto concreto, del cociente entre la concentración y la concentración inicial frente al tiempo debería ser idéntico para cualquier concentración inicial.



Figura 4. Localización de los puntos de control.

EFEECTO DEL VOLUMEN INICIAL

Este estudio se lleva a cabo en la Dársena Norte de Raos del Puerto de Santander, que ocupa una superficie de unas 33 hectáreas aproximadamente, representadas por 126 celdas de la misma malla utilizada en el caso anterior (Fig. 5).

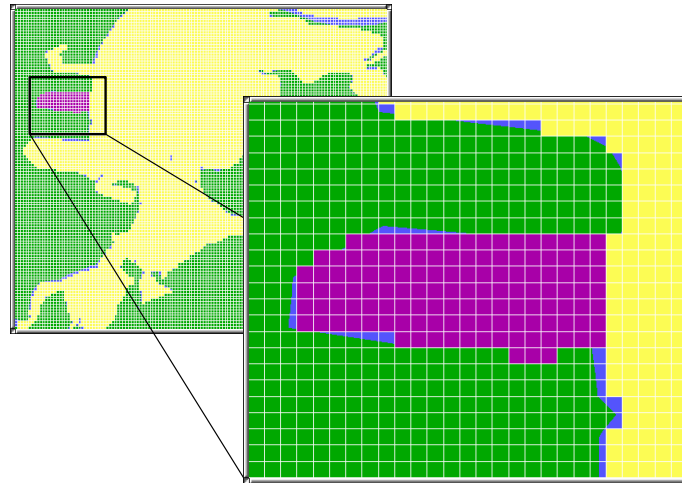


Figura 5. Celdas correspondientes a la Dársena Norte de Raos.

Asimismo, con el fin de observar la relación existente entre el volumen inicial y el tiempo de renovación se obtienen un total de doce dársenas imaginarias basadas en la Dársena Norte de Raos. Estas dársenas de calado homogéneo y bocana idéntica ven variado su volumen al ir aumentando la longitud de cada una de ellas en aproximadamente cien metros sucesivamente, o lo que es lo mismo incrementando el número de celdas en 16, pasando de 40 celdas que tiene la primera dársena a las 216 celdas de la última (Fig. 6).

Las condiciones iniciales para el modelado del transporte del trazador conservativo son las mismas que las especificadas en el caso del estudio del efecto de la concentración inicial: marea reflejante, con una amplitud de 1,4 metros, un periodo de 12 horas y una fase de 270° , no se tienen en cuenta las corrientes generadas por los vientos ni las aportaciones fluviales, se utiliza una malla de 199×253 celdas de 51.03333 metros de lado y una concentración inicial de 1mg/l.

Tras el modelado numérico se obtiene la masa inicial, la masa residual transcurridos siete días y el porcentaje de masa residual con respecto a la masa inicial, para la Dársena Norte de Raos y cada una de las dársenas imaginarias

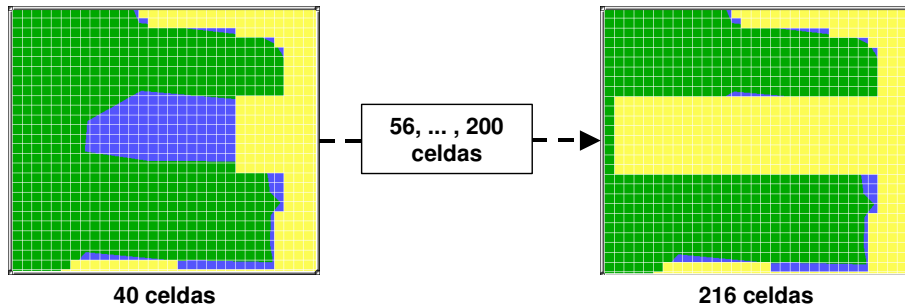


Figura 6. Celdas correspondientes a las doce dársenas imaginarias.

EFEECTO DEL RÉGIMEN DE VIENTO

La realización de este estudio, en el agua modificada de El Musel en el Puerto de Gijón, tiene como objeto establecer un procedimiento metodológico que tenga en cuenta la aleatoriedad inherente del fenómeno del viento. Para ello, se obtienen los campos vectoriales de corriente y los campos escalares de niveles de la superficie libre de la onda de marea, mediante el modelo bidimensional (H2D) en la zona de estudio.

Además, se calculan las corrientes generadas para las ocho direcciones de viento significativas (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) y para dos intensidades de viento representativas del Puerto de Gijón (5 y 10m/s). El régimen medio anual del viento se obtiene teniendo en cuenta las probabilidades de presentación de cada uno de los vientos (Fig. 7), a partir del método de Monte Carlo estableciendo sucesivamente situaciones de viento constante de 8 horas de duración.

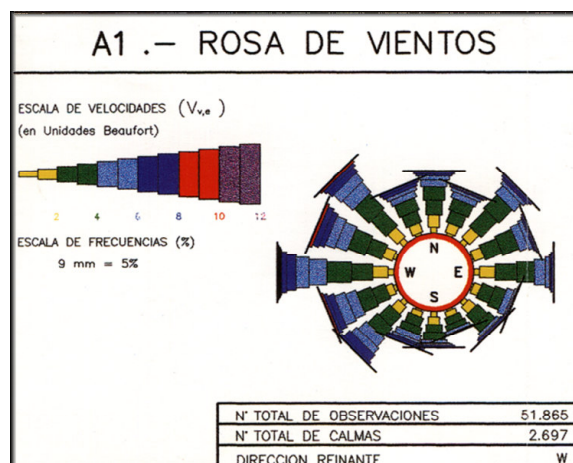


Figura 7. Rosa anual de los vientos de Gijón (Fuente: ROM. 04-95).

Para este estudio se consideran un total de seis sucesiones diferentes de viento (Tabla 1), considerando 21 situaciones de viento (21 x 8h = 168h = 7días). Por lo tanto, el cálculo del tiempo de renovación se lleva a cabo para cada uno de estos casos con el fin de comprobar el efecto del viento en el cálculo del tiempo de renovación.

CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
N10	W5	E10	SW10	NW5	N5
N5	-	NW10	NW5	NW5	S5
N10	-	SW10	-	E10	NW5
N5	SW5	NW10	W5	W5	E10
N5	W10	W10	W10	-	SW10
W10	-	SE10	SE5	NW5	SE5
W10	SW5	E10	-	S10	NE5
-	W5	NE5	SW5	NW5	-
-	E10	N10	S5	NW5	S5
NW5	E5	E10	E5	SW5	S10
-	NW5	W10	S5	NE10	W5
SE5	SW10	-	-	SE5	-
-	NW10	W10	E5	N5	S5
SW5	W10	W10	NW10	NW5	NW10
W5	-	NE10	W10	E5	SW10
W10	E10	SW10	S5	-	NE5
W10	-	E10	SW10	NW5	NE5
N10	N10	SE5	NW5	W10	W5
NE10	SW5	N10	E5	-	E10
-	SW5	-	E5	W5	E5
W5	NE10	N10	W10	-	NW5

Tabla 1. Sucesiones de vientos (- : Calma; 5: intensidad 5m/s; 10: intensidad 10m/s).

En este estudio no se consideran los datos de los aportes fluviales existentes en las proximidades del puerto de Gijón, Aboño y Piles, debido a que no se localizan en el

interior de la masa de agua modificada y su efecto se considera inapreciable para los resultados del tiempo de renovación.

Los datos batimétricos de la zona objeto de estudio se obtienen de las cartas náuticas números 940, 941 y 165A del Instituto Hidrográfico de la Marina. La batimetría utilizada se representa mediante una malla de 101x201 celdas de 92.65 metros de lado (Fig. 8), cubriendo todo el litoral próximo a puerto de Gijón.

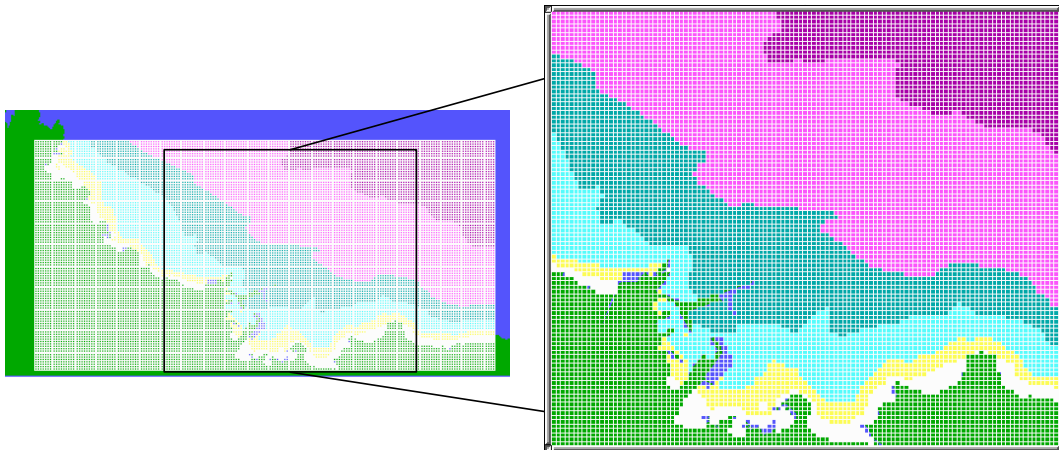


Figura 8. Malla de la zona de estudio.

La masa de agua modificada del Puerto del Musel tiene una dimensión aproximada de unas 158 hectáreas que en la malla se representan a través de 181 celdas (Fig. 9). A las celdas que ocupan una masa de agua modificada concreta se les introduce una concentración inicial homogénea del trazador conservativo, en este caso 1mg/l para poder estudiar su evolución en el transcurso de siete días para los diferentes casos de viento.

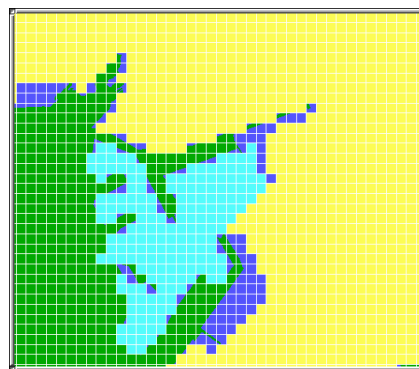


Figura 9. Celdas correspondientes a la Masa de agua del Musel.

El modelo numérico calcula, al igual que en los estudios anteriores, la masa inicial, la masa residual transcurridos siete días y el porcentaje de masa residual para cada una de las simulaciones.

RESULTADOS

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL

Los resultados obtenidos a partir del modelado del transporte del trazador en la Dársena de Maliaño del Puerto de Santander, recogidos en la Tabla 2, ponen en evidencia que el tiempo de renovación es independiente de la concentración inicial, ya que, el porcentaje de masa residual es idéntico en ambos supuestos, transcurrida una semana.

	Concentración inicial (mg/l)	Masa inicial (kg)	Masa residual (kg)	Porcentaje de masa residual (%)
Supuesto 1	1	119.80	4.20	3.51
	10	1198.02	42.05	3.51
	100	11980.24	420.53	3.51
	1000	119802.40	4205.30	3.51
Supuesto 2	1	2010.59	399.46	19.87
	10	20105.97	3994.66	19.87
	100	201059.80	39946.67	19.87
	1000	2010597.00	399466.70	19.87

Tabla 2. Resultados del modelado numérico en la Dársena de Maliaño.

De los resultados obtenidos, se observa que el modelado numérico del transporte del trazador conservativo proporciona a las celdas correspondientes al Supuesto 1 una renovación aceptable, ya que, en el periodo de una semana su concentración se reduce en más del 90% de la masa inicial (3.51%). Sin embargo, el área del Supuesto 2 tiene una renovación baja, ya que, el porcentaje de masa residual es mayor al 10% (19.87%).

Los puntos de control situados en el interior (P1) y el exterior (P2) de la Dársena de Maliaño dibujan la misma función para cada una de las concentraciones tenidas en cuenta al representar la evolución en el tiempo del cociente entre la concentración (C) y la concentración inicial (Ci). No obstante, tienen un comportamiento diferente

dependiendo de su localización, interior (P1) o exterior (P2), y de la zona objeto de estudio, Supuesto 1 ó Supuesto 2 (Fig. 10).

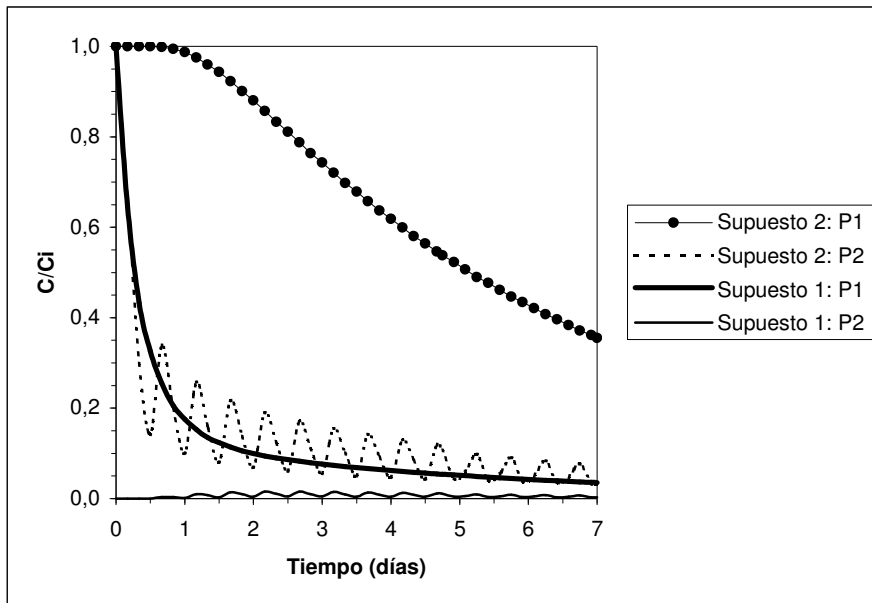


Figura 10. Variación de la concentración respecto a la concentración inicial en los puntos de control.

Con el fin de observar el efecto de las velocidades de las corrientes de marea, en la Fig. 11 se representa el transporte del trazador conservativo, para el Supuesto 1, en diferentes instantes durante los siete días en los que se lleva a cabo el modelado, para una concentración inicial de 100mg/l. Cabe destacar la continua oscilación de la zona coloreada, que representa la evolución de la concentración del trazador conservativo producida por la acción de la marea llenante y vaciante.

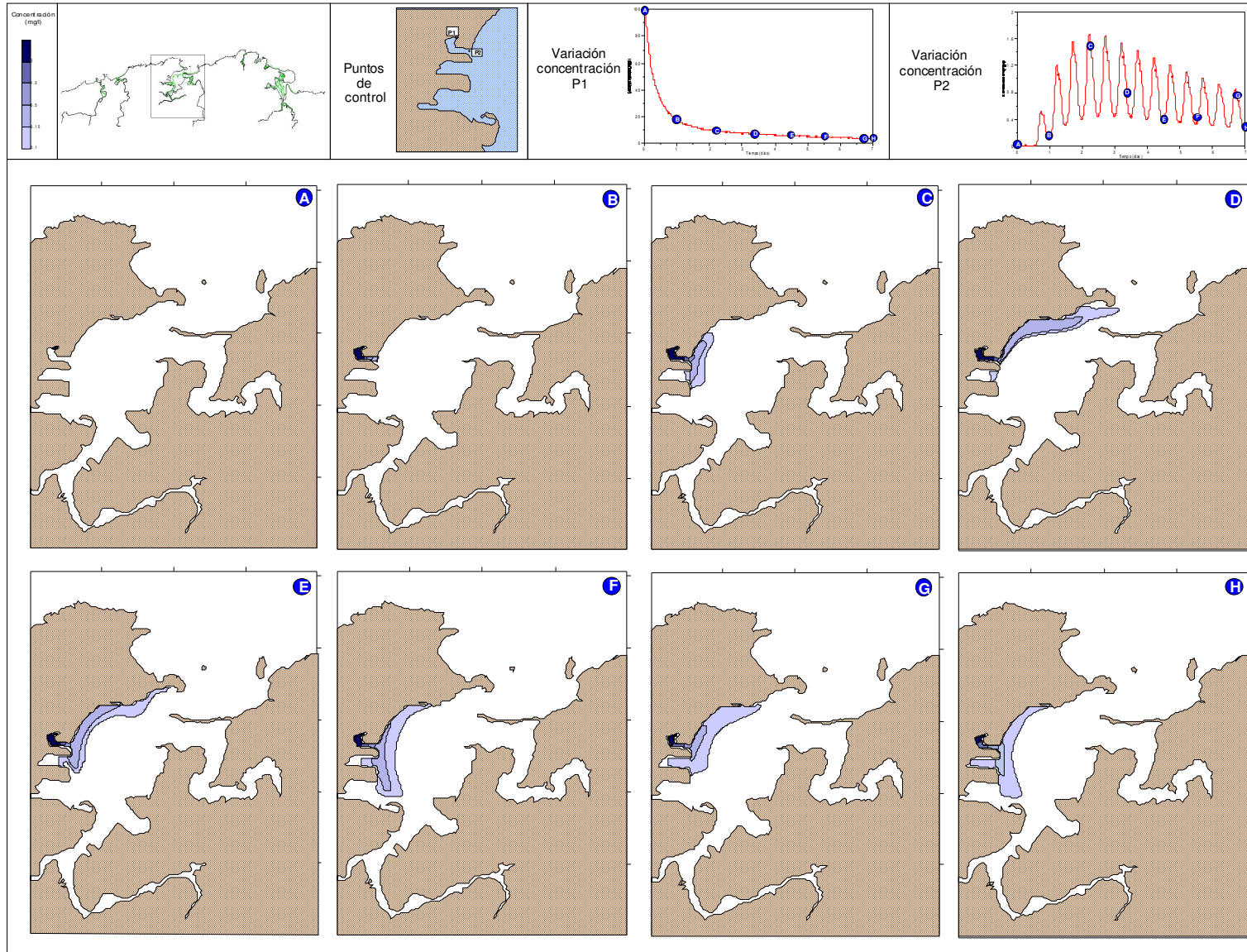


Figura 11. Evolución de la concentración del trazador en el Supuesto 1 para una concentración inicial de 100mg/l.

EFECTO DEL VOLUMEN INICIAL

Los resultados obtenidos en las doce dársenas imaginarias parecen confirmar la dependencia existente entre el tiempo de renovación y el volumen inicial. Al representar de forma gráfica el porcentaje de la masa residual al cabo de siete días frente al volumen inicial de cada una de las dársenas se observa como al incrementarse éste el porcentaje de masa residual aumenta de forma exponencial (Fig. 12).

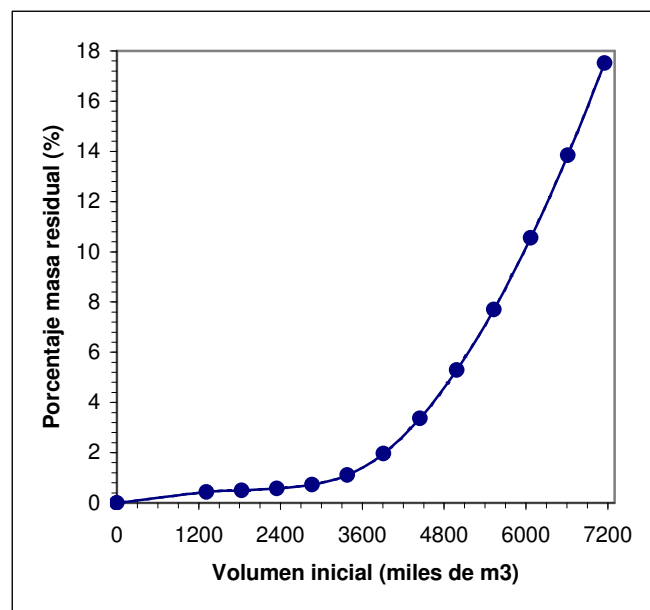


Figura 12. Evolución del porcentaje de masa residual con respecto a la masa inicial.

El comportamiento exponencial de la variación del porcentaje de masa residual se explica por el efecto de las corrientes hidrodinámicas, ya que, éstas afectan poco a las celdas interiores de las dársenas más largas, mientras que, aquellas dársenas cortas se ven fuertemente afectadas. Es decir, las corrientes hidrodinámicas influyen de forma más pronunciada a aquellas dársenas con longitud menor.

Con el fin de observar mejor este fenómeno, a partir de un modelo lagrangiano (AM_PART, 2002) se ha estudiado la evolución de partículas situadas en diferentes puntos dentro de la Dársena Norte de Raos durante el período de

una semana. Tal y como se representa en la Fig. 13, la partícula localizada en el interior ve modificada muy poco su posición inicial con respecto a su movimiento durante los siete días. Por el contrario, la partícula localizada en el punto exterior de la dársena se ve afectada por las velocidades generadas por las corrientes hidrodinámicas que provocan que la partícula salga fuera de la zona de estudio durante las primeras horas de simulación.

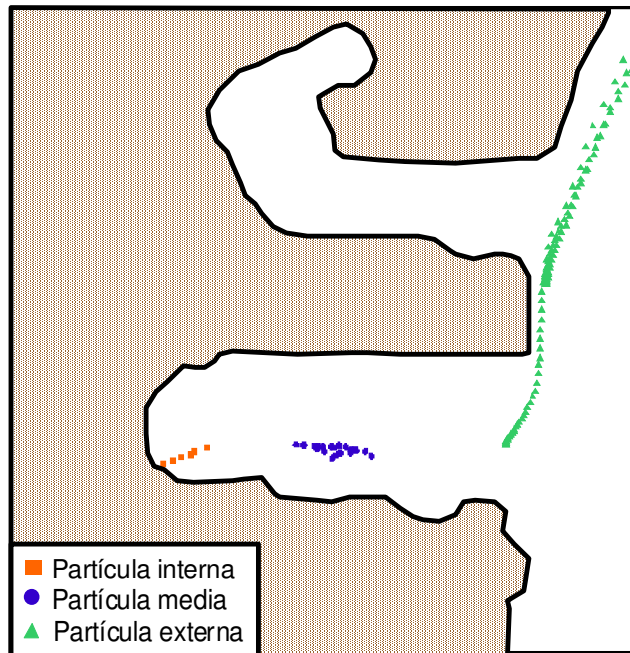


Figura 13. Evolución temporal de partículas en el interior de la Dársena de Norte de Raos.

Finalmente, mencionar que tras aplicar el procedimiento metodológico para la valoración de la tasa de renovación en la Dársena Norte de Raos, se obtiene que ésta presenta un porcentaje de masa residual al cabo de siete días de 15.4%, por tanto, esta masa de agua tiene renovación baja.

EFFECTO DEL RÉGIMEN DE VIENTO

Los resultados obtenidos a partir del modelado del trazador en la masa de agua modificada del Musel del Puerto de Gijón, recogidos en la Tabla 3, ponen en evidencia que el tiempo de renovación se ve afectado dependiendo de la

sucesión de situaciones de viento, ya que, el porcentaje de masa residual varía dependiendo del caso.

		Masa inicial (kg)	Masa residual (kg)	Porcentaje de masa residual (%)
Con marea y sin viento		23927.21	18541.70	77.5
Con marea y viento	Caso 1	23927.21	17644.55	73.7
	Caso 2	23927.21	17620.65	73.6
	Caso 3	23927.21	17272.24	72.2
	Caso 4	23927.21	17886.66	74.8
	Caso 5	23927.21	17614.52	73.6
	Caso 6	23927.21	17618.41	73.6

Tabla 3. Resultados del modelado numérico en la masa de agua de El Musel.

De todas formas, en primer lugar, cabe resaltar que la presencia o ausencia del viento en el medio provoca una disminución de aproximadamente tres puntos en el porcentaje de masa residual, debido a que el viento es también un agente dispersivo y como tal debe considerarse para el cálculo del tiempo de renovación.

En segundo lugar, con estos resultados se demuestra que dependiendo del caso de viento escogido el resultado final varía ligeramente, en este estudio entre 72.2% y 74.8%. Por ello, se considera necesario realizar un análisis estadístico de los diferentes resultados obtenidos para cada simulación con el fin de obtener un resultado representativo para el tiempo de renovación de una masa de agua modificada. En este caso, se obtiene que el porcentaje de masa residual del trazador conservativo es $73.6 \pm 0.9\%$ ($\alpha = 0.05$), calculado a partir de la distribución de la t-student. Por tanto, la masa de agua tiene una tasa de renovación baja, ya que, el porcentaje de masa residual al cabo de siete días es superior al 10%.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tras la realización del presente estudio se llega a tres conclusiones concretas: el tiempo de renovación es independiente de la concentración inicial del trazador, el tiempo de renovación depende del volumen y geometría de la masa

de agua y el tiempo de renovación depende del régimen de viento que se tenga en cuenta.

El tiempo de renovación es independiente de la concentración inicial, ya que, para una misma zona se obtiene el mismo porcentaje de masa residual para diferentes concentraciones iniciales. Además, la evolución de la masa residual en la zona de estudio se comporta de forma idéntica para cualquier concentración inicial, observándose una disminución de la masa residual que dibuja una fluctuación. Esto es debido a que el refluo de las mareas transportan al trazador fuera del volumen inicial, mientras que las mareas de inundación devuelven parte del trazador que había sido dispersado durante el refluo.

En un punto de control concreto el comportamiento de la evolución del cociente entre la concentración y la concentración inicial depende de la localización de dicho punto. Si el punto de control se sitúa en el interior de la masa de agua el cociente disminuye exponencialmente con el tiempo, sin embargo, si el punto se localiza en el exterior se observa una disminución oscilatoria parecida a la comentada anteriormente. Ello es debido a que las corrientes generadas por la marea afectan de manera más significativa en el exterior de la masa de agua que en su interior.

Por otro lado, **el tiempo de renovación de una masa de agua está íntimamente relacionado**, principalmente, con el efecto de las corrientes hidrodinámicas, y por ende, **con su volumen y geometría**. El transporte del trazador conservativo se ve considerablemente afectado por las corrientes hidrodinámicas, provocando que las zonas más exteriores, cercanas a la bocana, estén sometidas a corrientes hidrodinámicas importantes que transportan al trazador conservativo lejos del volumen inicial. Sin embargo, en las zonas más interiores la masa sale y vuelve a entrar por el efecto de la pleamar y la bajamar quedándose en el interior de la masa de agua.

Por lo tanto, el tiempo de renovación no sólo es dependiente del volumen inicial, sino también de la geometría de la masa de agua. Aquellas masas de agua con geometrías alargadas y estrechas tendrán un tiempo de renovación

más elevado que aquellas dársenas que, aún teniendo el mismo volumen, sean más anchas y abiertas al mar. Esto es debido a que las corrientes hidrodinámicas afectarán de una manera más pronunciada a la evolución del trazador conservativo en aquellas masas de agua con entradas más anchas.

Profundizando más, podría decirse, tal y como se apunta en un estudio sobre movimientos de agua y sedimentos en puertos (Yin y otros, 2000), que la presencia de turbulencias elevadas juega un papel importante en la desaparición del trazador conservativo en la dársena, siendo la mezcla mayor cuanto más ancha es la entrada de la dársena.

Finalmente, **el tiempo de renovación depende del régimen de viento escogido**. En primer lugar, cabe destacar que, las corrientes generadas por la onda media de marea influyen de una manera más significativa en el resultado final del tiempo de renovación que el régimen medio de viento, ya que, su efecto constante y homogéneo produce un efecto superior.

El viento es la única variable aleatoria tenida en cuenta en el cálculo del tiempo de renovación. Este hecho se ve reflejado en los resultados obtenidos para el cálculo del tiempo de renovación, ya que, al modificar la sucesión de episodios de vientos varía el resultado obtenido. Por este motivo, resulta necesario el cálculo del tiempo de renovación para diferentes casos de viento con el fin de obtener un resultado definitivo mediante un análisis estadístico.

Fruto de las conclusiones obtenidas de los diferentes estudios realizados en el presente artículo, se está en disposición de definir un **procedimiento metodológico robusto y sencillo** para la valoración de la tasa de renovación de las masas de agua modificadas de un puerto. A continuación se detallan los puntos básicos de esta metodología (Fig. 14):

1. Obtención de los ficheros de velocidad de la onda media de marea en la zona de estudio a partir de un modelo bidimensional.
2. Obtención de los ficheros de velocidad de las ocho direcciones de viento significativas (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) y dos intensidades

- representativas de la zona de estudio, mediante un modelo cuasitridimensional.
3. Obtención de diferentes sucesiones de situaciones de viento a partir del método de Monte Carlo teniendo en cuenta sus probabilidades de presentación.
 4. Obtención del porcentaje de la masa residual del trazador conservativo de la masa de agua, transcurridos siete días, para cada una de las diferentes sucesiones de viento, teniendo en cuenta la onda media de marea y las aportaciones fluviales medias, mediante un modelo de transporte bidimensional.
 5. Cálculo del porcentaje de masa residual de una masa de agua transcurridos siete días a partir del análisis estadístico de todos los resultados obtenidos.
 6. Comparación del resultado definitivo del porcentaje de la masa residual con el criterio de valoración de la tasa de renovación: < 10 % renovación aceptable, > 10 % renovación baja.

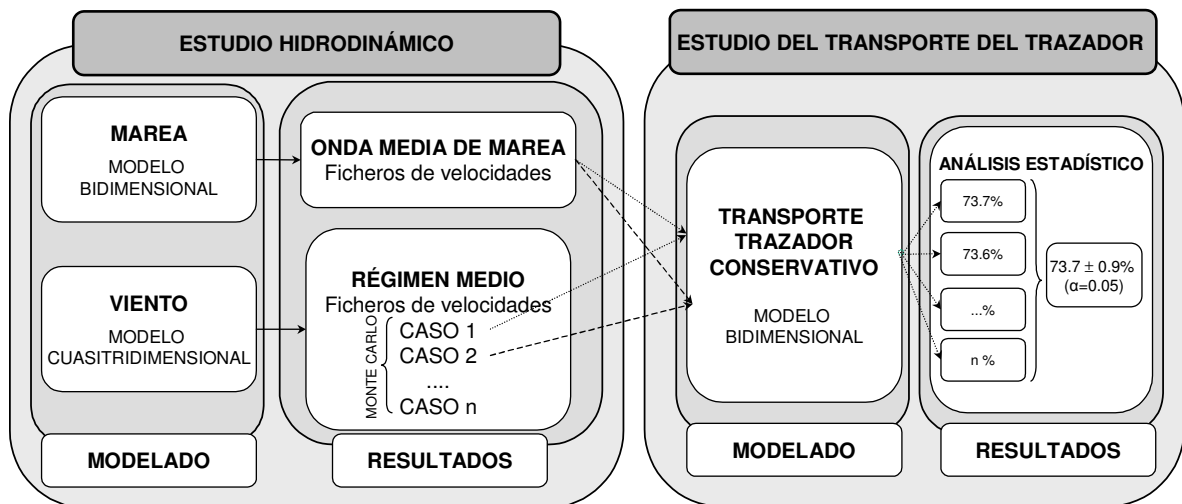


Figura 14. Organigrama del procedimiento metodológico para la valoración de la tasa de renovación en una masa de agua.

REFERENCIAS

AM_PART. (2002). “Simulación de la dispersión horizontal por método lagrangiano”. Santander. *Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental*.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

García, A. (2004). “Desarrollo de un modelo tridimensional para la determinación del transporte de sustancias en estuarios y zonas someras”. *Universidad de Cantabria*, Santander.

García, A. (2005). “Selección de variables para el modelado numérico de los procesos de calidad del agua en estuarios y zonas someras”. *Universidad de Cantabria*, Santander.

Gómez-Gesteira, M., de Castro, M., y Prego, R. (2003). “Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58, 567-573.

Llorca, J. (1995). “ROM 04-95. Acciones Climáticas II: Viento”. *Puertos del Estado*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Puente, A., Juanes, J. A., García-Castillo, G., Álvarez, C., Revilla, J. A., y Gil, J. L. (2002). “Baseline study of soft bottom benthic assemblages in the Bay of Santander (Gulf of Biscay)”. *Hydrobiologia*, 475/476, 141-149.

Puertos del Estado (2005). “ROM 5.1-05: Calidad de las aguas litorales en áreas portuarias”. *Ministerio de Fomento*. 136pp.

Rasmussen, B., y Josefson, A. B. (2002). “Consistent estimates for the residence time of micro-tidal estuaries”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 65-73.

RENOVA. (2006). “Simulación de la dispersión por método euleriano”. Santander. *Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental*.

Revilla, J. A., Koev, K. N., Roldán, A., Juanes, J. A., Álvarez, C., y Medina, R. (1995). “Metodología de Estudio de los Saneamientos Litorales”. Santander: *Confederación Hidrográfica del Norte*.

Wang, C.-F., Hsu, M.-H., y Y.Kuo, A. (2004). “Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 381-393.

Yin, J., Falconer, R. A., Chen, Y., y Probert, S. D. (2000). “Water and sediment movements in harbours”. *Applied Energy*, 67, 341-352.