

Convenio entre la Administración Nacional de Puertos (ANP) y la Facultad de Ingeniería – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) a través de la Fundación Julio Ricaldoni (FJR).

Estudio hidrodinámico e hidro-sedimentológico de la Bahía de Montevideo.

Agreement between the National Ports Administration (ANP) and the Faculty of Engineering – Fluid Mechanics and Environmental Engineering Institute (IMFIA) through the Julio Ricaldoni Foundation (FJR).

Hydrodynamic and hydro-sedimentological study of the Montevideo Bay

INFORME FINAL

1. Resumen Ejecutivo

1.1. Metodología

En este convenio se abordó el estudio de la hidrodinámica e hidro-sedimentología en la Bahía de Montevideo y recinto portuario. Metodológicamente el estudio incluye tres componentes. Por un lado el desarrollo de un modelo hidrodinámico y sedimentológico tridimensional avanzado para la costa de Montevideo que incluye además el efecto del oleaje (TELEMAC).

Por otro lado la aplicación del modelo básico bidimensional hidrodinámico RMA, disponible en el IMFIA, que resuelve el flujo en la Bahía de Montevideo y zona portuaria generado por las mareas (RMA2D) y que se utiliza para el cálculo de los tiempos de residencia del agua en la Bahía. La tercera componente refiere a las mediciones de corriente que se realizaron en la boca de la Bahía de Montevideo con un equipo acústico ADCP fondeado durante varios meses.

La implementación de ambos modelos numéricos considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata que muestra una variabilidad influenciada por la marea astronómica y los eventos de marea meteorológica u ondas de tormenta. Las primeras con régimen semidiurno con desigualdades diurnas, y las segundas y de frecuencia aproximadamente semanal y de varios días de duración.

1.2. Modelo numérico TELEMAC.

El modelo TELEMAC fue implementado especialmente para este estudio (Figura 1). El mismo trabaja en elementos finitos y se utilizaron tres de sus módulos:

El módulo de circulación tridimensional baroclínico TELEMAC 3D que permite simular la

FINAL REPORT

1. Executive Summary

1.1. Methodology

This project addresses the study of the hydrodynamics and hydro-sedimentology of the Montevideo Bay and port area. Methodologically, this study includes three components. Firstly, the development of an advanced three-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for the coast of Montevideo, which also includes the effect of waves (TELEMAC). Secondly, the application of the basic RMA two-dimensional hydrodynamic model, previously implemented in the IMFIA, which solves the flow at the Montevideo Bay and port area generated by tides (RMA2D) and which is used for the calculation of the water residence times within the Montevideo Bay. Thirdly, the measurement of currents at the mouth of the Montevideo Bay carried out with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) moored during several months.

The implementation of both numerical models takes into consideration the main features of the dynamics of the River Plate, which shows a great variability influenced by astronomical tides and the meteorological tide events (storm surge events). The former have a semidiurnal tidal regime with diurnal inequalities and the latter have approximately weekly frequency and last several days.

1.2. TELEMAC Numerical Model

The TELEMAC model was implemented for this study (Figure 1). It works on finite elements and three of its modules were used:

With the three-dimensional baroclinic circulation model implemented in TELEMAC 3D, it is possible to simulate the temporal evolution of the free

evolución temporal de la superficie libre, corrientes y la salinidad. Se consideraron los principales forzantes del sistema: aportes fluviales, ondas de marea astronómica y meteorológica, viento y presión atmosférica en la superficie libre.

surface, currents and salinity. The main forcings of the system were taken into account: river inputs, astronomical and meteorological tides, and wind and atmospheric pressure action on the sea surface.

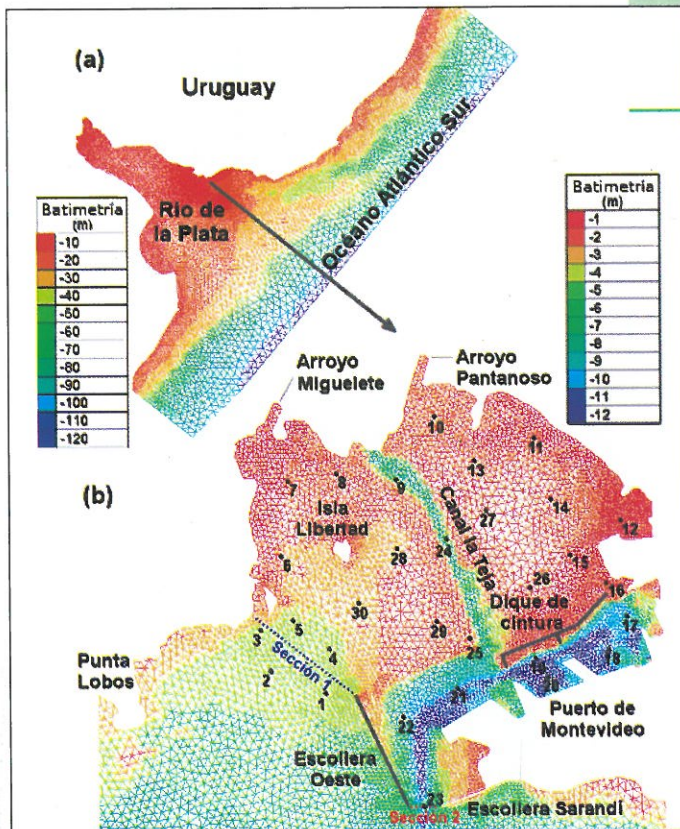


Figura 1: Malla de cálculo y batimetría en todo el dominio del Río de la Plata (a) y detalle en la Bahía de Montevideo (b).

Figure 1: Calculation mesh and bathymetry in the whole domain of the River Plate (a) and details of the Montevideo Bay (b).

Referencia Figura 1 Reference Figure 1

| ESPAÑOL | INGLÉS |
|----------------------|----------------------|
| Río de la Plata | River Plate |
| Batimetría | Bathymetry |
| Océano Atlántico Sur | South Atlantic Ocean |
| Arroyo Miguelete | Miguelete stream |
| Arroyo Pantanoso | Pantanoso stream |
| Isla Libertad | Libertad Island |
| Canal La Teja | La Teja channel |
| Dique de Cintura | Offshore breakwater |
| Puerto de Montevideo | Port of Montevideo |
| Escollera Oeste | West Breakwater |
| Escollera Sarandí | Sarandí Breakwater |
| Sección 1 | Section 1 |
| Sección 2 | Section 2 |
| Punta Lobos | Punta Lobos |

El módulo TOMAWAC, permite modelar la evolución en el espacio y en el tiempo del espectro de potencia del oleaje desde la escala oceánica hasta la escala costera. Los forzantes del modelo son el oleaje proveniente del océano y el viento en superficie.

With the TOMAWAC module, it is possible to model the evolution in time and space of the wave power spectrum ranging from oceanic up to coastal scale. The external forcings acting on this module are the waves coming into the modeling domain from the ocean and the surface wind.

El módulo SEDI3D (librería dentro de TELEMAC3D) simula el transporte de sedimentos finos (cohesivo) y la evolución del fondo (procesos de erosión y sedimentación). Los procesos de erosión y deposición consideran tanto el efecto de las 3 corrientes como del oleaje. El sedimento en suspensión actúa como un trazador activo que modifica la densidad del agua.

The SEDI3D module (library within TELEMAC3D) simulates the transport of fine sediments (cohesive) and the bottom evolution (erosion and sedimentation processes). The erosion and deposition processes take into account the effect of currents and waves. The suspended sediment acts as an active tracer that modifies water density.

Los módulos de circulación y oleaje se encuentran acoplados, por lo cual el oleaje considera las variaciones temporales en la circulación (niveles y corrientes), y a su vez ésta es afectada por la presencia del oleaje. Ambos fueron calibrados y validados en base a series de niveles, corrientes, salinidad y parámetros de oleaje (altura de ola significativa, período pico y dirección) en diversas estaciones del Río de la Plata y, con especial énfasis, en la Bahía de Montevideo. Asimismo el modelo de transporte de sedimentos fue calibrado en base a series temporales de concentración de sedimento en suspensión y turbiedad en diversas estaciones del Río de la Plata.

The circulation and wave modules are coupled, therefore, the wave module takes into account time variations in circulation (levels and currents), which in turn is affected by waves. Both were calibrated and validated based on levels, currents and salinity series as well as wave parameters (significant wave height, peak period and direction) in several stations of the River Plate and with special emphasis on the Montevideo Bay. Furthermore, the sediment transport model was calibrated based on turbidity and suspended sediment concentration time series in the different stations of the River Plate.

El mayor interés por incluir el oleaje en la simulación es su relevancia como forzante para la dinámica de sedimentos finos. Los resultados muestran que la combinación de los tres módulos es capaz de reproducir adecuadamente las características principales de la dinámica de sedimentos finos en el estuario, y en particular en la zona costera de Montevideo, caracterizada por picos de concentración de sedimento generados por resuspensión de material del fondo durante tormentas.

1.3. Caracterización hidro-sedimentológica de la Bahía de Montevideo.

Para caracterizar la hidro-sedimentología de la Bahía se simuló un período de tiempo extenso de un año de manera de incluir tanto eventos de calma dominados por marea astronómica y sin oleaje, como períodos de tormentas de marea meteorológica y fuerte oleaje. Por disponibilidad de condiciones de borde se selecciona el período de tiempo octubre 2014 a setiembre 2015. A partir de estos resultados en primer lugar se realiza una caracterización de las corrientes, sedimentos en suspensión y de las tensiones de corte de fondo generadas por oleaje y corrientes.

En términos globales se observa una variación en las intensidades de corriente a lo largo de la zona de la Bahía de Montevideo y recinto portuario: en la boca del Canal de Acceso la intensidad media es de 18 cm/s mientras que en la boca oeste es menor a 10 cm/s y disminuye al ingresar en la Bahía a 6-7 cm/s antes del canal La Teja y en el fondo de la Bahía valores de 3-4 cm/s; en el recinto portuario la intensidad media disminuye a valores de 1-2 cm/s. El campo de corrientes promedio en vertical residuales indica que las zonas de mayor circulación en la Bahía y recinto portuario son las cercanas a las bocas de intercambio con el Río de la Plata. En la zona central de la Bahía se observa también cierto grado de circulación generado por el Canal La Teja y en el fondo por el pasaje detrás del dique de cintura.

La dinámica de sedimentos finos en la zona está dominada por los procesos de erosión de fondo generados por las corrientes de marea y el oleaje. Los valores medios de tensiones inducidas por el oleaje son de un orden de magnitud superior a los inducidos por las corrientes y por tanto dominan en las tensiones totales.

Las distribuciones espaciales del sedimento en suspensión muestran que en la zona costera de Montevideo existe un valor base de concentración del orden de 10 mg/l mientras que los valores de concentración máxima integrada en vertical son cercanos a 300 mg/l. En la Bahía de Montevideo se obtienen valores de concentración máximos en las bocas de la bahía y decrecientes hacia el interior de la misma. Los valores mínimos durante el período simulado son menores a 5 mg/l en la zona exterior de la bahía y menores a 2 mg/l en la zona interior. Los valores máximos muestran una distribución espacial más uniforme, que la

Waves were included in the simulation mainly due to their relevance as forcings for fine sediment dynamics. The results show that the combination of the three modules is capable of properly reproducing the main characteristics of the fine sediment dynamics in the estuary and, particularly, in the coastal area of Montevideo, characterized by sediment concentration peaks generated by resuspension during storms.

1.3. Hydro-sedimentological characterization of the Montevideo Bay

For the hydro-sedimentological characterization of the bay, a whole year is simulated in order to include both calm conditions dominated by the astronomical tide without important wave action and storm events with significant meteorological tide and heavy swell. Due to the availability of boundary conditions, the time period from October 2014 to September 2015 is chosen. Based on the results, the currents, suspended sediments, wave-induced and current-induced bottom shear stress are characterized.

Overall, a variation in the current intensity throughout the Montevideo Bay and port area is observed. At the mouth of the access channel, the mean intensity is 18 cm/s, while in the west mouth it is lower at 10 cm/s and it decreases when entering the bay to 6-7 cm/s before the La Teja channel, and at the inner area of the bay values are 3-4 cm/s; in the port area, the mean intensity decreases to values of 1-2 cm/s. The vertical averaged residual current field shows that the zones with the greatest circulation of the bay and port area are the ones near the mouths where water exchange with the River Plate takes place. In the central area of the bay, there is also a certain degree of circulation generated by the La Teja channel and at the bottom behind the offshore breakwater.

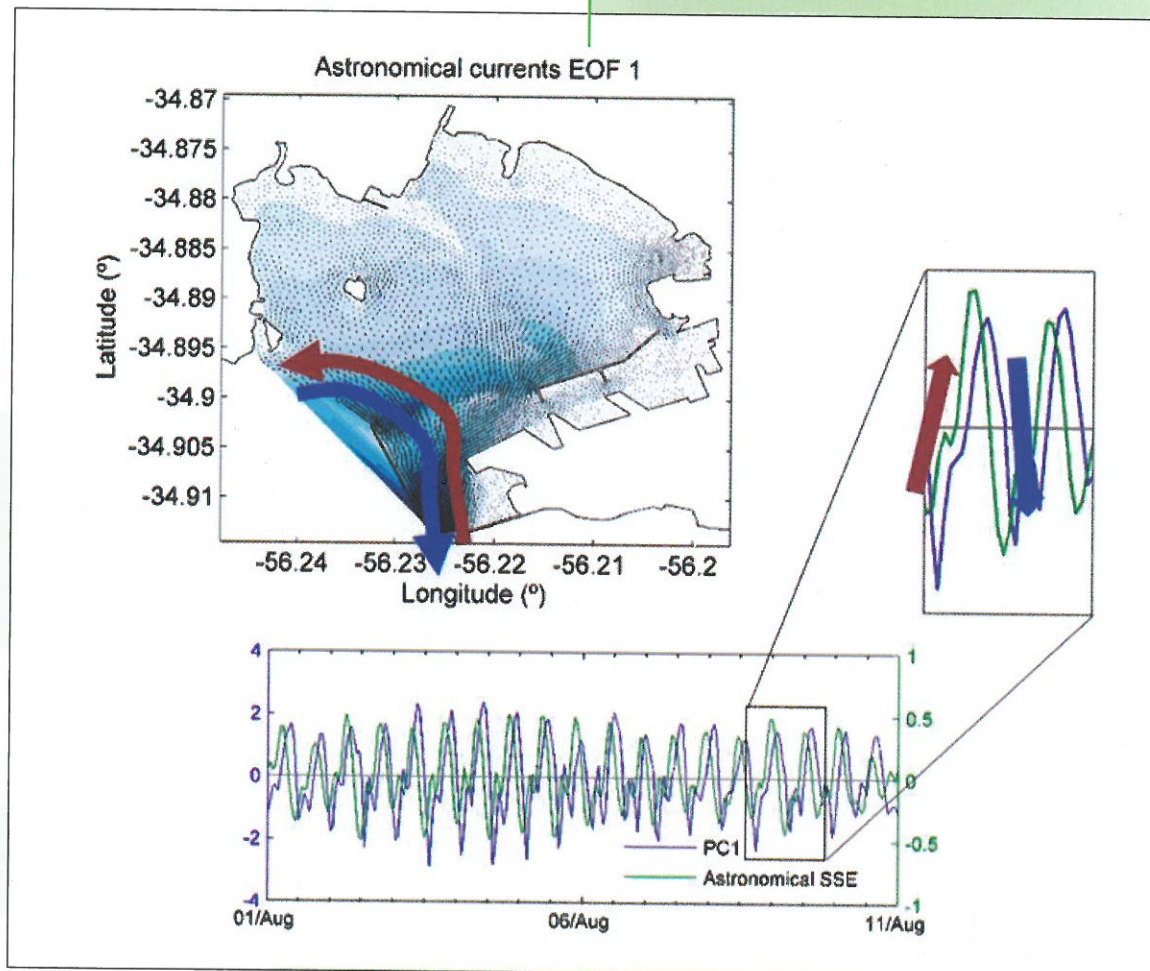
The fine sediment dynamics in the area is dominated by the bottom erosion processes generated by the tidal currents and waves. The mean values of wave-induced stress have a higher order of magnitude than the current-induced ones, and, therefore, prevail in the total stress.

The spatial distributions of suspended sediment show that in the coastal area of Montevideo there is a base concentration value of around 10 mg/l, while the vertical integrated maximum concentration values are around 300 mg/l. In the Montevideo Bay, the maximum concentration values are registered in the mouths of the bay, which decrease towards the inner area. The minimum values during the simulated period are below 5 mg/l in the outer area of the bay and below 2 mg/l in the inner area. In terms of spatial distribution, the maximum values, which are

observada para los valores medios y mínimos, siendo del orden de 250 mg/l.

Se identificaron patrones principales de flujo para las corrientes astronómicas y para las no-astronómicas (Figuras 2 a 4). La componente astronómica tiene un patrón principal que explica el 63% de la varianza y que muestra un ingreso de agua por la boca del Canal de Acceso y salida por la boca oeste en la fase ascendente de la marea y en fase descendente de la marea el agua tiende a ingresar por la boca oeste y salir por la boca del Canal de Acceso (Figura 2). Cerca de la pleamar y bajamar las corrientes son muy pequeñas asociadas a la rotación del flujo.

Figura 2: Primer EOF del campo de corrientes astronómicas. Se muestra abajo el PC1 durante los primeros diez días de agosto 2015, junto con los niveles astronómicos. Se esquematiza el patrón de circulación y su sentido en relación con la evolución del nivel.



around 250 mg/l, are more evenly distributed than the minimum and mean values.

Main flow patterns were identified for the astronomical and non-astronomical currents (Figures 2 to 4). The astronomical component has a main pattern that accounts for 63% of the variance and shows that water enters through the mouth of the access channel and goes out through the west mouth in the flood tide phase and that water tends to enter from the west mouth and go out through the mouth of the access channel in the ebb tide phase (Figure 2). Near high tide and low tide, currents are very small associated with flow rotation.

Figure 2: First EOF of the astronomical current field. The PC1 during the first ten days of August 2015 is shown below together with the astronomical levels. A diagram of the circulation pattern and direction related to the level evolution is detailed.

Para las corrientes no-astronómicas se obtienen dos patrones principales. El primero explica el 61% de la varianza original y muestra un flujo de agua que ingresa a la Bahía por la boca del Canal de Acceso, circula a través del ante-puerto y canal La Teja y sale de la Bahía por la boca oeste. Este patrón se correlaciona con condiciones de viento NE mientras que vientos del SW están asociados a un flujo de agua que tiende a ingresar por la boca oeste y salir por la del Canal de Acceso (Figura 3).

For the non-astronomical currents, two main patterns were obtained. The first one accounts for 61% of the original variance and shows a water flow that enters the bay through the mouth of the access channel, circulates through the outer harbor and La Teja channel and goes out through the west mouth. This pattern is correlated to the NE wind conditions, while SW winds are associated with a water flow that tends to enter through the west mouth and go out through the

El segundo patrón principal no-astronómico explica el 24% de la varianza original y esencialmente describe cómo es la circulación en la zona interior noreste de la Bahía. Este patrón muestra que agua tiende a girar en sentido horario en la zona interior noreste de la Bahía para condiciones de viento SE mientras que para condiciones de viento del NW este giro se da en sentido anti-horario (Figura 4).

mouth of the access channel (Figure 3). The second non-astronomical main pattern accounts for 24% of the original variance and basically describes the circulation in the northeastern inner area of the bay. This pattern shows that water tends to develop a clockwise circulation in the northeastern inner area of the bay for SE wind conditions, while for NW wind conditions this circulation is counterclockwise (Figure 4).

Figura 3: Nube de puntos de la velocidad del viento cada 6 horas en el período Octubre 2014 – Setiembre 2015 (Reanalysis ERAInterim) en un punto representativo de la Bahía de Montevideo (Izq.). Los colores indican el valor de PC1 de las corrientes no-astronómicas en la Bahía para cada instante. A la derecha se muestran los patrones de circulación asociados a valores positivos (rojo) y negativos (azul) del PC.

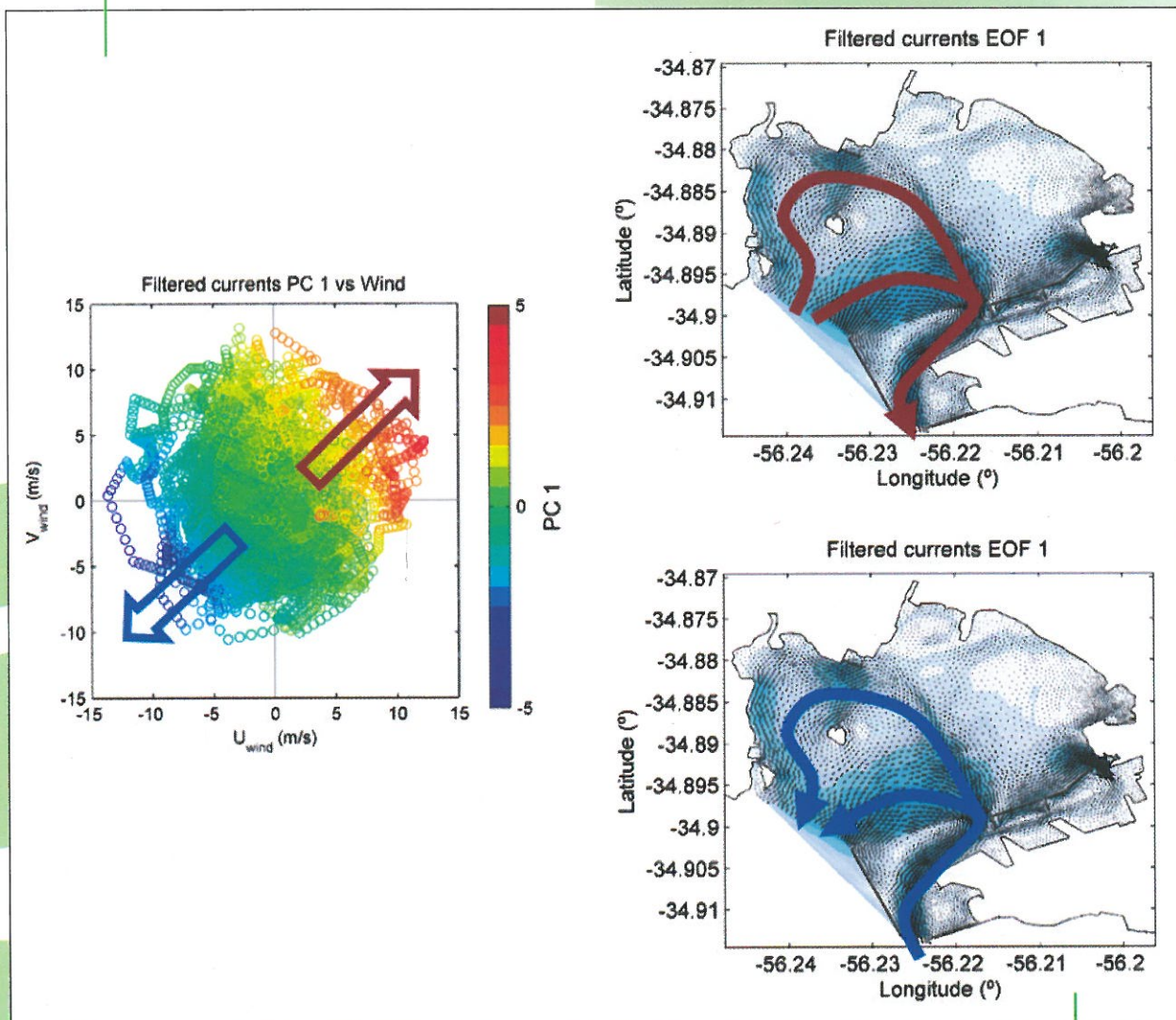


Figure 3: Scatter plot of wind velocity every 6 hours in the October 2014 - September 2015 period (ERA-Interim reanalysis) in a representative point of the Montevideo Bay (Left). Colors indicate the PC1 values of non-astronomical currents of the bay for each instant. The circulation patterns associated with positive values (red) and negative values (blue) of the PC are shown on the right.

Se analizaron los flujos de agua y sedimento a través de las bocas de la Bahía. Se observaron tanto flujos entrantes como salientes a la Bahía, no obstante, se observan eventos de marea meteorológica importantes, que duran varios días, donde el flujo entra permanentemente por una boca (y sale por la otra) y viceversa. Estas ocasiones coinciden generalmente con los mayores valores de flujo, y por lo tanto, son las que generan las corrientes máximas en la Bahía. Asimismo el flujo de sedimento se incrementa sustancialmente

The water and sediment flows through the mouths of the bay were analyzed. Both the inflows and outflows were observed in the bay. However, important meteorological tide events that lasted several days where the flow constantly enters through one mouth (and goes out through the other mouth), and vice versa, were observed. These events generally coincide with the highest flow values and, therefore, generate the maximum currents in the bay. Furthermore, the sediment flow

durante las tormentas debido a la mayor cantidad de sedimento en suspensión.

substantially increases during storms due to the greater amount of suspended sediment.

Figura 4: Nube de puntos de la velocidad del viento cada 6 horas en el período Octubre 2014 – Setiembre 2015 (Reanalysis ERAInterim) en un punto representativo de la Bahía de Montevideo (Izq.). Los colores indican el valor de PC2 de las corrientes no-astronómicas en la Bahía para cada instante. A la derecha se muestran los patrones de circulación asociados a valores positivos (rojo) y negativos (azul) del PC.

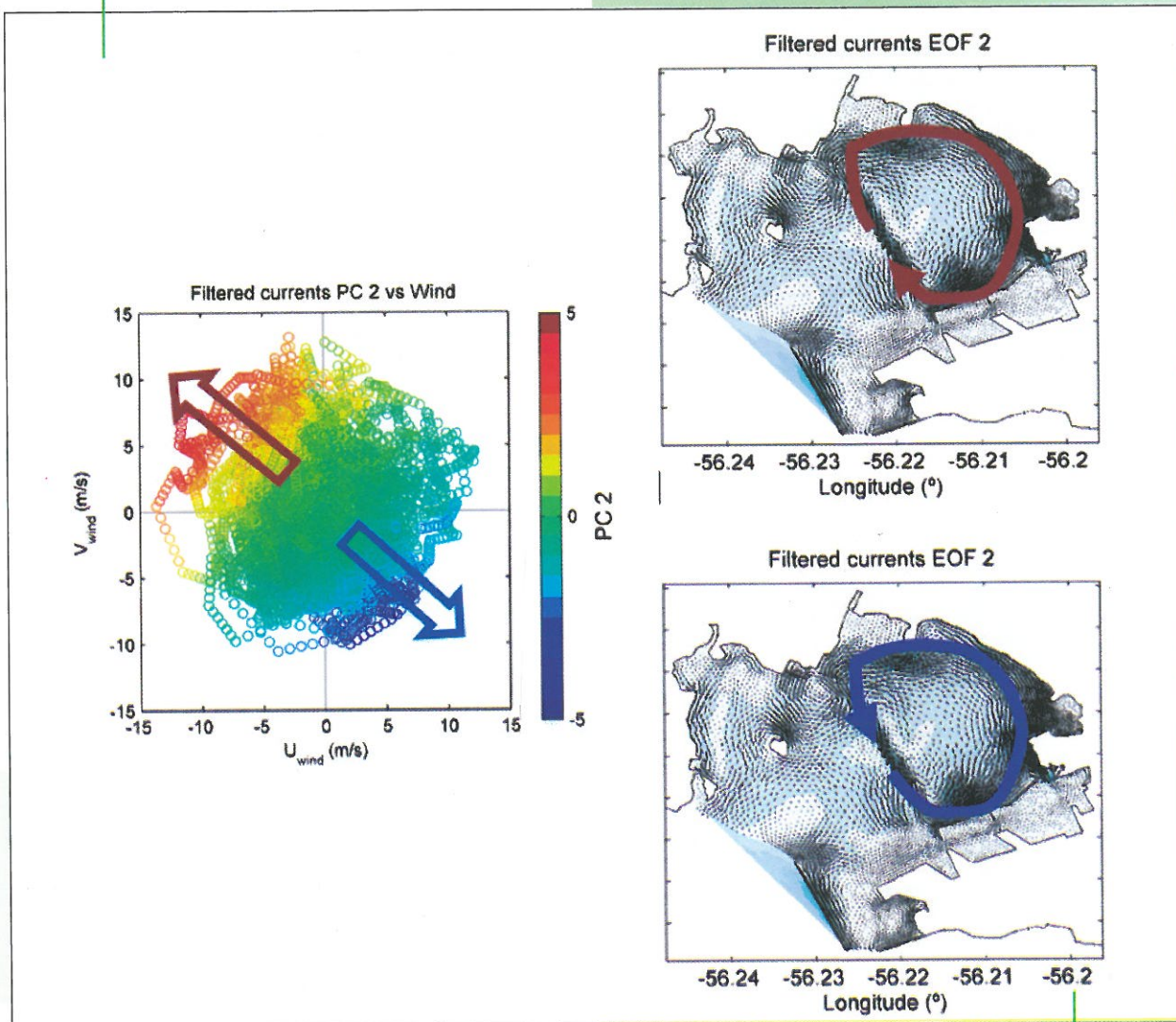


Figure 4: Scatter plot of wind velocity every 6 hours in the October 2014 - September 2015 period (ERA-Interim reanalysis) in a representative point of the Montevideo Bay (Left). Colors indicate the PC2 values of non-astronomical currents of the bay for each instant. The circulation patterns associated with positive values (red) and negative values (blue) of the PC are shown on the right.

Como se resume en la Tabla 1, cuantitativamente los resultados muestran que durante 40% del tiempo del período simulado hubo flujo hacia la Bahía a través de la boca oeste y hacia afuera por la boca del Canal de Acceso (denominando Tipo 1), la condición opuesta de flujo hacia la Bahía por la boca del Canal de Acceso y hacia afuera por la boca oeste se dio durante un 26% del tiempo (Tipo 2), durante un 18% del tiempo el agua entró a la Bahía por ambas bocas (Tipo 3) y un 16% salió por ambas bocas (Tipo 4).

En relación al flujo de sedimento un 88% del tiempo se tiene un aporte de sedimento hacia dentro de la Bahía y tan solo un 12% hacia fuera. El aporte total

As summarized in Table 1, quantitatively the results show that 40% of the time during the simulated period the flow entered the bay through the west mouth and went out through the mouth of the access channel (called Type 1). The opposite condition of flow entering the bay through the mouth of the access channel and going out through the west mouth occurred 26% of the time (Type 2). During 18% of the time, the water entered the bay through both mouths (Type 3) and 16% of the time it went out through both mouths (Type 4).

Regarding the sediment flux, 88% of the time there is an incoming sediment input at the bay and only 12% of the time it goes outwards. The total input

(suma de ambas bocas en todas las condiciones de flujo) es de 341 ton hacia dentro de la Bahía. A su vez el neto por la boca oeste indica un ingreso de 358 ton mientras que por la boca del Canal de Acceso el neto indica una salida de 17 ton.

Flujos de agua (% de tiempo)

| Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 | Tipo 4 |
|--------|--------|--------|--------|
| 40 | 26 | 18 | 16 |

Tipo 1 Entra por boca oeste sale por boca de Canal de Acceso.
 Tipo 2 Sale por boca oeste entra por boca del Canal de Acceso.
 Tipo 3 Entra por ambas bocas.
 Tipo 4 Sale por ambas bocas.

Tabla 1: Porcentajes de tiempo durante el período simulado en que se dan las cuatro combinaciones posibles de flujo de agua entre ambas bocas de la Bahía.

Los resultados del modelo muestran cómo varía el material depositado en el fondo durante el período de un año simulado (Figura 5).

(sum of both mouths in all flux conditions) is 341 tonnes inwards the bay. At the same time, the net sediment flux shows 358 tonnes entered through the west mouth, while 17 tonnes went out through the mouth of the access channel.

Water flows (% of time)

| Type 1 | Type 2 | Type 3 | Type 4 |
|--------|--------|--------|--------|
| 40 | 26 | 18 | 16 |

Type 1 Enters through west mouth, goes out through mouth of access channel
 Type 2 Goes out through west mouth, enters through mouth of access channel
 Type 3 Enters through both mouths
 Type 4 Goes out through both mouths

Table 1: Percentages of time during the simulated period in which the four possible water flow combinations between both mouths of the bay occur.

The results of the model show how the material deposited on the bottom changes during the simulated period of one year (Figure 5).

Figura 5: Evolución del fondo (m) simulada en la zona costera de Montevideo (panel superior) y en la Bahía de Montevideo (panel inferior) durante el período Setiembre 2014 – Octubre 2015.

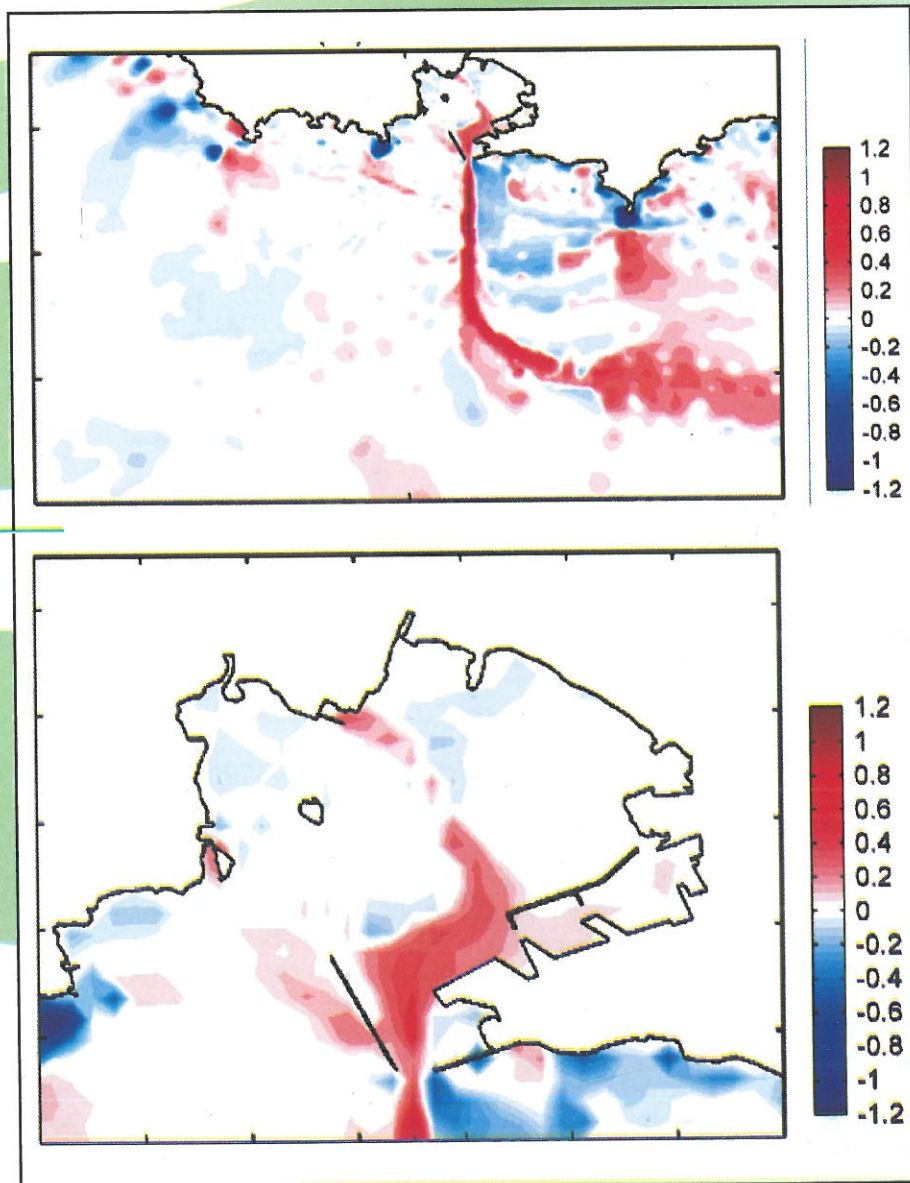


Figure 5: Simulated bottom evolution (m) in the coastal area of Montevideo (upper panel) and in the Montevideo Bay (lower panel) during the September 2014-October 2015 period.

En la zona costera el principal cambio es la sedimentación del canal de acceso; en el tramo N-S del canal se tiene una deposición simulada superior a 1.2 m al cabo de un año. Dentro de la Bahía el principal cambio batimétrico es la deposición en el antepuerto y el canal La Teja. En dichas áreas, el modelo muestra una deposición del orden de 0.4 m al cabo de un año (Figura 6).

In the coastal area, the main change is the sedimentation of the access channel. In the N-S section of the channel, the simulated deposition exceeds 1.2 m in one year. Within the bay, the main bathymetric change is the deposition in the outer harbor and the La Teja channel. In said areas, the model shows a deposition of around 0.4 m in one year (Figure 6).

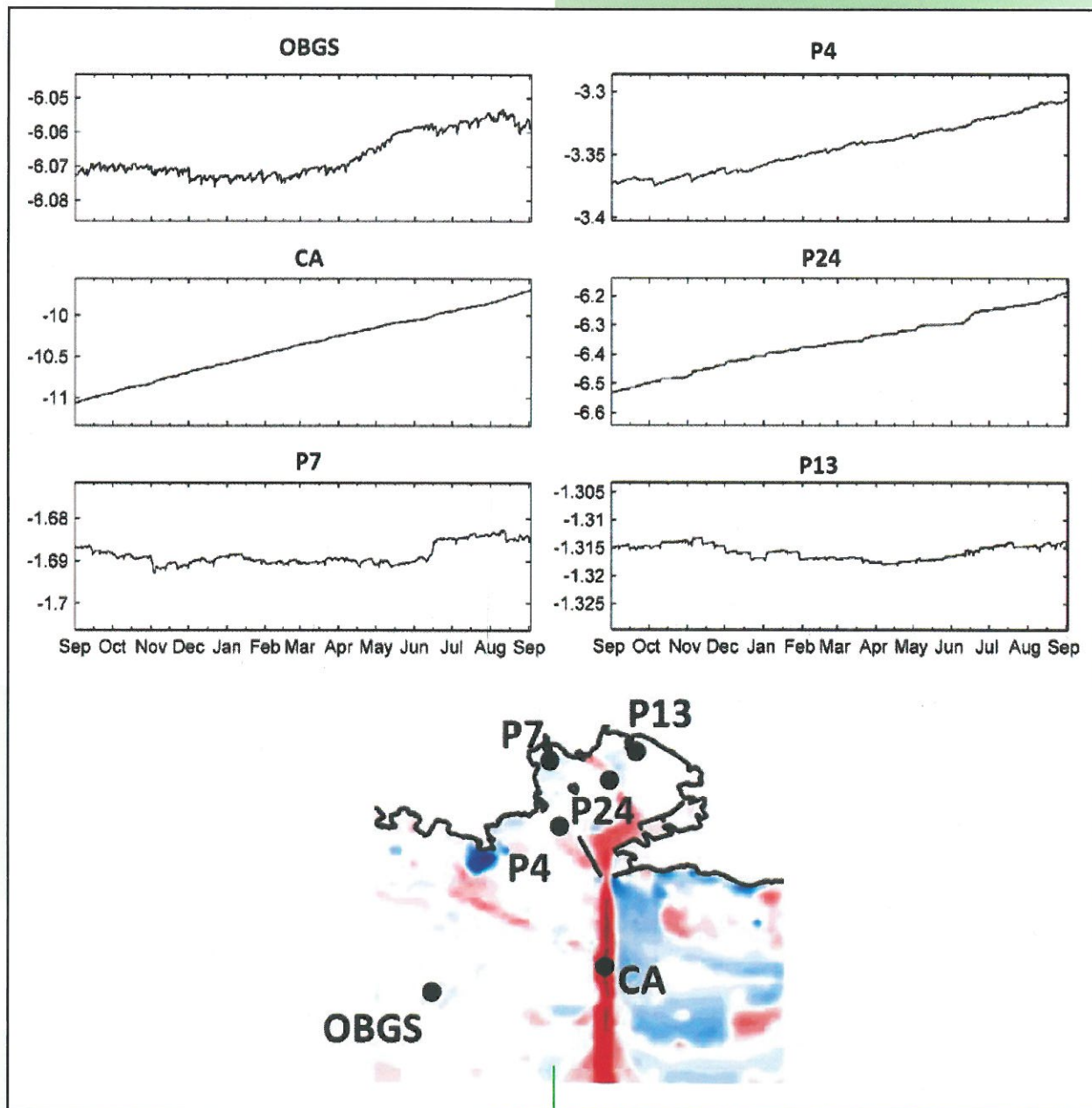


Figura 6: Series temporales de evolución de la cota del fondo (m) simulada en el período Setiembre 2014 - Octubre 2015 en varias estaciones de la Bahía de Montevideo y el área costera adyacente.

Figure 6: Time series of the simulated bottom elevation (m) evolution for the September 2014 - October 2015 period in several stations of the Montevideo Bay and the adjacent coastal area.

Un análisis de la evolución temporal de la cota del fondo muestra en general procesos de erosión y deposición en la zona exterior de la Bahía. En la zona intermedia y al fondo de la Bahía únicamente hay deposición, teniendo lugar las mayores tasas durante los eventos de tormenta por la mayor cantidad de sedimento en suspensión disponible para sedimentar.

An analysis of the bottom elevation temporal evolution shows in general erosion and deposition processes in the outer area of the bay. In the intermediate zone and at the bottom of the bay, there is only deposition and the highest rates occur during storm events due to the greater amount of suspended sediment available for sedimentation.

1.4. Análisis escenarios futuros

Se realizó un análisis de la influencia de diversas obras portuarias sobre la hidrodinámica y dinámica de sedimentos finos en la Bahía. Se consideraron tres escenarios: escenario base; escenario Gas Sayago y escenario Puerto Punta Sayago, y se simuló para los tres el período Enero-Octubre de 2015.

Los mayores cambios en los campos de corrientes y oleaje se observan alrededor de las obras, entre Punta Yeguas y Punta Rodeo. En ambos escenarios (Gas Sayago y Puerto Punta Sayago) se observa un incremento de la intensidad de las corrientes en la zona ubicada entre las obras y la costa. Respecto a las tensiones de fondo medias inducidas por el oleaje en el período simulado, en este caso las diferencias entre escenarios son aún más localizadas y se dan fundamentalmente alrededor de la obra (zona protegida) y en el canal de acceso a las nuevas obras.

En los flujos de agua por las bocas de la Bahía la mayor diferencia observada se da para el Escenario Puerto Punta Sayago con una disminución en el porcentaje del tiempo en que se da la condición de flujo entrante por la boca oeste y saliente por la boca del canal de acceso, acompañado por el incremento en el porcentaje del tiempo en que se da la condición de flujo saliente por ambas bocas.

En relación al campo medio de concentración en suspensión dentro de la Bahía prácticamente no se ve modificado en el escenario Gas Sayago. En el Escenario Puerto Punta Sayago se observa una leve disminución de las concentraciones medias en las bocas y dentro de la Bahía. En el escenario base el 90% del tiempo existe flujo de sedimento hacia la Bahía; dicho porcentaje disminuye a 89% en el escenario Gas Sayago y a 85% en el escenario Puerto Punta Sayago.

1.5. Tiempos de residencia del agua en la Bahía de Montevideo

Se determinaron en este trabajo los tiempos de residencia del agua en la Bahía, variable de gran interés ambiental, en la medida que una lenta renovación favorece su degradación acarreado problemas de anoxicidad, eutrofización, etc. En este trabajo esto se evaluó considerando el transporte de una sustancia ubicada en la parcela de 11 agua a evaluar, obteniendo lo que se denomina el tiempo de lavado ('flushing time'), que se define como el tiempo requerido para que la concentración de dicha sustancia disminuya en cierta proporción respecto de su concentración inicial.

El análisis de tiempos de residencia se realizó utilizando el modelo de transporte de sustancias RMA-11 que utiliza los resultados del modelo hidrodinámico bidimensional RMA2D, actualizado para este estudio. En las simulaciones se considera una sustancia pasiva en el instante inicial en toda la Bahía de Montevideo y se analiza posteriormente su evolución temporal. En primer lugar se calculan los tiempos de residencia para la Bahía de Montevideo y recinto portuario en el escenario actual.

1.4. Analysis of future scenarios

An analysis of the impact of two maritime infrastructure projects on the hydrodynamics and fine sediment dynamics in the bay was carried out. Three scenarios were considered: base scenario, Gas Sayago scenario and Punta Sayago Port scenario. The January-October 2015 period was simulated for the three scenarios.

The biggest changes in the wave and current fields were observed around the works, between Punta Yeguas and Punta Rodeo. In both scenarios (Gas Sayago and Punta Sayago Port), an increased current intensity was observed in the area located between the works and the coast. Regarding the wave-induced mean bottom stresses for the simulated period, in this case the differences between said scenarios are even more localized and occur mainly around the breakwaters (sheltered area) and the access channel to the new works.

Regarding the water flows through the mouths of the bay, the greatest difference was observed for the Punta Sayago Port scenario, with a decreased percentage of time in which the condition of flow entering through the west mouth and going out through the access channel occurred and an increased percentage of time in which the condition of flow going out through both mouths occurred.

In terms of the mean field of suspended concentration within the bay, there is virtually no change in the Gas Sayago scenario. In the Punta Sayago Port scenario, a slight reduction of the mean concentrations was observed at the mouths and within the bay. In the base scenario, 90% of the time there was sediment flux towards the bay. Said percentage decreases to 89% in the Gas Sayago scenario and to 85% in the Punta Sayago Port scenario.

1.5. Water residence times at the Montevideo Bay

In this work, the water residence times at the bay were determined. This is a very relevant variable for the environment due to the fact that a slow renovation favors its degradation, resulting in anoxic water and eutrophication issues, among others. These conditions were assessed in this work considering the transport of a substance located in the water parcel to be assessed, obtaining the flushing time, which is defined as the time required for the concentration of said substance to be reduced to a certain proportion from its initial concentration.

The analysis of the residence times was carried out using the substance transport model RMA-11, which uses the results of the two-dimensional hydrodynamic model RMA2D, updated for this study. In the simulations, a passive substance is considered at the initial moment throughout the Montevideo Bay and then its temporal evolution is assessed. First, the residence times are estimated

Posteriormente se repite la metodología considerando en el modelo las obras portuarias de Punta Sayago: la terminal de GNL de Gas Sayago S.A. y el proyecto de Puerto Sayago de ANP.

A pesar de que la metodología es sencilla, los resultados dependen absolutamente del período de tiempo considerado para hacer el análisis. Como se describió anteriormente: el intercambio de agua de la Bahía con el Río de la Plata es muy variable temporalmente, y por tanto, es lógico pensar que los tiempos de residencia serán distintos si consideramos eventos de marea meteorológica o una situación de marea astronómica. Los tiempos de residencia mayores en toda la zona están asociados a los períodos de calma y predominio de marea astronómica. Se analizaron dos situaciones de condición de marea meteorológica las cuales mostraron tiempos de lavado menores, en toda la zona, en relación a la condición de marea astronómica. Comparando dos situaciones de marea meteorológica se observa que la condición de marea meteorológica de flujo, ingresando por la boca oeste, genera menores tiempos de residencia en toda la Bahía y recinto portuario respecto a la condición de marea meteorológica en la cual el flujo ingresa a la Bahía por el Canal de Acceso.

Los tiempos de residencia más bajos son del orden de algunas horas y se obtienen en la zona alrededor de la boca oeste de la Bahía. Hacia el arroyo Pantanoso se incrementa a algunas decenas de horas y hacia el arroyo Miguelete del orden de 30-40 horas. En la zona baja del fondo de la Bahía se superan las 40 horas de tiempo de residencia mínimos y en el recinto portuario se obtienen valores entre 30 y 40 horas (Figura 7, panel superior). Los tiempos de residencia máximos asociados a períodos de calma son del orden de días, entre 5 y 6 días en la zona cercana a las bocas, y hasta 11 días en el recinto portuario y zona baja del fondo de la Bahía (Figura 7 panel inferior).

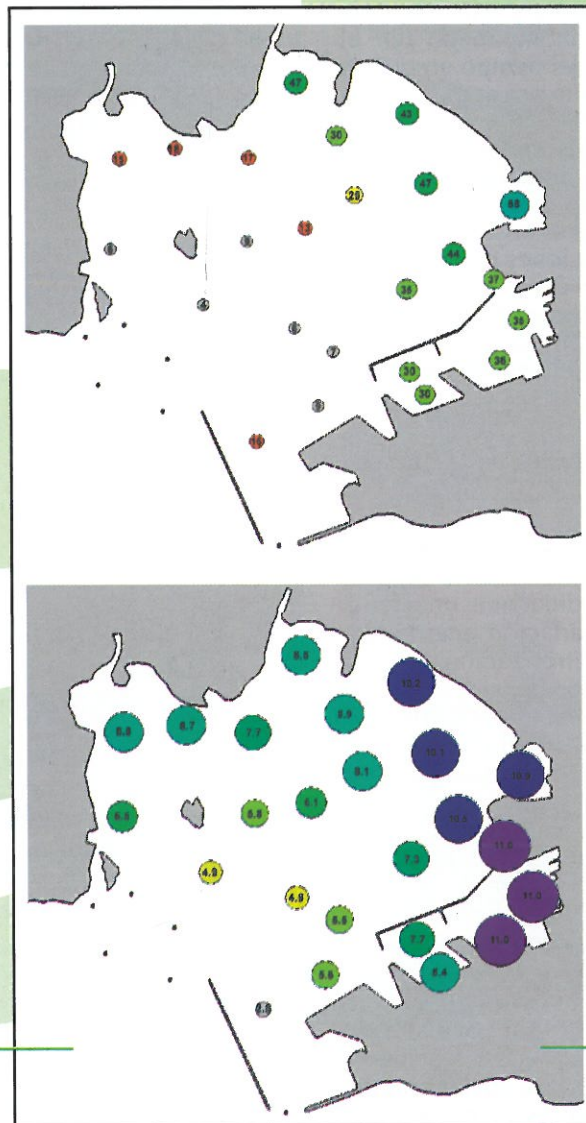


Figura 7: Rango inferior (panel superior) de lavado (horas) y rango superior (panel inferior) de lavado (días) característicos del sistema en el escenario actual.

for the Montevideo Bay and port area in the present scenario. Then the same methodology was applied taking into account in the model the Gas Sayago S.A. LNG terminal and ANP's Punta Sayago Port project.

Even though the methodology is simple, the results absolutely depend on the period of time considered for the analysis. As described above, water exchange between the bay and the River Plate greatly varies in time and, therefore, residence times would be expected to vary depending on whether we are considering meteorological tide events or astronomical tide conditions. The longest residence times in the whole area are associated with calm periods and astronomical tide prevalence. Two scenarios of meteorological tide conditions were analyzed and the flushing times in the whole area were shorter than for astronomical tide conditions. The comparison of two meteorological tide scenarios shows that the meteorological tide conditions where the flow comes through the west mouth generate shorter residence times throughout the bay and port area than the meteorological tide conditions

where the flow enters the bay through the access channel.

The shortest residence times are of the order of a few hours and are registered in the area around the west mouth of the bay. Towards the Pantanoso stream, they increase to a few tens of hours and towards the Miguelete stream to around 30-40 hours. In the shallower areas of the bay, the minimum residence times exceed 40 hours and in the port area values of around 30 to 40 hours are obtained (Figure 7, upper panel). The maximum residence times associated with calm periods are of the order of days, between 5 and 6 days in the zone near the mouths and up to 11 days in the port area and low zone of the bay's bottom (Figure 7, lower panel).

Figure 7: Flushing time lower range (hours) and flushing time higher range (days) characteristic of the system in the present scenario (upper and lower panel, respectively).

Los tiempos de residencia obtenidos para los escenarios con obras presentan leves diferencias con los valores calculados para el escenario base debido a las modificaciones en la hidrodinámica del sistema. El efecto de ambas obras es similar y puede resumirse en un leve incremento en los tiempos de residencia del agua en toda la Bahía y la zona del recinto portuario cercana al Muelle C. Por otro lado en la zona de dársenas A y B los tiempos de residencia disminuyen.

1.6. Mediciones de Campo.

Se realizaron mediciones para obtener registros in situ de velocidad de flujo en la bocana oeste de la Bahía de Montevideo. Para esto se utilizaron dos equipos: un Perfilador Acústico de Corrientes Horizontal (HADCP) y un Perfilador Acústico de Corrientes Vertical (ADCP) (Figura 8). Ambos equipos fueron colocados en la cercanía del extremo norte de la Escollera Oeste. Los registros obtenidos por el ADCP cubren el período de mediados de agosto de 2016 hasta principios de mayo de 2017; desafortunadamente no se obtuvieron registros de corrientes de valor con el HADCP.

The residence times obtained for the future scenarios are slightly different than the values estimated for the base scenario due to the modifications in the hydrodynamics of the system. The impact of both projects is similar and could be summarized as a slight increase in the water residence times throughout the bay and port area near Dock C. However, in the zone of Basins A and B, the residence times decrease.

1.6. Field Measurements

Measurements were taken to obtain in situ records of flow velocity at the west harbor entrance of the Montevideo Bay. For that purpose, two profilers were used: a Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (HADCP) and a Vertical Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) (Figure 8). Both profilers were placed near the northern end of the Western Breakwater. The records obtained by the ADCP cover the period of time between mid-August 2016 and the beginning of May 2017. Unfortunately, no current records of value were obtained with the HADCP.

Figura 8: Sistema de fondeo del ADCP, con el instrumento colocado.

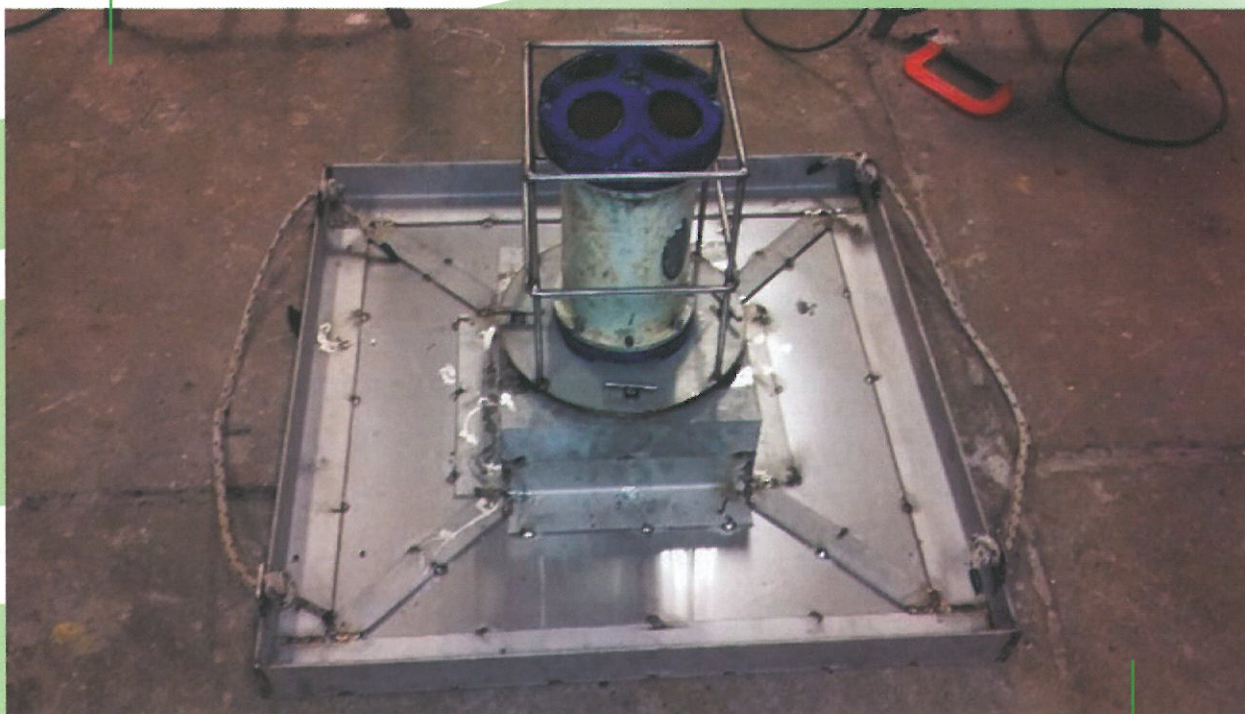


Figure 8: Anchorage system of the ADCP with the instrument in place.

Los registros de velocidad obtenidos con el ADCP muestran las variaciones por marea astronómica y meteorológica características de la zona costera de Montevideo (Figura 9). Las corrientes registradas en la zona pueden llegar a ser importantes, con velocidades que llegan a 0,5 m/s, frecuentemente. Los patrones de velocidad están fuertemente controlados, por la presencia de la escollera, predominando el sentido NNE para las corrientes entrantes a la Bahía y el sentido E para las corrientes salientes de la Bahía. Estos sentidos también corresponden a los de las máximas corrientes registradas.

The velocity records obtained with the ADCP show the variations due to astronomical and meteorological tides characteristic of the coastal area of Montevideo (Figure 9). The currents recorded in the area are likely to be significant and regularly reach velocities of 0.5 m/s. The velocity patterns are strongly controlled by the breakwater, prevailing the NNE direction for incoming currents and E direction for the outgoing currents in the bay. These directions also correspond to the maximum currents recorded.

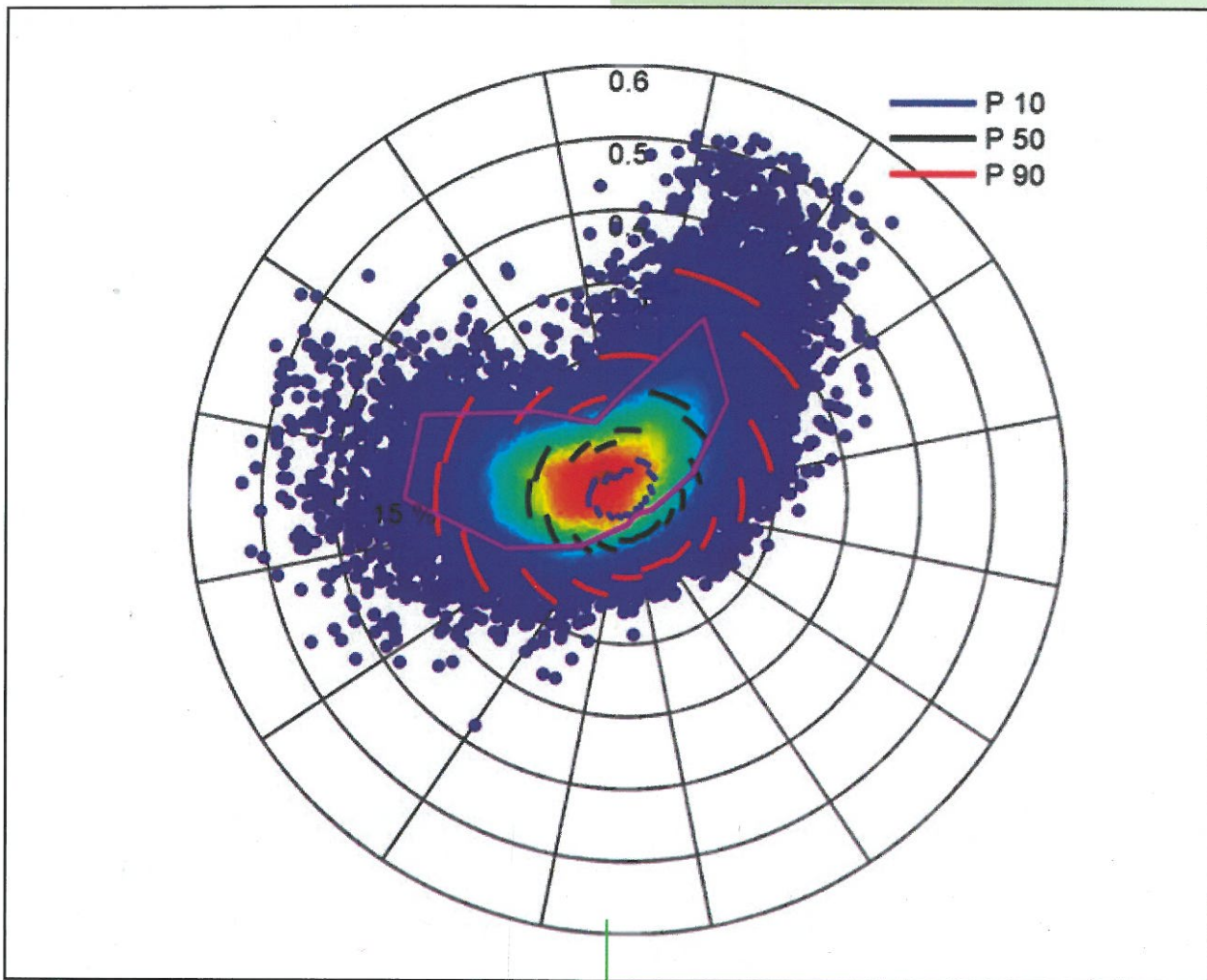


Figura 9: Distribución de la velocidad promedio en la columna de agua. Los colores indican densidad de datos, colores cálidos indican una densidad mayor que colores fríos. Los arcos azules, negro y rojo indican los percentiles 10, 50 y 90 respectivamente para cada uno de los sectores de dirección. La línea magenta conecta los porcentajes de ocurrencia de registros en cada sector respecto al número total de registros, el porcentaje se indica para el sector preponderante y sirve de escala para los porcentajes de los demás sectores. Notar que para datos de corriente se utiliza la convención de indicar el sentido hacia donde apunta el vector.

Figure 9: Mean velocity distribution in the water column. Colors indicate data density. Warm colors indicate higher density than cold colors. The blue, black and red arcs indicate the 10, 50 and 90 percentiles, respectively, for each direction sector. The magenta line connects the record occurrence percentages in each sector respect to the total number of records. The percentage is shown for the dominant sector and serves as reference scale for the percentages of the other sectors. For current data, the direction of the vector is shown.

1.7. Síntesis

Se han estudiado las principales características hidro-sedimentológicas de la Bahía de Montevideo y recinto portuario en base al desarrollo de un modelo sofisticado tridimensional, que acopla el efecto del oleaje, y a mediciones de campo realizadas en la zona. El modelo tridimensional permitió realizar un análisis de las corrientes, sedimento en suspensión, tensiones de fondo, y evolución del sedimento del fondo en la costa de Montevideo, en la Bahía y recinto portuario. Se ha realizado, además, una caracterización de los patrones de circulación en la Bahía, identificando

1.7. Synthesis

The main hydro-sedimentological characteristics of the Montevideo Bay and port area have been analyzed based on the development of a sophisticated three-dimensional model coupled with the wave effect and on field measurements carried out in the area. The three-dimensional model made it possible to analyze the currents, suspended sediment, bottom stresses and bottom sediment evolution in the coast, bay and port area of Montevideo. Moreover, a characterization of the circulation patterns in the bay was carried out, identifying the effect of the main forcings, the water

el efecto de los principales forzantes, una cuantificación del flujo de agua y sedimento en las bocas de la Bahía, y se han identificado los principales patrones de deposición y erosión de material de fondo.

Se ha realizado un análisis de los tiempos de residencia del agua en la Bahía y recinto portuario, utilizando un modelo bidimensional ajustado para la zona. Se realizó una cuantificación que permite zonificar el cuerpo de agua según las zonas de mayor o menor tiempo de residencia. Esto es un gran avance pues permitirá aplicar decisiones de gestión ambiental del cuerpo de agua con mayor información científica.

Los modelos numéricos también se han utilizado para analizar el efecto de obras futuras planificadas en la zona (Gas Sayago S.A y Puerto Sayago) sobre la hidrodinámica, dinámica de sedimentos finos y tiempos de residencia del agua en la Bahía de Montevideo y recinto portuario. De esta manera es posible prever que sucederá en la zona si las obras fuesen a llevarse a cabo.

Durante este estudio se realizó un importante avance en el desarrollo de los modelos numéricos y en la definición de metodologías y análisis de resultados. Estas herramientas son la base para otros estudios marítimos de interés en la zona, vinculados a la dinámica de flujo del sistema (niveles, corrientes, oleaje) o a la dinámica de sedimentos finos, como ser: estudio de modificaciones del sistema frente a nuevas obras, estudio de las tasas de sedimentación, estudios de descargas de dragados, modelación de pronóstico, entre otros.

IMFIA:

Dr. Ing. Pablo Santoro
 Dr. Ing. Mónica Fossati
 MSc. Ing. Rodrigo Mosquera
 Dr. Ing. Francisco Pedocchi
 Dr. Ing. Ismael Piedra Cueva
 Bach. Gonzalo Rodríguez
 Bach. Michelle Jackson
 Bach. Matías González

and sediment flow at the mouths of the bay was quantified and the main deposition and erosion patterns were also identified.

The water residence times in the bay and port area were analyzed using a two-dimensional model. A quantification that allows zoning the body of water according to the duration of the residence times was carried out. This is a major advance because it will make it possible to implement decisions regarding the environmental management of said body of water based on more scientific information.

The numerical models have also been used to analyze the impact of future works planned for the area (Gas Sayago S.A and Punta Sayago Port) on the hydrodynamics, fine sediment dynamics and water residence times of the Montevideo Bay and port area. In this way, it is possible to anticipate what would happen in the area if works were to be carried out.

During this study, a major advance was made regarding the implementation of numerical models and the definition of new methodologies for the analysis of the results. These tools are the basis for other relevant maritime studies in the area related to the dynamics of the system flow (levels, currents, waves) or the fine sediment dynamics, such as: analysis of the changes in the system due to new maritime projects, analysis of the siltation rates, analysis of dredging discharges and forecast modeling, among others.

IMFIA:

Dr. Eng. Pablo Santoro
 Dr. Eng. Mónica Fossati
 M.Sc. Eng. Rodrigo Mosquera
 Dr. Eng. Francisco Pedocchi
 Dr. Eng. Ismael Piedra Cueva
 B.Sc. Gonzalo Rodríguez
 B.Sc. Michelle Jackson
 B.Sc. Matías Gonzalez
