



4 RESULTADOS

4.1 NIVEL MEDIO DEL MAR

La serie del mareógrafo de Panamá, a pesar de estar alejada del Caribe colombiano puede tomarse como referencia pues las variaciones del nivel cerca de las costas de Panamá y sus límites con Colombia son mínimos. Además, esta serie posee una longitud de registro de 91 años continuos, siendo la mayor serie de nivel horario en la zona de estudio y con muy poco porcentaje de faltantes que permite realizar este cálculo (Figura 16). Serie del mareógrafo de San Cristóbal - Panamá con tendencia lineal de ascenso de 0.0004 m/año.

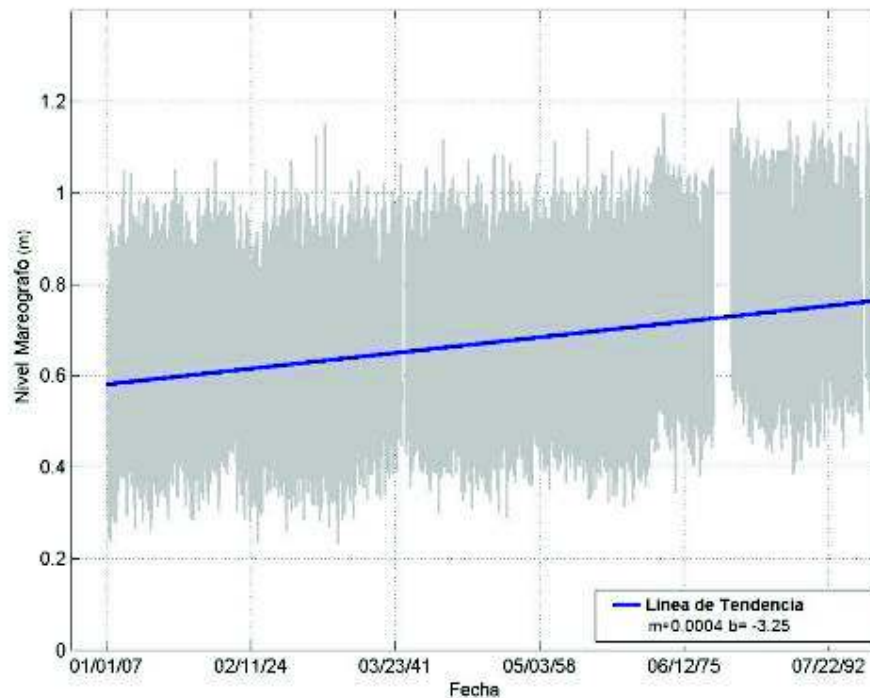


Figura 16. Nivel medio del mar en San Cristóbal – m y b corresponden a la pendiente e intercepto de la línea de tendencia esquematizada en azul

Las dos series de Cartagena se llevaron a la misma media y la resultante (Figura 17) es una serie con una longitud de registro de 43 años continuos con muy poco porcentaje de faltantes que permite estimar el nivel medio del mar para la zona central de la costa Caribe colombiana. Serie del mareógrafo de Cartagena - Colombia con tendencia lineal de ascenso de 0.0055 m/año

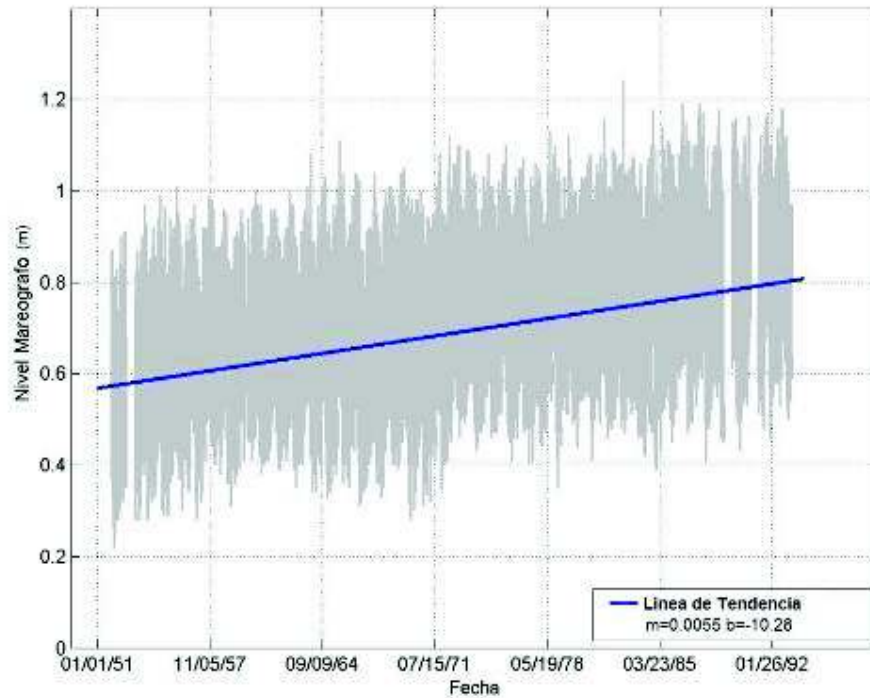


Figura 17. Nivel medio del mar en Cartagena de Indias – m y b corresponden a la pendiente e intercepto de la línea de tendencia esquematizada en azul.

La serie de Riohacha a pesar de su resolución mensual tiene una longitud de registro apropiada, ya que con 17 años y tan solo con el 4 % de faltantes permite realizar el cálculo del nivel medio para la región NE de la costa Caribe (Figura 18). Serie del mareógrafo de Riohacha - Colombia con tendencia lineal de ascenso no significativa.

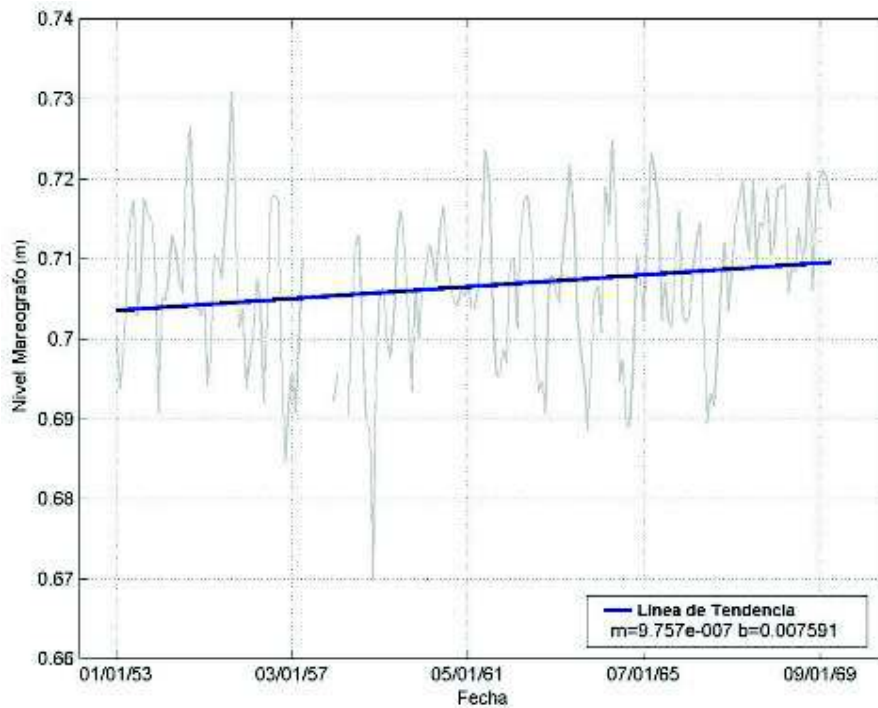
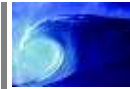


Figura 18. Nivel medio del mar en Riohacha – m y b corresponden a la pendiente e intercepto de la línea de tendencia esquematizada en azul.

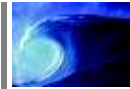
Dadas las anteriores consideraciones, se presenta el cálculo para el nivel medio del mar en la zona de estudio por medio de las siguientes ecuaciones en cada unas de las diferentes zonas en el Caribe Colombiano, así:

Caribe Norte: Cuyos límites van desde la península de La Guajira hasta la ciudad de Santa Marta. $NMN = 0.0004 (\text{Fecha} *) - 3.25$

Caribe Centro: Cuyos límites van desde a ciudad de Santa Marta hasta el Golfo de Morrosquillo. $MNC = 0.0055 (\text{Fecha} *) - 10.28$

Caribe Sur: Cuyos límites van desde el Golfo de Morrosquillo hasta el Golfo de Urabá. $NMS = 0.0000009 (\text{Fecha} *) + 0.0076$.

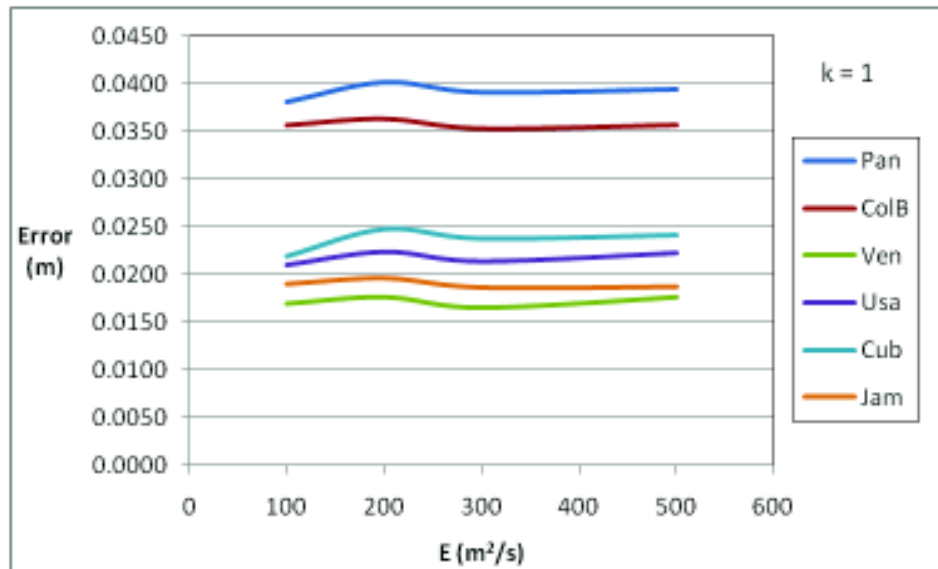
* Corresponde a la fecha en Juliano.



4.2 MAREAS

4.2.1 MAREA ASTRONOMICA

A los resultados obtenidos de las simulaciones se les calculó el error cuadrático medio entre la serie de marea astronómica de cada estación y el nivel simulado por el modelo, obteniendo que la mejor combinación de los valores ε y k_s fue de 300 y 1 respectivamente ya que esta combinación presentaba los menores errores, estos errores se presentan a continuación.



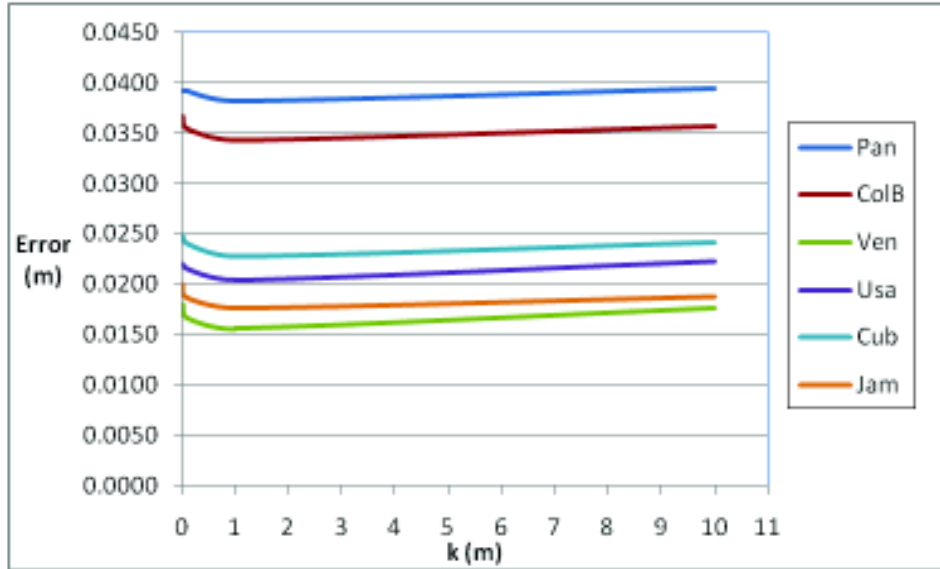
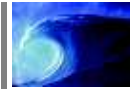
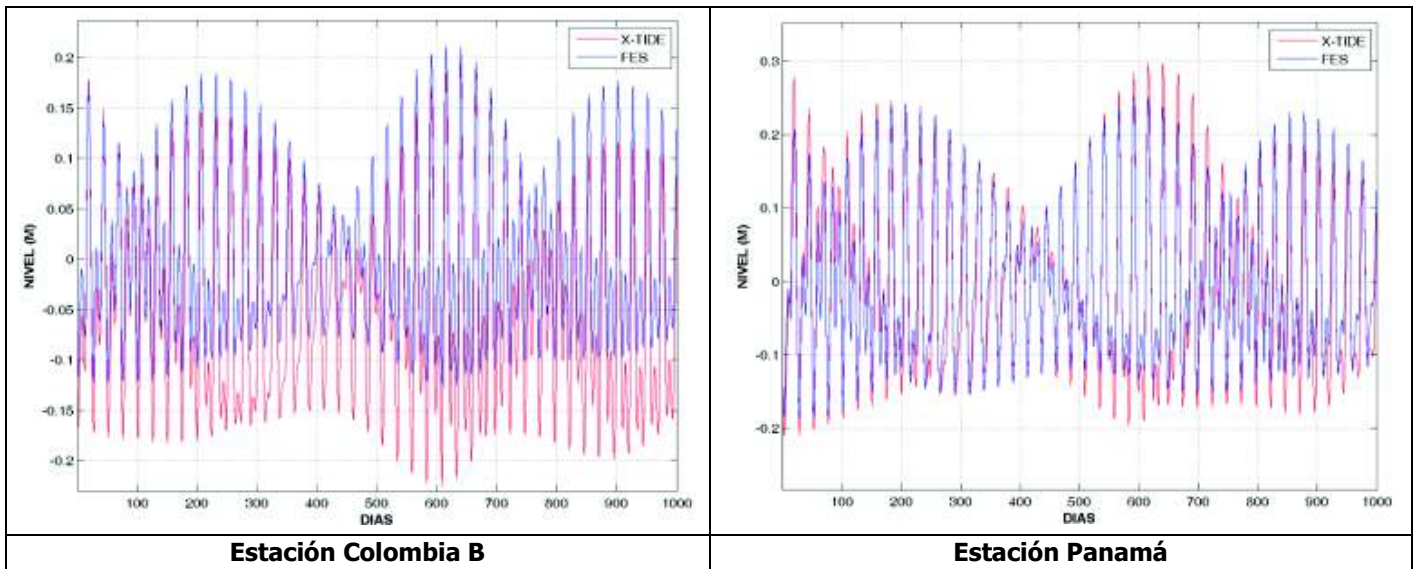


Figura 19. Error cuadrático medio calculado entre las estaciones de medición y las simuladas por el modelo

En la Figura 20 se presentan la comparación de los resultados de marea astronómica reconstruida utilizando los valores de los armónicos del modelo FES 2004 comparadas con las series de marea astronómica filtradas por medio del algoritmo X_Tide donde se cuenta con registro de los mareógrafos.



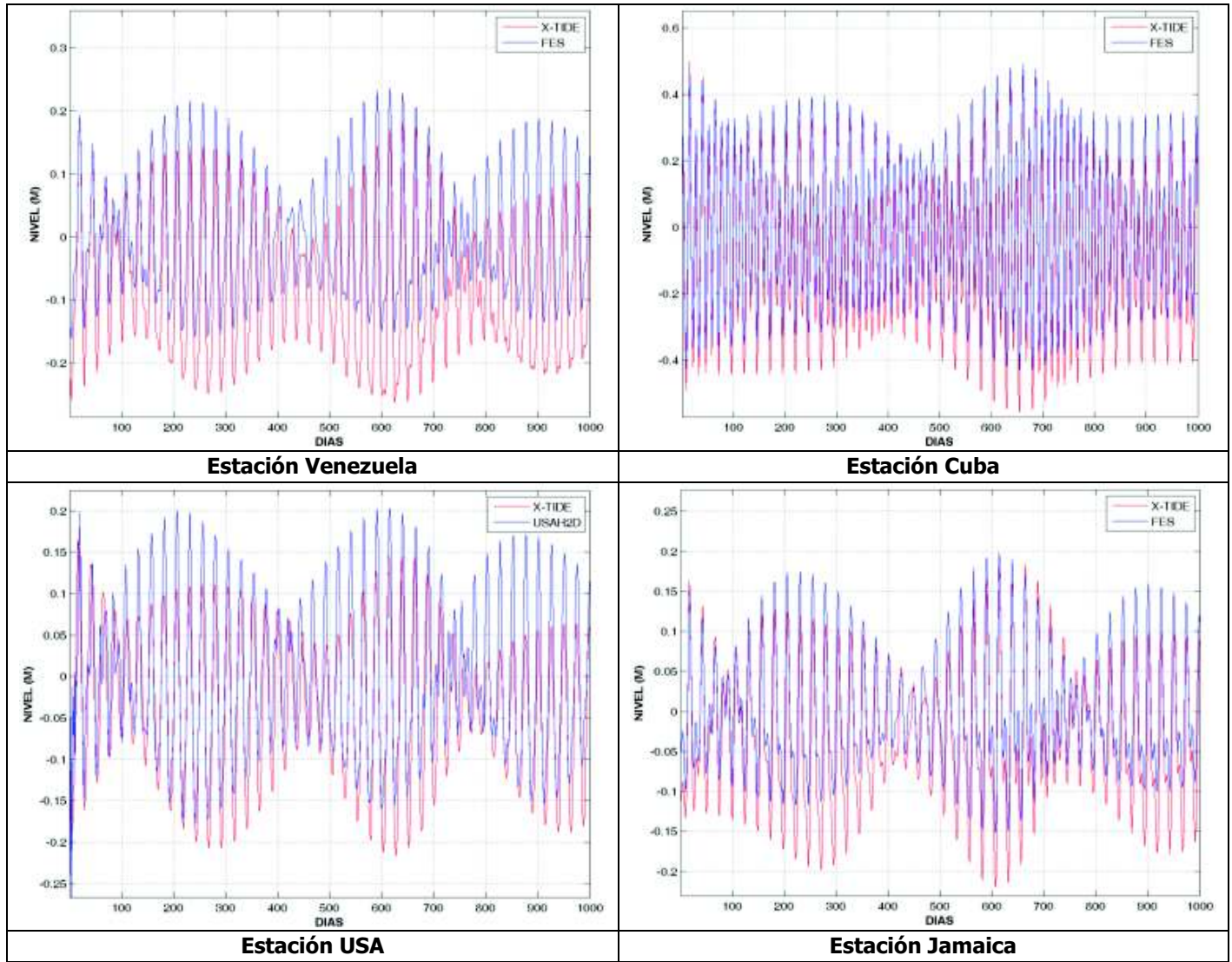
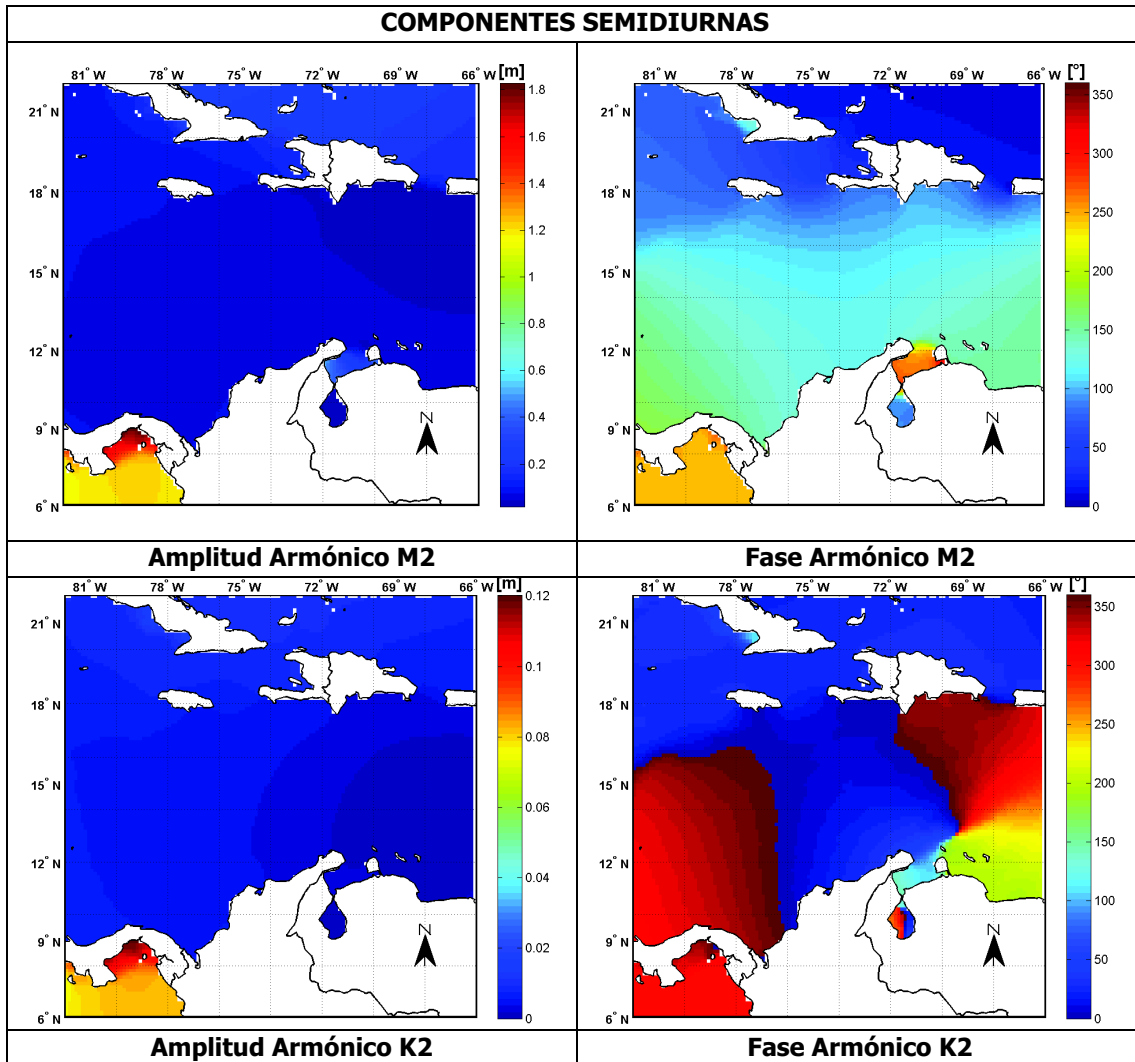


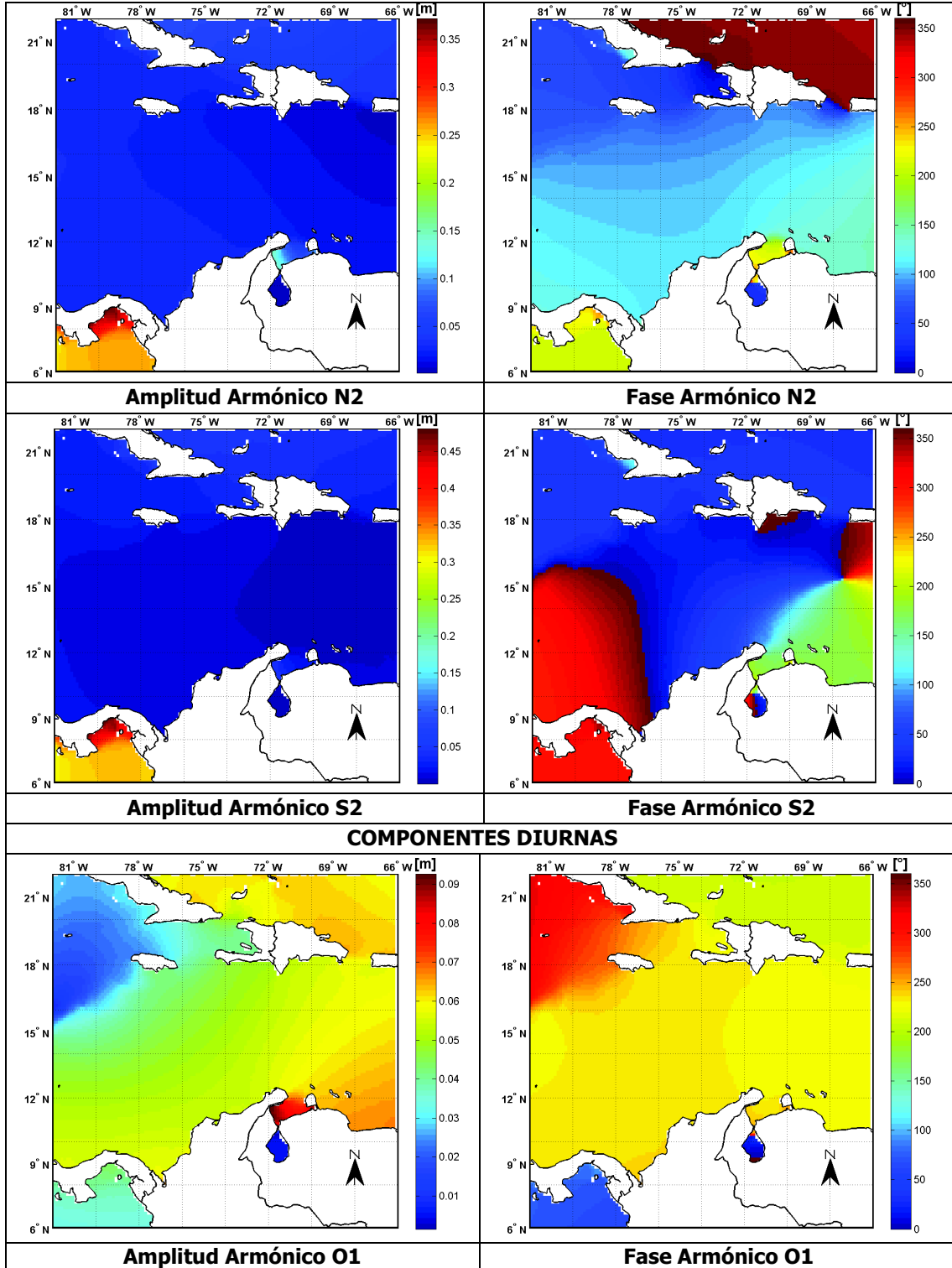
Figura 20. Comparación Marea Astronómica FES 2004 vs Análisis de Armónicos Mareógrafos (XTide) para el Caribe

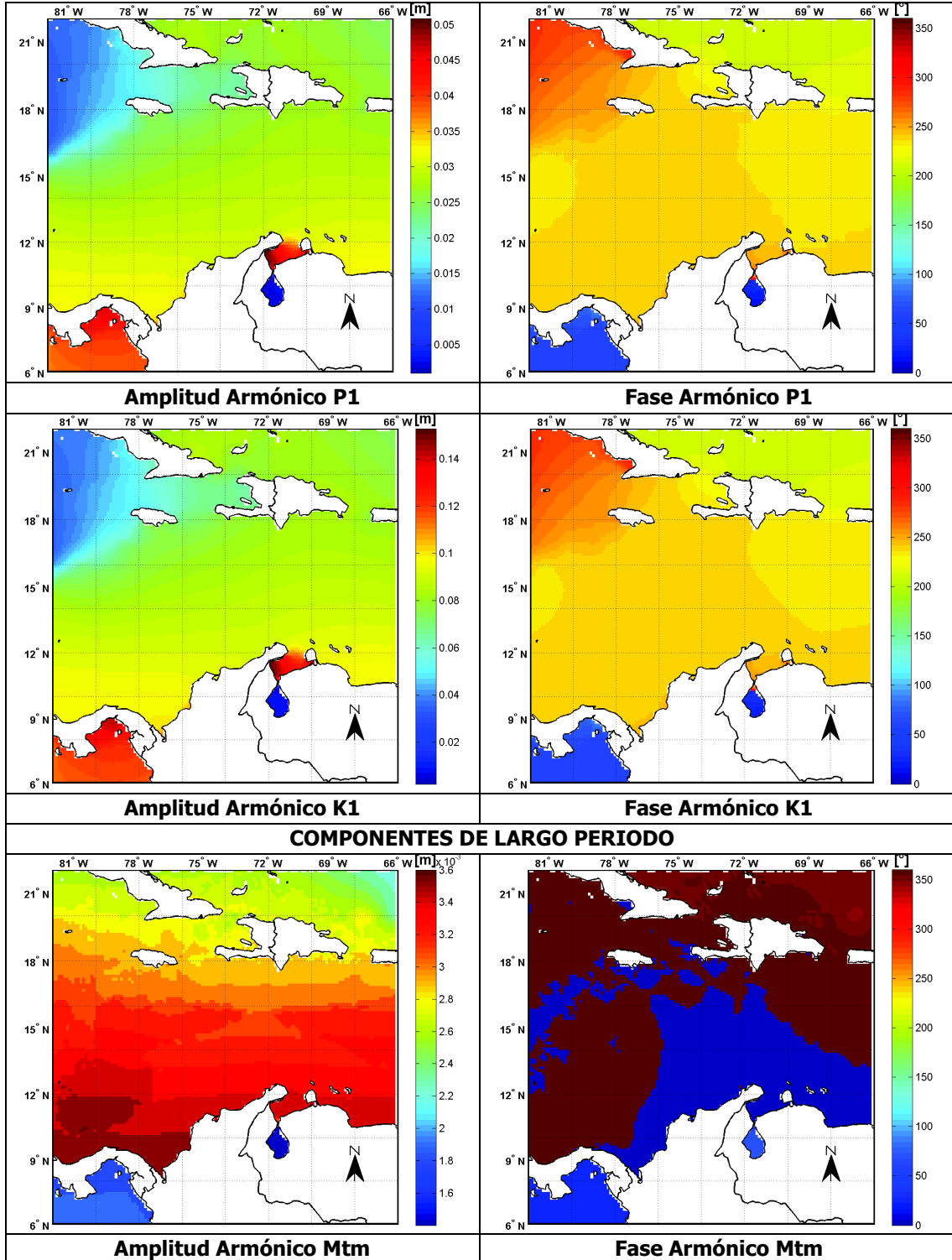
Esta comparación indica que las series reconstruidas a partir del modelo FES 2004 representan más del 90% de las series extraídas de cada mareógrafo, a pesar de que en ciertas partes de la gráfica se presentan diferencias, corresponden a subarmónicos que no son significativos para las serie astronómica, ya que un análisis armónico completo de los datos de un mareógrafo incluye unos 100 constituyentes y el FES 2004 cuenta con 14 armónicos, lo que muestra que la metodología empleada para la predicción de la marea astronómica a partir del FES 2004 es confiable. En la mayoría de las situaciones y para propósitos de predicciones a lo largo de un año es suficiente con incluir solamente M2, S2, K1 y O1. En la práctica, las predicciones que se producen por computadora para publicar las tablas de marea oficiales utilizan muchos más



términos que estos cuatro. Por ejemplo, el Departamento Nacional de Mareas en Australia utiliza 115 términos para producir las Tablas de Marea oficiales de ese país. A partir de los resultados espaciales del FES 2004 se generaron los mapas comareales de la región para los 9 armónicos principales de la marea (Figura 21).







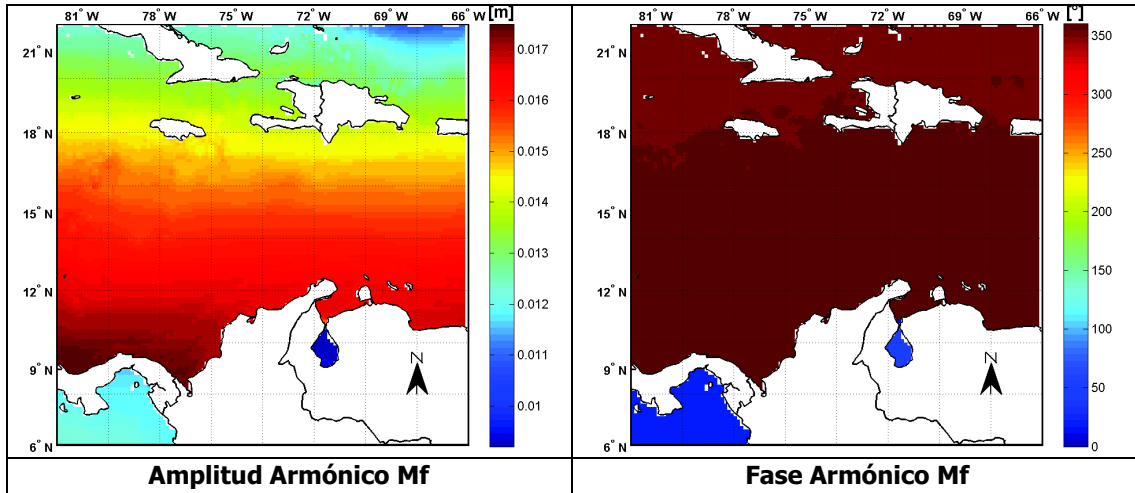


Figura 21. Amplitudes y Fases armónicos en la zona de estudio (FES 2004)

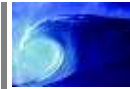
Los valores de amplitud son muy pequeños comparados con otros mares, indicando que el régimen de mareas en el Caribe Colombiano es de tipo micromareal. La línea comareal, representa la marea alta referidos al paso de la Luna por el meridiano de Greenwich. Uno de los armónicos más importante es el S2 que corresponde a la componente del Sol, con un periodo asociado de medio día. Nótese que se presenta una rotación en contra de las manecillas del reloj cerca a Puerto Rico a partir del cual crece hacia Cuba. Este punto es llamado punto anfodrómico y en él la altura de la marea es cero. Esto produce una marea cuyo rango (altura entre marea baja y alta), es realmente pequeño, teniendo un promedio de 30 cm, y un máximo de 50 cm. Para clasificar las mareas se utiliza el Número de Forma F definido como

$$F = (K1 + O1) / (M2 + S2)$$

donde los símbolos de las constituyentes indican los valores de las amplitudes para el armónico indicado. De acuerdo con el valor de F se distinguen cuatro categorías:

Tabla 5. Categoría y valor del numero de Forma

Valor de F	Categoría
0 - 0.25	Semidiurna
0.25 - 1.5	Mixta, principalmente semidiurna
1.5 - 3	Mixta, principalmente diurna
> 3	Diurna



En la Figura 22 se observa que la marea en el Caribe colombiano es de tipo mixta, principalmente diurna, lo que indica un máximo dominante y un mínimo por día, dos mareas altas y dos bajas durante las mareas vivas.

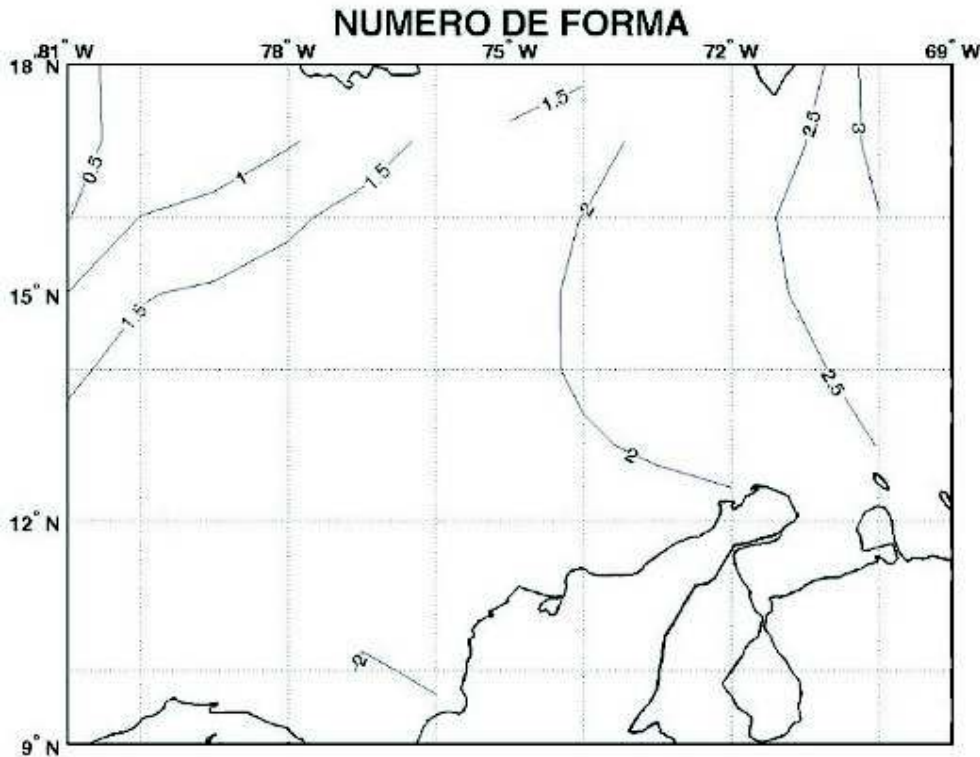


Figura 22. Tipo de Marea en el Caribe Colombiano

Tabla 6. Amplitudes de los mareógrafos en el Caribe (cm)

Armónicos	Cartagena-B	Cristóbal	Gibara	La Guaira	Magueyes Island,PR	Port Royal
M2	6.99	8.16	27.39	4.62	0.67	4.76
K2	0.56	0.38	0.95	0.11	0.35	0.57
S2	1.70	1.28	4.46	0.59	0.89	2.11
N2	2.35	2.63	6.76	1.50	0.37	1.97
O1	3.68	5.60	5.58	6.36	5.68	4.35
P1	1.31	3.05	2.32	3.04	2.46	2.15
K1	5.51	9.57	8.20	9.52	8.17	6.83
Mtm	0.80	1.03	0.64	0.75	0.67	0.95
Mf	0.90	1.73	1.51	1.93	1.45	1.90

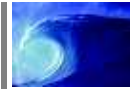
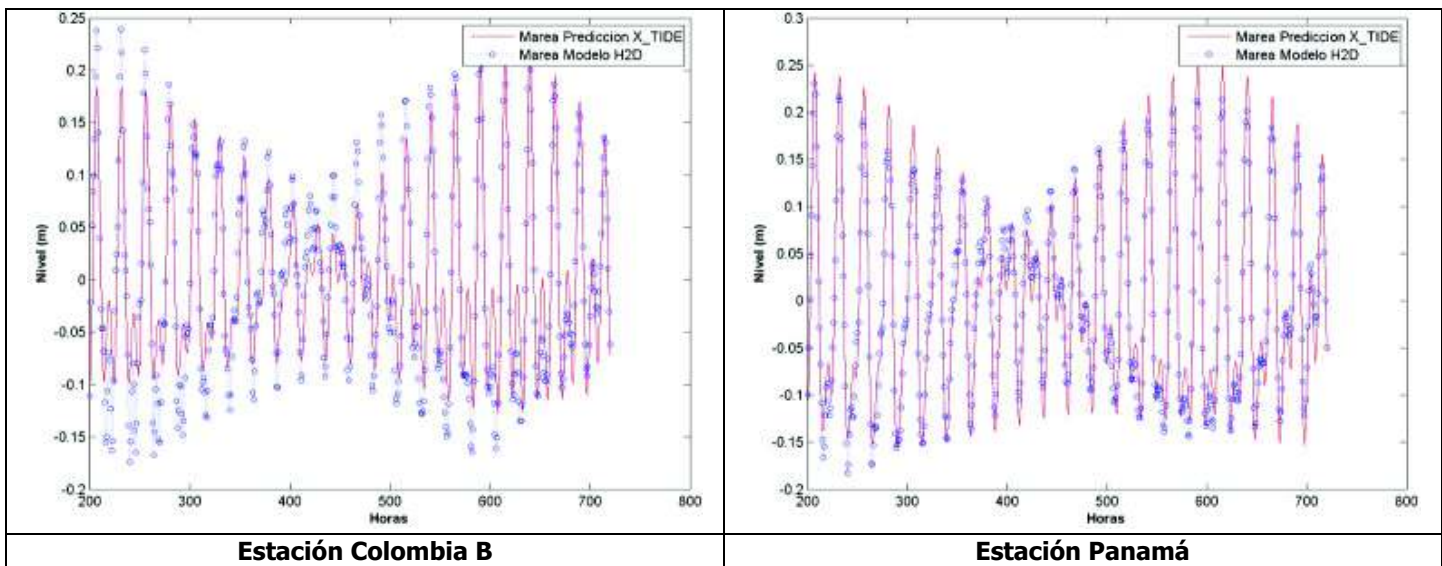


Tabla 7. Fases de los mareógrafos en el Caribe (°)

Armónicos	Cartagena-B	Cristóbal	Gibara	La Guaira	Magueyes Island,PR	Port Royal
M2	141.36	165.93	9.85	157.96	4.14	91.04
K2	45.76	358.72	33.86	113.19	341.71	23.77
S2	51.86	355.89	35.92	145.88	334.31	32.32
N2	115.55	125.10	352.26	140.18	77.30	82.42
O1	228.25	229.86	207.67	230.40	202.50	238.73
P1	241.25	242.24	207.01	240.58	221.62	238.06
K1	250.88	248.60	205.23	241.40	227.68	237.90
Mtm	346.06	355.96	352.56	335.01	349.73	347.25
Mf	357.37	0.18	339.85	346.44	354.06	1.74

Los resultados de marea astronómica del modelo H2D fueron comparados con las series de marea astronómica extraídas de los diferentes mareógrafos utilizados en la zona de estudio (Caribe colombiano). Estos resultados carecen de nivel de referencia ya que en la configuración del modelo lo asume así; esta suposición la asume el modelo ya que el nivel medio el mar presenta variaciones significativas en diferentes zonas del mundo y el modelo no reproduce estas variaciones.



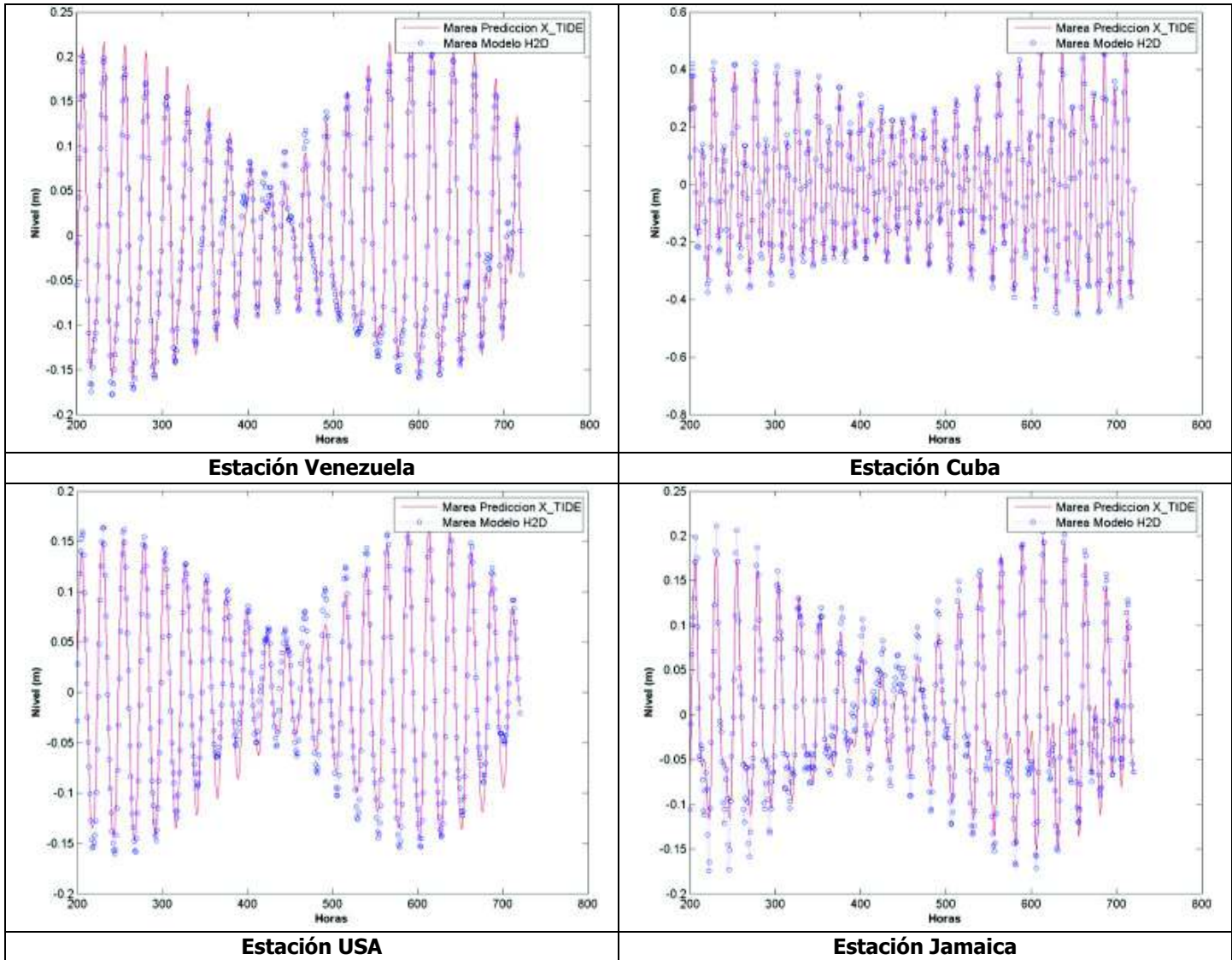
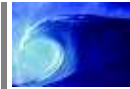


Figura 23. Comparación Marea Astronómica H2D vs Análisis de Armónicos Mareógrafos para el Caribe

Como se observa en Figura 23 los resultados en los mareógrafos que se presentan para las diferentes estaciones simuladas son cercanos a la serie real, la marea astronómica está siendo representada por el modelo en gran parte de la serie. Adicional a esto se simularon puntos cercanos a las costas colombianas como se mostró en la Figura 4 para así reconstruir esta variable tanto de forma temporal como espacial. A las series reconstruidas se les realizó un análisis de armónicos para obtener los valores de amplitudes y fases para Colombia.



Tabla 8. Amplitudes de los armónicos de marea en las estaciones definidas para el Caribe colombiano (cm)

Armónicos	Golfo de Urabá	Golfo de Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
M2	5.64	5.16	5.02	4.97	4.92	4.93
K2	0.43	0.42	0.42	0.41	0.4	0.39
S2	1.58	1.54	1.53	1.5	1.49	1.44
N2	2.36	2.21	2.14	2.08	2.04	1.97
O1	6.29	6.15	6.16	6.15	6.13	6.08
P1	3.27	3.18	3.16	3.13	3.1	3.05
K1	9.87	9.59	9.54	9.45	9.38	9.22
Mtm	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Mf	1.58	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51

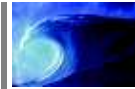
Tabla 9. Fases de los armónicos de marea en de las estaciones definidas para el Caribe (°)

Armónicos	Golfo de Urabá	Golfo de Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
M2	128.03	115.21	110.25	105.90	103.05	97.62
K2	331.78	343.79	348.15	352.59	355.49	0.72
S2	309.38	321.39	325.75	330.19	333.09	338.32
N2	86.95	81.55	79.74	78.32	77.32	74.70
O1	241.67	241.79	241.74	241.65	241.66	241.64
P1	223.20	223.10	223.10	223.01	222.98	222.83
K1	216.13	216.03	216.03	215.94	215.91	215.76
Mtm	268.59	262.43	262.42	261.66	263.15	267.38
Mf	102.46	100.95	101.51	101.16	100.71	99.96

En el caso del Caribe para las estaciones seleccionadas a lo largo de la costa colombiana, se presentan los valores de número de forma mostrados en la Tabla 10.

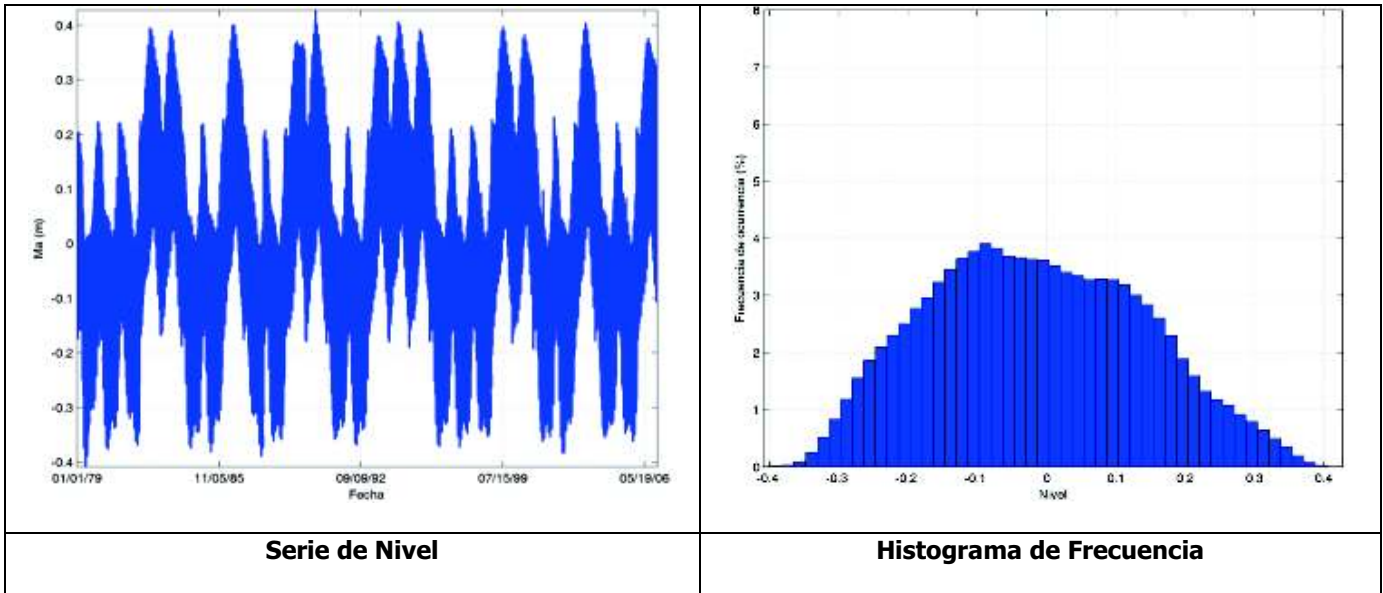
Tabla 10. Categoría y valor del numero de Forma para las ubicaciones en el Caribe colombiano

Estación	Valor de F	Estación	Valor de F
Golfo de Urabá	2.24	Barranquilla	2.40
Golfo Morrosquillo	2.60	Santa Marta	2.41
Cartagena	2.35	Guajira	2.40



De la Figura 24 a la Figura 29 se presentan los análisis estadísticos realizados para algunos de los puntos donde se reconstruyó la marea astronómica.

Para el Golfo de Urabá (Figura 24) se presentan valores mínimos y máximos de -0.4 m y 0.4 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.15 m y 0.2 m. La función de probabilidad acumulada muestra que los valores no superan los 0.4 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica que supera los 0.30 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de enero y a abril y las máximas en los meses de octubre a diciembre. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.1 y -0.1 m.



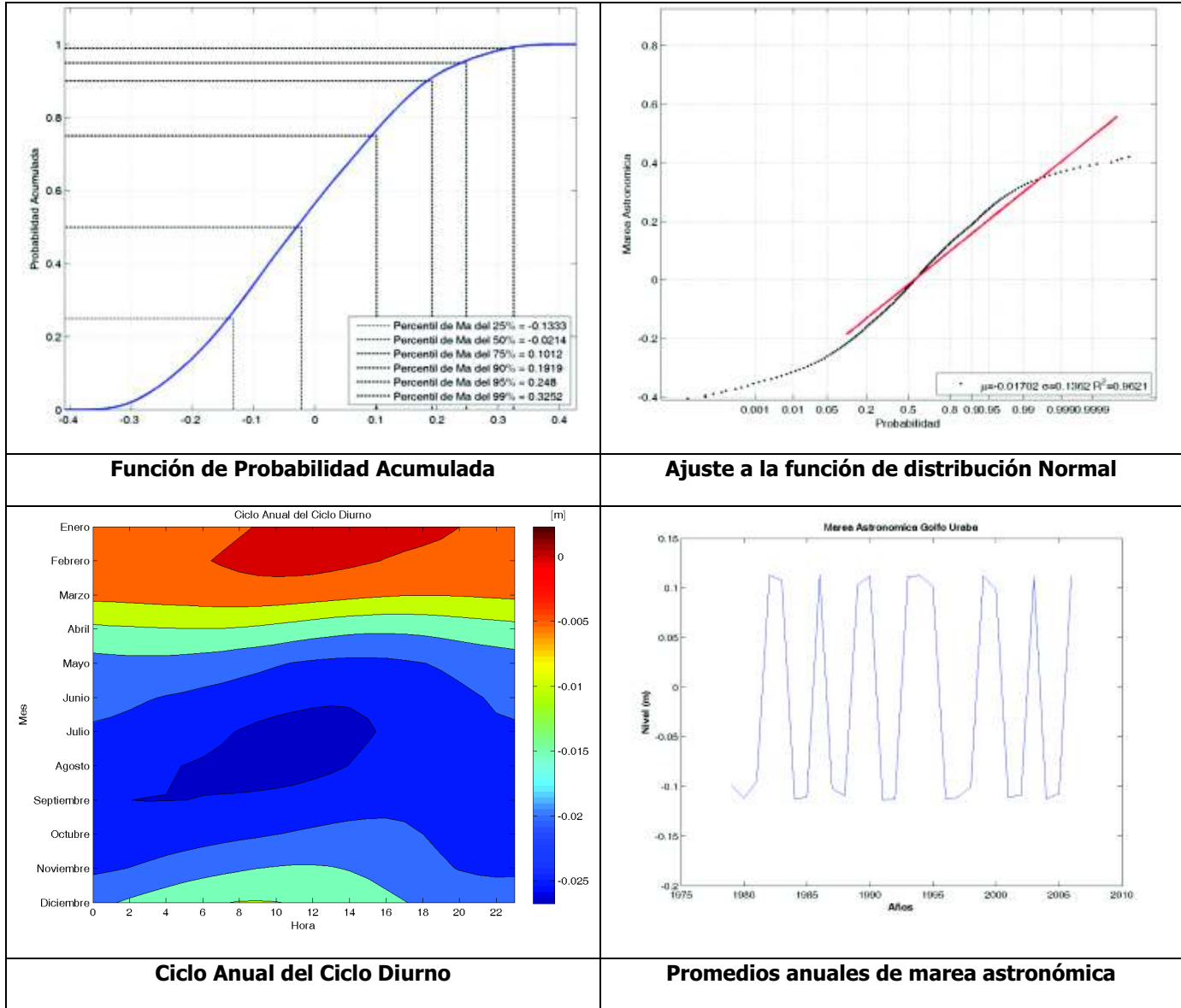
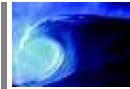
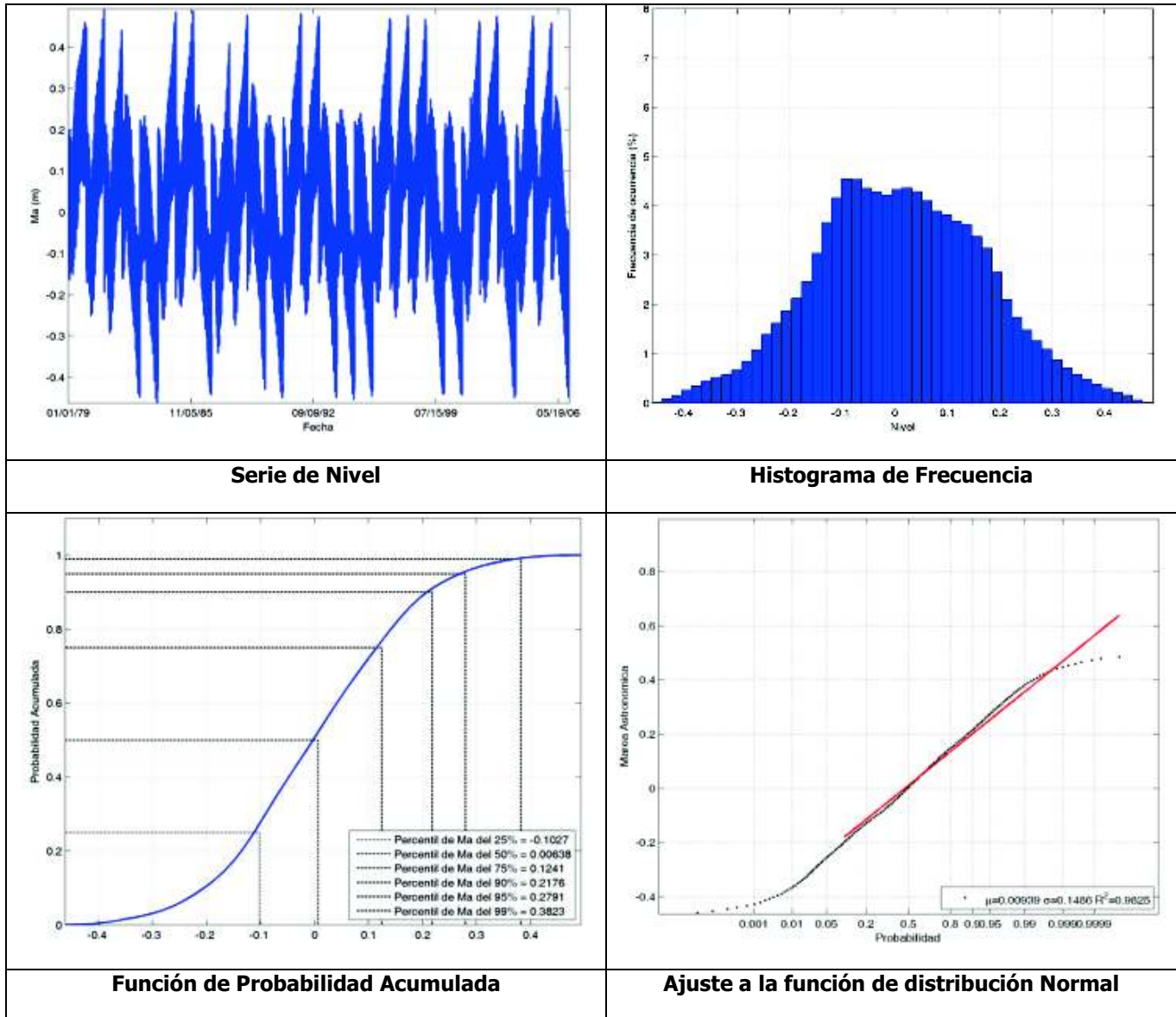


Figura 24. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en el Golfo de Urabá

Para el Golfo de Morrosquillo (Figura 25) se presentan valores mínimos y máximos de -0.45 m y 0.45 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.2 m y 0.3 m. La función de probabilidad acumulada muestra que los valores no superan los 0.45 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica



que supera los 0.40 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de marzo y abril y las máximas en los meses de noviembre a diciembre. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.15 y -0.1 m.



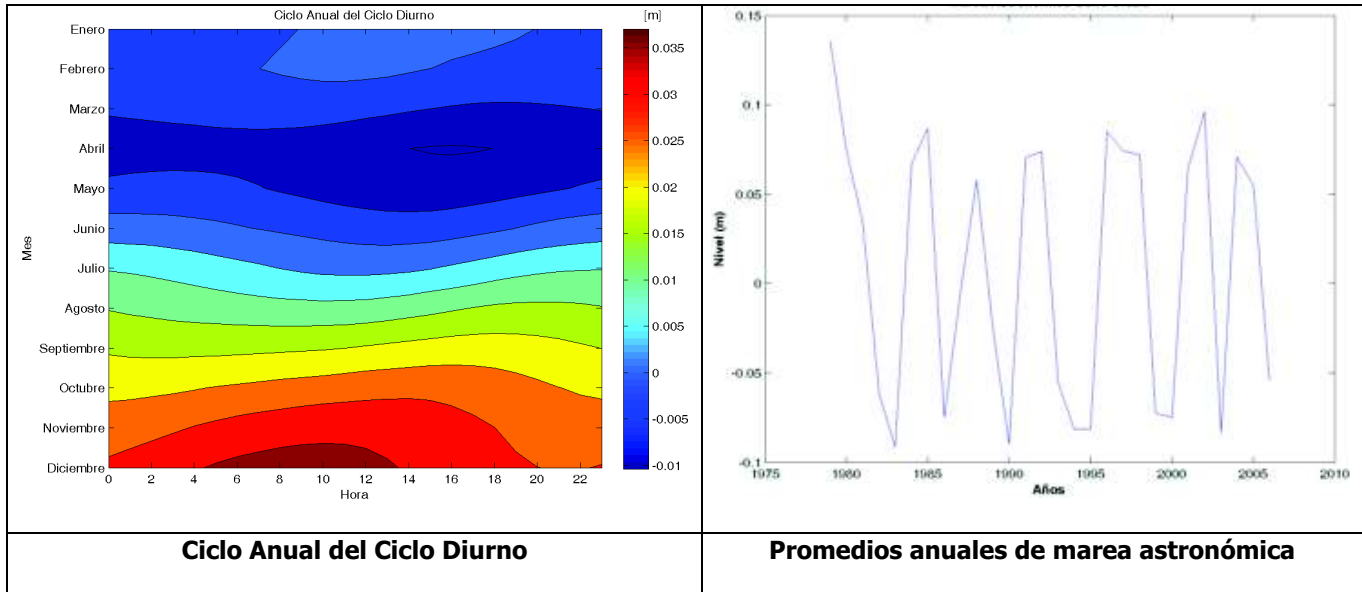
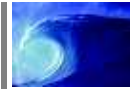
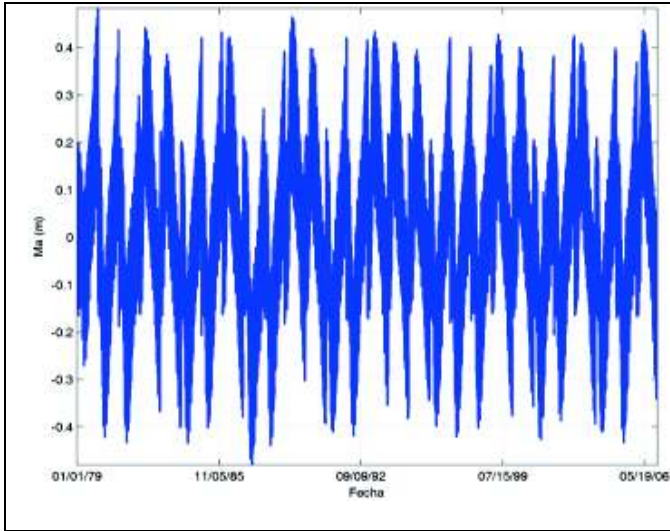
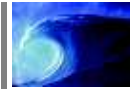
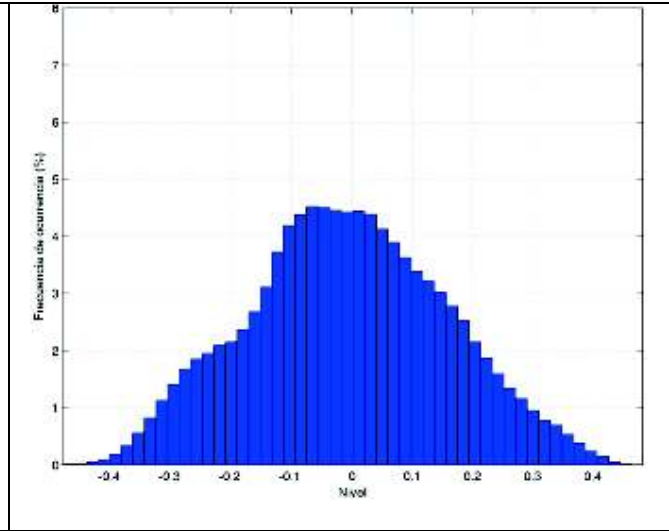


Figura 25. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en el Golfo de Morrosquillo

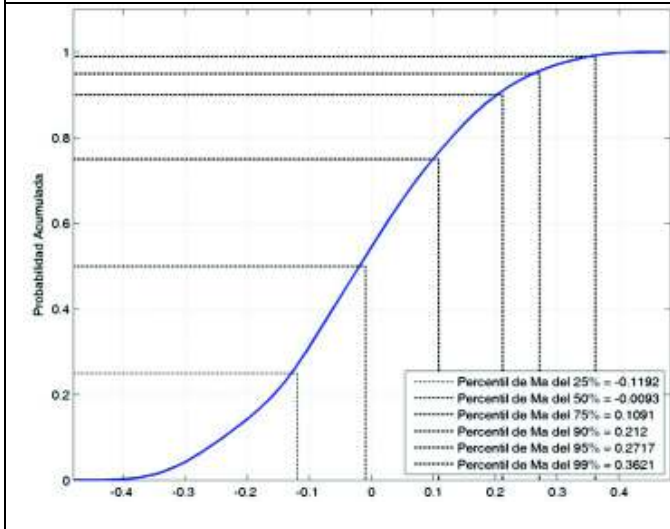
Para Cartagena (Figura 26) se presentan valores mínimos y máximos de -0.5 m y 0.5 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.2 m y 0.25 m. La función de distribución muestra que los valores no superan los 0.5 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica que supera los 0.40 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de abril y mayo y las máximas en los meses de noviembre a diciembre. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.1 y -0.15 m.



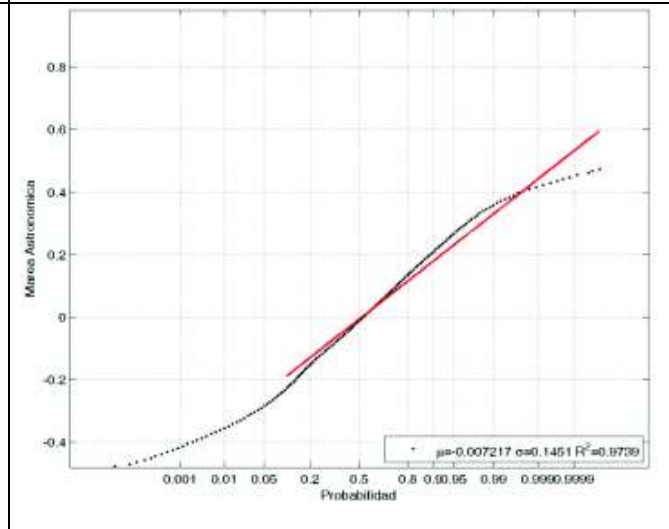
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

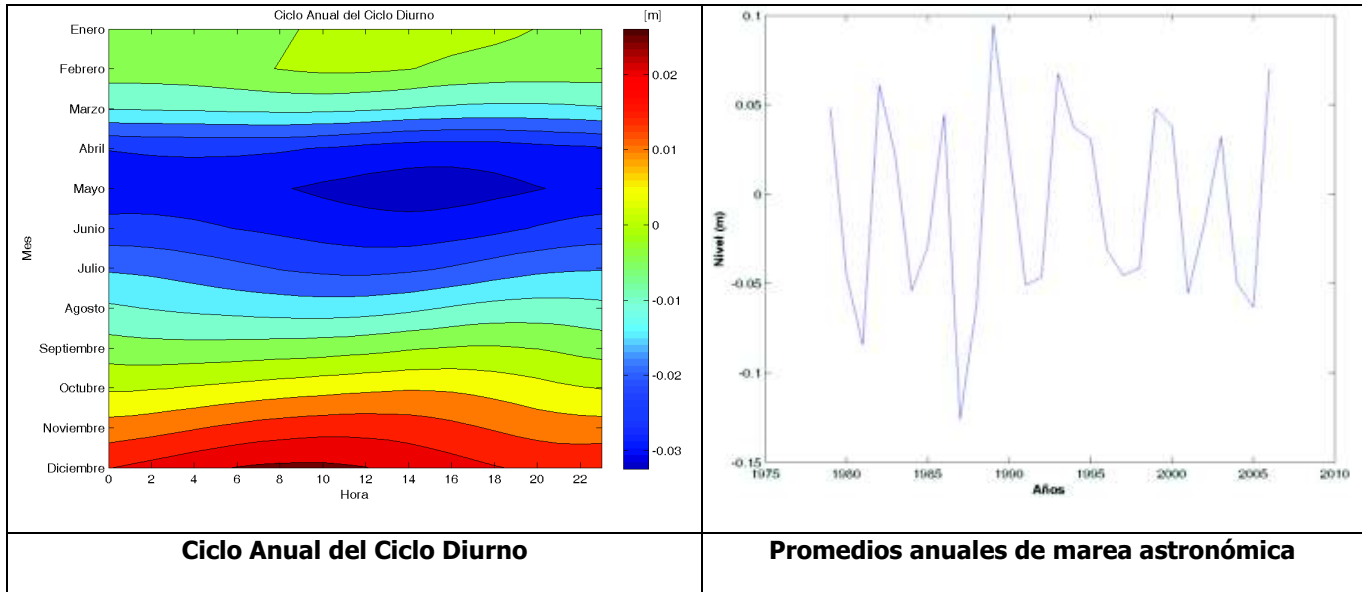
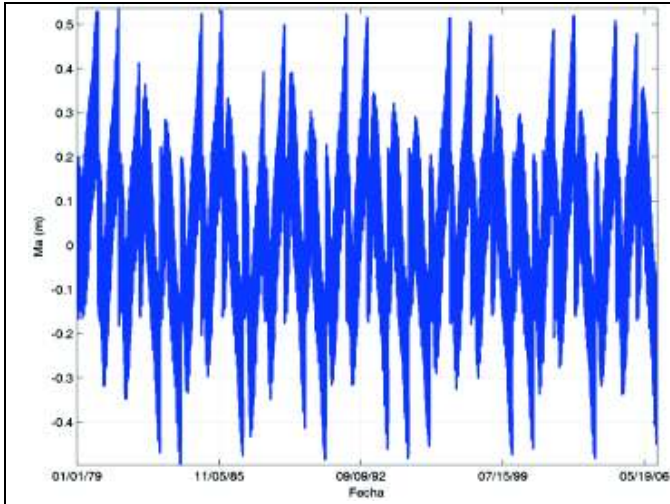
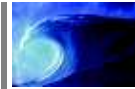
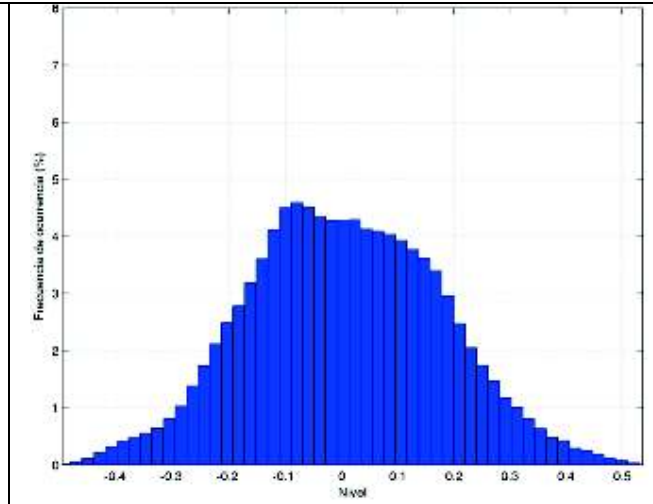


Figura 26. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en Cartagena

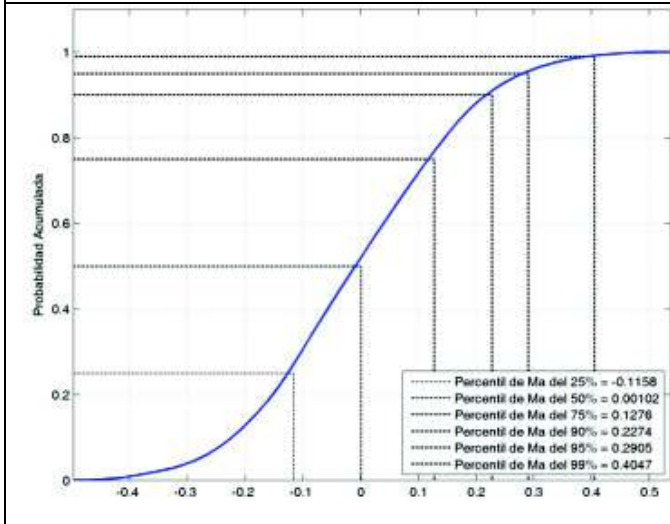
Para Barranquilla (Figura 27) se presentan valores mínimos y máximos de -0.5 m y 0.5 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.3 m y 0.3 m. La función de distribución muestra que los valores no superan los 0.5 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica que supera los 0.40 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de abril y mayo y las máximas en los meses de noviembre a diciembre. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.15 y -0.08 m.



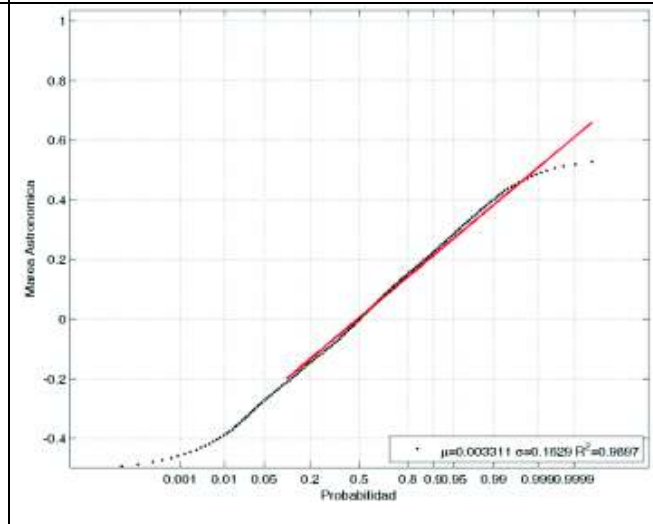
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

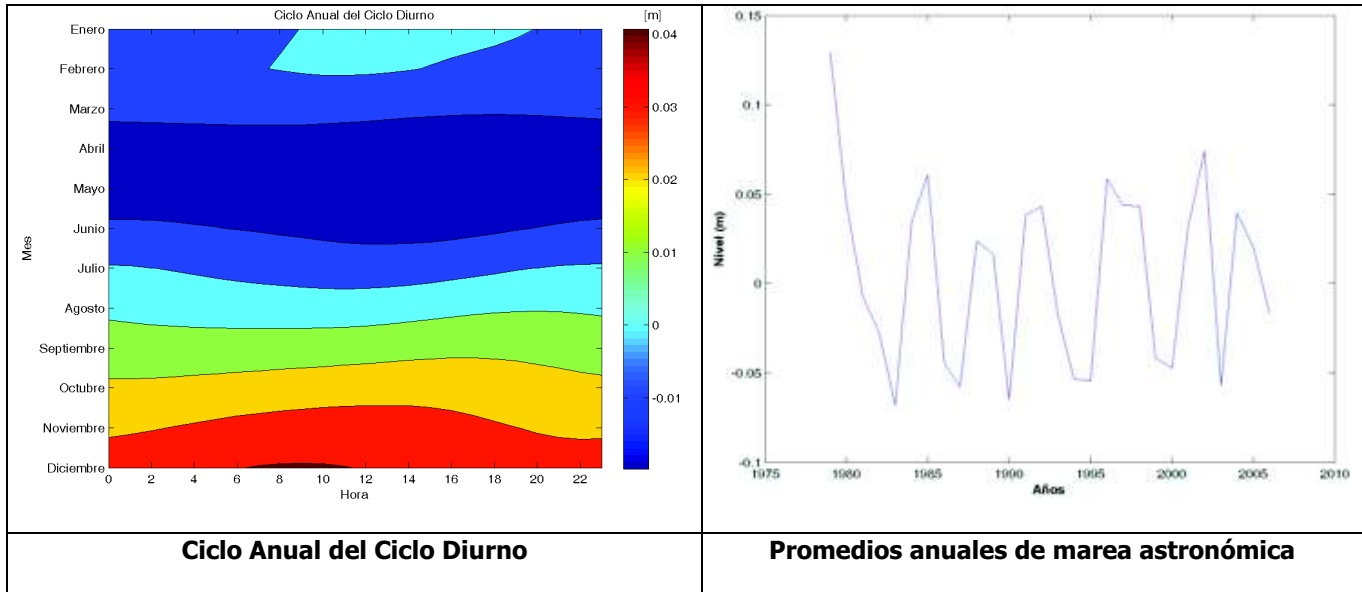
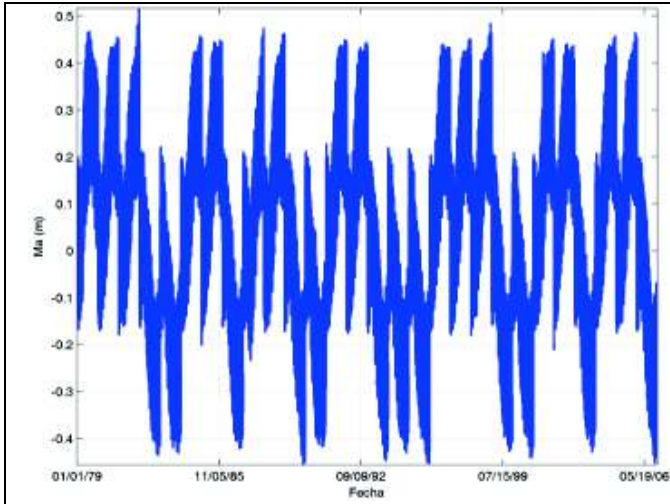
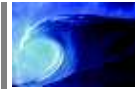
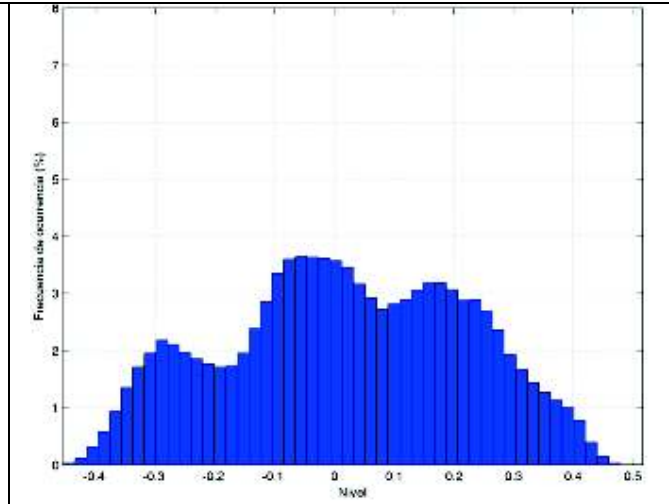


Figura 27. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en Barranquilla

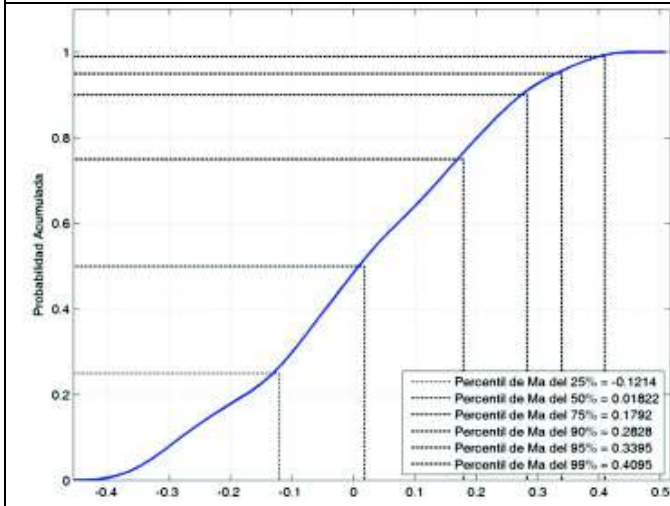
Para Santa Marta (Figura 28) se presentan valores mínimos y máximos de -0.5 m y 0.5 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.2 m y 0.2 m. La función de distribución muestra que los valores no superan los 0.5 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica que supera los 0.40 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de enero y febrero y las máximas en los meses de noviembre a diciembre. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.18 y -0.15 m.



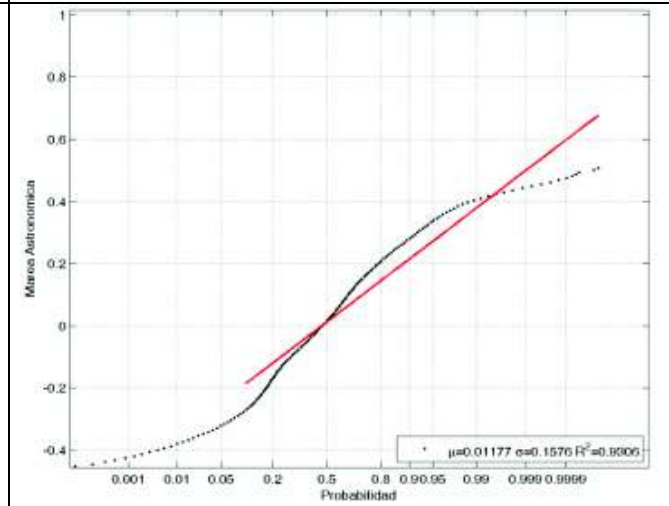
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

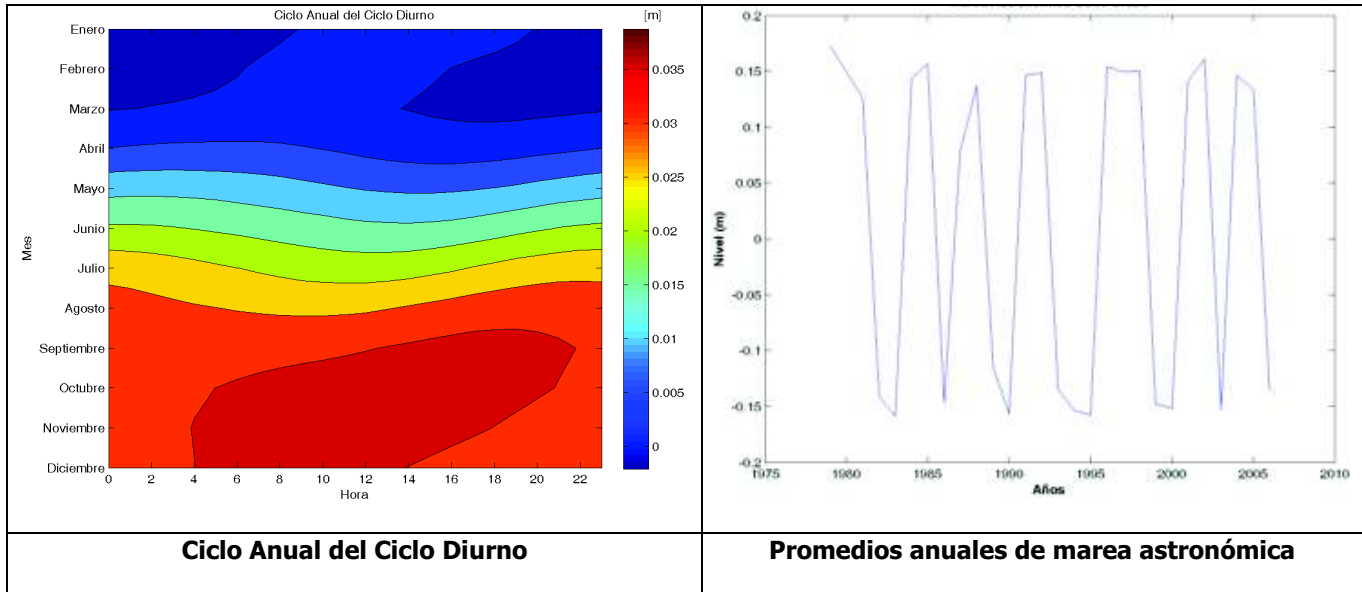
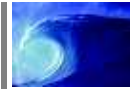
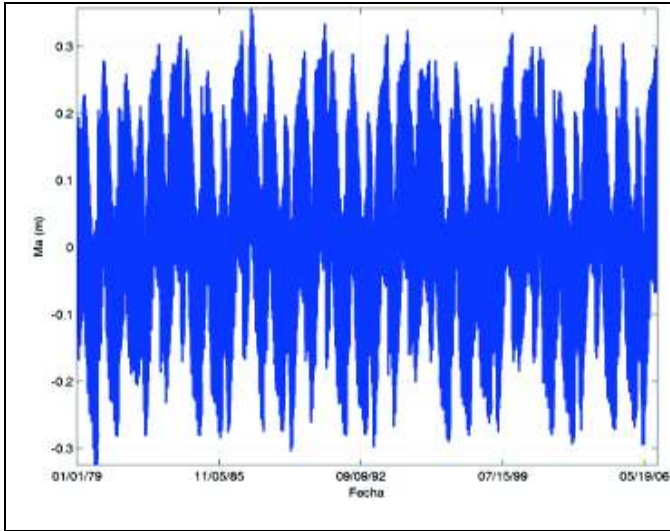
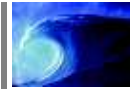
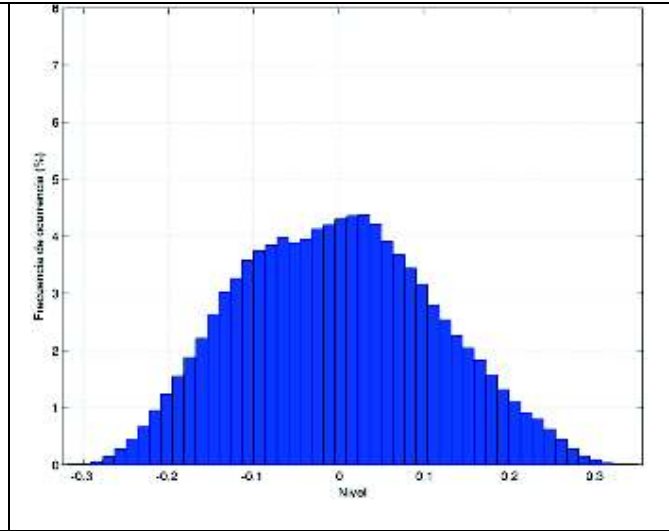


Figura 28. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en Santa Marta

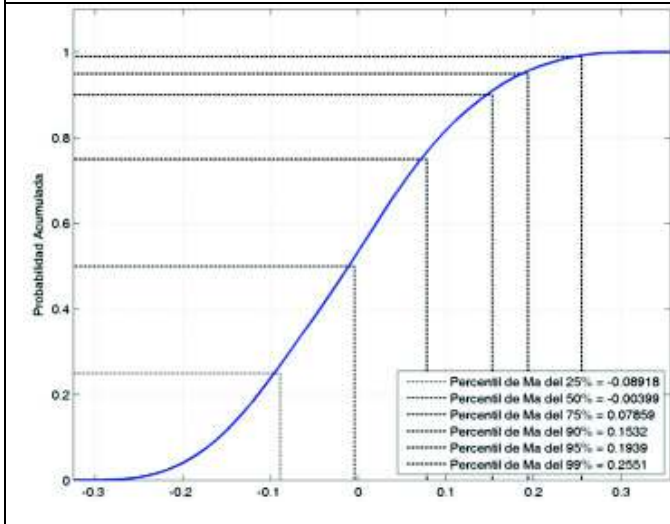
Por último, para Riohacha (Figura 29) se presentan valores mínimos y máximos de -0.3 m y 0.3 m respectivamente con respecto al nivel de la marea astronómica, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra las máximas frecuencias en torno al cero, también se observa un pequeño ciclo entre -0.15 m y 0.1 m. La función de distribución muestra que los valores no superan los 0.3 m. El régimen medio de marea astronómica presenta para una probabilidad del 99%, lo que representa un total de 86 horas al año, un nivel de marea astronómica que supera los 0.25 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de noviembre a diciembre y las máximas en los meses de abril a junio. La gráfica de promedios anuales muestra el comportamiento cíclico de la marea entre 0.05 y -0.05 m.



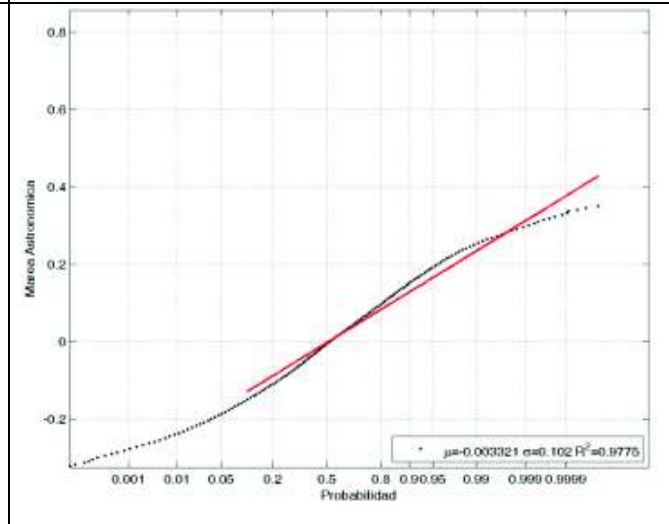
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

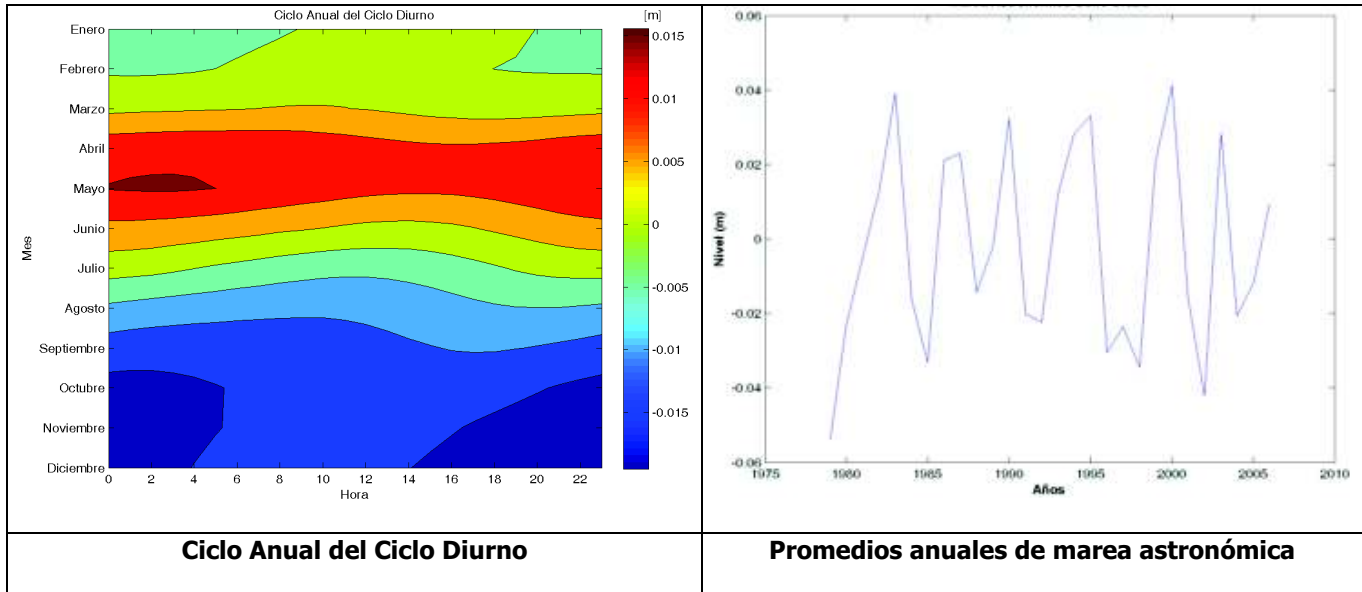


Figura 29. Análisis estadísticos de la serie de Marea Astronómica ubicada en Riohacha

La amplitud de la marea astronómica varía desde Urabá hasta la Guajira, aumentando para cada uno de los armónicos calculados en el análisis que se presentó para las series reconstruidas, dicho ascenso no es significativo para el Caribe colombiano pues la variación es del orden de los centímetros para dichos armónicos y por ende los cambios en los niveles no son tan bruscos. Esto clasifica la marea astronómica en el Caribe de tipo micromareal. Con respecto a la fase la variación es similar a la que se presentó para la amplitud, esta se mueve desde Urabá hasta la Guajira y para cada armónico se presentan ascenso de dicho parámetro es entonces importante mencionar que dicha fase relaciona el tiempo en que ocurre y el movimiento la marea astronómica en el Caribe va en ascenso desde Urabá hasta Riohacha.

En la Tabla 11 se muestran los valores mínimos, máximos, los ciclos internos de la marea astronómica, si la distribución de niveles se concentra alrededor de un valor (Histograma y rango) y los meses en que se presentan los valores mínimos y máximos de marea astronómica.

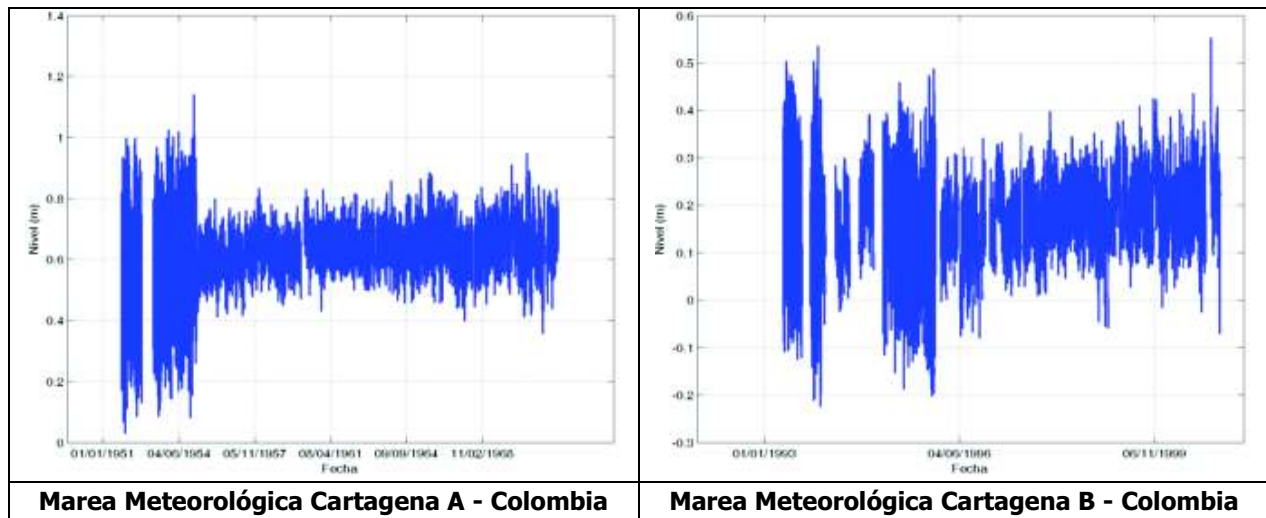


Tabla 11. Principales características de la marea astronómica en el Caribe Colombiano

Marea Astronómica						
	Urabá	Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
Mínimo	-0.4	-0.45	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3
Máximo	0.4	0.45	0.5	0.5	0.5	0.3
Ciclo Min	-0.15	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.15
Ciclo Max	0.2	0.2	0.25	0.3	0.2	0.1
Moda de la serie	0	0	0	0	0	0
Rango	-0.1 a 0.1	-0.2 a 0.2	-0.1 a 0.1	-0.2 a 0.2	-0.4 a 0.2 y 0.2 a 0.4	-0.1 a 0.1
Min Mes	Ago	Abr	May	Abr	Ene	Dic
Max Mes	Ene	Dic	Dic	Dic	Dici	May

4.2.2 MAREA METEOROLOGICA

La marea meteorológica es el residuo que resulta de restar al nivel del mareógrafo la serie de marea astronómica; en la Figura 30 se presentan las gráficas de dicho nivel para las estaciones del Caribe utilizadas en el estudio.



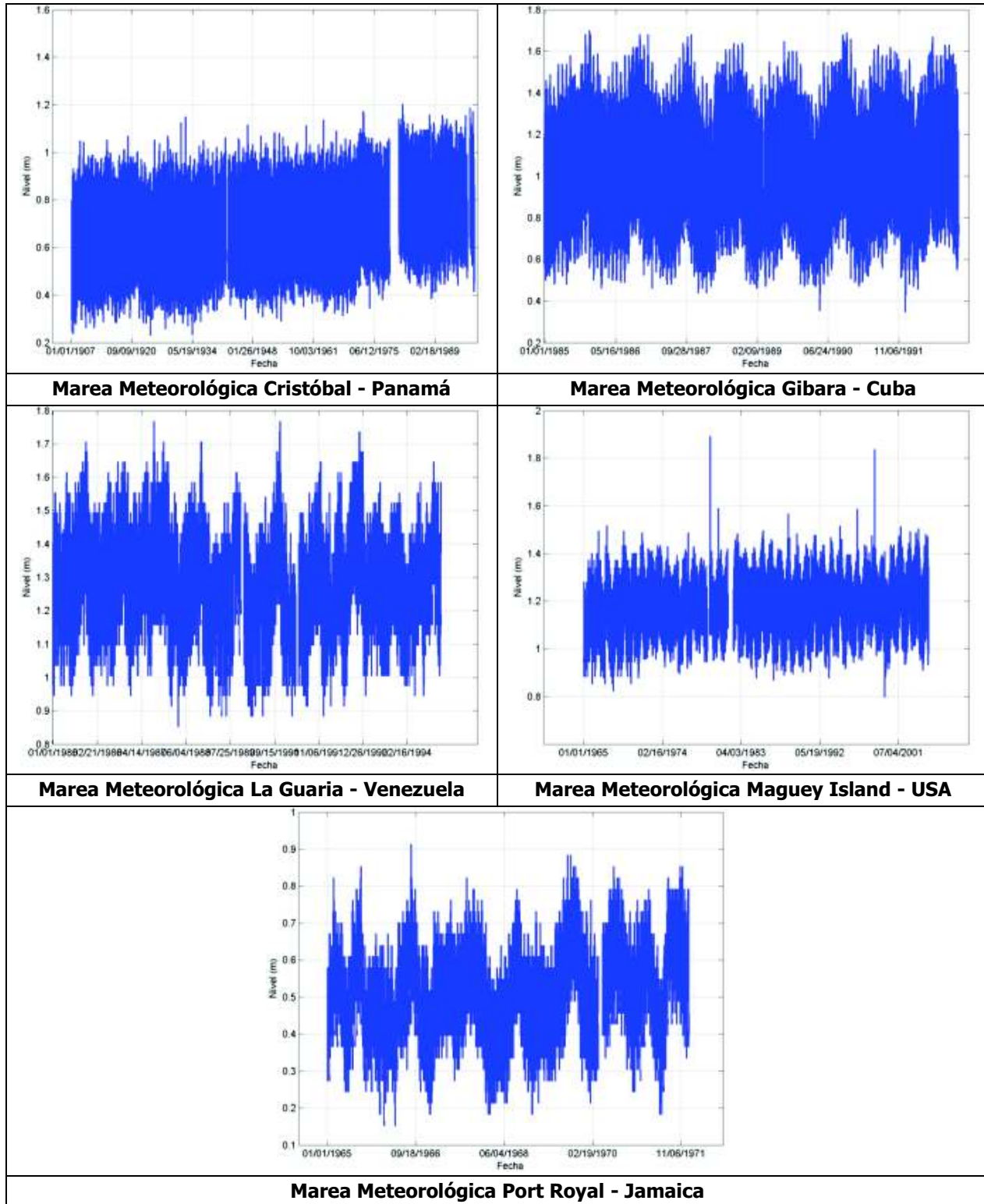
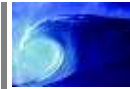


Figura 30. Marea Meteorológica en el Caribe



Estos niveles que fueron extraídos de los mareógrafos se compararon con las series de nivel de marea meteorológicas del modelo y de las formulaciones empíricas y se presentan a continuación.

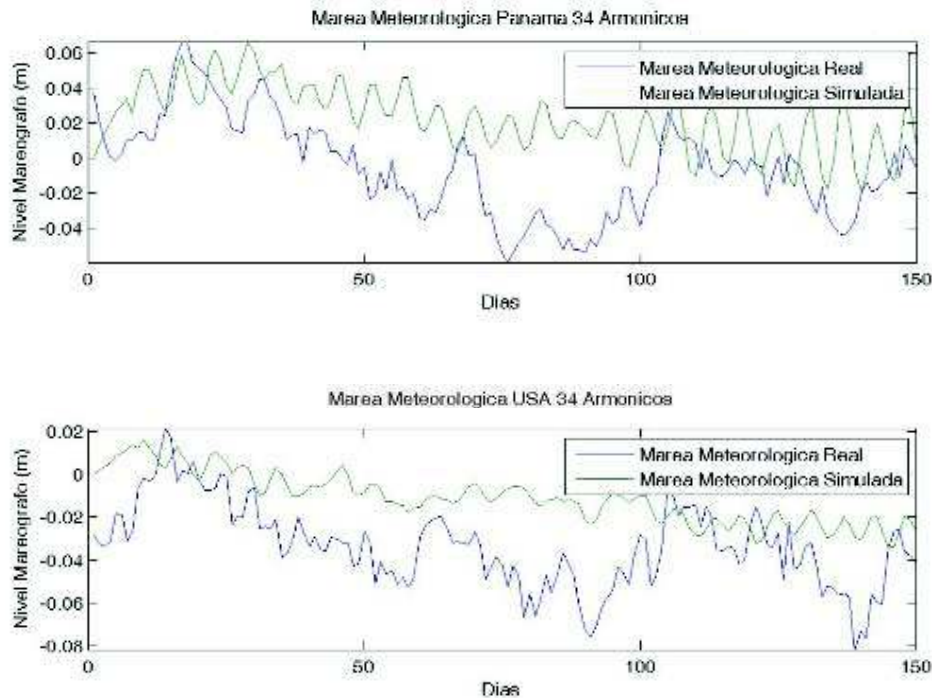
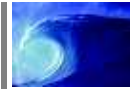


Figura 31. Marea Meteorológica simulada por el modelo H2D comparada con la serie real en dos estaciones mareográficas del Caribe

En la Figura 31 se observan las dos estaciones mareográficas que mostraron mejor ajuste con los cálculos de marea meteorológica (Panamá y USA) y la representación de la marea meteorológica reproducida por el modelo. Se observa que esta serie tiene diferencias hasta de 9 cm con las de los mareógrafos y no sigue la misma variabilidad de la serie medida. Los valores de marea meteorológica no muestran grandes sobreelevaciones. Esto se explica porque la variación debida al viento en el modelo requiere una batimetría de mayor detalle frente a la costa pues cuando las diferencias de profundidad son muy significativas el término que aporta dicho nivel se vuelve mínimo ya que depende inversamente de la profundidad. Por tanto, no es recomendable utilizar el modelo H2D en el cálculo de sobreelevación por marea meteorológica para este caso general, ya que se requiere una malla de detalle.



Los niveles reconstruidos por las formulaciones (en conjunto) fueron comparados con los niveles filtrados de los mareógrafos para observar qué tanto reconstruyen el nivel debido a la marea meteorológica o residuo meteorológico, como lo muestra la Figura 32, para la estación mareográfica de Cartagena de Indias (Colombia), la serie que mostró mejor ajuste y para la única que se tenía información de la profundidad de fondeo del mareógrafo.

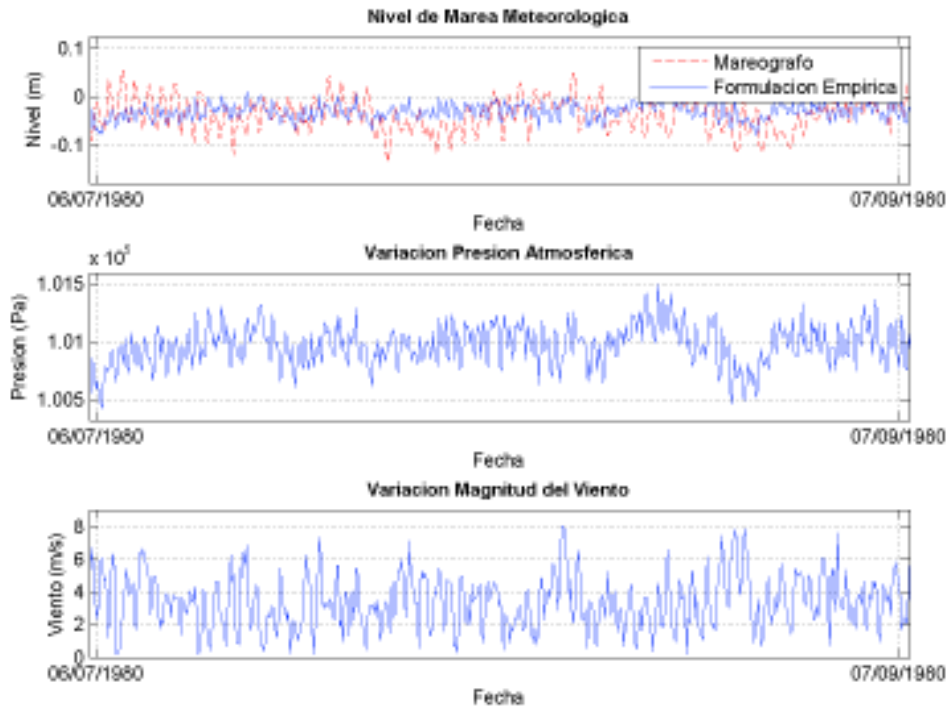
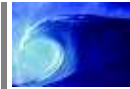


Figura 32. Series nivel de marea meteorológica (nivel debido a presión y nivel debido al viento) calculado utilizando la formulación empírica vs nivel de marea meteorológica del mareógrafo de Cartagena de Indias

Para este caso, los órdenes de magnitud son similares a los calculados por el modelo y nuevamente las series simuladas presentan diferencias de hasta 10 cm con la serie real del mareógrafo. Sin embargo, sigue mejor la variabilidad y además no tiene la limitante de la resolución de la malla. Por tanto las series calculadas por los modelos empíricos fueron las escogidas para el cálculo de la cota de inundación, aunque todavía tienen limitaciones que hay que abordar en estudios futuros.



Como se observa en las figuras 33 y 34 el aporte más importante a la marea meteorológica es debido a la presión, ya que su efecto representa más del 98% de la serie mientras que la contribución por el efecto del viento es del orden del 0.1%.

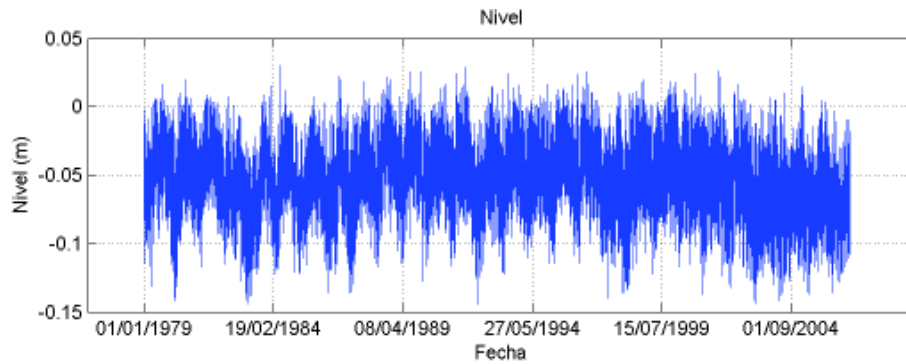


Figura 33. Serie de nivel calculada a partir de la series de presión

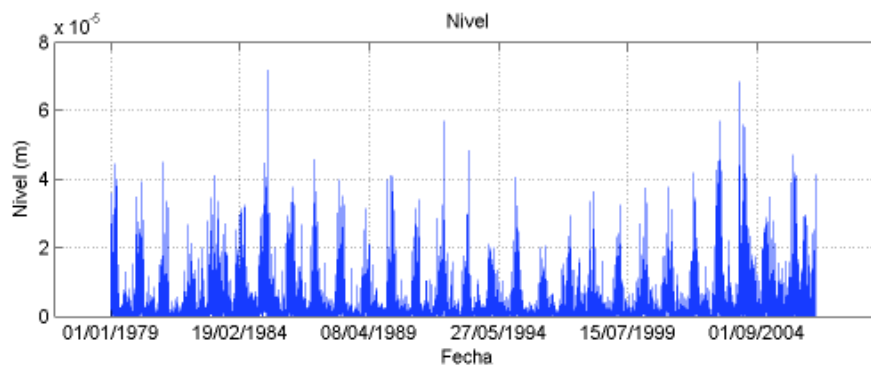
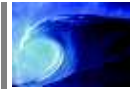


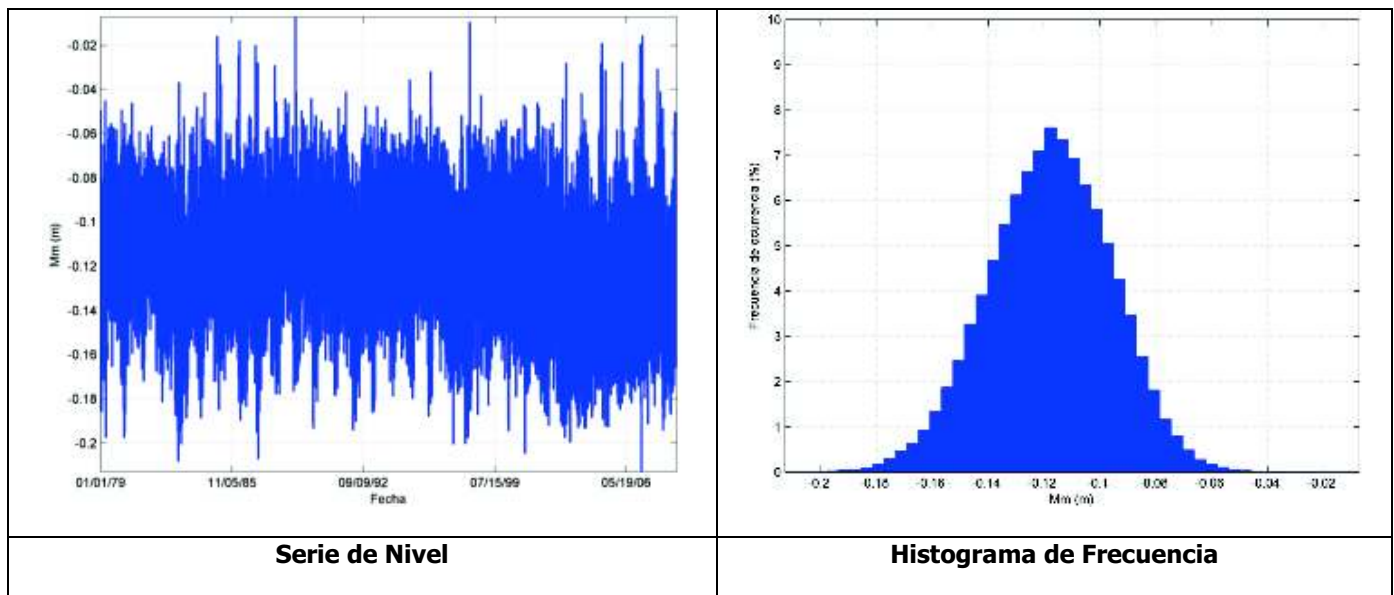
Figura 34. Serie de nivel calculada a partir de la serie de viento - $C_d = 1.3 \times 10^{-3}$

Como primera aproximación estas series de marea meteorológica simuladas aportan información importante para la reconstrucción de este nivel, a pesar de que ninguna de las dos reproduce el nivel de una manera adecuada. Las sobreelevaciones que afectan este nivel no son sólo debido a la presión y al viento, sino a otras ondas de frecuencias diferentes, que la formulación no puede reproducir y que a su vez pueden afectarlo, como son las descargas de ríos, pasos de tormentas tropicales o huracanes, efectos locales de la zona de estudio, etc. Es por ello que este valor de marea meteorológica se estimo como una primera aproximación, es importante que estos valores se manejen con especial cuidado y teniendo en cuenta las anteriores apreciaciones. De la Figura 35 a la Figura 40 se muestran los resultados de las series



reconstruidas con la formulación empírica de las diferentes series de nivel de marea meteorológica simuladas para el Caribe Colombiano.

Para el Golfo de Urabá (Figura 35) se presentan valores mínimos y máximos de -0.2 m y -0.02 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 0.22 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de -0.12 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de -0.12 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica del orden de -0.05 m. Según el ciclo diario dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de marzo y abril y las máximas en los meses de agosto a octubre.



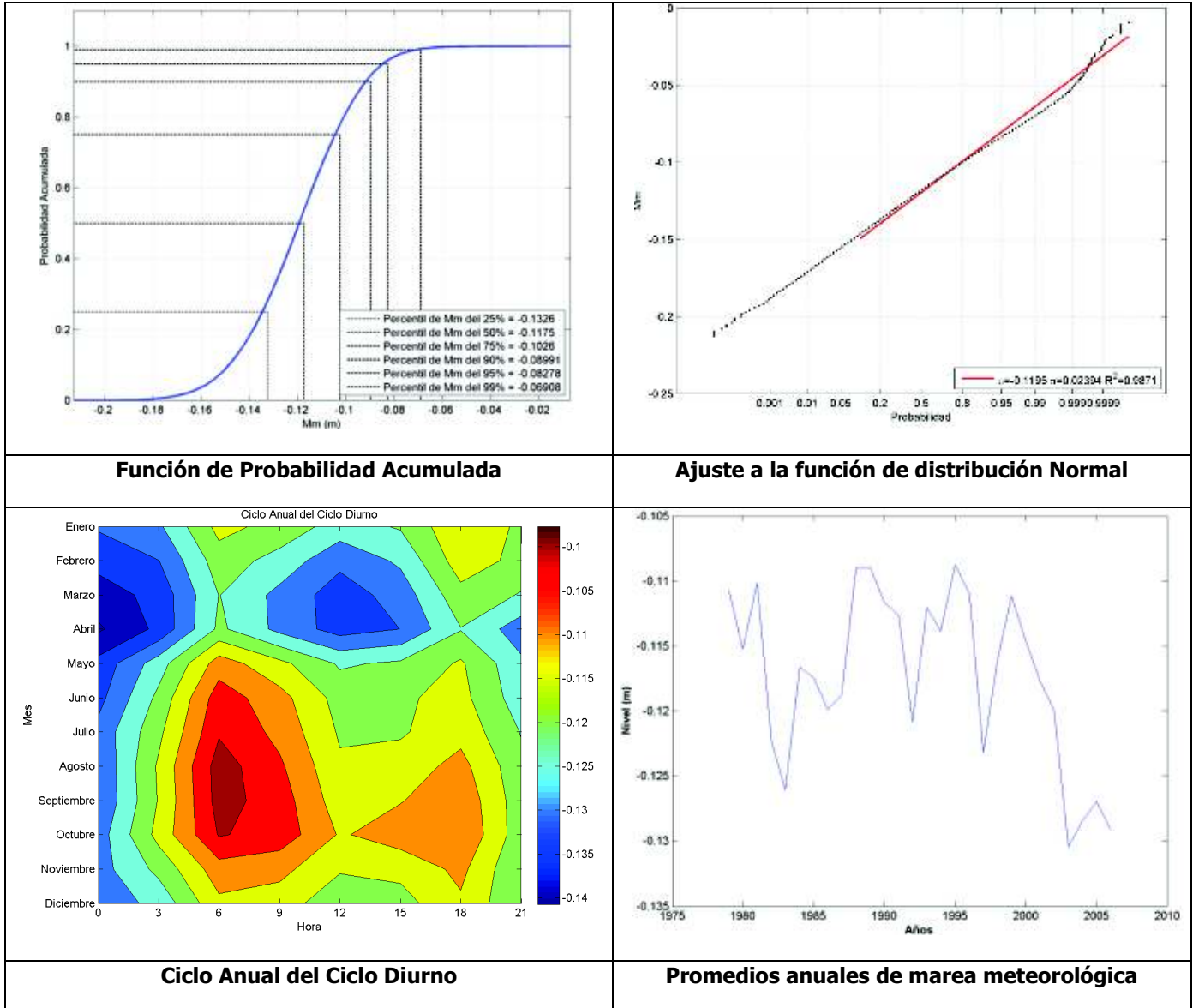
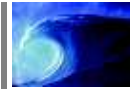
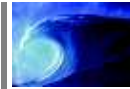
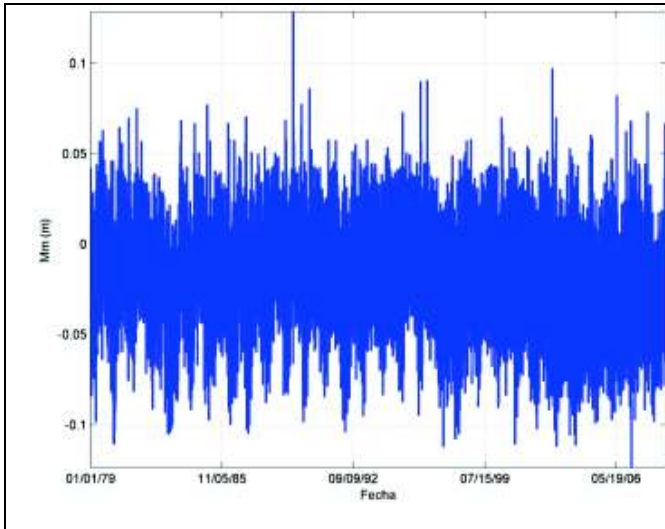


Figura 35. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en el Golfo de Urabá

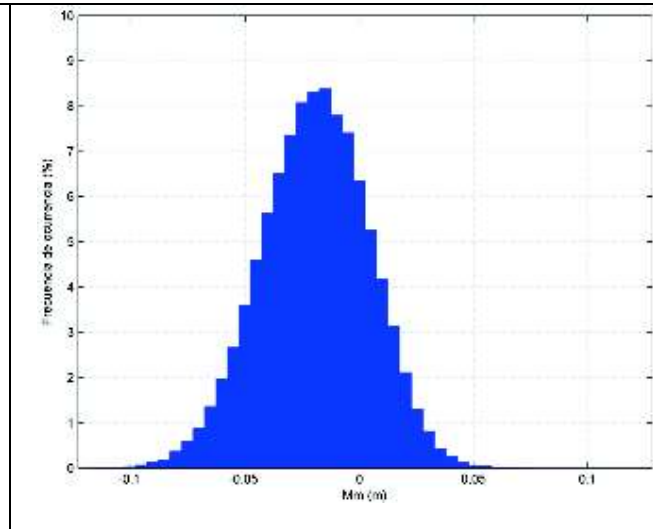
Para el Golfo de Morrosquillo (Figura 36) se presentan valores mínimos y máximos de -0.1 m y 0.1 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 0.20 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de -0.01 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de -0.01 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica



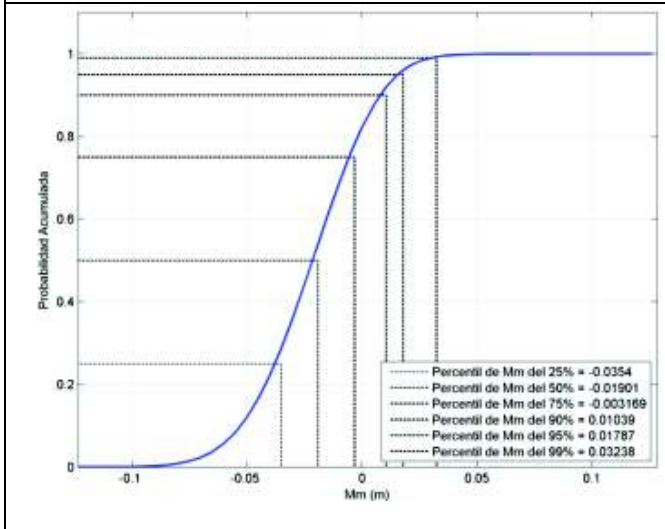
del orden de -0.03 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de marzo y abril y las máximas en los meses de agosto a octubre.



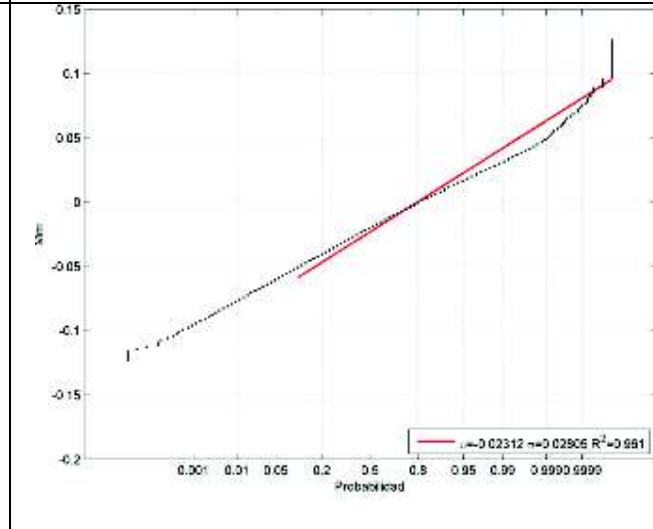
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

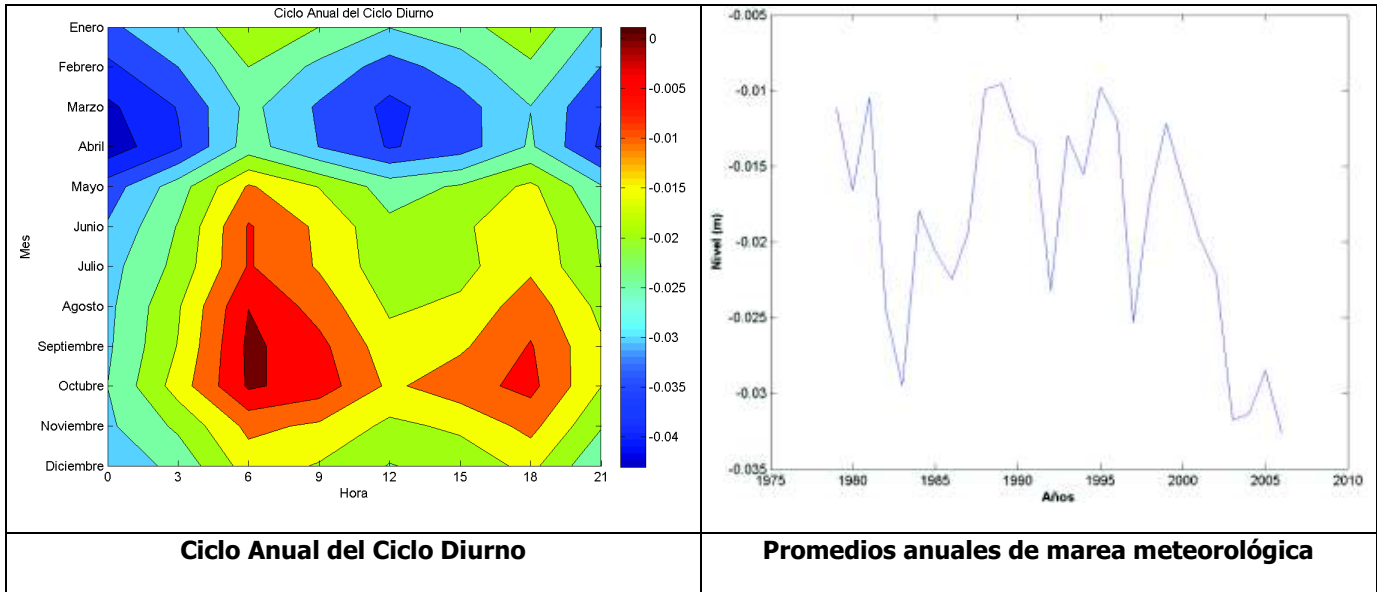
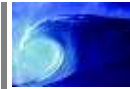
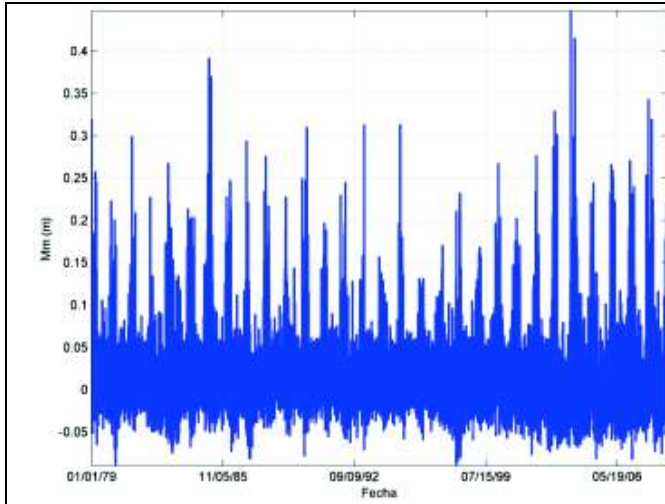
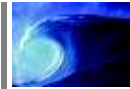
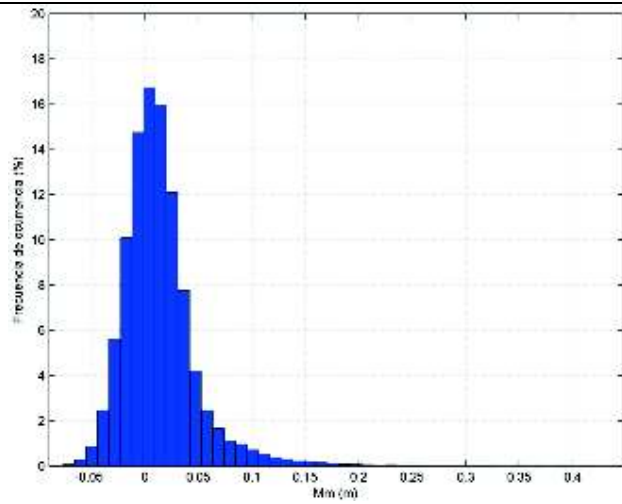


Figura 36. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en el Golfo de Morrosquillo

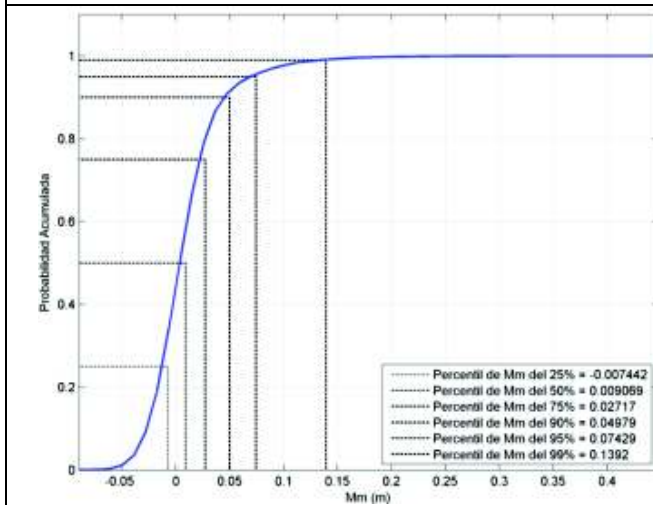
Para Cartagena (Figura 37) se presentan valores mínimos y máximos de -0.05 m y 0.4 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 0.45 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de 0 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de 0 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica del orden de 0.2 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de abril a julio y las máximas en los meses de enero a marzo.



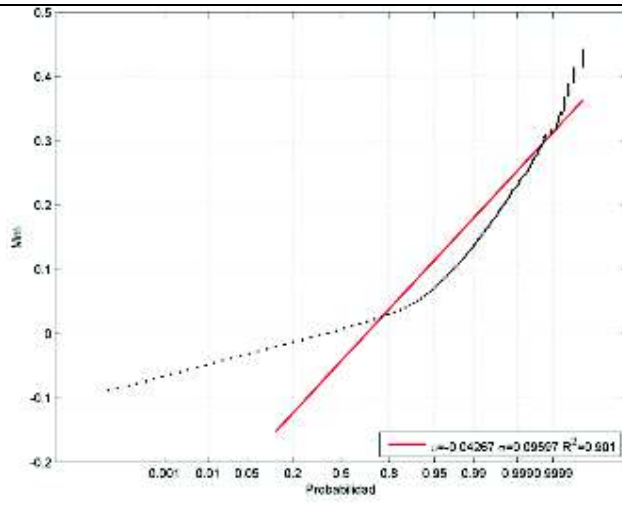
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

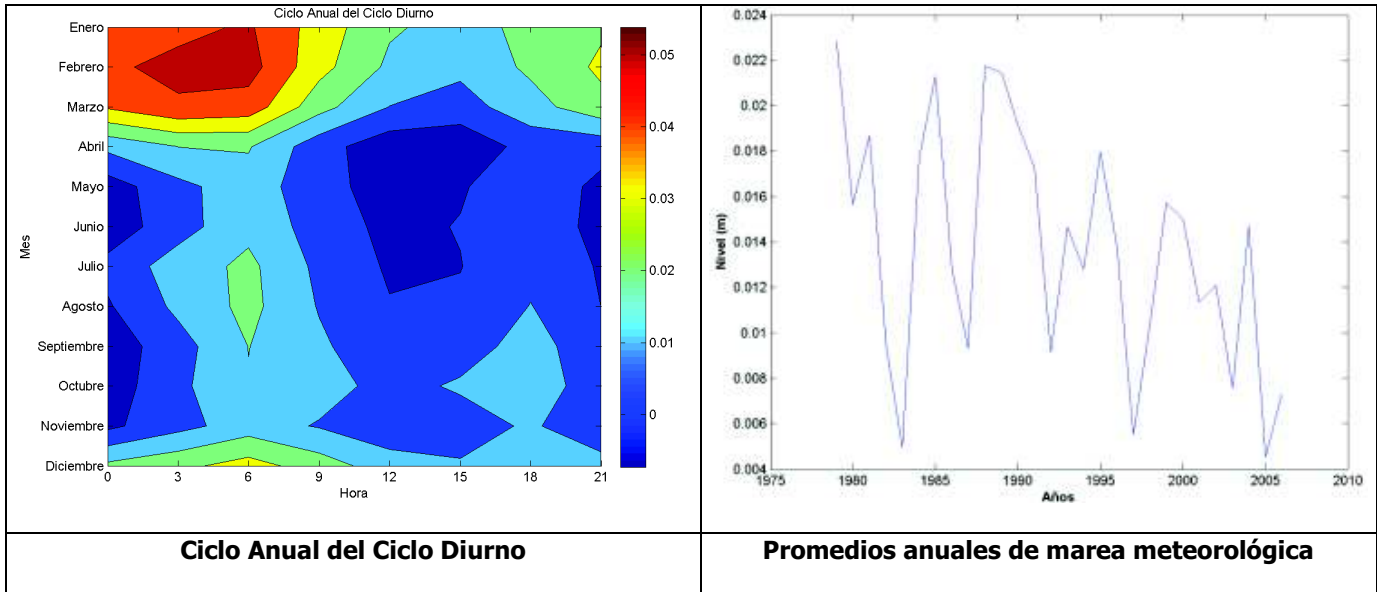
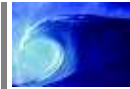
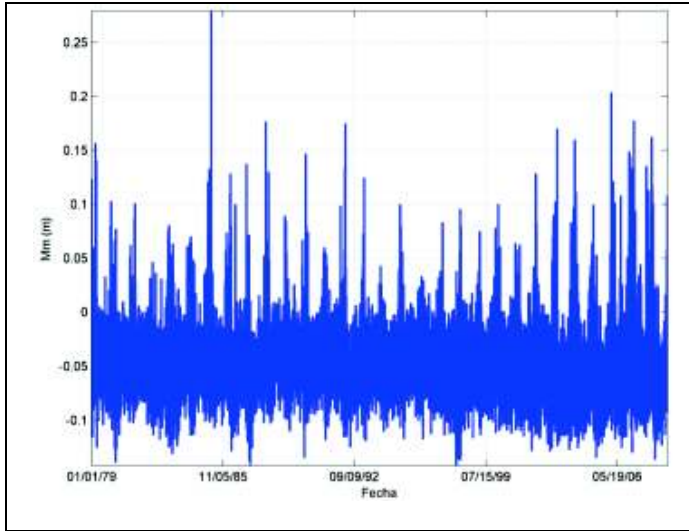
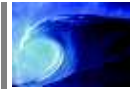
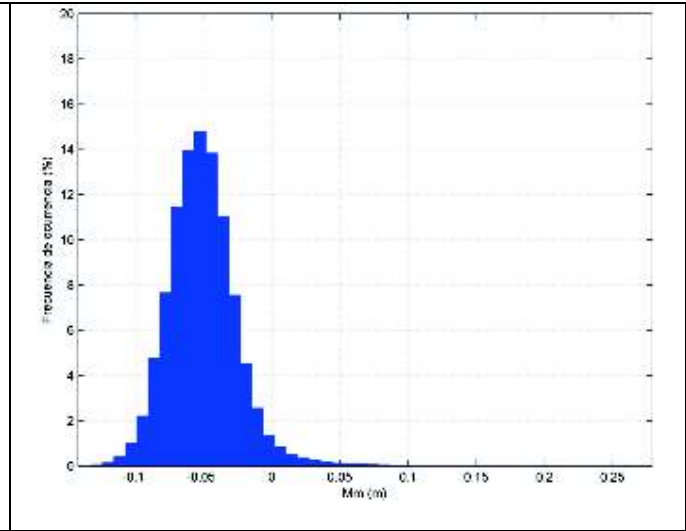


Figura 37. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en Cartagena

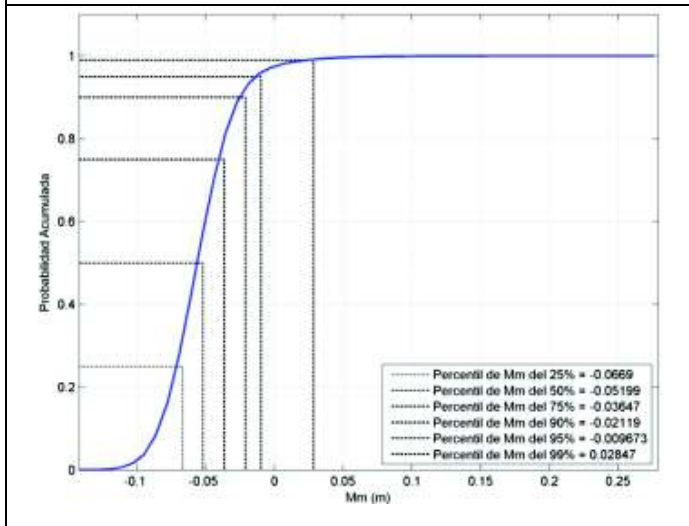
Para Barranquilla (Figura 38) se presentan valores mínimos y máximos de -0.15 m y 0.25 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 0.40 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de -0.05 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de -0.05 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica del orden de 0.05 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de abril y mayo y las máximas en los meses de enero y febrero.



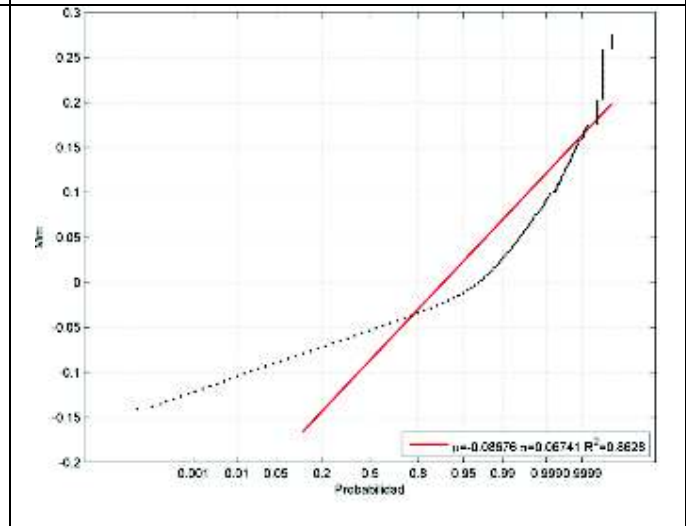
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

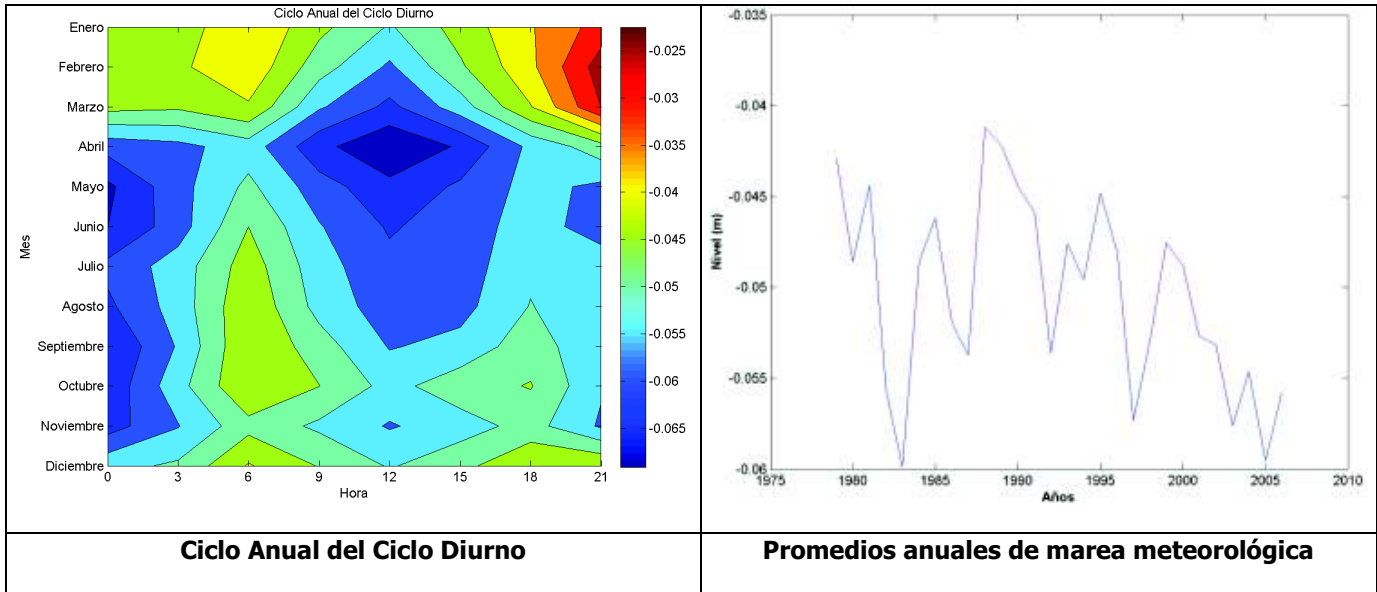
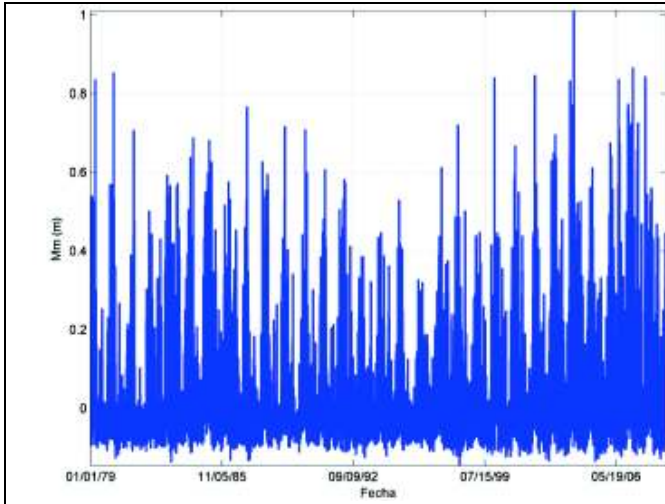
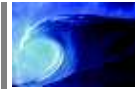
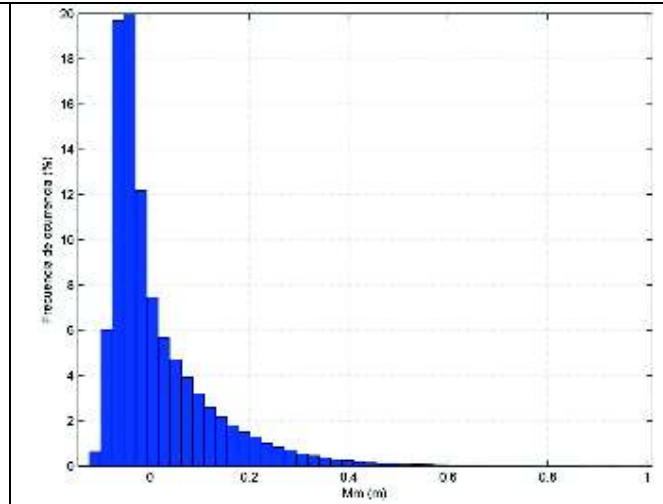


Figura 38. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en Barranquilla

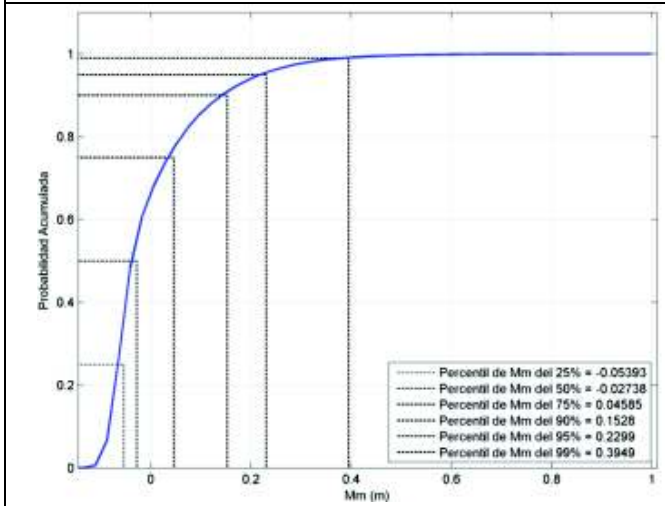
Para Santa Marta (Figura 39) se presentan valores mínimos y máximos de -0.1 m y 1 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 1.1 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de -0.01 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de -0.01 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica del orden de 0.5 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de septiembre a noviembre y las máximas en los meses de enero a marzo.



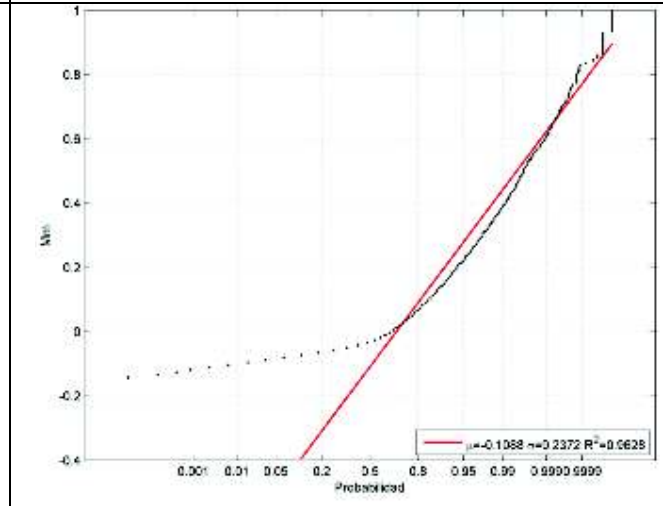
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

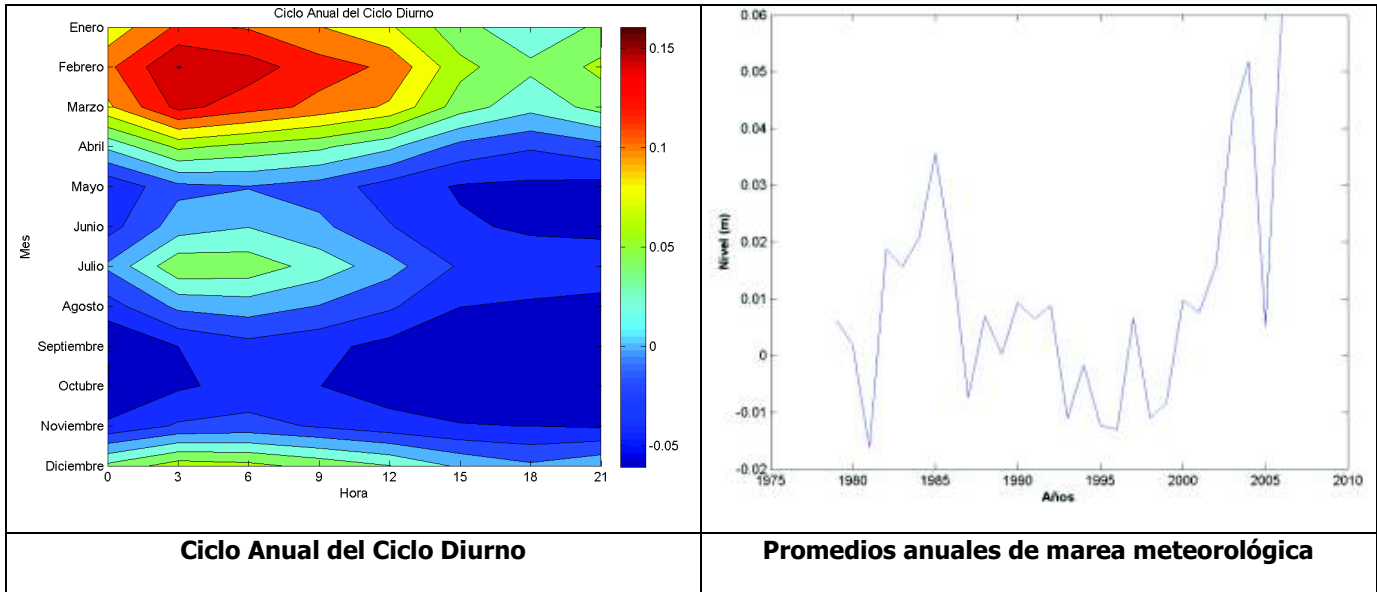
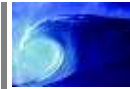
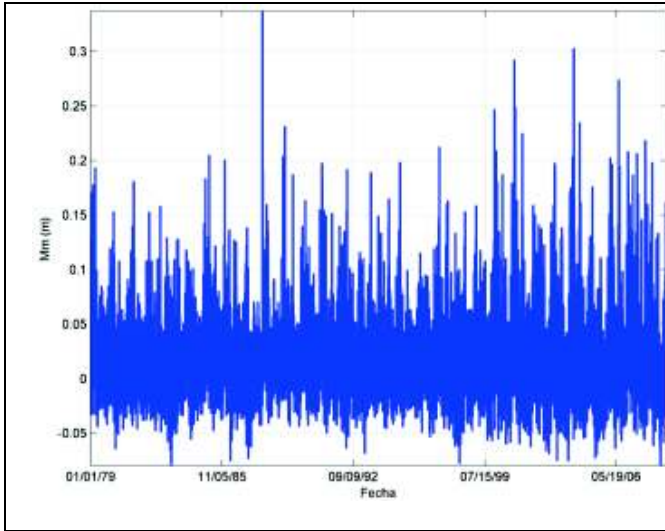
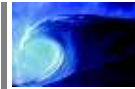
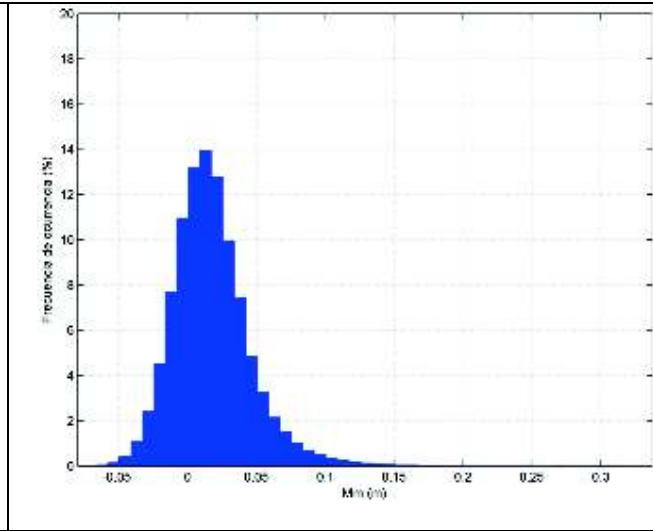


Figura 39. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en Santa Marta

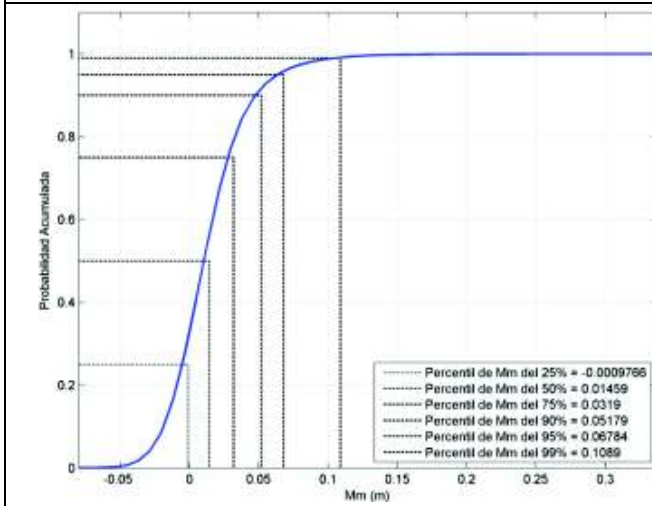
Para Riohacha (Figura 40) se presentan valores mínimos y máximos de -0.1 m y 0.3 m respectivamente con respecto al nivel de la marea meteorológica, definiendo un rango de 0.4 m. La distribución del histograma de frecuencias presenta una campana que concentran las máximas frecuencias alrededor de 0.02 m. La función de probabilidad acumulada muestra que para el 50% del tiempo se supera el valor de 0.01 m. El régimen medio de marea meteorológica presenta que para una probabilidad del 99% (86 horas al año) se presenta un nivel de marea meteorológica del orden de 0.15 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan las mínimas mareas en los meses de septiembre a noviembre y las máximas en los meses de enero a marzo.



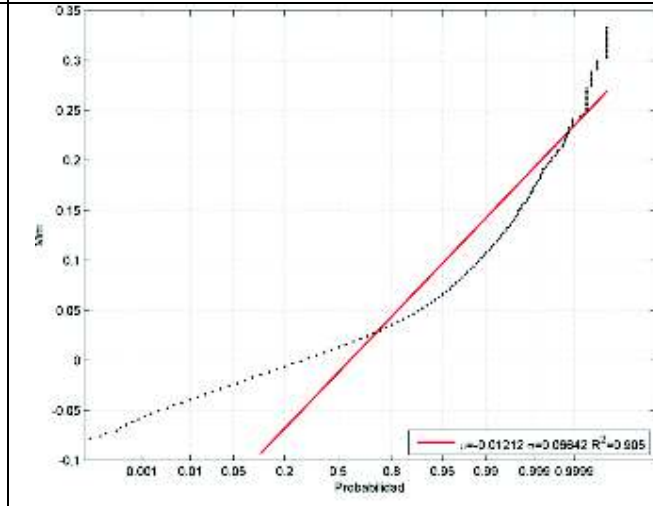
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

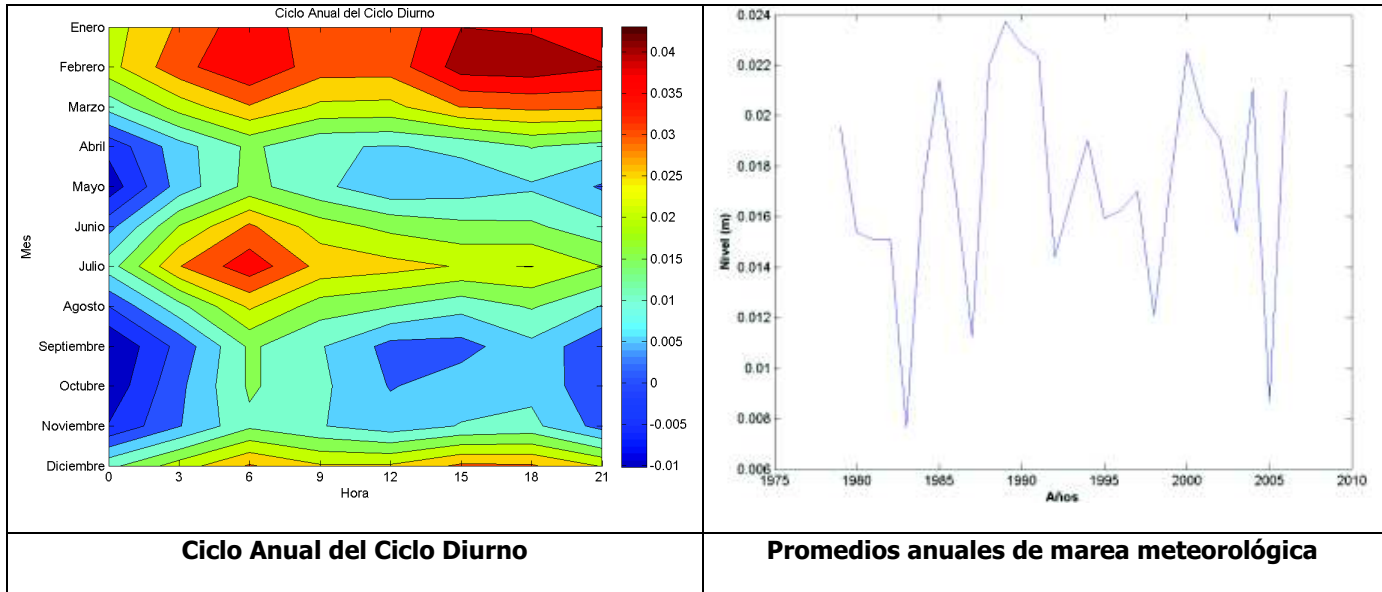
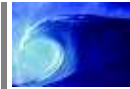


Figura 40. Análisis estadísticos de la serie de Marea Meteorológica ubicada en Riohacha

En la Tabla 12 se muestran los valores mínimos, máximos, el valor donde se concentran las frecuencias más representativas (Histograma), el valor del nivel superado el 50% del tiempo en la función de distribución, el valor cuya probabilidad de excedencia superada es del 90% y los meses en que se presentan los valores mínimos y máximos de marea meteorológica.

Tabla 12. Principales características de la marea meteorológica en el Caribe Colombiano

Marea Meteorológica						
	Urabá	Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
Mínimo	-0.2	-0.1	-0.05	-0.15	-0.1	-0.1
Máximo	-0.02	0.1	0.4	0.25	1	0.3
Moda de la serie	-0.12	-0.01	0	-0.05	-0.01	0.02
Función Distribución	-0.12	-0.01	0	-0.05	-0.01	0.01
Nivel para una Probabilidad (99%)	-0.05	-0.03	0.2	0.05	0.5	0.15
Min Mes	Mar – Abr	Mar – Abr	Abr – Jul	Abr – May	Sept – Nov	Sept – Nov
Max Mes	Ago - Oct	Ago - Oct	Ene - Mar	Ene - Feb	Ene - Mar	Ene - Mar



4.3 RUN UP

4.3.1 OLEAJE

En la Figura 41 y Figura 42 se muestran las series de altura de ola significativa (H_s). Los valores de altura de ola que se presentan en la serie de Barranquilla van desde las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}}= 5.17$ m, con una media de $H_{s_{med}}=1.67$ m. Los valores de altura de ola que se presentan en la serie de Puerto Bolívar van desde las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}}= 5.71$ m, con una media de $H_{s_{med}}=1.43$ m.

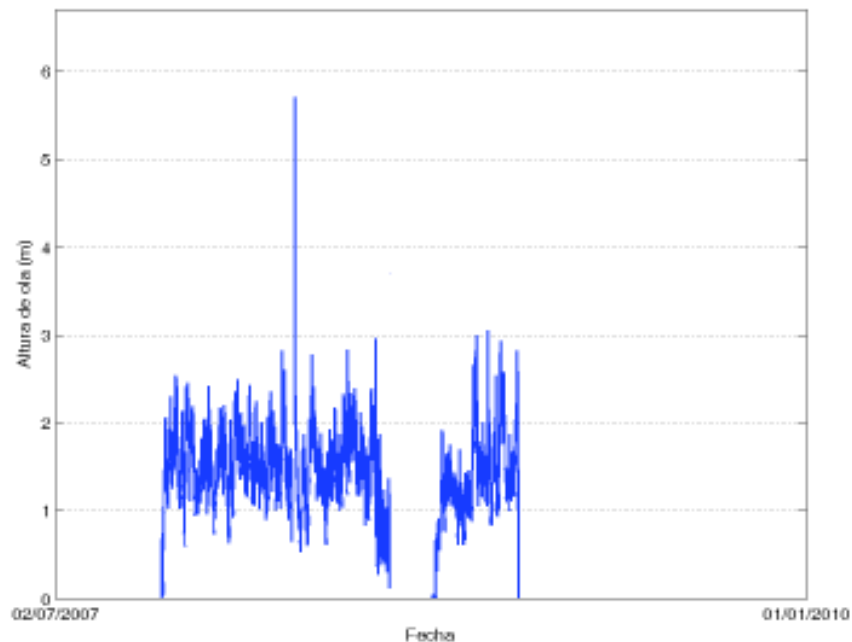


Figura 41. Serie de datos de altura de ola significativa de la boya ubicada en Barranquilla

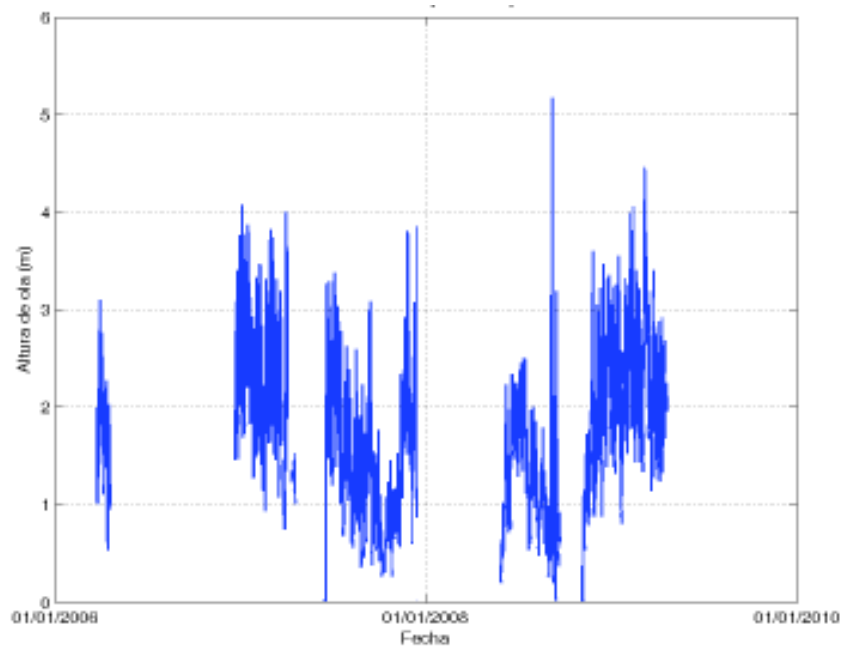


Figura 42. Serie de datos de altura de ola significativa de la boya ubicada en Puerto Bolívar

En la Figura 43 y la Figura 44 las series de periodo pico (T_p). Se presentan los siguientes valores $T_{p_{\min}}=2$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{\max}}= 18.18$ s, con una media de $T_{p_{\text{med}}}=7.20$ s en Barranquilla. En Puerto Bolívar los periodos presentan valores desde $T_{p_{\min}}=2.7$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{\max}}= 22$ s, con una media de $T_{p_{\text{med}}}=7.07$ s.

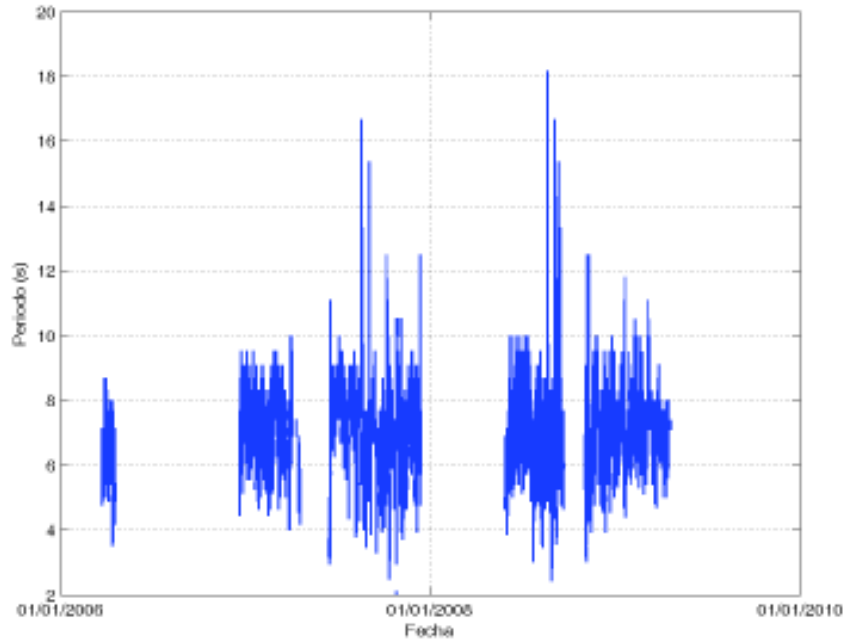


Figura 43. Serie de datos de periodo pico de la boya ubicada en Barranquilla

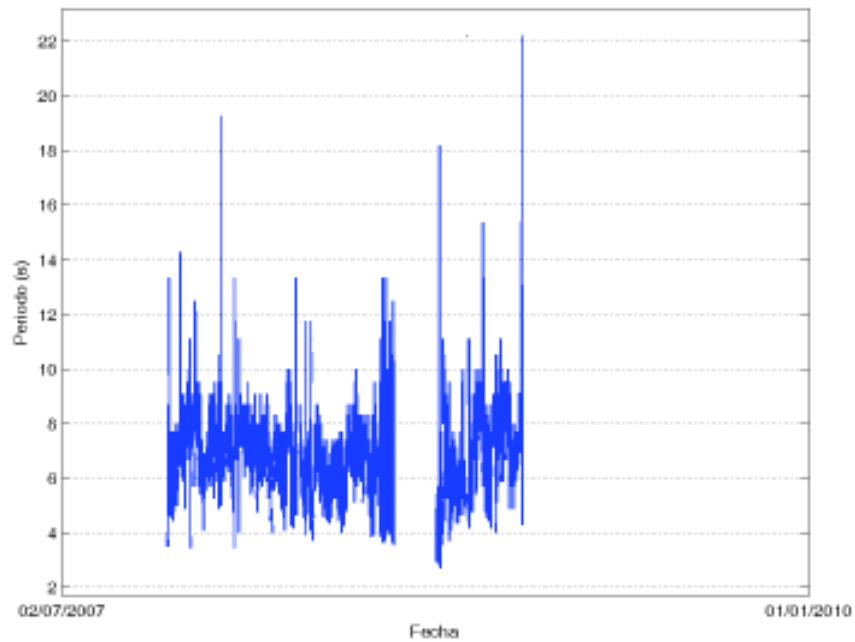


Figura 44. Serie de datos de periodo pico de la boya ubicada en Puerto Bolívar



Los histogramas de frecuencias para ambas series de altura de ola (H_s), se presentan en la Figura 45 y Figura 46 respectivamente. Para la boya ubicada en Barranquilla se observa un agrupamiento significativo de las alturas de ola entre los 1.0 y 1.8 m, algunos valores de 3.0 m y hasta de 5.0 m también se registran con menor frecuencia de ocurrencia. Para la boya de Puerto Bolívar el histograma de frecuencia muestra un agrupamiento significativo de las alturas de ola entre los 1 y 2 m, algunos valores de 3.0 m y hasta de 5.2 m también se registran con menor frecuencia de ocurrencia.

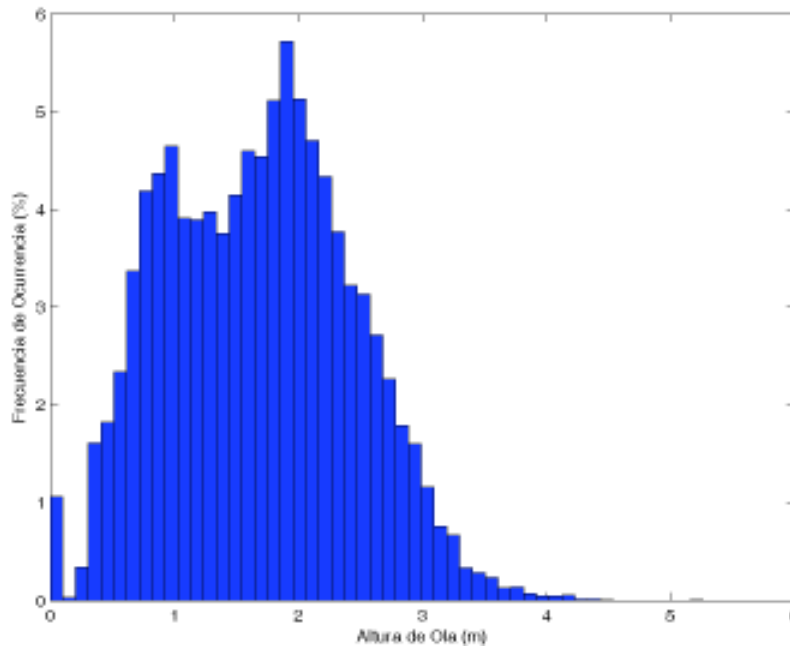


Figura 45. Histograma de frecuencia de altura de ola significativa de la boya ubicada en Barranquilla

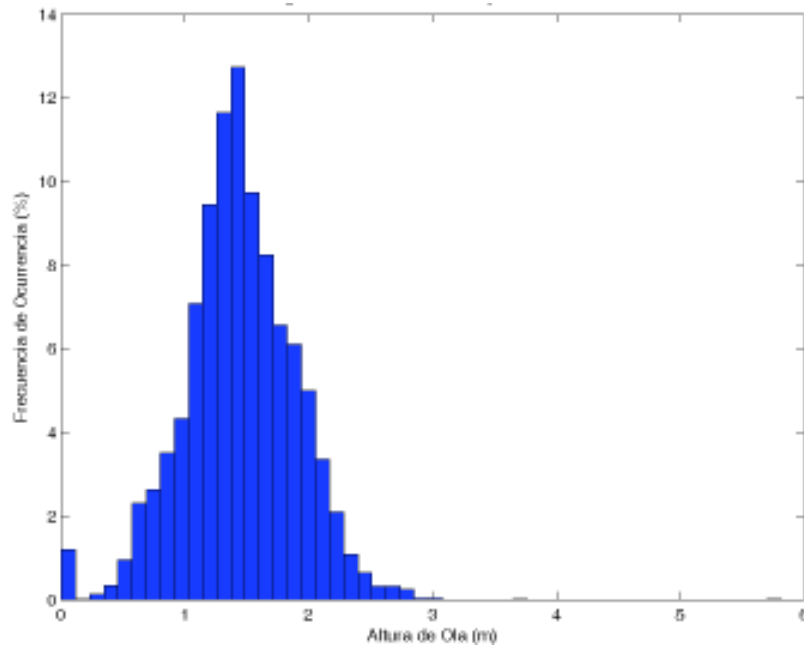
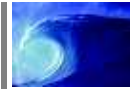


Figura 46. Histograma de frecuencia de altura de ola significativa de la boya ubicada en Puerto Bolívar

Los histogramas de frecuencias para ambas series de periodo pico (T_p), se presentan en la Figura 47 y Figura 48 respectivamente. Para los periodos los datos de la boya de Barranquilla se encuentra agrupados en su mayoría entre los 6 y 9 s y algunos valores del orden de 12 s hasta 18 s se registran con menor frecuencia de ocurrencia. Y en la boya de Puerto Bolívar los datos se encuentra agrupados en su mayoría entre los 5 y 10 s y algunos valores del orden de 15 s hasta 22 s se registran con menor frecuencia de ocurrencia.

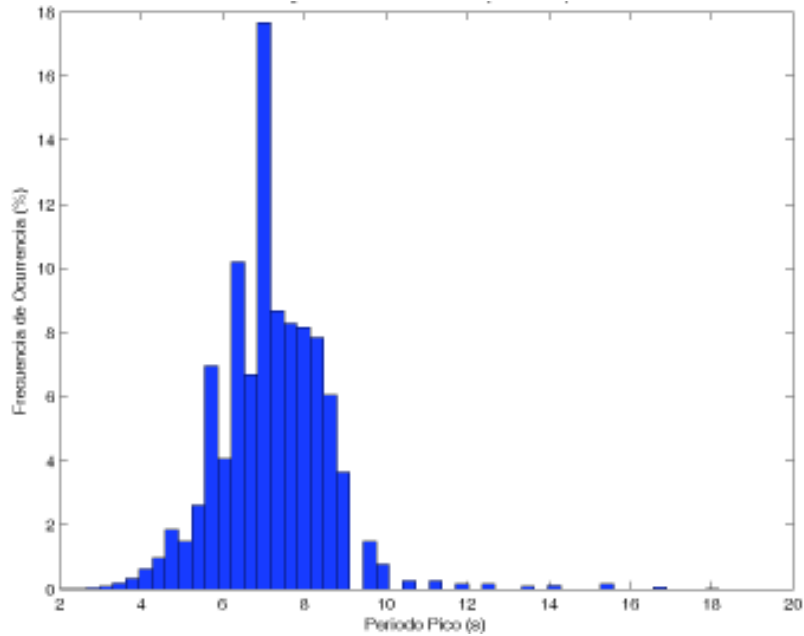
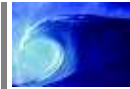


Figura 47. Histograma de frecuencia de periodo pico de la boya ubicada en Barranquilla

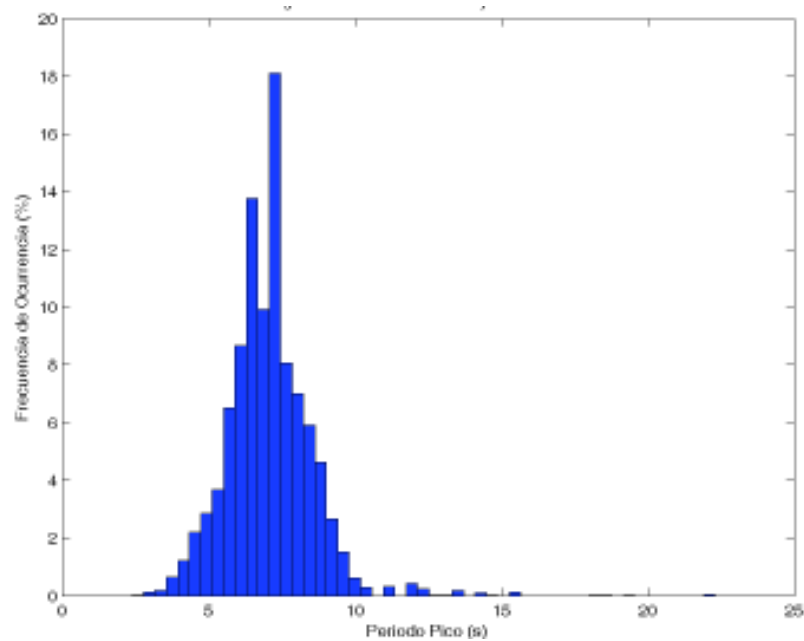


Figura 48. Histograma de frecuencia de periodo pico de la boya ubicada en Puerto Bolívar



La rosa de oleaje de la boya de Barranquilla indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NE con un porcentaje de ocurrencias de más del 70% y algunas pocas del ENE con un porcentaje del 15%. En la boya Puerto Bolívar las olas más frecuentes provienen del ENE con un porcentaje de ocurrencias cercano al 50% y algunas del NE con un porcentaje del 30%.

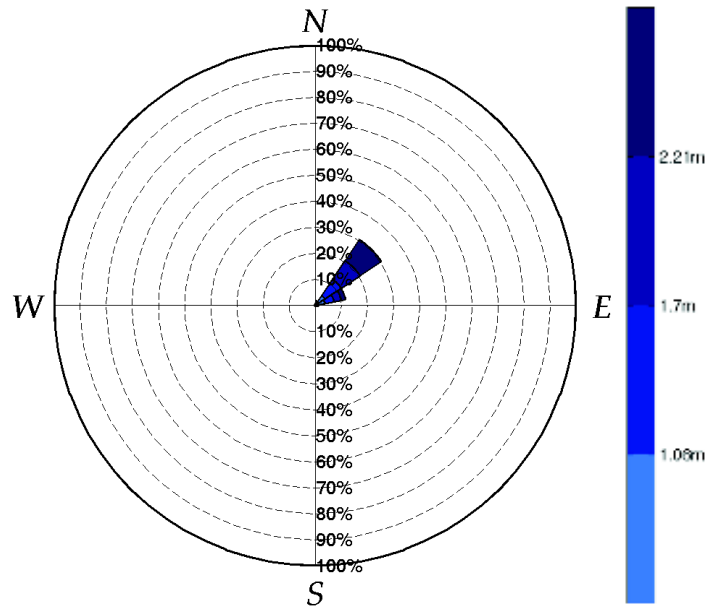


Figura 49. Rosas de oleaje de la boya ubicada en Barranquilla

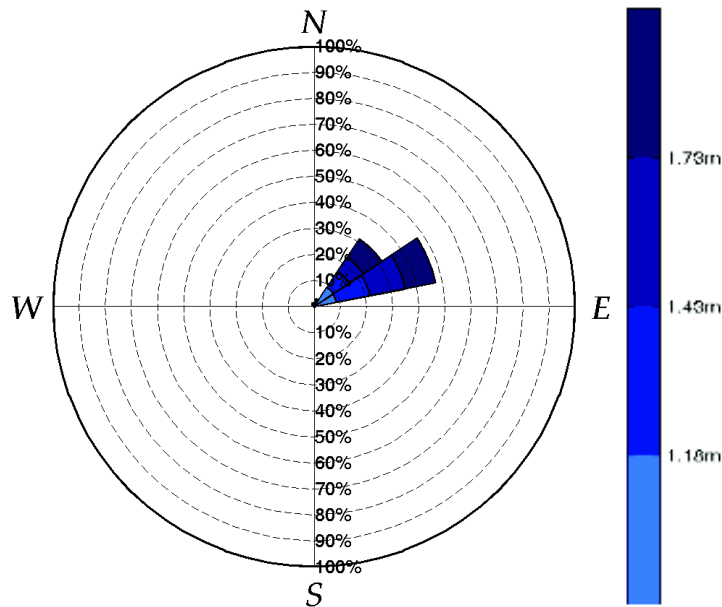


Figura 50. Rosas de oleaje de la boya ubicada en Puerto Bolívar



En la Figura 51 a la Figura 52 se presentan los resultados de las series de oleaje obtenidas a partir del modelo SWAN y las comparaciones con las series de las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar.

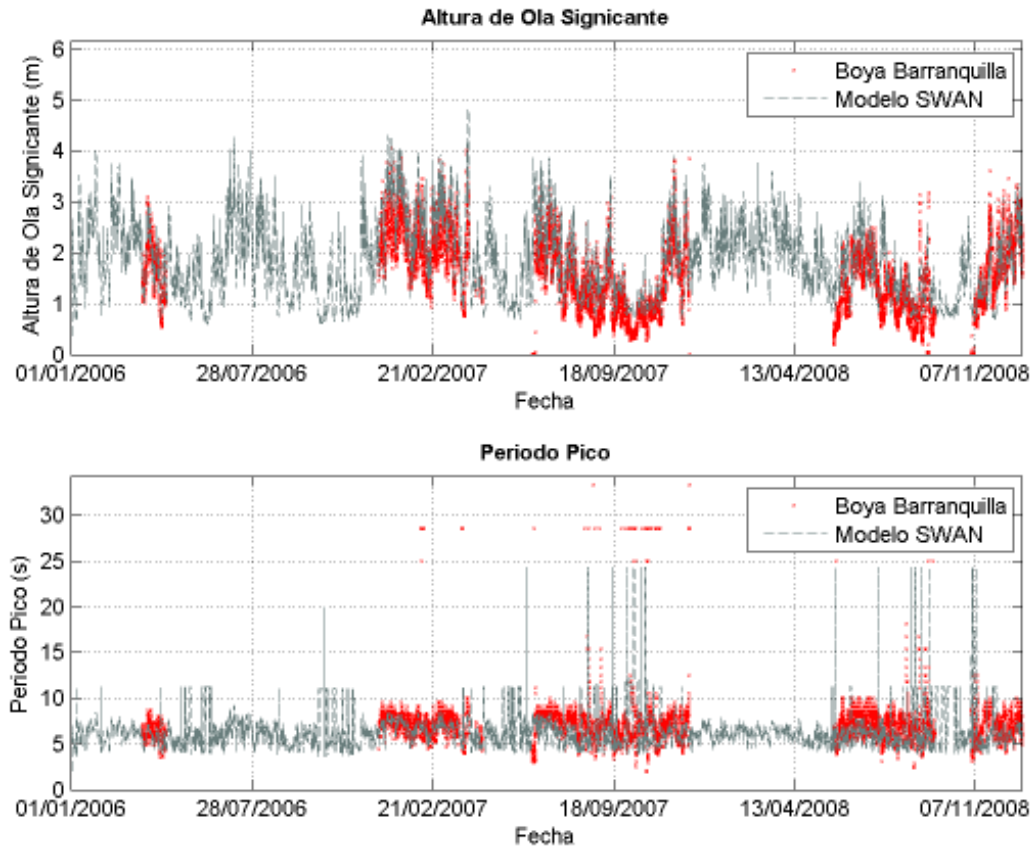


Figura 51. Series de altura de ola significativa y periodo pico Boya Barranquilla vs Modelo SWAN

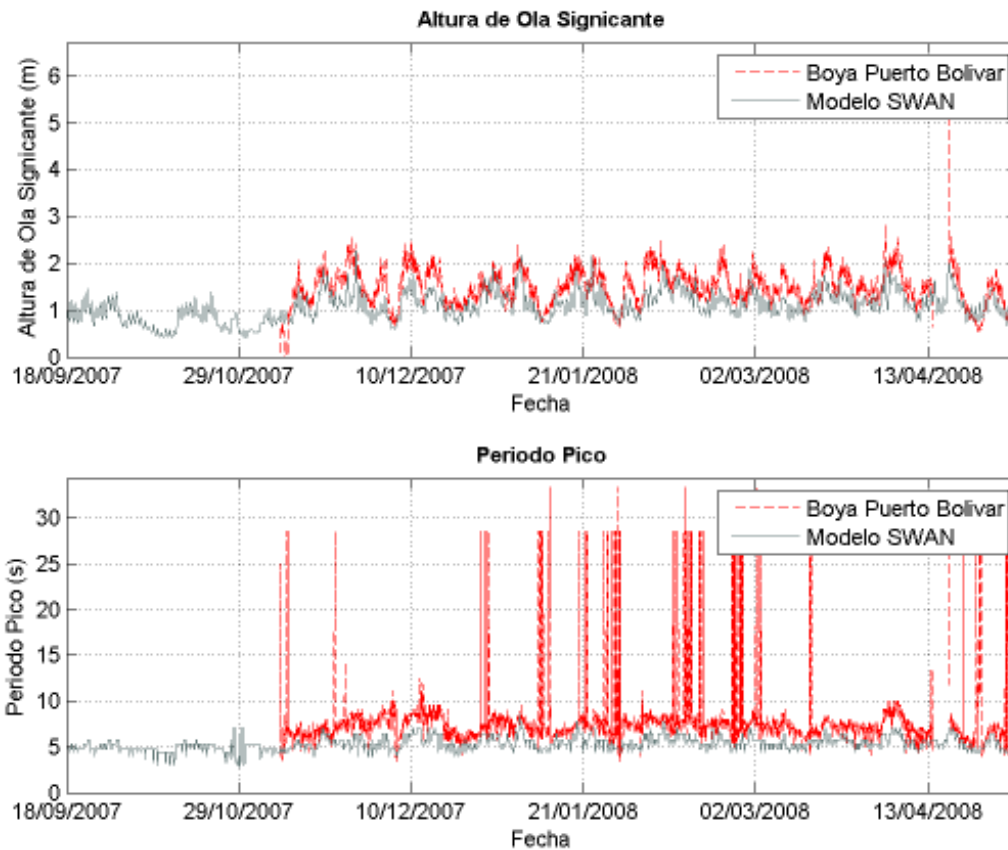
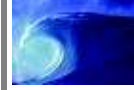


Figura 52. Series de altura de ola significativa y de periodo pico Boya Puerto Bolívar vs Modelo SWAN

En algunos casos el modelo no reproduce los casos extremos, pero en términos generales el modelo sigue la tendencia de las variaciones de la boya, observándose buenos resultados. Al realizar un ajuste por medio de cuantiles que representa una medida estadística de la posición de un valor en una distribución, y la divide en intervalos iguales. Para realizar la correcciones se tomaron cuantiles de 0.1% de ambas series, y se graficaron uno contra otro. Al hacerlo, se obtienen gráficas semejantes a una línea recta, cuyos ajustes se presentan a continuación.

Para la altura de ola significativa de la boya ubicada en Barranquilla se tiene un ajuste con un $r^2=0.98$ y un error cuadrático de 0.41 m.

$$Hs_{BOYA_BARR} = 0.8892Hs_{SWAN} - 0.0755$$



Para el periodo pico de la boya ubicada en Barranquilla se tiene un ajuste tiene un $r^2=0.93$ y un error cuadrático de 0.33 s.

$$Tp_{BOYA_BARR} = 1.241Tp_{SWAN} - 0.2973$$

Para la altura de ola significativa de la boya ubicada en Puerto Bolívar se tiene un ajuste con un $r^2=0.98$ y un error cuadrático de 0.32 m.

$$Hs_{BOYA_PBOL} = 1.417Hs_{SWAN} - 0.1565$$

Para el periodo pico de la boya ubicada en Puerto Bolívar se tiene un ajuste con un $r^2=0.98$ y un error cuadrático de 1.36 s.

$$Tp_{BOYA_PBOL} = 1.818Tp_{SWAN} - 2.844$$

Estos ajustes se aplicaron de manera espacial debido a la ubicación de las series de las boyas existentes con respecto a las series de las boyas del modelo SWAN, se establecieron dos zonas para la aplicación de dichas correcciones como lo muestra la Figura 53. Para la región definida desde La Guajira a Santa Marta (2 series: Riohacha y Santa Marta) se calibró con la ecuación de corrección obtenida entre la serie de oleaje en Puerto Bolívar y la boya virtual del modelo SWAN en el mismo sitio. Para la zona definida desde Barranquilla hasta el Golfo de Urabá (4 series: Barranquilla, Cartagena, Golfo de Morrosquillo y Golfo de Urabá) se calibró con la ecuación de corrección obtenida entre la serie de oleaje en Barranquilla y la boya virtual del modelo SWAN en el mismo sitio.

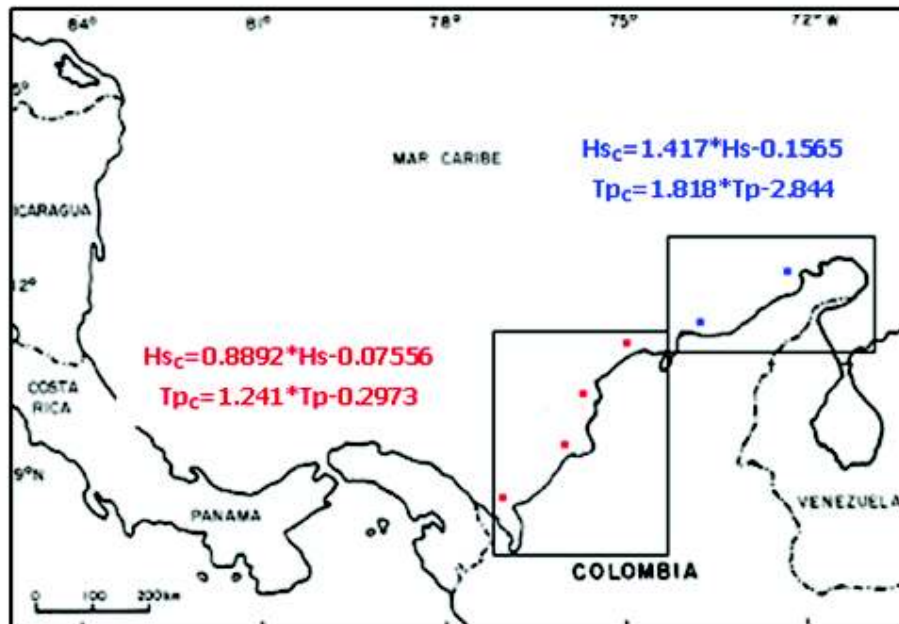
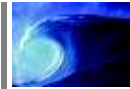
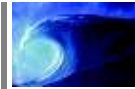


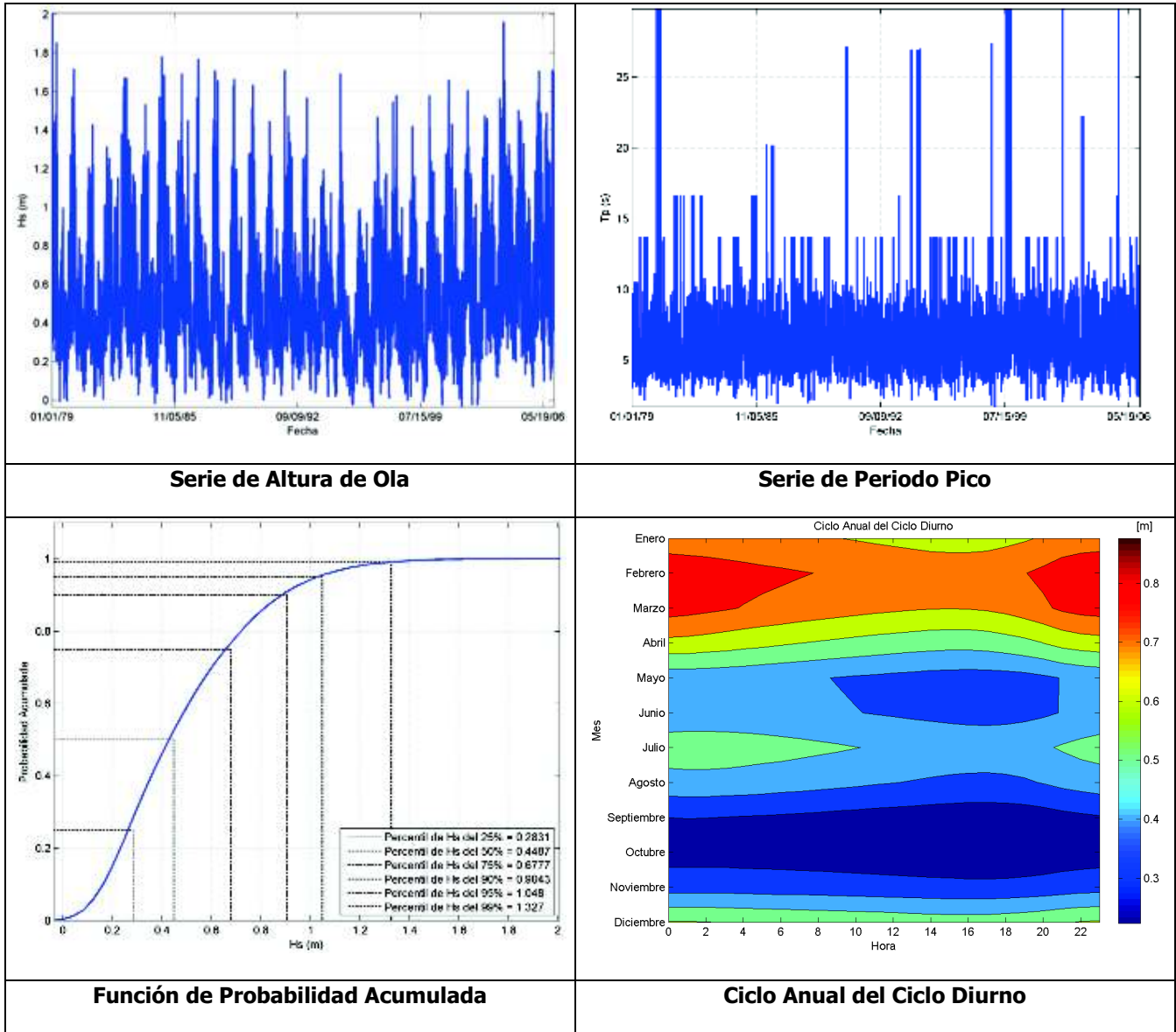
Figura 53. Zonas establecidas para la corrección de la series de oleaje generadas a partir del modelo SWAN

Los resultados del oleaje con las series ya calibradas se presentan en la Figura 54 a la Figura 59.

Para la región del Golfo de Urabá (Figura 54) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van desde las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 2$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 0.5$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 2$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 29$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 6.7$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 0.5 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses de Septiembre a Octubre y los máximos en los meses de Enero y Febrero. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del N con un porcentaje de ocurrencias cercano al 41%, algunas pocas del NNW con un porcentaje de ocurrencias cercano al 17% y del NNE al E con un porcentaje conjunto del 10%. Los descriptores básicos de la serie de oleaje en Urabá se presentan a continuación; es importante resaltar que para las direcciones N y NNW se presentan las alturas de ola más frecuentes, con un porcentaje conjunto del 58%, esto quiere decir que más del 58% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones. Para la dirección N el oleaje tiene los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.50$ m, $H_{s_{90\%}} = 1.01$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.49$ m y $H_{s_{12}} = 1.64$ m, y para la dirección NNW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.43$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.72$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.00$ m y



$H_{s12} = 1.30$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s50\%} = 0.50$ m indica que la altura de ola de 0.50 m es superada el 50% del tiempo.



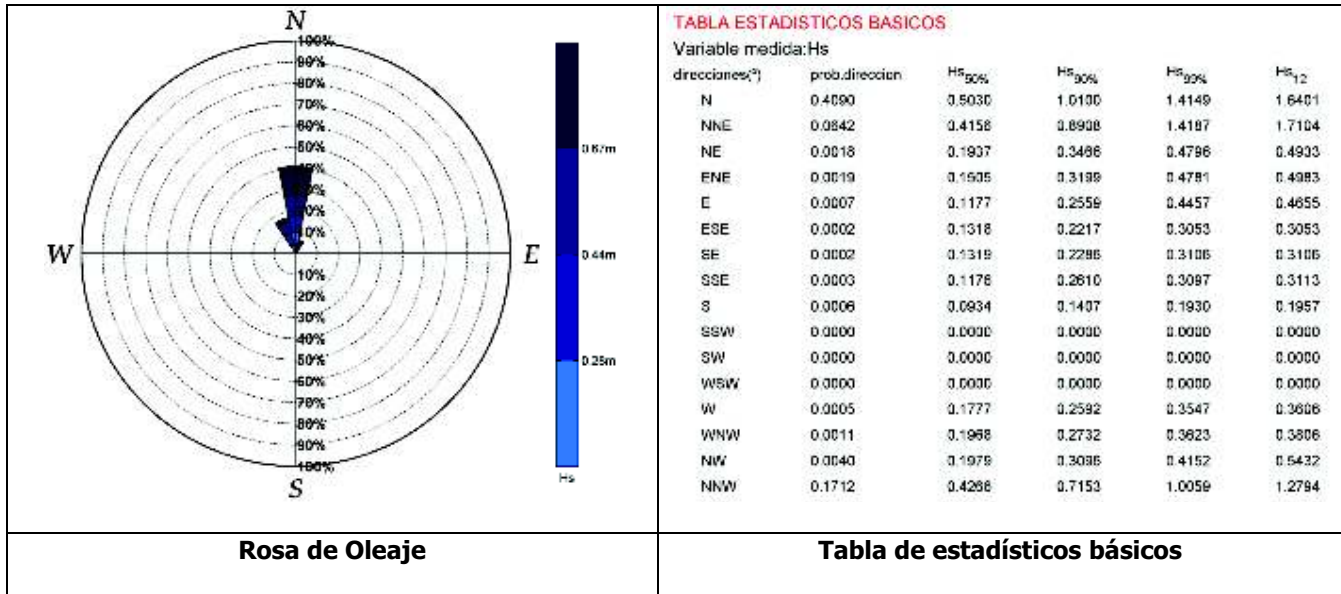
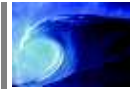
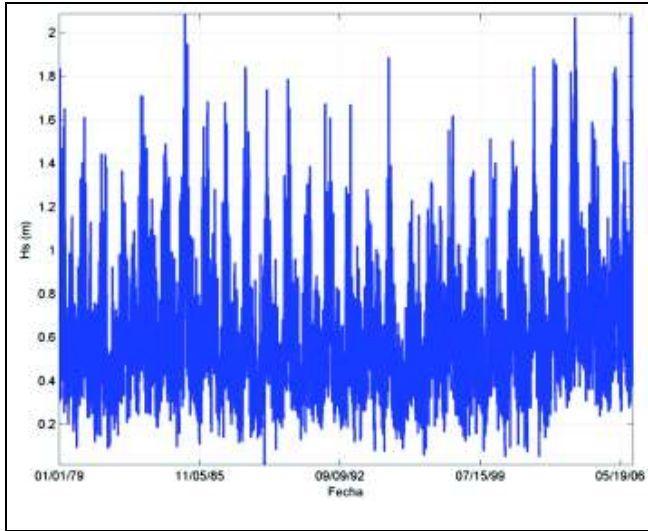
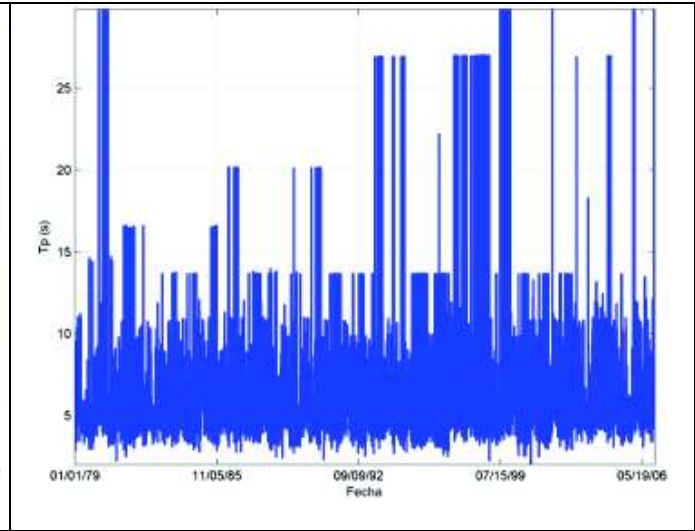


Figura 54. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Golfo de Urabá

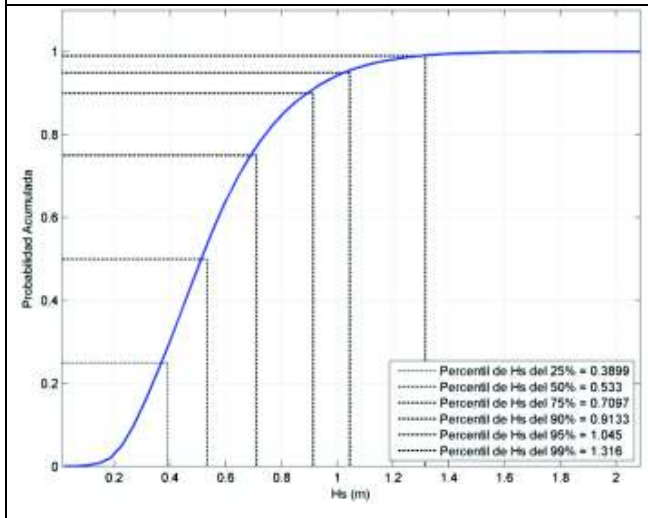
En el Golfo de Morrosquillo (Figura 55) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van desde las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 2.1$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 0.6$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 2$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 29$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 6$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 0.3 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses de Septiembre a Octubre y los máximos en los meses de Enero a Marzo. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NNW con un porcentaje de ocurrencias cercano al 37%, la dirección que sigue es NW con un porcentaje de ocurrencias cercano al 26% y del WNW y del N con un porcentaje conjunto del 14%. Para las direcciones NNW y NW se presentan las alturas de ola más frecuentes, con un porcentaje conjunto del 63%, esto quiere decir que más del 63% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones. Para la dirección NNW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.52$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.84$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.14$ m y $H_{s_{12}} = 1.36$ m, y para la dirección NW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.43$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.65$ m, $H_{s_{99\%}} = 0.85$ m y $H_{s_{12}} = 1.02$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s_{50\%}} = 0.52$ m indica que la altura de ola de 0.52 m es superada el 50% del tiempo.



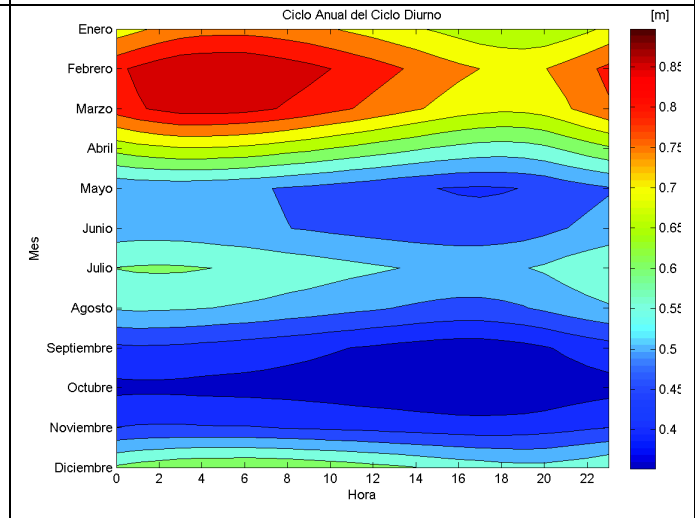
Serie de Altura de Ola



Serie de Periodo Pico



Función de Probabilidad Acumulada



Ciclo Anual del Ciclo Diurno

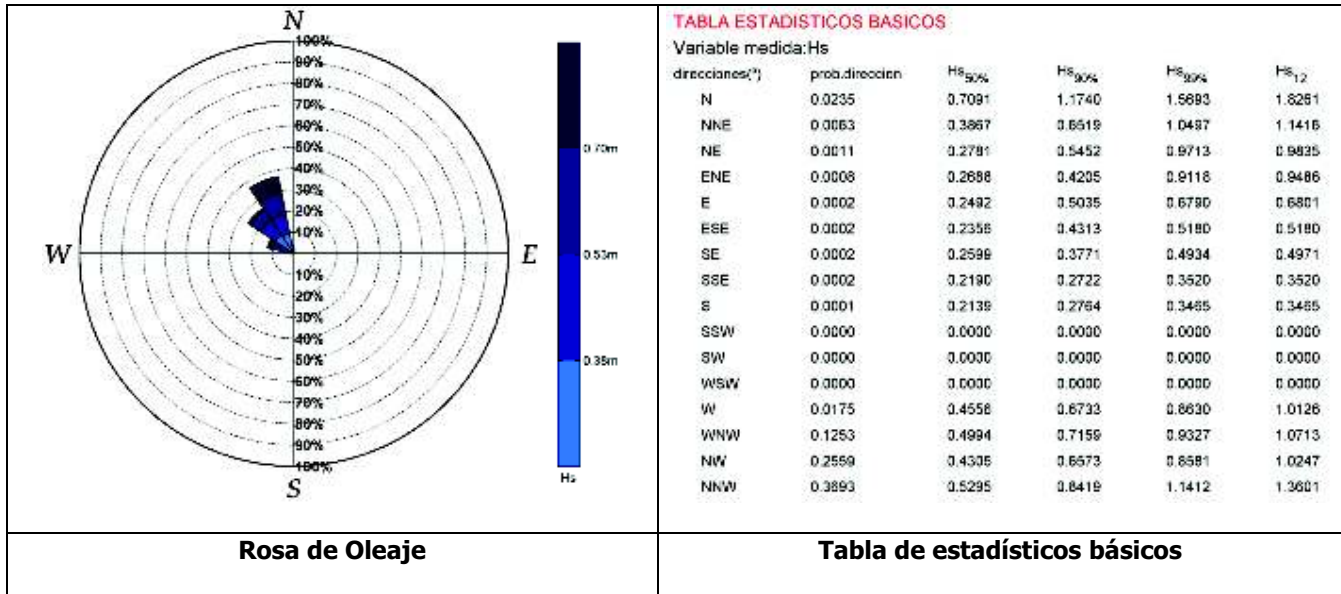
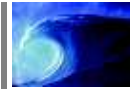
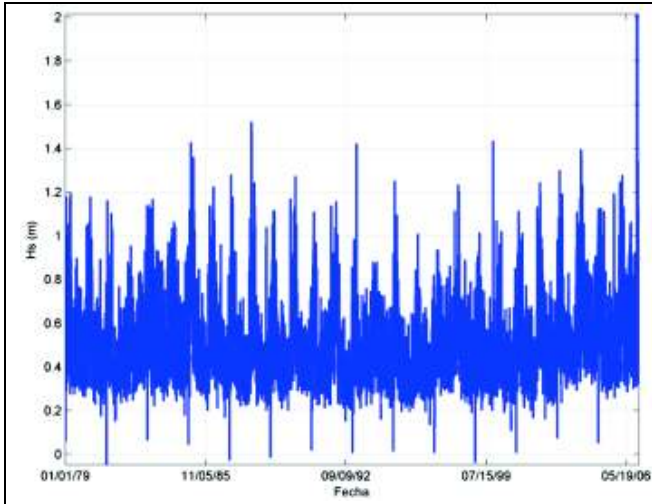
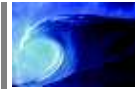
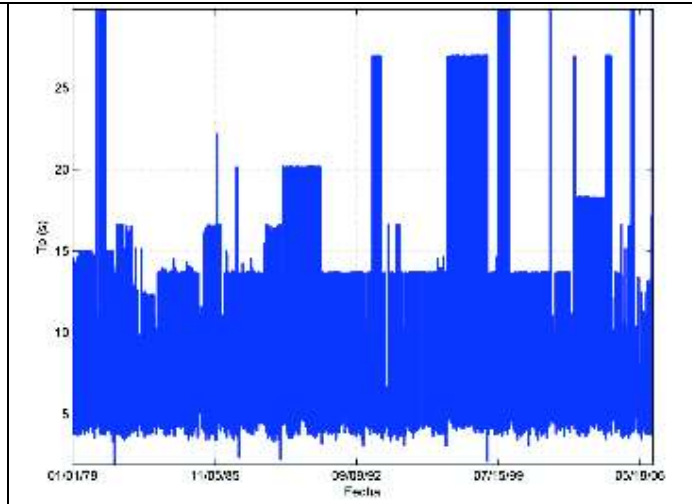


Figura 55. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Golfo de Morrosquillo

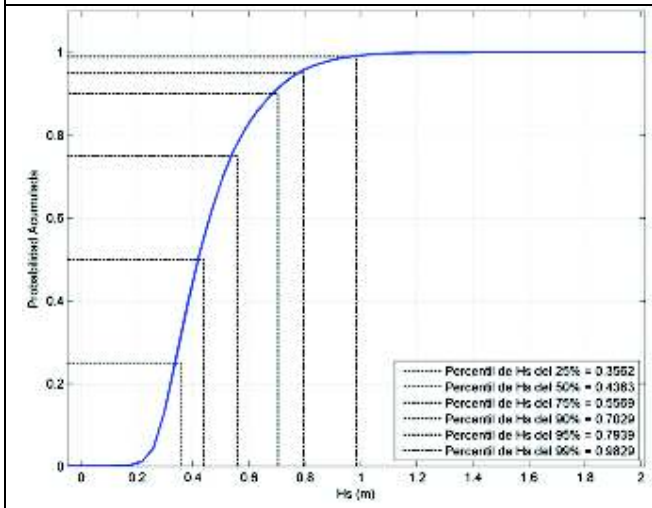
En Cartagena (Figura 56) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 2.0$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 0.5$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 2$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 29$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 9$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 0.5 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses Julio a Agosto y los máximos en los meses de Enero a Marzo. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NNW y del NW con un porcentaje de ocurrencias conjunto cercano al 74 %, esto quiere decir que más del 74% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones, la dirección que sigue es WNW con un porcentaje de ocurrencias cercano al 18 %. Los descriptores básicos de la serie de oleaje en Cartagena se presentan a continuación. Para la dirección NNW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.57$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.82$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.07$ m y $H_{s_{12}} = 1.23$ m, y para la dirección NW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.38$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.52$ m, $H_{s_{99\%}} = 0.69$ m y $H_{s_{12}} = 0.95$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s_{50\%}} = 0.57$ m indica que la altura de ola de 0.57 m es superada el 50% del tiempo.



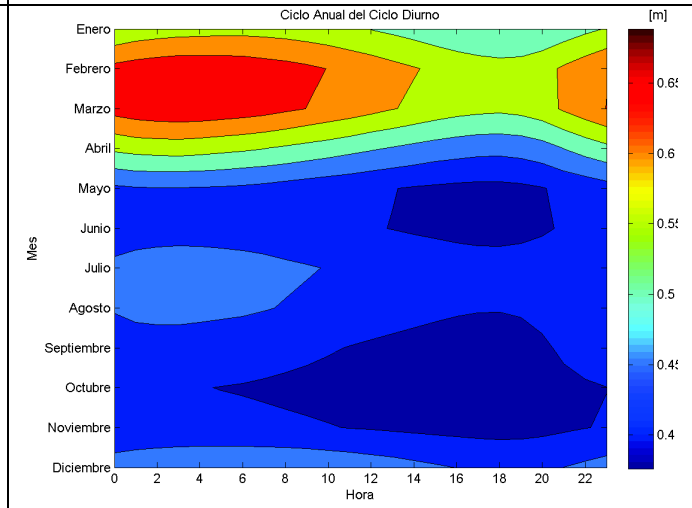
Serie de Altura de Ola



Serie de Periodo Pico



Función de Probabilidad Acumulada



Ciclo Anual del Ciclo Diurno

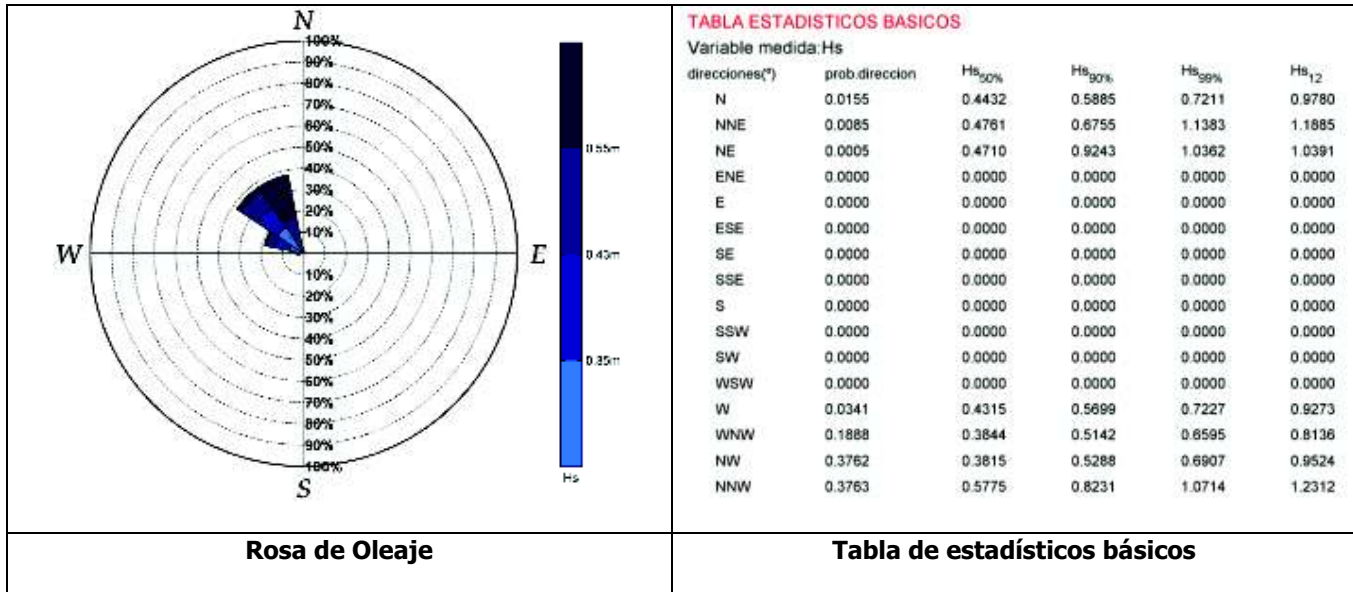
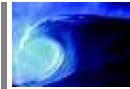
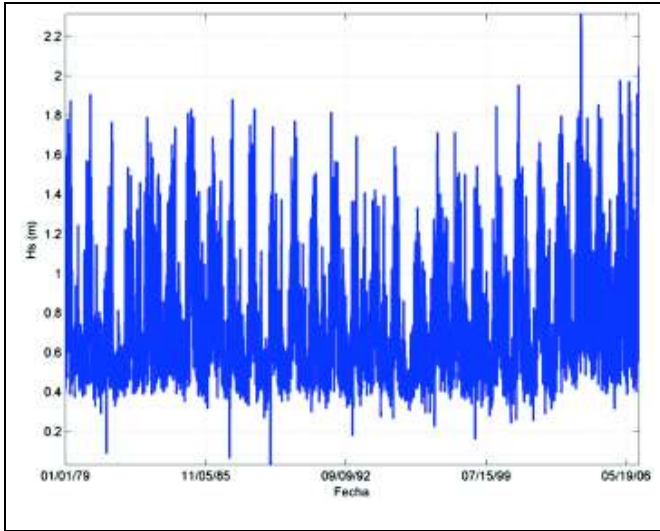
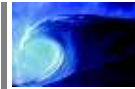
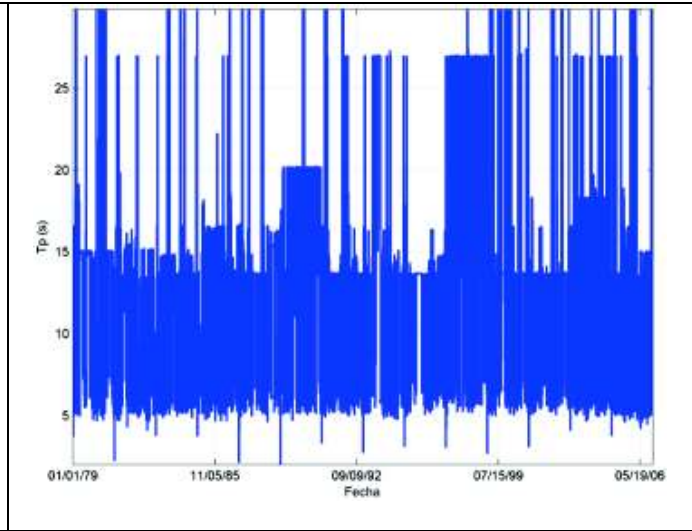


Figura 56. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Cartagena

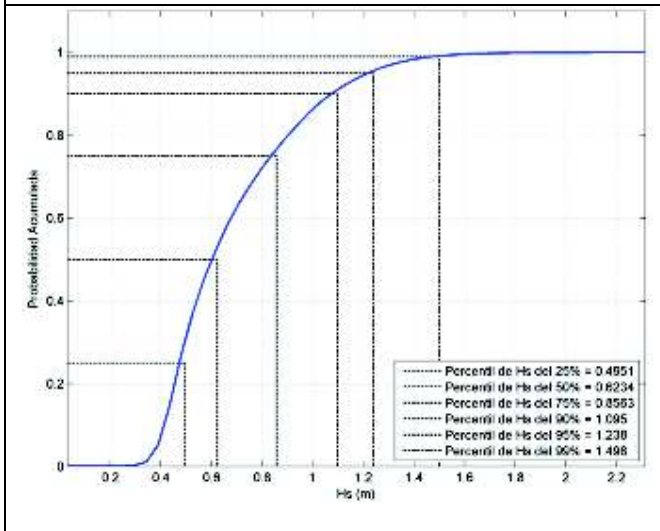
En Barranquilla (Figura 57) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 2.3$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 0.7$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 2$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 29$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 12$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 0.6 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses Junio a Agosto y los máximos en los meses de Enero a Marzo. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NNE, del NW y del N con un porcentaje de ocurrencias conjunto cercano al 81%, esto quiere decir que más del 81% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones. Los descriptores básicos de la serie de oleaje en Barranquilla se presentan a continuación. Para la dirección NNE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.85$ m, $H_{s_{90\%}} = 1.24$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.59$ m y $H_{s_{12}} = 1.84$ m, para la dirección NNW se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.47$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.59$ m, $H_{s_{99\%}} = 0.73$ m y $H_{s_{12}} = 0.94$ m y para la dirección N se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.56$ m, $H_{s_{90\%}} = 0.79$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.05$ m y $H_{s_{12}} = 1.24$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s_{50\%}} = 0.85$ m indica que la altura de ola de 0.85 m es superada el 50% del tiempo.



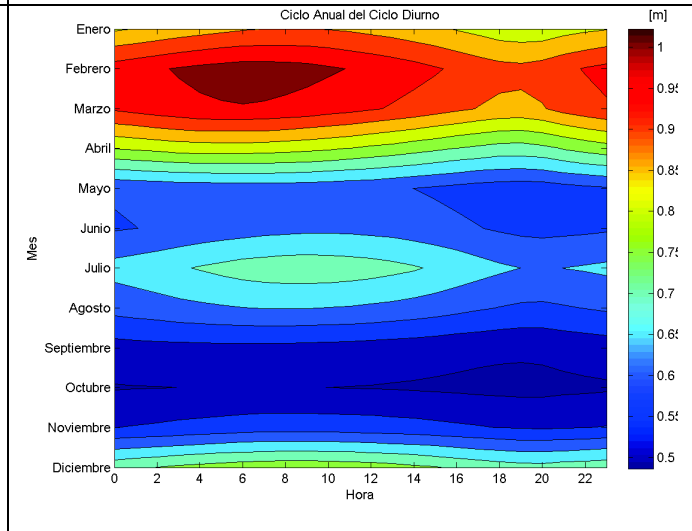
Serie de Altura de Ola



Serie de Periodo Pico



Función de Probabilidad Acumulada



Ciclo Anual del Ciclo Diurno

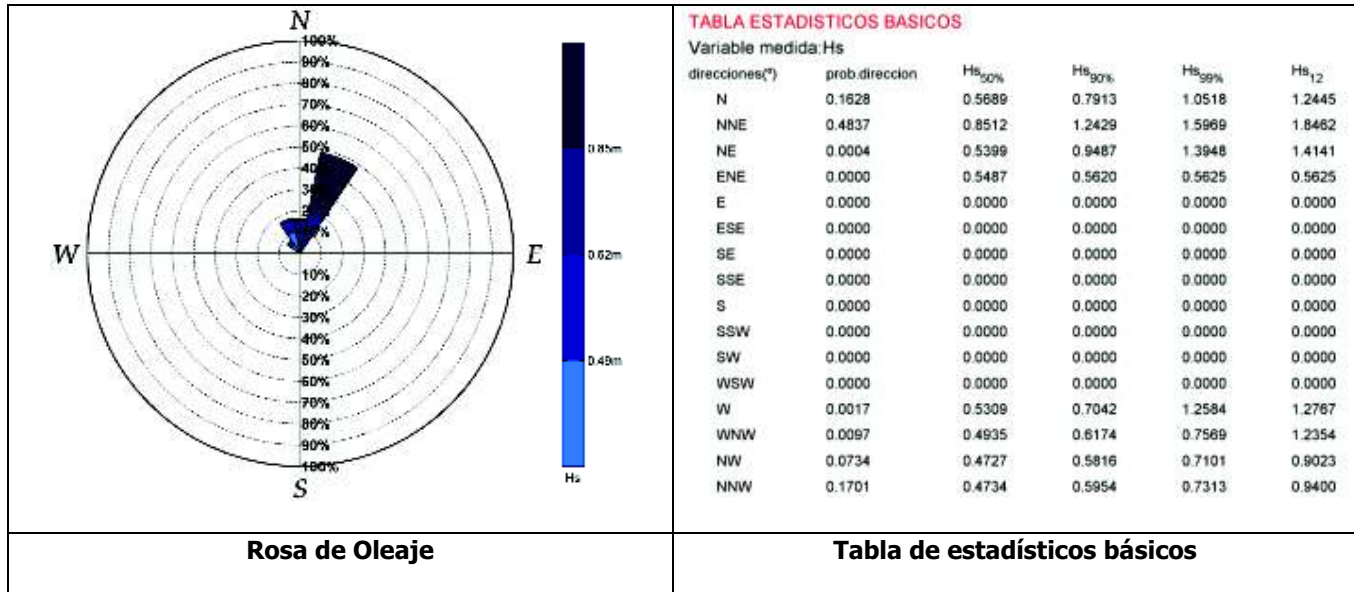
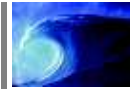
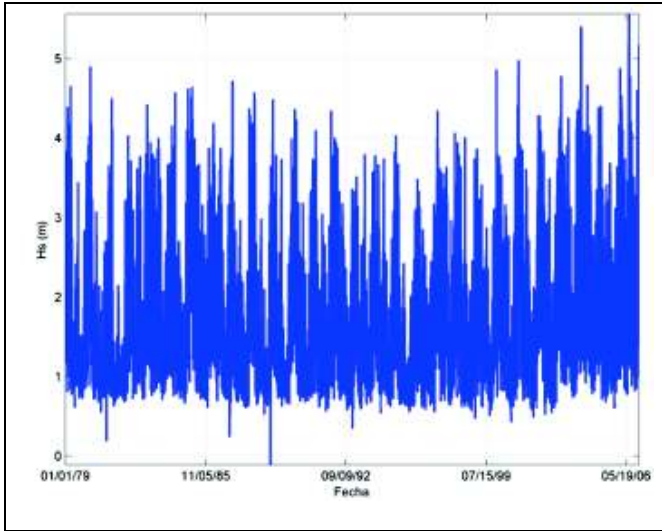
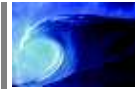
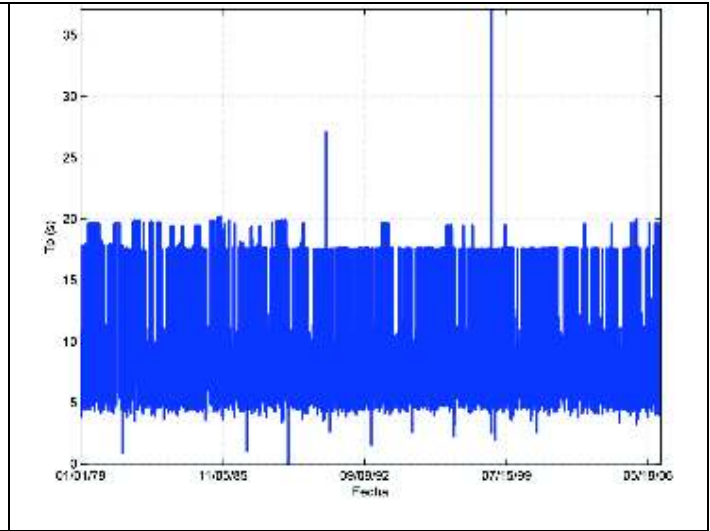


Figura 57. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Barranquilla

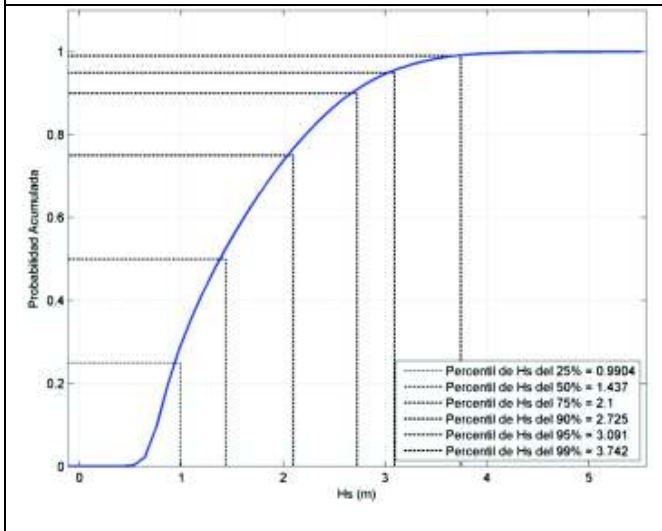
En Santa Marta (Figura 58) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 5.5$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 1.6$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 1$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 29$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 10$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 1.4 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses Septiembre a Noviembre y los máximos en los meses de Enero a Marzo. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NE, del con un porcentaje de ocurrencias cercano al 64%, la dirección que le sigue es la NNE con un porcentaje del 13%, esto quiere decir que más del 77% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones. Los descriptores básicos de la serie de oleaje en Santa Marta se presentan a continuación. Para la dirección NE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 1.86$ m, $H_{s_{90\%}} = 2.95$ m, $H_{s_{99\%}} = 3.88$ m y $H_{s_{12}} = 4.58$ m y para la dirección NNE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 1.02$ m, $H_{s_{90\%}} = 1.29$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.66$ m y $H_{s_{12}} = 1.98$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s_{50\%}} = 1.86$ m indica que la altura de ola de 1.86 m es superada el 50% del tiempo.



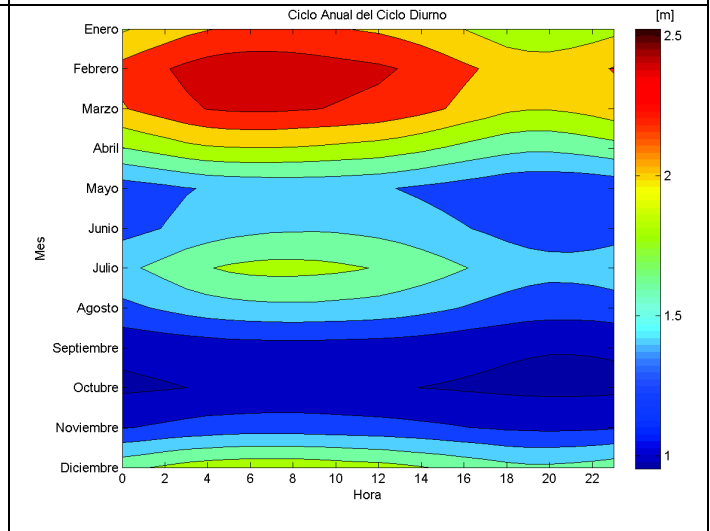
Serie de Altura de Ola



Serie de Periodo Pico



Función de Probabilidad Acumulada



Ciclo Anual del Ciclo Diurno

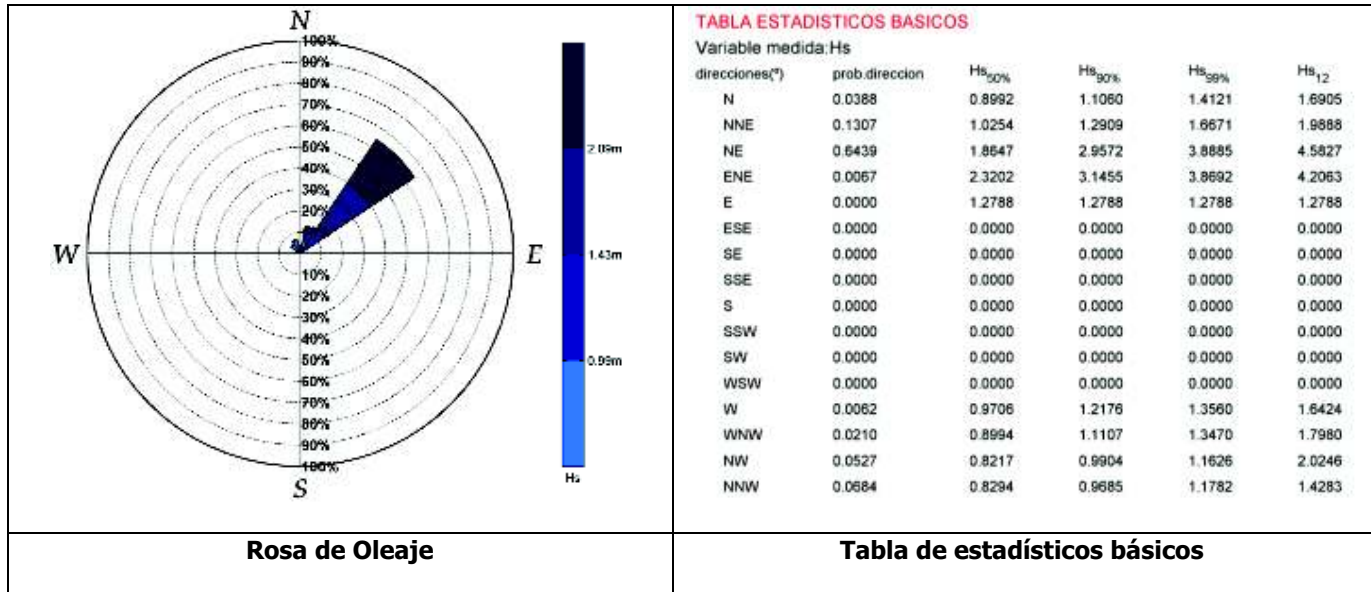
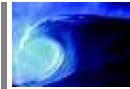
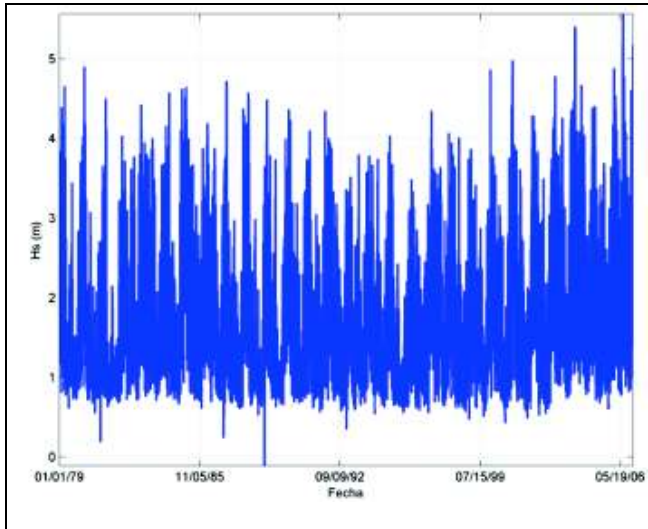
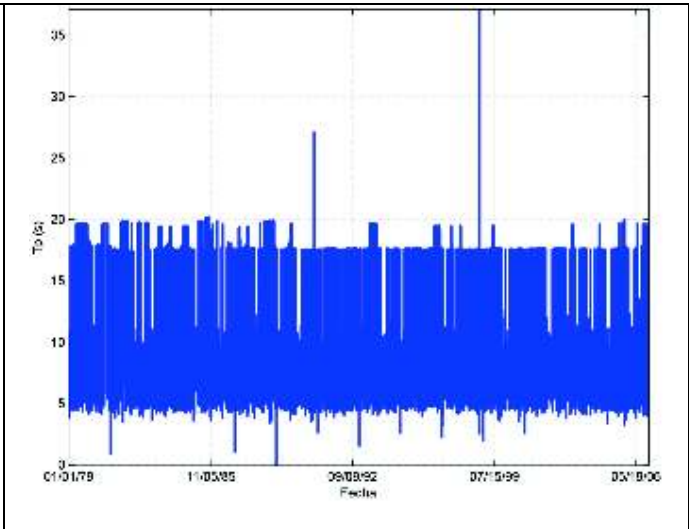


Figura 58. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Santa Marta

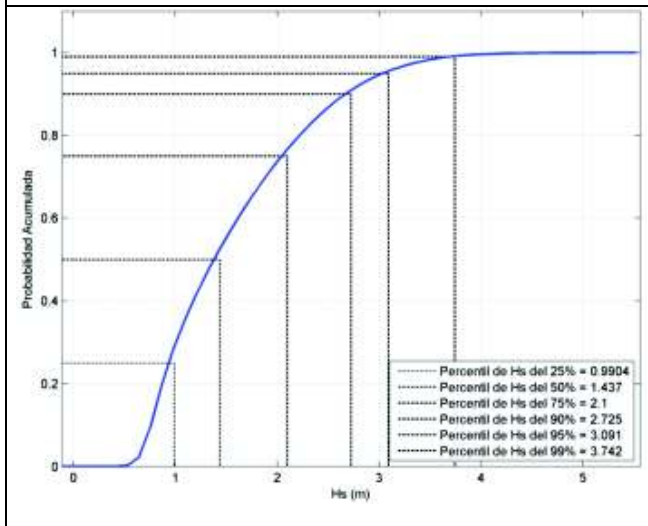
En Riohacha (Figura 59) los valores de altura de ola que se presentan en la serie van las calmas hasta valores máximos que alcanzan $H_{s_{max}} = 4.4$ m, con una media de $H_{s_{med}} = 1.3$ m. Con respecto a los periodos se presentan los siguientes valores $T_{p_{min}} = 1$ s hasta valores máximos que alcanzan $T_{p_{max}} = 19$ s, con una media de $T_{p_{med}} = 9$ s. La función de distribución muestra que para el 50% del tiempo no se supera el valor de 1.3 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los mínimos oleajes en los meses Septiembre a Noviembre y los máximos en los meses de Enero a Marzo. La rosa de oleaje presente indica la dirección y altura de las olas en aguas profundas en una amplia zona frente al área de estudio. Las olas más frecuentes provienen del NE, del ENE y del NNE con un porcentaje de ocurrencias conjunto cercano al 77%, esto quiere decir que más del 77% del tiempo las alturas de ola vienen de estas direcciones. Los descriptores básicos de la serie de oleaje en Riohacha se presentan a continuación. Para la dirección NE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 1.38$ m, $H_{s_{90\%}} = 2.05$ m, $H_{s_{99\%}} = 2.77$ m y $H_{s_{12}} = 3.29$ m, para la dirección ENE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 1.59$ m, $H_{s_{90\%}} = 2.24$ m, $H_{s_{99\%}} = 2.84$ m y $H_{s_{12}} = 3.46$ m y para la dirección NNE se presentan los siguientes estadísticos $H_{s_{50\%}} = 0.99$ m, $H_{s_{90\%}} = 1.24$ m, $H_{s_{99\%}} = 1.51$ m y $H_{s_{12}} = 1.71$ m. Cada uno de estos estadísticos corresponde a la altura de ola superada el % del tiempo que indica cada valor, quiere decir esto que el $H_{s_{50\%}} = 1.38$ m indica que la altura de ola de 1.38 m es superada el 50% del tiempo.



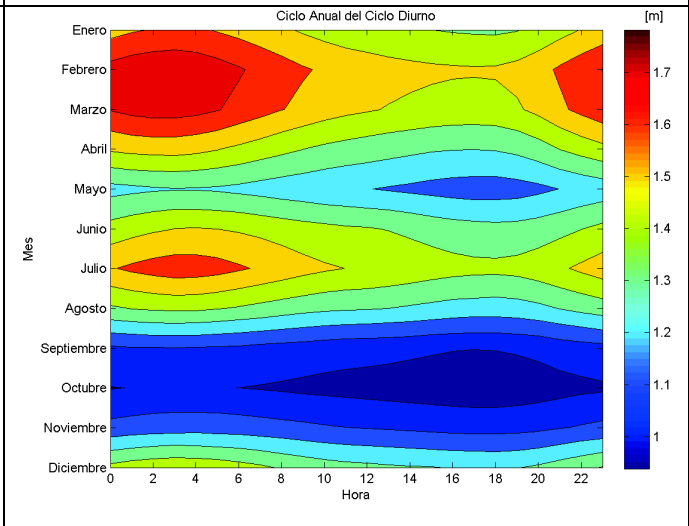
Serie de Altura de Ola



Serie de Periodo Pico



Función de Probabilidad Acumulada



Ciclo Anual del Ciclo Diurno

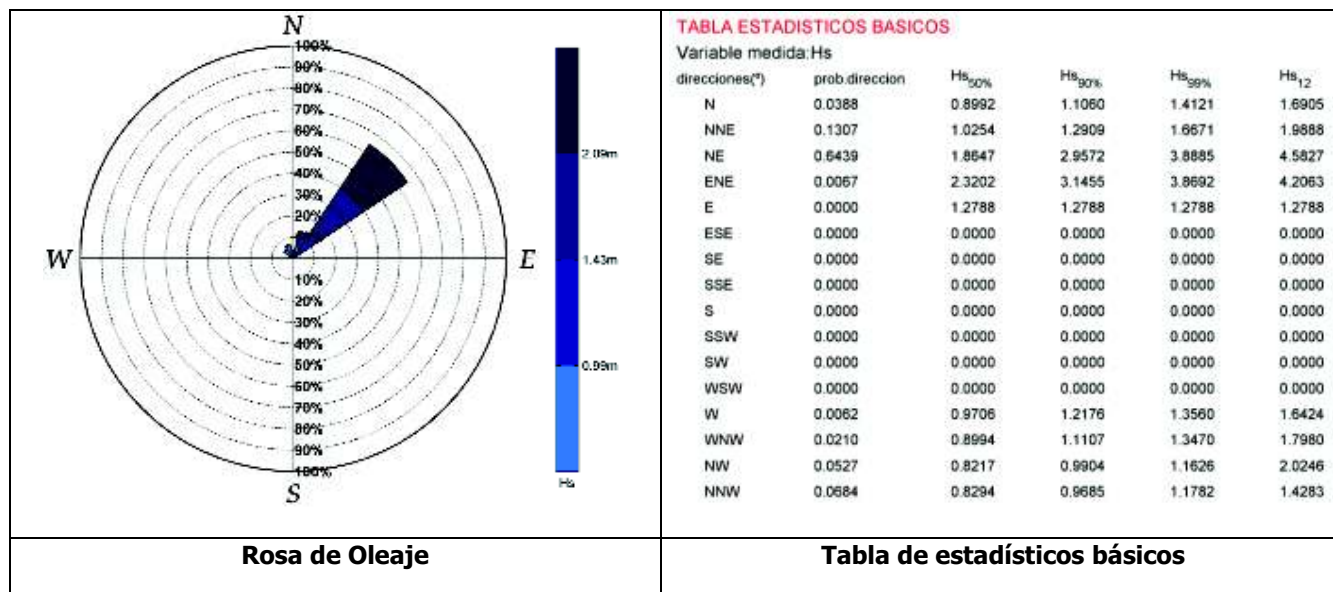
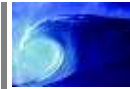


Figura 59. Análisis estadísticos de la serie de Oleaje Riohacha

En la Tabla 13 se muestran los valores medios y máximos de altura de ola, los valores mínimos, medios y máximos del periodo pico, el valor del nivel superado el 50% del tiempo en la función de distribución, los meses en que se presentan los valores mínimos y máximos y la dirección del oleaje predominante.

Tabla 13. Principales características del oleaje en el Caribe Colombiano

Oleaje						
	Urabá	Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
Medio (Hs)	0.5	0.6	0.5	0.7	1.6	1.3
Máximo (Hs)	2	2.1	2	2.3	5.5	4.4
Mínimo (Tp)	2	2	2	2	1	1
Medio (Tp)	6.7	6	9	12	10	9
Máximo (Tp)	2.9	29	29	29	29	19
Función Distribución	0.5	0.3	0.5	0.6	1.4	1.3
Mínimo Mes	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct
Máximo Mes	Feb	Feb	Feb	Feb	Feb	Feb
Dirección Oleaje	N (41)	NNW-NW (63)	NNW-NW (74)	NNE-NWN(81)	NE (64)	NE-ENE-NNE (77)



Según la información disponible con que se cuenta hasta ahora, a saber las series de oleaje simuladas con el modelo SWAN, en la Figura 60 se presenta una comparación de las diferentes metodologías con que se calcula el run up, obteniendo que para la formulación de Guza y Thornton (1981) y Mase (1989) los valores son elevados mientras que la formulación de Hollman (1985) los valores son bajos, existiendo una gran diferencia entre las series. Las formulaciones de Nielsen y Hanslow (1991) dan valores inferiores. Se ha utilizado la expresión correspondiente a Hollman con $\tan\beta = 0.1$. Estos resultados, para los valores más comunes de altura de ola, se encuentran como los más conservadores y a medida que crece el valor de la altura de ola los resultados dados por la formulación de Guza y Thornton (1981) estos aumentan significativamente, notándose aun más la diferencia entre ésta y las otras fórmulas.

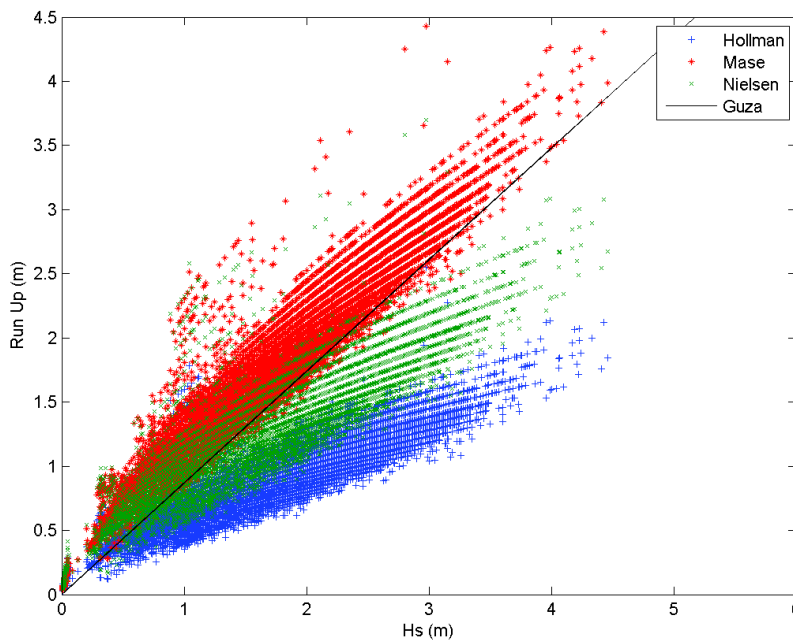


Figura 60. Variación del remonte (Ru) con la altura de ola para las cuatro fórmulas analizadas para la boya de Barranquilla

En la Figura 61 se observan las determinadas combinaciones de la altura de ola significativa y de periodo pico con que se obtiene los valores de run up, estos se concentran entre los 0 y 2 m, existen adicionalmente ciertas combinaciones de altura de ola y periodo que no se presentan en la realidad y que no permiten entonces que se establezca un run up asociado a dichas combinaciones, es por ello que estas series de se concentran entre los valores anteriormente mencionados.

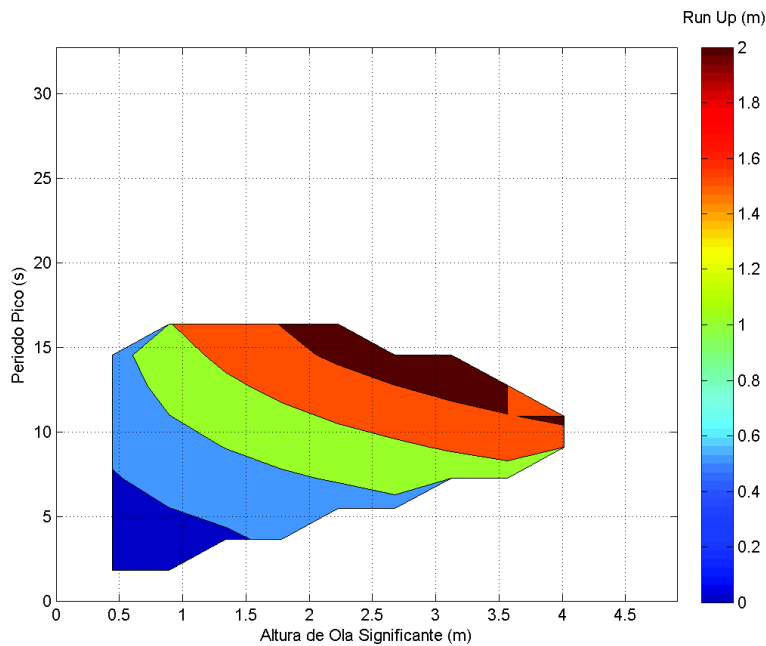
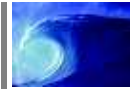
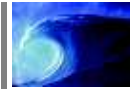


Figura 61. Variación del remonte (Ru) con respecto a la altura de ola significativa (Hs) y el periodo pico (Tp) para la boya de Barranquilla (Formulación Hollman)

Se calcularon entonces las series de run up a partir de las series de oleaje para los diferentes puntos en la costa colombiana. Estas series que se calcularon provienen de la aplicación de ciertos parámetros a la serie de alturas de ola, periodo pico y $Tan\beta=0.1$ para cada punto, y su análisis se completamente calculando los valores máximos y medios de dichas serie en cada ubicación, como lo muestra la tabla adjunta.

Tabla 14. Estadísticos principales de las series de Run Up (en m)

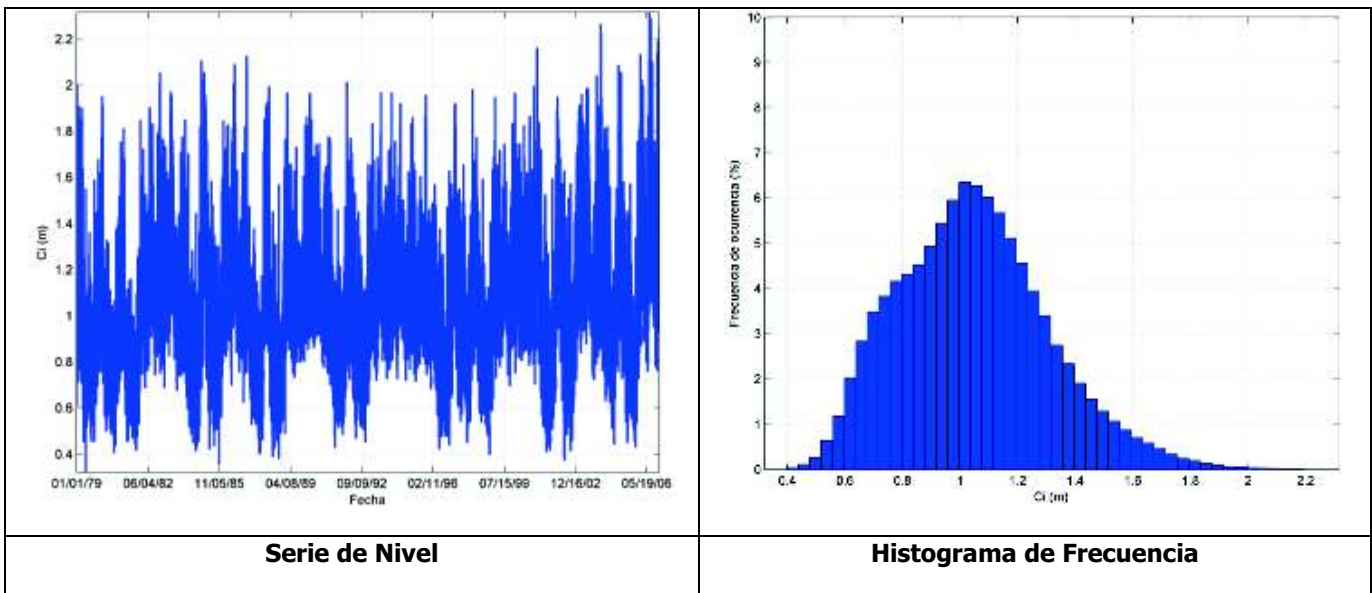
Run Up	Urabá	Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
Máximos	1.57	0.45	1.57	1.60	3.00	2.32
Medios	0.42	0.23	0.49	0.81	0.96	0.76



4.4 COTA DE INUNDACION

Para cada una de las localidades seleccionadas en la costa Caribe colombiana se presentan los resultados de la cota de inundación. Se toma como referencia el nivel medio del mar en cada una de las zonas dependiendo de la ubicación escogida y luego a nivel horario se toma cada valor en cada una de las series calculadas: Marea Astronómica, Marea Meteorológica y Run Up, calculada a partir del Oleaje, estas series se suman hora a hora y se construye la serie de cota de inundación.

Los resultados de la cota de inundación para una pendiente típica de $Tan\beta=0.10$ con las series calculadas se presentan en la Figura 62 a la Figura 67. Para el sector del Golfo de Urabá (Figura 62) los valores medios y máximos de cota de inundación para esta pendiente son 1.0 m y 2.3 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.1 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.0 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de septiembre a octubre y los máximos en los meses de enero a marzo. El régimen medio de cota de inundación para esta pendiente en el sector del Golfo de Urabá presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 1.7 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 1.0 m y de 2.0 m respectivamente.



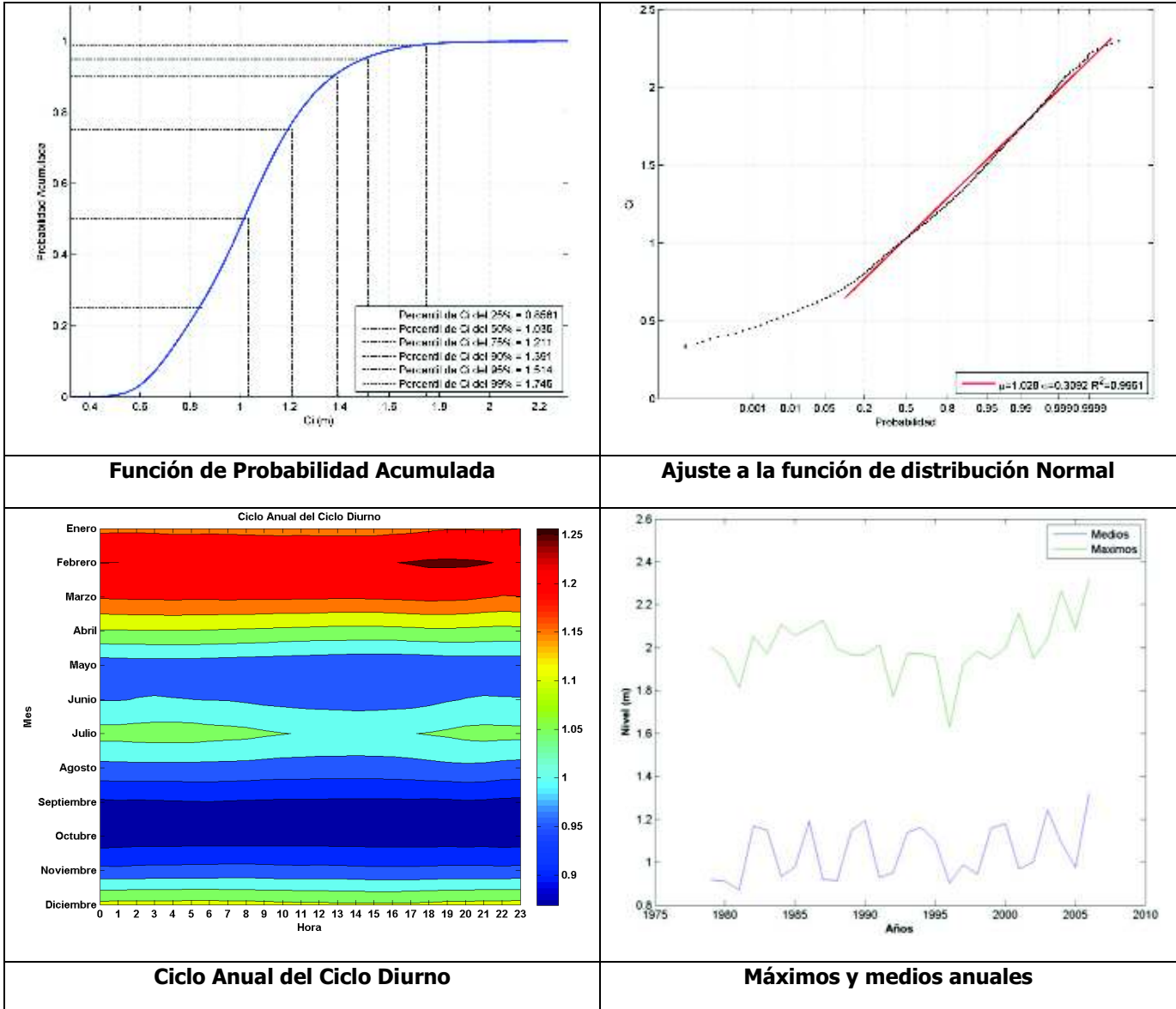
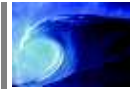
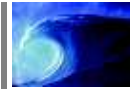
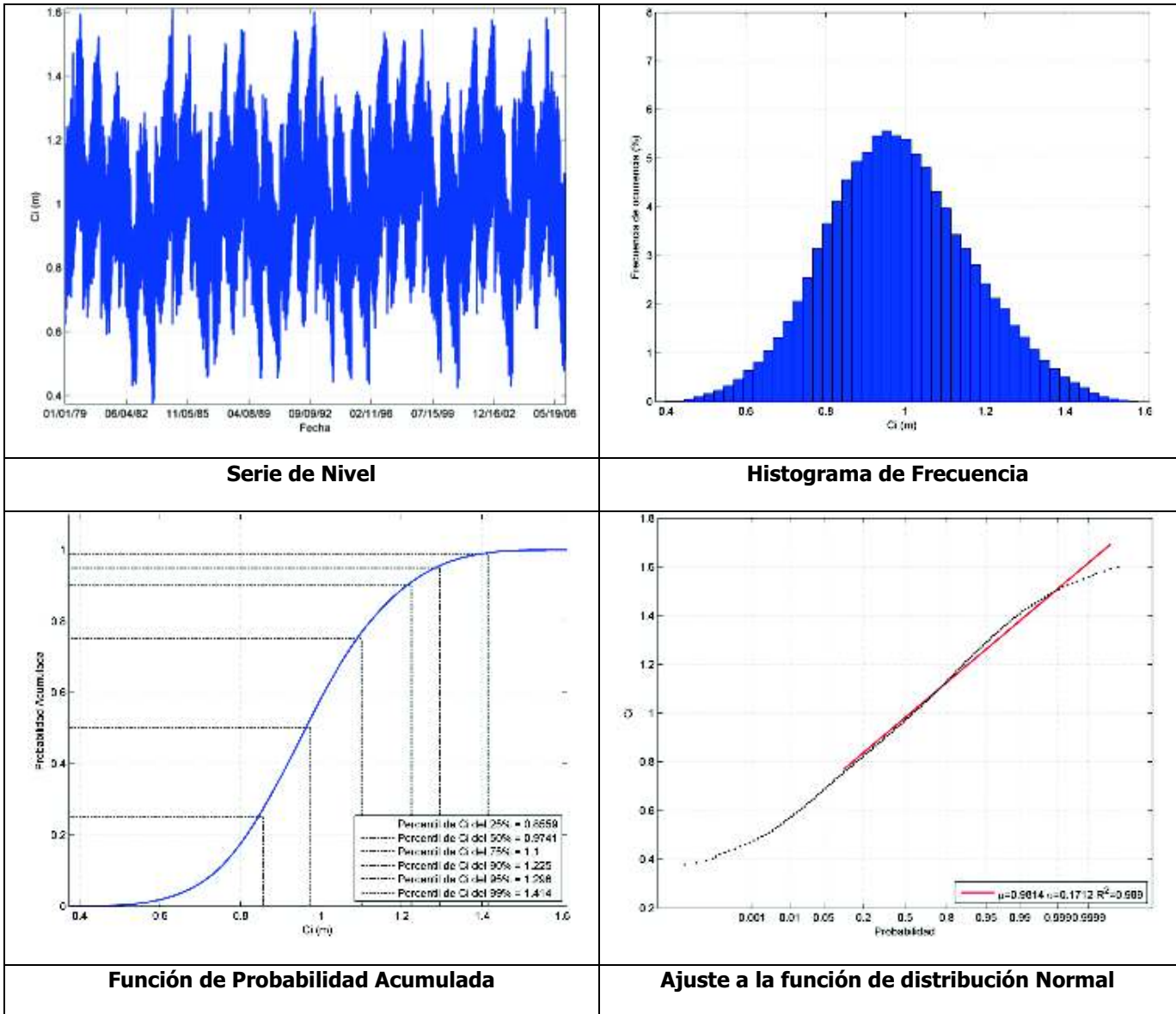


Figura 62. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para el sector del Golfo de Urabá

Para el sector del Golfo de Morrosquillo (Figura 63) los valores medios y máximos de cota de inundación para esta pendiente son 0.9 m y 1.6 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.0 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.0 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de marzo a mayo y los máximos en los meses de octubre y noviembre. El régimen medio de cota de



inundación para esta pendiente en el sector del Golfo de Morrosquillo presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 1.4 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 0.9 m y de 1.4 m respectivamente.



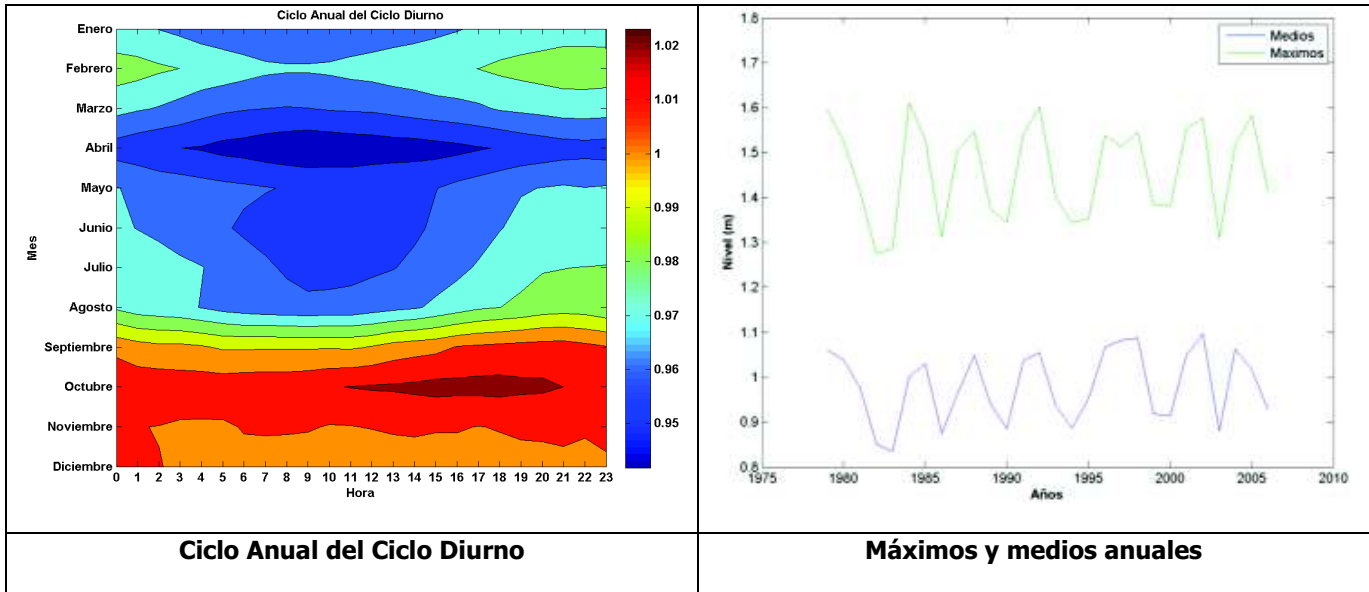
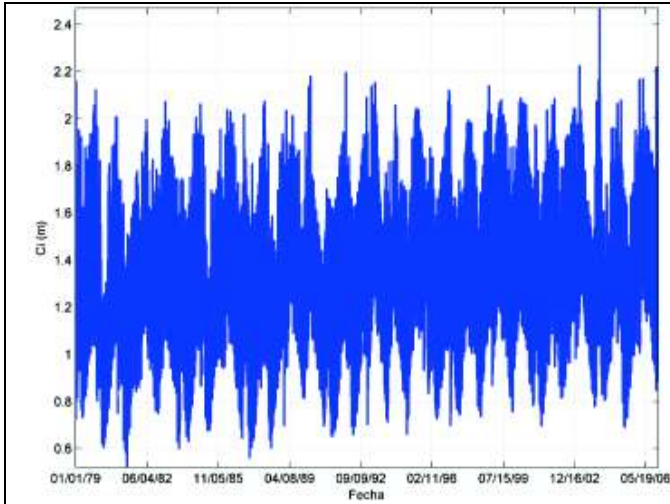
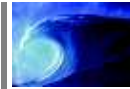
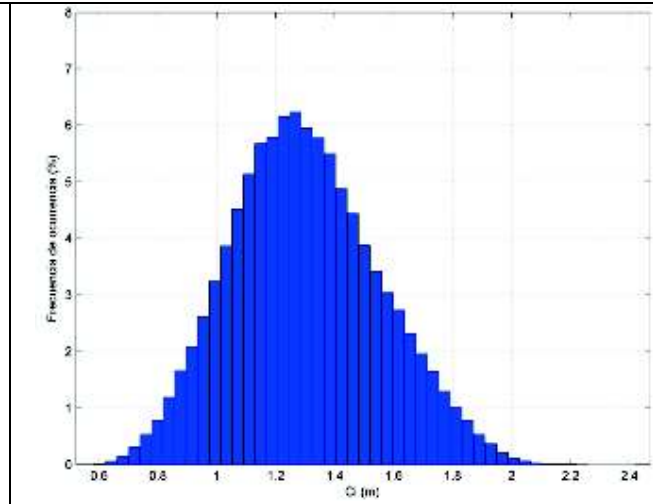


Figura 63. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para sector del Golfo de Morrosquillo

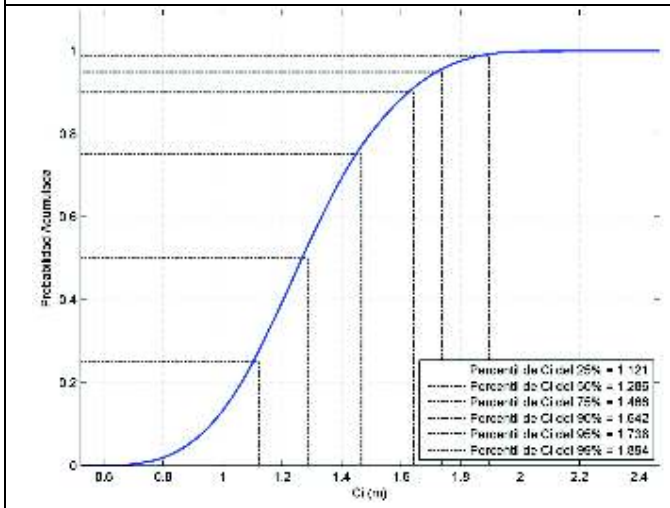
Para el sector de Cartagena (Figura 64) los valores medios y máximos de cota de inundación son para esta pendiente 1.3 m y 2.4 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.3 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.3 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de junio a agosto y los máximos en los meses de octubre y noviembre. El régimen medio de cota de inundación para esta pendiente en el sector de Cartagena presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 1.8 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 1.3 m y de 2.1 m respectivamente.



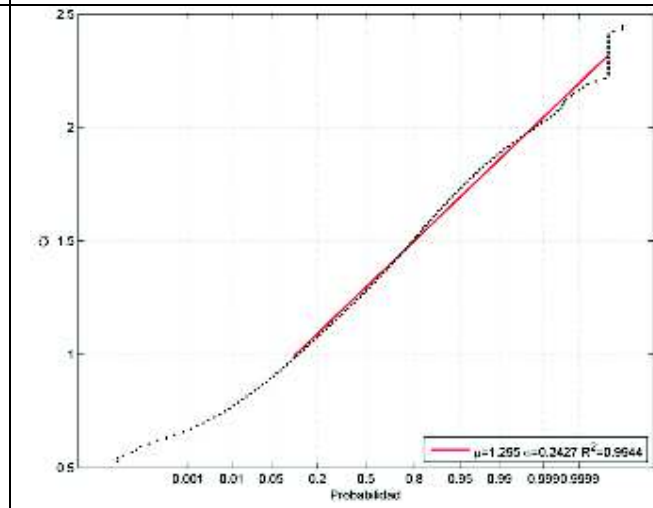
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

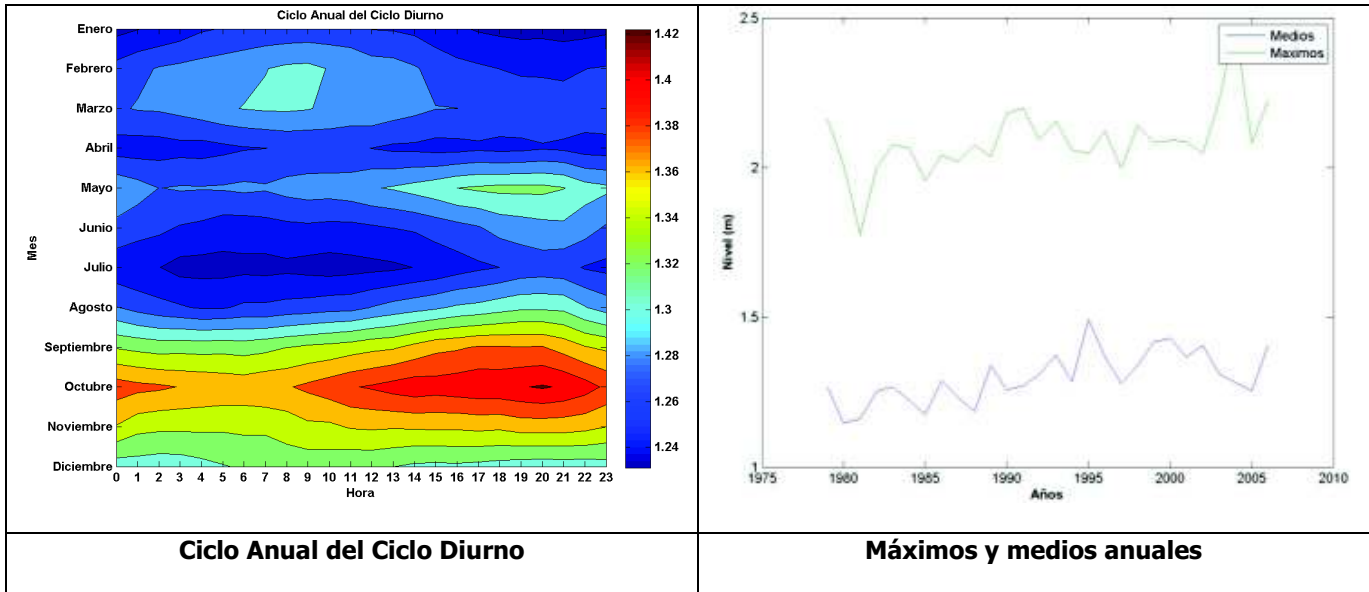
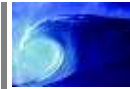
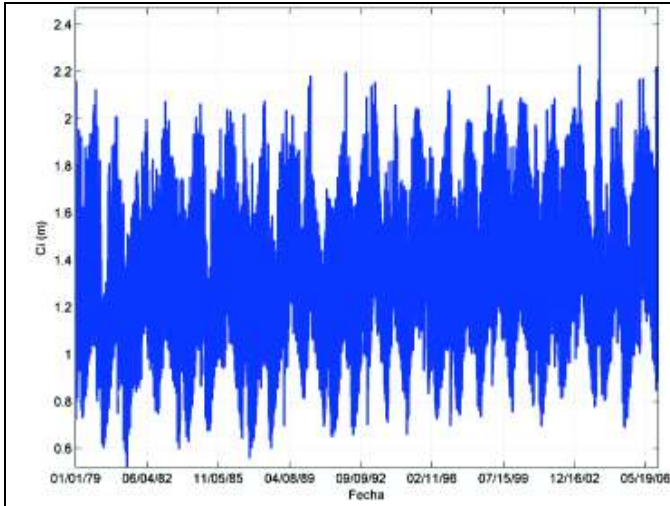
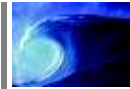
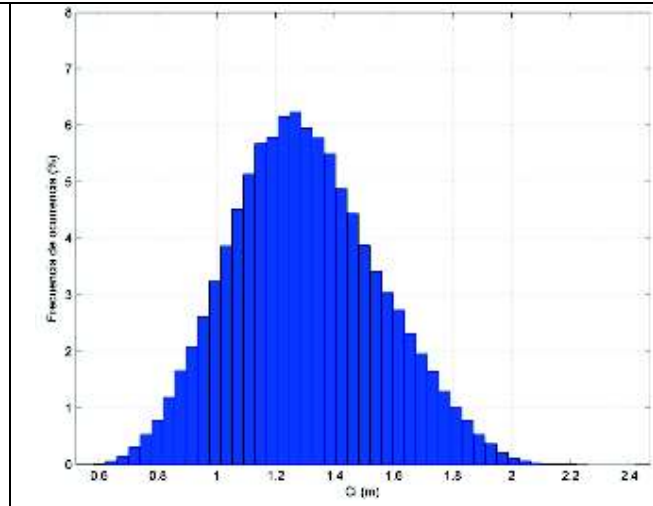


Figura 64. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para el sector de Cartagena

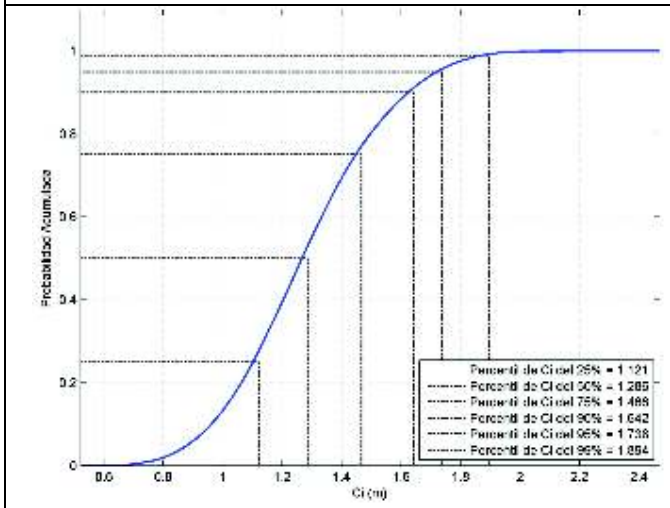
Para el sector de Barranquilla (Figura 65) los valores medios y máximos de cota de inundación para esta pendiente son 1.5 m y 2.4 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.3 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.3 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de junio a agosto y los máximos en los meses de octubre y noviembre. El régimen medio de cota de inundación para esta pendiente en el sector de Barranquilla presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 1.9 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 1.3 m y de 2.1 m respectivamente.



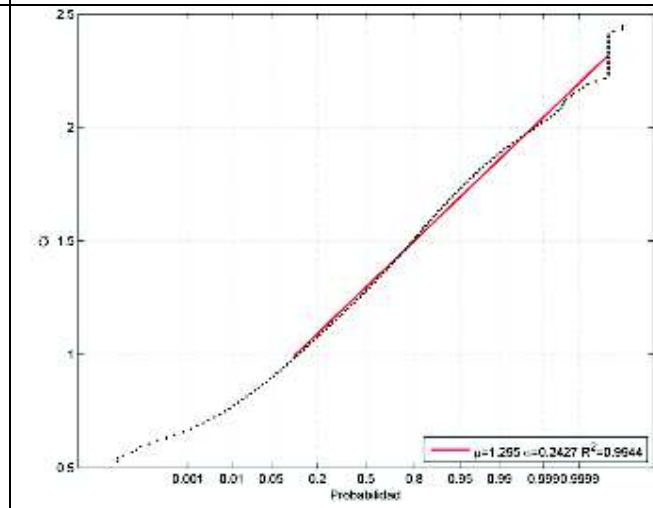
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

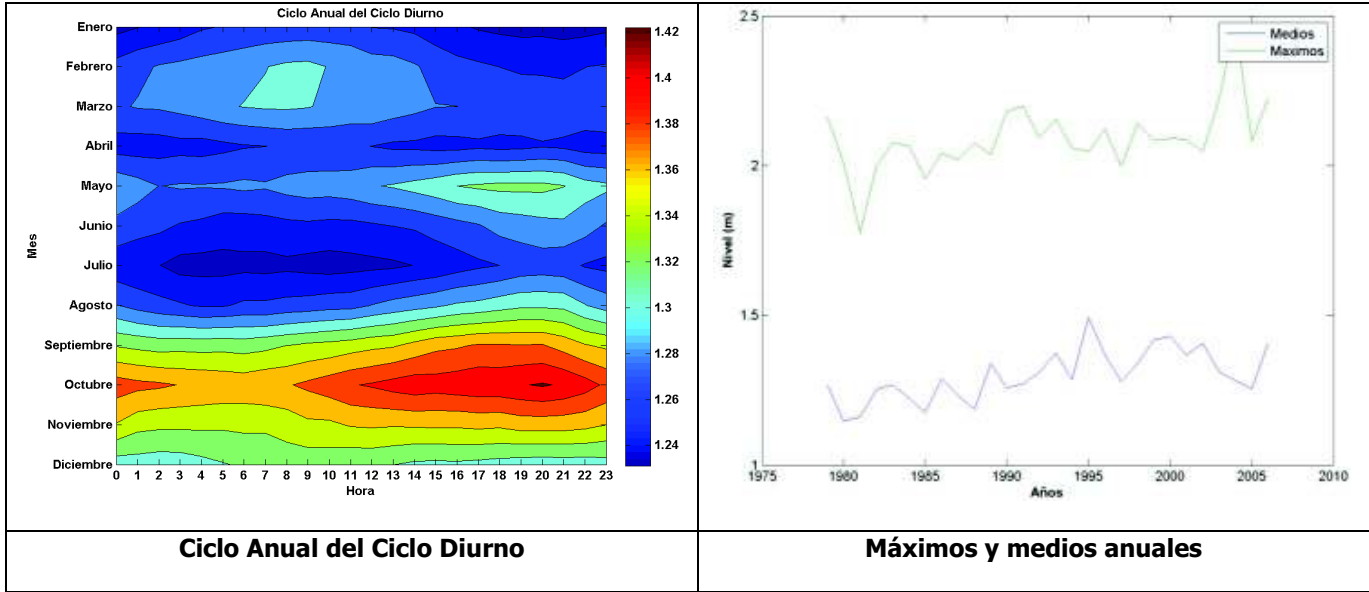
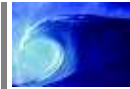
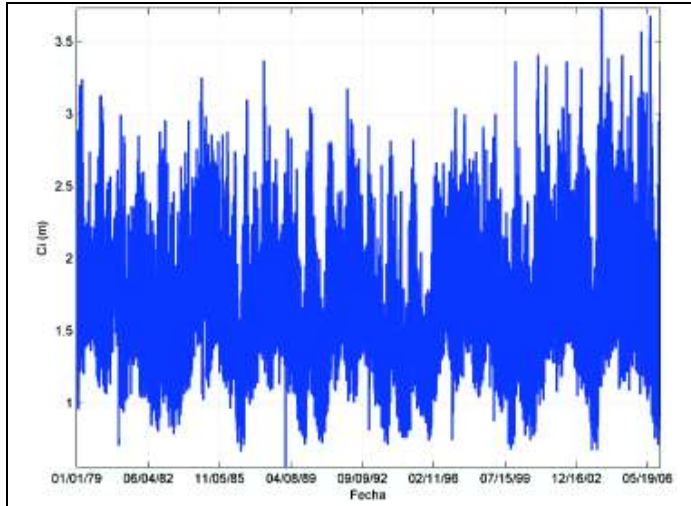
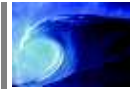
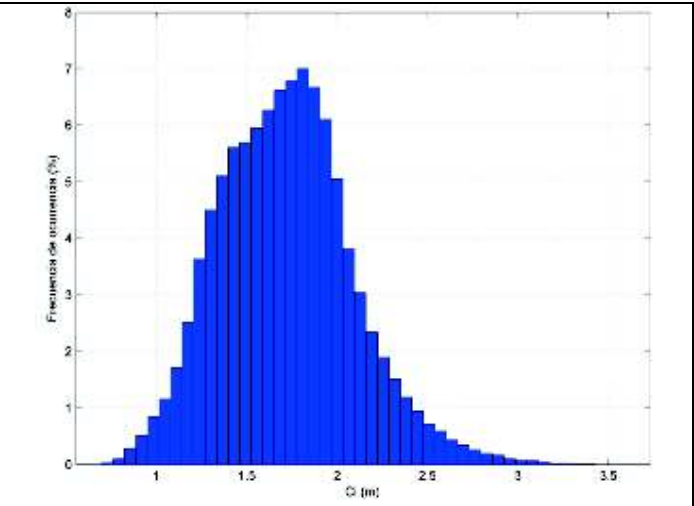


Figura 65. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para el sector de Barranquilla

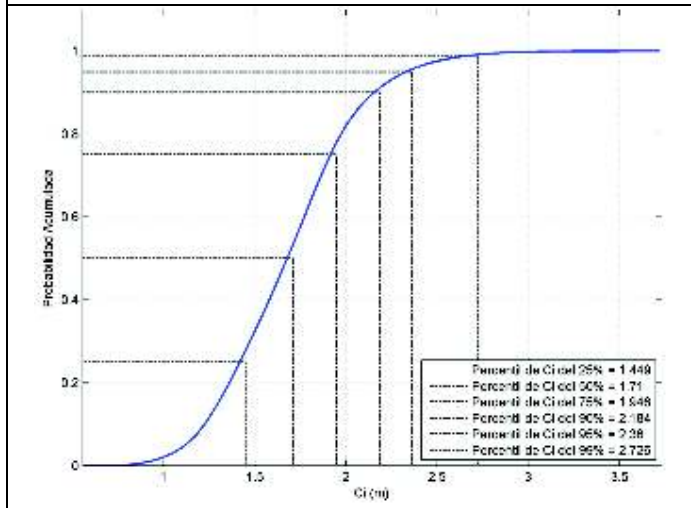
Para el sector de Santa Marta (Figura 66) los valores medios y máximos de cota de inundación para esta pendiente son 1.7 m y 3.6 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.7 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.7 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de septiembre a noviembre y los máximos en los meses de enero a marzo. El régimen medio de cota de inundación para esta pendiente en el sector de Santa Marta presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 2.7 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 1.7 m y de 3.2 m respectivamente.



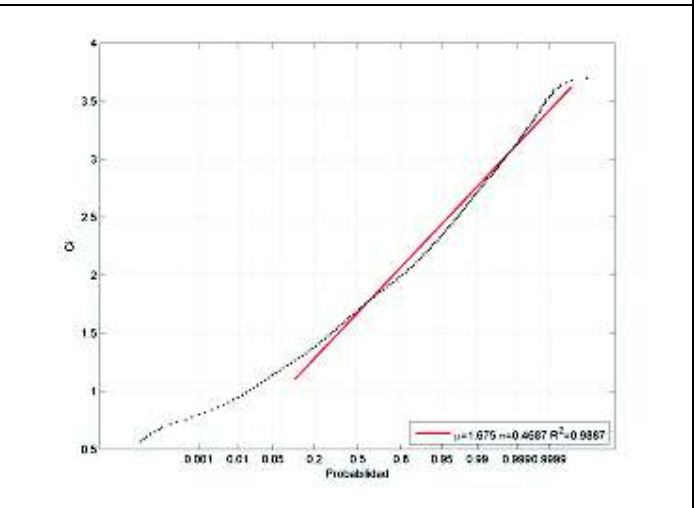
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

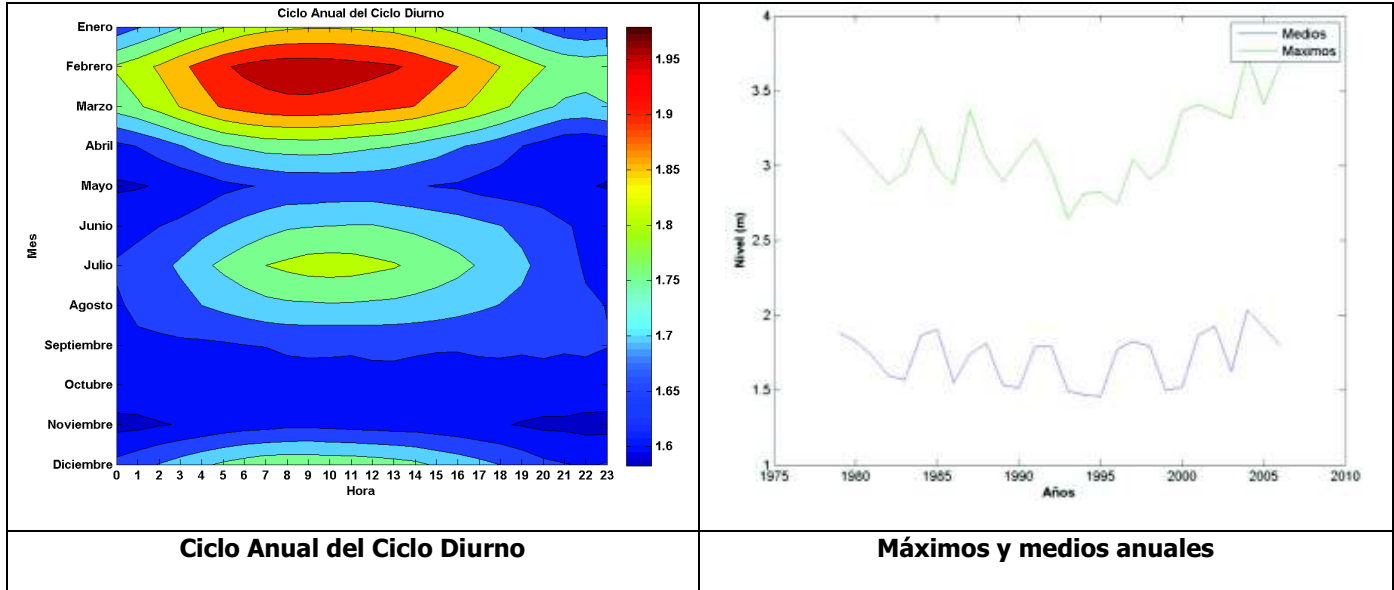
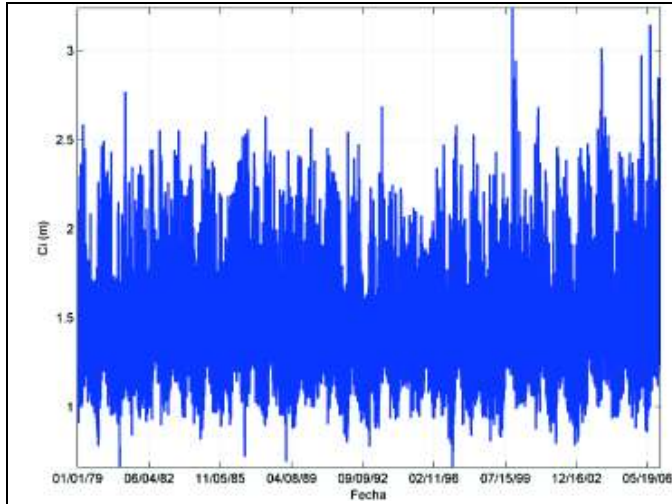
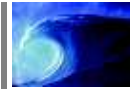
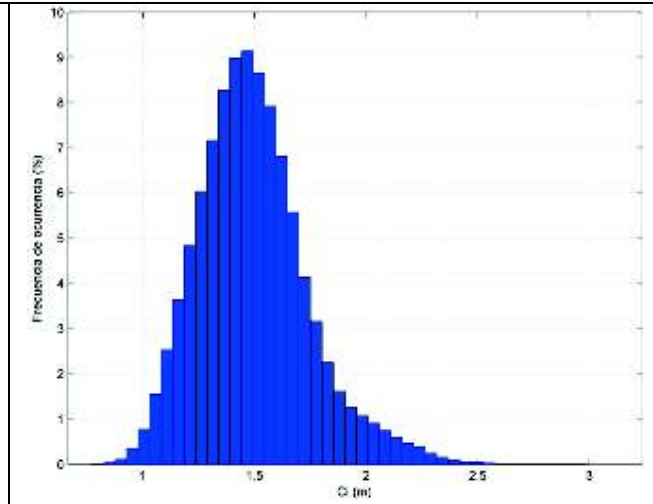


Figura 66. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para el sector de Santa Marta

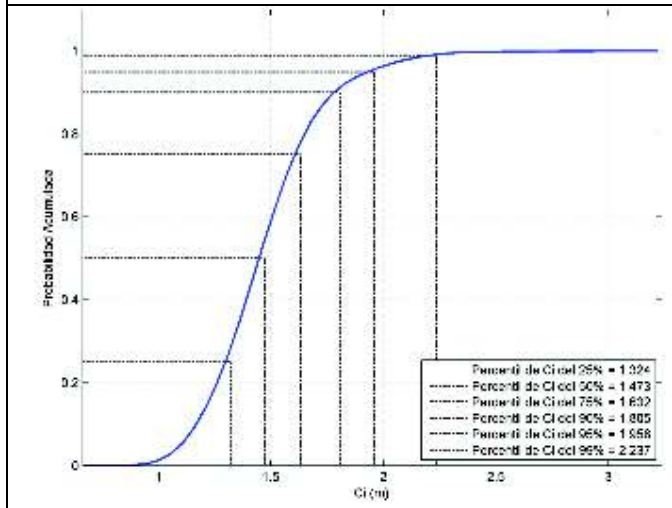
Para el sector de Riohacha (Figura 67) los valores medios y máximos de cota de inundación para esta pendiente son 1.5 m y 3.2 m respectivamente, la distribución del histograma de frecuencias es una campana que concentra la máxima frecuencia en torno a 1.5 m. La función de distribución muestra que para esta pendiente el 50 % del tiempo no se supera el valor de 1.6 m. Según el ciclo diurno dentro del ciclo anual se presentan los niveles mínimos en los meses de noviembre a diciembre y los máximos en los meses de febrero a marzo y de junio a julio. El régimen medio de cota de inundación para esta pendiente en el sector de Riohacha presenta para una probabilidad del 99% (86 horas al año) un nivel de 2.3 m. La gráfica de promedios y máximos anuales muestra el siguiente comportamiento: Los promedios medios anuales y máximos anuales de nivel se concentran alrededor de 1.5 m y de 2.7 m respectivamente.



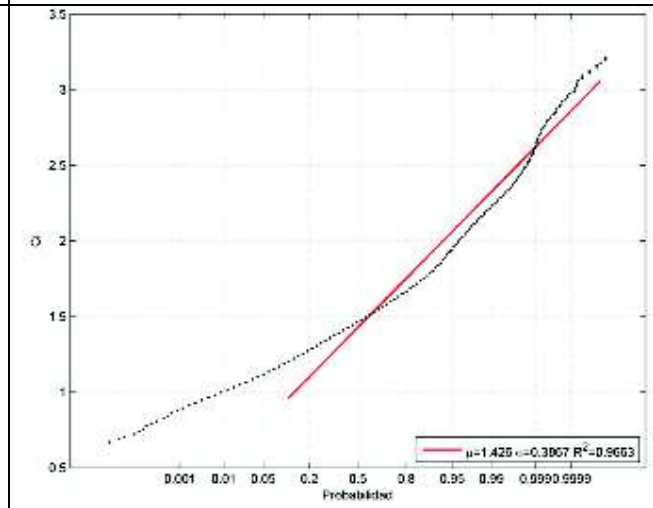
Serie de Nivel



Histograma de Frecuencia



Función de Probabilidad Acumulada



Ajuste a la función de distribución Normal

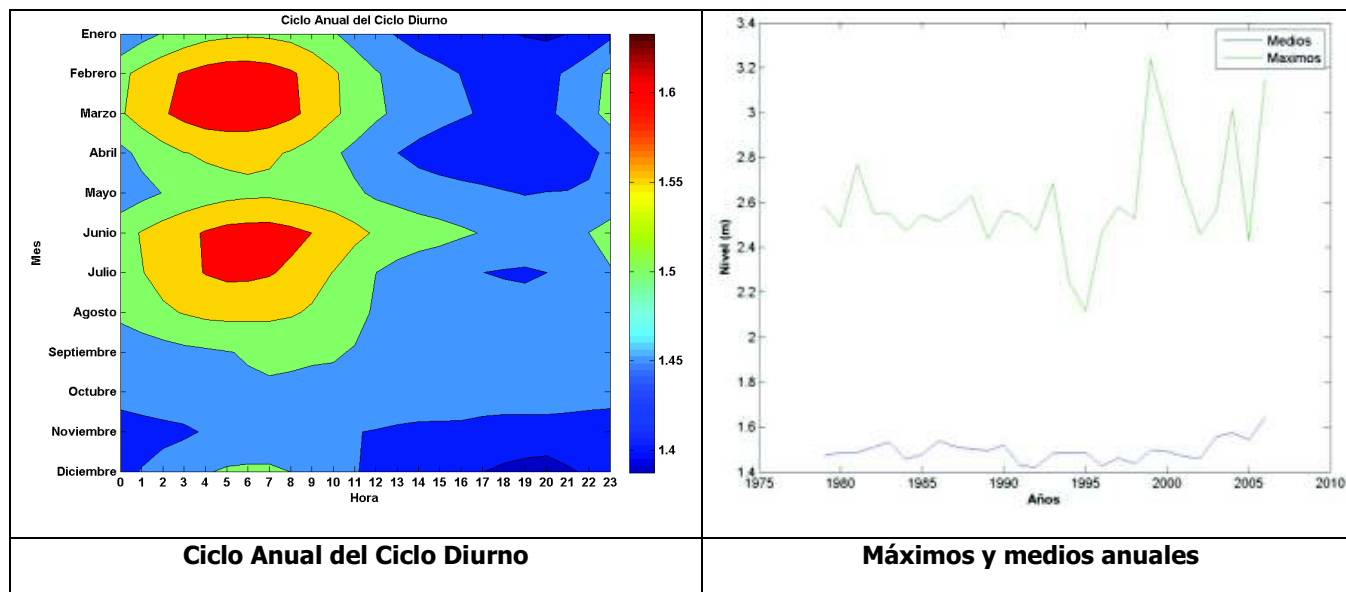
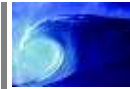


Figura 67. Análisis estadísticos de la serie de Cota de Inundación para el sector de Riohacha

En la Tabla 15 se muestran los valores medios y máximos, si la distribución de niveles se concentra la frecuencias más representativas alrededor de un valor, el valor del nivel superado el 50% del tiempo en la función de distribución, los meses en que se presentan los valores mínimos y máximos, el valor del nivel superado 86 horas al año, el valor medio anual y el rango de valores máximos anuales de cota de inundación.

Tabla 15. Principales características de la cota de inundación en el Caribe Colombiano

Cota de Inundación						
	Urabá	Morrosquillo	Cartagena	Barranquilla	Santa Marta	Riohacha
Medio	1.1	1.0	1.3	1.6	1.7	1.5
Máximo	2.3	1.6	2.5	2.5	3.7	3.2
Moda de la serie	1.1	1.0	1.3	1.3	1.7	1.5
Función Distribución	1.0	1.0	1.3	1.3	1.7	1.6
Min Mes	Sep - Oct	Mar - May	Jun - Ago	Jun - Ago	Sep - Nov	Nov - Dic
Max Mes	Ene - Mar	Oct - Nov	Oct - Nov	Oct - Nov	Ene - Mar	Feb - Mar
Prob. 99 (%) 86 horas	1.7	1.4	1.8	1.9	2.7	2.3
Medio Anual	1.0	0.9	1.3	1.3	1.7	1.5
Máximos Anuales	2.0	1.4	2.1	2.1	3.2	2.7



En la Figura 68 y Figura 69 se presenta la serie de máximos mensuales de cota de inundación para esta pendiente en las diferentes zonas o ubicaciones de la costa Caribe Colombiana, se observan 2 agrupaciones de las series de cota de inundación. Las zona sur (Golfo de Urabá, Golfo de Morrosquillo) presenta rangos de variación entre 0.9 m y 2.1 m y la zona centro y la zona norte (Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Riohacha) con rangos de variación que van desde los 1.3 m hasta los 3.6 m. En la esta gráfica se observan mayores magnitudes de la cota de inundación, este nivel se encuentra influenciado directamente por el oleaje que se utilizó para el cálculo del Run Up, pues estos valores de altura de ola son significativamente altos para las regiones más expuestas.

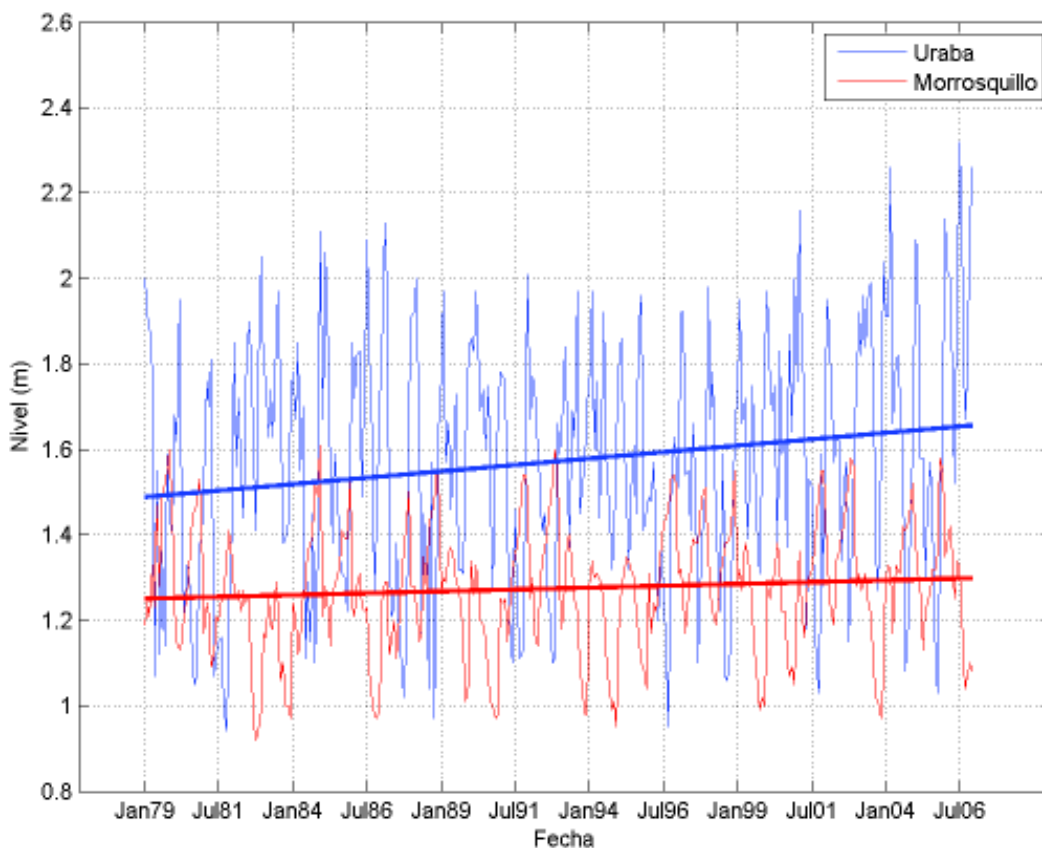


Figura 68. Series de Máximos Cota de Inundación en las ubicaciones de la costa Caribe Colombiana (Grupo 1)

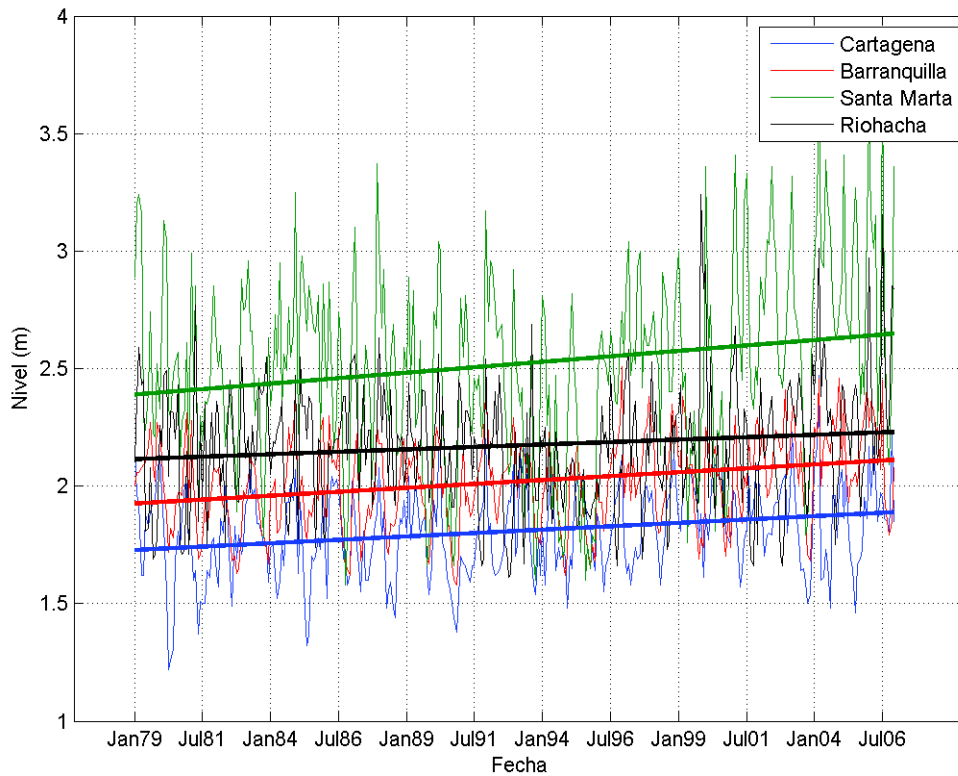
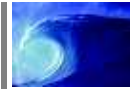


Figura 69. Series de Máximos Cota de Inundación en las ubicaciones de la costa Caribe Colombiana (Grupo 2)

En relación con las variaciones de la cota de inundación entre la zona sur (Urabá y Morrosquillo) son de 0.4 m y con la zona centro y norte (Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Riohacha) de 1.5 m. Estas series reflejan cuáles son los máximos valores que se puedan presentar y resultan de vital importancia calcularlas ya que puede dar indicios de cuál es la variabilidad de los valores extremos que se presenta en el Caribe colombiano, ya que estos máximos valores están relacionados con eventos como los huracanes y los mares de leva. No se encontró una tendencia significativa de largo plazo en las series de cota de inundación, pero a partir de 1996 se observa un ascenso de dicha serie en las localidades de Santa Marta y Riohacha (Figura 70).

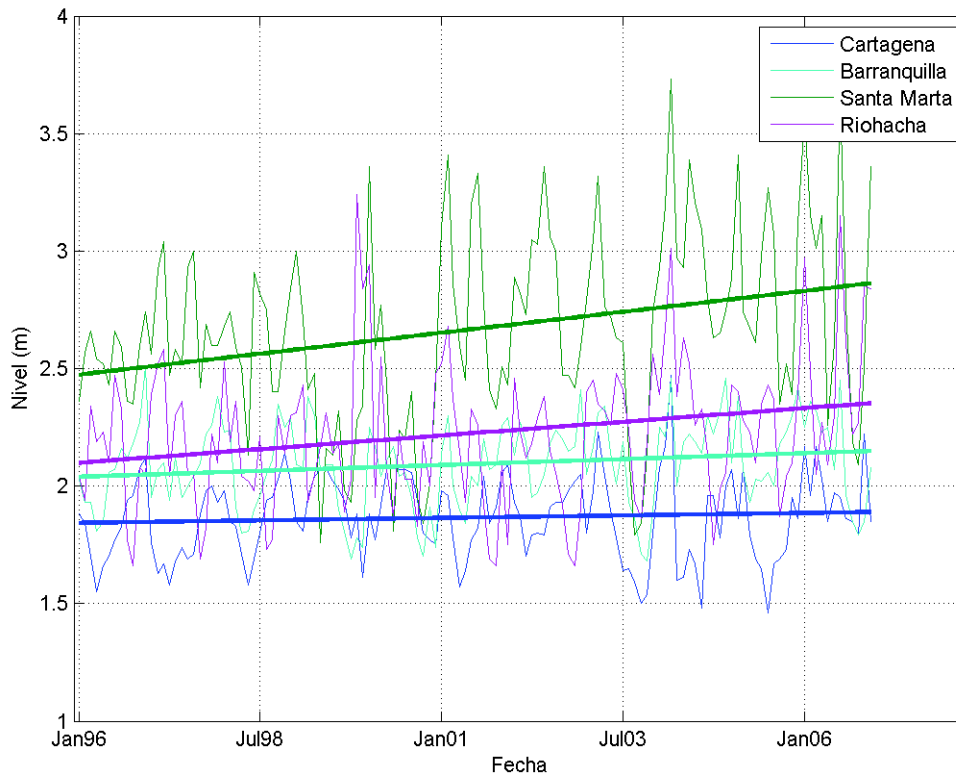
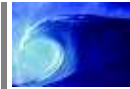


Figura 70. Series de Máximos Cota de Inundación en las ubicaciones de la costa Caribe Colombiana que se agrupan al norte de la zona de estudio (Ascenso a partir de 1996)

Según la literatura revisada, el nivel aportado por cada una de las variables a la cota de inundación según la Figura 71 se presenta a continuación.

Los aportes de cada una de las variables a la cota de inundación son: Nivel medio de Marea (corresponde a la suma de la Marea Astronómica, la Marea Meteorológica y la tendencia del nivel medio del mar) = 56 %, Nivel Medio del Mar = 28 %, Marea Astronómica = 16 %, Marea Meteorológica = 12 % y Run Up = 44 %. Estos porcentajes obedecen a condiciones locales de cada una de las variables, se observa en la Figura 71 como las condiciones de marea son más importantes al sur de la zona de estudio y el oleaje traducido en Run Up no es tan significativo como el nivel de dicha marea, esto es debido a que esta zonas (Golfos y Bahías) permanecen abrigada por efectos geográficos locales y no permiten que el efecto de las olas sea tan importante como ocurre en la parte norte de la zona de estudio (Santa Marta y Riohacha) donde es mas importante el nivel que aporta el Run Up, pues al ser zonas expuestas el oleaje no sufre transformaciones tan significativas y llega con más energía, o que se traduce en un remonte mayor en la costa.

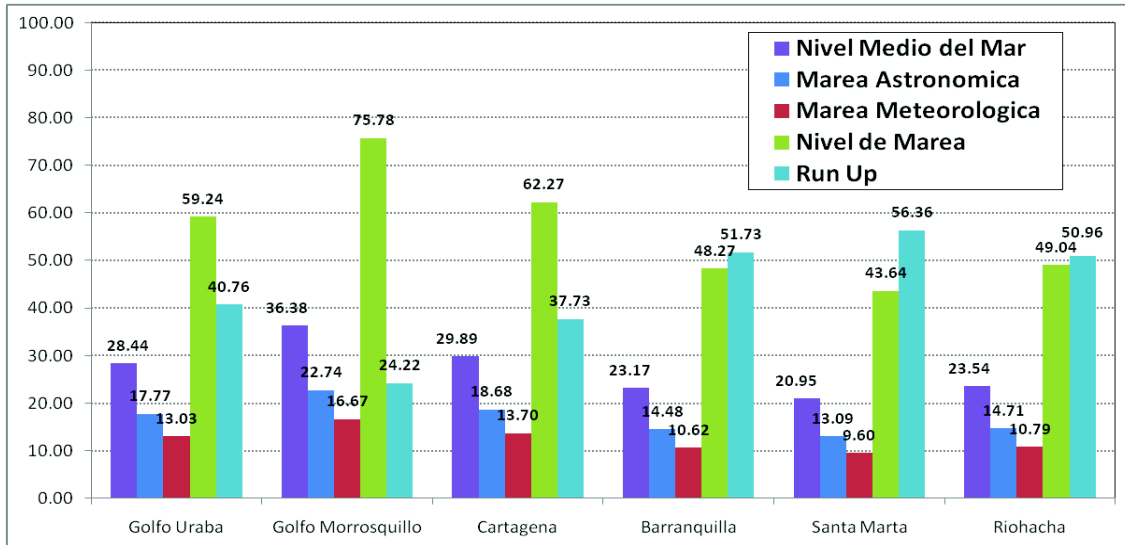


Figura 71. Porcentajes que aportan las variables involucradas en el cálculo de la cota de inundación

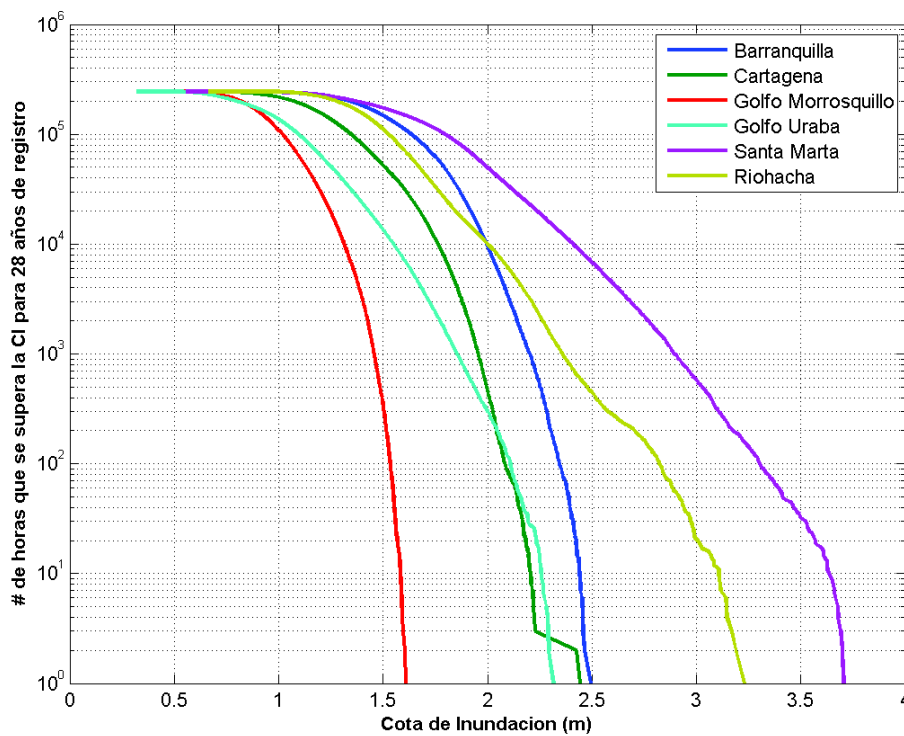


Figura 72. Regímenes de cota de inundación para el Caribe colombiano (Para tipo de playas cuya pendiente es $Tan\beta=0.10$)



Obsérvese que líneas menos pendientes indican una mayor variabilidad de la cota de inundación, que, a su vez, es definida por la aleatoriedad que presenta el run-up y la marea meteorológica. Por ejemplo, se nota que para el sector del Golfo de Urabá y el el sector del Golfo de Morrosquillo las gráficas están más verticales que para el sector de Santa Marta y el sector de Riohacha, debido a esto el valor de cota de inundación que se presenta en las primeras ubicaciones es menor que en las otras; este resultado está influenciado directamente con el oleaje incidente ya que en las primeras localidades (El sector del Golfo de Urabá y el sector del Golfo de Morrosquillo) se presenta en una menor altura de ola significativa a pie de playa y un menor run-up, diferente que para las segundas localidades (El sector de Santa Marta y el sector de Riohacha). En términos medios, en la zona norte se presentan las mayores cotas, que alcanzan valores de hasta 3.7 m y los menores cuando se encuentran en la zona sur caso en el que no superan los 2.5 m.

4.4.1 HURACANES Y MAR DE LEVA

Con respecto a estos fenómenos, dada su complejidad, las múltiples variables que relacionan y las limitaciones metodológicas de este trabajo, se presenta un análisis cualitativo de si es posible que la cota de inundación calculada por medio de esta metodología pueda reproducir estos efectos. Para ello se intentó observar en la serie de cota de inundación eventos representativos para las costas del Caribe. Se buscó si los huracanes que tuvieron trayectorias cercanas al Caribe colombiano tuvieron representación en la serie de CI con algún ascenso significativo. Igualmente para el mar de leva, teniendo como base los registros históricos de prensa que se recopilaron, se buscaron los mismos indicios de ascenso anómalos de la serie. En las Figura 73 Figura 74 se presentan algunos resultados de dichos fenómenos en el Caribe.

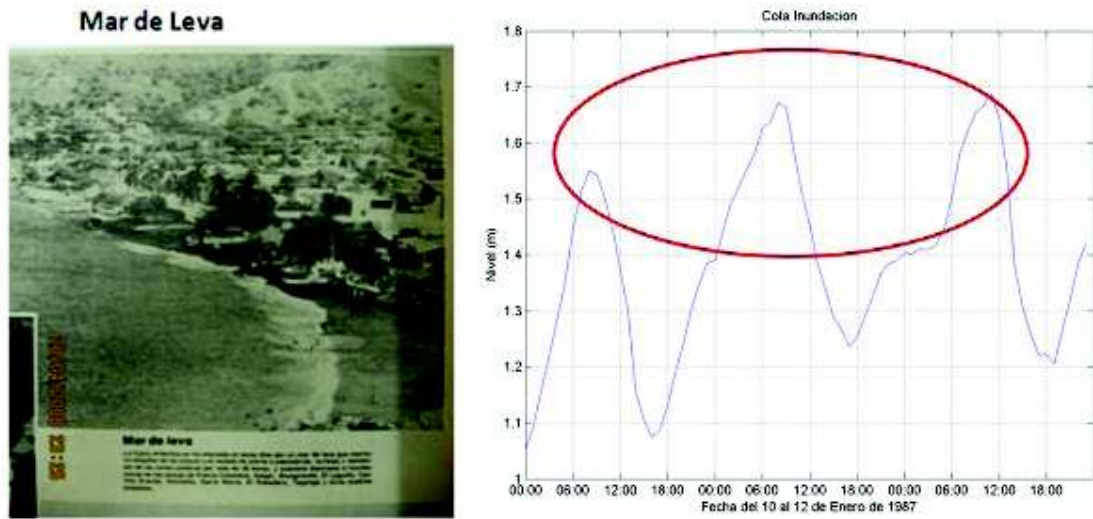
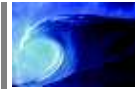


Figura 73. Mar de leva representado por la serie de Cota de Inundación en Santa Marta

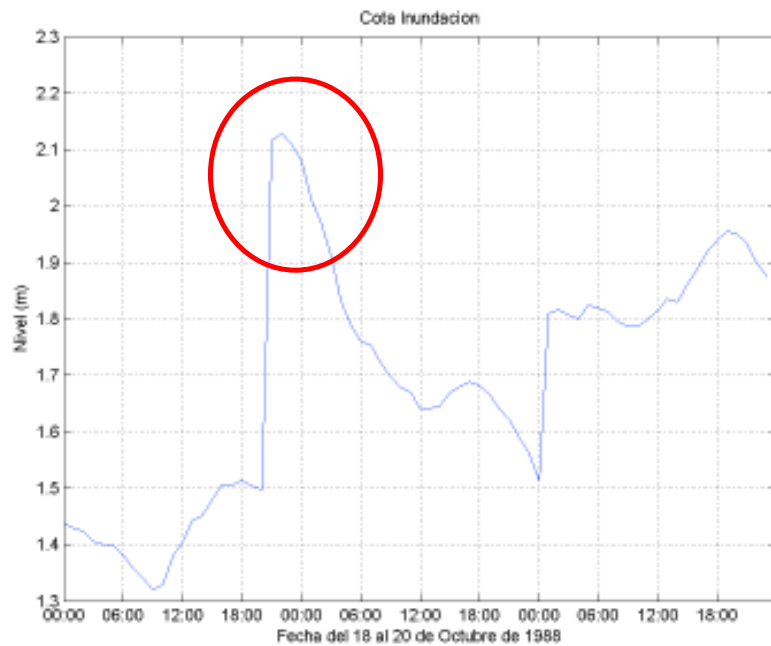
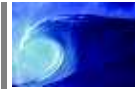


Figura 74. Huracán Joan representado por la serie de Cota de Inundación en Riohacha

Del total de los 96 eventos extremos reportados por la investigación histórica (Zapata, en elaboración) un total de 85 eventos de huracanes y de mar de leva fueron



contrastados con los valores de las series de cota de inundación. La serie de cota de inundación presenta ascensos significativos en las fechas de los diferentes fenómenos reportados. Es posible entonces definir un nivel de cota de inundación que indique que en el mar Caribe se presenta un mar de leva, este valor fue estimado como el valor promedio observado en los valores de la serie de cota de inundación en las fechas de los eventos de mar de leva encontrados y es de 1.14 m. Por medio de este análisis se pueden definir en qué épocas se presentan dichos fenómenos, los meses en que se encontraron más eventos fueron noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

La relación con los huracanes se establece cuando el evento huracanado se presenta y el coletazo genera un ascenso de nivel del agua. Con respecto a las diferencias espaciales estas se asocian a que tan expuesta se encuentra la estación del cálculo de la cota de inundación y mientras más expuesto este pues dicho efecto aumenta.