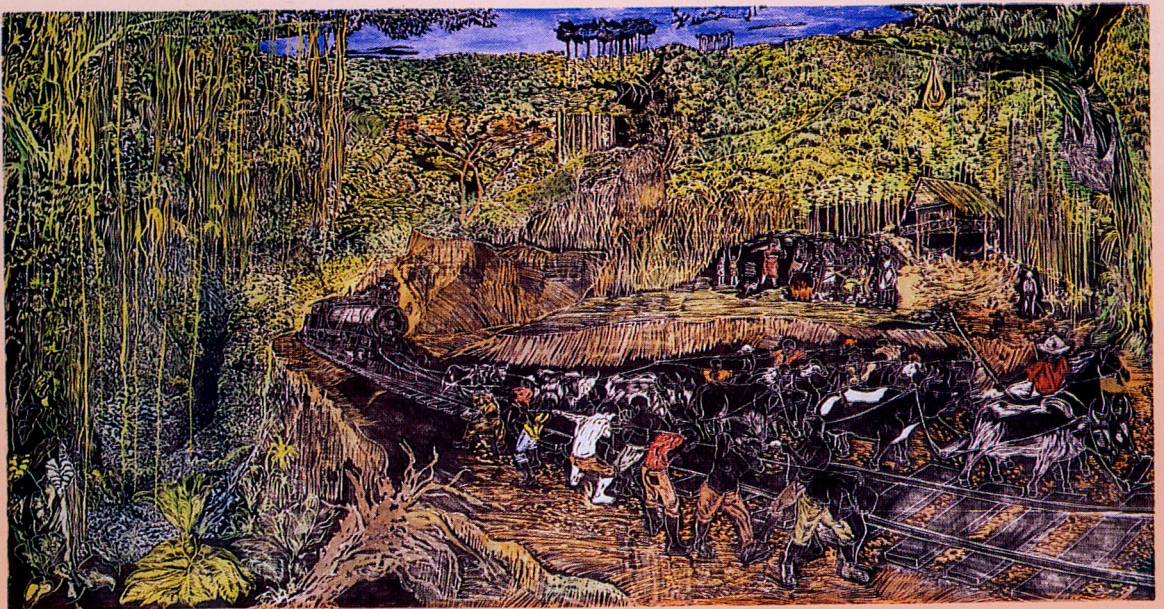


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1994 VOLUMEN 4 Nº 2



TOPOGRAFÍA SUBMARINA MEDIANTE COMPUTADORAS PERSONALES

*Luis M. Murillo B. **

RESUMEN

Se introduce un método para construir cartas náuticas cerca de la costa que usa procedimientos computarizados, hojas de cálculo modernas, tableta de dibujo por computadora y el criterio profesional de un ingeniero. El método es muy rápido y se basa en el uso de un corrector de profundidades automático cuya validéz supera los cien años si se cuenta con un análisis armónico apropiado de la marea.

SUMMARY

A hydrographic tidal height reduction method is presented. The method makes heavy use of personal computers, spreadsheets and harmonic analysis. Nautical charts of near-shore locations are produced rapidly and time required is determined mostly by the field data gathering work.

INTRODUCCIÓN

A menudo se desea construir o dragar una facilidad cerca de la costa como una marina, un muelle o atracadero, una dársena u otra estructura costera. Al igual que como con las construcciones y movimientos de suelos en tierra firme, se requiere del conocimiento de la topografía del sitio de construcción planeado. En muchos sitios la marea, o sea el nivel del agua, cambia constantemente y los métodos tradicionales de la topografía de tierra firme no son aplicables directamente. Debe incluirse un método de reducción para corregir por marea los datos de profundidad obtenidos mediante medición directa y así poder construir una carta hidrográfica con batimetría para el sitio de interés, o medir con exactitud la forma del fondo marino para determinar el costo o avance de un proyecto de dragado.

El presente artículo presenta un método de ingeniería costera moderna para realizar determinaciones de topografía submarina cerca de la costa a profundidades medias inferiores a los 30 metros. El método usa computadores personales, hojas de cálculo y métodos numéricos para reducir las profundidades a un nivel de referencia predeterminado y es sustancialmente más rápido que los métodos de topografía tradicionales con mediciones directas de la marea. Los mapas o cartas batimétricas luego se construyen en paquetes de dibujo por computadora (CAD), con reducciones

por ángulos y correcciones finales hechas de nuevo en hojas de cálculo.

Al final, el método de ingeniería presentado aquí, produce cartas batimétricas del lugar estudiado y tablas de marea locales de tal forma que, el usuario del sistema, luego de realizado el estudio inicial, pueda obtener la profundidad en el lugar con solo ver la carta batimétrica y sumar al valor de la profundidad de la carta, el valor de la altura de la marea de la tabla. Esto le permite entonces proceder con su proyecto de diseño costero, control de sedimentación o dragado, o simplemente trazar la ruta de entrada o de navegación requerida.

Como las precisiones iniciales pueden errar en unos decímetros, si se desea más precisión, se deberá extender la medición de mareas en un sitio fijo, predeterminado, con un mareógrafo, por un lapso cuya duración mínima podrá superar los doce meses. Esto es recomendable en sitios con alto grado de desarrollo costero previsible a lo largo de los litorales nacionales.

EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA MAREA

En el método presentado aquí, se calcula la altura de la marea en el sitio de interés a partir de un análisis armónico previo de los datos de un mareógrafo cercano al sitio, o mediante

* Ingeniero. Ph. D. Universidad de Costa Rica -Programa de Ingeniería Costera -Instituto de Investigaciones en Ingeniería

extrapolaciones apropiadas, usando sitios cercanos al estudiado. Para este análisis armónico existen métodos tradicionalmente usados en la ingeniería costera como el Método del Almirantazgo Británico o Doodson de un mes para siete componentes armónicos. También hay métodos más modernos de análisis por frecuencias escondidas (Murillo 1994) que no requieren estrictamente de series de datos de longitud predeterminada. La precisión temporal de estos cálculos, una vez fijado el nivel de referencia, es de unos 10 minutos y la precisión espacial es de unos 10 centímetros en las costas de Costa Rica.

También existen métodos más exactos usados por los geofísicos y oceanógrafos que; sin embargo, requieren series de datos horarios mucho más largos que un mes. Además, difícilmente se justifica mucha precisión en las predicciones para efectos ingenieriles, debido a los comunes errores que introducen las olas del mar y de que, a menos de que se tengan complicados sistemas de medición y filtrado, harán muy difíciles y demasiado sofisticadas las mediciones exactas de la profundidad para efectos de la ingeniería costera.

Estos métodos, ya sea cortos o largos, parten de una serie de datos de alturas mareales, tomados cada hora durante un período largo, que se analizan para obtener las constantes armónicas. Una vez calculadas las constantes armónicas astronómicas se procede a hacer la predicción, usando el método de superposición expuesto en los manuales de hidrografía, como el de Shureman (1958). La denominación "astronómicas" se refiere al origen de las constantes, cuyos valores son debidos al movimiento regular de la Luna y el Sol alrededor de sus órbitas.

Existen métodos más sencillos para predecir la altura de la marea, mediante el uso de tablas precalculadas en manuales de amplia distribución como los de Murillo (1983, 1993c) que se basan en los procedimientos, ampliamente conocidos a nivel mundial, del Manual de Análisis Armónico y Predicción de las Mareas norteamericano (Schureman, 1958) y usa sus tablas directamente, sin calcularlas.

En el procedimiento presentado en este artículo, usamos el método de frecuencias escondidas

expuesto en Murillo (1994), si la serie de datos mareográficos iniciales para el sitio estudiado es corta (i.e. menos de 30 días). Si la serie es de 30 o más días usamos el método de Doodson, directamente (Stravisi, 1983), adaptado a las costas de Centroamérica y a los computadores personales. También usamos una combinación de ambos métodos cuando sea necesario.

Partiendo de estos cálculos, cuya realización ya se expuso en los artículos anteriormente mencionados de este autor, se genera una serie temporal de datos-horarios de alturas astronómicas del mar, para el sitio escogido con el fin de realizar la topografía submarina. Estos cálculos se hacen usando la ecuación

$$h = h_0 + \sum F_i * A_i * \cos[w_i * t + (V_0 + u) - e_i]$$

en donde h_0 representa la altura media sobre el nivel de referencia definido para el lugar, A_i es la amplitud del componente armónico i , F_i es el factor de declinación nodal para la componente i , w_i es la velocidad del componente i en grados/hora; $(V_0 + u)$ es el argumento de equilibrio en Greenwich, Inglaterra para el componente armónico i y e_i es la época del componente i , t es el tiempo local con base en 24 horas. Las amplitudes y fases de los siete armónicos usados aquí se conocen también con el nombre de "constantes armónicas".

El Cuadro No. 1 muestra los datos de marea astronómica predichos para el sitio Arenilla de Bahía Culebra, que usaremos en este artículo de ejemplo. El Cuadro No. 1 muestra las alturas de marea referidas al nivel de sicigias (valor medio de las bajamares inferiores extremas) para el mes de febrero de 1994. De igual forma se pueden calcular las alturas mareales para cualquier otro mes o año. De hecho el autor automatizó todos estos cálculos y ahora se está en capacidad de predecir, mediante el uso de computadores personales y programas en fortran, la marea en cualquier sitio del litoral costarricense con una precisión de 10 cm en las alturas y 10 minutos en los tiempos. La Figura No. 1 muestra la localización del sitio en la costa pacífica norte de Costa Rica.

Cuadro No. 1

Fecha	Alturas de la Marea Astronómica en centímetros (cm)																							
940201	14.1	34.9	82.5	144.4	204.3	246.9	261.0	242.8	196.6	134.2	71.1	23.5	3.4	16.3	59.2	121.9	189.1	244.4	274.5	272.4	238.8	182.6	117.7	60.4
940202	24.6	18.7	43.7	92.5	152.3	207.5	243.8	252.0	229.8	182.8	122.9	65.3	24.7	11.4	29.3	74.3	135.5	198.2	247.3	271.1	264.2	28.3	172.8	111.5
940203	59.2	28.5	26.3	52.3	99.4	155.0	204.7	235.9	240.6	217.7	173.0	117.9	66.5	31.9	23.1	42.7	86.3	143.5	200.7	244.1	263.6	254.6	219.6	167.4
940204	110.5	62.7	35.2	33.9	58.3	101.6	152.3	197.6	225.8	229.9	209.2	168.9	119.4	3.34	2.5	35.1	53.3	93.2	145.3	197.4	237.1	254.9	246.8	214.7
940205	166.5	113.7	68.7	41.9	39.0	60.0	99.0	145.8	188.6	216.5	222.8	206.1	170.8	126.0	83.2	53.4	44.5	59.2	94.5	142.1	190.9	229.3	247.9	242.4
940206	214.0	169.3	118.7	74.2	45.9	40.0	57.4	93.1	138.1	180.9	211.0	221.0	208.6	177.3	135.0	92.7	61.3	49.2	59.8	91.2	136.2	184.2	223.5	244.5
940207	242.0	216.3	173.2	122.6	76.5	45.5	36.7	51.7	86.5	132.2	177.4	211.0	224.8	215.5	185.7	143.2	98.9	64.3	48.6	56.2	85.9	130.8	180.1	221.6
940208	245.1	244.5	219.3	175.3	122.8	74.0	40.7	30.5	45.7	82.3	131.1	180.0	217.0	232.8	223.9	192.7	147.3	99.5	61.7	43.8	50.9	81.6	128.7	180.5
940209	224.3	248.8	247.5	220.2	173.1	117.4	66.5	32.6	24.0	42.4	83.4	136.7	188.9	227.3	242.4	230.6	195.2	145.5	94.2	54.7	37.3	46.8	81.1	131.8
940210	186.1	230.3	253.1	248.1	216.2	164.9	106.5	55.4	24.1	20.2	44.8	91.6	149.0	202.7	239.4	250.1	232.5	191.2	137.0	83.9	45.7	32.1	46.8	86.3
940211	140.5	195.6	237.5	255.2	243.8	205.9	150.6	91.5	43.3	18.1	22.1	54.4	106.9	166.5	218.4	249.8	253.0	227.6	180.2	123.2	71.3	37.7	31.0	52.9
940212	97.7	153.8	206.8	242.8	252.5	233.1	189.2	131.7	75.0	33.4	17.5	31.2	71.3	127.7	186.5	232.9	255.5	249.1	215.5	163.5	106.7	59.4	33.7	35.9
940213	65.2	113.8	169.1	216.5	243.8	243.6	216.0	167.8	111.1	60.4	28.6	24.0	47.7	93.9	151.2	205.3	242.8	254.5	237.9	197.5	143.8	90.5	51.1	35.4
940214	47.0	82.5	132.3	183.3	222.2	238.7	228.6	194.2	144.5	92.1	50.6	30.6	37.5	69.7	119.2	173.8	219.9	246.2	246.5	220.9	176.3	124.2	77.7	48.3
940215	43.2	63.0	102.1	149.9	193.8	222.3	217.8	209.0	170.7	122.8	77.8	47.4	39.5	56.5	94.2	143.5	219.1	228.1	242.7	232.7	206.8	155.4	107.9	70.2
940216	51.3	55.6	81.2	120.8	163.9	198.9	216.7	212.7	187.9	148.9	105.8	70.0	50.8	53.5	77.7	117.6	163.5	204.1	229.5	233.7	216.0	181.0	137.7	96.8
940217	68.3	58.8	70.1	98.3	135.8	172.4	198.4	207.1	196.2	168.7	131.9	95.4	68.8	59.4	69.7	97.7	136.7	177.1	209.3	225.4	221.8	199.7	164.6	125.3
940218	91.4	70.9	68.2	83.3	111.6	145.3	175.4	194.0	196.4	181.9	154.6	121.6	91.7	72.8	70.0	84.6	113.2	149.2	183.9	209.0	218.5	210.4	186.8	153.5
940219	118.5	90.3	75.2	76.3	92.6	119.3	149.2	174.5	188.5	187.9	172.8	147.4	118.3	93.2	78.9	79.3	94.8	122.1	154.7	185.0	205.8	212.1	202.5	179.3
940220	148.1	116.2	91.0	78.2	80.2	96.1	121.2	149.0	172.3	185.2	184.5	170.6	147.1	120.2	97.0	83.7	84.1	98.6	124.1	154.7	183.3	203.0	209.1	199.9
940221	177.5	147.1	115.6	90.4	77.1	78.5	93.9	119.0	147.5	172.2	186.8	187.9	175.2	152.1	124.5	99.7	84.3	82.5	95.5	120.5	151.8	182.0	203.6	211.3
940222	202.9	180.1	147.9	113.9	85.9	70.5	71.2	87.6	115.5	148.0	176.9	195.1	198.0	184.9	159.3	127.6	98.2	78.6	74.5	87.3	114.4	149.4	183.9	209.3
940223	218.9	210.0	184.2	147.4	108.2	75.9	58.5	60.0	80.2	114.1	153.2	188.0	209.7	212.9	196.7	165.3	126.6	90.6	66.8	61.5	76.7	108.9	150.5	191.0
940224	220.2	230.4	218.5	186.8	142.8	97.0	60.7	42.8	48.0	75.0	117.5	164.8	205.3	228.7	229.3	206.7	166.7	119.5	77.0	50.4	46.7	67.3	107.3	156.8
940225	203.2	234.7	242.8	225.0	185.0	132.7	80.7	42.1	26.7	38.6	75.1	127.3	182.4	226.7	248.9	243.6	211.9	161.9	106.2	59.1	32.5	33.6	62.2	111.3
940226	168.4	219.1	250.0	252.9	226.7	177.4	117.2	61.0	23.3	13.6	34.7	81.9	143.4	204.1	248.9	266.5	252.4	210.3	150.6	88.6	39.8	16.8	25.3	63.3
940227	121.1	183.9	235.6	262.7	257.9	222.1	164.0	98.2	41.2	7.7	6.5	38.2	95.3	163.7	226.6	268.1	278.0	253.9	201.7	134.6	69.5	22.9	6.2	23.7
940228	70.7	135.1	200.3	249.5	269.9	256.1	211.3	146.8	78.9	24.8	-1.5	7.1	48.7	113.4	185.0	246.0	281.2	281.8	247.8	187.8	116.8	52.7	11.3	2.8

Los datos del Cuadro No. 1, para la época apropiada en que se realizan las mediciones topográficas, se pasan a una hoja de cálculo (CUTLET.XLS) para ser leídos y analizados por la computadora personal y el paquete de procesamiento del método presentado aquí. Finalmente estos datos, calculados por la computadora, se usan en la corrección de los datos de la profundidad tomados en el campo para reducir estos a un nivel de referencia marino común (por ejemplo el nivel medio de bajamares mayores o nivel de sicigias). Esta reducción de las profundidades se realiza en una hoja de cálculo (REDUCTOR.XLS) que también posee métodos de verificación gráficos mediante la ejecución de poligonales marinos apropiados al sitio de la costa de que se trate. Todo lo anterior se realiza de forma automática usando procedimientos macro de las hojas de cálculo.

En zonas interiores del litoral centroamericano como en el interior del Golfo de Nicoya, estos procedimientos se complican un poco puesto que existe, en esta zona del litoral pacífico de Costa Rica, un coeficiente de amplificación fuerte que es mayormente debido a efectos inerciales (Murillo 1993b, 1990, 1981) de las corrientes mareales y que suben significativamente (hasta en un 100%) el nivel medio de las aguas sobre el fondo del suelo marino. Sin embargo, una vez conocida esta

amplificación de la marea, simplemente, se varía el nivel de referencia de los datos apropiadamente con el fin de realizar las reducciones de profundidad requeridas para la construcción de las cartas hidrográficas.

En la zona de Bahía Culebra, que usaremos de ejemplo en este artículo, no existe tal amplificación y se puede notar que, por existir una onda estacionaria en toda la región pacífica centroamericana (Fleming, R.H., 1937, Murillo 1995), todos los tiempos de marea son similares en sitios no interiores al margen de costa centroamericana y, en consecuencia, se pueden usar datos de otras estaciones cercanas de la costa, no interiores, para hacer correcciones y verificaciones de las predicciones de las mareas.

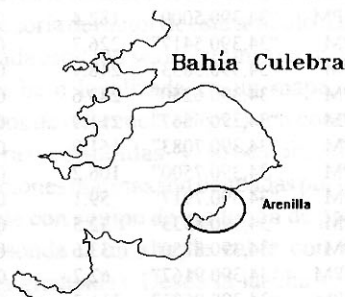


Figura No. 1. Localización de Playa Arenilla en Bahía Culebra. Guanacaste

Es recomendable llevar un registro de alturas de marea en el sitio a la hora de tomar las medidas de profundidad. Esto se hace para corregir las predicciones astronómicas por efectos de posibles mareas meteorológicas extraordinarias debidas a variaciones de la presión atmosférica, vientos, tsunamis, surgimientos u otros efectos atmosféricos o geofísicos.

CORRECCIÓN DE LA PROFUNDIDAD MEDIDA POR EFECTOS MAREALES

Debido a que las medidas de profundidad deben darse todas respecto a un nivel de referencia base, que sirva para la construcción de las cartas náuticas, se debe proceder a reducir las mediciones hechas durante la sesión de mediciones conociendo la hora

y el día. Con el conocimiento de la hora y del día se puede reducir la profundidad, medida a la profundidad con referencia al nivel base (por ejemplo el nivel de sicigias) mediante un reductor de mareas.

El Cuadro No 2 muestra un reductor de altura mareal para una medición de profundidad del día 25 de febrero de 1994, hecha a las 9:17. En este método, cuadros similares se construyen para cada medición de forma automática, usando los procedimientos de automatización (o Macros...) comunes a las hojas de cálculo modernas. En el Cuadro No. 2 los cálculos se han hecho en tiempo juliano para evitar los problemas del calendario común con años bisiestos y meses de duración variable.

Cuadro No. 1 Tabla Reductora de Mareas

Fecha	Alturas Horarias del Día								
Vier-25--Feb-94	940225	203.2	234.7	242.8	225	185	132.7	80.7	42.1
	26.7	38.6	75.1	127.3	182.4	227	248.9	243.6	
Fecha	Fecha Juliana	211.9	161.9	106.2	59.1	32.5	33.6	62.2	111.3
2/25/94 0:00	"34,389.9583"			Marea	Profundidad		Profundidad Reducida		
				46.51 cm	420.0 cm		373.492 cm		
Visita del 31/1/1994 al 3/2/1994 h=0.04									
Hora	Tiempo Juliano	Altura	Diferencias Finitas						
		lineal	1.ra	2.da	3.ra	x	x+h	Valor Cúbico	
0:00	"34,390.0000"	203.2	0	0	0	0.387	0.428	0	
1:00 AM	"34,390.0417"	234.7	0	31.5	0	0.345	0.387	0	
2:00 AM	"34,390.0833"	242.8	0	8.1	-23.4	0.303	0.345	0	
3:00 AM	"34,390.1250"	225	0	-17.8	-25.9	0.262	0.303	0	
4:00 AM	"34,390.1667"	185	0	-40	-22.2	0.22	0.262	0	
5:00 AM	"34,390.2083"	132.7	0	-52.3	-12.3	0.178	0.22	0	
6:00 AM	"34,390.2500"	80.7	0	-52	0.3	0.137	0.178	0	
7:00 AM	"34,390.2917"	42.1	0	-38.6	13.4	0.095	0.137	0	
8:00 AM	"34,390.3333"	26.7	0	-15.4	23.2	0.053	0.095	0	
9:00 AM	"34,390.3750"	38.6	48.94	11.9	27.3	0.012	0.053	46.508	
10:00 AM	"34,390.4167"	75.1	0	36.5	24.6	-0.03	0.012	0	
11:00 AM	"34,390.4583"	127.3	0	52.2	15.7	-0.072	-0.03	0	
12:00 PM	"34,390.5000"	182.4	0	55.1	2.9	-0.113	-0.072	0	
1:00 PM	"34,390.5417"	226.7	0	44.3	-10.8	-0.155	-0.113	0	
2:00 PM	"34,390.5833"	248.9	0	22.2	-22.1	-0.197	-0.155	0	
3:00 PM	"34,390.6250"	243.6	0	-5.3	-27.5	-0.238	-0.197	0	
4:00 PM	"34,390.6667"	211.9	0	-31.7	-26.4	-0.28	-0.238	0	
5:00 PM	"34,390.7083"	161.9	0	-50	-18.3	-0.322	-0.28	0	
6:00 PM	"34,390.7500"	106.2	0	-55.7	-5.7	-0.363	-0.322	0	
7:00 PM	"34,390.7917"	59.1	0	-47.1	8.6	-0.405	-0.363	0	
8:00 PM	"34,390.8333"	32.5	0	-26.6	20.5	-0.447	-0.405	0	
9:00 PM	"34,390.8750"	33.6	0	1.1	27.7	-0.488	-0.447	0	
10:00 PM	"34,390.9167"	62.2	0	28.6	27.5	-0.53	-0.488	0	
11:00 PM	"34,390.9583"	111.3	0	49.1	20.5	-0.572	-0.53	0	
Valor Interpolado Lineal y Cúbico en centímetros									
Hora	Altura	Linealmente Interpolada				Altura Cúbicamente Interpolada			
9:17 AM	46.5084	48.94166669				46.508			