

# Estimación de Niveles en la Zona Estuarina del Río Guapi

Lilian Posada García

MSc. PhD

Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

AA 1027 Medellín, e-mail: [lposada@unal.edu.co](mailto:lposada@unal.edu.co)

Maria Mercedes Quiceno

I.C.

Estudiante Posgrado en Recursos Hidráulicos,

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, AA 1027 Medellín,

e-mail: [mmquicen@unal.edu.co](mailto:mmquicen@unal.edu.co)

**Resumen.** Para la estimación de niveles en el muelle de Guapi (Cauca), ubicado sobre el río Guapi a 17.5 km del Océano Pacífico, se consideró el efecto de las mareas sobre el flujo del río. En la isla Partidero (13 km aguas arriba de la desembocadura) el río se bifurca en el brazo Guapi y el brazo Limones.

En la cuenca media - alta del río Guapi, con procesos netamente fluviales, relieve escarpado, alta pluviosidad, está la única estación que registra caudales (Sangaral). Se estimaron caudales extremos hasta la estación Sangaral, isla Partidero y el muelle. En el tramo final se implementó un modelo numérico H2D, que resuelve las ecuaciones de ondas largas, para considerar la propagación de la onda de marea y la interacción con los caudales fluviales. El modelo se ejecutó bajo diferentes escenarios de marea y de aportes fluviales.

Palabras Claves: Muelle, estuario, estimación de niveles fluviomarinos.

## 1. Introducción

En cumplimiento del contrato 073 de 2002 con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, realizó las actividades tendientes al estudio para el diseño de un muelle de carga y pasajeros para el municipio caucano de Guapi. Este municipio tiene una extensión de 2681 km<sup>2</sup> (Figura 1), cuenta con el único puerto en el departamento del Cauca y por su importancia este puerto es el tercero en el Océano Pacífico. Este puerto, ubicado sobre el río Guapi a 9 km de la desembocadura en el mar Pacífico, fue construido hace unos 30 años, se encuentra en un estado de deterioro avanzando y fuera de servicio por el peligro de un colapso total. Esto llevó a la conclusión de la necesidad de un muelle nuevo. Es así, que una de las variables primordiales para el diseño de dicho muelle, es el establecimiento de los niveles del agua, los cuales por la naturaleza estuariana del sitio donde se ubicará el muelle, requiere un análisis de la interacción de la marea y del flujo del río.

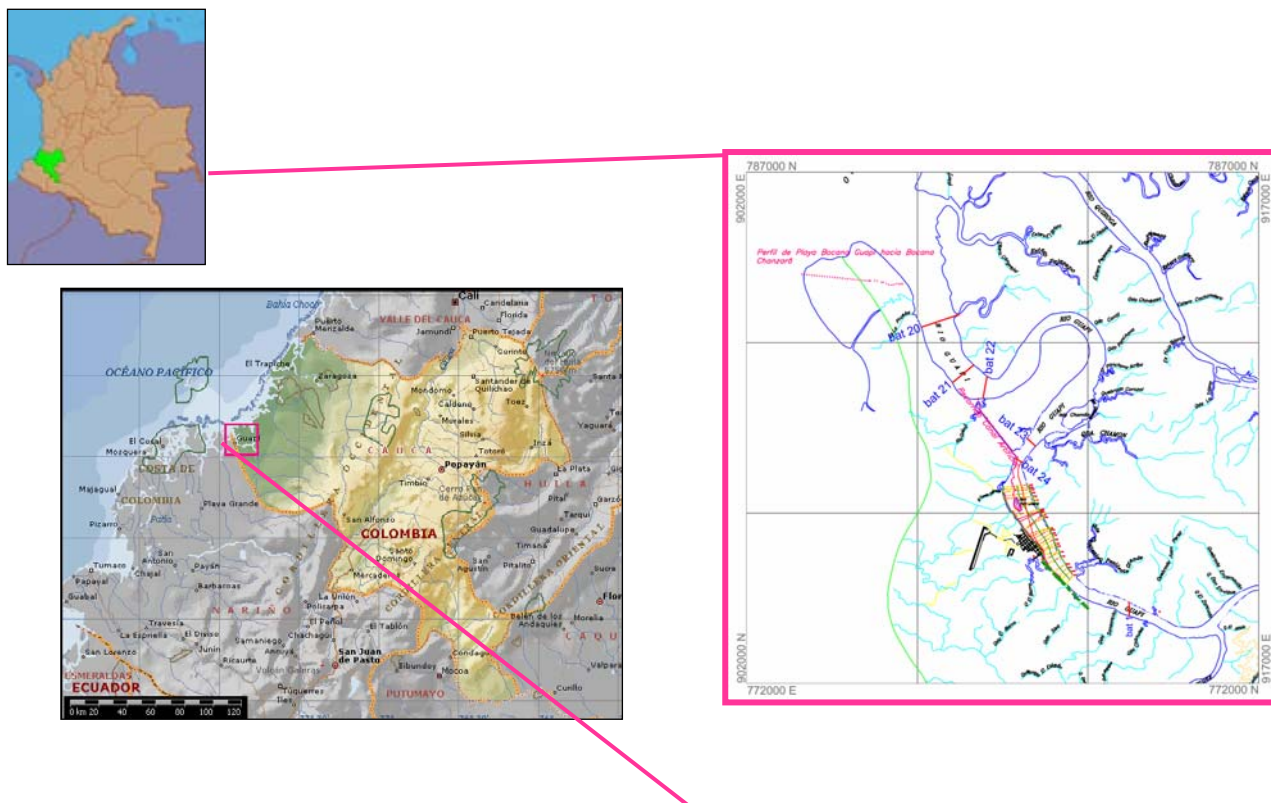


Figura 1. Esquema general de la ubicación del muelle de Guapi, secciones analizadas.

### BATIMETRÍA UTILIZADA

A partir de la siguiente información batimétrica se construyó el terreno en 3D, suponiendo secciones transversales entre las existentes y haciendo una interpolación lineal de las mismas: Batimetría general de la zona: Carta náutica 032 – Bahía de Buenaventura a Bahía Ancón de Sardinias del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH de la Armada Colombiana; Base cartográfica del municipio de Guapi realizada por el IGAC - CRC 2001 (escala 1:25000), y campañas topo-batimétricas del cauce del río Guapi en diferentes secciones a lo largo de éste (Figura 1).

### CARACTERIZACIÓN DE LOS CAUDALES DEL RÍO

Después de realizar un estudio de caudales máximos y mínimos de la cuenca del río Guapi, en donde se evaluaron varias metodologías, se seleccionaron los caudales estimados con rendimientos de caudales a partir de la información de caudales la estación Sangaral (5304701), período 1981 – 2002, sobre la corriente Napi. Debido a la existencia de brazos efluentes (esteros) en la desembocadura del río Guapi al océano (Figura 3), se analizaron tres cuencas (Figura 2): Hasta donde está ubicado el muelle, aunque la divisoria corta el brazo Limones (Cuenca 1, área 2025.38 Km<sup>2</sup>), Hasta Isla Partidero. Antes que el cauce se bifurque (Cuenca 2 área 1839 Km<sup>2</sup>) y hasta la estación limnimétrica Sangaral (Cuenca área 3419.18 Km<sup>2</sup>). Según aforo en Isla Partidero, el 42% del caudal del río Guapi desvía hacia el Brazo Limones y el 58% restante continua por el río Guapi (Figura 3). En la Tabla 1 se resumen los caudales para diferentes períodos de retorno a partir de los cuales se obtuvo el caudal en el sitio del muelle de Guapi.

Tabla 1. Caudales máximos y mínimos en el río Guapi en m³/s.

Período de Retorno (años)	Estación Sangaral, Cuenca 1		Isla Partidero, Cuenca 2		Muelle sin considerar el agua que se deriva, Cuenca 3		Muelle considerando derivación en Isla Partidero	
	Qmax (f.d.p. Lognormal Límite superior)	Qmin (f.d.p. Lognorm al límite inferior)	Q <sub>PARTIDERO</sub> =4.39Q <sub>SANGARAL</sub>		Q <sub>MUELLE GUAPI</sub> =4.83Q <sub>SANGARAL</sub>		Q <sub>MUELLE</sub> = Q <sub>CUENCA HASTA MUELLE</sub> - 0.42 Q <sub>CUENCA HASTA ISLA PARTIDERO</sub>	
			Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin
2.33	992	10.17	4355	44.646	4960	51	51	32.1
5	1182	5.52	5189	24.233	5910	28	3731	17.4
10	1338	3.42	5874	15.014	6690	17	4223	10.8
25	1535	1.9	6739	8.341	7675	10	4845	6.0
50	1679	1.23	7371	5.400	8395	6	5299	3.9
100	1820	0.79	7990	3.468	9100	4	5744	2.5

Tabla 2. Características de los mareógrafos usados.

Mareógrafo	Latitud	Longitud	Período
Tumaco	1° 50' N	78° 44' W	Nov/51-Dic/00
Bahía Solano	6° 00' N	78° 00' W	Nov/63-Jul/68

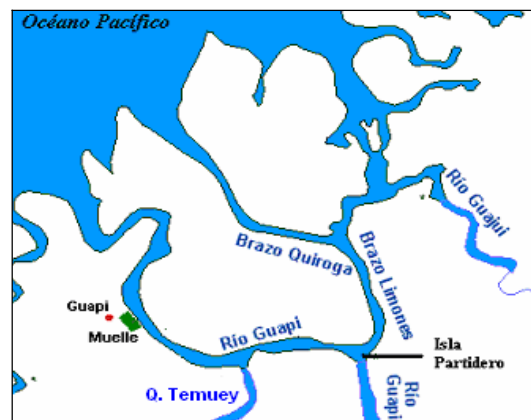


Figura 3. Esquema de la desembocadura del río Guapi en el océano Pacífico. Se aprecian los brazos del río y las "islas" formados en la entrega al mar.

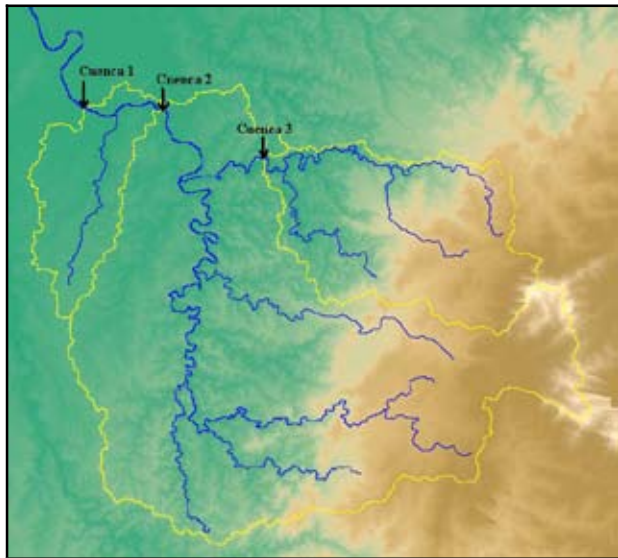


Figura 2. Divisorias de cada una de las cuencas con análisis morfométrico.

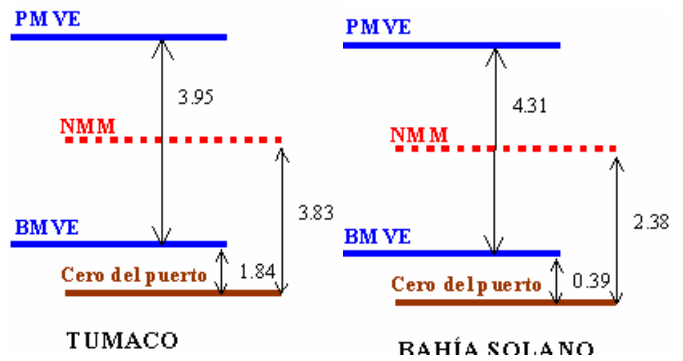


Figura 4. Niveles referenciados en puerto. (BMVE: Bajamar media viva equinoccial; PMVE: Pleamar media viva equinoccial; NMM: NMM con respecto al cero del puerto).

### 1.1 ANÁLISIS DE LA MAREA ASTRONÓMICA

Se usaron los registros de los mareógrafos de Tumaco y Bahía Solano – IDEAM (Tabla 2). El NMM, se estimó a partir de las series históricas de estos mareógrafos y se referenció al cero correspondiente de cada puerto (Figura 4). La marea en el Pacífico colombiano tiene un carácter semidiurno ( $T = 12.4$  h) con una amplitud media de 3.0 m, y máxima entre 3.6 a 4.0 m en septiembre y durante el Fenómeno de El Niño.

Se implementó la metodología del análisis armónico, que consiste en descomponer los registros de nivel del mar en un número finito de ondas cuyo período y fase, coinciden con los períodos de algunos movimientos astronómicos. Además, se supuso que la marea astronómica varía linealmente a lo largo del Pacífico colombiano. En las Tabla 3 y Tabla 4 se presentan las componentes armónicas obtenidas. Este análisis en Tumaco ya había sido realizado por Carlos E. Tejada en el 2002, quien encontró 27 componentes armónicas. En la Figura 5 se muestra el espectro de Fourier del nivel del mar en Tumaco. En la Figura 6 está la relación lineal entre la marea de Bahía Solano y Tumaco, con un excelente ajuste ( $R^2=0.9901$ ). Ésto soporta la suposición de que las componentes armónicas sean las mismas en todos los puntos de análisis y constantes en el tiempo; esto se validaría al analizar los años 1964-1965. Esta relación se aplicó a una serie reciente (12/1995-11/1996) en Tumaco, obteniéndose así la marea astronómica en Bahía Solano.

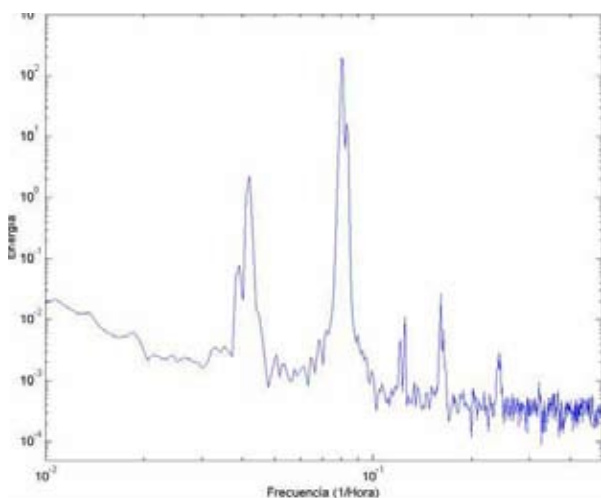


Figura 5. Espectro de los registros de nivel del mar en Tumaco (1964-1965)

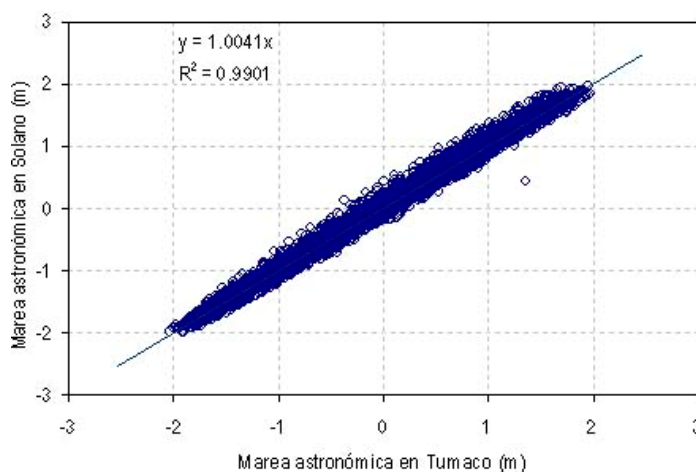


Figura 6. Relación entre la marea astronómica en Tumaco y Bahía Solano (Período de análisis: 04/1964-03/1965)

Para el mareógrafo de Tumaco, se tiene una amplitud,  $M$ , de 2.32 m, o sea una carrera de marea,  $CM$ , de 4.64 m, máxima marea astronómica; para las mareas vivas (componentes  $M_2$  y  $S_2$  en fase), se obtiene un valor de 1.55 m; para las mareas muertas (componentes  $M_2$  y  $S_2$  se restan) se obtiene 0.91 m. En el mareógrafo de Bahía Solano se obtuvo 2.34 m de  $M$  ( $CM$  de 4.68 m), para las mareas vivas el valor estimado es 1.56 m, y para las mareas muertas es 0.92 m. Al comparar las principales constantes armónicas de los dos mareógrafos (Tabla 3 y Tabla 4), no se observan grandes diferencias. Con base en esto, es posible inferir las características de la marea en la zona de estudio por medio de una interpolación lineal entre los mareógrafos de Tumaco y Bahía Solano.

donde  $P$  es el caudal en la dirección  $x$ ;  $Q$  el caudal en la dirección  $y$ ;  $H$  es la profundidad total;  $\eta$  es el nivel de la superficie libre;  $C$  es el coeficiente de fricción de Chézy, y  $\varepsilon$  el coeficiente de viscosidad de remolino. La resolución analítica de la ecuación (2) es posible en casos donde los contornos de la desembocadura (márgenes y batimetría) pueden expresarse con funciones simples. En casos reales, la variabilidad de los contornos hace que la ecuación (2) sólo pueda resolverse numéricamente. Por esto, se usó el programa AQUALAB, que tiene incorporado un modelo hidrodinámico 2DH, que emplea un algoritmo en diferencias finitas implícito de doble barrido (Leendertse, 1970). La versión de AQUALAB usada fue desarrollada por los Grupos de Emisarios Submarinos y Saneamiento Litoral, y de Ingeniería Oceanográfica y de Costas del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.

### 1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO 2DH

El modelo 2DH divide el dominio en elementos rectangulares (“malla de estudio”), donde calcula la velocidad y el nivel. La malla tiene  $451 \times 226$  celdas, con un espaciado de 40 m (Figura 7). Este modelo trabaja en diferencias finitas con las hipótesis de: fluido incompresible, ondas largas, velocidades horizontales uniformes, sin variaciones verticales de densidad, hipótesis de Boussinesq para el término turbulento. Los agentes de movimiento posibles en este modelo son: marea, viento, gradientes horizontales de densidad, caudales fluviales (AQUALAB, 2001).

### 1.2.2 DATOS DE ENTRADA

Se usó un coeficiente de viscosidad de remolino,  $\varepsilon = 2 \text{ s}^{-1}$ , según ajustes entre modelos teóricos y medidas realizadas en cuencas y estuarios del litoral colombiano (Restrepo, 2003). Para el coeficiente de rugosidad  $C$ , adoptó un coeficiente de  $k = 0.1 \text{ m}$ , donde:

$$C = 18 \log \left( \frac{12h}{k} \right) \quad (3)$$

En las modelaciones (Tabla 5) se verificó la condición de Courant, para la discretización espacial de 40m, profundidad media del dominio de 8m, número Courant de 5 y un intervalo de tiempo de cálculo de 10 s.

Tabla 5. Casos modelados.

Carrera de marea, CM (m)	Caudal del río ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
5.20 (asociada al nivel de pleamar máximo)	1
3.60 (asociada a la pleamar media viva)	100
1.82 (asociada a la pleamar media muerta)	1000
	5000

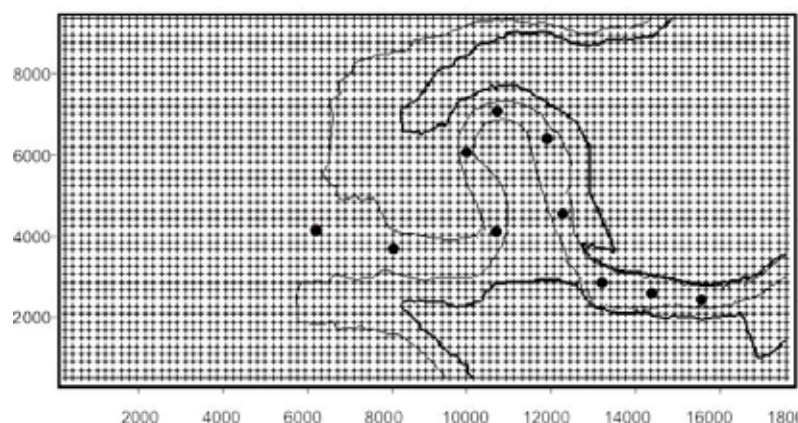


Figura 7. Malla de trabajo y ubicación de los puntos de control.

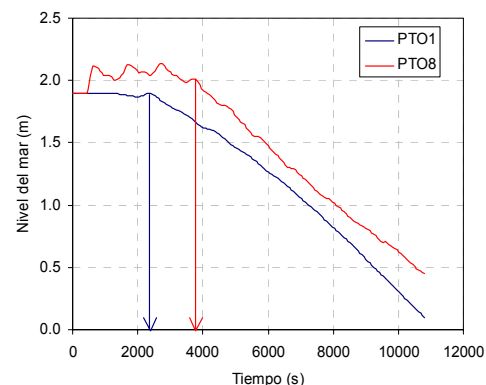


Figura 8. Prueba de estabilización del modelo en la desembocadura (pto. 1) y en el muelle de Guapi (pto. 8).



### 1.3 RESULTADOS

En cada nodo se obtuvieron las velocidades y niveles en pleamar, máxima vaciante, bajamar y máxima llenante. Los resultados se enfocaron en los 10 puntos representativos ubicados a lo largo del cauce de río (Figura 7). Las pruebas de tiempo de estabilidad del modelo se efectuaron a partir de simulaciones con grabación de datos cada 2 s. En la Figura 8 se presenta una prueba de estabilización del modelo para una M de 1.9 m y caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s. En general se observó que a mayor interacción entre el flujo de marea y el caudal del río, el modelo tarda más en estabilizarse. La estabilización se dio después de la primera hora, así se usaron los resultados a partir de la hora 12, coincidiendo con un flujo en pleamar.

#### 1.3.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE SUPERFICIE LIBRE Y CORRIENTES EN EL RÍO

La Figura 9 muestra un esquema de la relación entre el nivel máximo respecto al nivel medio del mar (NMM) en la desembocadura (NMM está referenciada la batimetría y los resultados de las propagaciones) y respecto al 0 local (en el muelle). La ecuación (4) sirve para realizar las correspondientes transformaciones relativas en los niveles de referencia:

$$N_{\max}(\text{respecto al } 0 \text{ local}) = N_{\max}(\text{respecto a NMM}) + 1.98 - 2.88 \quad (4)$$

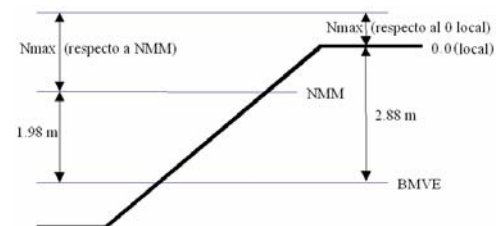


Figura 9. Relación de niveles de referencia.

En la ubicación del muelle el cero local se encuentra a la cota +44.65 m, respecto al nivel de referencia con el que se levantaron las secciones transversales del río.

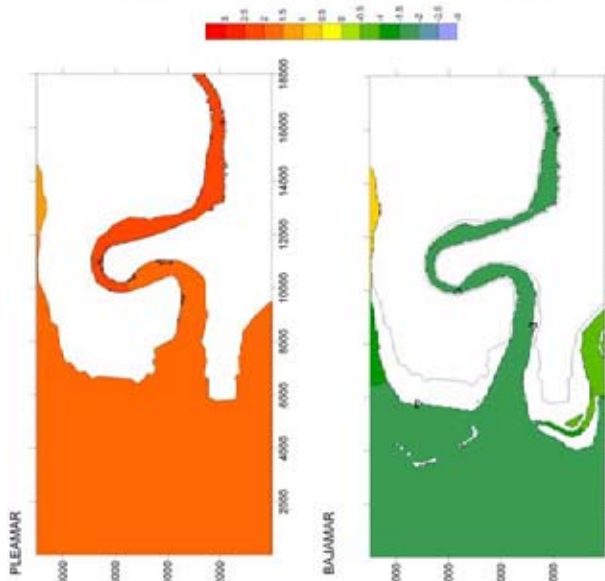
#### 1.3.2 RESULTADOS DE SUPERFICIE LIBRE

La Figura 10 presenta las isolíneas de superficie libre en pleamar y bajamar, para el caso CM de 3.60 m y caudal del río de 1000 m<sup>3</sup>/s, la evolución temporal de la superficie libre depende directamente del ciclo mareal: valores máximos en pleamares y mínimos en bajamares. Cuando la onda de marea se propaga desde la desembocadura hasta el muelle, experimenta un desfase de aproximadamente 1 h en la evolución de la superficie libre a través del tiempo, fenómeno claro en pleamar y bajamar (Figura 12 y Figura 13). Este desfase es consecuencia de la fricción que el fondo y los contornos le imprimen a la onda.

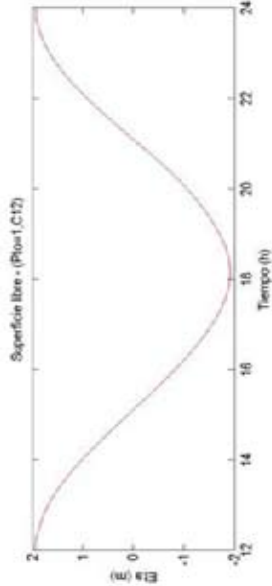
La Figura 14 presenta la variación de los caudales con marea constante (M = 2.6 m). El máximo nivel del agua en el muelle se presenta en el caso de pleamar para el caudal de 5000 m<sup>3</sup>/s como era de esperarse, siendo esta elevación de 2.8 m medidos desde el NMM en la desembocadura. Los caudales mínimos y medios no representan un condicionante en la variación de la superficie libre en el sitio del muelle. En la Figura 15 se presenta la evolución temporal de la superficie libre variando las amplitudes de marea (1.1, 1.9 y 2.6 m) y manteniendo un caudal fijo de 1000 m<sup>3</sup>/s; en este gráfico el valor de elevación máxima del nivel en el muelle, para una M de 2.6 m en el instante de la pleamar, es de 2.5 m medidos desde el NMM en la desembocadura.

#### 1.3.3 RESULTADOS DE CORRIENTES

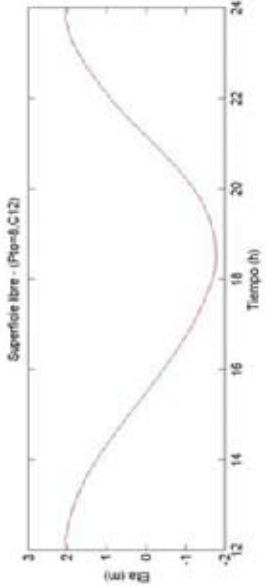
La evolución temporal de la velocidad de las corrientes está igualmente relacionada con el ciclo de marea: valores máximos durante la vaciante y la llenante, y mínimos en la pleamar y la bajamar. La Figura 11 presenta la evolución temporal de la superficie libre y el módulo de la velocidad para una CM de 2.2 m y



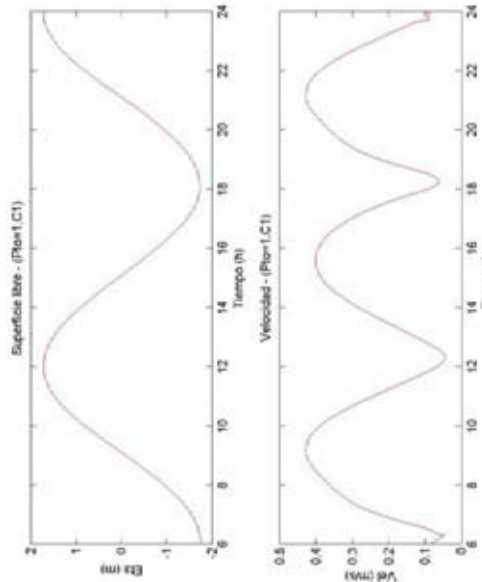
66 **Figura 10.** Isolíneas de superficie libre en pleamar y bajamar. CM 3.60 m y caudal del río de 1000 m<sup>3</sup>/s.



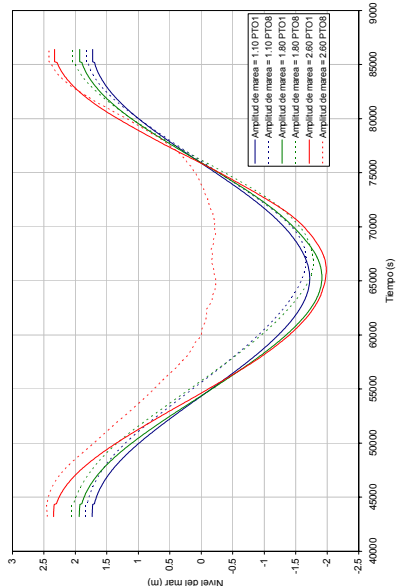
**Figura 12.** Evolución temporal del nivel de la superficie libre en la desembocadura. CM 3.60 m y caudal del río de 1000 m<sup>3</sup>/s



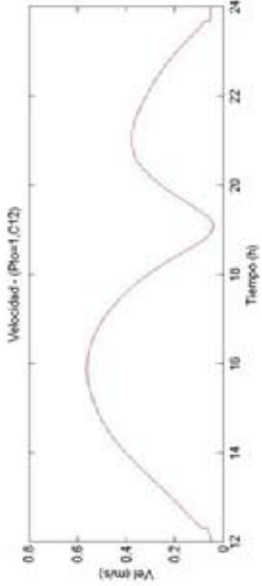
**Figura 13.** Evolución temporal del nivel de la superficie libre en el muelle. CM 3.60 m y caudal del río de 1000 m<sup>3</sup>/s.



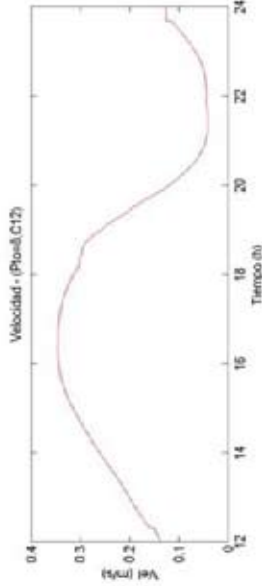
**Figura 11.** Relación temporal de la velocidad y la superficie libre.



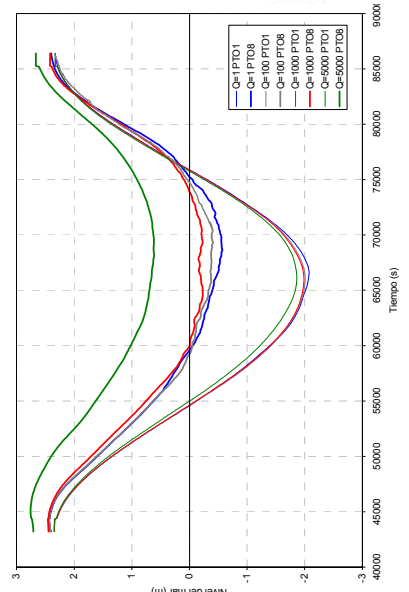
**Figura 15.** Evolución temporal de la superficie libre en el muelle y la desembocadura, manteniendo constante el caudal (1000 m<sup>3</sup>/s) y variando la M.



**Figura 16.** Evolución temporal del nivel de la superficie libre y velocidad de la corriente en la desembocadura. CM 3.60 m y caudal 1000 m<sup>3</sup>/s



**Figura 17.** Evolución temporal de la velocidad de la corriente en el muelle. CM 3.60 m y caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 14.** Evolución temporal de la superficie libre en el muelle y la desembocadura, manteniendo constante la M (2.6 m) y variando el caudal.

caudal del río de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (minimizando el efecto fluvial). A medida que la onda de marea se propaga en el interior de la desembocadura, esta sufre un desfase debido a la distancia recorrida. Cuando la onda de marea se propaga hacia aguas arriba de la desembocadura (llenante), se ve afectada por los efectos de la pendiente del lecho, las corrientes inducidas por el caudal del río y los fenómenos de fricción (fondo y márgenes laterales), producen una disminución de las velocidades del flujo ascendente. Estos efectos influyen de diferente manera en el proceso de vaciante, dando como resultado un incremento de la velocidad del flujo (Figura 18). En la Figura 16 y Figura 17 se compara la evolución temporal de la velocidad del flujo en el muelle y la desembocadura, donde los máximos valores en la vaciante son de 0.60 y 0.35 m/s para la desembocadura y el muelle, respectivamente. Las velocidades encontradas en la llenante son de 0.40 y 0.10 m/s para la desembocadura y el muelle, respectivamente. Esta disminución en la velocidad entre los dos puntos es debida a la disipación que experimenta el flujo al propagarse por la cuenca.

### 1.3.4 INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DEL LECHO DEL RÍO EN EL NIVEL MÁXIMO DEL AGUA

Para chequear el uso de  $k = 0.1 \text{ m}$ , se realizaron simulaciones con diferentes valores de  $k$  dejando fijas la amplitud de marea ( $M = 1.9 \text{ m}$ ) y caudal del río ( $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para evaluar la variación de los máximos niveles del agua en la desembocadura del río Guapi (Punto 1) y en el muelle de Guapi (Punto 8). El nivel máximo del agua en ambos puntos apenas varió como ante diferentes rugosidades del fondo (Figura 19); esto es debido al predominio sobre las condiciones hidrodinámicas del flujo que se presenta.

## 1.4 CONCLUSIONES

Para resumir los resultados se construyeron gráficas (Figura 20, Figura 21 y Figura 22) y la Tabla 6 que definen los niveles máximos del agua en el muelle de Guapi. Mayores pleamares (mayores amplitudes de marea) imponen un control hidráulico en la desembocadura que hace disminuir la pendiente de la superficie libre del río, aumentando el nivel del agua en Guapi. Si la onda de marea se propaga hacia aguas arriba del río (como ocurre en un sistema fluvio-mareal), la interacción de ésta con los contornos hace que la periodicidad de la onda se vea modificada produciendo un desfase de la onda de marea. En el muelle Guapi, este desfase provoca una sobre elevación adicional del nivel del agua. Mareas vivas interactuando con caudales extremos implican mayores niveles; sin embargo, la amplitud de la marea parece dominar en la estimación los niveles, por lo que los niveles de la cota inferior y superior de la losa del muelle de Guapi están relacionados directamente por la carrera de la marea. Así el escenario más desfavorable para los niveles mínimos es la condición de bajamar y caudales mínimos.

## 1.5 BIBLIOGRAFÍA

- RESTREPO, P. A. (2003). Estudio de la Cota de inundación en el litoral Pacífico colombiano. Tesis de Maestría de la Universidad de Cantabria.
- R.O.M. 03-91, R.O.M. 03-99, R.O.M. 0.0. (1992). Recomendaciones para Obras Marítimas. Ministerio de Obras Públicas y Transporte- Dirección General de Puertos - Madrid, España.
- CASTANEDO, S. (2000). "Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras". Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- C.H.N. (1995). "Metodología de estudio de los saneamientos litorales". Confederación Hidrográfica del Norte, Dir. Téc., Oviedo.
- LEENDERTSE, J.J. (1970). "A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas. Vol. 1. Principles of computation". RM-6230-RC. The Rand Corporation, Santa Mónica, California.
- AQUALAB, 2001. Manual de referencia. por los Grupos de Emisarios Submarinos y Saneamiento Litoral, y de Ingeniería Oceanográfica y de Costas del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.