



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA
EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN
ENFOQUE A GRAN ESCALA**

TESIS
QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ROMÁN ALEJANDRO CANUL TURRIZA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO. FEBRERO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Gracia Sánchez Jesús
Secretario: Dr. Silva Casarín Rodolfo
Vocal: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
1er. Suplente: Dr. Reyes Chávez Lilia
2do. Suplente: Dr. Posada Vanegas Gregorio

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, CIUDAD DE MÉXICO

TUTOR DE LA TESIS

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

FIRMA

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer un reconocimiento especial a mi Padre y a mi Madre que me han apoyado a lo largo de mi formación académica, porque siempre han estado conmigo y me han motivado a ser mejor persona día a día. Gracias por las enseñanzas brindadas, por el apoyo y el ejemplo; a mis hermanas por el apoyo y la paciencia durante todo este proceso. A mi tía y abuelita que me han brindado su apoyo y consejos. A Monse por su apoyo y paciencia en la distancia.

Le quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico prestado para la manutención de mis estudios de doctorado.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme realizar los estudios de doctorado, por los conocimientos adquiridos y las oportunidades de crecer profesionalmente.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por ser mi tutor, por su tiempo, dedicación, paciencia, consejos y oportunidades para mejorar mi formación académica.

Al Dr. Gregorio Posada por sus aportaciones a este trabajo, por su apoyo, comentarios, consejos y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Rodolfo Silva, Dr. Jesús Gracia y Dra. Lilia Reyes por las aportaciones que efectuaron al trabajo, a lo largo de los estudios de doctorado y en la etapa final de este trabajo.

Mil gracias a mis amigos del cubículo con los que compartimos grandes momentos, alegrías, fiestas, discusiones, viajes y que fueron un gran apoyo a lo largo del doctorado: Angel, Anahí, Violeta, Monse, Pedro, Ernesto, Mani y Jessica. A Don Octavio y Novenio por las pláticas, el tiempo y las vivencias. Y a todas las personas que conocí y me apoyaron a lo largo de los estudios, gracias.

Ciudad de México, Febrero de 2020

RESUMEN

En este trabajo se presenta de manera, cuantitativa y cualitativa, el análisis de diversos elementos del litoral del estado de Campeche a fin de caracterizarlos; en primer lugar, basado en características geomorfológicas y el tipo de sedimento, para ello la costa fue dividida en tres grandes sectores, cada uno con características particulares. Posteriormente, tras el análisis de quince variables tanto físicas como sociales y la aplicación de un análisis jerárquico se dividió la zona en sectores, encontrando que la zona sur del estado presenta una vulnerabilidad alta, la zona central una vulnerabilidad moderada y la zona norte una vulnerabilidad baja. Se realizó también un análisis exclusivo para las variables físicas propias del sistema a fin de identificar los sectores que deben abordarse con mayor urgencia. Finalmente, los resultados fueron compilados y se propusieron segmentos de costa denominados “Segmentos Litorales Jerarquizados” que involucran la división en celdas litorales, la vulnerabilidad y la urgencia de actuación. Adicionalmente, se presenta una caracterización de los principales parámetros de los sedimentos de diez playas de Campeche, complementariamente mediante simulaciones numéricas se replicaron las condiciones de oleaje, viento y mareas para las diferentes estaciones y épocas climáticas, condiciones de norte y huracán que se presentan en el litoral con el fin de evaluar acciones de intervención como retiro de estructuras o rellenos de playa y evaluar cómo estas acciones influyen en la reducción o aumento de la vulnerabilidad costera.

Los resultados representan una base que permite generar acciones y medidas de planeación y manejo para el litoral del estado de Campeche a fin de preservar y permitir la recuperación del sistema con el objetivo de reducir y/o controlar la erosión costera, esta metodología puede replicarse en otras zonas costeras.

ABSTRACT

In this study, the analysis of various elements of the coast of the state of Campeche is presented in a quantitative and qualitative terms in order to characterize them. First, based on geomorphological characteristics and the type of sediment, the coast was divided into three main sectors, each with particular characteristics. Subsequently, after the analysis of fifteen physical and social variables and the application of hierarchical analysis, the area was divided into sectors, finding that the southern zone of the state presents a high vulnerability, the central zone a moderate vulnerability and the northern zone a low vulnerability. An analysis was made exclusively of physical variables of the system in order to identify the sector that should be addressed most urgently. Finally, the results were compiled and coastal segments called "Hierarchical Littoral Segments" were proposed that involve the division into littoral cells, vulnerability and urgency for action. Additionally, a characterization of the main parameters of the sediments of ten Campeche beaches is presented, in addition to numerical simulations the conditions of waves, wind and tides were replicated for the different seasons and climatic season, condition of "Nortes" and hurricane that occur in the coast in order to evaluate intervention actions such as removal of structures or nourishment and evaluate how these actions influence the reduction or increase of coastal vulnerability.

The results represent a basis that allows to generate actions and measures of planning and management for the coast of the state of Campeche in order to preserve and allow recovery of the system with the objective of reducing and/or controlling coastal erosion, this methodology can be replicated in other coastal areas.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas.....	XX
Introducción	1
1 Estado del arte	6
1.1 Introducción	6
1.2 Conceptualización de erosión.....	6
1.3 Conceptualización de vulnerabilidad.....	7
1.4 Enfoques empleados para evaluar la vulnerabilidad costera	8
1.5 Desarrollo de índices de vulnerabilidad.....	10
2 Aspectos de la Zona de Estudio	14
2.1 Introducción	14
2.2 Definición de la zona de estudio.....	14
2.3 Condiciones naturales	15
2.3.1 Topografía y suelos.....	15
2.3.2 Geomorfología.....	19
2.3.3 Características geológicas	21
2.3.4 Hidrografía.....	23
2.3.5 Oceanografía	25
2.4 Condiciones sociales.....	25
2.4.1 Población	25
2.4.2 Uso de suelo	27
2.4.3 Economía e infraestructura costera.....	27
2.5 Diagnóstico.....	29
3 Propiedades físicas de los sedimentos de la costa del estado de Campeche	34
3.1 Introducción	34
3.2 Trabajo de campo	34
3.3 Caracterización de los sedimentos	42
3.3.1 Parámetros estadísticos de la muestra	42
3.3.2 Tamaño y forma de los granos del sedimento	42

3.4	Clasificación y agrupación de resultados	42
3.4.1	Zona de duna	42
3.4.2	Zona de lavado	46
3.4.3	Zona sumergida	50
4	Perfil de playa y Desplazamiento de línea de costa del estado de Campeche.....	55
4.1	Introducción	55
4.2	Trabajo de campo.....	55
4.3	Evolución de la línea de costa.....	65
4.3.1	Extracción de la línea de costa.....	66
4.3.2	Cálculo de las tasas de erosión/acreción	67
4.3.2.1	Zona norte	67
4.3.2.2	Zona centro	69
4.3.2.3	Zona sur	71
5	Celdas litorales	79
5.1	Introducción	79
5.2	Marco Conceptual	79
5.3	Evaluación de celdas litorales para el litoral del estado de Campeche	82
6	Vulnerabilidad costera	96
6.1	Introducción	96
6.2	Enfoque evaluativo.....	96
6.3	Variables, información y base de datos del área de estudio	98
6.3.1	Definición de variables y su evaluación	99
6.4	Índice de vulnerabilidad costera.....	107
6.4.1	Suma de productos.....	107
6.4.2	Proceso Jerárquico Analítico.....	109
6.4.3	Normalización y sensibilidad de las variables	111
6.5	Evaluación de la vulnerabilidad costera	113
6.5.1	División de la costa	113
6.5.2	Evaluación de la vulnerabilidad costera del estado de Campeche por el método de suma de productos.....	114
6.5.3	Evaluación de la vulnerabilidad costera del estado de Campeche por el método Jerárquico Analítico	117
7	Índice de actuación y Segmentos litorales jerárquicos.....	125
7.1	Introducción	125

7.2	Marco conceptual.....	125
7.3	Variables, información y bases de datos	126
7.3.1	Definición de variables y su evaluación	126
7.4	Evaluación de índice de actuación.....	130
7.5	Segmentos litorales jerárquicos	133
7.5.1	Evaluación de segmentos litorales jerárquicos.....	133
8	Modelado numérico.....	134
8.1	Introducción	134
8.2	Delimitación de las áreas de estudio	134
8.3	Modelo Topobatimétrico	135
8.4	Modelo Hidrodinámico.....	136
8.4.1	Malla.....	137
8.4.2	Modelo	138
8.5	Análisis de las condiciones del clima marítimo en la línea de costa de Campeche.....	148
8.5.1	Estadística del clima marítimo	150
8.5.2	Análisis de regímenes medio y extremal	151
8.6	Modelo numérico de propagación de oleaje.....	157
8.6.1	Malla.....	158
8.6.2	Escenarios de simulación numérica	160
8.7	Condiciones hidrodinámicas en la costa	165
8.7.1	Malla.....	165
8.7.2	Escenarios de simulación numérica	165
8.8	Evaluación de las medidas de actuación.....	171
8.8.1	Isla Arena.....	172
8.8.2	San Francisco de Campeche	175
8.8.3	Ciudad del Sol y alrededores	178
8.8.4	Sabancuy	182
8.8.5	Isla Aguada	183
8.8.6	Ciudad del Carmen	185
8.8.7	Puerto Rico	189
8.8.8	Nuevo Campechito	192
8.8.9	Reevaluación de la vulnerabilidad costera e índice de actuación	198
9	Aportaciones, Conclusiones, Recomendaciones y futuras líneas de investigación.....	200

9.1	Aportaciones	200
9.2	Conclusiones.....	201
9.3	Recomendaciones	202
9.4	Futuras líneas de investigación.....	203
BIBLIOGRAFÍA.....		204
ANEXO I. Análisis Granulométrico en CAMSIZER. Información contenida en el CD		225
ANEXO II. Análisis Granulométrico (Estadístico). Información contenida en el CD		229
ANEXO III. Perfil es de playa. Información contenida en el CD		391
ANEXO IV. Vulnerabilidad costera. Información contenida en el CD		403
ANEXO V. Programa DDW3. Información contenida en el CD		419
ANEXO VI. Encuesta AHP. Información contenida en el CD		431
ANEXO VII. Simulación numérica. Información contenida en el CD		435
ANEXO VIII. Medidas de actuación (análisis de oleaje). Información contenida en el CD		464

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estado de Campeche	15
Figura 2. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del estado de Campeche.....	16
Figura 3. Edafología del estado de Campeche.....	19
Figura 4. Unidades geomorfológicas de la zona costera del estado de Campeche.	21
Figura 5. Paleología de la Península de Yucatán (de López Ramos, E. Estudio Geológico de la Península de Yucatán. 1973. Tomado de Ruíz Martínez, Determinación del Estado Morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos, 2009)	22
Figura 6. Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas del estado de Campeche.	23
Figura 7. Ríos y lagunas más importantes del estado de Campeche.	24
Figura 8. Localidades costeras de Campeche y su clasificación en rangos basado en el número de habitantes.	26
Figura 9. Crecimiento poblacional de las localidades costeras de Campeche para el periodo 2000 - 2010.	26
Figura 10. Usos de suelo para el estado de Campeche.	27
Figura 11. Producto Interno Bruto (PIB) para el periodo 2008 - 2017, se incluye la participación de la actividad petrolera. Fuente: INEGI. Dirección General de Estadísticas Económicas. Sistema de Cuentas Nacionales de México. https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0&t=10200043002000700070 (03 de mayo de 2019).	28
Figura 12. Infraestructura relevante en el estado de Campeche.....	29
Figura 13. Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIAS) sometidas ante la SEMARNAT para el periodo 2003 – 2012 de proyectos de construcción de obras de protección costera.	31
Figura 14. Playas muestreadas a lo largo del litoral campechano.	34
Figura 15. Estaciones de muestreo en Isla Arena.	35
Figura 16. Estaciones de muestreo en Playa Bonita.	36
Figura 17. Estaciones de muestreo en Payucán.	37
Figura 18. Estaciones de muestreo en Chenkán.	37
Figura 19. Estaciones de muestreo en Sabancuy.....	38
Figura 20. Estaciones de muestreo en Isla Aguada.....	39
Figura 21. Estaciones de muestreo en Puerto Real.	39
Figura 22. Estaciones de muestreo en Playa Norte.	40
Figura 23. Estaciones de muestreo en Zacatal.	41
Figura 24. Estaciones de muestreo en Nuevo Campechito.	41
Figura 25. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de duna. a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.	43
Figura 26. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.	44
Figura 27. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.	45
Figura 28. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona de Duna.	46

Figura 29. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de lavado, a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.	47
Figura 30. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.	48
Figura 31. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.	49
Figura 32. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona de Lavado.	50
Figura 33. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de duna. a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.	51
Figura 34. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.	52
Figura 35. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.	53
Figura 36. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona Sumergida.	53
Figura 37. Estaciones de muestreo en Isla Arena.	56
Figura 38. Perfil de playa medido en Isla Arena.	56
Figura 39. Estaciones de muestreo en Playa Bonita.	57
Figura 40. Perfil de playa medido en Playa Bonita.	57
Figura 41. Estaciones de muestreo en Payucán.	58
Figura 42. Perfil de playa medido en Payucán.	58
Figura 43. Estaciones de muestreo en Chenkán.	59
Figura 44. Perfil de playa medido en Chenkán.	59
Figura 45. Estaciones de muestreo en Sabancuy.	60
Figura 46. Perfiles de playa medidos en Sabancuy.	60
Figura 47. Estaciones de muestreo en Isla Aguada.	61
Figura 48. Perfil de playa medido en Isla Aguada.	61
Figura 49. Estaciones de muestreo en Puerto Real.	62
Figura 50. Perfil de playa medido en Puerto Real.	62
Figura 51. Estaciones de muestreo en Playa Norte.	63
Figura 52. Perfil de playa medido en Playa Norte.	63
Figura 53. Estaciones de muestreo en Zacatal.	64
Figura 54. Perfil de playa medido en Zacatal.	64
Figura 55. Estaciones de muestreo en Nuevo Campechito.	65
Figura 56. Perfil de playa medido en Nuevo Campechito.	65
Figura 57. Metodología para la extracción de línea de costa.	66
Figura 58. Transectos para la zona 1, con espaciado de 100 m.	68
Figura 59. Procesos de evolución de la línea de costa. Línea roja indica erosión, línea verde sección estable y azul acreción.	68
Figura 60. Tasa de desplazamiento de línea de costa.	69
Figura 61. Desplazamiento neto de línea de costa.	69
Figura 62. Transectos para la zona 2, con espaciado de 100 m.	70

Figura 63. Procesos de evolución de la línea de costa. Línea roja indica erosión, línea verde sección estable y azul acreción.	70
Figura 64. Tasa de desplazamiento de línea de costa.....	71
Figura 65. Desplazamiento neto de línea de costa.	71
Figura 66. Cambio en la posición de la línea de costa calculada con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 437 transectos. Los valores positivos indican acreción, mientras que los negativos retroceso.	72
Figura 67. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión). NSM se refiere a una distancia y no a una tasa, entre la costa más antigua y la más reciente.	73
Figura 68. Sección a. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor erosión (km 45).	73
Figura 69. Cambio en la posición de la línea de costa calculada con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 410 transectos. Los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión.....	74
Figura 70. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican retroceso). NMS se refiere a una distancia y no a una tasa, entre la costa más antigua y la más reciente.	75
Figura 71. Sección b. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor acreción (Playa Norte).	75
Figura 72. Cambio en la posición de la línea de costa calculado con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 780 transectos. los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión.	76
Figura 73. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión). NSM se refiere a una distancia y no a una tasa, entre las costas más antigua y más reciente.	77
Figura 74. Sección c. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor erosión.	77
Figura 75. Esquema metodológico para la determinación de las celdas litorales del Estado de Campeche	81
Figura 76. Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIAS) sometidas ante la SEMARNAT para el periodo 2003 - 2012.	85
Figura 77. Tamaño de sedimentos muestreados a lo largo del litoral del estado. El eje X toma como referencia las coordenadas UTM en X, mientras que el eje Y representa el valor del tamaño medio del sedimento en mm.	86
Figura 78. Mapa de distribución de zonas de muestro de sedimentos.	87
Figura 79. División del litoral para la recopilación de imágenes satelitales.....	88
Figura 80. Mosaico de imágenes satelitales y línea de costa digitalizada para el año 2016.	89
Figura 81. Código generado para indicar dirección, tipo de sedimento y origen.	89
Figura 82. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, tipo de costa y mecanismo de transporte.	90
Figura 83. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, comportamiento de la costa y mecanismo de transporte.	90
Figura 84. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, geomorfología, tipo de costa y mecanismos de transporte.	91

Figura 85. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, tipo de sedimento y mecanismo de transporte.	91
Figura 86. Sobreposición de los límites encontrados.	92
Figura 87. Celdas litorales para el litoral del estado de Campeche.	93
Figura 88. Celda Litoral 1. Comprende las Áreas Naturales Protegidas de Celestún y Petenes.	93
Figura 89. Celda Litoral 2. Comprende de la Ciudad de San Francisco de Campeche a la Boca del Estero de Sabancuy.	94
Figura 90. Celda Litoral 3. Comprende de la Boca del Estero de Sabancuy a la desembocadura del Río San Pedro y San Pablo.	95
Figura 91. Diagrama de flujo que resume la metodología aplicada en este estudio para el cálculo del índice de Vulnerabilidad Costera (IVC).	97
Figura 92. Variables seleccionadas para el análisis de la vulnerabilidad.	99
Figura 93. Clasificación de la variable geomorfología.	100
Figura 94. Clasificación de la variable pendiente costera.	100
Figura 95. Clasificación de la variable cambio de línea de costa.	101
Figura 96. Clasificación de la variable material de vivienda.	102
Figura 97. Clasificación de la variable tipo de infraestructura.	102
Figura 98. Clasificación de la variable densidad de población.	103
Figura 99. Clasificación de la variable distancia a la costa.	103
Figura 100. Clasificación de la variable distancia a la costa.	103
Figura 101. Clasificación de la variable manglar.	104
Figura 102. Clasificación de la variable vegetación diferente a manglar.	105
Figura 103. Clasificación de la variable duna.	105
Figura 104. Clasificación de la variable altura de duna.	105
Figura 105. Clasificación de la variable arrecife de coral.	106
Figura 106. Clasificación de la variable protección artificial.	106
Figura 107. Clasificación de la variable altura de ola significativa.	107
Figura 108. Diagrama de flujo que resume la metodología adoptada en este estudio para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) usando la suma de productos.	109
Figura 109. Diagrama de flujo que resume la metodología adoptada en este estudio para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) usando el Proceso de Análisis Jerárquico.	111
Figura 110. Ejemplo de localización de polígonos de AGEB, curva de nivel de 10 m y proyección del polígono AGEB en la costa.	114
Figura 111. Vulnerabilidad costera para el estado de Campeche.	117
Figura 112. Vulnerabilidad costera para el estado de Campeche.	124
Figura 113. Variables seleccionadas para el análisis del índice de actuación.	126
Figura 114. Clasificación de la variable vulnerabilidad.	127
Figura 115. Clasificación de la variable uso de suelo.	127
Figura 116. Clasificación de la variable características del suelo.	128
Figura 117. Clasificación de la variable pendiente media del terreno.	128
Figura 118. Clasificación de la variable batimetría.	129
Figura 119. Clasificación de la variable distancia a la fuente.	129
Figura 120. Clasificación de la variable distancia a sumidero.	129
Figura 121. Clasificación de la variable densidad de población (Hab/km ²).	130

Figura 122. Nivel de urgencia de actuación (intervención) para la costa del estado de Campeche.	132
Figura 123. Segmentos Litorales Jerárquicos identificados para la costa de Campeche.	133
Figura 124. Zonas de estudio consideradas para la simulación numérica.	135
Figura 125. Modelo topobatimétrico del estado de Campeche y sector del Golfo de México. a) Vista 2D; b) Vista 3D. Se observa la caída en profundidad hacia el norte del dominio.	136
Figura 126. Malla de cálculo empleada para el modelo hidrodinámico.	137
Figura 127. Modelo topobatimétrico generado en el módulo QUICKIN	138
Figura 128. Interfaz de delftdashboard; en la figura se presenta la malla del estado de Campeche y las 3 fronteras generadas: North, South y West.....	139
Figura 129. Ríos considerados en el modelo hidrodinámico.	140
Figura 130. Serie de viento para febrero 2005 - mayo 2019.	141
Figura 131. Rosa de oleaje para las diferentes estaciones y épocas climáticas: a) anual, b) primavera, c) verano, d) otoño, e) invierno, f) secas, g) lluvias, h) nortes, i) tormenta.	142
Figura 132. Puntos de Observación para el modelo Hidrodinámico.	144
Figura 133. Mapas de Superficie Libre para el escenario anual. a) Nivel de bajamar, b) Nivel de pleamar.	145
Figura 134. Niveles de agua para diferentes puntos de obsevración: PO2 - Isla Arena, PO5 - Sabancuy, PO6 - Isla Aguada, PO10 - Playa Norte (Ciudad del Carmen).	146
Figura 135. Magnitud de velocidad: a) Escenario anual, b) Escenario de Tormenta.	147
Figura 136. Ubicación del punto de descarga de información de oleaje.	150
Figura 137. Serie temporal de oleaje obtenida del modelo WaveWatch III.	151
Figura 138. Gráficas de probabilidad conjunta: a) altura de ola significativa - periodo medio, b) altura de ola significativa - dirección de propagación; observaciones de febrero 2005 - mayo 2019.	152
Figura 139. Rosa de oleaje para las observaciones de febrero 2005 - mayo 2019.	152
Figura 140. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.....	154
Figura 141. Histograma de frecuencias para la serie de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.....	155
Figura 142. Función de distribución acumulada para la serie de datos de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.	155
Figura 143. Distribución Log Normal para la serie de datos de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.	156
Figura 144. Mallas utilizadas en el modelo WAVE.....	159
Figura 145. Altura de ola significativa. a) Anual, b) Primavera, c) Verano 01, d) Verano 02.	161
Figura 146. Altura de ola significativa. e) Otoño 01, f) Otoño 02, g) Invierno 01, h) Invierno 02, i) Secas, j) Lluvias 01. Continuación.	162
Figura 147. Altura de ola significativa. k) Lluvias 02, l) Nortes, m) Tormentas 01, n) Tormentas 02, o) Huracán Janer. Continuación.	164
Figura 148. Altura de ola (m) para Isla Arena, Sabancuy y Nuevo Campechito. Se aprecia una línea recta ya que los datos que se presentan son estacionarios.	164
Figura 149. Malla empleada en el modelo acoplado.....	165
Figura 150. Puntos de observación empleados en el análisis de resultados de las simulaciones...166	166
Figura 151. Mapas de Superficie Libre para los escenarios: a) Anual, b) Huracán.....	167
Figura 152. Comparación de los diferentes niveles obtenidos para el punto de observación 10...168	168

Figura 153. Niveles de agua para diferentes puntos de observación: PO1 - Isla Arena, P06 - Sabancuy, P08 - Isla Aguada, P010 - Playa Norte (Ciudad del Carmen).....	169
Figura 154. Velocidades de corriente: a) bajamar anual, b) pleamar anual, c) bajamar tormenta, d) pleamar tormenta, e) bajamar huracán, f) pleamar huracán. Las unidades de la escala son m/s..	170
Figura 155. Bed Level. a) Valor inicial; b) Resultado de la simulación.	173
Figura 156. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.....	173
Figura 157. Altura de ola media cuadrática (Hrms).	174
Figura 158. Campo de velocidades. a) Zona norte al inicio de la simulación, b) Zona sur al inicio de la simulación, c) Zona norte al final de la simulación, d) Zona sur al final de la simulación.	175
Figura 159. Bed level: a) Valor inicial; b) Resultado de la simulación.	176
Figura 160. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.....	176
Figura 161. Altura de ola media cuadrática (Hrms).	177
Figura 162. Campo de velocidades. a) Dominio en general, b) Zona de la Dársena de San Francisco de Campeche, c) Zona denominada Resurgimiento, d) Puerto pesquero de Lerma.	178
Figura 163. Bed level: a) Valor inicial, b) Resultado de la simulación.	179
Figura 164. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.....	180
Figura 165. Altura de ola media cuadrática (Hrms).	181
Figura 166. Campo de velocidades. a) Dominio en general, b) Zona del Puerto de Payucán, c) Zona del Puerto de Seybaplaya, d) Zona de puerto menor Seybaplaya.	182
Figura 167. Bed level; a) Valor inicial, b) Valor final.	183
Figura 168. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) Zona general, b) Acercamiento a zona de interés.....	184
Figura 169. Altura de ola media cuadrática (Hrms).	184
Figura 170. Campo de velocidades. a) Dominio general, b) Acercamiento a la zona de interés; c), d) y e) dirección de velocidades para el área de interés.....	185
Figura 170. Bed level para las propuestas planteadas en la Isla del Carmen.....	186
Figura 172. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.....	187
Figura 172. Altura de ola media cuadrática (Hrms) para la zona de estudio.	188
Figura 173. Magnitud de las velocidades que se presentan en la zona.	189
Figura 174. Bed level para la zona de Puerto Rirco. a) Bed level inicial, b) Bed level al final de la simulación.	190
Figura 175. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) Mapa general de la zona. b) Mapa específico para la zona de mayor interés.	190
Figura 177. Altura de ola media cuadrática (Hrms) para la zona de estudio.	191
Figura 178. Magnitud de las velocidades. a) Mapa de velocidades para la zona en general. b) Mapa de velocidades para la zona de interés en específico. c) Mapa de dirección de corriente. ..	192
Figura 179. Bed level para los diferentes escenarios simulados. a) Bed level inicial escenario "Do - nothing", b) bed level final escenario "Do - nothing", c) bed level inicial escenario "retiro", d) bed level final escenario "retiro", e) bed level inicial escenario "relleno", f) bed level final escenario "relleno".....	193
Figura 180. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) escenario "Do - nothing", b) "relleno", c) "retiro".	194
Figura 181. Altura de ola media cuadrática (Hrms) para la zona de estudio, para los escenarios: a) "Do - nothing", b) "retiro", c) "relleno".	195

Figura 182. Magnitud de las velocidades para los escenarios: a) "Do - nothing", b)"retiro", c) "relleno".....196

Figura 183. Dirección de la corriente para los escenarios: a) "Do - nothing", b) "retiro", c) "relleno".197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Enfoques desarrollados para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera.	11
Tabla 2. CVIs desarrollados originalmente.	12
Tabla 3. Elevaciones principales	16
Tabla 4. Imágenes utilizadas para el análisis de la evolución de la línea de costa.	66
Tabla 5. Descripción de los métodos usados para evaluar las tasas de erosión/acreción en la costa.	67
Tabla 6. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.	72
Tabla 7. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.	74
Tabla 8. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.	76
Tabla 9. Base de datos de desplazamiento de la línea de costa (fragmento).	82
Tabla 10. Base de datos de corrientes (fragmento).....	83
Tabla 11. Base de datos de Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) (fragmento).	84
Tabla 12. Base de datos de sedimento (fragmento).....	85
Tabla 13. Base de imágenes satelitales disponibles (fragmento correspondiente a la zona sur).	88
Tabla 14. Metodologías analizadas para evaluar la vulnerabilidad costera en diferentes zonas costeras.	98
Tabla 15. Escala de calificación de Saaty.	110
Tabla 16. Valores de RI, donde n es el orden de la matriz.....	112
Tabla 17. Variables, clasificación e índices específicos.....	114
Tabla 18. Categorías de vulnerabilidad encontradas.....	116
Tabla 19. Variables físicas y sociales utilizadas en este estudio.	117
Tabla 20. Criterios de clasificación de vulnerabilidad.....	118
Tabla 21. Matriz de comparación de variables.	119
Tabla 22. Matriz normalizada de las variables.....	120
Tabla 23. Valores de RI, donde n es el orden de la matriz.....	121
Tabla 24. Cálculo de la relación de consistencia (CR).	122
Tabla 25. Pesos obtenidos del proceso AHP.....	123
Tabla 26. Valores del índice de vulnerabilidad costera para los cinco grupos de vulnerabilidad. ..	124
Tabla 27. Síntesis de variables, clasificación y valores específicos.	131
Tabla 28. Grupos obtenidos de los resultados de la evaluación del índice de intervención.....	132
Tabla 29. Fronteras generadas para el dominio.	139
Tabla 30. Componentes de marea astronómica para el conjunto de frontera North1A, tomados del modelo TPXO 7.2 incluido en la base de datos “Tide Database” de delfttdashboard.	139
Tabla 31. Valores de descarga para los principales ríos del estado de Campeche.	140
Tabla 32. Escenarios generados para las condiciones de viento.	143
Tabla 33. Descripción de las mallas empleadas en el modelo WAVE.	159
Tabla 34. Condiciones de oleaje a simular.	160
Tabla 35. Escenarios para simulación.....	166
Tabla 36. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Isla Arena.	172
Tabla 37. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de San Francisco de Campeche.	175

Tabla 38. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Ciudad del Sol y alrededores.	179
Tabla 39. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Sabancuy.	183
Tabla 40. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Isla Aguada.	183
Tabla 41. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Ciudad del Carmen.	185
Tabla 42. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Puerto Rico.	190
Tabla 43. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Nuevo Campechito.	192
Tabla 44. Comparación de la vulnerabilidad de cada parámetro en análisis y el valor del Índice de Vulnerabilidad (IVC) antes y después de la actuación.	198
Tabla 45. Comparación de la clasificación de cada parámetro en análisis y el valor del Índice de urgencia antes y después de la actuación.	199

INTRODUCCIÓN

La zona litoral comprende la intersección natural entre la atmósfera, el mar y la tierra. Las playas y las dunas constituyen los ambientes de sedimentación más importantes del mundo, ya que son los lugares donde existe la mayor acumulación y erosión de arena de distintos tamaños. Estos ecosistemas son considerados extremadamente dinámicos (French, 1997; Moreno-Casasola, Peresbarbosa Rojas, & Travieso-Bello, 2006).

En las playas bajo condiciones de alta energía, el movimiento de arena de la duna permite que se reduzca la erosión debido a que este material compensa la demanda de material adicional para que el perfil de playa disipe la energía del oleaje. La interrupción o disminución de las fuentes de arena puede provocar la desaparición de playas (Nordstorm, Psuty, & Carter, 1990).

Debido a diferentes factores locales y globales, Bird (1996) considera que entre el 70 y 90% de las playas del mundo están sufriendo intensos procesos de erosión debido a la falta de sedimentos.

En general, los ecosistemas costeros proporcionan importantes servicios ecosistémicos, tales como la pesca, acuicultura, turismo y una alta productividad biológica y ecológica. Aunque las zonas costeras ocupan sólo una parte muy pequeña de las zonas utilizadas por la sociedad (Bagdavičiūtė et al., 2015) están expuestas a la acción continua de factores tales como: vientos, olas, mareas, corrientes, transporte de sedimentos, cambio relativo del nivel del mar, eventos extremos, incluyendo tormentas; que son los principales factores físicos que modifican las costas de forma natural. La presión antropogénica, principalmente el cambio de uso de suelo y urbanización, son la principal amenaza para las costas ya que se han desarrollado proyectos altamente productivos que generan una rápida degradación de la dinámica costera, debido principalmente a la falta de información y deficiencias en los análisis, lo anterior acelera los procesos erosivos. En resumen, la ocupación costera ha aumentado dramáticamente en las últimas décadas, principalmente debido a las demandas del turismo y actividades de ocio (Anfuso et al., 2011), aumentando la presión sobre los sistemas litorales. Como consecuencia en muchas áreas se han reportado problemas de erosión crónica; por lo que es necesario desarrollar una comprensión más precisa de la dinámica costera para desarrollar mejores alternativas de adaptación, protección, restauración y manejo.

México cuenta con aproximadamente 11 500 km de litoral, de los cuales el 28% corresponden al Golfo de México y el Mar Caribe; su zona costera es destinada principalmente al desarrollo del turismo y fuentes energéticas (Casco Montoya, 2004). Sin embargo, todavía hay muchas zonas donde el desarrollo sostenible sigue siendo una oportunidad de la cual la nación puede beneficiarse.

El estado de Campeche, ubicado en la Península de Yucatán, tiene una costa de 520 km de largo, formada principalmente por playas arenosas y rocosas. Aunque no hay desarrollos turísticos masivos, presenta una erosión con tasas de hasta 7 m/año, con máximos de hasta 15 m/año, reportados por Ortíz-Pérez (1992) y Valderrama-Landeros et al. (2019). Dado su característico paisaje y patrimonio histórico, así como su proximidad a la Riviera Maya en Quintana Roo, la costa de Campeche es un lugar atractivo para la industria del turismo, como lo demuestra la reciente

construcción de complejos turísticos como Aak Bal y Campeche Country; así como la ampliación de los puertos de Seybaplaya y Ciudad del Carmen (Alpuche-Gual, 2014).

En contraste con la evolución de la costa en Quintana Roo, donde las playas se han degradado hasta un punto donde los ecosistemas, las actividades económicas e incluso la infraestructura está en alto riesgo (Diez et al., 2009; Silva, 2007), la mayor parte de la costa de Campeche todavía puede ser conservada en condiciones muy similares a las naturales. Por lo tanto, el entendimiento de los procesos costeros y una adecuada planificación costera podría permitir al estado desarrollar las actividades turísticas y su urbanización de manera armoniosa con el ambiente.

Recientemente se han desarrollado estudios enfocados al análisis de vulnerabilidad y riesgo costero (Martínez et al., 2006; Oropeza-Orozco et al., 2011) que garanticen la gestión y mitigación de riesgos eficiente (Cooper & McKenna, 2008; Murali et al., 2013; McFadden et al., 2007). Por lo que se ha propuesto una herramienta (Gornitz, White, & Cushman, 1991; Gornitz, 1991) basada en índices que expresa la vulnerabilidad costera por medio de un índice unidimensional, el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) (De Serio et al., 2018). El IVC proporciona una discretización de la costa en varios segmentos, asignando valores de clasificación para cada uno de ellos, en función de la evaluación de diferentes parámetros. El IVC resultante es una base numérica simple para clasificar secciones de la costa en términos de su potencial de cambios (De Serio et al., 2018). El objetivo es evaluar las características físicas del sistema costero para clasificar, al menos cualitativamente, los posibles impactos en diferentes sectores costeros. Este enfoque es ampliamente utilizado en todo el mundo (Bagdavičiūtė et al., 2015; Boruff, Emrich, & Cutter, 2005; Devoy, 2008; Doukakis, 2005; Gornitz et al., 1994; Kunte et al., 2014; Maniet et al., 2013; Nageswara Rao et al., 2008; Pendleton, Thieler, & Jeffress, 2004; Szlafsztein & Sterr, 2007; Tibbetts & van Proosdij, 2013).

Con lo expuesto anteriormente, se plantea como objetivo general de la investigación desarrollar una metodología que permita evaluar la vulnerabilidad costera (considerando aspectos físicos y sociales) e identificar sitios prioritarios para la implementación de acciones de control y/o disminución de la erosión en las costas del estado de Campeche. La aplicación de la metodología puede extenderse al resto de zonas costeras a nivel nacional e internacional, ya que aporta herramientas para caracterizar la zona en sectores denominados “Segmentos litorales jerárquicos” que involucra elementos físicos y sociales de la costa.

Como objetivos particulares se plantean caracterizar perfiles típicos de diferentes playas a partir del levantamiento topográfico con equipo GPS; se caracterizar el sedimento en tres zonas del perfil de playa para las diferentes playas basado en el análisis granulométrico; identificar las fuentes de sedimento, sumideros y celdas litorales; evaluar la vulnerabilidad del litoral y; por último, modelar numéricamente de los parámetros hidrodinámicos: marea, oleaje y viento.

Los pasos metodológicos aquí seguidos son: 1) Evaluación de celdas litorales, 2) Evaluación de la vulnerabilidad costera, 3) Evaluación de índice de actuación y segmentos litorales jerárquicos, 4) Evaluación de propuestas de intervención: “Do – nothing”, retiro y beach nourishment a partir de simulación numérica, 5) Reevaluación de la vulnerabilidad costera, índice de actuación y segmentos a partir de los resultados de las simulaciones numéricas.

Síntesis del estudio

En el Capítulo 1, se presenta el estado del arte relacionado con los temas de erosión, vulnerabilidad costera y desarrollo de índices de vulnerabilidad; aquí se presenta una revisión de los diferentes enfoques empleados para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera y los elementos a considerar para su desarrollo.

En el Capítulo 2, se describe la zona de estudio, se presentan las características que para este estudio pudieran ser relevantes como la geomorfología, características geológicas, hidrografía, así como aspectos sociales de población, economía y uso de suelo. Hacia el final de capítulo se presenta un breve diagnóstico de las condiciones actuales de la zona costera, haciendo énfasis en las causas que originan la erosión costera en el litoral de Campeche.

En el Capítulo 3, se presenta, en primer lugar, la descripción del trabajo de campo realizado acompañado de mapas donde se identifican los puntos de recolección de muestras de sedimento. Posteriormente se presenta los resultados de la caracterización de los sedimentos, específicamente los parámetros estadísticos de la muestra y su agrupación en las tres zonas muestreadas: duna, lavado y sumergida.

En el Capítulo 4, se presentan mapas elaborados con información de los perfiles de playa medidos en diez playas a lo largo del litoral del estado de Campeche. Así mismo se realiza un análisis de la evolución de la línea de costa para el periodo 1994 – 2018 a partir de la digitalización de la línea de costa de imágenes Landsat.

En el Capítulo 5, se plantea y desarrolla una metodología para caracterizar el litoral en celdas litorales; en esta metodología se combinan diferentes enfoques a fin de que la caracterización sea más robusta y homogénea. Es así que se obtienen tres celdas para el estado de Campeche.

En el Capítulo 6, se hace una descripción de los enfoques empleados para evaluar la vulnerabilidad costera; así mismo, se presenta información que justifique el uso de quince variables para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera. Finalmente se presenta el método de cálculo del índice de vulnerabilidad costera por suma de productos y por el proceso analítico jerárquico “Analytical Hierchical Process” (AHP). Al final del capítulo se presenta el proceso de evaluación de la vulnerabilidad costera. En primer lugar, se exhibe el proceso de división de la zona costera en sectores a partir de las localidades ubicadas por debajo de la cota de 10 m. Posteriormente, se presentan los resultados de la evaluación por el método de suma de productos y por el AHP; para cada enfoque se elaboraron mapas de vulnerabilidad.

En el Capítulo 8, se hace un análisis y evaluación de las variables consideradas para el cálculo del índice de actuación propuesto; posteriormente se calcula el índice de actuación, encontrando que la zona sur presenta una mayor urgencia. Finalmente, con la información generada se evalúan los segmentos litorales jerárquicos.

En el Capítulo 9 se muestra, en primera instancia, el modelo topobatimétrico generado para el litoral del estado de Campeche y su zona marina; se describe el modelo hidrodinámico empleado y la malla generada para su funcionamiento; posteriormente se presenta el análisis de las condiciones del clima marítimo para la costa de Campeche incluyendo la estadística del clima marítimo y el análisis medio y extremal. Consecutivamente, se describe el modelo de propagación de oleaje y los escenarios simulados; así como los resultados de la simulación acoplada de los modelos de oleaje e hidrodinámico. Finalmente se presentan los resultados de la simulación morfodinámica de

escenarios de actuación para 8 zonas del litoral (señalando que no en todas las zonas se consideraron los mismos escenarios).

En el Capítulo 10, se describen las aportaciones realizadas al estado del arte con esta investigación, se resumen las conclusiones y se enlistan recomendaciones; finalmente se presentan las futuras líneas de investigación.

1

ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN

La presión antrópica, particularmente el cambio de uso de suelo y urbanización, son las principales amenazas para las costas; por lo que recientemente se ido intensificando la realización de estudios enfocados al análisis de vulnerabilidad y riesgo costero (Martínez et al., 2006; Oropeza-Orozco et al., 2011).

Las playas y las dunas constituyen los ambientes de sedimentación más importantes del mundo, ya que son los lugares donde existe la mayor acumulación de sedimentos con granos de arena de distintos tamaños. Estos ecosistemas son considerados extremadamente dinámicos (French, 1997; Moreno-Casasola et al., 2006).

El suministro periódico de arena de la duna a la playa es un ciclo de retroalimentación que compensa la erosión costera debido a que disipa la energía del oleaje. La interrupción o disminución del balance de arena puede provocar la desaparición de playas (Nordstorm et al., 1990).

Bird (1996) considera que entre el 70% y 90% de las playas del mundo están sufriendo intensos procesos de erosión debido a la falta de sedimentos.

A continuación, se presenta de manera sintética el estado del arte sobre estudios relevantes que abordan el análisis de la vulnerabilidad costera.

1.2 CONCEPTUALIZACIÓN DE EROSIÓN

La erosión se define como el proceso geomorfológico que representa el ajuste de la línea de costa hacia un nuevo equilibrio, como respuesta al incremento del nivel del mar, cambio en el suministro de sedimentos, clima de oleaje o una combinación de estos factores (Rangel-Buitrago, Anfuso, & Williams, 2015). Al ser considerada un peligro, se vuelve un tema importante para los administradores de las zonas costeras.

Son diversos los trabajos que se han realizado para entender, disminuir o controlar el proceso de erosión costera a nivel mundial; a continuación, se presentan algunos de interés para este trabajo, por la metodología empleada, resultados obtenidos y soluciones propuestas.

Hegde & Akshaya (2015), emplearon imágenes satelitales LANDSAT de 1994 a 2014, con un intervalo de 8 años para delinear la línea de costa de Karnataka, India y definir la transformación de la línea de costa. En China se han realizado trabajos como el de Luo et al., (2015) quienes afirman que las estructuras de ingeniería dura, como malecones, espigones y rompeolas que se construyeron para reducir la erosión costera y mantener un mínimo de ancho de playa para la recreación resultan ser trampa de sedimentos por lo que otras medidas de protección que tienen resultados positivos incluyen la plantación de *Spartina alterniflora*, manglares, trasplante de arrecife de coral y la introducción de reservas naturales marinas.

Por otro lado, Semeoshenkova et al., (2017) afirma que la erosión costera disminuye el atractivo del área costera para el desarrollo del turismo, lo que lleva a impactos económicos; por lo que es conveniente aplicar el enfoque: Conductor – Presión – Estado – Impacto – Respuesta (DPSIR) y el sistema de marcos de aprovechamiento para analizar la erosión en 2 playas: Monte Hermoso y Pehuen Co.

Por el contrario, en Estados Unidos se estudió la playa Delray ubicada en el sureste de las costas de Florida por Benedet et al., (2016), utilizando modelos morfológicos para evaluar la intervención de la ingeniería costera destinada a reducir la pérdida de volumen de la playa; entre las soluciones evaluadas incluyen la construcción de un rompeolas y rellenos.

Finalmente, uno de los trabajos más emblemáticos es el reportado por (Bruun, Gerritsen, & Morgan, 1957) que estudiaron los problemas costeros, principalmente la erosión, de Florida. En su trabajo hacen una descripción de la geografía costera de Florida y presentan la dirección predominante de la deriva litoral. En esta zona se tuvieron grandes pérdidas económicas debido a la erosión de las playas, llegando a calcular una pérdida anual de tierra de aproximadamente 300 a 500 acres, para contrarrestar la erosión se realizaron rellenos artificiales en bahías que fueron perjudiciales para las entradas a los canales. Todas las acciones realizadas de rellenos se realizaron sin ningún estudio hidrográfico o hidrológico previo, siendo hasta la legislación de 1957 en la que se estableció la necesidad de contar con regulaciones, estudios e investigaciones sobre las condiciones de la erosión y reportar los más eficientes y económicos métodos de prevención, corrección, control y detención de la erosión a lo largo de las playas de Florida. En este trabajo se ofrecen recomendaciones para resolver los problemas de erosión costera en la zona.

1.3 CONCEPTUALIZACIÓN DE VULNERABILIDAD

El uso científico inicial de “*vulnerabilidad*” tiene sus raíces en la investigación de la geografía y los peligros naturales, pero ahora este término es un concepto central en una variedad de contextos de investigación relacionados con los impactos naturales, como la intrusión salina, sequías, incendios forestales, inundaciones, desbordamiento de ríos, erosión y sedimentación; así como efectos sociales, como la pobreza, el hambre y el cambio de uso de suelo (Füssel, 2007). Adger (1999) y O’Brien & Leichenko (2001) indican que la vulnerabilidad no es un resultado, sino un estado o condición de ser muy dinámico y modulado por las desigualdades existentes en la distribución y acceso de recursos, el control individual que se puede ejercer sobre las opciones y oportunidades, y los patrones históricos de la socialización y la marginación. A continuación, se presenta una breve revisión de las definiciones generales de la vulnerabilidad.

White (1974) indicó que “*vulnerabilidad es el grado en que un sistema, subsistema o componente puede sufrir daños debido a la exposición a un peligro, ya sea una perturbación o estrés*”. Más tarde, Timmerman (1981) planteó la hipótesis de que “*vulnerabilidad es un término de uso tan amplio que resulta casi inútil una descripción cuidadosa en el presente, excepto como un indicador retórico de las áreas de mayor preocupación*”. Liverman (1990) señaló que la vulnerabilidad se *ha relacionado o equiparado con conceptos como la resiliencia, la marginalidad, la susceptibilidad, la adaptabilidad, la fragilidad y el riesgo*”. Otros conceptos como exposición, sensibilidad, capacidad de afrontamiento, criticidad y robustez podrían agregarse fácilmente a la lista, Füssel (2007). Es evidente que no existe una definición única de vulnerabilidad que se ajuste a todos los contextos de

evaluación. Es importante tener en cuenta que la diversidad de definiciones se puede considerar como una consecuencia primaria del empleo del término “*Vulnerabilidad*” en diferentes contextos políticos, referentes a diferentes sistemas expuestos a diferentes impactos.

En consecuencia, varios autores han enfatizado que el término “*vulnerabilidad*” solo se puede considerar de manera significativa con referencia a una situación de amenaza específica (Brooks, 2003; Downing et al., 2005; Füssel, 2007; Hinkel & Klein, 2006; Luers et al., 2003; Metzger et al., 2005). Las siguientes cuatro dimensiones fundamentales se pueden usar para describir una situación vulnerable:

- El sistema que este sujeto a análisis, como un sistema integrado de entorno humano, un grupo de población, un sector económico, una región geográfica o un sistema natural.
- Los atributos de preocupación, que pueden incluir, por ejemplo, vidas humanas y salud, la existencia, el ingreso, la identidad cultural de una comunidad, la biodiversidad, secuestro de carbono y la productividad de la madera.
- El peligro, se refiere a una influencia potencialmente dañina en el sistema.
- Referencia temporal, que se refiere al punto en el tiempo o período de interés, por ejemplo, actual vs futuro vs dinámico) (Füssel, 2007).

Una descripción clara de la situación vulnerable es un primer paso importante para evitar confusiones sobre vulnerabilidad. Por otro lado, las diferentes clasificaciones de vulnerabilidad por parte de especialistas de diferentes disciplinas o con diferentes percepciones producen diferentes interpretaciones del término “*vulnerabilidad*”.

En este trabajo se toma como referencia la definición de Ávila García (2007), que define la vulnerabilidad como el proceso por el cual la población humana y los ecosistemas están sujetos a daños o amenazas debido a factores sociales y biofísicos.

1.4 ENFOQUES EMPLEADOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD COSTERA

La vulnerabilidad se considera dinámica y varía dentro de escalas espaciales y temporales (Ashrafur Islam et al., 2016). Sin embargo, depende de factores geográficos, demográficos, económicos, sociales, institucionales, de gobierno y medioambientales (IPCC, 2012; Ashrafur Islam et al., 2016). Por lo tanto, en el contexto de la reducción y mitigación del riesgo de desastres, se considera que la evaluación de la vulnerabilidad es un requisito previo que puede mejorar la capacidad de recuperación de una comunidad, sociedad o nación. La evaluación de la vulnerabilidad de las regiones costeras incluye dos áreas principales: la primera considera las variables físicas para evaluar la vulnerabilidad de un sector costero en particular (Gornitz, 1990; Gornitz et al., 1994; Shaw et al., 1998; Thieler & Hammer - Klose, 1999; Nageswara Rao et al., 2008; Kumar & Kunte, 2012; Yin et al., 2012; Ashrafur et al., 2016); mientras que la segunda incluye variables socioeconómicas como la densidad de población junto con parámetros físicos para estimar la vulnerabilidad socioeconómica (Boruff et al., 2005; Szlafsztein & Sterr, 2007; Devoy, 2008; Murali et al., 2013; Kunte et al., 2014; Mahapatra et al., 2015; Ashrafur et al., 2016). Se han utilizado varias técnicas para estudiar la vulnerabilidad, incluido el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI, *siglas en inglés*), el Índice de Sensibilidad Costera (CSI, *siglas en inglés*), entre otros. La mayor intención de estos

trabajos, es generar información sobre los impactos del aumento del nivel del mar, el cambio climático y factores no climáticos sobre la línea de costa que puedan ser de gran valor para los miembros de la comunidad, los administradores costeros y otras partes interesadas. Además, la evaluación de la vulnerabilidad es el primer enfoque utilizado antes de realizar cualquier tipo de trabajo de desarrollo sostenible y es altamente beneficioso para reducir el riesgo ante desastres (Hinkel & Klein, 2009).

Una metodología común para la evaluación de la vulnerabilidad fue desarrollada por el IPCC en 1991 (CM-IPCC, 1991); posteriormente se desarrollaron varios enfoques para evaluar la vulnerabilidad costera basado en la metodología común, pero siempre desde una perspectiva relacionada al cambio climático. Un ejemplo es la que define la vulnerabilidad en función de la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa propuesto por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 1996). A pesar de los diversos enfoques, la mayoría de los estudios se centran en factores físicos asociados como la dinámica geofísica (por ejemplo, procesos geomorfológicos), o impactos físicos (por ejemplo, aumento del nivel del mar o inundaciones) en lugar de factores socioeconómicos como la pobreza (Abuodha & Woodroffe, 2006; Eakin & Luers, 2006; Nicholls et al., 2008; Nguyen, 2015).

En consecuencia, es necesario determinar una serie de factores, como los objetivos de la investigación o las cuestiones de políticas abordadas, la urgencia de la amenaza, el alcance geográfico y temporal del análisis, la confiabilidad de las proyecciones futuras, el nivel de conocimiento previo y la disponibilidad de datos, experiencia y otros recursos relevantes. Lo anterior es necesario para seleccionar un enfoque de evaluación adecuado para ser utilizado en una situación vulnerable específica, como la ubicación (por ejemplo, el área regional o local) o el sector (por ejemplo, el agrícola) (Eakin & Luers, 2006).

La vulnerabilidad depende de la escala, tanto en el espacio como en tiempo. Primero, la vulnerabilidad depende de la escala espacial, dependiendo de si es nacional, regional o local. Yoo, Hwang & Choi (2011) afirmaron que la escala espacial de las evaluaciones de vulnerabilidad suele ser demasiado amplia cuando se centra en la escala nacional o regional (Thieler & Hammer - Klose, 1999, 2000; Bryan et al., 2001; Domínguez et al., 2005; Mokrech et al., 2008; Dawson et al., 2009) o demasiado estrechos cuando se enfocan en segmentos costeros (Pendleton et al., 2005; Mahapatra et al., 2015). Abuodha & Woodroffe (2006) resumen numerosos enfoques basados en técnicas de segmentación que clasifican secciones de la costa según una evaluación semicuantitativa de variables. Estos son útiles para determinar áreas de alta prioridad para la reducción de la vulnerabilidad; sin embargo, la mayoría carece de incorporación de los aspectos socioeconómicos de la vulnerabilidad. Harvey & Woodroffe (2008) también indican que es necesario realizar evaluaciones de impacto específicas y estrategias de adaptación que sean locales. Torresan et al. (2008) señalan que un enfoque más detallado a escala local y regional requiere que los sistemas y la dinámica costera se describan en detalle y que los modelos más complejos de datos requieren métricas y variables específicas del sitio para comprender y gestionar las dificultades de un área de estudio específico y permitir la identificación de áreas y sectores vulnerables más específicos que podrían apoyar la toma de decisiones y políticas en el diseño de estrategias de adaptación integrales. Romieu et al. (2010) también enfatizan que las evaluaciones locales brindan más puntos de vista “*bottom – up*” y contextualizados localmente sobre la formación de vulnerabilidades.

1.5 DESARROLLO DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD

En general, el desarrollo del índice de vulnerabilidad involucra etapas secuenciales que incluyen la selección de indicadores, la normalización de indicadores a una escala común y la adición a un valor final:

- Primero, el objetivo de la selección de indicadores es elegir variables proxy para las dimensiones teóricas subyacentes de la vulnerabilidad que comprendan factores físicos y sociales relacionados con los componentes de las evaluaciones de vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.
- En segundo lugar, es importante tener en cuenta que la normalización de los datos a una escala de unidad común (comparable) y la suma subsecuente de los datos normalizados se utilizan generalmente para superar los problemas de inconmensurabilidad cuando se combinan múltiples indicadores.
- Finalmente, la etapa de agregación, se refiere a la forma en que se utilizan los indicadores transformados, normalizados y ponderados para combinarlos en el índice final. Las opciones incluyen el análisis multicriterio (Tate, 2013).

El concepto de Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) fue propuesto por primera vez por Gornitz (1990, 1991) para evaluar la vulnerabilidad costera debido al aumento del nivel del mar en la costa este de los Estados Unidos. Es un enfoque numérico para clasificar los segmentos de una línea costera en función del daño potencial causado por el cambio climático global, y el resultado se presenta a través de mapas y estadísticas para resaltar regiones donde la interacción de diversos factores influye en la vulnerabilidad de la línea costera (Kunte et al., 2014). Específicamente, esta técnica permite a un investigador calcular el (IVC) teniendo en cuenta los parámetros clave para poder determinar los factores importantes que influyen en la vulnerabilidad de un entorno costero.

A pesar de la amplia aceptación y el uso extensivo del algoritmo de Gornitz, en ciudades como Tamil Nadu, India (Sankari et al., 2015) y Bangladesh (Ashraf et al., 2016); se han desarrollado otros enfoques para calcular el índice de vulnerabilidad costera. Por ejemplo, Hegde & Reju (2007) consideraron su valoración como la suma de los parámetros dividida por el total de parámetros para la costa de Mangalore, India. Nageswara Rao et al., (2008) trabajaron en la costa de Andhara usando la suma de del producto de la variable por un peso; dando mayor peso a tres variables: geomorfología, pendiente costera y tasa de cambio de la línea de costa.

Un índice adicional es el que se refiere a la vulnerabilidad ambiental (EVI, *siglas en inglés*), el cual proporciona una base sólida para las medidas de gestión ambiental y se calcula como la suma del indicador de exposición más el indicador de sensibilidad menos la capacidad adaptativa, se ha aplicado a ciudades como Jakarta, Indonesia (Yoo et al., 2014).

El índice de vulnerabilidad social (SVI, *siglas en inglés*), evalúa la susceptibilidad del sistema social urbano a los impactos de las amenazas y se expresa en función de la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, se aplicado a ciudades costeras de China (Su et al., 2015).

Por otro lado, la técnica de evaluación multicriterio, como el proceso de jerarquía analítica (AHP, *siglas en inglés*), es adoptada por Bagdanavičiūtė et al., (2015) en la estimación de la vulnerabilidad costera.

Tabla 1. Enfoques desarrollados para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera.

Método	Aplicación
<i>Coastal Vulnerability Indices (CVI)</i>	Desarrollado por Gornitz et al. (1994), incluye 8 parámetros físicos para evaluar la vulnerabilidad de un área costera al aumento anticipado del nivel del mar relieve, tipo de roca, forma de relieve, movimiento tectónico vertical, desplazamiento de la línea de costa, rango de mareas y altura de las olas.
<i>Community Vulnerability Assessment Tool (CVAT)</i>	Desarrollado por el Centro de Servicios Costeros de la Administración Nacional de Oceanografía y Atmosférica, CVAT; apoya la vinculación de datos ambientales, sociales y económicos para construir una estrategia eficaz en respuesta a los peligros, tanto a nivel macro como micro, basado en una evaluación sistemática de la vulnerabilidad. Consta de 7 pasos: identificación y priorización de peligros, análisis de riesgos, análisis de instalaciones críticas, análisis social, análisis económico, análisis ambiental y análisis de oportunidades de mitigación. La herramienta de evaluación de riesgo y vulnerabilidad (RVAT) es una extensión de la metodología en CVAT, y apoya a las comunidades a identificar sus riesgos y vulnerabilidades a las tormentas costeras para crear estrategias efectivas de mitigación de riesgos y reducir los impactos de las tormentas (Russell, 2003).
<i>Coastal social vulnerability index (CSoVi)</i>	Boruff et al. (2005) han sugerido un enfoque híbrido que integre un índice de vulnerabilidad socioeconómica (SoVI) con variables socioeconómicas desarrolladas por Cutter et al. (2003) en un CVI para producir el índice general de vulnerabilidad social costera en sus evaluaciones de la vulnerabilidad costera de los condados de EE.UU. El CSoVI incluye además parámetros como pobreza, población, desarrollo, etnicidad, edad y urbanización.
<i>Place vulnerability index (PVI)</i>	Boruff et al. (2005) aplicaron el modelo de vulnerabilidad de riesgo de un lugar (Cutter, 1996) para derivar el índice de vulnerabilidad del lugar (PVI) para cada uno de los condados de los Estados Unidos al agregar puntajes CVI y CSoVI luego clasificar los puntajes PVI en clases: bajo, medio y alto. El análisis de Varianza (ANOVA) identificó diferencias

significativas (a un nivel de confianza del 95) para cada uno de estos índices en diferentes costas. Estas diferencias fueron expuestas por los datos socioeconómicos considerados de manera inclusiva.

El CVI originalmente combinaba información de siete variables físicas; en el cual de cada variable para cada segmento costero se le asignó un valor entre 1 y 5, donde 5 representa la clase más vulnerable. El CVI se calculaba como la suma o producto de las clases asignadas a cada variable. El producto tiene la ventaja de ampliar el rango de valores, pero es bastante sensible a pequeños cambios. Por lo tanto, se introdujo un factor para amortiguar los rangos extremos, reduciendo así la sensibilidad del CVI calculado. En la siguiente Tabla se presentan los CVI desarrollados originalmente:

Tabla 2. CVIs desarrollados originalmente.

Nombre	Formulación
Producto medio	$CVI_1 = \left(\frac{x_1 * x_2 * x_3 * x_4 * \dots * x_n}{n} \right)$
Producto medio modificado	$CVI_2 = \frac{(x_1 * x_2 * 0.5(x_3 + x_4) * x_5 * 0.5(x_6 + x_7))}{n - 2}$
Promedio de la suma de los cuadrados	$CVI_3 = \frac{(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + \dots + x_n^2)}{n}$
Producto medio modificado (2)	$CVI_4 = \frac{(x_1 * x_2 * x_3 * x_4 * \dots * x_n)}{5^{(n-4)}}$
Raíz cuadrada del producto medio	$CVI_5 = (CVI_1)^{\frac{1}{2}}$
Suma de productos	$CVI_6 = 4x_1 + 4x_2 + 2(x_3 + x_4) + 4x_5 + 2(x_6 + x_7)$

2

ASPECTOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 INTRODUCCIÓN

Para poder identificar los problemas que enfrenta una zona costera se requiere, en primer lugar, conocer las características particulares de la misma a fin de poder identificar los procesos y fenómenos que originan modificaciones en el sistema costero.

Las modificaciones pueden ser generadas por agentes físicos, químicos, biológicos, entre otros. Con el objetivo de tener un conocimiento global del litoral del estado de Campeche; en este capítulo se proporciona información general de aspectos del litoral del estado, clasificados en aspectos físicos y sociales.

De los aspectos físicos se presenta información específicamente de topografía y suelos, geomorfología, hidrografía, oceanografía y; de condiciones sociales se habla de población, uso de suelo, economía e infraestructura. Por último, hacia el final del capítulo se presenta un diagnóstico de la condición actual de la zona costera del estado.

2.2 DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estado de Campeche ($57,924 \text{ km}^2$)¹ se localiza en la Península de Yucatán entre los paralelos $17^\circ 49'$ y $20^\circ 51'$ de latitud norte y los meridianos $89^\circ 06'$ y $92^\circ 27'$ de longitud oeste. Colinda al noreste con el estado de Yucatán ($43,379 \text{ km}^2$)², al este con el estado de Quintana Roo ($50,212 \text{ km}^2$)², al sur con la República de Guatemala, al suroeste con el estado de Tabasco y al oeste con el Golfo de México (INEGI, 2010) (Figura 1).

¹ INEGI, 2015.

² Medio Físico del Estado de Yucatán». e-local.gob.mx. Archivado desde el original el 26 de noviembre de 2011. Consultado el 10 de agosto de 2018.



Figura 1. Estado de Campeche

Campeche tiene una extensión territorial de 57,924 km² (2.93% de la superficie nacional) dividida en 11 municipios (INEGI, 2015b). La población total del estado es de 899,931 habitantes con una densidad promedio de 16 hab/km². El 75% de la población vive en localidades urbanas y el restante en localidades rurales (INEGI, 2015b).

La costa del estado cuenta con 523 km de litoral, que representa el 4.51% del total del país (Ayala Pérez, 2010). Seis municipios son costeros. En la costa norte del estado, el litoral está conformado por una extensa franja de manglares; hacia el sur, en el litoral de los municipios de Campeche y el norte de Champotón la costa es árida, con numerosas colinas boscosas que forman salientes y ensenadas; siguiendo la línea de costa, en los municipios de Champotón y Carmen, se forma una extensa franja arenosa, que cuenta con playas de gran importancia, pues en estas anidan diversas especies de tortugas marinas. Sobresale por su variedad de paisajes naturales la Isla del Carmen, isla que separa a la Laguna de Términos del Golfo de México y en la que se localiza ciudad del Carmen. Entre las playas más importantes destacan: Punta Xen, Chenkán, Sabancuy, Isla Aguada, Puerto Real, Punta San Julián, Bahamitas, Tortugueros, Playa Norte y Xicalango.

2.3 CONDICIONES NATURALES

2.3.1 Topografía y suelos

La superficie estatal forma parte de las provincias: Llanura Costera del Golfo y Península de Yucatán. El occidente, suroriente y norte, están conformados por llanuras que se inundan con cierta frecuencia, áreas pantanosas y formación de ríos. Al oriente hay lomas, con elevaciones máximas de 340 metros sobre el nivel del mar (msnm), así como depresiones que se denominan cenotes (Figura 2).

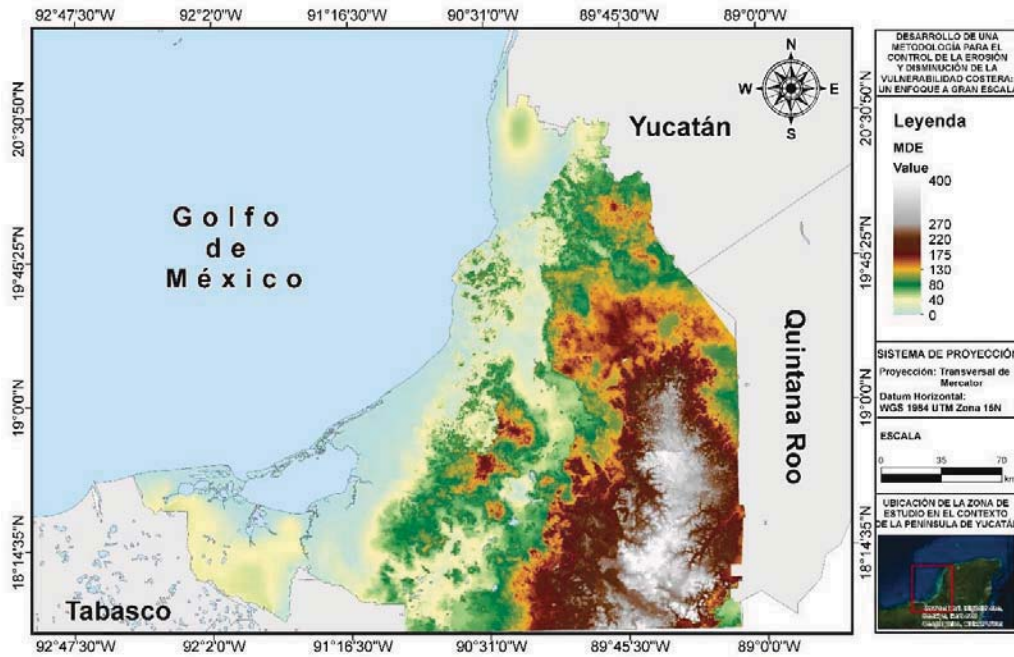


Figura 2. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del estado de Campeche.

La base continental se formó mediante la acumulación de fragmentos finos y gruesos de carbonato de calcio y magnesio de origen marino. La superficie estatal se considera que está formada por rocas sedimentarias que descansan en formaciones terciarias y que no han recibido movimientos orogénicos³ notables.

En el sur de Seybaplaya, en el municipio de Champotón se inicia una serie de lomeríos que tienen una altitud media de entre 40 y 60 metros, llegando a alcanzar en algunos puntos más de 100 metros.

En su recorrido por la costa cercana a la Ciudad de Campeche estos lomeríos forman acantilados con puntas. En el sureste se encuentra la parte más elevada del relieve, cerca de los límites con Guatemala y Quintana Roo; las máximas y principales elevaciones se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Elevaciones principales

Nombre	Latitud Norte			Longitud Oeste			Altitud (msnm)
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
Cerro Champerico	17	54	38	89	28	13	390
Cerro los Chinos	18	09	01	89	24	58	370
Cerro el Ramonal	18	16	08	89	49	02	340
Cerro las Águilas	18	01	12	89	25	09	320
Cerro el Doce	18	33	29	90	08	28	250
Cerro Chumul	19	18	07	89	27	00	230
Cerro el Gavilán	18	53	59	89	15	35	210

³ Movimientos horizontales de la corteza terrestre.

En lo que respecta a los suelos⁴, en Campeche se presenta una diversidad edáfica producto de las tres grandes zonas geomorfológicas: planicies y lomeríos kársticos, planicies acumulativas y planicies costeras (Figura 3); teniendo 13 de los 32 grupos de suelos considerados en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006 (WRB, 2006).

Los Leptosoles⁵ (LP) son los suelos más comunes en el estado, son pocos profundos y están limitados por roca dura continua dentro de los 25 cm; son suelos azonales y/o sin rasgos morfológicos claramente expresados. Se encuentran en todo el estado con excepción de la parte oeste, ubicándose principalmente en las planicies y lomeríos kársticos. Presentan vegetación de selva mediana subperennifolia.

Los Vertisoles (VR) localizado en las partes bajas del relieve. Son arcillosos y presentan vegetación de selva baja caducifolia y subperennifolia, y mediana subperennifolia. Se localiza en la parte centro y sur, en las planicies kársticas y las planicies acumulativas.

El Phaeozem (PH), suelo acumulativo de materia orgánica. Es fértil y se desarrolla en lugares bien drenados, se encuentra principalmente en la parte centro – oeste del estado de forma dispersa en planicies y lomeríos kársticos. Presenta vegetación de selva mediana.

El grupo Gleysol (GL) se caracteriza por la prolongada saturación del suelo con agua del acuífero. Se concentran en las partes más bajas del relieve al oeste del territorio. Presentan vegetación de selva mediana subperennifolia y tular⁶.

El Solonchak (SC) tiene alta concentración de sales solubles. Se localizan en las partes bajas del relieve sin drenaje o con drenaje deficiente, por lo que las sales se acumulan. Se desarrollan principalmente en la costa sur y norte. Presentan vegetación de manglar, matorrales y arbustos halófitos.

⁴ Ver: Bautista Zúñiga et al., 2010. Suelos. En: G. J. Villalobos-Zapata & J. Mendoza-Vega (Eds.), La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. (p. 730). Campeche, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur.

⁵ Leptosol proviene del griego *leptos*, delgado. En la taxa de muchos sistemas de clasificación internacional (USA, FAO) se les denomina Litosoles, ejemplo: Mapa de Suelos del Mundo (FAO – UNESCO, 1971 – 1981).

⁶ Comunidad de plantas herbáceas enraizadas en el fondo de terrenos pantanosos o en las orillas de lagos y lagunas. Se caracteriza porque sus componentes tienen hojas largas y angostas o carecen de ellas. Se les conoce como tules y pertenecen principalmente los géneros *Typha*, *Scripus* y *Cyperus*.

El Luvisol (LV), suelos con acumulación de arcilla. Se ubican al norte del estado, en los lomeríos y planicies kársticas y en las partes bajas del relieve con buen drenaje. Suelos buenos para agricultura, laboreo mecánico.

Los Nitisoles son suelos profundos y bien drenados. Se ubican exclusivamente en la parte norte del estado, en las partes bajas del relieve, planicies y lomeríos kársticos. Presentan vegetación de selva mediana subcaducifolia.

Los Regosoles (RG) son suelos minerales constituidos por material suelto. Se encuentra muy disperso en el territorio, sólo ocupa el 1.04% en la parte norte y suroeste principalmente, con una cobertura vegetal de selva mediana subcaducifolia y pastizal cultivado.

Los Histosoles (HS) contienen material orgánico en la superficie. Se ubica al noroeste y oeste del estado, muy cercanos a la costa. Son poco profundos y sobreyacen a materiales calcáreos. Presentan vegetación de manglar, tular y popal, se localizan en los Petenes.

Los Fluvisoles (FL) formados por depósitos aluviales, confinados a sedimentos de ríos y depósitos marinos y lacustres. Se encuentran en la parte sur del estado, en las planicies acumulativas, con vegetación de selva baja espinosa.

Los Arenosoles (AR) con más del 80% de arena a lo largo del perfil y una profundidad de 100 cm o mayor, con escasa retención de humedad y baja fertilidad. Se localiza en las planicies costeras; cubiertos de matorrales, herbazales y pastizales.

Los Calcisoles (CL), suelos con acumulación de carbonato de calcio en un horizonte de 15 cm de espesor o mayor, y presentan un horizonte petrocalcico⁷. Se localizan en el sur del estado y presentan vegetación de selva mediana subperennifolia y pastizales.

Los Cambisoles (CM) son suelos con horizonte subsuperficial de 15 cm de espesor o mayor. Se encuentran en la parte sur, en las zonas bajas del relieve, junto a los Luvisoles y Leptosoles.

⁷ Carbonato de calcio solidificado.

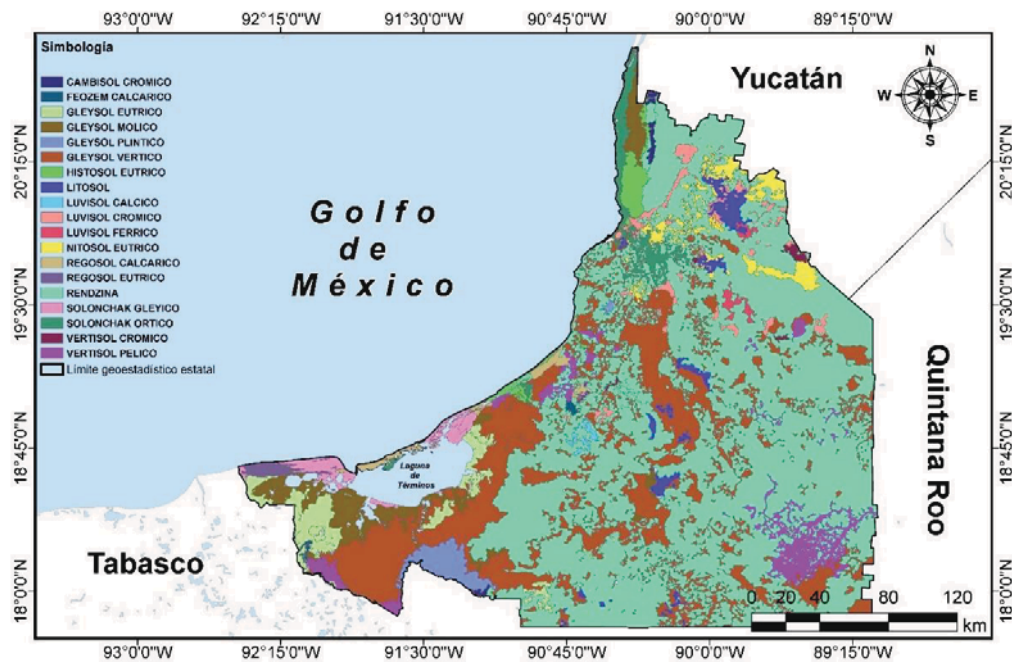


Figura 3. Edafología del estado de Campeche.

2.3.2 Geomorfología

El mapa geomorfológico de la Península de Yucatán se encuentra delimitado por unidades territoriales de escalas medias con cierto grado de homogeneidad morfogenética y ambiental. Bajo este criterio se estructura al sistema de clasificación de paisajes geomorfológicos. A cada paisaje le corresponde una particular combinación de procesos endógenos y exógenos, así como las respectivas evidencias en geformas, materiales (residuales, acumulativos, erosivos y denudativo⁸) e indicadores bióticos.

Debido al estrecho vínculo entre los paisajes geomorfológicos y el comportamiento de los acuíferos, se incluye el conocimiento hidrológico (Butterlin & Bonnet, 1963; Duch, 1988; Lasser & Weidie, 1988; Perry et al., 1995; Villasuso & Méndez - Ramos, 2000; Wilson, 1980) disponible para la Península de Yucatán.

Se distinguen 3 sistemas principales (Bautista et al., 2005):

- Sistema Fluvio – Palustre: Ubicado sobre planicies bajas acumulativas en cuencas de acumulación marginal. Están expuestas a inundación semipermanente y extraordinaria por lo que existe hidromorfismo en los suelos y vegetación hidrófila como vegetación riparia, manglares, popales, tulares, pastizales inundados y selvas bajas y medianas inundables.

⁸ Referido a denudación que, en el ámbito de la geología, se produce cuando la capa más externa de la corteza terrestre se desprende como consecuencia de la actuación de un agente externo; puede estar vinculada a la erosión o bien asociarse al transporte de sedimentos y a la meteorización.

- Sistema Litoral: Se sitúa en el borde externo continental, sobre una cuenca marginal o de transición entre el continente y el océano. Recibe los sedimentos de la porción continental y los generados en el ambiente marino. En estos sistemas la hidrodinámica costera del oleaje, las mareas y la deriva litoral son factores morfogenéticos relevantes.
- Sistema Carso – Tectónico: El relieve cárstico se debe a la disolución por aguas subsuperficiales y subterráneas de rocas como caliza, dolomita, yeso y sal. El karst se desarrolla en zonas húmedas sobre superficies de estructura tabular y/o horizontal, como el caso de pliegues braquianticlinales, mesetas y terrazas estructurales. Es el sistema más representativo de la Península. El relieve en su conjunto es considerado del tipo karst de mesa por el predominio de estructuras tabulares monoclinales. Se pueden diferenciar dos grandes subregiones, una al norte y otra al sur: En el norte predominan superficies niveladas durante el Cuaternario (Lugo-Hubp et al., 1992) resultado de transgresiones y regresiones desde el Pleistoceno, por lo cual el relieve cárstico es reciente, predominando planicies estructurales denudativas y de disolución. En la subregión sur existen levantamientos tectónicos desde el Mioceno por lo que representa un relieve de lomeríos en cúpulas y planicies residuales resultado de un mayor grado de carsticidad.

El mapa geomorfológico de la zona costera de Campeche, propuesto por Lugo-Hubp & García-Arizaga (1999) se tomó como mapa base. A partir de éste se tipificaron nuevas geoformas basadas en el análisis de patrones de humedad y suelos identificados en imágenes de satélite Landsat TM recientes, fotografías aéreas 1:75000 y observaciones en campo (Palacio-Aponte et al., 2005).

Se identificaron y describieron 22 unidades geomorfológicas (Figura 4). Las características morfogenéticas y morfodinámicas presentan diversos gradientes ambientales, principalmente en la región suroeste, en donde las unidades geomorfológicas son hidrodinámicamente más heterogéneas de planicies palustres, fluviales y lacustre-marinas. En el norte las unidades son más homogéneas, con geoformas planas, y con acumulación de sales en superficie, debido a la escasez de precipitación durante un periodo más largo que en las otras regiones. En el centro las unidades geomorfológicas son de transición, y presentan la morfología de mayor altitud en toda el área de estudio (lomeríos y planicies cársticas elevadas), así como el único lecho cárstico- fluvial importante.

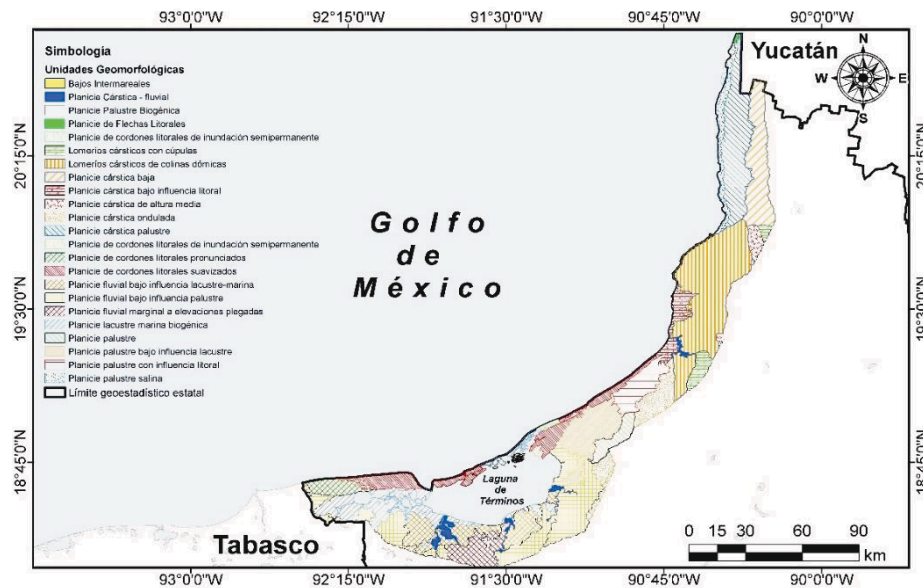


Figura 4. Unidades geomorfológicas de la zona costera del estado de Campeche.

2.3.3 Características geológicas

La identificación de calizas⁹ en la plataforma continental de las playas del noreste de la Península de Yucatán, provoca que éstas se diferencien con respecto al resto de las playas de la península.

Para tratar de comprender el comportamiento de los sistemas litorales, es necesario analizar la evolución de estos, pero desde una perspectiva global que permita deducir conclusiones acerca de la respuesta que tendrá el sistema en un futuro; el estudio del marco global debe iniciar desde la composición geológica de la región en la cual, se encuentra inmerso el sistema.

La composición geológica básica de la península consiste de carbonatos autigénicos y anhidritas; que se originaron en el Cretácico Medio – Aptiano (124.5 MA) hasta el Mioceno (23.3 MA). El análisis de sedimentos cretácicos ha demostrado un hundimiento continuo del estrato marino que se presentó del Cretácico (145.6 MA) hasta parte del Eoceno (56.5 MA); siendo en el Cretácico donde prevalecieron las condiciones necesarias para la formación de material evaporítico. Debido a la gran cantidad de rocas evaporíticas localizadas en la península, se reconocen a todas las “evaporizas de Yucatán” como una combinación de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico Medio (97 MA). La Península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos del Terciario (López, 1973).

La Península de Yucatán es una porción de tierra que emergió en el Cretácico; durante la Era Paleozoica (570 MA), la península permaneció bajo el nivel del mar (Figura 5a); esta condición prevaleció durante los periodos del Triásico (245 MA) y Jurásico (208 MA) (Figura 5b y Figura 5c). A

⁹ Sedimento consistente de calcita o de residuos calcáreos de organismos. Con frecuencia contiene minerales de dolomita, partículas arcillosas y arenosas. A la caliza se le llama además según el componente o textura de la misma (oolítica, compacta, cristalina, detrítica, etc.).

partir del Cretácico Inferior (145.6 MA) se presentaron las condiciones necesarias para el depósito de grandes masas de evaporitas (Figura 5d). Sin embargo, la inexistencia de sal en la tierra que emergió, provocó que la sedimentación de las evaporitas (calizas, dolomías y anhidritas) se iniciara a partir del Albaniano – Cenomaniano (112 – 97 MA) (Ruíz-Martínez, 2009).

En el Cretácico Superior (65 MA), un lado de la porción central comenzó a emerger hasta quedar expuesta. En el Terciario y Cuaternario (Figura 5e y Figura 5f) se presentaron facies¹⁰ de plataforma somera en ambientes de supramarea¹¹, que fueron generados por la continua oscilación del nivel del mar. Al final del Plioceno (2.48 MA) y ya en el Cuaternario (1.64 MA), la península adquiere la forma actual, observándose alineamientos de arrecifes al Norte del Banco de Campeche; ya que la carencia de ríos en la masa de tierra peninsular limita de una manera importante la presencia de sedimentos del tipo terrígeno.

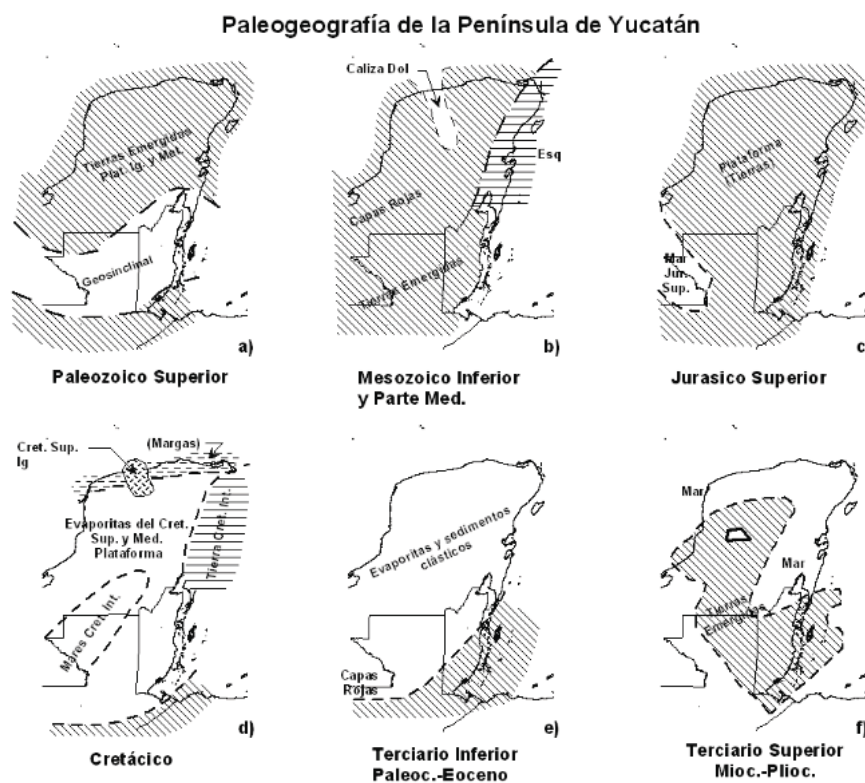


Figura 5. Paleología de la Península de Yucatán (de López Ramos, E. Estudio Geológico de la Península de Yucatán. 1973. Tomado de Ruíz Martínez, Determinación del Estado Morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos, 2009)

La Península de Yucatán se originó a partir de la emersión de la plataforma continental; en la mayor parte de ella se identifica una llanura de relieve moderado y suave, mientras que en la parte oriental se profundiza rápidamente por erosión. Esta porción de tierra se considera como una zona

¹⁰ Conjunto de rocas con determinadas características.

¹¹ Zona de la costa que se encuentra delimitada por el nivel de pleamar de la marea.

tectónicamente estable, en la que se observan rasgos casi planos por la ausencia de relieves positivos de importancia; que facilitan la libre precipitación de carbonatos que más tarde darán lugar a la formación de rocas carbonatadas. Una de las características de la porción central y norte de la Península de Yucatán es que al no existir ríos superficiales a través de cuales, fluya el agua de las precipitaciones atmosféricas o de la condensación, el líquido se percola hacia el subsuelo, formando mantos freáticos; esta agua subterránea tiende a disolver las calizas superficiales (fenómeno conocido como karst), originando cenotes. Otra consecuencia de la falta de drenaje superficial es que no existe aporte de sedimentos terrígenos al mar.

2.3.4 Hidrografía

La geología superficial de la Península de Yucatán está formada principalmente por sedimentos de origen calcáreo que le han brindado el carácter de cárstico¹² que controla la hidrogeología de la Península. El estado de Campeche forma parte de lo que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha denominado Región Hidrológica – Administrativa (RHA¹³) XII, Península de Yucatán (CONAGUA, 2018). La RHA XII Península de Yucatán está conformada por cuatro Regiones Hidrológicas (RH): Grijalva – Usumacinta, Yucatán Oeste, Yucatán Norte y Yucatán Este (CONAGUA, 2017) (Figura 6).



Figura 6. Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas del estado de Campeche.

En la porción sur – suroeste del territorio de Campeche se concentra el mayor número de corrientes superficiales (ríos, lagos, lagunas y esteros). Las corrientes superficiales de esta zona pertenecen a

¹² Terreno calcáreo altamente fracturado, con gran número de cavidades de disolución: cavernas y cenotes

¹³ El país se ha dividido en 13 RHA, formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como unidades básicas para la gestión de recursos hídricos.

distintas cuencas, siendo la de mayor extensión la del sistema Grijalva – Usumacinta, seguida por las cuencas de los ríos Candelaria, Chumpán y Mamantel (Rebolledo Vieyra, 2010).

Los principales ríos en Campeche se ubican hacia el suroeste del estado (Figura 7). El Río Usumacinta es el límite natural con Tabasco y entre sus afluentes están los Ríos Palizada, Río San Pedro y San Pablo. El río Palizada es el brazo más caudaloso y estrecho oriental del Usumacinta, recibe las aguas del arroyo Blanco, sigue su curso hasta unirse con el río Viejo y desemboca en la laguna del Este, donde desembocan pequeñas corrientes de los ríos del este (Piñas y Marentes) que finalmente salen por la Barra de Boca Chica a la Laguna de Términos.

El río Chumpán se forma por la unión de los arroyos: Salsipuedes, San Joaquín y Piedad y desemboca en la Laguna de Términos por la Boca de Balchacah. El Río Candelaria se forma en la región del Petén, en Guatemala y desemboca en la laguna Pargos, la cual desemboca en la Laguna de Términos. El Río Mamantel desemboca en la Laguna del Panlau, y el Río Champotón en el delta entre Punta Paraíso y Punta Couoh, junto al poblado de Champotón. El resto de las corrientes, situadas en el centro y suroeste del estado, son temporales, pues sólo llevan agua en tiempo de lluvias.

Un rasgo importante es el conjunto lagunar que rodea la Laguna de Términos, formando el sistema de lagunas más importante del país. De oeste a este se encuentran: Pom, Atasta, Puerto Rico, El Este, Del Vapor, Del Corte, Pargos y Panlau (Figura 7). Estas lagunas reciben agua dulce de los principales ríos y se comunican con la Laguna de Términos y esta a su vez lo hace con el mar y con el estero de Sabancuy (CONAGUA, 2015), formado por barreras de arena y manglar (Rendón-von Osten et al., 2008). En el sur de Campeche se presenta una serie de depósitos de agua conocidos como aguadas o akalches. Estos depósitos se generan durante la temporada de lluvias.

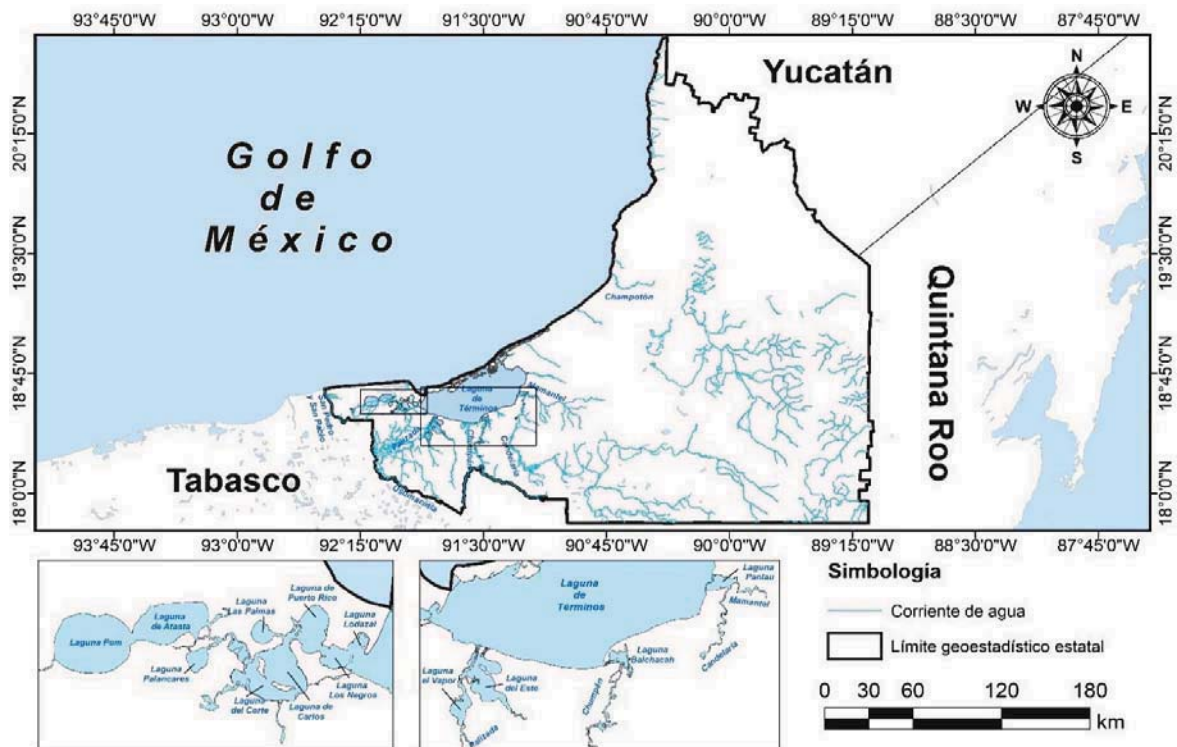


Figura 7. Ríos y lagunas más importantes del estado de Campeche.

En el estado no hay presas, pero la Comisión Federal de Electricidad tiene un proyecto hidroeléctrico en Tenosique, Tabasco (Amezcuca et al., 2007), con el que se represaría el Río Usumacinta en el cañón de Boca del Cerro, lo que modificaría los patrones hidrológicos de aporte de sedimentos y nutrientes en los humedales y dunas costeras de Tabasco y Campeche (Amezcuca et al., 2007), siendo la Laguna de Términos el sistema más afectado.

2.3.5 Oceanografía

El Golfo de México es un mar de tipo mediterráneo con captación limitada y rangos de marea bajos (micromareal) en todo momento. Contiene todas las principales provincias batimétricas de un océano junto con una zona costera complicada; se encuentra en las latitudes bajas y medias y se extiende sobre múltiples zonas climáticas. Incluye regiones donde se entregan enormes volúmenes de sedimentos terrígenos y otras donde los sedimentos autóctonos generalmente están ausentes (Davis, 2017).

La superficie es bastante plana con relieve local de solo unos pocos metros. Los sedimentos son una combinación de sedimentos terrígenos finos y sedimentos biogénicos aportados por organismos planctónicos. Los sedimentos autóctonos son casi todos minerales arcillosos que provienen de las provincias del norte de los estados del Golfo. Los sedimentos biogénicos son principalmente foraminíferos con algunas diatomeas (Davis, 2017).

2.4 CONDICIONES SOCIALES

2.4.1 Población

En el 2015, en el estado de Campeche vivían 899,931 habitantes; de los cuales 458,655 eran mujeres y 441,276 hombres, ocupando el lugar 30 a nivel nacional; los municipios más poblados son Campeche y Carmen con 283,025 y 248,303 habitantes respectivamente, seguidos de Champotón con 90,244 habitantes (INEGI, 2015a). En la Figura 8 se presenta las localidades costeras y su clasificación en rangos de población.

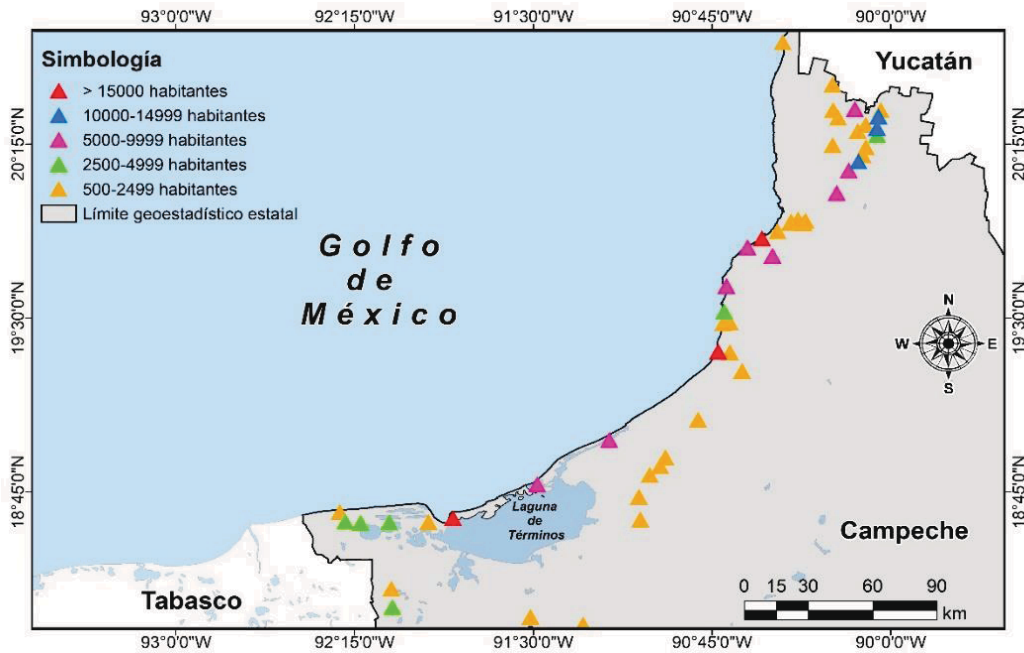


Figura 8. Localidades costeras de Campeche y su clasificación en rangos basado en el número de habitantes.

El 75% de la población es urbana y el restante rural; para el 2015 la densidad poblacional en Campeche era de 16 hab/km² en promedio. En la Figura 9 se presenta el crecimiento poblacional por localidad para el periodo 2000 - 2010.

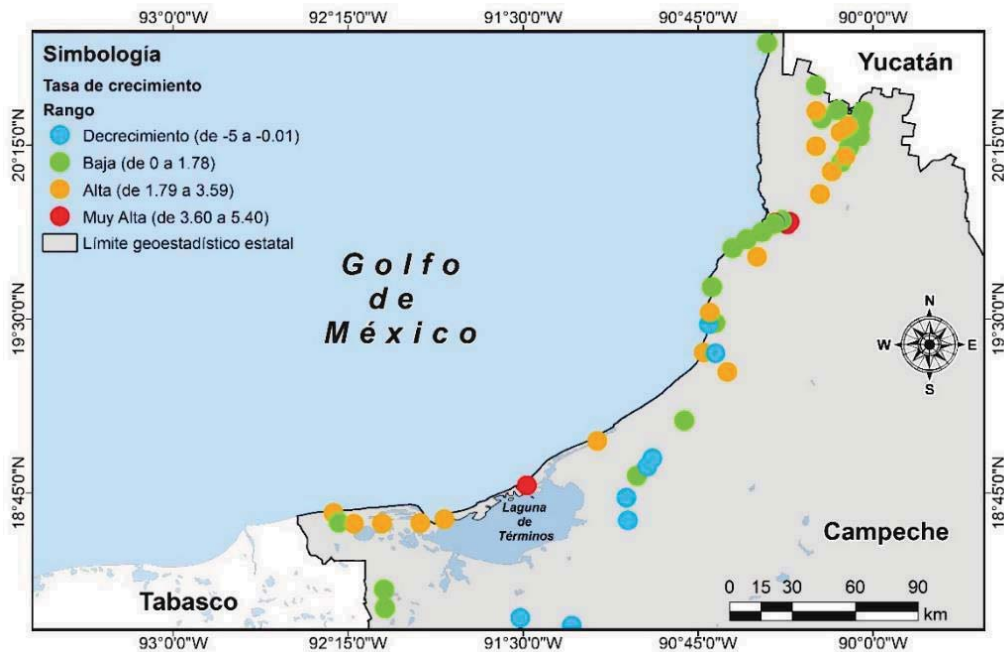


Figura 9. Crecimiento poblacional de las localidades costeras de Campeche para el periodo 2000 - 2010.

2.4.2 Uso de suelo

El uso de suelo costero de Campeche presenta una variedad de elementos representativos del estado natural y modificado del suelo. Hacia el sur del estado hay presencia de dunas frontales, localizadas al norte del sistema lagunar de Pom – Atasta; que constituyen un extenso campo de dunas formado por cordones de playa. Esta zona está sujeta a usos agropecuarios y forman una franja ancha. En algunas zonas más conservadas, se entremezclan los cordones de dunas con depresiones entre los cordones donde se establecen manglares y otros humedales.

Hacia el norte las dunas frontales se adelgazan y forman una isla barrera; parte de las dunas de la isla están ocupadas por urbanizaciones como Ciudad del Carmen e Isla Aguada. El resto están cubiertas por matorrales y restos de selvas; gran parte de las dunas de esta región colindan con humedales, tanto de agua dulce como manglares.

En la zona central del litoral del estado hay predominancia de usos agrícolas, pecuario y forestal con una combinación de selva mediana, aquí se localizan urbanizaciones como Champotón, Seybaplaya y Ciudad del Sol. Mientras que la zona norte del estado hay predominancia de bosques de mangle y áreas sin vegetación producto de la desertificación en la zona, resaltan por su importancia las urbanizaciones de San Francisco de Campeche e Isla Arena (Figura 10).

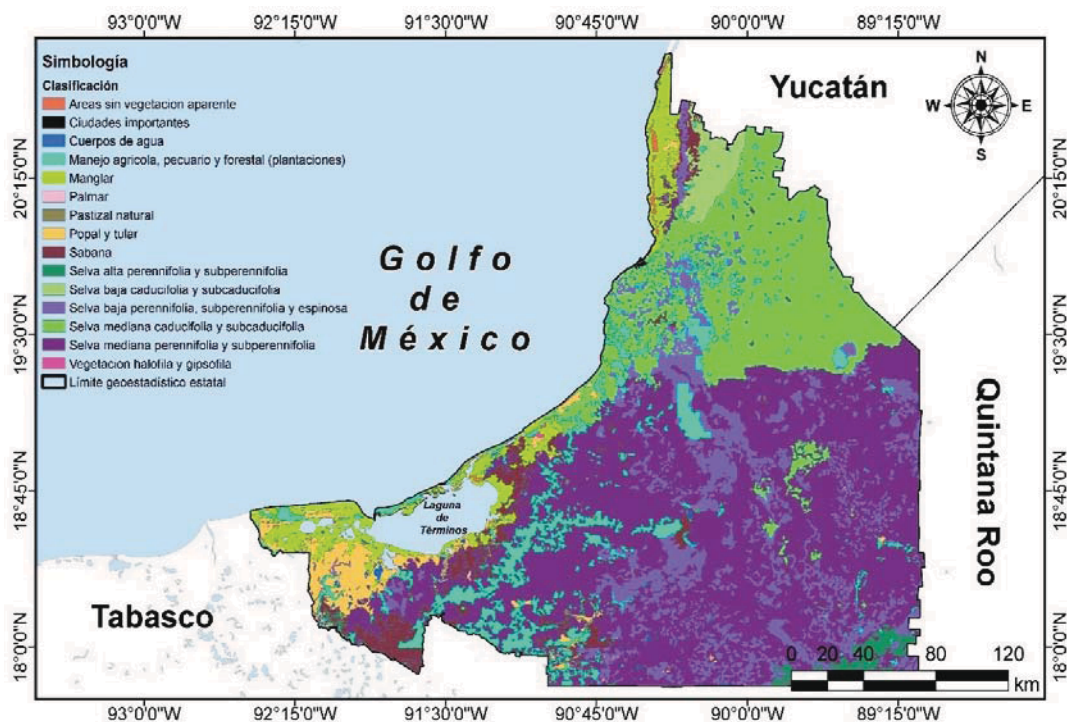


Figura 10. Usos de suelo para el estado de Campeche.

2.4.3 Economía e infraestructura costera

El Producto Interno Bruto (PIB) de Campeche en 2017 fue del 2.4% con respecto a la nacional (Figura 11).

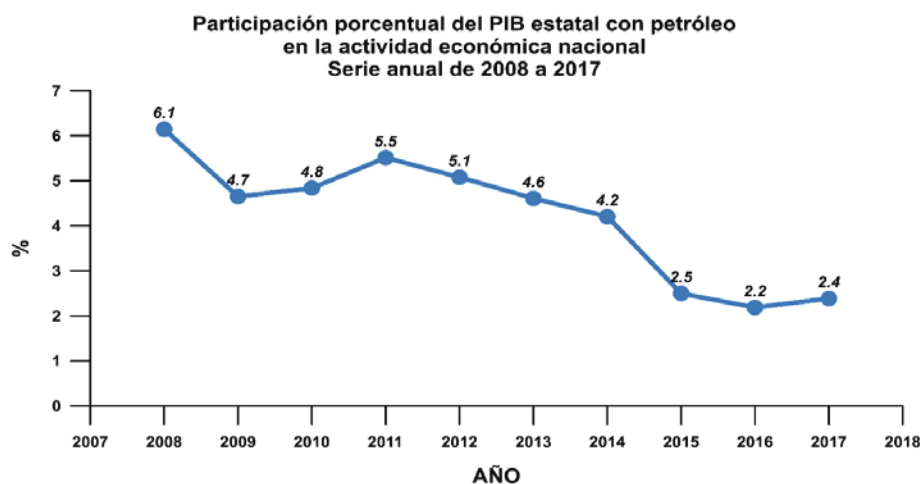


Figura 11. Producto Interno Bruto (PIB) para el periodo 2008 - 2017, se incluye la participación de la actividad petrolera.
Fuente: INEGI. Dirección General de Estadísticas Económicas. Sistema de Cuentas Nacionales de México.
<https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0&t=10200043002000700070> (03 de mayo de 2019).

Para el año 2016 y en relación al PIB, las actividades primarias representaban el 1.6%, las secundarias el 76.9% y las terciarias el 21.4%.

Entre las principales actividades se encuentran: minería petrolera (80.3%), construcción (7.1%) y comercio (2.1%), que juntas representan el 89.5% del PIB estatal.

Los sectores estratégicos en el estado son: agroindustrial, productos del mar, forestal, minería, petroquímica y turismo¹⁴.

En el sector primario con enfoque a la producción agrícola, Campeche produce arroz palay, calabaza, zapato, soya y maíz grano semilla. Referente a la captura pesquera, los principales productos pesqueros son el jurel y el róbalo; la miel es el principal producto pecuario producido por el estado, mientras que en la producción minera destacan el petróleo crudo y el gas natural.

Según el Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2013, el estado de Campeche contaba en 2012 con una longitud carretera de 5,553 km y 415.6 km de vías férreas. La entidad cuenta con un total de 14 puertos y terminales portuarias, siete de ellos cuya actividad preponderante es la pesquera, cinco son petroleros y dos son comerciales, de los cuales, ocho se clasifican como puertos de altura. Adicionalmente, la entidad cuenta con dos aeropuertos internacionales y 18 aeródromos (Figura 12).

¹⁴ Delegación Federal en Campeche 2014.

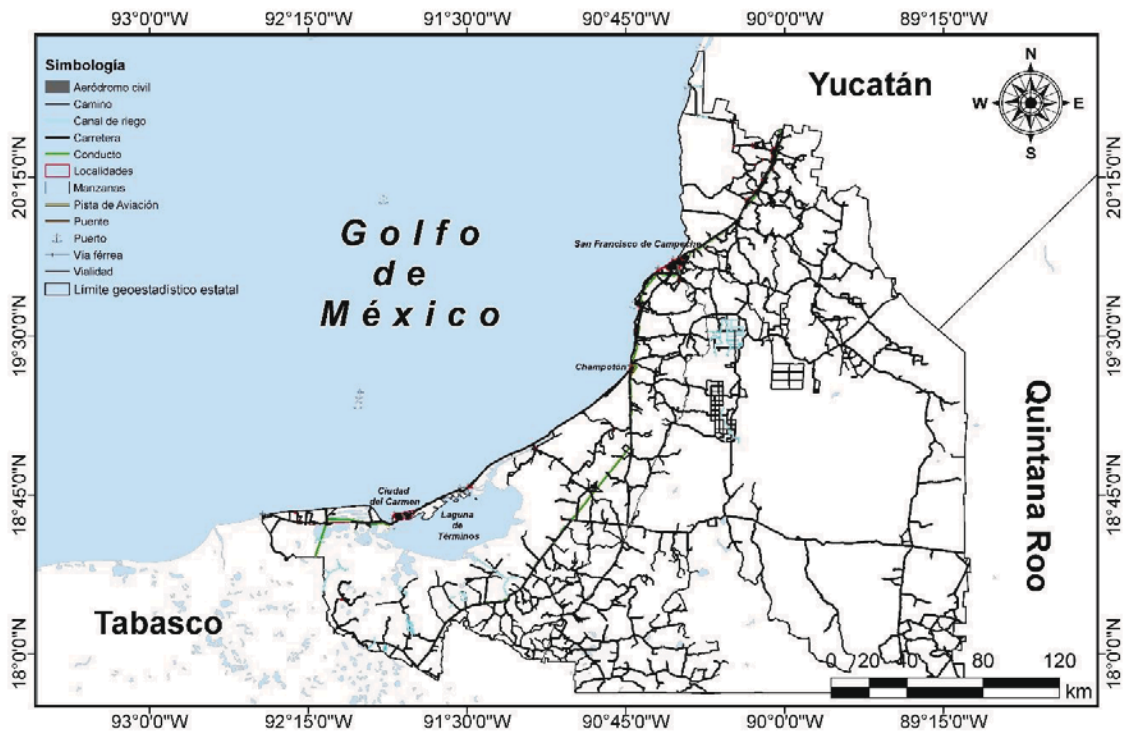


Figura 12. Infraestructura relevante en el estado de Campeche.

Los principales desarrollos urbanos son San Francisco de Campeche, Champotón y Ciudad del Carmen. Desde Ciudad del Carmen se continúa una carretera costera (Carretera Federal 180) sobre las dunas que permite llegar hasta Yucatán. Varias ciudades a lo largo del litoral funcionan como zonas turísticas: Si – Ho Playa, Sabancuy, Isla Aguada, entre otras.

Paralelo a la Carretera Federal 180 se encuentran los tendidos de torres de conducción eléctrica, especialmente en Isla del Carmen y en el tramo costero entre Isla Aguada y Si – Ho Playa. El estado tiene algunos muelles y escolleras; cuenta con un total de 24,196 m de obras portuarias de protección; de éstas, 2,295 son rompeolas, 377 escolleras, 5,886 son espigones y 15,638 son protecciones marginales (SCT, 2011). La infraestructura industrial petrolera está ubicada principalmente en el mar, en la zona de Campeche.

2.5 DIAGNÓSTICO

El estado de Campeche representa la transición entre el Golfo y el Caribe de México, sus arenas aumentan de contenido de carbonato de calcio hacia la frontera con Yucatán. Su costa es una de las más amenazadas por la elevación del nivel del mar, es el cuarto estado con la mayor extensión de dunas frontales (López Rosas et al., 2014) y pertenece a la región que más vegetación de dunas ha perdido en 30 años (Seingier et al., 2009).

Para entender mejor el problema y el diagnóstico hay que analizar aspectos de la costa, algunas de las cuales ya han sido plasmadas a lo largo de este capítulo. El estado presenta un clima cálido húmedo con una precipitación promedio anual de 1272 mm y la temperatura media anual es de

26.2 °C; está sujeto a la influencia de los vientos alisios del este y del noreste; en el verano y otoño la influencia proviene de los ciclones tropicales y en el invierno de los “Nortes”; siendo los huracanes, las tormentas y los “Nortes” quienes tienen mayores repercusiones sobre la costa.

La geología está conformada por sedimentos de origen calcáreo que le da su carácter cárstico y es en el sector sur – suroeste donde se concentra el mayor número de corrientes superficiales, pertenecientes a las cuencas Grijalva- Usumacinta, Palizada, Candelaria, Chumpán, Mamantel y Champotón; siendo la laguna de Términos y el conjunto de lagunas satélites que la rodea el sistema lagunar más importante del país.

El estado pertenece a dos regiones: la Costa Centro Sur y la Costa Noroccidental de la Península de Yucatán. La primera colinda con Tabasco e incluye los principales sistemas deltaicos y estuarinos; aquí, la línea de costa es baja y arenosa con islas de barrera formadas por la sucesión continua de cordones de playa producto de sedimentos transportados por la acción de las corrientes de deriva costera y que flanquearon el frente de las planicies deltaicas. En la segunda región la costa se orienta con rumbo norte – sur y está formada por rocas calizas con ausencia de drenaje superficial.

Las dunas frontales del estado se ubican en los municipios del Carmen y Champotón, mientras que las planicies de dunas frontales se encuentran en los municipios de Calkiní, Carmen y Champotón (López Rosas et al., 2014). Con respecto al tipo de arena pueden identificarse principalmente dos tipos: de origen terrígeno y carbonatadas; las primeras se encuentran en la frontera con Tabasco y hasta la zona de Zacatal, mientras que las segundas se ubican en el resto de la franja costera con duna o planicie arenosa.

A pesar de que las dunas del estado pueden considerarse como estabilizadas, la mayoría se encuentran en mal estado de conservación, lo que reduce su capacidad para proporcionar servicios ambientales, esto se debe a las actividades que en ella se desarrollan como asentamientos humanos, actividades productivas y turísticas. Por último, en el estado podemos identificar 3 áreas de importancia eco – biológica: El Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, la Reserva de la Biosfera Los Petenes y la Reserva de la Biosfera Ría Celestún.

A pesar de todas estas características físicas, naturales, ecológicas y biológicas el litoral presenta zonas con degradación y erosión. Aquí se considera la intervención humana como el principal factor de degradación del litoral del estado seguido de los fenómenos naturales extremos.

La zona norte del estado presenta un grado mejor de conservación debido al tipo de suelo y elevaciones que presenta el terreno, así como el tipo de vegetación predominante: manglar, lo que ha generado una menor urbanización y/o intervención antrópica en comparación con el sur y centro del estado. Hacia el centro del estado el suelo de tipo rocoso y la ausencia de material arenoso no impide asentamientos urbanos y el desarrollo portuario del estado. Es el sector sur del estado que presenta una mayor degradación y es hacia esta zona donde se centra la siguiente descripción.

Las dunas frontales del sur reciben constante aportación de material terrígeno proveniente de la cuenca Grijalva – Usumacinta, esta zona ha experimentado modificaciones debido a las actividades agropecuarias en la zona, generando una fragmentación de los bosques de manglar y otros humedales; por otro lado, las dunas han sido ocupadas por urbanizaciones como Ciudad del Carmen e Isla Aguada que en las últimas décadas han experimentado un crecimiento descontrolado y sobre ellas se ha construido una carretera costera que se extiende paralela al litoral y ha generado puntos

de asentamientos y desarrollos turísticos. El principal desarrollo urbano es la ciudad de San Francisco de Campeche, seguido de Ciudad del Carmen y Champotón, existiendo otros asentamientos que han resaltado en años recientes como: Seybaplaya, Sabancuy, Isla Aguada, Isla Arena y Siho Playa.

Al generar una degradación en las dunas frontales e interrumpir el ciclo sedimentario se provoca que se fragmente el sistema y por lo tanto una baja o nula recuperación de las dunas resultando en un proceso de erosión que amenaza los asentamientos y desarrollos turísticos. Con el intento de contrarrestar los procesos erosivos se han colocado espigones y otras estructuras de protección costera sin una planeación y/o diseños pertinentes, como se observa en la Figura 13, en la que se presenta la ubicación de los proyectos relacionados a la construcción de estructuras de protección costera que han sido evaluados mediante Manifestaciones de Impacto Ambiental, y sometidos a evaluación ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para el periodo 2003- 2012 (Ver Sección 5.3).

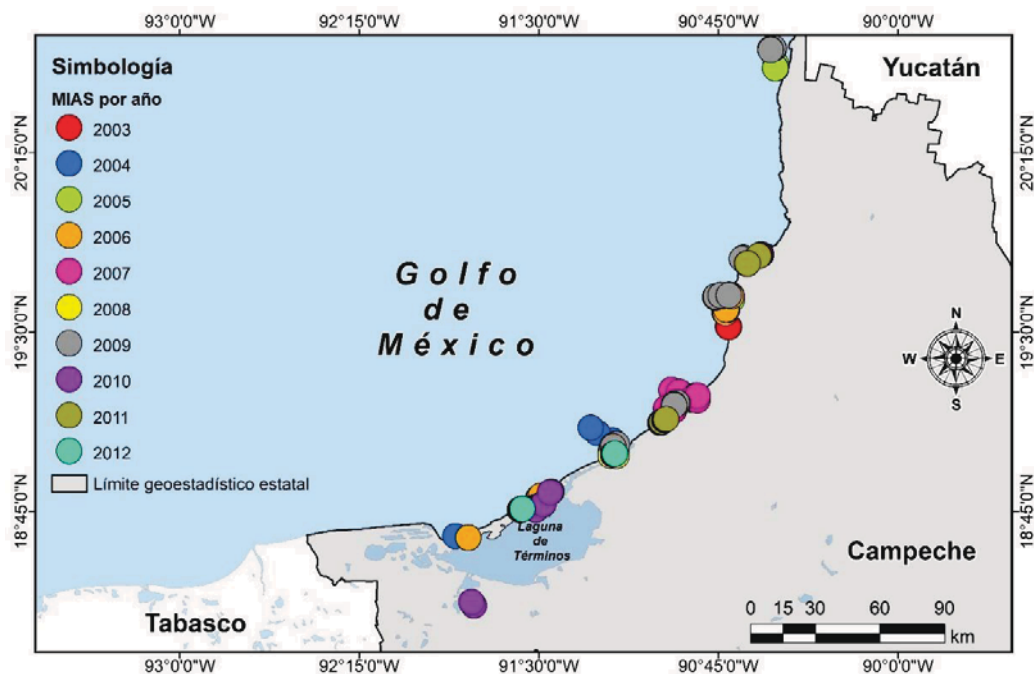


Figura 13. Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIAS) sometidas ante la SEMARNAT para el periodo 2003 – 2012 de proyectos de construcción de obras de protección costera.

Los cambios en la red hidrográfica generan una disminución de los aportes de material sedimentario por parte de los ríos; esta condición anula la morfogénesis de los cordones costeros y evita su crecimiento, se erosionan y la línea de costa retrocede.

Esta disminución de sedimentos genera condiciones lénticas dominadas por la acumulación de los sedimentos y una reducción de la vegetación riparia¹⁵, por lo que la cuenca sedimentaria permite la

¹⁵ La vegetación inmediatamente adyacente a los arroyos o a lo largo de los bordes de los lagos y charcos, se caracteriza por especies vegetales y formas de vida que difieren de aquéllas de los bosques circundantes.

acumulación de un amplio espesor de sedimentos que propicia la subsidencia continua, un hundimiento progresivo del terreno que altera el balance de energía y materia del geosistema. El proceso de subsidencia influye en una mayor frecuencia de inundaciones, problemas de sedimentación y azolves, mayor penetración de la cuña salina, incremento de la salinización de los suelos, destrucción de playas por erosión, removilización de dunas y retroceso de la línea de costa.

Por otro lado, se ha reportado un aumento en la frecuencia e intensidad de los vientos a partir de los años sesenta (Jáuregui, 1975) y la invasión de aire polar “Nortes” guarda una relación de comportamiento cíclico (máximos en las décadas 20s y 30s, decaimiento en la década de los 40s y nuevamente máximos en la década de los 60s con valores iguales al de los 20s – 30s).

El oleaje erosivo que trae consigo los “Nortes”, inciden con dirección NW transportando sedimentos a lo largo de las costas hacia el oriente. La deriva litoral entonces se dirige hacia el oriente mientras perdura el corto tiempo de la tormenta del Norte. La mayor parte del año prevalecen las olas de baja altura y de energía baja, que serán normalmente de naturaleza constructiva, es decir, el arribo de este oleaje se traducirá en un depósito y extensión de playa, tanto en amplitud horizontal como longitudinalmente; por tanto, la variación estacional del oleaje marca las fluctuaciones de avance o retroceso de la línea de costa.

Hacia la década de los 60s se construyó la carretera federal 180 sobre la duna costera y paralela a la línea de costa, generando un retroceso de playa; sin embargo, a lo largo de los años el proceso erosivo disminuyó en velocidad debido al control que ejerció la estructura, concretamente al terraplén y la carpeta asfáltica generando un nuevo punto de “equilibrio”.

Resumiendo lo anterior, se puede establecer que los problemas costeros que se presentan en el litoral de Campeche se deben a una serie de factores antrópicos que en combinación con factores físicos naturales incrementan los procesos erosivos:

1. Disminución de la descarga de sedimentos debido a actividades antrópicas como represamiento, por ejemplo, en la cuenca del Usumacinta, que genera una subsidencia y con ello un retroceso de línea de costa.
2. Modificación y degradación de los cordones y dunas costeras debido al cambio en el uso de suelo y urbanización de la costa.
3. Construcción de la Carretera Federal 180 sobre la duna costera que fragmentó el sistema e impidió la recuperación natural de la duna.
4. Incremento de la energía del oleaje por la presencia de los “Nortes” como lo señala Appendini et al (2018) y su comportamiento cíclico.
5. Y la extracción de material sedimentario del sistema como el proyecto de extracción de arena frente a playa Norte (MIA - 04CA2016UD046, 2016), que generan un déficit sedimentario y; la construcción y colocación a priori de estructuras de protección sin un diseño adecuado como la construcción de rompeolas en Ciudad del Carmen (MIA - 04CA2015UD072, 2015), por mencionar algunos proyectos.

3

Propiedades físicas de los sedimentos de la costa del estado de Campeche

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento de la línea de costa debe involucrar el estudio de los sedimentos de la zona; partiendo de que la configuración de la costa se debe al transporte de sedimento, siendo éste el que configura la forma en planta, longitudinal y transversal de la playa.

Por lo anterior es importante conocer las características de los sedimentos, por ello, en Campeche se analizaron 258 muestras de arena recolectadas a lo largo de 10 playas. A partir de los resultados obtenidos se elaboró una zonificación espacial de los principales parámetros físicos del sedimento.

El procedimiento de análisis y los resultados de la caracterización de cada una de las muestras pueden ser consultados en los Anexos I y II.

3.2 TRABAJO DE CAMPO

Se recolectaron 258 diferentes muestras de campo en 10 playas a lo largo del litoral del estado de Campeche (Figura 14). Debido a las condiciones geomorfológicas del litoral campechano, se optó por recolectar sedimentos en las zonas (playas) con interés turístico, desarrollo urbano y/o presencia de arena.

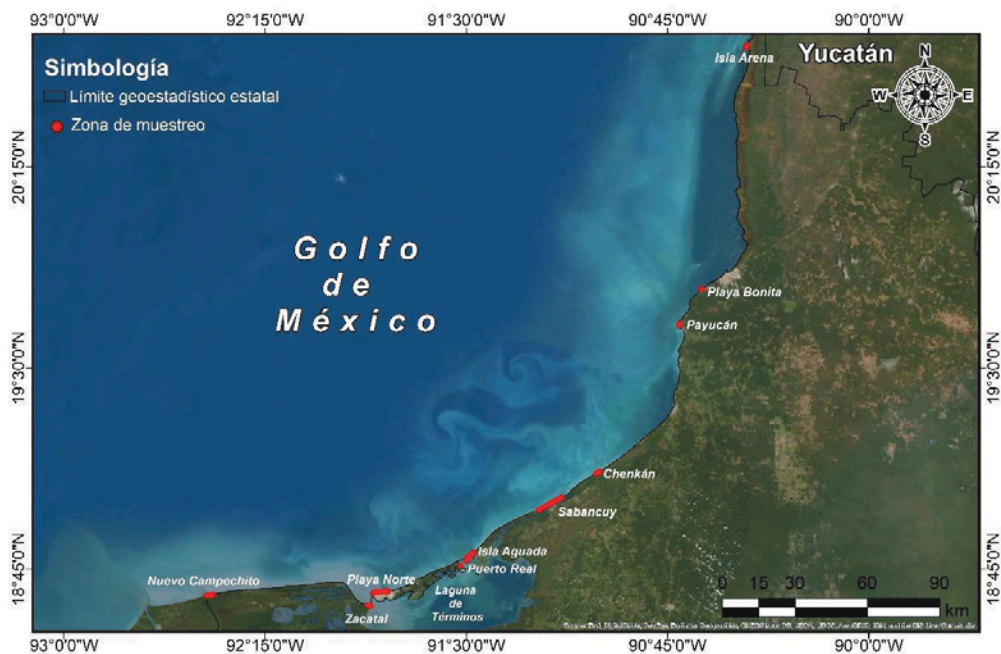


Figura 14. Playas muestreadas a lo largo del litoral campechano.

Ya que el movimiento del material sedimentario exhibido en una playa puede considerarse como intrincado, al analizar el sentido de aproximación o alejamiento de la costa con respecto a las zonas en que se produce y la dirección trasversal o longitudinal del litoral, es posible efectuar conclusiones acerca del estado de equilibrio que guarda la línea de costa; por lo que comprender los movimientos del sedimento en las diferentes zonas que forma el perfil transversal de la playa es de relevancia. En cada una de las playas se recolectaron muestras en 3 zonas de la playa, denominadas para su fácil identificación: a) duna, que corresponde a la playa seca; b) lavado y; c) sumergida, que es la playa sumergida a una profundidad de entre -1 m a -1.5 m.

En cada sitio de muestreo se extrajo aproximadamente 1 kg de material, este se obtuvo de manera superficial.

A continuación, se presenta una breve reseña del muestreo realizado en cada zona, donde se señala fecha de muestro, el número de muestras extraídas y su ubicación en un mapa.

- **Isla Arena**

Fecha: 24 de noviembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida. Para un total de 21 muestras.

Observaciones: En la zona norte es una playa con lodos y hacia el sur se presenta playa arenosa

Imagen de localización:



Figura 15. Estaciones de muestreo en Isla Arena.

- **Playa Bonita**

Fecha: 07 de noviembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado, y sumergida.

Observaciones: Es un balneario con playa arenosa, con alta intervención antrópica, que en tiempos recientes ha tenido rellenos artificiales de arena.

Imagen de localización:



Figura 16. Estaciones de muestreo en Playa Bonita.

- Payucán

Fecha: 10 de noviembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado, y sumergida.

Observaciones: En la zona norte se presenta una playa de arena y hacia el sur una playa de gravas. Esta playa se encuentra entre el Refugio Pesquero Seybaplaya (norte) y el Puerto Seybaplaya (sur).

Imagen de localización:



Figura 17. Estaciones de muestreo en Payucán.

- Chenkán

Fecha: 15 de noviembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado, y sumergida.

Observaciones: Es una playa de arena con zona de anidación de tortugas

Imagen de localización:

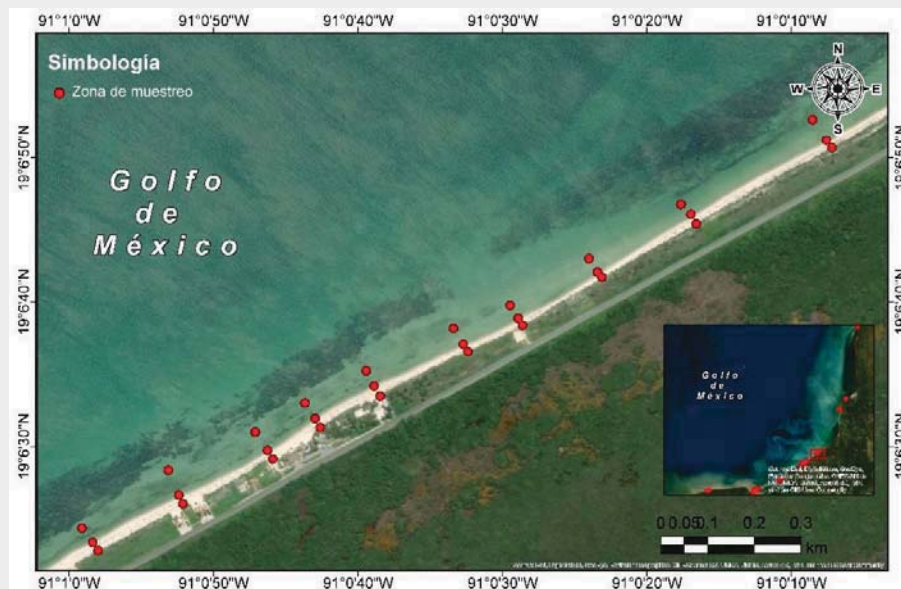


Figura 18. Estaciones de muestreo en Chenkán.

- Sabancuy

Fecha: 29 de noviembre y 01 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida.

Observaciones: La playa antes de la boca presenta zonas de acreción mientras que la playa posterior a la boca, es una playa de arena con fuerte erosión y presencia de estructuras costeras

Imagen de localización:



Figura 19. Estaciones de muestreo en Sabancuy.

- Isla Aguada

Fecha: 06 y 09 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida.

Observaciones: Es una playa de arena que presenta un ancho de zona seca con pendiente suave. La medición del 09 se realizó durante “Norte”.

Imagen de localización:



Figura 20. Estaciones de muestreo en Isla Aguada.

- Puerto Real

Fecha: 09 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 1 zonas de perfil: lavado

Observaciones: Se midió durante norte. Playa de arena con presencia de estructuras costeras

Imagen de localización:



Figura 21. Estaciones de muestreo en Puerto Real.

- **Playa Norte**

Fecha: 07 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida.

Observaciones: Es una playa de arena con zonas de acreción; la pendiente del perfil es suave

Imagen de localización:



Figura 22. Estaciones de muestreo en Playa Norte.

- **Zacatal**

Fecha: 07 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida.

Observaciones: Es una playa de arena con erosión hacia el oeste y cuenta con zonas de manglar

Imagen de localización:



Figura 23. Estaciones de muestreo en Zacatal.

- Nuevo Campechito

Fecha: 08 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 3 zonas de perfil: duna, lavado y sumergida.

Observaciones: Se midió durante norte. Es una playa de arena oscura con fuerte erosión

Imagen de localización:



Figura 24. Estaciones de muestreo en Nuevo Campechito.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS

3.3.1 Parámetros estadísticos de la muestra

Previo al análisis de las características físicas y granulométricas de los sedimentos fue necesario retirar humedad en la muestra de sedimentos (ANEXO I).

A partir de la metodología de Folk & Ward (1957) se obtuvieron los parámetros estadísticos de las muestras analizadas. De la curva granulométrica, se convirtieron los diámetros nominales de interés (en este caso, d_5 , d_{10} , d_{16} , d_{25} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{75} , d_{84} , d_{90} y d_{95}) con unidades en milímetros a unidades Phi.

3.3.2 Tamaño y forma de los granos del sedimento

El factor de forma del sedimento (CSF) es relevante, ya que principalmente influye en el contorno del fondo marino donde se deposita el sedimento (Ruíz-Martínez, 2009), el ángulo de reposo se encuentra en función de la forma del sedimento (Soulsby, 1997), la velocidad de caída depende directamente del coeficiente de arrastre de la partícula y este en último, se considera el efecto de la forma y redondez del sedimento en el fluido (Dietrich, 1982; Gibbs et al., 1971).

La forma sirve para descifrar la historia de un depósito involucra la esfericidad y redondez. Por lo que para los alcances de este estudio se define esfericidad como la medida del grado al que se aproxima una partícula a la forma de una esfera, definiendo así el comportamiento dinámico de la partícula; mientras que la redondez es el grado de curvatura que presenta las aristas de la partícula, depende del tamaño y la resistencia mecánica de los granos y en general aumenta con el transporte. Autores como Powers (1953) han propuesto un comparador visual para clasificar la redondez en arenas y su relación con la esfericidad. Para este estudio las características de redondez, esfericidad y factor de forma se obtienen de forma directa a través del software del equipo CAMSIZER (ANEXO I).

3.4 CLASIFICACIÓN Y AGRUPACIÓN DE RESULTADOS

Una vez que se obtuvieron las características de los sedimentos de todas las muestras (ver ANEXO II); se procedió a clasificarlas en categorías. Se agruparon en tres clases los datos: la zona de duna, zona de lavado y la zona sumergida.

3.4.1 Zona de duna

Media

Isla Arena es la única playa que presenta arena gruesa; por el contrario, Nuevo Campechito es la única playa que presenta arena fina; mientras que el resto de las playas son dominadas por arena media en el área de duna. Estos valores refuerzan la idea de que el transporte sedimentario regional del sedimento es de norte a sur (Figura 25a).

Asimetría

Para el parámetro de asimetría todas las playas pueden ser clasificadas como casi simétricas, indicando que el tamaño de las partículas es casi la misma para toda la muestra; sin embargo, Playa Bonita, Sabancuy y Nuevo Campechito tienen una inclinación hacia partículas ligeramente más

gruesas que el conjunto. Sólo la playa de Zacatal presenta una asimetría positiva que indicaría una predominancia de sedimentos más pequeños (finos) (Figura 25b).

Desviación estándar

Esta es una medida de la dispersión, aquí todas las playas son clasificadas dentro del rango de muy bien graduadas, lo que indica una homogeneidad en las partículas, siendo Playa Bonita y Playa Norte las que presentan los valores más bajos, es decir una muy fuerte homogeneidad (Figura 25c).

Curtosis

Es la medida cuantitativa utilizada para describir la desviación de la normalidad. Se la porción central está mejor ordenada que las colas, se dice que la curva tiene un pico excesivo o leptocúrtico; si las colas están mejor ordenadas que la porción central, la curva es deficiente o de pico plano y platicúrtica. Para la zona de duna, Playa Bonita presenta una clasificación Platicúrtica: mientras que el resto de las playas pueden ser clasificadas como mesocúrticas (Figura 25d).

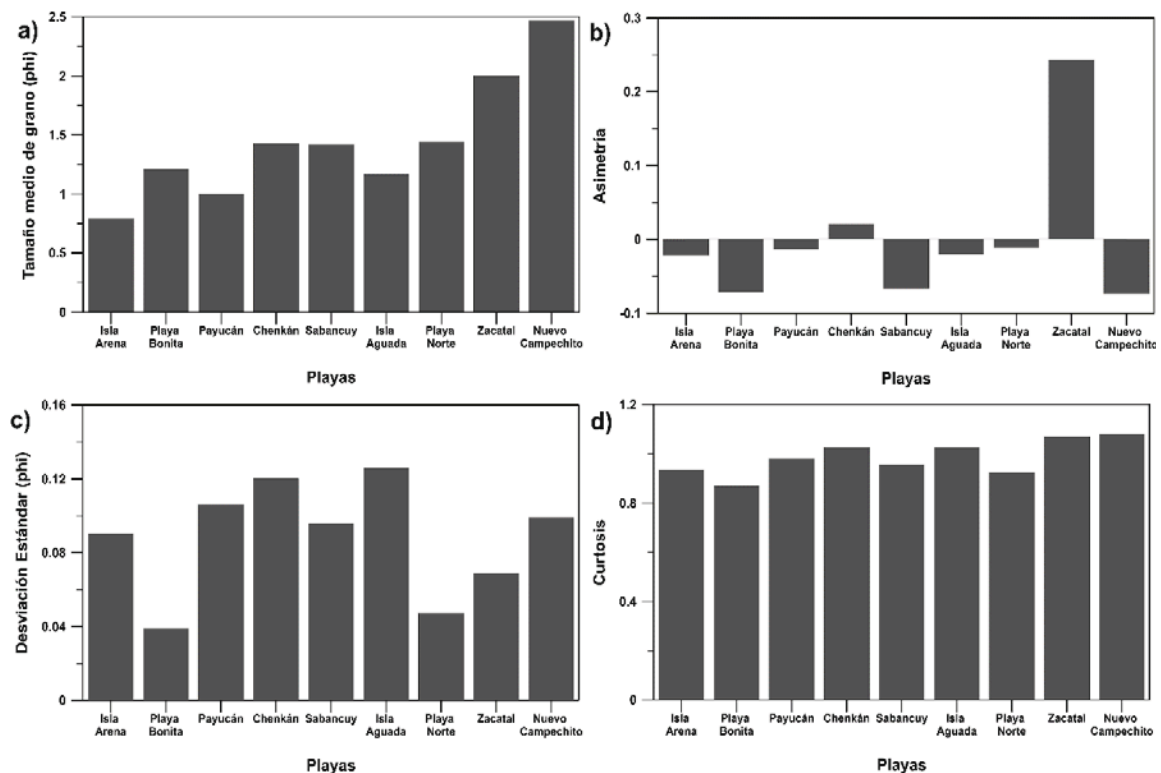


Figura 25. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de duna. a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.

Gráficos bivariados

La Figura 26a muestra que los sedimentos de la zona de duna tienen predominancia por las arenas medias y muy bien clasificadas, las arenas de Isla Arena se inclinan por arena gruesa mientras que las de Nuevo Campechito y Zacatal por arenas finas. La relación entre el tamaño medio del grano y la desviación estándar revela que los sedimentos que llegan a las playas son transportadas y seleccionadas por las corrientes litorales y las olas, sugiriendo que el sedimento se transporta de

norte a sur. La Figura 26b muestra la relación entre el tamaño medio de la arena y la asimetría, el gráfico muestra una distribución casi homogénea del tamaño de las partículas. En la Figura 26c se presenta la relación entre el tamaño medio de grano y el cuarto momento (curtosis), el gráfico muestra que la mayoría de los sedimentos se clasifican como mesocúrticos con excepción de los sedimentos de Playa Norte que se consideran como platocúrticos, en el primer caso la arena está en proceso de maduración y en el segundo las arenas pueden considerarse como maduras. Finalmente, la Figura 26d compara la asimetría con la desviación estándar y revela que las partículas de las arenas son muy homogéneas y que las arenas de las playas del sur tienden hacia finos.

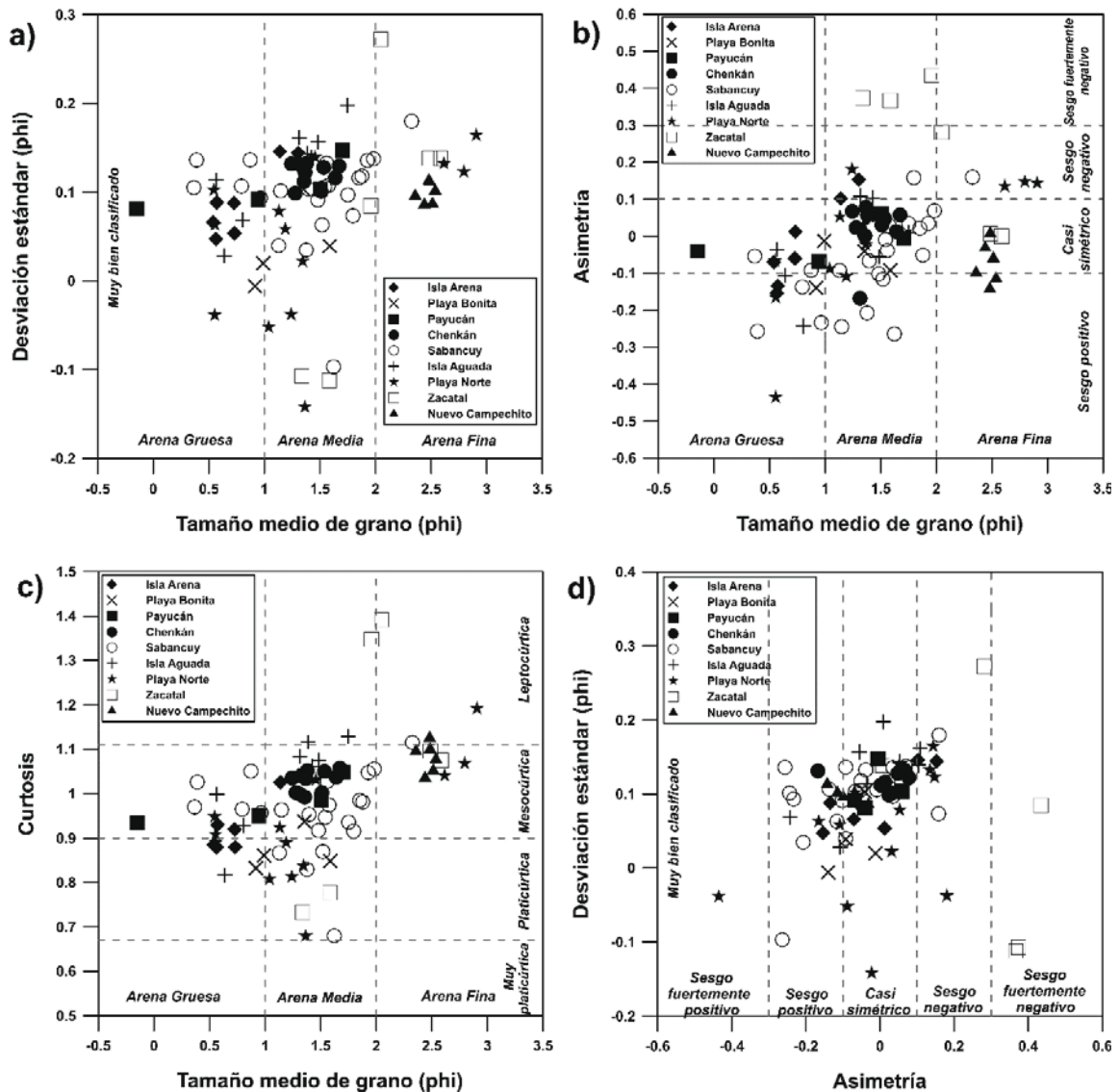


Figura 26. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.

Mecanismos y ambientes de sedimentación

La Figura 27, presenta el análisis de la función discriminante de los ambientes de sedimentación; para establecer si los sedimentos han sido almacenados por la acción del viento o procesos costeros, en la Figura 27a se observa que son los procesos costeros los que dominan el proceso de sedimentación, sólo algunas muestras de Playa Norte, Zacatal y Nuevo Campechito tienen una influencia del viento en la deposición de las partículas. Para identificar si los sedimentos corresponden a un río o medio marino, se presenta el análisis de la Figura 27b, donde se observa que los sedimentos de Zacatal, Playa Norte, Isla Arena y algunos de Sabancuy tienen un origen terrígeno, sin embargo, el ambiente de depósito predominante es marino y los procesos costeros son los responsables del depósito.

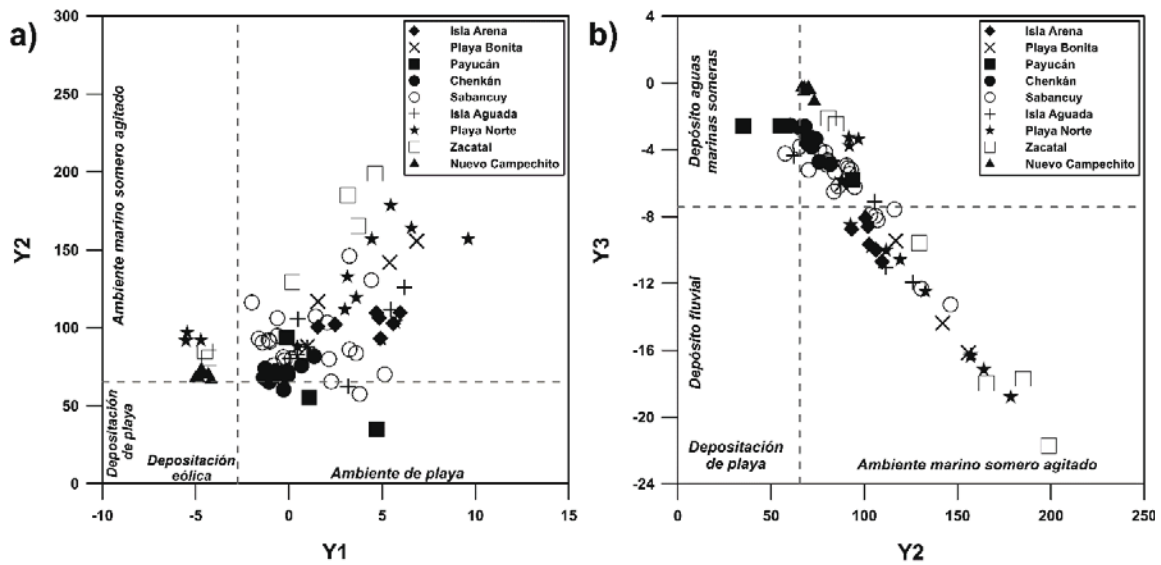


Figura 27. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.

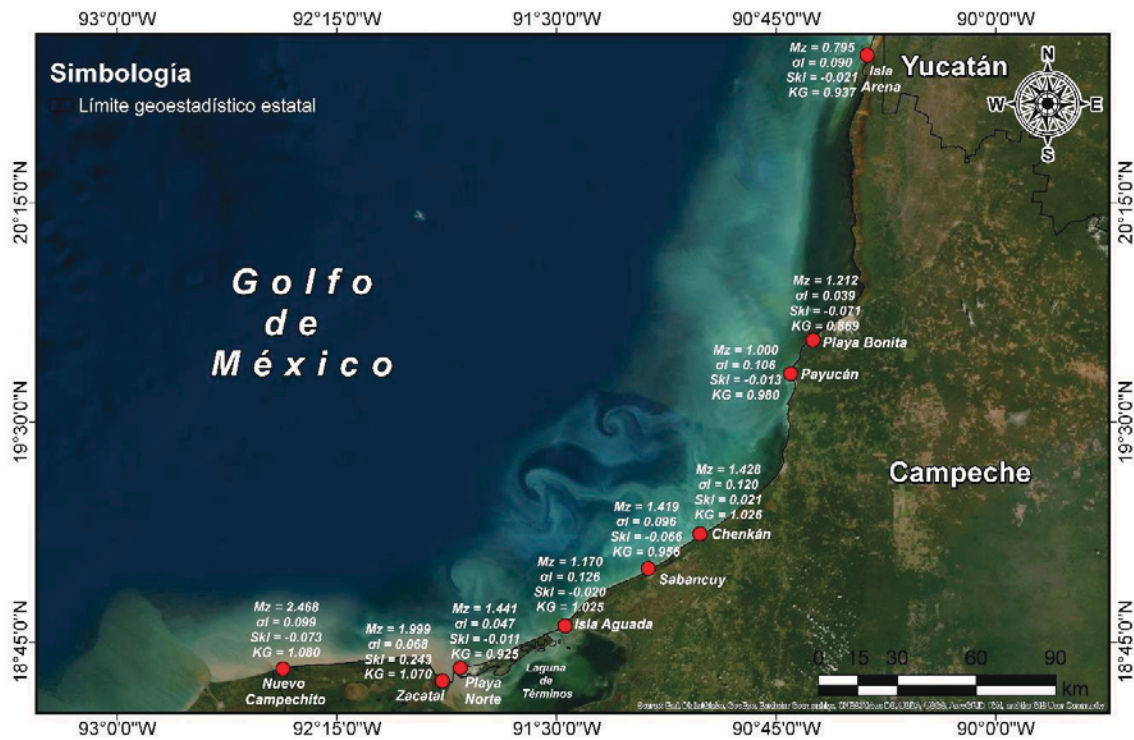


Figura 28. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona de Duna.

En la Figura 28 se presentan los valores de los momentos promedio calculados para cada playa muestreada.

3.4.2 Zona de lavado

Media

La playa Puerto Real es la única que presenta sedimento muy grueso; en las playas Isla Arena e Isla Aguada hay dominancia de arenas gruesas; mientras que las playas Playa Bonita, Payucán, Chenkán, Sabancuy y Zacatal son dominadas por arenas clasificadas como medias y en Nuevo Campechito la dominancia es de arenas finas (Figura 29a).

Asimetría

Para el parámetro de asimetría, Zacatal se clasifica con una asimetría negativa; las playas Sabancuy, Playa Norte y Nuevo Campechito son clasificadas como casi simétricas; mientras que las playas Isla Arena, Playa Bonita, Payucán, Chenkán, Isla Aguada y Puerto Real son clasificadas con una asimetría gruesa o positiva (Figura 29b).

Desviación estándar

En el parámetro de desviación estándar todas las playas son clasificadas como muy bien graduadas, indicando que el tamaño de las partículas es casi la misma para toda la muestra en cada playa; sin embargo, Puerto Real es la playa que tiene una mayor inclinación hacia partículas más gruesas que

el conjunto. Caso contrario a Zacatal, que es la playa que tiene inclinación por unas partículas más finas (asimetría con valor positivo) (Figura 29c).

Curtosis

En lo referente a la curtosis, Puerto Real es clasificada como leptocúrtico; las playas Chenkán, Sabancuy, Isla Aguada, Playa Norte, Zacatal y Nuevo Campechito se clasifican como mesocúrticas y las playas Isla Arena, Playa Bonita y Payucán como platocúrticos (Figura 29d).

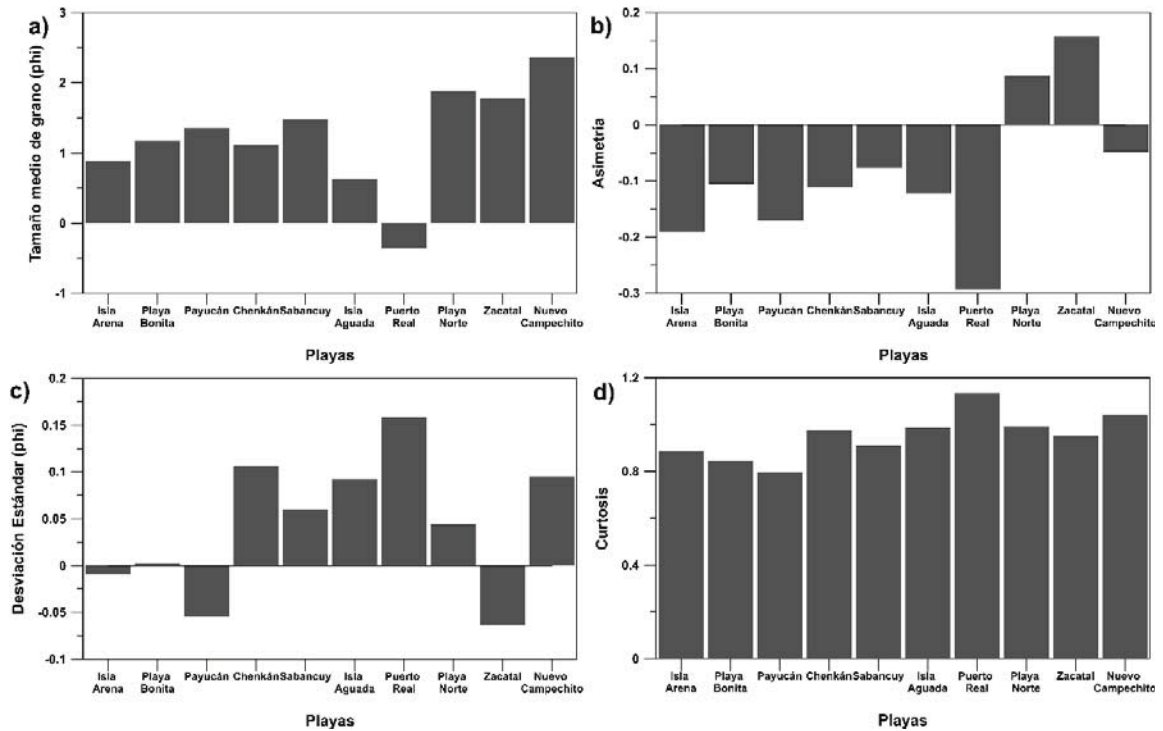


Figura 29. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de lavado, a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.

Gráficos bivariados

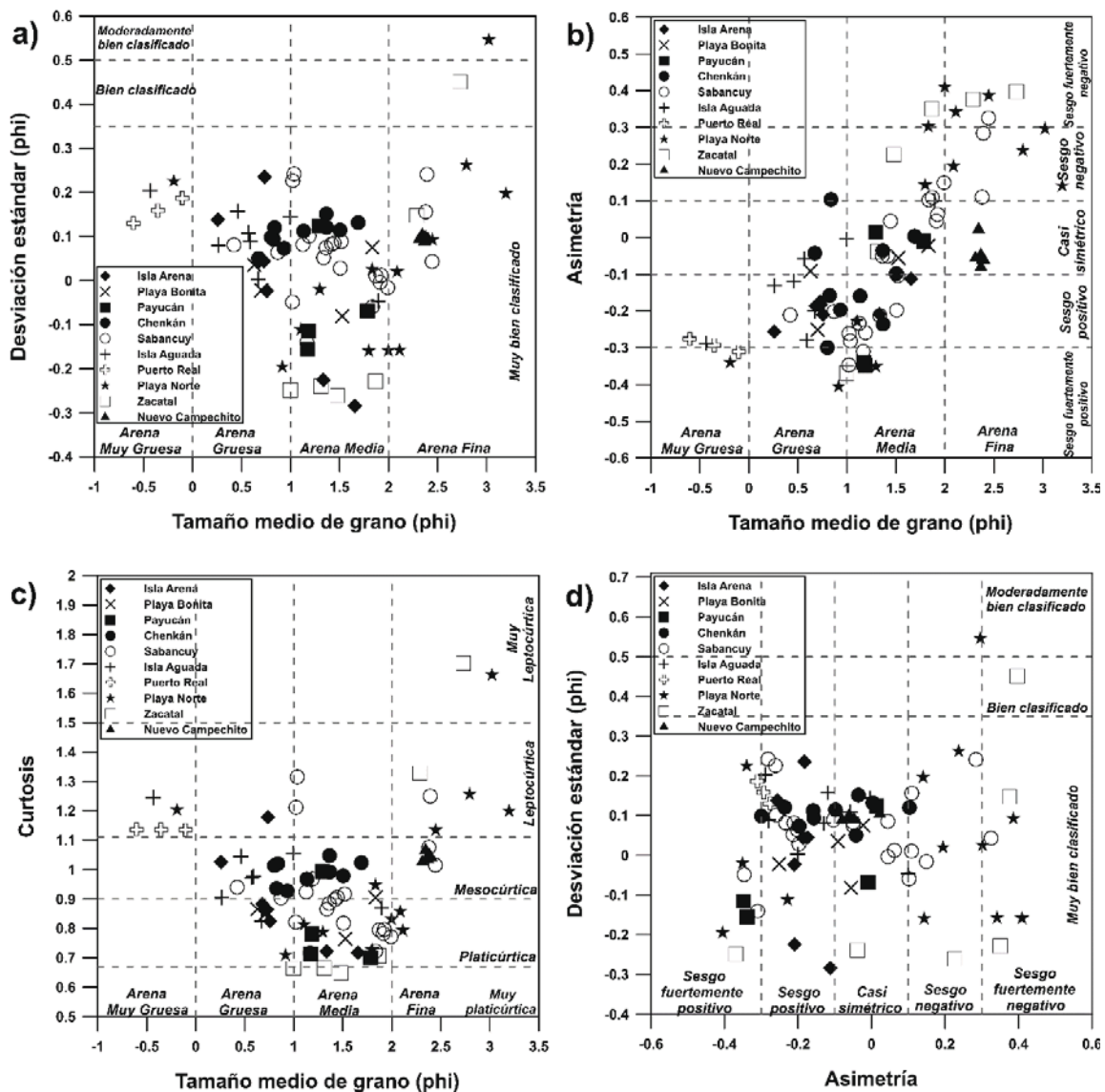


Figura 30. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.

La Figura 30a muestra que los sedimentos de la zona de lavado tienen predominancia por las arenas medias - gruesas y muy bien clasificadas, las arenas de Puerto Real se inclinan por arena muy gruesa mientras que las de Nuevo Campechito por arenas finas, las arenas de Sabancuy tienen transición de arenas gruesas a arenas finas. La relación entre el tamaño medio del grano y la desviación estándar revela que los sedimentos que llegan a las playas son transportadas y seleccionadas por las corrientes litorales y las olas. La Figura 30b muestra la relación entre el tamaño medio de la arena y la asimetría, el gráfico indica que la mayoría de los sedimentos poseen partículas gruesas y las muestras de Playa Norte poseen un exceso partículas gruesas comparados con la distribución normal. La Figura 30c muestra la relación entre el tamaño medio de grano y el cuarto momento (curtosis), el gráfico muestra que la mayoría de los sedimentos se clasifican dentro de los rangos platicúrticos a mesocúrticos con excepción de los sedimentos de Puerto Real que se consideran

como leptocúrticos, los primeros presentan una mejor clasificación de la población, mientras que los segundos la clasificación es pobre. Finalmente, la Figura 30d compara la asimetría con la desviación estándar y revela que las partículas de las arenas son muy homogéneas y que las arenas de las playas tienden a los gruesos.

Mecanismos y ambientes de sedimentación

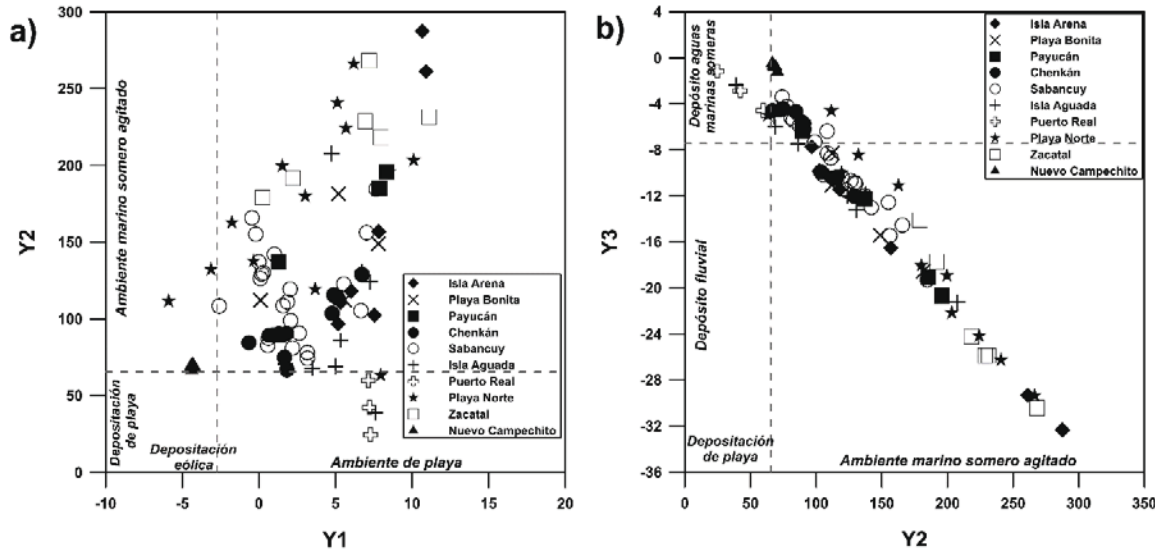


Figura 31. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.

La Figura 31, presenta el análisis de la función discriminante de los ambientes de sedimentación; para establecer si los sedimentos han sido almacenados por la acción del viento o procesos costeros, en la Figura 31a se observa que son los procesos costeros los que dominan el proceso de sedimentación, sólo algunas muestras de Playa Norte y Nuevo Campechito tienen una influencia del viento en la deposición de las partículas. Para identificar si los sedimentos corresponden a un río o medio marino, se presenta el análisis de la Figura 31b, donde se observa que los sedimentos de Zacatal, Playa Norte, Isla Arena y algunos de Sabancuy tienen un origen terrígeno, sin embargo, el ambiente de depósito predominante es marino y los procesos costeros son los responsables del depósito.

En la Figura 32, se presentan los valores de los momentos promedio calculados para cada playa muestreada.

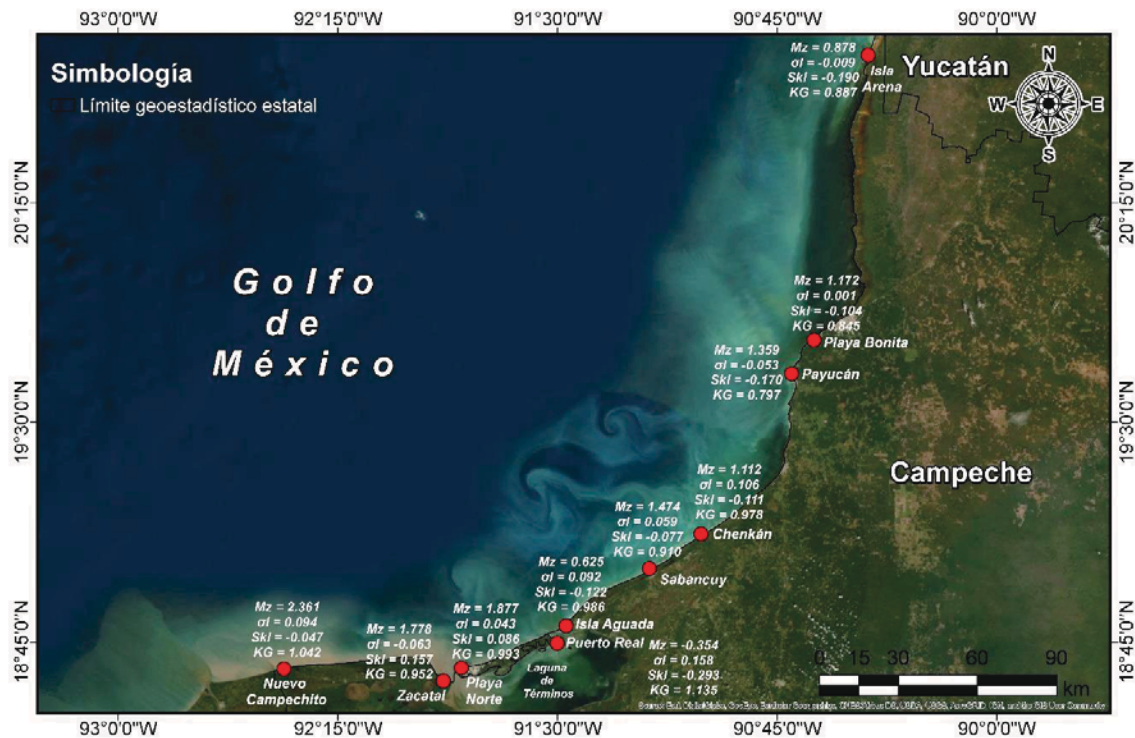


Figura 32. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona de Lavado.

3.4.3 Zona sumergida

Media

Las playas Isla Arena, Chenkán e Isla Aguada son clasificadas con arena de tipo medio; mientras que en el resto de las playas domina la arena fina. Las arenas de las playas Payucán, Sabancuy y Playa Norte son más finas que las de las playas de Isla Arena y Chenkán (Figura 33a).

Asimetría

Las playas de Sabancuy, Playa Norte y Zacatal se clasifican con una asimetría negativa, mientras que las playas restantes se clasifican en el grupo de casi simétricas. Nuevo Campechito es la única playa que presenta un valor numérico negativo en la asimetría (Figura 33b).

Desviación estándar

Todas las playas se clasifican como muy bien graduadas lo que implica que las partículas que forman el sedimento tienden a la homogeneidad (Figura 33c).

Curtosis

En esta medida, las playas de Isla Arena, Chenkán, Sabancuy y Nuevo Campechito pertenecen a la misma clasificación, mesocúrticas; mientras que el resto de las playas presentan una clasificación leptocúrtica (Figura 33d).

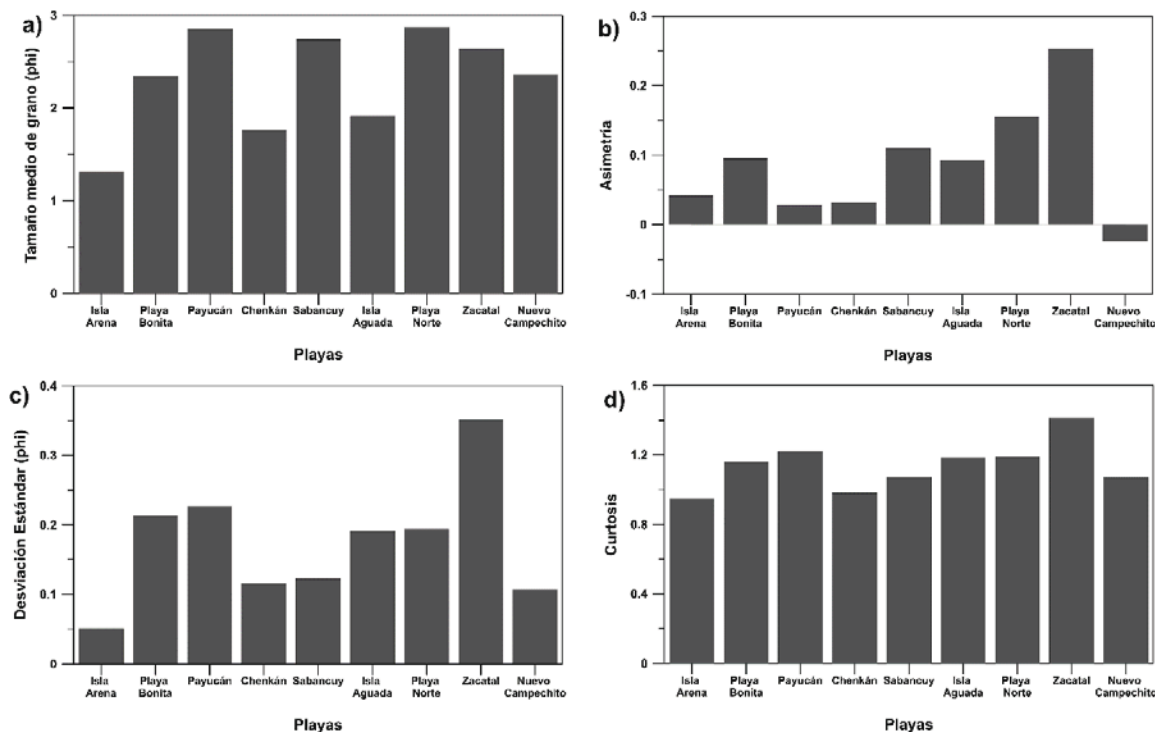


Figura 33. Valores promedio para los parámetros estadísticos del sedimento. Zona de duna. a) Tamaño medio de grano, b) Asimetría, c) Desviación estándar, d) Curtosis.

Gráficos bivariados

La Figura 34a muestra que los sedimentos de la zona sumergida presentan una transición de arenas medias a arenas muy finas y que se encuentran muy bien clasificadas, las arenas de Isla Arena, Chenkán e Isla Aguada se inclinan por arena media mientras que las de Playa Norte y Sabancuy por arenas finas. La relación entre el tamaño medio del grano y la desviación estándar revela que los sedimentos que llegan a las playas son transportadas y seleccionadas por las corrientes litorales y las olas. La Figura 34b muestra la relación entre el tamaño medio de la arena y la asimetría, el gráfico indica una distribución casi homogénea del tamaño de las partículas, con excepción de las arenas de Sabancuy y Playa Norte que presentan partículas gruesas en comparación con la distribución normal. La Figura 34c muestra la relación entre el tamaño medio de grano y el cuarto momento (curtosis), el gráfico muestra que la mayoría de los sedimentos se clasifican como mesocúrticos con excepción de los sedimentos de Playa Bonita, Isla Aguada, Zacatal y Playa Norte que se consideran como leptocúrticos. Finalmente, la Figura 34d compara la asimetría con la desviación estándar y revela que las partículas de las arenas son muy homogéneas y que las arenas de las playas tienden hacia finos.

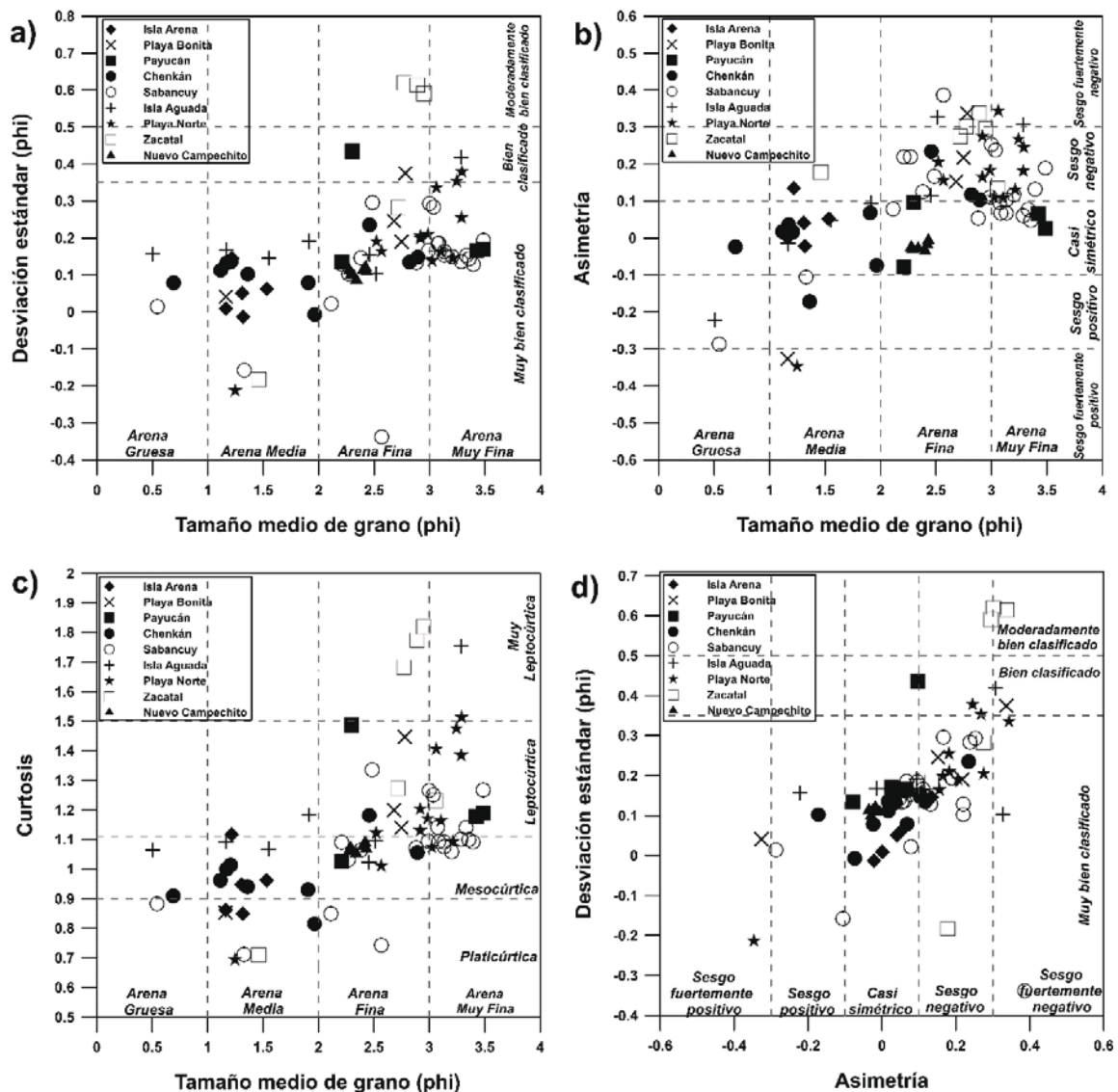


Figura 34. Gráficos que muestran la relación bivalente entre: a) Tamaño medio y Desviación estándar, b) Tamaño medio y Asimetría, c) Tamaño medio y Curtosis, d) Asimetría y Desviación estándar.

Mecanismos y ambientes de sedimentación

La Figura 35, presenta el análisis de la función discriminante de los ambientes de sedimentación; para establecer si los sedimentos han sido almacenados por la acción del viento o procesos costeros, en la Figura 35a se observa que son los procesos costeros los que dominan el proceso de sedimentación. Para identificar si los sedimentos corresponden a un río o medio marino, se presenta el análisis de la Figura 35b, donde se observa que los sedimentos de Zacatal, Playa Norte, Isla Arena y algunos de Sabancuy y Chenkán tienen un origen terrígeno, sin embargo, el ambiente de depósito predominante es marino y los procesos costeros son los responsables del depósito.

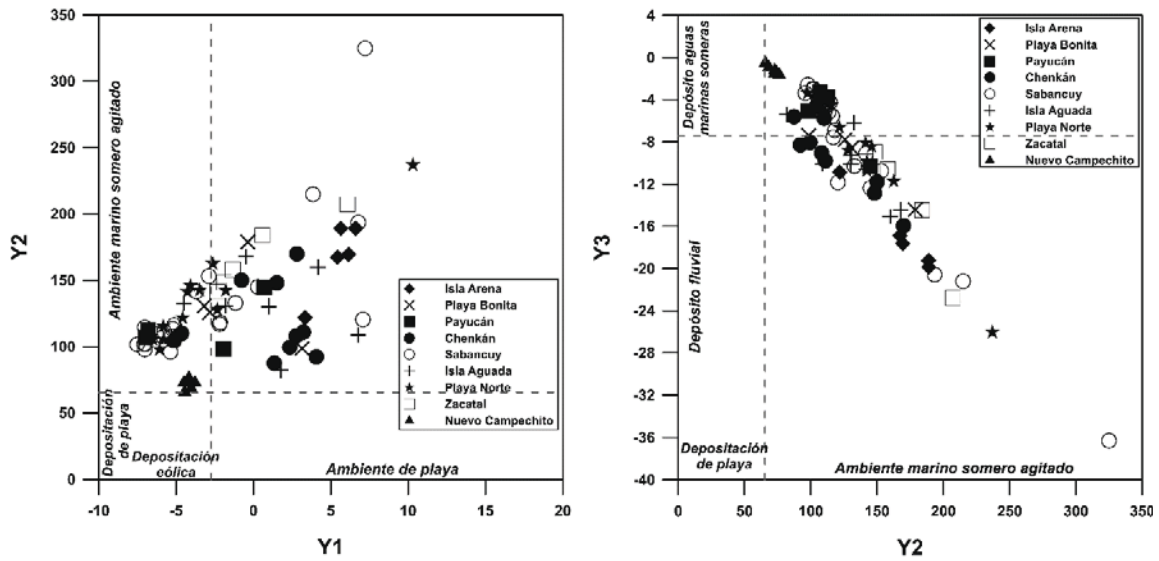


Figura 35. Relación entre las funciones discriminantes a) Y1 y Y2, b) Y2 y Y3, que muestran los entornos estimados.

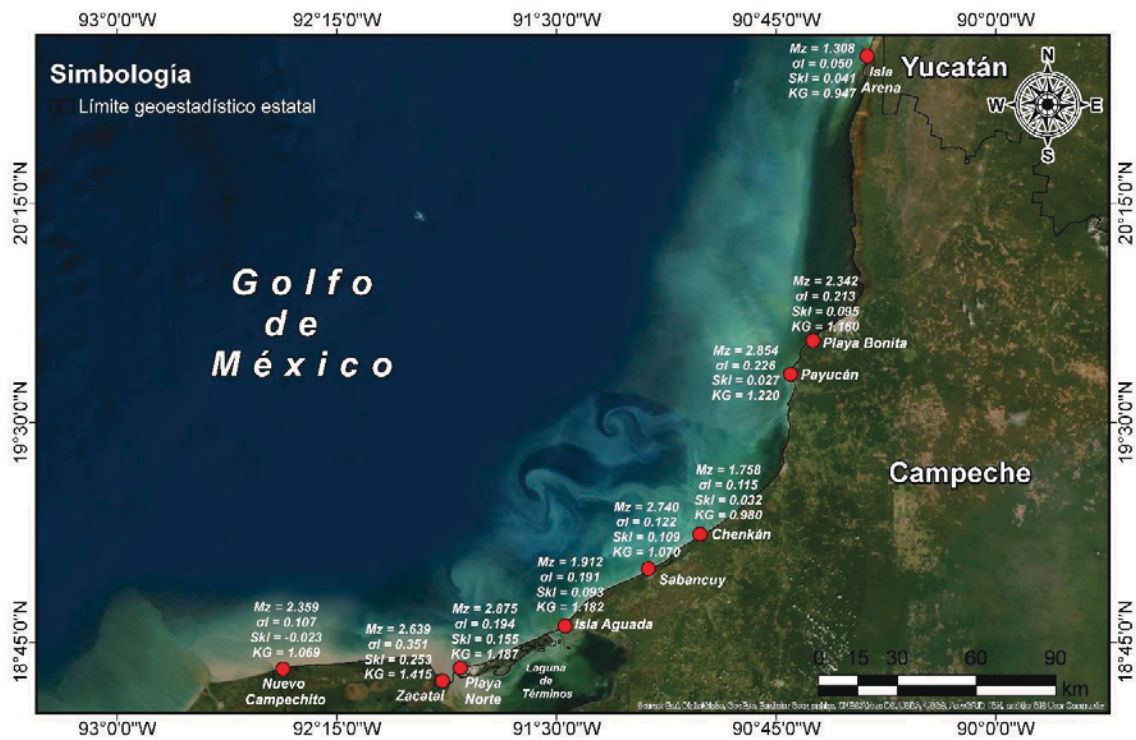


Figura 36. Parámetros estadísticos del sedimento para la zona Sumergida.

En la Figura 36, se presentan los valores de los momentos promedio calculados para cada playa muestreada.

4

PERFIL DE PLAYA Y DESPLAZAMIENTO DE LÍNEA DE COSTA DEL ESTADO DE CAMPECHE

4.1 INTRODUCCIÓN

Un elemento importante para la ingeniería costera es el estudio de la forma geométrica de una playa. La forma de la playa puede analizarse en planta, en perfiles longitudinales y transversales a ésta.

En esta sección se analizan perfiles transversales de 10 playas a lo largo del litoral del estado de Campeche, obteniendo el ancho y el área de playa seca para cada uno. Así mismo, se analiza el desplazamiento de la línea de costa en el tiempo a fin de identificar las zonas con erosión o acreción y poder cuantificar estos procesos.

Para ello se construyó una base de imágenes satelitales tipo Landsat y se digitalizó la línea de costa para el periodo 1994 – 2018; a través de la extensión DSAS se hizo un análisis de la evolución de la línea de costa.

Los resultados del análisis de los perfiles de playa pueden ser consultados en el Anexo III.

4.2 TRABAJO DE CAMPO

Se realizó el levantamiento de perfiles a lo largo de 10 playas del estado de Campeche, empleando un equipo GPS Leica Viva GS1 GNSS Smart antena con un controlador de campo Leica CS15; el equipo tiene tecnología GNSS con un excelente seguimiento en bajas elevaciones y un ruido muy bajo en las medidas de fase de la portadora GNSS con <0.5 mm de precisión y un tiempo de adquisición mínimo con un tiempo de readquisición menor a 1 s. El equipo tiene 120 canales y puede seguir hasta 60 satélites de forma simultánea en dos frecuencias; las señales satelitales seguidos son:

- GPS: L1, L2, L2C, L5
- GLONASS: L1, L2
- Galileo (Test): GIOVE – A, GIOVE – B
- Galileo: E1, E5a, E5b, Alt – BOC
- Compass
- SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS

La precisión (emc) con tiempo real (RTK) en estado cinemático (fase) en movimiento tras inicialización es de 10 mm + 1ppm (emc) en horizontal y de 20 mm + 1 ppm (emc) en vertical. Almacena datos brutos GNSS y datos RINEX de hasta 20 Hz en una tarjeta SD extraíble.

El levantamiento de los perfiles se hizo de forma transversal a la línea de costa, con una separación entre perfiles de 300m en las playas de Isla Arena, Chenkán, Playa Bonita y Payucán. En las playas restantes, la separación fue de 500 m.

A continuación, se presenta una breve reseña del levantamiento de los perfiles en cada playa, número de perfiles, extensión y su ubicación en un mapa; en el ANEXO III se presenta a detalle los gráficos de los perfiles medidos por playa.

- Isla Arena

Fecha: 24 de noviembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 7 perfiles en sentido transversal con una longitud de 54 m en promedio y un espaciado longitudinal entre perfiles de 250 m.

Imagen de localización:



Figura 37. Estaciones de muestreo en Isla Arena.

En esta zona el ancho de playa seca medida es en promedio de 20 m; mientras que la pendiente promedio de la playa es de 0.06. En la Figura 38, se presenta un perfil medido para la Isla Arena.

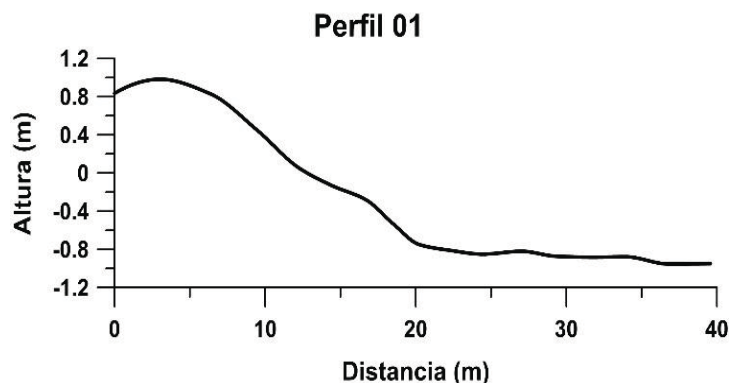


Figura 38. Perfil de playa medido en Isla Arena.

- Playa Bonita

Fecha: 07 de noviembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 8 perfiles en sentido transversal, con una longitud promedio de 100 m y un espaciado longitudinal entre perfiles de 300 m.

Imagen de localización:



Figura 39. Estaciones de muestreo en Playa Bonita.

El ancho de playa seca medida en Playa Bonita fue de 26.5 m y la playa seca presenta una pendiente promedio de 0.1. En la Figura 40 se presenta uno de los perfiles medidos.

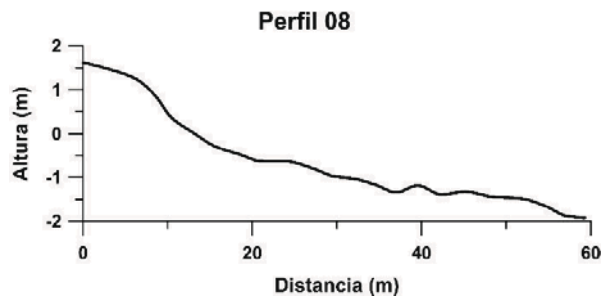


Figura 40. Perfil de playa medido en Playa Bonita.

- Payucán

Fecha: 10 de noviembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 8 perfiles en sentido transversal con una longitud de 55 m en promedio y un espaciado longitudinal de 300 m en promedio.

Imagen de localización:

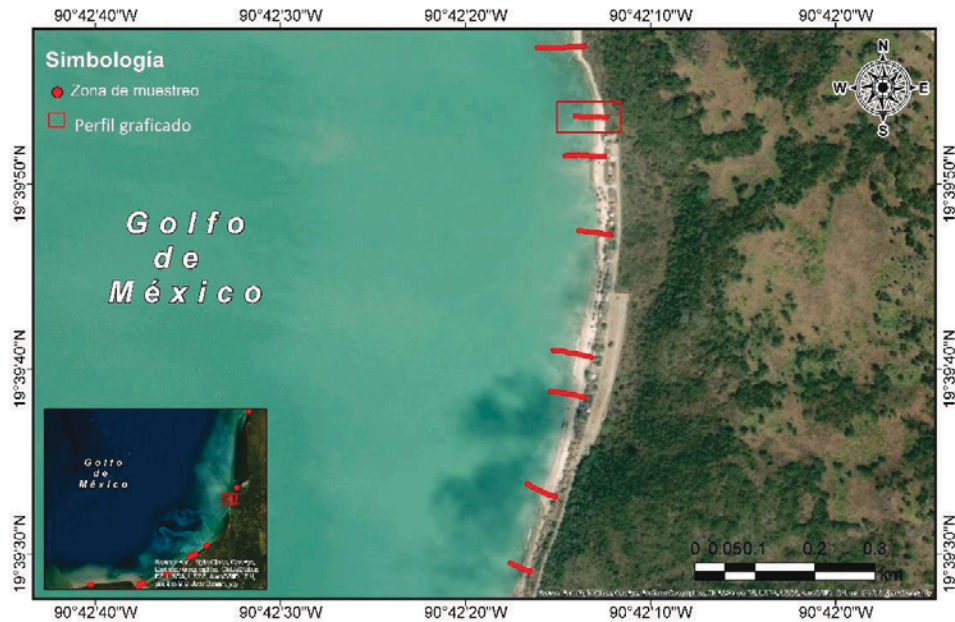


Figura 41. Estaciones de muestreo en Payucán.

En la Figura 42 se presenta uno de los perfiles medidos en la playa de Payucán, esta playa presenta un ancho de playa seca de 17 m y una pendiente promedio de 0.075.

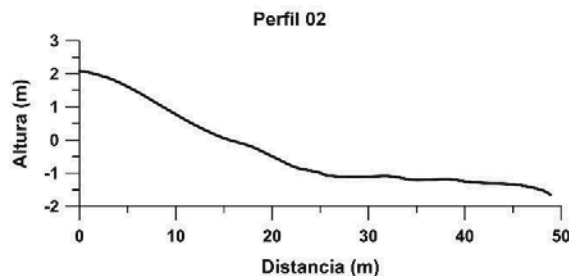


Figura 42. Perfil de playa medido en Payucán.

- Chenkán

Fecha: 15 de noviembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 10 perfiles en sentido transversal con una longitud de 58 m en promedio y un espaciado longitudinal entre perfiles de 300 m promedio.

Imagen de localización:

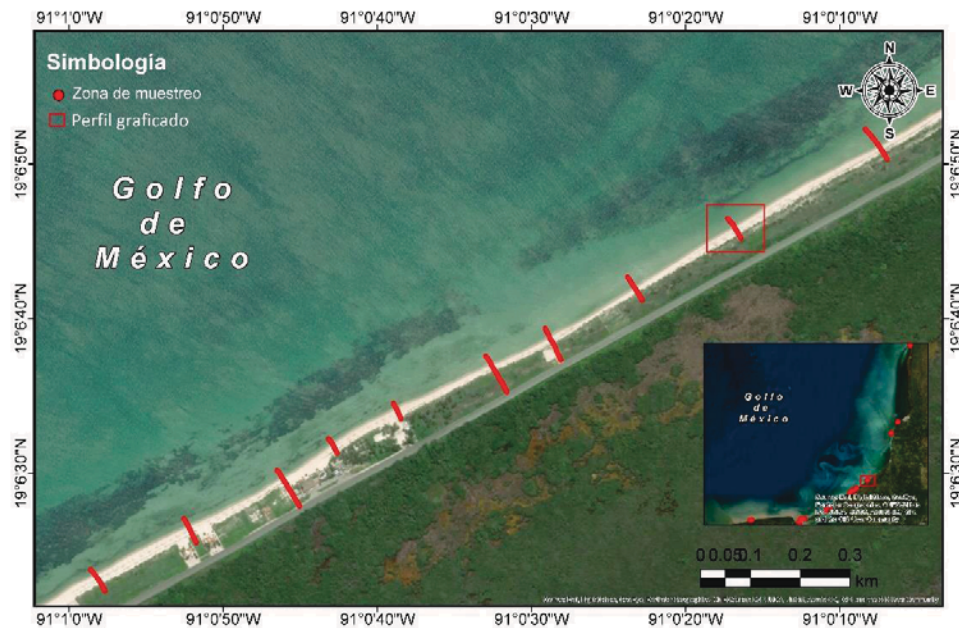


Figura 43. Estaciones de muestreo en Chenkán.

La Figura 44 corresponde a la proyección de un perfil de playa medido. Para Chenkán, el ancho de playa seca promedio es de 38 m y la pendiente de 0.08.

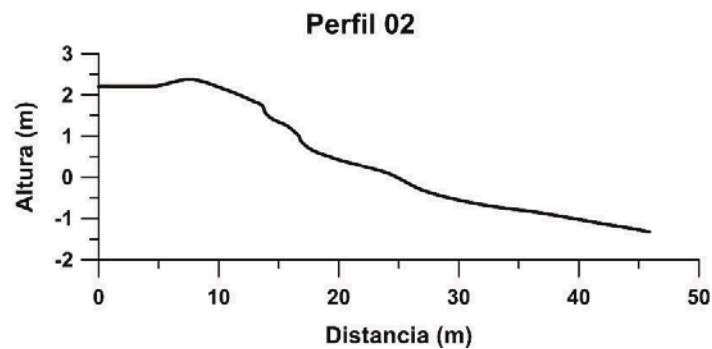


Figura 44. Perfil de playa medido en Chenkán.

- Sabancuy

Fecha: 29 de noviembre y 01 de diciembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 26 perfiles en sentido transversal con una longitud de 136 m y un espaciado longitudinal entre perfiles de 500 m, y 4 perfiles con un espaciado de 1 km entre ellos.

Imagen de localización:

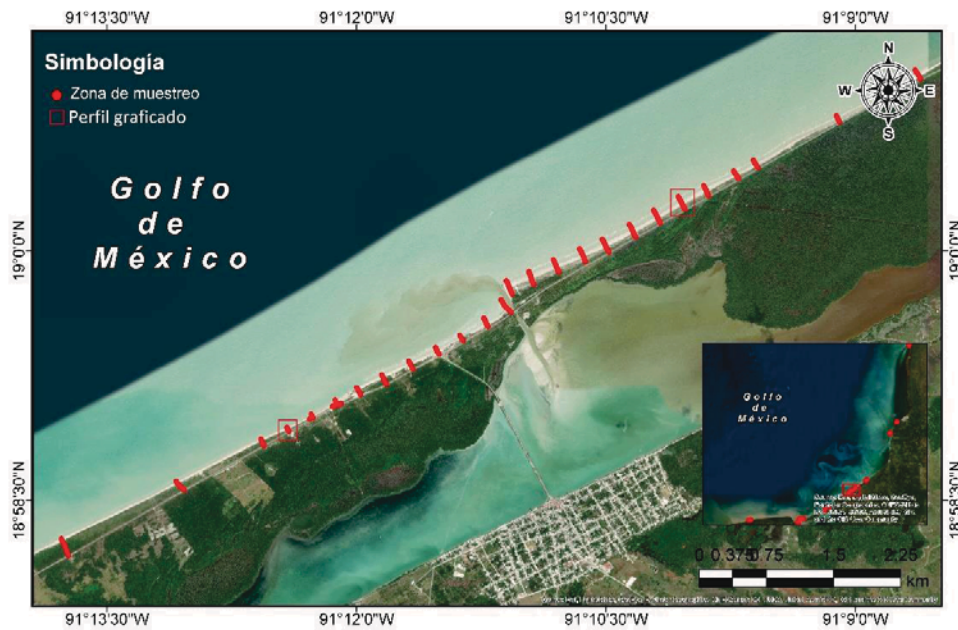


Figura 45. Estaciones de muestreo en Sabancuy.

El ancho de playa seca medida para la zona de Sabancuy es de 75 m en promedio, mientras que la pendiente es de 0.042. La Figura 46 presenta dos perfiles característicos de la zona de Sabancuy.

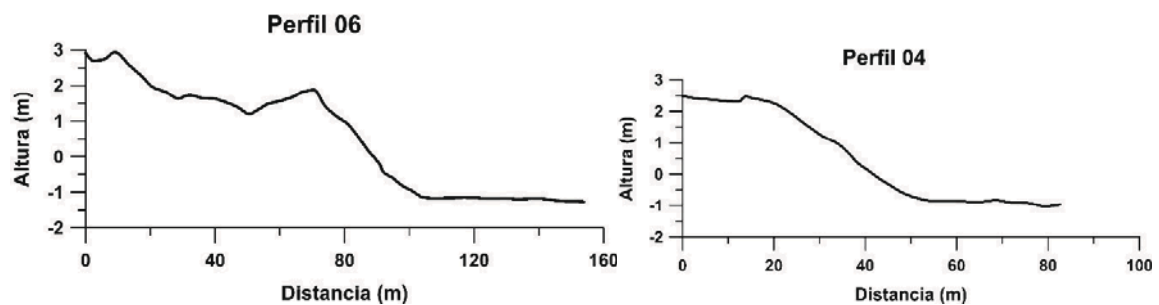


Figura 46. Perfiles de playa medidos en Sabancuy.

- Isla Aguada

Fecha: 06 y 09 de diciembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 8 perfiles en sentido transversal, 4 con una longitud de 42 m y un espaciado longitudinal entre perfiles de 1 km y 4 con una longitud de 157 m en promedio y un espaciado entre perfiles de 500 m.

Imagen de localización:



Figura 47. Estaciones de muestreo en Isla Aguada.

La Figura 48 corresponde a uno de los perfiles medidos en Isla Aguada. Para esta zona el ancho de playa seca medida en promedio fue de 68 m y la pendiente tiene un valor promedio de 0.044.

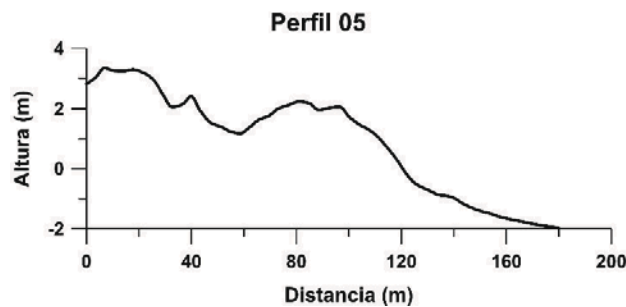


Figura 48. Perfil de playa medido en Isla Aguada.

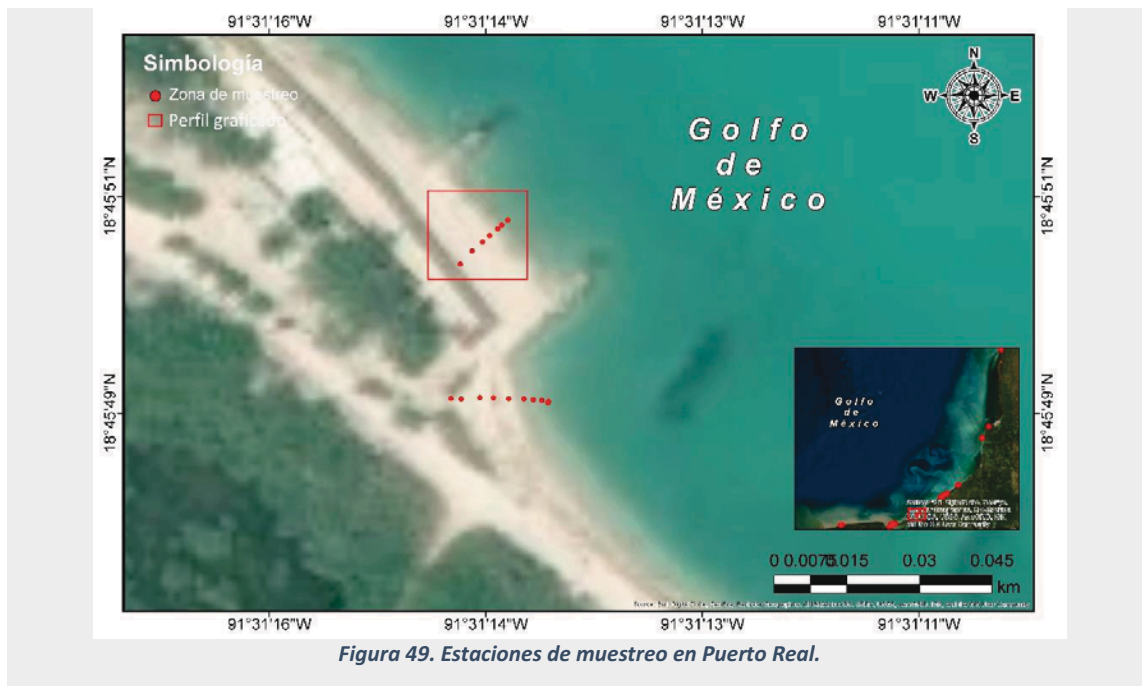
- Puerto Real

Fecha: 09 de diciembre de 2017

Sedimentos: Se tomaron muestras de sedimento en 1 zonas de perfil: lavado

Observaciones: Se midió durante norte. Playa de arena con presencia de estructuras costeras

Imagen de localización:



Para Puerto Real se midió un ancho de playa seca de 17 m en promedio, debido a las condiciones climáticas sólo fue posible medir dos perfiles, considerando que estos no son completamente representativos de la zona; para estos dos perfiles la pendiente promedio fue de 0.105. La Figura 50 muestra uno de los perfiles medidos.

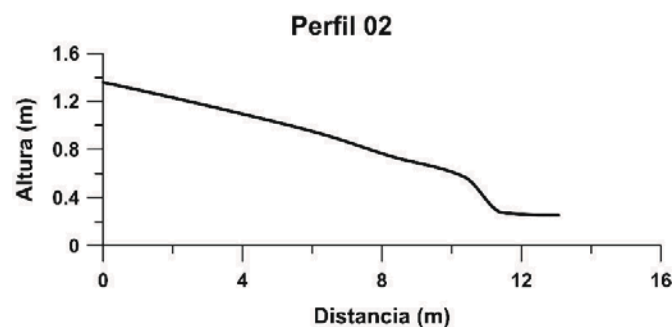


Figura 50. Perfil de playa medido en Puerto Real.

- Playa Norte

Fecha: 07 de diciembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 13 perfiles en sentido transversal con una longitud de 183 m promedio y un espaciado longitudinal entre perfiles de 500 m.

Imagen de localización:



Figura 51. Estaciones de muestreo en Playa Norte.

Para la playa de Playa Norte se midió un ancho de playa seca en promedio de 95 m con una pendiente de 0.031. La altura máxima que alcanza la duna es de 3m, mientras que la mínima es de 1.5 m. La Figura 52 corresponde a uno de los perfiles medidos.

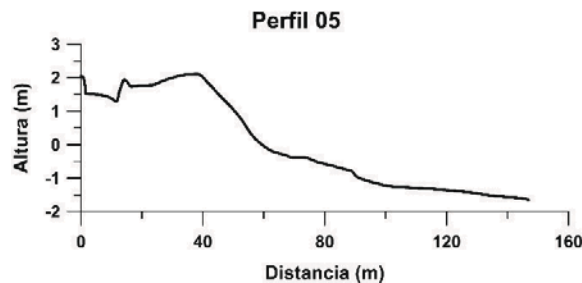


Figura 52. Perfil de playa medido en Playa Norte.

- **Zacatal**

Fecha: 07 de diciembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 6 perfiles en sentido transversal con una longitud de 56 m promedio y un espaciado entre perfiles de 500 m.

Imagen de localización:



Figura 53. Estaciones de muestreo en Zacatal.

En Zacatal se midieron 6 perfiles, la Figura 54 proyecta uno de los perfiles medidos. Para esta zona se midió un ancho de playa seca de 21 m en promedio con una pendiente 0.071.

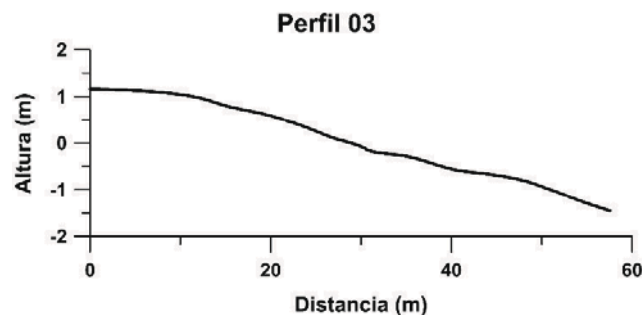


Figura 54. Perfil de playa medido en Zacatal.

- **Nuevo Campechito**

Fecha: 08 de diciembre de 2017

Perfiles: Se levantaron 9 perfiles en sentido transversal con una longitud de 60 m y un espaciado longitudinal entre perfiles de 500 m.

Imagen de localización:

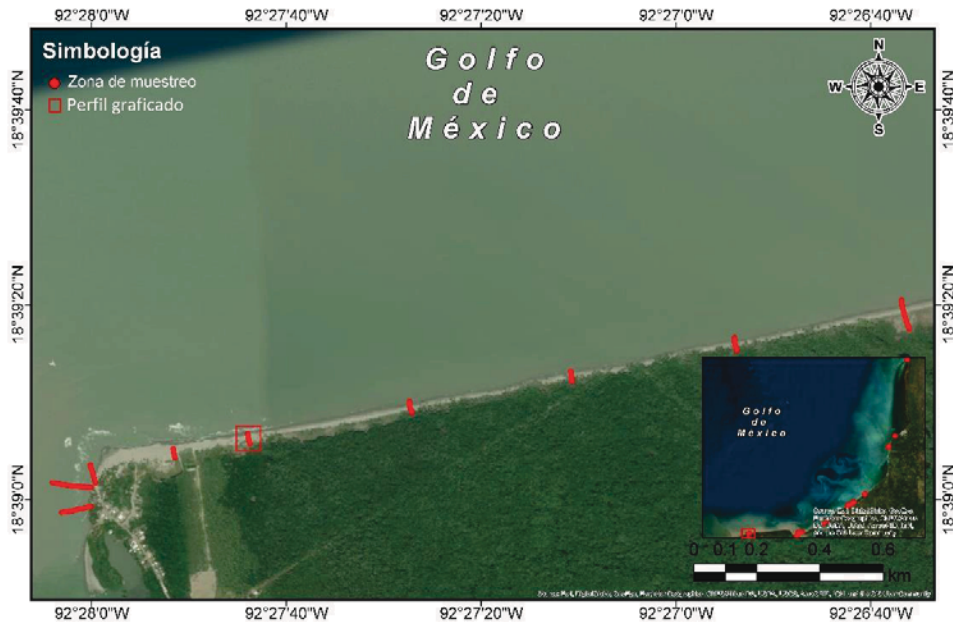


Figura 55. Estaciones de muestreo en Nuevo Campechito.

En Nuevo Campechito se midió un ancho de playa seca de 60 m en promedio, en la Figura 56 se presenta un perfil característico de esta zona. Se observa que el perfil es tendido con una pendiente suavizada de 0.05. Se observa que en la zona de duna inicia la formación de un escarpe, lo que indica erosión de la playa.

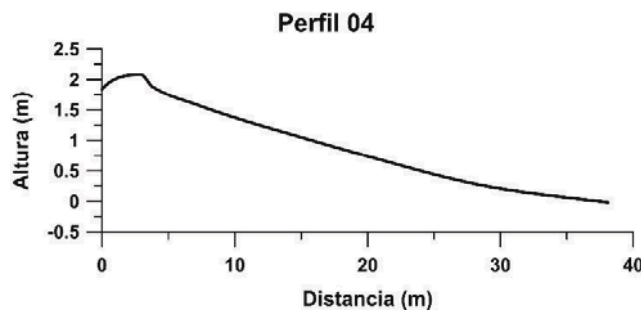


Figura 56. Perfil de playa medido en Nuevo Campechito.

4.3 EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Se utilizaron 60 imágenes Landsat que cubren el periodo 1994 – 2018 para evaluar los cambios a lo largo de la costa del Estado de Campeche. Dichas imágenes fueron obtenidas de la base de datos de la *United Satates Geological Survey (USGS)*, por sus siglas en inglés) en la página web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Debido al tamaño de las imágenes y para poder cubrir toda la costa del estado se requirió la descarga de 4 zonas; las imágenes disponibles se enlistan en la Tabla 4.

Tabla 4. Imágenes utilizadas para el análisis de la evolución de la línea de costa.

Año	Zonas			
	21045	21046	21047	22047
19940326	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
19950313	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
19960228	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
19970403	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
19980508	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
19990511	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
20000223	LT05_L1TP_021045	LT05_L1TP_021046	LT05_L1TP_021047	LT05_L1TP_022047
20010406	LE07_L1TP_021045	LE07_L1TP_021046	LE07_L1TP_021047	LE07_L1TP_022047
20030428	LE07_L1TP_021045	LE07_L1TP_021046	LE07_L1TP_021047	LE07_L1TP_022047
20130517	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047
20140301	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047
20150912	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047
20160509	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047
20170325	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047
20180328	LC08_L1TP_021045	LC08_L1TP_021046	LC08_L1TP_021047	LC08_L1TP_022047

4.3.1 Extracción de la línea de costa

Para la digitalización de la línea de costa a partir de cada imagen se procedió a seguir la siguiente metodología; en cada paso se requirió crear una rutina en Phytón para procesar la información, para la extracción de la línea de costa se utilizó la banda 5 que se encuentra en la región cercana al infrarrojo y permite una mayor diferenciación entre el suelo y el agua (Figura 57):

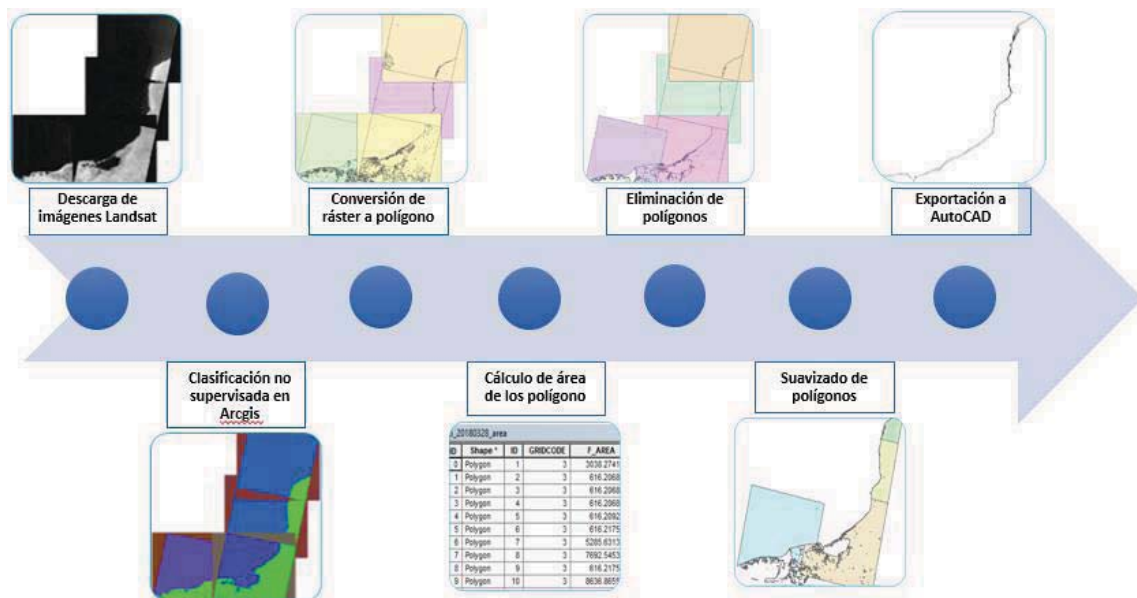


Figura 57. Metodología para la extracción de línea de costa.

Las líneas obtenidas se exportaron a AutoCAD® para poder unir los segmentos en una sola línea; posteriormente se exportaron a ArcGIS a formato shapefile para obtener una geodatabase. Las tasas de desplazamiento de línea de costa fueron calculadas utilizando el *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* desarrollado por el USGS (Thieler et al., 2009).

Las tasas de cambio de la línea de costa fueron estimadas para n perfiles separados 100 m. Estos transectos fueron numerados del 1 al n , donde el transecto 1 se localiza al sur y el n al norte.

4.3.2 Cálculo de las tasas de erosión/acreción

Varias técnicas de análisis de datos pueden ser usadas para evaluar las tasas de erosión/acreción costera (Thieler et al., 2009), estos incluyen la envolvente de cambio costero (*Shoreline Change Envelope, SCE*) movimiento neto de la costa (*Net Shoreline Movement, NSM*), tendencia de regresión lineal (*Linear Regression Rate, LRR*) y tasa neta de punto final (*End Point Rates, EPR*). En la Tabla 5 se presenta la descripción de cada método.

Tabla 5. Descripción de los métodos usados para evaluar las tasas de erosión/acreción en la costa.

Método	Descripción
SCE	Es la distancia entre las líneas de costa más cercana y más lejana (Ozturk & Sesli, 2015)
NSM	Es la distancia entre las líneas de costa más antigua y más reciente para cada transecto (Crowell & Leatherman, 1999; Hegde & Akshaya, 2015)
LRR	Encuentra la tendencia lineal, que corresponde al mínimo de las distancias cuadradas (Crowell & Leatherman, 1999; Hegde & Akshaya, 2015)
EPR	Es la relación entre la distancia del movimiento de la costa y el tiempo transcurrido entre la línea de costa más antigua y la más reciente (Kermani et al., 2016)

Para facilidad de trabajo e interpretación de los resultados, la costa se dividió en 3 zonas principales:

4.3.2.1 Zona norte

Se realizaron 1973 transectos de sur a norte (Figura 58). Encontrando que el proceso de acreción es el que domina sobre el de erosión (Figura 59).

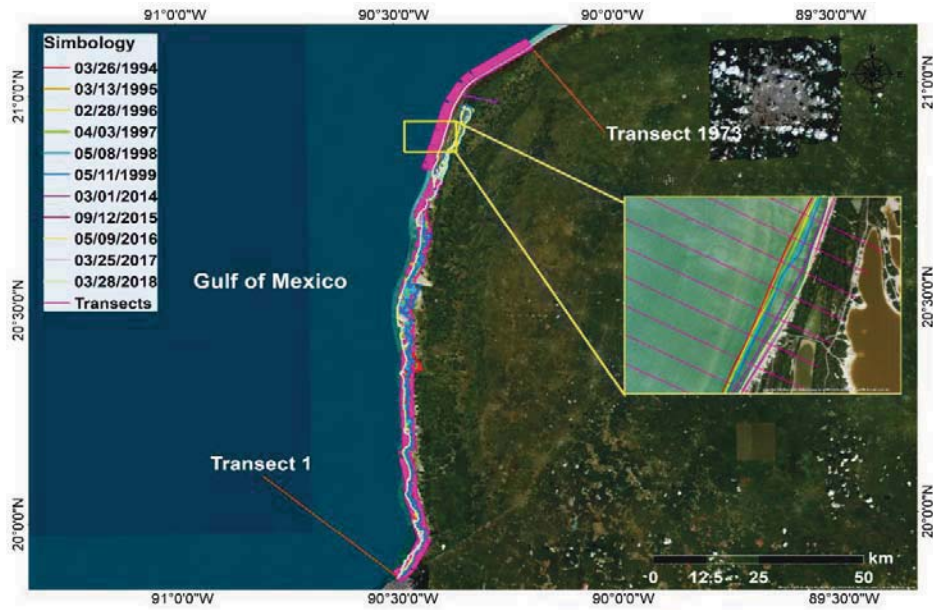


Figura 58. Transectos para la zona 1, con espaciado de 100 m.

La tasa de EPR promedio fue de 5.12 m/año, mientras que el desplazamiento neto promedio fue de 233.49 m; se obtuvieron valores máximos para EPR y NSM positivos de 120.09 m/año y 2329.6 m respectivamente y negativos de -458.7 m/año y -2351 m respectivamente (Figura 60 y Figura 61).



Figura 59. Procesos de evolución de la línea de costa. Línea roja indica erosión, línea verde sección estable y azul acreción.

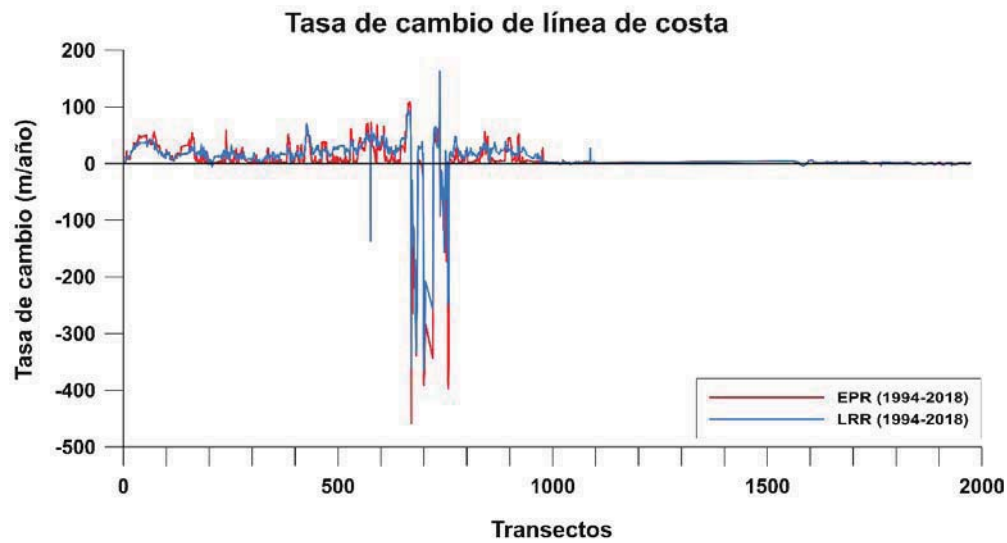


Figura 60. Tasa de desplazamiento de línea de costa.

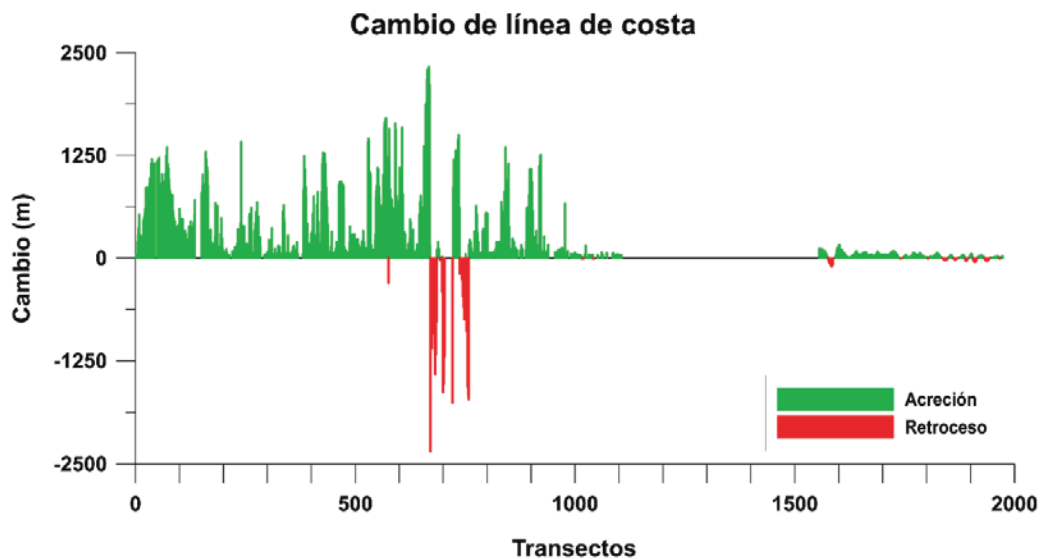


Figura 61. Desplazamiento neto de línea de costa.

4.3.2.2 Zona centro

Se realizaron 1329 transectos de sur a norte (Figura 62). Encontrando que principalmente domina el proceso de acreción (Figura 63).

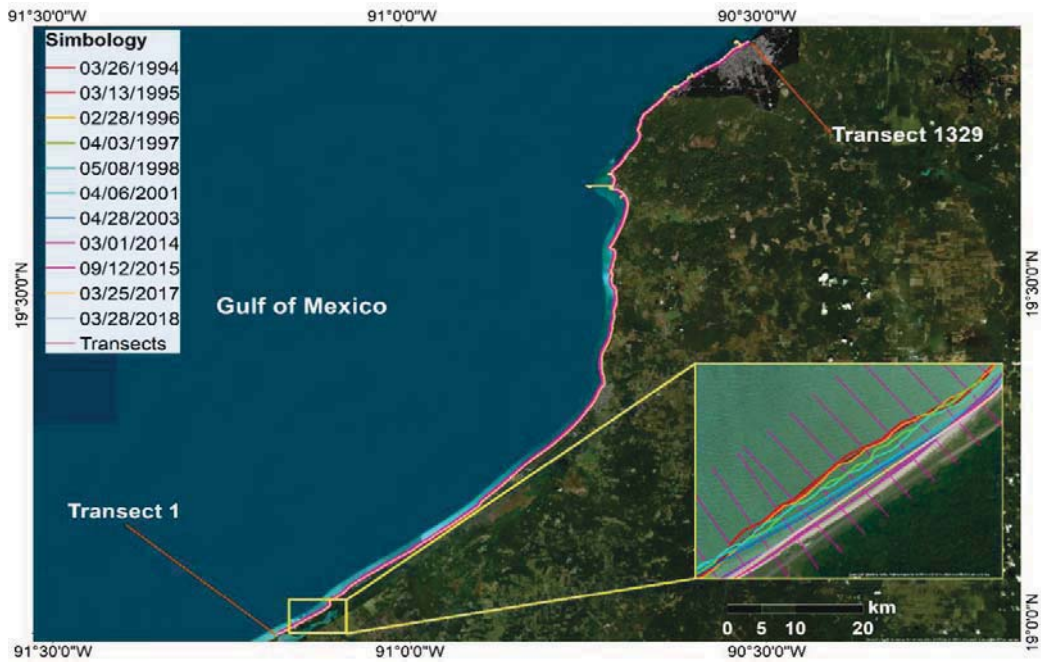


Figura 62. Transectos para la zona 2, con espaciado de 100 m.

La tasa de EPR promedio fue de 0.25 m/año, mientras que el desplazamiento Neto promedio fue de 6.1345 m; con valores máximos para EPR y NSM positivos de 9.04 m/año y 217.11 m respectivamente y negativos de -4.58 m/año y -109.9 m respectivamente (Figura 64 y Figura 65).

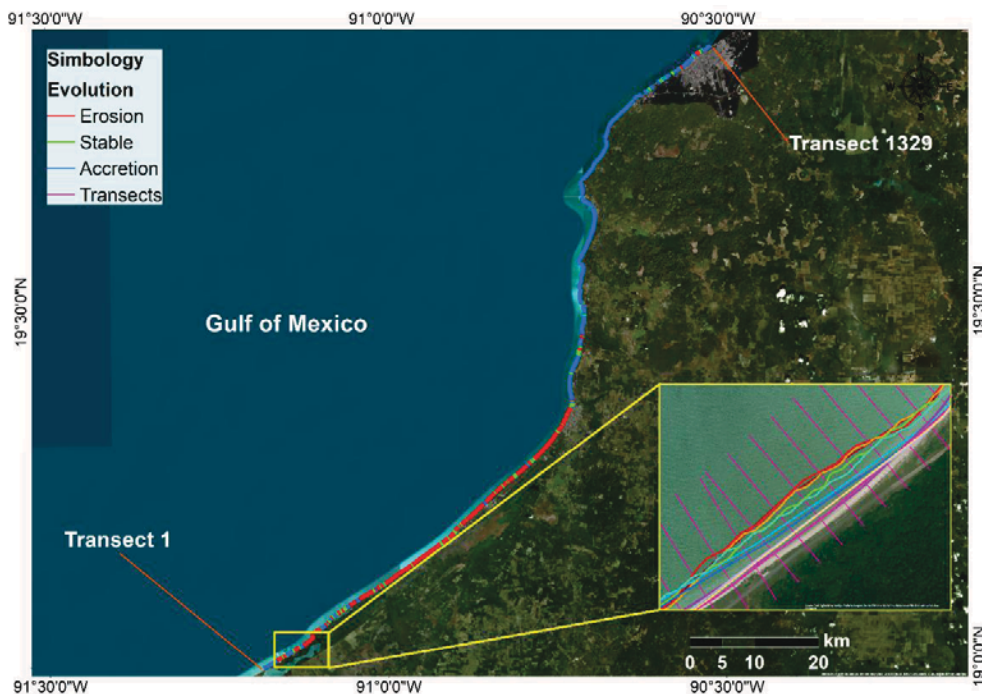


Figura 63. Procesos de evolución de la línea de costa. Línea roja indica erosión, línea verde sección estable y azul acreción.

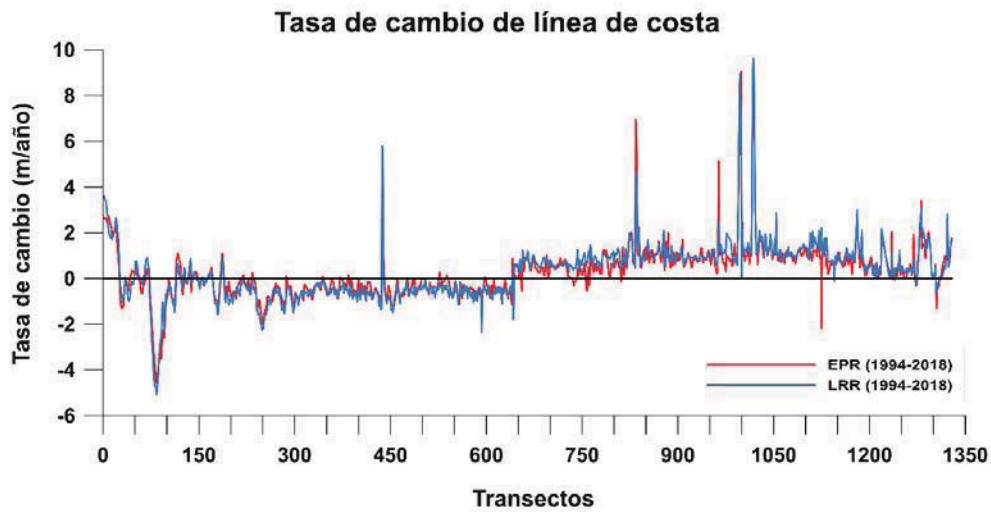


Figura 64. Tasa de desplazamiento de línea de costa.

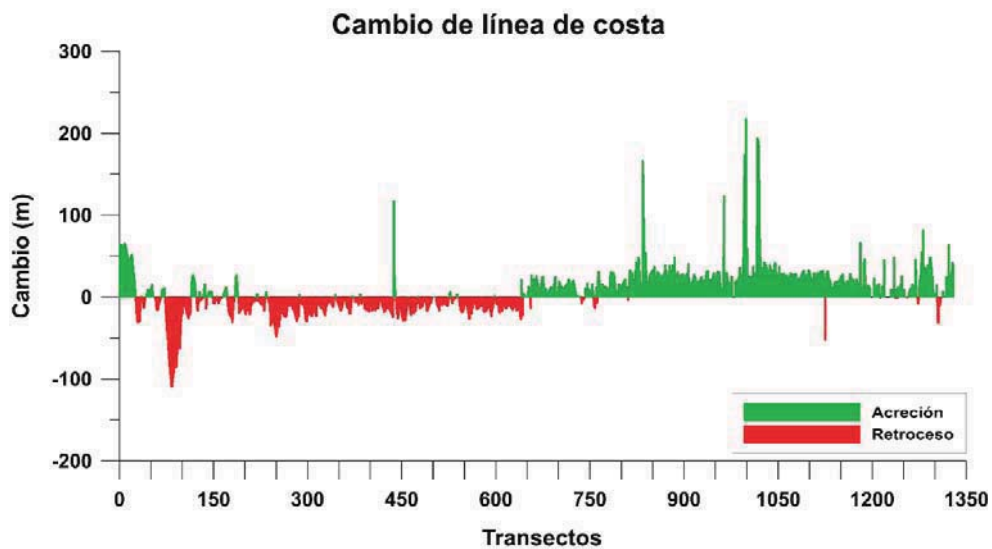


Figura 65. Desplazamiento neto de línea de costa.

4.3.2.3 Zona sur

Debido al tipo de playa y la importancia socioeconómica de la zona sur del estado, se dividió en 3 secciones para facilidad de análisis e interpretación de resultados. Así mismo el análisis se dividió en 3 periodos: 1994 – 2003, 2003 – 2013, 2013 – 2018.

4.3.2.3.1 Sección a

Se evaluaron 437 transectos (Figura 68); una evaluación de las tasas anuales revela que la mayor erosión se presentó en el periodo 2003 – 2013 con un valor de -19.12 m/año; mientras que la mayor acreción se presentó en el periodo 2013 – 2018 con un valor de 18.96 m/año (Tabla 6). De forma general el proceso de erosión para el periodo 1994 – 2018 ha sido predominante al de acreción con una diferencia de 1.80 m/año.

Tabla 6. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.

		1994 - 2003	2003 - 2013	2013 - 2018	1994 - 2018
EPR (m/año)	Min	-9.98	-19.12	-13.4	-7.97
	Max	7.54	5.36	18.96	6.16
	Mean	-0.14	-0.80	-0.03	-0.40
	Std. Dev.	2.15	3.37	3.47	1.82
NSM (m)	Min	-90.73	-192.19	-65.18	-191.36
	Max	68.58	53.86	92.19	147.84
	Mean	-1.30	-8.08	-0.16	-9.53
	Std. Dev.	19.54	33.83	16.86	43.61

Los mayores cambios ocurrieron entre los transectos 25 a 75 como se muestra en la Figura 66.

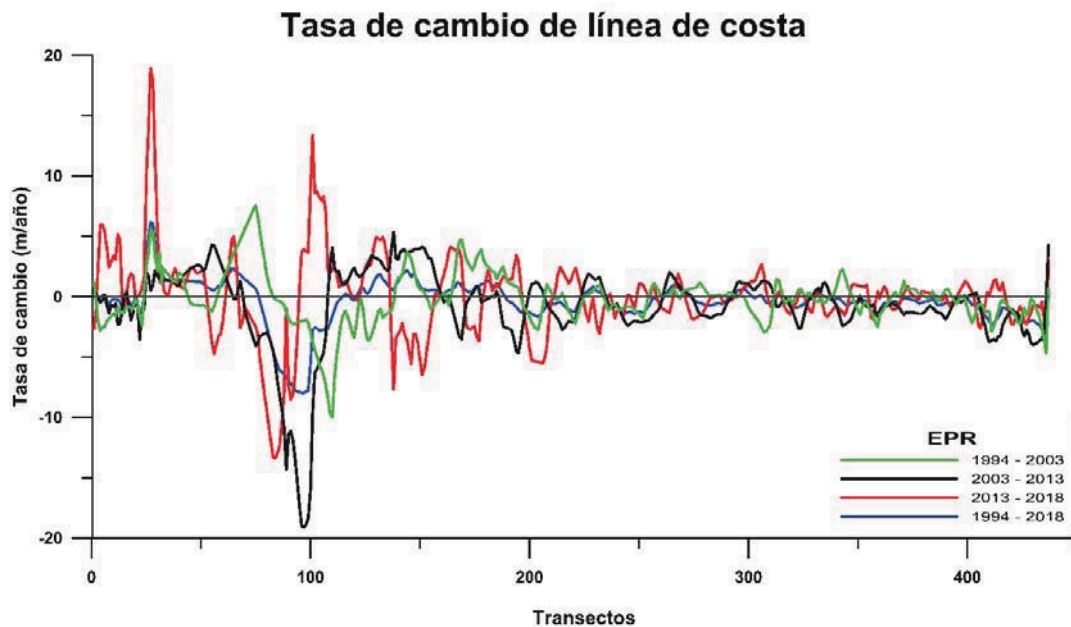


Figura 66. Cambio en la posición de la línea de costa calculada con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 437 transectos. Los valores positivos indican acreción, mientras que los negativos retroceso.

Los mayores retrocesos de costa se presentaron en los transectos 93 a 99 (Figura 67). Con valores próximos a -190 m en promedio.

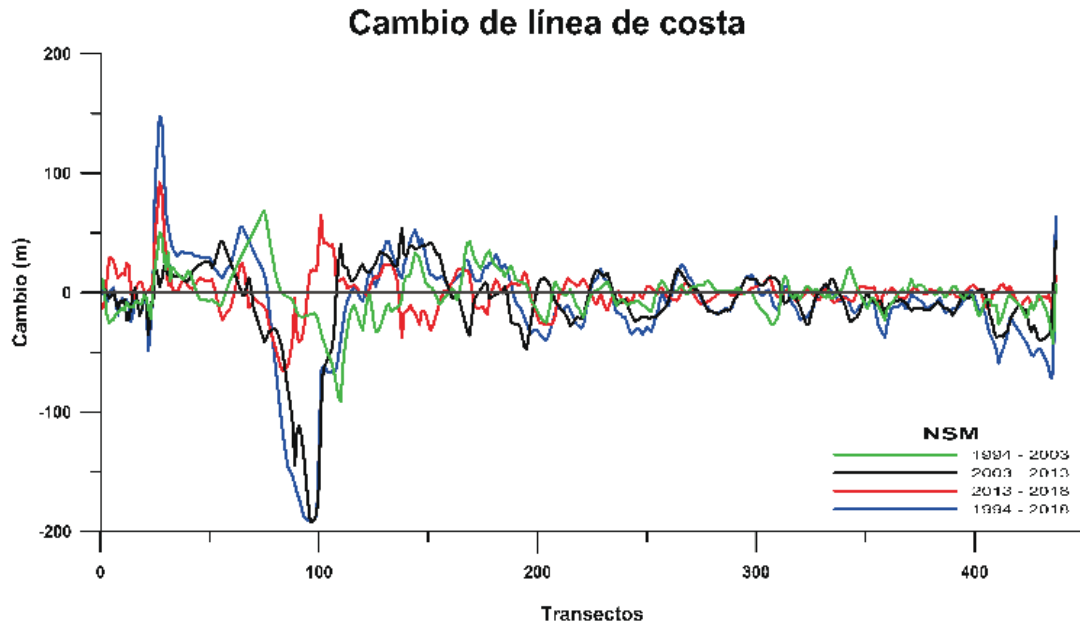


Figura 67. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión). NSM se refiere a una distancia y no a una tasa, entre la costa más antigua y la más reciente.

Esta zona se identifica como km 45+000 de la Carretera Federal 180 (Figura 68).



Figura 68. Sección a. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor erosión (km 45).

4.3.2.3.2 Sección b

En la Tabla 7 se presenta los resultados del análisis de 410 transectos, para los cuatro periodos en estudio. El mayor retroceso neto se presentó en el periodo 2003 – 2013 con un valor de -231.62 m, en este mismo periodo se presenta la mayor tasa de erosión con un valor de -23.04 m/año. La mayor

acreción neta se presentó en el periodo 1994 – 2003 con un valor de 256.21 m y una tasa de 29.17 m/año. Las tasas de acreción en esta sección predominan ante el proceso de erosión.

Tabla 7. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.

		1994 - 2003	2003 - 2013	2013 - 2018	1994 - 2018
EPR (m/año)	Min	-8.47	-23.04	-18.53	-5.72
	Max	29.17	14.32	17.00	7.14
	Mean	-0.37	0.01	0.45	-0.05
	Std. Dev.	4.08	3.48	3.80	1.83
NSM (m)	Min	-76.98	-231.62	-90.09	-137.25
	Max	265.21	143.90	82.66	171.50
	Mean	-3.37	0.11	2.19	-1.15
	Std. Dev.	37.08	35.00	18.46	44.03

Los cambios de acreción se presentaron entre los transectos 16 al 53 y de forma puntual para el periodo 2003 – 2013 en los transectos 172 y 173 con valores de 12 m/año en promedio (Figura 69).

Tasa de cambio de línea de costa

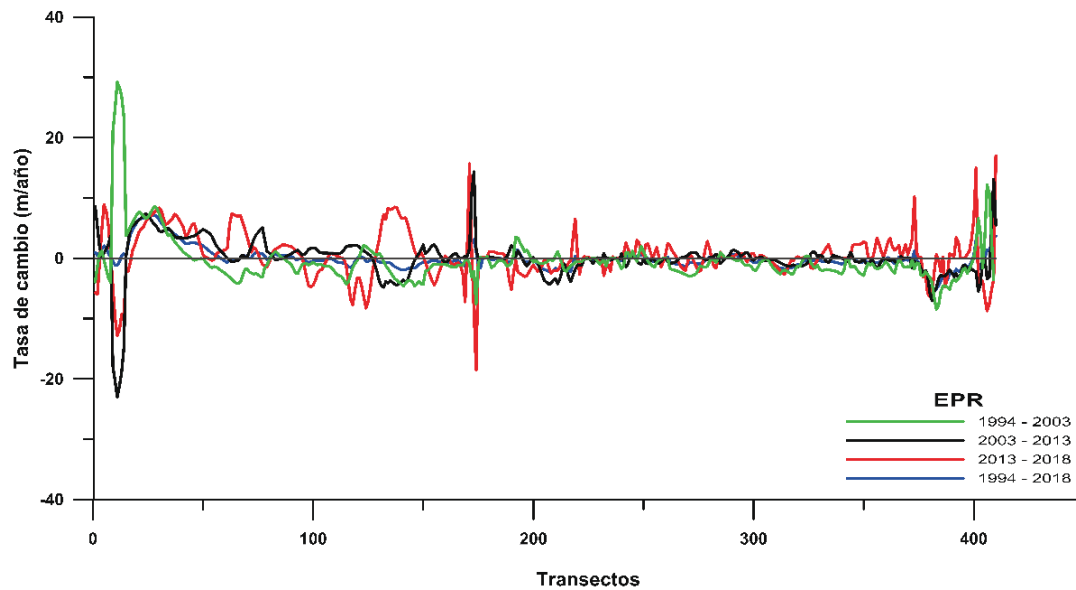


Figura 69. Cambio en la posición de la línea de costa calculada con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 410 transectos. Los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión.

Los mayores retrocesos de línea de costa se presentaron para el periodo 2003 – 2013 entre los transectos 9 a 14 con valor máximo de -231.62 m (Figura 70).

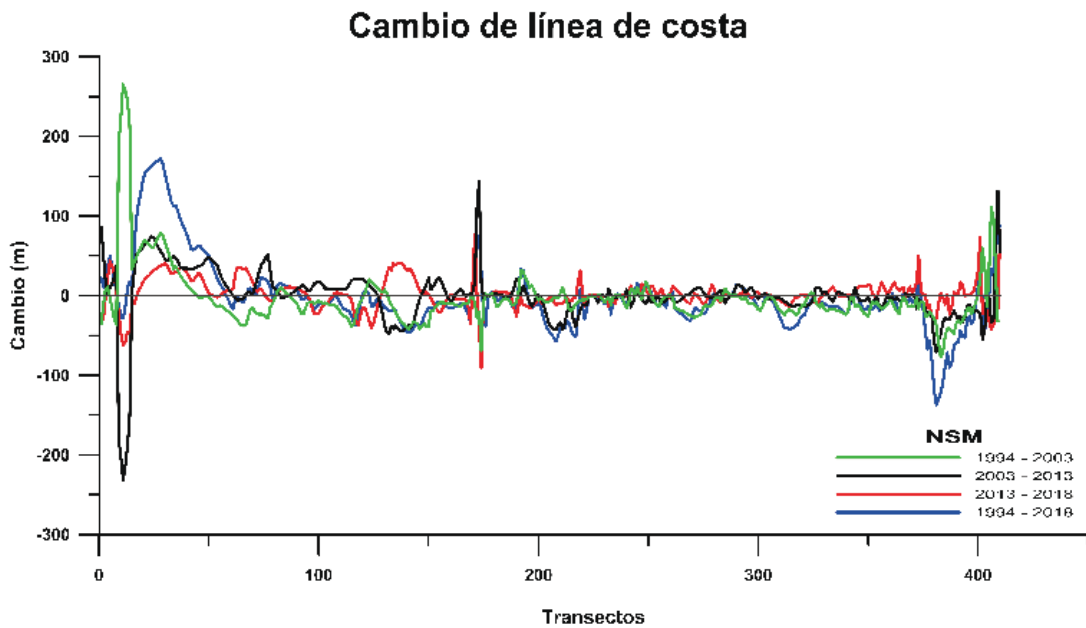


Figura 70. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican retroceso). NMS se refiere a una distancia y no a una tasa, entre la costa más antigua y la más reciente.

En la Figura 71 se presenta la localización de la zona con mayor acreción, llamada Playa Norte, ubicada en Ciudad del Carmen.



Figura 71. Sección b. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor acreción (Playa Norte).

4.3.2.3.3 Sección c

Para la sección c se analizaron 780 transectos. En la Tabla 8 se presentan los resultados del análisis del comportamiento de la línea de costa para los periodos 1994 – 2003, 2013 – 2018 y 1994 – 2018. La mayor acreción neta se presentó en el periodo 2013 – 2018; mientras que la mayor erosión neta se presentó en el periodo 1994 – 2018. En el periodo 1994 – 2003 se presentó la mayor tasa de erosión con -51.45 m/año.

Tabla 8. Detalle de EPR y NSM para cada periodo de análisis.

		1994 - 2003	2003 - 2013	2013 - 2018	1994 - 2018
EPR (m/año)	Min	-51.45	-31.24	-14.41	-21.86
	Max	7.10	5.40	89.07	8.98
	Mean	-11.06	-8.35	22.70	-3.08
	Std. Dev.	13.35	9.50	26.85	7.15
NSM (m)	Min	-467.69	-314.07	-70.09	-524.72
	Max	64.53	54.31	433.16	215.61
	Mean	-100.53	-83.89	110.38	-74.06
	Std. Dev.	121.36	95.50	130.59	171.65

El periodo 2013 – 2018 presenta las mayores tasas de acreción (Figura 72), así como un valor máximo de 89.07 m/año de acreción; los mayores valores se presentaron entre los transectos 256 a 375.

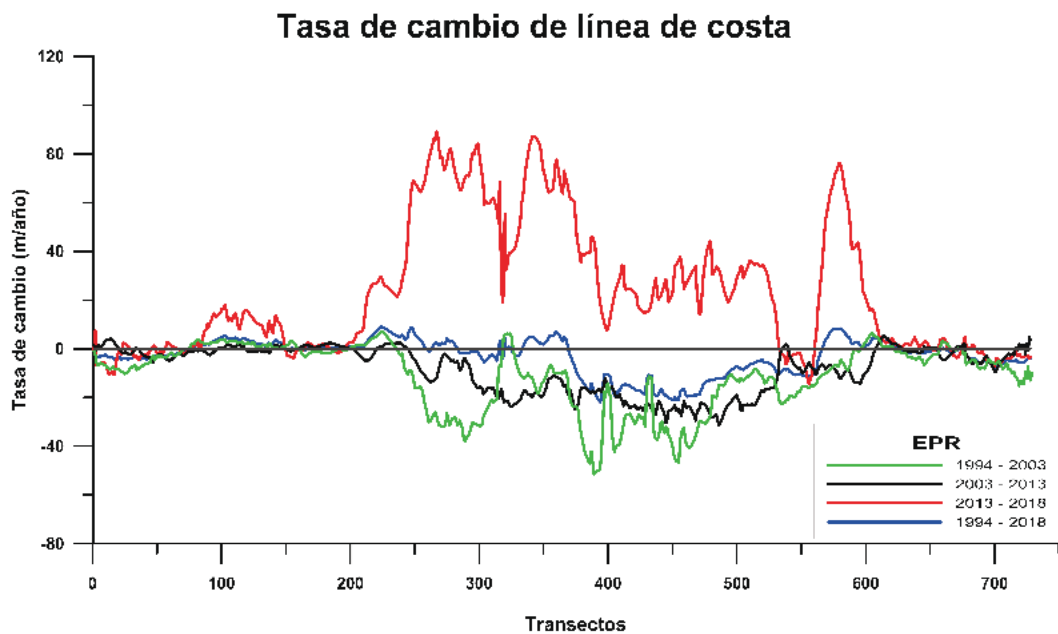


Figura 72. Cambio en la posición de la línea de costa calculado con la métrica de tendencia de la costa, EPR (m/año) para los 780 transectos. los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión.

De forma general el proceso de erosión predomina en la sección, alcanzando valores de retroceso de -524.72 m en el análisis del periodo 1994 – 2018, como se observa en los valores de los transectos 394 a 472 (Figura 73).

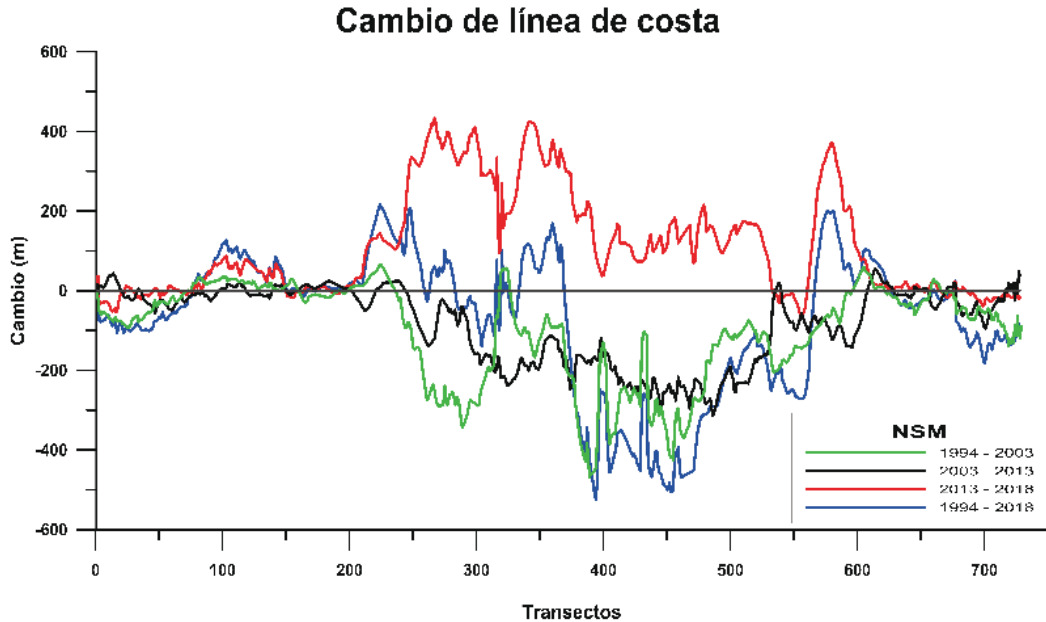


Figura 73. NSM para los cuatro periodos en análisis (los valores positivos indican acreción, mientras que los valores negativos indican erosión). NSM se refiere a una distancia y no a una tasa, entre las costas más antigua y más reciente.

En la Figura 74 se presenta la ubicación de la zona con mayor retroceso de línea de costa.

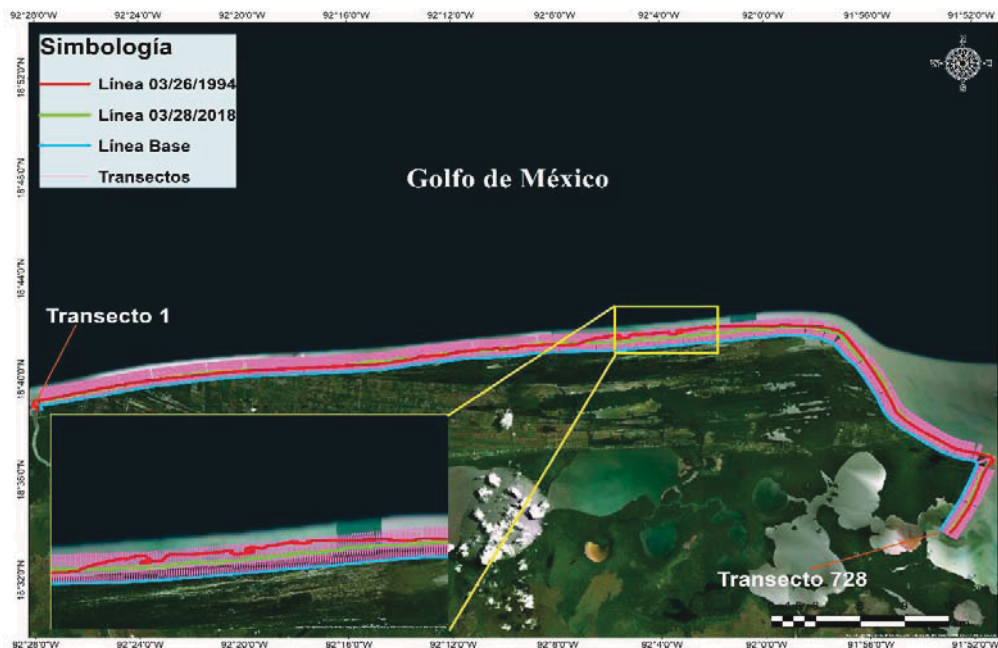


Figura 74. Sección c. Periodo de análisis 1994 - 2018. En el recuadro zona con mayor erosión.

5

CELDAS LITORALES

5.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de la zona costera es de suma importancia para analizar, entender y encontrar soluciones a los problemas que se enfrenta la costa. Para su análisis, un método practicable es dividir el litoral en unidades básicas.

Estas unidades básicas reciben diferentes dependiendo de la extensión de la unidad o el rasgo base bajo el cual se optó dividir el litoral. Aquí se emplea el término celdas litorales; para la división del litoral en este tipo de unidades existen diferentes criterios basados en elementos importantes como: el transporte sedimentario, descripción de criterios morfológicos, sedimentológicos y volumétricos y, análisis de fotografías aéreas o imágenes de satélite.

Aquí se propone un método que incluya y combine los criterios anteriores a fin de general una herramienta universal que pueda ser replicable en cualquier zona litoral. Este método se aplica en el litoral del Estado de Campeche.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

Las celdas litorales se pueden definir como unidades básicas en las que se divide el litoral. La determinación de las celdas es básica para la comprensión del transporte litoral, la reconstrucción de su formación y la predicción de la evolución de la línea de costa a medio – largo plazo. Además, su conocimiento es fundamental para calcular el balance sedimentario de un área (Anfuso, 2004).

Los sedimentos se mueven dentro de cada celda y/o pasan a celdas contiguas en función de la dirección del oleaje y de las características de los límites entre ellas. Los límites de las celdas, separan las partes de la costa que son interdependientes en términos de los procesos físicos (Bray et al., 1995) y se pueden clasificar en total o parcialmente impermeables, en los últimos puede existir un transporte sedimentario unidireccional o bidireccional (Bray et al., 1995).

La delimitación de las celdas puede ser más o menos compleja dependiendo de los rasgos fisiográficos de la zona ya que éstos determinarán el tipo de límite entre las mismas y por lo tanto a los procesos de intercambio sedimentario. Son fácilmente individualizables cuando tienen límites de tipo fijo, por ejemplo, en costas irregulares o en costas rectilíneas interrumpidas por salientes rocosas. En cambio, la delimitación de celdas con límites de tipo libre es más compleja porque varían su posición en función de las características del oleaje incidente (Anfuso, 2004).

Las celdas litorales están constituidas por componentes de entrada y de salida. Los primeros se refieren a los aportes de sedimentos que recibe la celda y pueden provenir de diferentes fuentes como ríos, erosión de dunas, acantilados y desde otras celdas por transporte litoral. En los componentes de salida se puede considerar a los cañones submarinos, acumulación en dunas, estrán, bocas, lagunas, entre otros. Cabe señalar que los componentes de entrada y de salida pueden ser naturales o antrópicas (Carter, 1988a; Juárez & Torres, 2008).

Para identificar las celdas litorales se han propuesto diferentes criterios, los más destacados son:

- 1) Determinación del transporte sedimentario relacionado con procesos hidrodinámicos, flujos causados por gradientes de disipación de energía, etc. Este método ha sido utilizado por Sulis & Annis (2014) en la playa Sa Mesa Longa, Italia, así como por Bray et al. (1995) al sur de Inglaterra.
- 2) Descripción de criterios morfológicos, sedimentológicos y volumétricos. Por ejemplo, los estudios realizados por Samsuddin & Suchindan (1987) en la costa de Kerala, India y por Shih & Komar (1994) en la Costa de Oregón, Estados Unidos.
- 3) Análisis de fotografías aéreas o imágenes de satélite. Empleado en la zona costera de Kuwait por Al Bakri (1996), en la costa de Kerala, India por Kunte (1994) y en la costa noreste del delta del Nilo por El-Asmar (2002).

En el presente estudio se generará un criterio que incluya los antes descritos, de forma que los límites encontrados sean identificados en base a un análisis más robusto. Para generar el criterio se seguirán los siguientes pasos (Figura 75):

- 1) Análisis de información bibliográfica.
- 2) Creación de una base de datos bibliográficos que incluya aspectos de sedimentación costera como tipo y tamaño de sedimento, patrones de transporte, entre otros.
- 3) Procesamiento de imágenes satelitales donde se identifique: rasgos morfológicos, elementos antrópicos, cambios en la línea de costa, fuentes, almacenes y sumideros.
- 4) Agrupación de la información obtenida en los pasos anteriores en patrones de transporte sedimentario.
- 5) Elaboración de un mapa a detalle de la circulación de sedimentos locales en la zona de estudio.
- 6) Diseño de un sistema de flechas con código para mostrar información referente a: tipo de transporte y ubicación, tipo de sedimento en tránsito, y dirección.
- 7) Elaboración de una síntesis a gran escala basada en las fuentes, sumideros, transporte, límites y las interconexiones.
- 8) Validación y refinamiento de la síntesis a escala a través del análisis de muestras sedimentarias.
- 9) Delimitación de las celdas litorales a través de la identificación de los patrones continuos de transporte de sedimentos y la delimitación de límites.

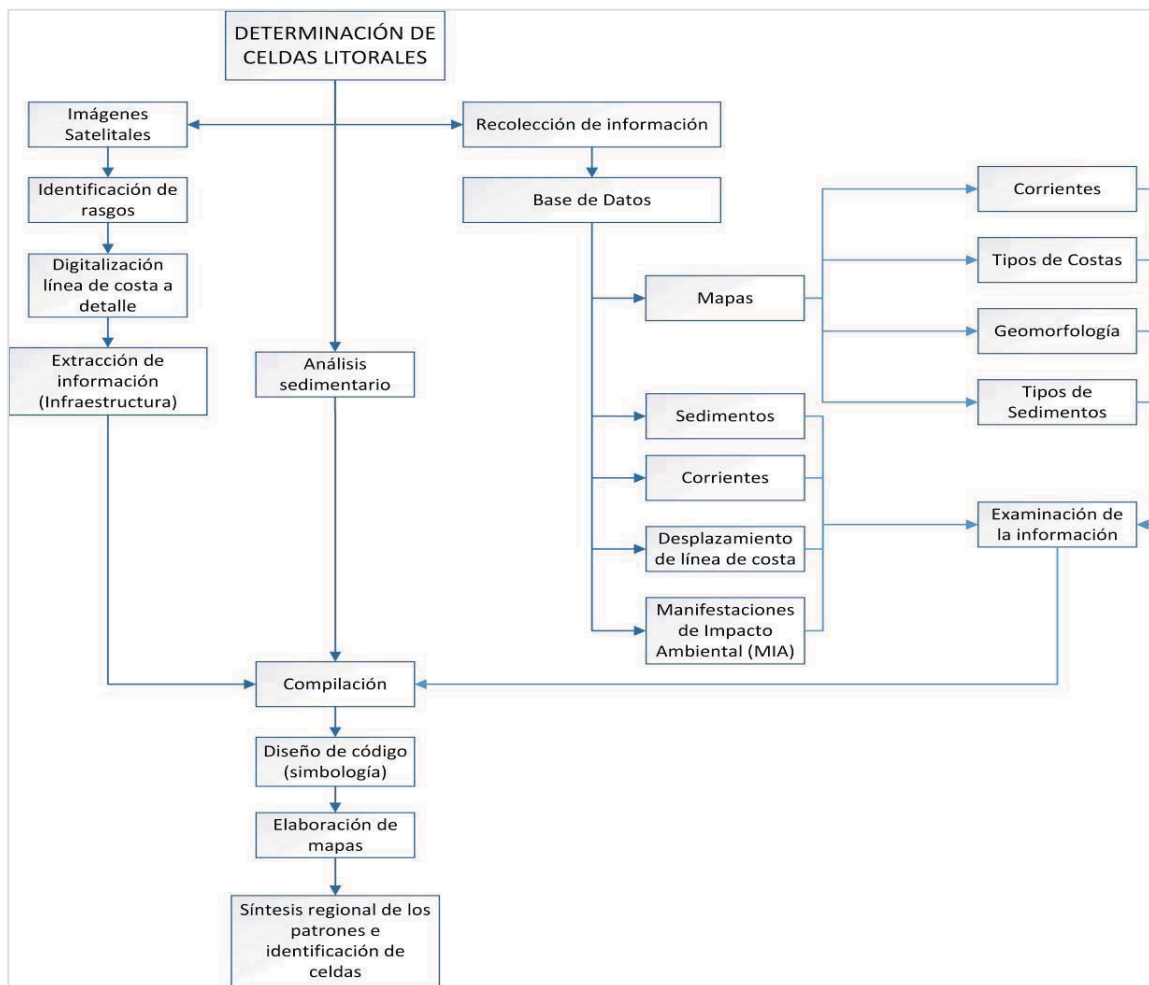


Figura 75. Esquema metodológico para la determinación de las celdas litorales del Estado de Campeche

Posteriormente, en cada celda litoral definida se identificarán los problemas asociados a la erosión y se evaluará la vulnerabilidad de la población.

La metodología empleada para la determinación de las celdas litorales será capaz de reconocer que los sistemas costeros comprenden una serie de unidades interrelacionadas y vinculadas por procesos de transferencia sedimentaria que operan sobre diferentes escalas espaciales y temporales. La diferenciación del equilibrio y comportamiento es crítica para comprender las implicaciones y los efectos asociados con la interferencia humana (estructuras de protección costera) o el cambio natural progresivo que afecta las condiciones de los límites de las celdas (Bray et al., 1995).

Este tipo de estudios beneficia el entendimiento de problemas específicos que integran una extensa base de información para vincular procesos y ofrecer una perspectiva más amplia de las interconexiones.

5.3 EVALUACIÓN DE CELDAS LITORALES PARA EL LITORAL DEL ESTADO DE CAMPECHE

1) Análisis de información bibliográfica

Se realizó una recopilación de información bibliográfica sobre aspectos del litoral del estado de Campeche, entre ellos: sedimentos, corrientes, desplazamiento de línea de costa entre otros. La información fue analizada y compilada en base de datos que sirvieron para la elaboración de 11 mapas de: tipos de costas, unidades geomorfológicas, distribución geográfica de sedimentos, circulación costera, vientos, subsistemas ecológicos, velocidad y dirección de las corrientes a lo largo de la costa, distribución generalizada de los sedimentos y origen de los sedimentos.

Para la digitalización, el shape del estado de Campeche fue exportado a formato *.dwg; posteriormente la información digitalizada se georreferenció en el software AutodeskTM Autocad 2013 y posteriormente proyectados en el software ArcGIS 10.1.

2) Base de datos

Con la información recopilada se realizaron las siguientes bases de datos:

- Desplazamiento de línea de costa

Se identificaron las zonas donde se ha registrado el desplazamiento de la línea de costa, así como el periodo de registro. En la Tabla 9 se presenta un fragmento de la información obtenida.

Tabla 9. Base de datos de desplazamiento de la línea de costa (fragmento).

- Corrientes

Zona	Periodo	Desplazamiento	Autor	Trabajo	Año	Imagen
Punta disciplina	1974 - 2008	-581.9	Torres Rodríguez, V., A. Márquez	Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático en Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático	2010	
Playa norte	1974 - 2005	-8.1	García, A. Bolongaro			
Club de playa	1974 - 2007	-171	Crevenna, J. Chavarria			
CASES	1974 - 2007	-117.7	Hernández, G. Expósito Díaz			
Isla Aguada	1974 - 2005	-5.7	y E. Márquez García en A.V.			
Sabancuy	1974 - 2005	-211.2	Botello, S. Villanueva-			
Punta de Xen	1974 - 2002	-124.6	Fragoso, J. Gutiérrez, y			
Champotón	1974 - 2006	-77.2	J.L. Rojas Galaviz (ed.).			

Se identificó la dirección de las corrientes para diferentes periodos. (Tabla 16).

Tabla 10. Base de datos de corrientes (fragmento).

Zona	Tipo de Corriente	Dirección	Velocidad
Capa de 4 a 20 m	Giro ciclónico	Al suroeste	0.20 m/s
Capa de 4 a 20 m	Giro ciclónico	Al sur	0.27 m/s
Capa de 4 a 20 m	Giro anticiclónico	Al norte	0.19 m/s

- Manifestación de Impacto Ambiental

De la página de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se obtuvieron 850 gacetas ecológicas para el periodo 2003 – 2017. Cada gaceta fue revisada y se obtuvieron los proyectos ingresados y la emisión de resolutivos de los evaluados. Con esta información se elaboró una primera base.

Posteriormente, la información fue filtrada basándose en los documentos disponibles para su consulta; obteniéndose una base de datos refinada que incluye la siguiente información por proyecto: clave, promovente, año, proyecto, modalidad, fecha de ingreso, fecha de resolución, vigencia, descripción, ubicación y coordenadas UTM; en la Tabla 11 se presenta un fragmento de la información.

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

Tabla 11. Base de datos de Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) (fragmento).

Clave	Municipio	Promoviente	Proyecto	Modalidad	Fecha de ingreso	Fecha de Resolución	Vigencia	Descripción	X	Y	UBICACIÓN
04CA2010HD006	CARMEN	ERNESTO ANTONIO MANJARREZ ALEGRÍA	DRAGADO DE SANEAMIENTO DE LA LAGUNA UBICADA EN EL KM 14 + 500 EN LA CARRETERA A CARMEN-PUERTO REAL EN CARMEN, CAMPECHE.	MIA.- PARTICULAR	01-MAR-10	24-MAY-10	NO APLICA	SE REALIZARÁ UN DRAGADO EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634119.4	2065670.72	SE LOCALIZA EN UN ÁREA UBICADA EN EL KM 14+500 DE LA CARRETERA CARMEN - PUERTO REAL, EN UN PUNTO NATURAL QUE FORMA UNA BARRA DE FLUJO DEL ESTERO PARGO, HACIA LA DESEMBOCADURA A LA LAGUNA DE TÉRMINOS EN CD DEL CARMEN
								EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634056.09	2065618.3	
								EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634064.73	2065549.15	
								EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634112.39	2065529.41	
								EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634179.33	2065548.02	
								EN UN SISTEMA DE FORMACIÓN LAGUNAR CON UNA LONGITUD DE 150M Y UNA PROFUNDIDAD QUE VARÍA DE -0.5 A -1.50 MTS A NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.), ÁREA A DRAGAR = 13.135.92 M2; NIVEL A DRAGAR = -2.20 M; VOLUMEN A DRAGAR = 28,899.02 M3 APROX.	634199.64	2065580.09	
04CA2010HD016	CARMEN	MACC SERVICIOS SA DE CV	APROVECHAMIENTO DE ARENA EN PLAYA NORTE, CIUDAD DEL CARMEN	MIA.- PARTICULAR	06-ABR-10	20-ago-10	2	USO DE DRAGA DE SUCCIÓN QUE EXTRAERÁ MATERIAL EN FORMA PROGRESIVA. SE REALIZARÁ EN LA ISOBATA -4 A -6 MSNMM.	622016.56	2064149.87	EN LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN DE PLAYA NORTE, CD DEL CARMEN, ENTRE LA BAJAMAR Y LA PLEAMAR DE LA ZONA LITORAL COMPRENDIDA DENTRO DE LA ZOFEMAT
								USO DE DRAGA DE SUCCIÓN QUE EXTRAERÁ MATERIAL EN FORMA PROGRESIVA. SE REALIZARÁ EN LA ISOBATA -4 A -6 MSNMM.	622023.2	2064120.09	
								USO DE DRAGA DE SUCCIÓN QUE EXTRAERÁ MATERIAL EN FORMA PROGRESIVA. SE REALIZARÁ EN LA ISOBATA -4 A -6 MSNMM.	622254.92	2064172	
								USO DE DRAGA DE SUCCIÓN QUE EXTRAERÁ MATERIAL EN FORMA PROGRESIVA. SE REALIZARÁ EN LA ISOBATA -4 A -6 MSNMM.	622250.87	2064209.48	

La base fue proyectada y georreferenciada por año en ArcGIS, para obtener un mapa (Figura 76), se observa que la zona sur es la que posee la mayor cantidad de proyectos promovidos.

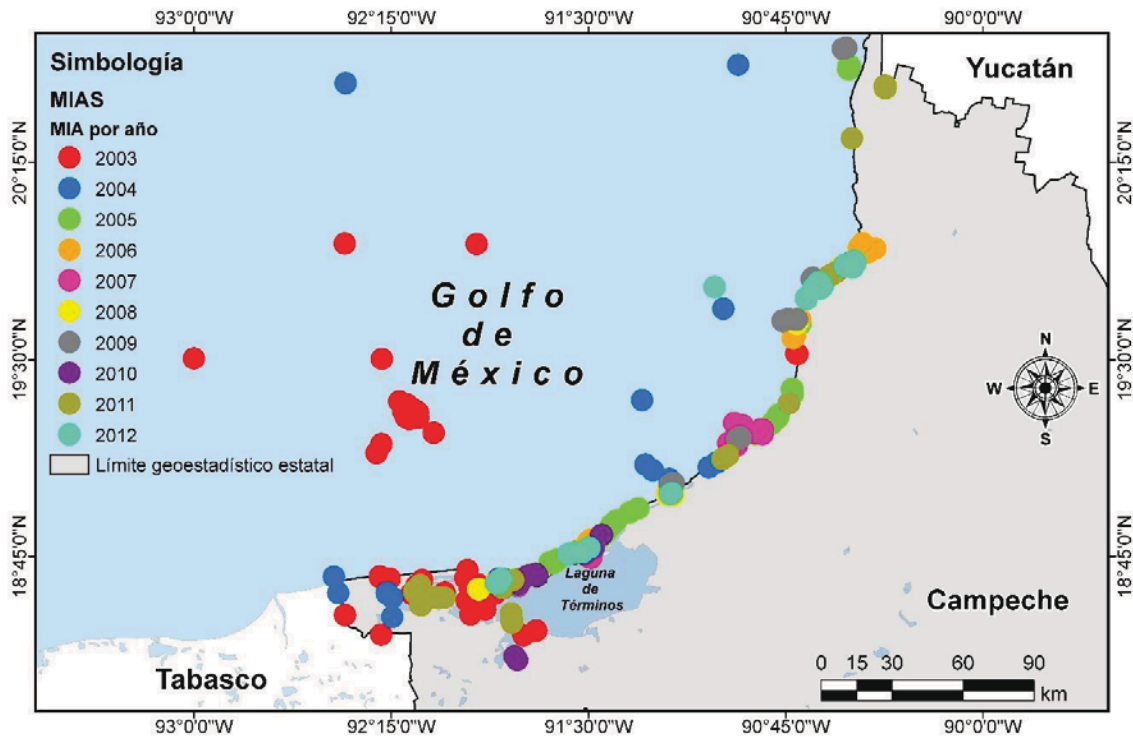


Figura 76. Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIAs) sometidas ante la SEMARNAT para el periodo 2003 - 2012.

- Sedimentos

A partir de información publicada se elaboró la base de datos. Dicha base contiene información referente a: zona de muestreo, coordenadas UTM, tamaño de sedimento en unidades phi y mm, así como la clasificación basado en la escala Udden – Wenworth (Tabla 12).

Tabla 12. Base de datos de sedimento (fragmento).

Zona de muestreo	X	Y	Tamaño (phi)	Tamaño (mm)	Clasificación Udden - Wenworth
16C	554999.1502	2063854.346	6.20	0.01	Limo fino
17C	555820.2714	2067427.639	6.00	0.02	Limo medio
Campechito (11)	556215.0876	2062185.069	2.67	0.16	Arena fina
18C	556428.1371	2072272.529	7.60	0.01	Limo fino
19C	557302.0732	2078991.945	6.30	0.01	Limo fino
1C	583072.7911	2067187.966	5.60	0.02	Limo medio
2C	583566.1419	2070588.483	6.20	0.01	Limo fino
3C	584474.7584	2076104.943	6.80	0.01	Limo fino
4C	585482.9681	2083648.663	6.40	0.01	Limo fino

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

5C	615028.8563	2066293.551	6.70	0.01	Limo fino
6C	615640.0984	2069786.261	5.70	0.02	Limo medio
7C	615921.2432	2073760.216	6.20	0.01	Limo fino
8C	616604.0231	2081306.715	5.00	0.03	Limo medio
9C	617238.2671	2088915.97	5.60	0.02	Limo medio
Playa norte	621336.70	2062999.43	2.68	0.16	Arena fina
Playa norte	621437.42	2063051.75	2.71	0.15	Arena fina
Playa norte	621512.25	2063012.17	2.65	0.16	Arena fina
M5	621794.7954	2063672.958	2.65	0.16	Arena fina
Playa Norte (12)	622234.0496	2064046.139	1.72	0.30	Arena media

En la Figura 77 se observa la variación en el tamaño del sedimento a lo largo del litoral.

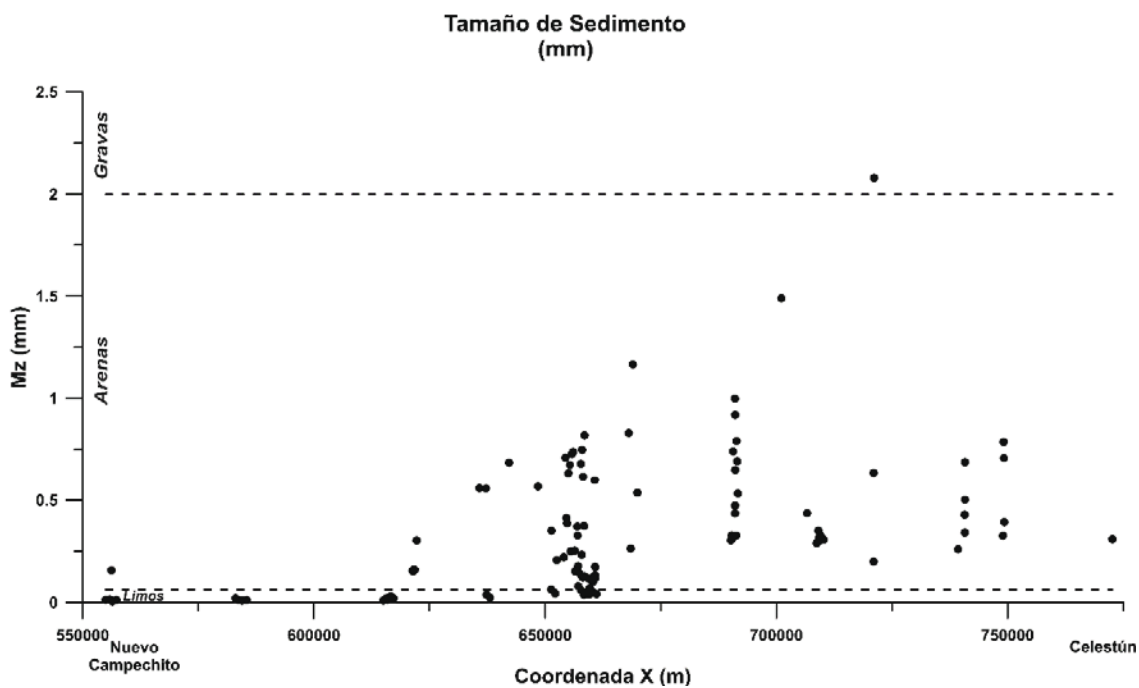


Figura 77. Tamaño de sedimentos muestreados a lo largo del litoral del estado. El eje X toma como referencia las coordenadas UTM en X, mientras que el eje Y representa el valor del tamaño medio del sedimento en mm.

Toda la información fue proyectada y georeferenciada para obtener el siguiente mapa (Figura 78).

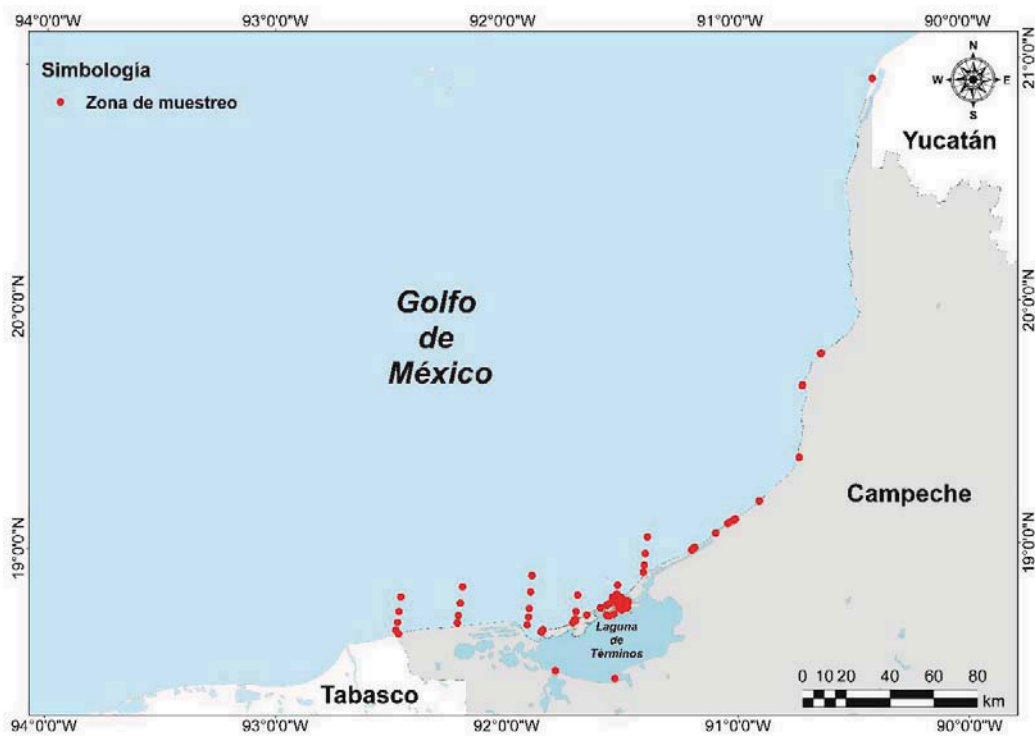


Figura 78. Mapa de distribución de zonas de muestreo de sedimentos.

Así mismo, se recopilaron mapas de Yañez - Arancibia et al (1988) y Machain-Castillo (1999) con información de sedimentos mar adentro que fueron digitalizados para su fácil interpretación.

- Imágenes satelitales

Para un mejor análisis, el litoral del estado se dividió en 4 zonas teniendo como referencia las Áreas Naturales Protegidas (Figura 79): Zona 1: Ría Celestún, Zona 2: Los Petenes, Zona 3: San Francisco de Campeche – Noham y Zona 4: Noham – Laguna de Términos.

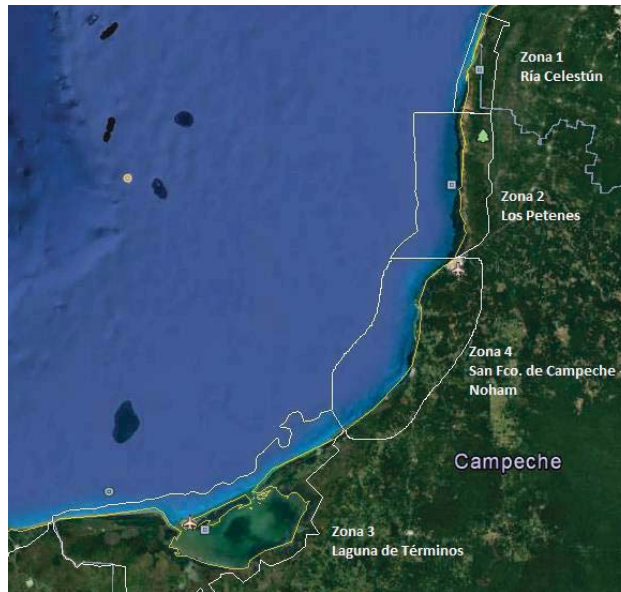


Figura 79. División del litoral para la recopilación de imágenes satelitales.

Se utilizaron imágenes de satélite de una franja de 4 km a partir de la línea de costa hacia tierra adentro, para el periodo 1999 – 2016. Con la información se generó una base de los años con imágenes disponibles para cada zona, así como los cambios observados entre imágenes por zona (Tabla 19).

Tabla 13. Base de imágenes satelitales disponibles (fragmento correspondiente a la zona sur).

FOTO	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	COMENTARIOS
Z3_1																			De 2010 a 2011 construcción de un muelle y crecimiento de mancha urbana.

3) Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes fueron georeferenciadas y se elaboraron mosaicos de la costa por año. Se identificaron los cambios en la línea de costa, así como las fuentes y sumideros. Para el año 2016 se digitalizó la línea de costa a detalle (Figura 80).

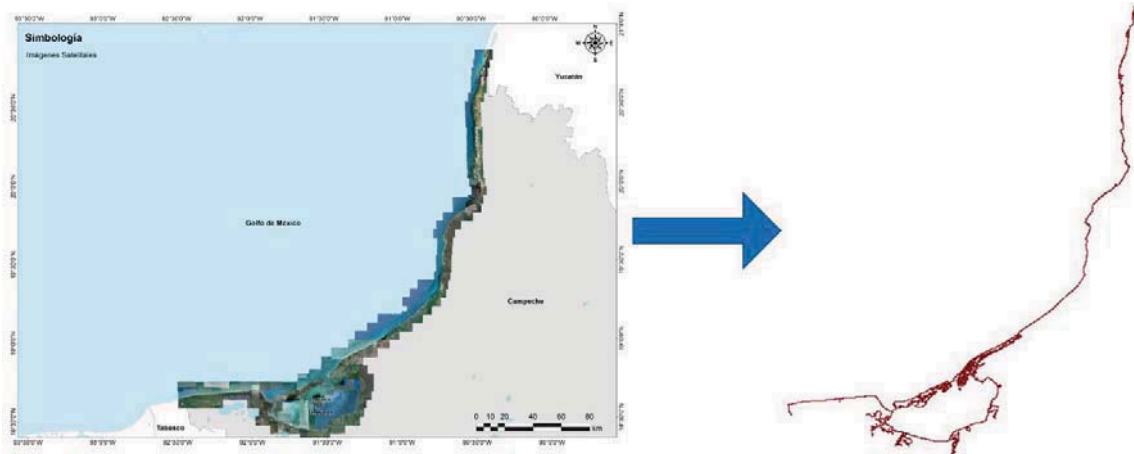


Figura 80. Mosaico de imágenes satelitales y línea de costa digitalizada para el año 2016.

4) Compilación y elaboración de mapas

La información recopilada, así como los mapas fueron digitalizados y colocados en capas a fin de ser sobrepuestos y obtener mapas combinados.

5) Generación código

Con un enfoque sedimentario, se elaboró un código para identificar el tipo de sedimento, dirección de transporte y origen del sedimento (Figura 81). La flecha indica la dirección hacia donde se mueve el sedimento, el color el tipo de sedimento y la letra el origen.

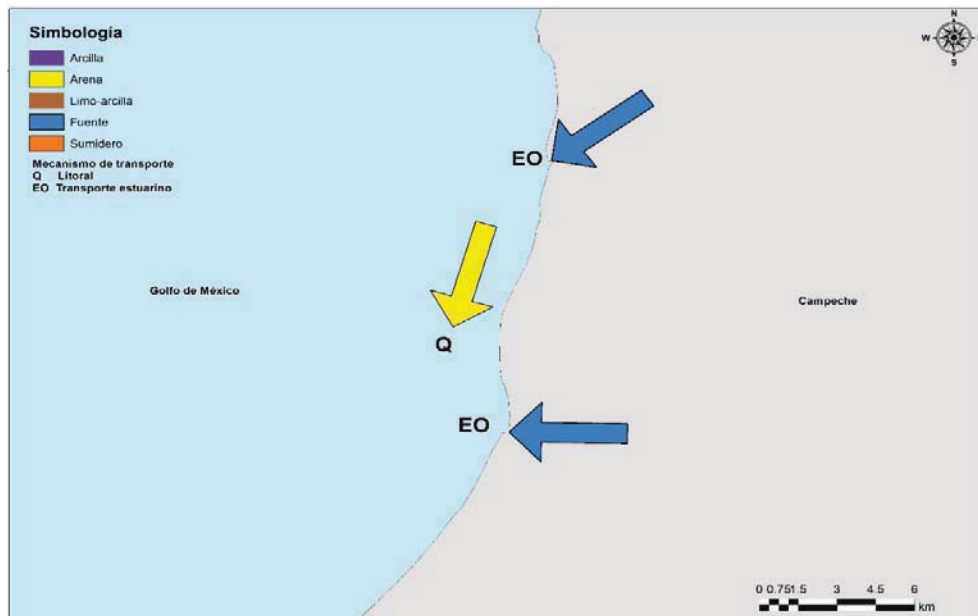


Figura 81. Código generado para indicar dirección, tipo de sedimento y origen.

6) Síntesis a gran escala

Al sobreponer las capas generadas anteriormente, se pudo descartar aquella información repetitiva; por lo que generaron 4 mapas (Figura 82 a Figura 85).



Figura 82. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, tipo de costa y mecanismo de transporte.



Figura 83. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, comportamiento de la costa y mecanismo de transporte.



Figura 84. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, geomorfología, tipo de costa y mecanismos de transporte.

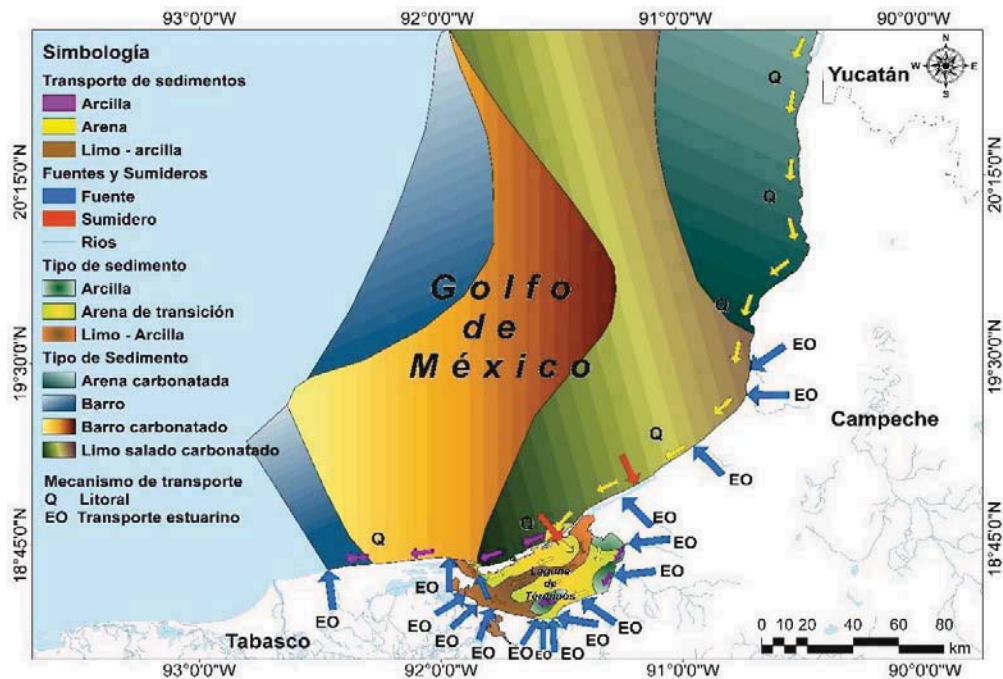


Figura 85. Mapa de síntesis de transporte de sedimentos, fuentes y sumideros, tipo de sedimento y mecanismo de transporte.

7) Delimitación de celdas

Para delimitar las celdas litorales se procedió a:

- Ubicar los límites con base en los siguientes criterios:
 - geomorfología: Se consideró un límite al cambio entre unidades geomorfológicas (Figura 84).
 - comportamiento de la costa: se consideró un límite a la transición entre los sectores que indican una costa acumulativa, avance de la línea de costa o retroceso de la línea de costa.
 - sedimentos: Se tiene en cuenta la variación granulométrica de los sedimentos, lo que indica una transición entre arcilla, arena o limo.
 - obstáculos y cambios en la configuración de la línea de costa: se consideró que un límite se ubicaba en las zonas con puertos, desembocaduras de ríos, bocas de laguna y un cambio abrupto en la configuración de la línea de costa, ya que estos elementos pueden generar cambios en los procesos hidrodinámicos.
- Los límites encontrados fueron sobrepuestos (Figura 86).



Figura 86. Sobreposición de los límites encontrados.

- El tiempo requerido para que ocurra un cambio en la costa, es el criterio para determinar la importancia de un criterio. De mayor a menor importancia se ubican: 1) geomorfología, 2) comportamiento de la costa, 3) sedimentos, 4) obstáculos y cambios en la configuración de la línea de costa.
- Zonas donde coinciden 3 o más límites (criterios) son denominados límite fijo.
- Zonas donde coinciden 2 límites son denominados parciales.
- Zonas con un solo límites se denomina de transición. Sin embargo, si el límite es un rasgo natural (ejemplo: río) o un rasgo geomorfológico se denomina parcial.

Se obtuvieron 4 límites principales, con lo que se definen 3 celdas litorales (Figura 87).



Figura 87. Celdas litorales para el litoral del estado de Campeche.

- Celda Litoral 1

En esta celda se ubican dos zonas naturales protegidas: Ría Celestún y Los Petenes (Figura 88). Es una zona que presenta costa acumulativa y un avance de la línea de costa hacia el mar por sedimentación de acarreo costero; además de se pueden identificar tres unidades geomorfológicas principales: planicie de flechas litorales, planicie palustre salina y planicie cárstica palustre. El sedimento predominante es arena fina.

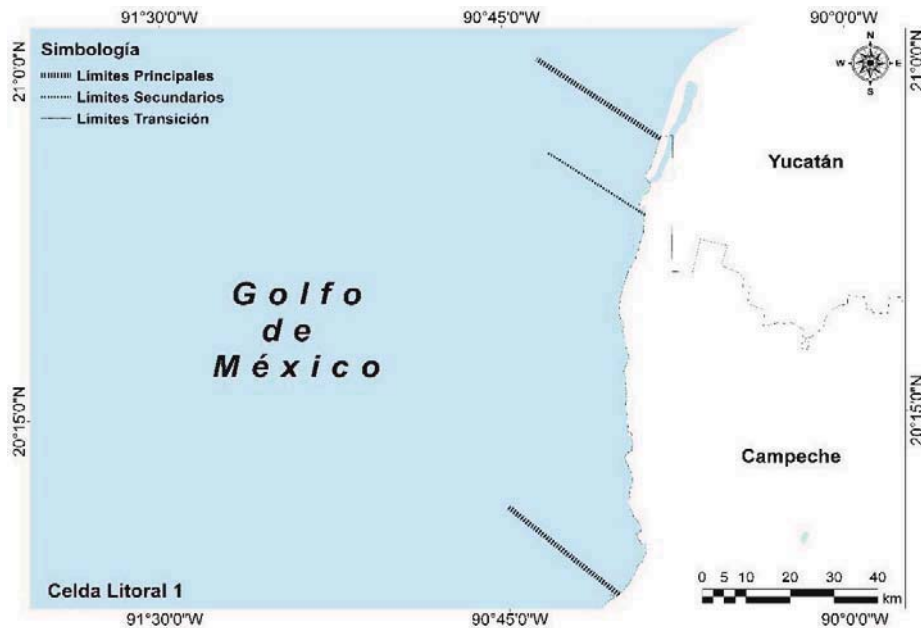


Figura 88. Celda Litoral 1. Comprende las Áreas Naturales Protegidas de Celestún y Petenes.

- Celda Litoral 2

En la Figura 89 se presenta los límites de la Celda Litoral 2; es una zona que en general presenta un tipo de costa abrasivo – acumulativa (mixta), hacia el sur es una zona acumulativa de playas bajas arenosas. Presenta un avance de la línea de costa hacia el mar por emersión y/o sedimentación deltaica, sin embargo, también presenta un retroceso de la línea de costa hacia el continente por sumersión y/o inactividad deltaica, principalmente en la zona sur. Además, se identifican una planicie cárstica bajo influencia litoral y una planicie lacustre marina biogénica. Hacia el límite de la celda (sector sur del estado) se encuentra una porción del Área Natural Protegida Laguna de Términos. El sedimento se identifica en transición de arena gruesa a área media.

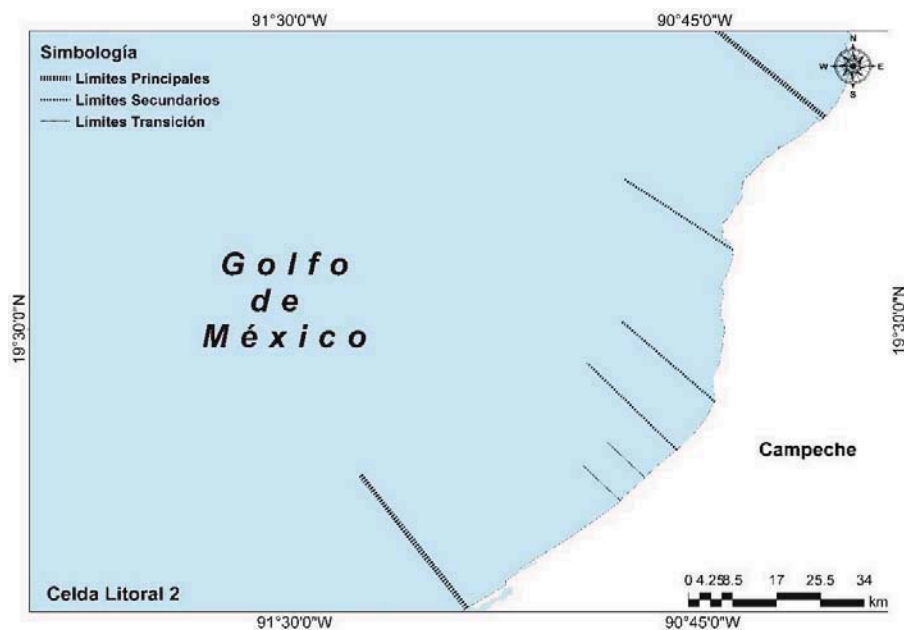


Figura 89. Celda Litoral 2. Comprende de la Ciudad de San Francisco de Campeche a la Boca del Estero de Sabancuy.

- Celda Litoral 3

Presenta un tipo de costa acumulativa de playas bajas arenosas, aunque con un retroceso de la línea de costa hacia el continente por sumersión y/o actividad deltaica. Principalmente se identifica planicie cárstica palustre en combinación con planicie de cordones litorales. El sedimento presenta una variación entre arena gruesa a arena muy fina, así mismo se encuentra sedimento muy fino clasificado como limo. La Figura 90 presenta los límites de esta celda.

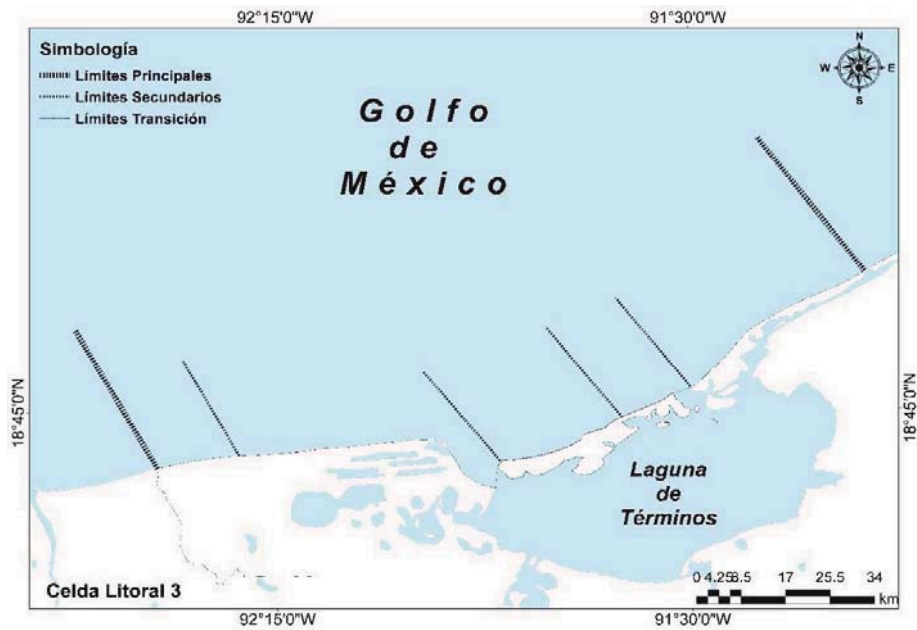


Figura 90. Celda Litoral 3. Comprende de la Boca del Estero de Sabancuy a la desembocadura del Río San Pedro y San Pablo.

6

VULNERABILIDAD COSTERA

6.1 INTRODUCCIÓN

Como se enunció en los apartados anteriores, la vulnerabilidad es definida como el proceso por el cual la población humana y los ecosistemas están sujetos a amenazas debido a factores sociales y biofísicos.

A lo largo del mundo se han realizado estudios que proponen metodologías para analizar y cuantificar la vulnerabilidad costera, enfocadas a la erosión y eventos extremos, aspectos ambientales y desastres naturales.

En cada metodología se consideran diferentes parámetros o variables de índole física y social, así como la aplicación de una expresión matemática que permita expresar cuantitativamente las características de la zona costera.

En este trabajo se analiza y describe la importancia de utilizar 15 variables; así mismo se presentan los enfoques con los cuales se evalúa la vulnerabilidad costera: suma de productos y Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP, siglas en inglés).

6.2 ENFOQUE EVALUATIVO

Para evaluar la vulnerabilidad costera se aplicó de forma generalizada la suma de productos. En primera instancia se modificó la formulación original propuesta por Gornitz et al. (1994). Al pasar de 8 variables a 15 variables; estas variables consideran aspectos físico - ambientales de la zona como aspectos socioeconómicos de la población ubicada en la franja litoral.

Así mismo el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) se calculó bajo dos enfoques como se explica en las secciones 6.4.1 y 6.4.2. Para ambos enfoques se requirió de forma general seguir el método que se resume en la Figura 91.

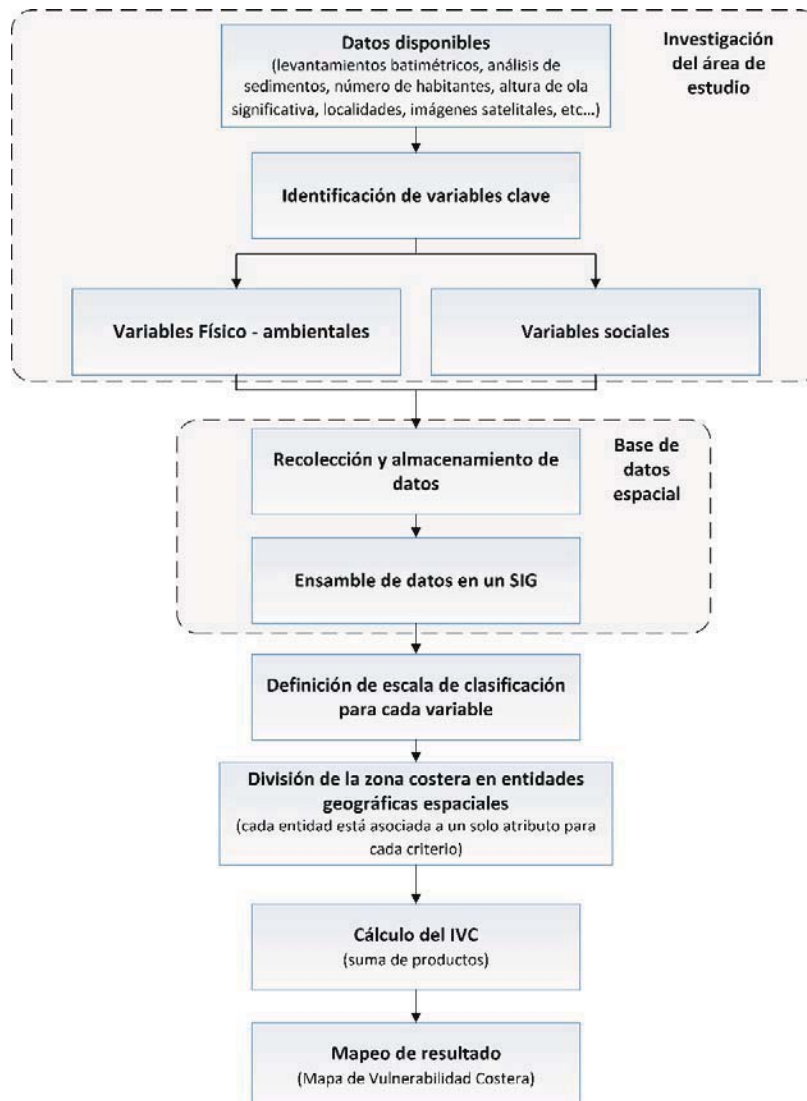


Figura 91. Diagrama de flujo que resume la metodología aplicada en este estudio para el cálculo del índice de Vulnerabilidad Costera (IVC).

La primera parte se refiere a investigaciones preliminares en la zona costera, analizando los diferentes criterios que intervienen en el proceso costero, incluidos criterios físicos y sociales. En total se seleccionaron 15 variables, cuyos parámetros se derivaron de la adquisición, análisis y procesamiento de base de datos asociadas a sistemas de información geográfica (SIG), datos de teledetección, modelado numérico y datos de campo. El número y la tipología de las variables clave se pueden modificar de acuerdo al área de estudio, las necesidades específicas de la zona y los datos disponibles (De Serio et al., 2018; Ramieri et al., 2011; Shanganlall et al., 2019). En este estudio se considera que las variables físicas y sociales tienen la misma contribución en la vulnerabilidad, sin embargo, es necesario la asignación de puntajes o valores de clasificación. Se generaron bases de datos que fueron proyectadas en un SIG, estas bases incluyen información cuantitativa y cualitativa; a los valores cuantitativos se les asignó una clasificación, mientras que a las variables cualitativas se clasificaron de acuerdo con la característica que

representan. Posteriormente se dividió el área de estudio en segmentos para una mejor interpretación de las variables; finalmente se calculó el Índice de Vulnerabilidad Costera y se elaboró un mapa.

6.3 VARIABLES, INFORMACIÓN Y BASE DE DATOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para la evaluación de la vulnerabilidad se han generado diferentes metodologías, cada una considera variables físicas y sociales propias de la región en estudio, así como una formulación basada en la propuesta por Gornitz et al. (1994). En la Tabla 14 se presenta las metodologías consultadas, señalando el área de estudio, las variables consideradas en el análisis, la formulación y los niveles de vulnerabilidad encontrados. Se observa que, tanto el número de variables como los niveles de vulnerabilidad encontrados varían acorde al autor y las variables; sin embargo, se identifican 3 niveles de vulnerabilidad en todos los autores: baja, moderada y alta. En la Figura 92 se presentan las variables consideradas para este estudio.

Tabla 14. Metodologías analizadas para evaluar la vulnerabilidad costera en diferentes zonas costeras.

Autor	Área de estudio	Variables	Formulación	Niveles de vulnerabilidad
Nageswara Rao et al., 2008	Costa de Andhra Pradesh, India	Geomorfología costera, pendiente costera, cambios en la línea de costa, rango de marea viva, altura de ola significativa	$CVI = 4g + 4s + 2c + t + w$	Bajo Moderado Alto Muy Alto
Sankari et al., 2015	Costa Cuddalore – Pichavaram, Tamil Nadu, India	Geomorfología, uso de suelo, batimetría, pendiente costera, cambios en la línea de costa, rango de marea media	$CVI = \sqrt{\frac{(a * b * c * d * e * f)}{6}}$	Muy baja Baja Moderada Alta Muy alta
Denner et al., 2015	Costa del estuario Loughor, Gales del Sur	Ancho de playa, ancho de duna, distancia de vegetación detrás de la playa, pendiente costera, porcentaje de afloramiento rocoso	$CVI = a + b + c + d + e + f + g$	< 12 Muy baja 12 to 15 Baja 15 to 18 Moderada 18 to 22 Alta 22 to 28 Muy alta
Cruz, 2016	Costas mexicanas	Material de vivienda, tipo de infraestructura, densidad de población, tipo de costa, distancia, cota de elevación, protección artificial, manglar, vegetación, duna, arrecife de coral, altura de duna	$IVP = 12 * ICE + 11 * ID + 10 * IDP + 9 * ITI + 8 * IMV + 7 * IAD + 6 * IDC + 5 * ITC + 4 * IPA + 3 * IM + 2 * IV + 1 * IAC$	$IVP \leq 30$ Vulnerabilidad Baja $30 < IVP \leq 50$ Vulnerabilidad Moderada $51 < IVP \leq 71$ Vulnerabilidad Alta
Ashraful et al., 2016	Costa deltaica del Ganges, Bangladesh	Geomorfología, pendiente costera, tasa de cambio de línea de costa, tasa de cambio del nivel del mar, rango medio de marea,	$CVI = \sqrt{\frac{(a * b * c * d * e * f * g)}{7}}$	Muy baja Baja Moderada Alta Muy alta

		batimetría, altura de marea de tormenta		
Martínez-Graña et al., 2016	Algarve Central, Sur de Portugal	Litología, geomorfología, pendiente, altura, distancia, batimetría, costa, altura de ola significativa, nivel del mar y rango de marea extrema	$AVI = \sqrt{\frac{Fl \times Fg \times Fs \times Fh \times Fd \times Fb \times Fc \times Fw \times Fsl \times Ftr}{10}}$	Muy Baja Baja Media Alta Muy Alta
Núñez et al., 2016	Litoral tabasqueño, México	Geomorfología/geología, erosión, pendiente costera, cambio del nivel del mar, oleaje medio significativo y rango mareal	$CVI = \sqrt{\frac{a * b * c * d * e * f}{6}}$	Baja Media Alta Muy Alta

6.3.1 Definición de variables y su evaluación

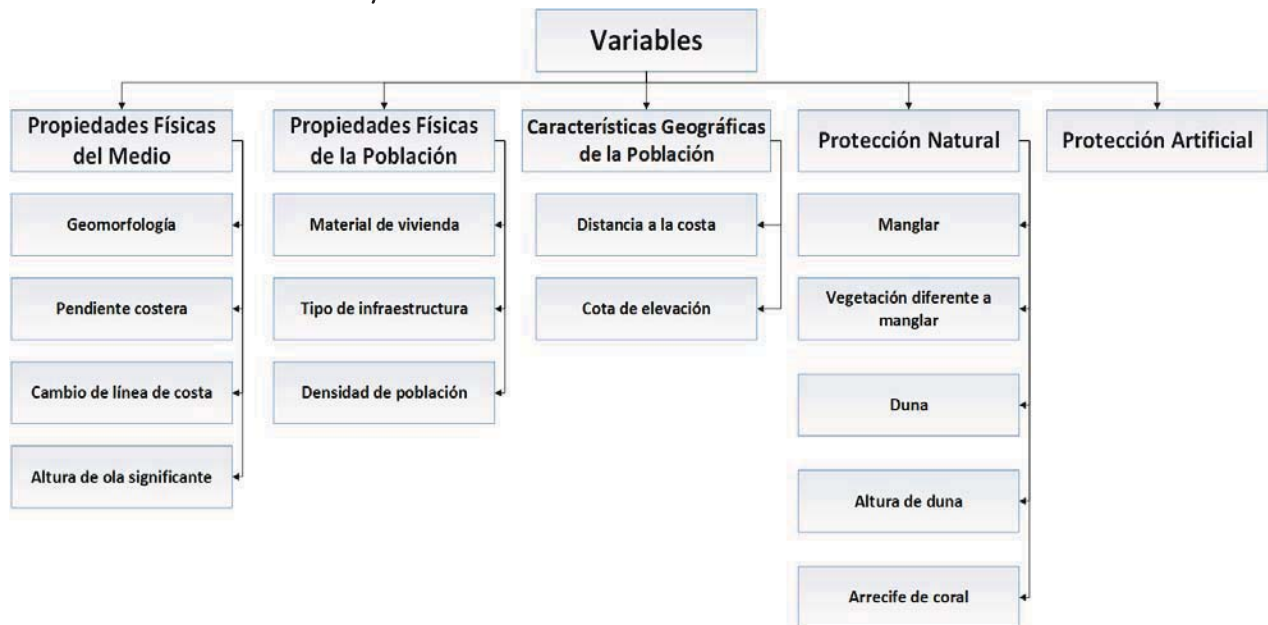


Figura 92. Variables seleccionadas para el análisis de la vulnerabilidad.

A continuación, se describen las variables seleccionadas para este estudio, su clasificación y base de datos generada para la zona de estudio:

- **Geomorfología:** La morfología de la costa está conformada por características tectónicas y estructurales, por la naturaleza de la roca que forma la costa, por la actividad erosiva y de depositación. Desempeña un papel pertinente en la determinación de la respuesta de la costa al aumento del nivel del mar, ya que expresa la erosión relativa y el grado de resistencia de las diferentes formas del relieve y los materiales que la componen (Thieler & Hammar-Klose, 1999); es decir determina la respuesta de una costa ante perturbaciones y su grado de resistencia a la erosión (Thieler & Hammer - Klose, 2008). Por ejemplo, los acantilados rocosos ofrecen una resistencia máxima y, por lo tanto, son mucho menos vulnerables; por otro lado, las formas

arenosas y lodosas como las dunas ofrecen la menor resistencia y, por lo tanto, son extremadamente vulnerables (Murali et al., 2013).

Las imágenes de satélite han demostrado que en área de estudio predominan las playas, las dunas de arena, los estuarios (costas de fango) y los acantilados. Debido a la presencia de estuarios y playas en el sur de Campeche, esta región se encuentra principalmente bajo la vulnerabilidad alta y muy alta.



Figura 93. Clasificación de la variable geomorfología.

- **Pendiente costera:** También llamada inclinación o planitud de la región costera, se define como la relación entre el cambio de altitud y la distancia horizontal entre dos puntos en la costa perpendicular a la costa. La susceptibilidad de la costa debido a la inundación y la pérdida de tierra es una función directa de la pendiente costera (Murali et al., 2013; Thieler & Hammar-Klose, 2000). Por lo tanto, en una costa escarpada, la consecuencia del aumento del nivel del mar o de las tormentas sería insignificante, al contrario de una costa de pendiente suave, donde cualquier aumento en el nivel del mar inundaría grandes extensiones de tierra (Nageswara Rao et al., 2008). Algunos indicadores de esta variable son la medición de la pendiente, inclinación, gradiente o grado de una línea recta (Sankari et al., 2015). La pendiente es un componente vital en el cálculo del IVC ya que refleja el gradiente topográfico de un área (Ashraful Islam et al., 2016).

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución de 20 m proporcionado por el Área de Procesos Costeros e Hidrológicos del Instituto EPOMEX (Posada et al., 2013) se utilizó para preparar el mapa de vulnerabilidad debido a la pendiente. La pendiente para toda el área de estudio se calcula en el entorno de ArcGis. La capa de pendiente se clasifica adicionalmente según los criterios de clasificación, obteniendo cinco clases de significancia en la región.

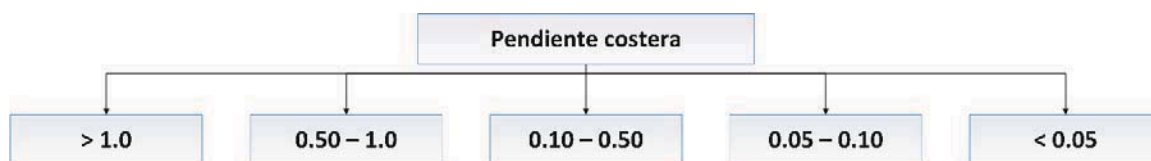


Figura 94. Clasificación de la variable pendiente costera.

- **Cambio de línea de costa:** Las costas por ser de naturaleza dinámica, siempre están sujetas a cambios espacio temporales asociados a procesos costeros (Ashraful Islam et al., 2016; Bird, 1993; Carter, 1988; Kumar et al., 2010). Los cambios dependen principalmente de las características de las olas, la circulación cercana a la costa, el transporte litoral y las formas de la playa (De Serio et al., 2018). En el contexto de la vulnerabilidad costera, las costas crecientes se consideran menos vulnerables, ya que resultan de la adición de áreas terrestres al moverse hacia el océano. Por otro lado, las costas erosionadas se consideran altamente vulnerables debido a que se asocian a la

pérdida de recursos naturales y artificiales. Contrastar el estado de una costa en diferentes fechas permite determinar su comportamiento natural; por ejemplo, si es erosiva, estable o progradante, y mejorar la predicción de su respuesta ante eventos extremos (Nageswara Rao et al., 2008).

Las imágenes satelitales de LANDSAT para el período 1994 – 2018 se han utilizado para extraer la costa. Las costas extraídas se vectorizaron en ArcGis. Las tasas de cambio de la línea de costa se calcularon usando el *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) versión 4.3, una extensión de ESRI ArcGIS (Thieler et al., 2009). Los transectos en tierra se colocaron en un intervalo de 100 m cada uno a lo largo de la costa (Ver Sección 5.3.2). La herramienta DSAS calcula varias estadísticas que son útiles para comprender las tendencias de la costa de una perspectiva temporal (Murali et al., 2013). Basado en la tasa de cambios en la línea de costa del método de tasa de punto final (EPR, siglas en inglés), los tramos costeros se han clasificado en cinco categorías.



Figura 95. Clasificación de la variable cambio de línea de costa.

- **Material de vivienda:** La escala de vulnerabilidad cambia con las personas y los hogares, ya que abarca la respuesta al riesgo y el potencial para reaccionar y resistir un desastre (Kumpulainen, 2006). Para la construcción de la matriz de vulnerabilidad, Saxena, et al. (2013) considera viviendas vulnerables y viviendas en zonas vulnerables para la evaluación de la vulnerabilidad en la costa de Cuddalore en Tamil Nadu, India.

En el caso de los peligros naturales, como la inundación costera, la exposición está dada por todos los elementos que se verían afectados por el escenario de peligro seleccionado, cada uno de estos elementos respondería al peligro de acuerdo con su vulnerabilidad; por ejemplo, una casa de madera es más vulnerable a la inundación que un edificio de concreto (Dall’Osso & Dominey-Hoes, 2013). En Australia, la metodología de Vulnerabilidad Costera a Múltiples Fuentes de Inundación (COVERMAR, siglas en inglés) aplicada en Nueva Gales del Sur (NSW) analiza el grado de vulnerabilidad de los edificios o infraestructura que se inundarían, o que podrían sufrir daños estructurales debido a la erosión costera (Dall’Osso & Dominey-Hoes, 2013). En los últimos años se han desarrollado métodos para evaluar la vulnerabilidad de los edificios y la infraestructura ante inundaciones extremas (Messner et al., 2007; Middelman-Fernandes, 2010; Nielsen et al., 1992; Papatoma, 2003; Penning-Rowell et al., 2003; Pistrika & Jonkman, 2010; Suleman et al., 1988). Finalmente, Dias et al (2009) analiza el daño completo de dos clases principales de edificios: (a) edificios con más del 50% de materiales de construcción “permanentes”, y (b) edificios con menos del 50% de materiales de construcción “permanentes”; por otro lado Koshimura et al (2009) clasificaron edificios afectados en viviendas de madera de baja altura, construcción de madera y estructuras de concreto reforzado no ingenieriles. Aquí se considera la vivienda en dos categorías: (a) concreto y (b) madera y otros materiales, toda vez que se ha demostrado que las construcciones de concreto, con buenos cimientos, son más resistentes a la presión lateral que ejercen el agua y el viento que aquellas construidas de materiales perecederos (cartón, lámina, madera) (Angelotti, 2014; Cruz, 2016).



Figura 96. Clasificación de la variable material de vivienda.

- **Tipo de infraestructura:** McLaughlin et al (2002) utilizaron el asentamiento como una variable en el cálculo del índice de vulnerabilidad a lo largo de la costa de Irlanda del Norte. Se supone que la proximidad de una ciudad es más vulnerable en comparación con la de una aldea (Mahapatra et al., 2015). Aquí se consideró como tipo de infraestructura y la clasificación se basa en el hecho de que un asentamiento es rural cuando tiene una población menor a 2500 habitantes y, urbano cuando tiene una población mayor o igual a 2500 habitantes (Cruz, 2016; INEGI, 2010); así mismo se relaciona al nivel socioeconómico de una población con las posibilidades de prevenir, reaccionar o recuperarse de daños causados por fenómenos hidrometeorológicos extremos (Jacob, 2010).



Figura 97. Clasificación de la variable tipo de infraestructura.

- **Densidad de población:** Los datos de la población son esenciales para comprender el efecto y la dimensión del desastre natural. La vulnerabilidad de los seres humanos se considera una condición social o una medida de la resistencia de la sociedad ante un desastre (Mani Murali et al., 2013). El objetivo es identificar áreas donde las poblaciones son desproporcionadamente susceptibles a los impactos del desastre, ya que el incremento en la densidad de población en zonas vulnerables incrementa su exposición a eventos extremos y representa una mayor probabilidad de daños en los primeros kilómetros de costa (CEPAL, 2012). Aquí, se consideran los datos del censo de 2015 (INEGI, 2015a) y el área de las áreas geoestadísticas básicas (AGEB) para encontrar zonas con una mayor distribución de la población en comparación con otras. Se calculó la densidad de población, dividiendo el número de habitantes entre los metros cuadrados del AGEB correspondiente y se clasifica como dispersos con una población menor que 3000 habitantes por kilómetro cuadrado y concentrada con una población igual o mayor que 3000 habitantes por kilómetro cuadrado de acuerdo con Cruz (2016).

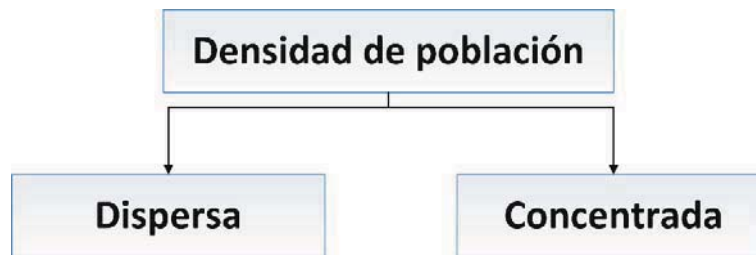


Figura 98. Clasificación de la variable densidad de población.

- **Distancia a la costa:** Está estrechamente relacionada con la altura y la pendiente, la distancia considera la distancia lineal entre la línea de costa actual y el asentamiento situado a una altura de 10 m, cuyo contorno se deriva del procesamiento digital del MDE. Esta variable estima la capacidad del agua de mar para avanzar tierra adentro desde la costa actual, siempre que haya una continuidad espacial con el mar (Martínez-Graña et al., 2016). Las poblaciones humanas históricamente más afectadas por desastres naturales, en términos de pérdidas humanas y económicas, están ubicadas en una franja costera de un kilómetro tierra adentro a partir de la línea de costa (CEPAL, 2012; Cruz, 2016).



Figura 99. Clasificación de la variable distancia a la costa.

- **Cota de elevación:** Permite identificar la vulnerabilidad de una población y compararla con otras regiones. Actualmente, el 10% de la población mundial reside en zonas costeras que presentan una elevación inferior a 10 msnm (Silva et al., 2014).



Figura 100. Clasificación de la variable distancia a la costa.

- **Manglar:** Los manglares contribuyen a la protección costera al reducir la energía de las olas, aumentar la sedimentación y/o reducir la erosión y el movimiento de los sedimentos (Gedan et al., 2011; Shepard et al., 2011). También se ha documentado el papel protector de los manglares durante eventos extremos (Spalding et al., 2014). Las mareas de tormenta pueden ser ralentizadas por amplios tramos de manglar: se han registrado tasas de reducción de la altura de la marejada a entre 4 y 48 cm por kilómetro de paso a través del manglar, por lo que puede tomar varios kilómetros de manglar para tener un gran impacto en cualquier tormenta grande (Krauss et al., 2009; McIvor et al., 2012; Spalding et al., 2014; Zhang et al., 2012). Sin embargo, existe un consenso cada vez mayor de que los manglares atenúan la acción de las olas y reducen el

movimiento de escombros durante los principales riesgos naturales (Alongi, 2008; Wolanski, 2007), es decir, los manglares proporcionan una protección significativa; dicha capacidad está determinada por su estado de conservación, estructura y localización (Cruz, 2016; Lara-Lara et al., 2008).

Los manglares se encuentran en primera línea en términos de su posición en relación con muchos peligros costeros. El hecho de que prosperen en muchos entornos costeros da alguna indicación de su capacidad para hacer frente a tales peligros, o al menos para recuperarse de los principales impactos. Los manglares a menudo modifican las costas a través de su capacidad para atenuar las olas, capturar sedimentos y construir suelos, y son estas mismas propiedades las que los hacen importantes en términos de reducción de la intensidad del peligro en los márgenes terrestres y disminución de la exposición. También brindan muchos beneficios asociados que pueden ayudar a reducir la vulnerabilidad de las comunidades costeras y respaldar la recuperación después de los impactos de los peligros (Spalding et al., 2014b). Aquí se consideran dos categorías: con y sin manglar.



Figura 101. Clasificación de la variable manglar.

- **Vegetación diferente a manglar:** Según estudios y resultados científicos, la presencia de vegetación en las zonas costeras mejora la estabilidad de la pendiente, consolida los sedimentos y reduce la energía de las olas que se mueven en tierra; por lo tanto, protege la costa de la erosión (Clark, 1995; French, 2001). La relación entre plantas y dunas es recíproca y compleja (Miller, 2015; Stallins & Parker, 2003). Se cree que las plantas controlan el movimiento de la arena y determinan la forma y posición de las dunas (Moreno-Casasola, 1986). Algunas plantas se han asociado con la acumulación de dunas (Bitton & Hesp, 2013), mientras que otras plantas pueden dificultar la formación de dunas, promoviendo áreas más bajas y más planas de interdunas (Ehrenfeld, 1990; Wolner et al., 2013). De hecho, la presencia de vegetación es útil para disipar la energía de las olas y reducir la erosión en caso de eventos extremos (Pantusa et al., 2018). Por esta razón, la vegetación es importante para la protección a largo plazo de la playa, el entorno natural, las propiedades y el hogar de las personas (Mackay, 2017). En el área de estudio se pueden encontrar vegetación de dunas, humedales herbáceos, selvas inundables, entre otros; que ofrecen servicios de protección al funcional como barrera de protección natural (Furukawa et al., 1997). Aquí se consideran dos categorías: con y sin vegetación.

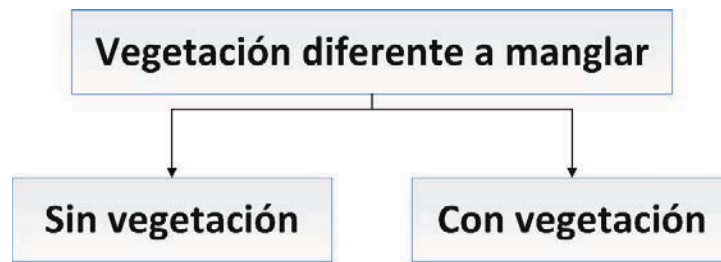


Figura 102. Clasificación de la variable vegetación diferente a manglar.

- **Presencia de duna:** Funcionan como reserva de sedimentos ya que reciben, proveen y almacenan arena transportada de y hacia playas adyacentes (Ranwell & Rosalind, 1986). Por lo tanto, tienen un papel importante en la estabilidad de la línea de costa. Además, el suministro periódico de arena de la duna a la playa es el ciclo de retroalimentación que reduce la erosión costera y disipa la energía del oleaje. La interrupción o disminución del balance de arena puede provocar la desaparición de playas (Nordstorm et al., 1990).

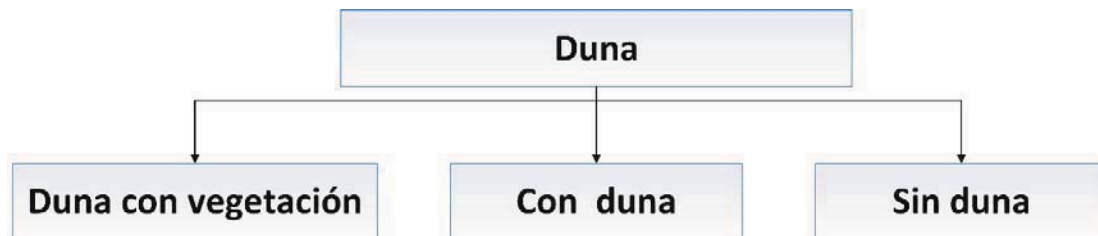


Figura 103. Clasificación de la variable duna.

- **Altura de duna:** Proporciona un servicio de regulación como la protección a inundaciones ocasionadas por las olas, define la defensa ante fenómenos hidrometeorológicos extremos e inundaciones (Agardy et al., 2003; Jiménez-Orocio et al., 2014; Martínez et al., 2004; Ranwell & Rosalind, 1986) y define la protección de los bienes detrás de ella. En México, alrededor de 3,944,957 personas viven sobre dunas costeras (Jiménez-Orocio et al., 2014).

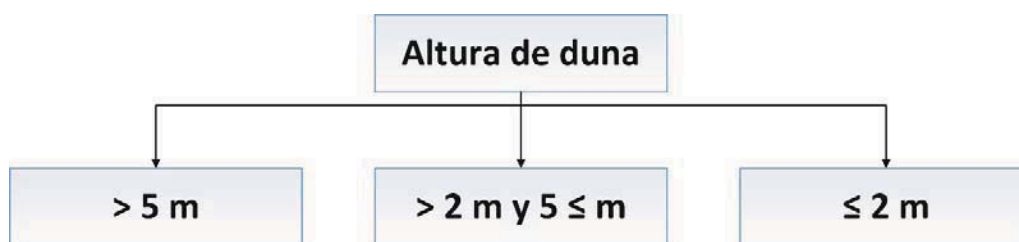


Figura 104. Clasificación de la variable altura de duna.

- **Arrecife de coral:** Los arrecifes de coral son particularmente importantes para la pesca y el turismo, pero también contribuyen a la protección costera y en algunos lugares tienen valores culturales significativos (Cinner et al., 2013). Por lo tanto, comprender el papel de los arrecifes de coral en la protección es fundamental (Kennedy et al., 2013). Ferrario et al (2014) estiman que hay hasta 197 millones de personas que viven por debajo de los 10 m de altitud y a menos de 50 km de un arrecife, y que pueden recibir beneficios de reducción de riesgos; pero si sólo se

consideran áreas dentro de 10 km y por debajo de los 10 m de elevación, todavía hay unos 100 millones de personas que pueden recibir beneficios de reducción de riesgos por arrecife.

Los resultados combinados a través de diversos estudios muestran que los arrecifes de coral disipan el 97% de la energía de las olas que de otro modo impactarían en las costas, todo el arrecife disipa la energía con un efecto lineal desde pequeñas olas a nivel de huracanes. El efecto de la cresta del arrecife en la reducción de las olas no es lineal y se intensifica a medida que aumenta la energía de las olas incidentes. Estos efectos son críticos para la reducción de la exposición; los arrecifes son relevantes para la reducción del riesgo incluso durante eventos extremos (Ferrario et al., 2014), son un sistema de protección natural de otros ecosistemas y de las poblaciones urbanas porque disminuye la energía del oleaje que impacta en la infraestructura costera (Wielgus et al., 2010); y se ha demostrado que tienen una influencia importante en la reducción de la erosión costera (Sheppard et al., 2005; Spalding et al., 2014). Además, los arrecifes son fuente de sedimento biogénico a través de procesos hidrodinámicos (olas, corrientes, mareas) que permiten la formación de playas (Huang et al., 2007).

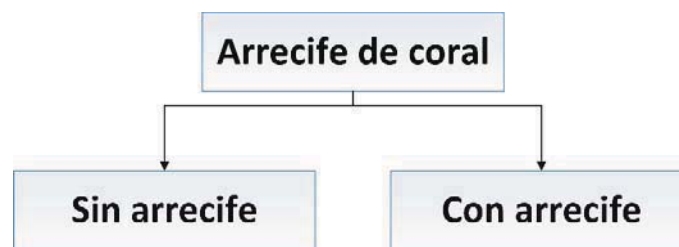


Figura 105. Clasificación de la variable arrecife de coral.

- **Protección artificial:** La protección artificial se construye para la defensa de la costa contra mareas de tormenta e impactos de erosión costera (Torresan et al., 2012). Torresan et al., (2012) consideran la protección artificial como factor de susceptibilidad a los tres peligros potenciales (inundación por incremento del nivel del mar, inundaciones de tormenta y erosión costera). En este caso, la presencia de protección artificial se consideró un factor relevante que disminuye la susceptibilidad de la costa a la erosión y las inundaciones por tormenta (Özyurt & Ergin, 2010). En consecuencia, el puntaje de vulnerabilidad máxima se asignó a una costa sin protección artificial y el puntaje mínimo a una costa con protección costera, las clases son categóricas (presencia o ausencia).



Figura 106. Clasificación de la variable protección artificial.

- **Altura de ola significativa:** La altura de ola significativa es un parámetro fundamental en muchos aspectos de la evolución costera, especialmente considerando que la energía de las olas está directamente relacionada con la altura de estas. El aumento de la intensidad de los procesos

costeros (más a menudo erosión que acumulación), el ascenso máximo y la inundación a lo largo de la costa, finalmente causa la pérdida de tierras. Las costas que experimentan alturas de ola altas son consideradas más vulnerables que las expuestas a alturas de olas bajas (De Serio et al., 2018; Pendleton et al., 2004; Thieler & Hammar-Klose, 2000), suponiendo que la ruptura de las olas más altas tienen una mayor fuerza de impacto en la playa y moviliza y transporta más sedimentos costeros. Además, la acción de las olas puede poner en peligro el patrimonio cultural y las infraestructuras en zonas bajas (Valdmann et al., 2008). La altura significativa de las olas es importante para estudiar la vulnerabilidad de las costas (Murali et al., 2013), ya que la altura de ola tiene un umbral para causar daños, que depende de las condiciones locales de la playa (López Royo et al., 2016)..

Los datos de altura de ola significativa se descargaron del modelo WAVEWATCH III (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>), compuesto por estados del mar a intervalos de 3 horas; para ello se requirió desarrollar un programa (Ver ANEXO V).



Figura 107. Clasificación de la variable altura de ola significativa.

6.4 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

6.4.1 Suma de productos

El Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) es uno de los métodos más comunes y simples para evaluar la vulnerabilidad costera al aumento del nivel del mar, a la erosión y/o inundación (Gornitz, 1991). Los IVC proporcionan una base numérica para clasificar las secciones de la costa en términos de su potencial de cambio y son útiles para identificar regiones donde los riesgos pueden ser relativamente altos. Los resultados pueden ser mostrados en mapas para resaltar regiones donde los factores contribuyen a incrementar el potencial de cambios en el retroceso de la costa (Gutierrez et al., 2009). El primer paso metodológico se ocupa de la cuantificación de variables clave que representan una influencia significativa en los procesos que influyen en la vulnerabilidad costera y evolución costera en general (Gornitz et al., 1991) (Figura 108).

El número y tipología de las variables clave pueden modificarse ligeramente de acuerdo con necesidades específicas; aquí se agruparon en variables físicas y variables sociales. El segundo paso trata de la recolección y almacenamiento de datos y el tercero del ensamble de esta información en un Sistema de Información Geográfica que permita la facilidad de interpretación y manejo de información. El quinto paso se refiere a la cuantificación de las variables, que se basa en la definición de puntajes semicuantitativos de acuerdo a una escala, donde el menor valor indica una baja contribución a la vulnerabilidad costera y un valor alto indica una contribución alta.

Las variables se integran en un solo índice para la derivación del IVC. Finalmente, los valores del IVC son clasificados en n diferentes grupos usando percentiles como límites de cada grupo. La clasificación

permite evaluar la vulnerabilidad costera de los diferentes segmentos costeros y representarlos en un mapa.

La formulación aquí empleada toma base en primer lugar al propuesto originalmente por Gornitz et al. (1991), conocido como IVC₆ (Ver Sección 2.5); sin embargo para homogenizar análisis y resultados se retoma lo propuesto por Cruz (2016), en donde el IVC se calcula como la suma ponderada de los pesos de cada variable afectada por su índice específico y se expresa por la ecuación:

$$CVI = \sum_{i=1}^n W_i * SV_i \quad (6.1)$$

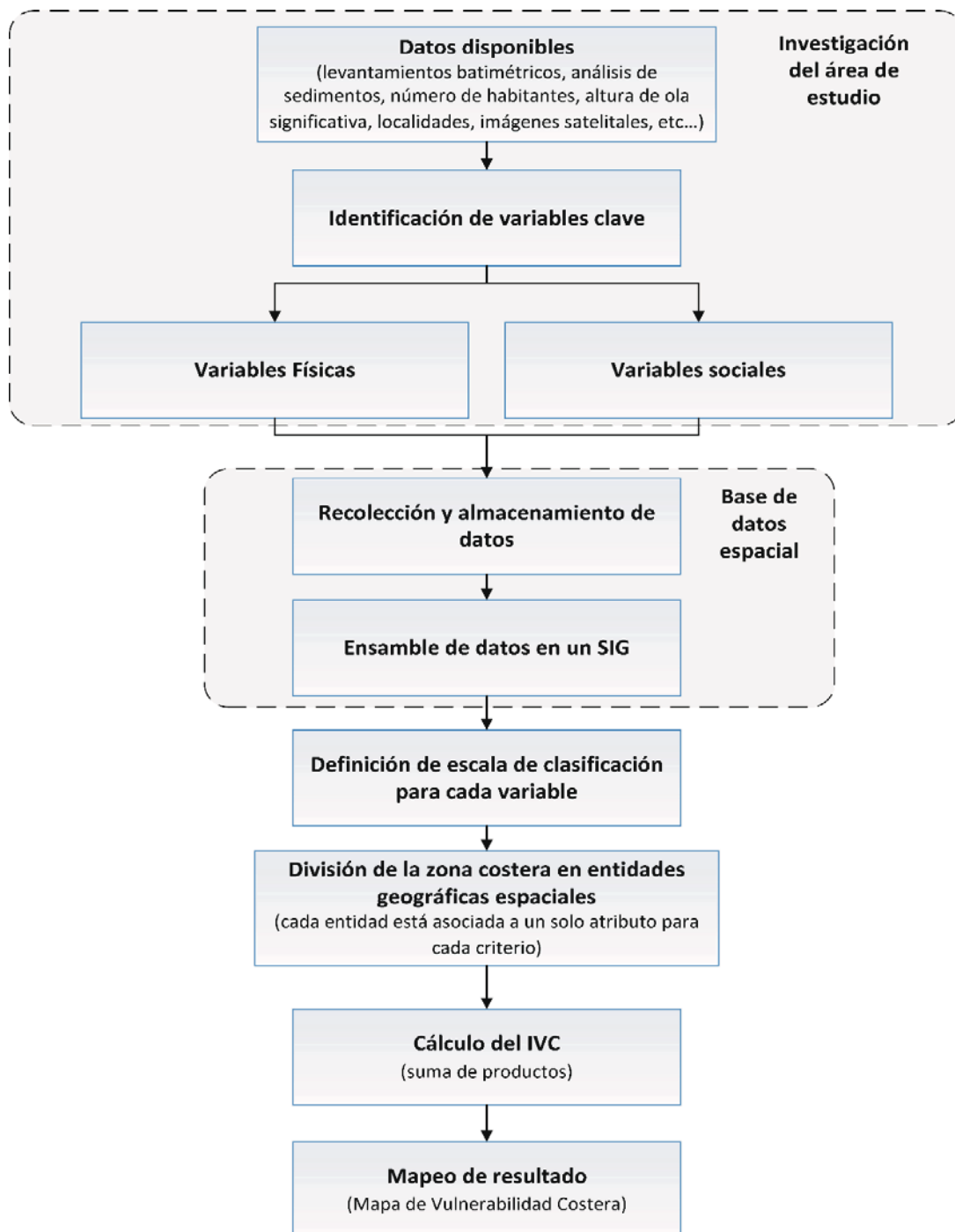


Figura 108. Diagrama de flujo que resume la metodología adoptada en este estudio para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) usando la suma de productos.

6.4.2 Proceso Jerárquico Analítico

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, siglas en inglés) es un método que resuelve problemas relacionados a la toma de decisiones clasificando las posibles alternativas de acuerdo con varios criterios (Saaty & Vargas, 1991; Saaty, 1977). Fue desarrollado por (Saaty, 1977) para calcular los factores de

ponderación necesarios con la ayuda de una matriz de preferencias, donde todos los criterios relevantes identificados se comparan entre sí con factores de preferencia reproducibles. El AHP selecciona las mejores alternativas al considerar los factores objetivos y subjetivos.

El método AHP se aplicó para derivar los pesos relativos para un conjunto de criterios que incorporan el juicio de expertos. En primer lugar, se realizan comparaciones por pares para todos los parámetros involucrados, y la matriz se completa utilizando puntajes basados en su importancia relativa. En la construcción de una matriz de comparación por pares, cada factor se califica frente a cualquier otro factor y el método emplea una escala lineal subyacente con valores del 1 al 9 para asignar un valor dominante dentro del par de criterios (Saaty, 1980; Saaty, 1977). La importancia de los valores de la escala dominante se presenta en la Tabla 15. De esta forma, la evaluación cualitativa se transforma en una evaluación cuantitativa (De Serio et al., 2018). En la Figura 109 se resume la metodología empleada.

Tabla 15. Escala de calificación de Saaty.

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos factores contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderadamente importante	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un elemento es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Absolutamente más importante	Preferencia clara y absoluta de un criterio sobre otro
2,4,6,8	Valores intermedios	Intermedia entre valores anteriores

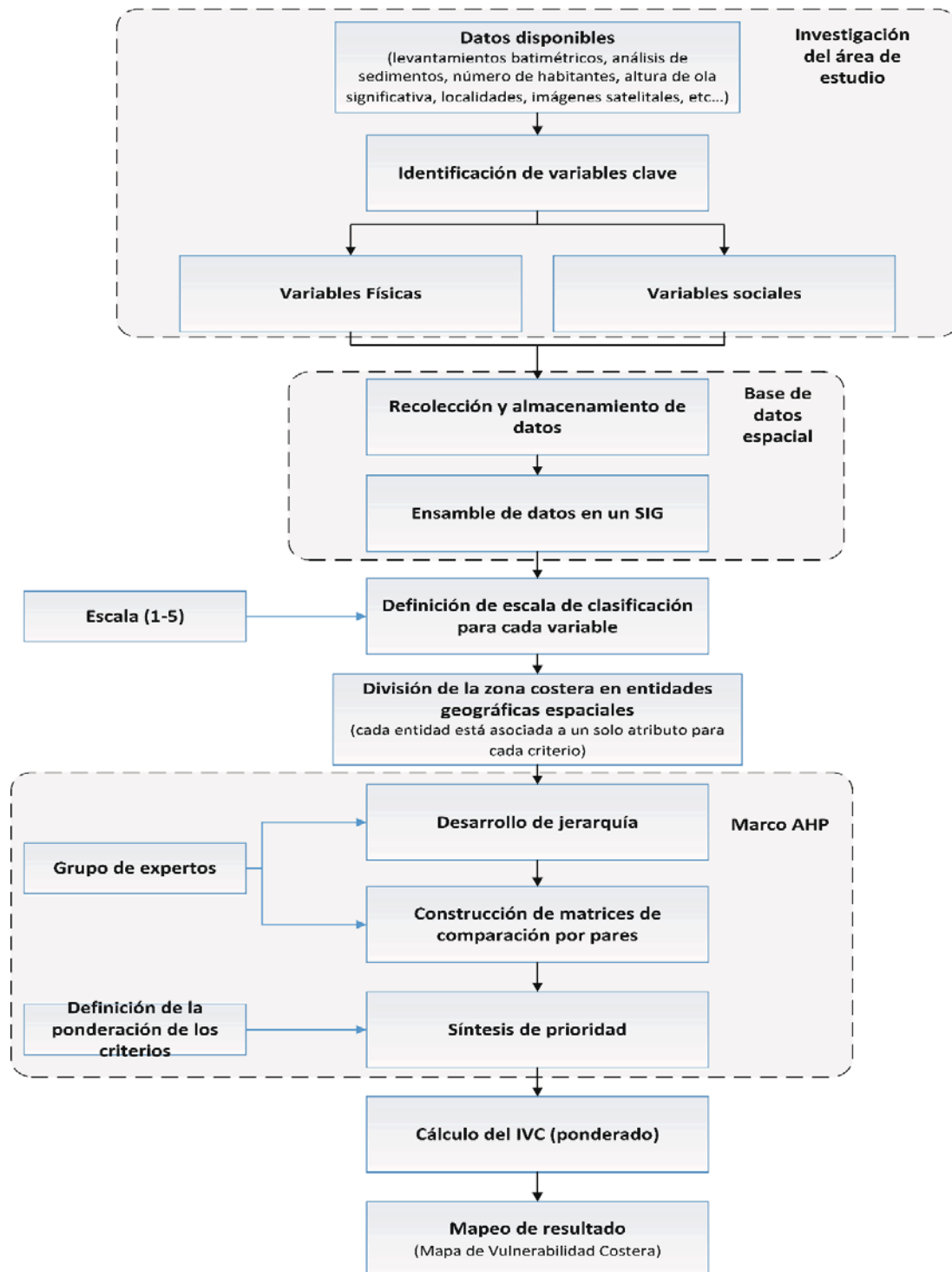


Figura 109. Diagrama de flujo que resume la metodología adoptada en este estudio para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) usando el Proceso de Análisis Jerárquico.

6.4.3 Normalización y sensibilidad de las variables

Para este trabajo, la normalización y la sensibilidad de las variables se aplican al método AHP. Se aplicó una encuesta a un grupo de expertos de diferentes áreas de investigación: manejo de zonas costeras,

arqueología acuática, manejo de arrecifes, planificación territorial, política pública ambiental, educación ambiental, cambio climático, vulnerabilidad social y costera, modelado pesquero y biogeoquímica; los participantes son miembros de la Red Internacional de Costas y Mares, una Red Temática de CONACYT formada por expertos con adscripción a consultorías, secretarías de gobiernos estatales, organizaciones civiles, secretarías de gobierno federal, Banco Mundial y Banco Interamericano de Desarrollo; los expertos debían ordenar las variables analizadas de mayor a menor influencia en la vulnerabilidad de la zona costera. Finalmente se construye una matriz de comparación.

Teniendo una matriz de comparación, se calcula un vector de prioridad que es el vector propio normalizado de la matriz. Esto se hace dividiendo cada una de las columnas por la suma correspondiente. En el siguiente paso, se calculan los valores promedio de cada fila y se usan como pesos en la jerarquía de objetivos. La matriz debe ser coherente, por lo tanto, un índice de consistencia conocido como Índice de Consistencia CR, debe calcularse en el proceso de síntesis de AHP (Saaty, 1977) con la siguiente fórmula:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{6.2}$$

Donde CI es el Índice de Consistencia y RI significa un índice aleatorio y depende del orden de la matriz. El Índice de Consistencia se expresa como:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \tag{6.3}$$

Donde λ_{max} es el valor propio principal de la matriz y n es el orden de la matriz.

Los valores de RI para diferentes valores de n pueden obtenerse por Saaty & Tran (2007), como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de RI, donde n es el orden de la matriz.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

Si $CR < 0.10$, la matriz es consistente, por lo contrario, si $CR > 0.10$ es necesario reevaluar las comparaciones por pares y probar nuevamente la consistencia por AHP. Este procedimiento garantiza la correcta priorización de las variables involucradas (De Serio et al., 2018; Mu & Pereyra-Rojas, 2017).

Finalmente, los pesos derivados del AHP son utilizados para calcular el IVC; que es estimado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$CVI = \sum_{i=1}^n w_i v_i \tag{6.4}$$

Donde CVI es el índice de vulnerabilidad para un área dada; w_i es el peso de cada criterio i ; v_i es el rango de vulnerabilidad de cada criterio i y n es el número total de criterios.

6.5 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA

La evaluación de la vulnerabilidad costera del litoral del estado de Campeche es fundamental para conocer, en primera instancia, los sectores que requieren acciones prioritarias de intervención.

A continuación, se presenta la evaluación de la vulnerabilidad costera con base en los dos enfoques presentados en el capítulo anterior. Primeramente, se divide la costa en sectores considerando las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBS) propuesta por el INEGI; posteriormente se hace la evaluación de la vulnerabilidad por el método de suma de productos con los resultados se obtuvieron cinco categorías de vulnerabilidad y un mapa de vulnerabilidad.

Finalmente se evaluó la vulnerabilidad por el método AHP, en este método se clasificó cada variable analizada en niveles de vulnerabilidad del muy bajo a muy alto y se elaboraron mapas de vulnerabilidad por variable, que pueden ser consultados en el ANEXO IV, también se aplicó una encuesta (ANEXO VI) que permite obtener información de los principales actores de la zona costera; como resultados se obtuvieron cinco categorías de vulnerabilidad y un mapa de vulnerabilidad de la zona costera.

6.5.1 División de la costa

Este estudio se centra en las poblaciones humanas costeras; basado en esta premisa, para dividir la zona costera en sectores, se consideraron las AGEB, que pueden ser rurales o urbanas.

Las AGEB rurales están ubicados en zonas rurales y contiene localidades que comparten características naturales y culturales; los AGEB urbanos son áreas geográficas ocupadas por un conjunto de manzanas perfectamente delimitados por calles, avenidas, carreteras o cualquier característica para facilitar la identificación en tierra y cuyo uso es principalmente para vivienda, industrial, servicios, comercial, entre otros.

Las AGEB ubicadas a un nivel de elevación por debajo de los 10 m se proyectaron perpendicularmente a la costa para obtener los sectores costeros bajo análisis (Figura 110). Se utilizó el límite a 10 m porque es una altura considerada inalcanzable según las estimaciones actuales del aumento potencial del nivel del mar en los próximos 100 años (IPCC, 2014).

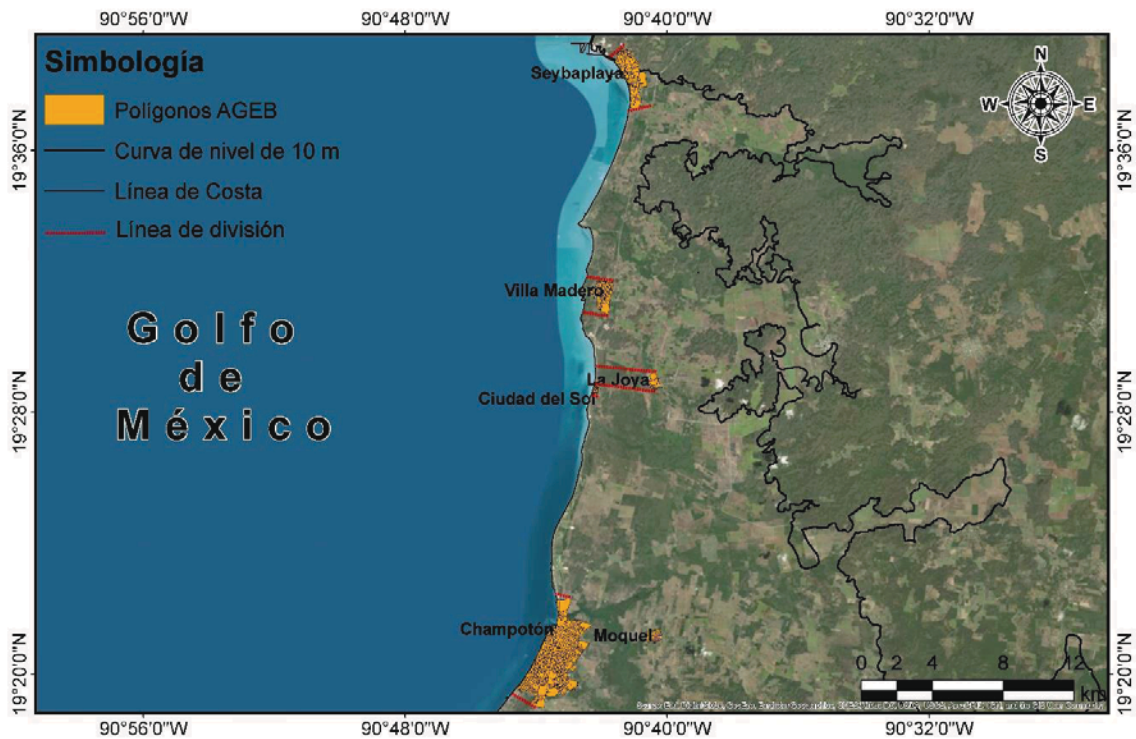


Figura 110. Ejemplo de localización de polígonos de AGE, curva de nivel de 10 m y proyección del polígono AGE en la costa.

6.5.2 Evaluación de la vulnerabilidad costera del estado de Campeche por el método de suma de productos

Se seleccionaron las 15 variables y se clasificaron en dos categorías: variables físicas y variables sociales. A cada variable se le asignó un valor y un peso específico (Tabla 17). Diez et al. (2007) observaron que el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) definido como la suma de variables ponderadas diferencialmente es más sensible a la diversidad ambiental. Los cálculos actuales indican que la suma de las variables con los números de rango de cada uno multiplicado por un valor de peso específico, como se detalla a continuación, representa mejor las condiciones a lo largo de la costa.

Tabla 17. Variables, clasificación e índices específicos.

Pesos	Variables	Clasificación	Índices específicos	Pesos	Variables	Clasificación	Índices específicos
15	Cota de elevación (ICE)	Mayor a 10 m	0	8	Altura de la duna (IAD)	Mayor a 5 m	0
		Mayor a 4 m y menor o igual a 10 m	0.2			Mayor a 2 m y menor o igual a 5 m	0.5
		Mayor a 1 m y menor o igual a 4 m	0.5			Menor o igual a 2 m	0.9
		Menor o igual a 1 m	0.9			Duna con vegetación	0.2
14	Distancia (ID)	Mayor a 4 km	0	7	Duna (ID)	Con duna	0.5
		Mayor a 1 km y menor o igual a 4 km	0.5			Sin duna	1

		Mayor a 500 m y menor o igual a 1 km	0.7	6	Geomorfología (tipo de costa) (IG)	Acantilado, cantil o playa rocosa	0.2		
		Menor o igual a 500 m	0.9			Playa de arena o grava	0.7		
13	Pendiente costera (IPC)	> 1.0	0	5	Cambio de línea de costa (ICLC)	Costa de fango	0.9		
		0.50 – 1.0	0.2			> 2.0	0		
		0.10 – 0.50	0.5			1.0 a 2.0	0.2		
		0.10 – 0.05	0.7			-1.0 a 1.0	0.5		
		< 0.05	0.9			-2.0 a -1.0	0.7		
12	Altura de ola significativa (IAO)	< 0.55	0	4	Protección artificial (IPA)	Con protección artificial	0.5		
		0.55 – 0.85	0.2			Sin protección artificial	1		
		0.85 – 1.05	0.5			3	Manglar (IM)	Con manglar	0.2
		1.05 – 1.25	0.7					Sin manglar	0.9
11	Densidad de población (IDP)	Dispersa	0.2	2	Vegetación (sin considerar manglar) (IV)	Con vegetación	0.2		
		Concentrada	0.9			Sin vegetación	0.9		
10	Tipo de infraestructura (ITI)	Urbana	0.1	1	Arrecife de coral (IAC)	Con arrecife	0.2		
		Rural	1			Sin arrecife	0.9		
9	Material de vivienda (IMV)	Concreto	0.2						
		Madera y otros	0.9						

Es decir, a cada variable se le asignó un peso y a cada elemento de su clasificación un índice específico. Dichos valores se basan en lo reportado en la literatura. De tal forma que la cota de elevación sobre el nivel del mar es la variable más importante ya que a partir de ella se definen las zonas vulnerables, por lo que se le asignó el peso de 15 (más importante); la distancia depende de la cota de elevación para definir si una zona está expuesta a sufrir un daño, por lo que se le asignó el peso 14; por lo tanto, la pendiente costera dependerá de éstas dos variables y tiene peso 13. La pendiente costera influirá sobre la energía del oleaje incidente en la costa, por lo que se le dio a esta variable un peso de 12.

Los niveles de exposición de una población ante las amenazas naturales, depende en primer lugar de los asentamientos e infraestructuras asentadas en el área de riesgo, posteriormente al mal diseño de las estructuras y por último a las condiciones socioeconómicas; por lo que se le asignó el peso 11 a densidad de población, 10 a tipo de infraestructura y 9 a material de vivienda.

Las dunas funcionan como reserva de sedimentos y mantienen estables a las playas de arena, disminuyendo la vulnerabilidad de la zona, por lo que su altura define el grado de protección detrás de la duna y se le asignó un peso de 8; mientras que a la ausencia o presencia de duna se le asignó un peso de 7.

Dependiendo del tipo de costa será la respuesta ante una amenaza, por lo que se le asignó un peso de 6; así mismo los cambios en la línea de costa definirá el nivel de vulnerabilidad de una población asentada en la zona, por lo que tiene un peso de 5.

Uno de los objetivos de la protección artificial es ayudar a las protecciones naturales a disminuir la vulnerabilidad de una población ya que ofrecen mayor resistencia a los embates de fenómenos naturales por lo cual se le asignó el peso de 4. Al manglar se le dio peso 3 ya que funge como amortiguador además de ofrecer gran variedad de servicios ambientales.

La vegetación sin considerar manglar se le asignó un peso de 2 ya que, al ser rebasado el manglar, la vegetación funciona como protección de los bienes que tiene detrás. Los arrecifes de coral tienen peso 1 debido a que se ubican en zonas costeras específicas con las características y condiciones necesarias para su crecimiento y dependen de los nutrientes proporcionados por el manglar.

El IVC se estima de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$IVC = \sum_{i=1}^n W_i * SV_i \quad (6.5)$$

Se obtuvo un valor mínimo representativo de 10.45 y un máximo de 110.45; el rango de los valores del IVC se puede dividir en 4 partes iguales (Diez et al., 2007; Gornitz et al., 1991), cuartiles (Pendleton et al., 2004) o percentiles (Doukakis, 2005), donde cada división indica un cierto nivel de vulnerabilidad; aquí, los valores fueron divididos en cinco partes iguales para dar lugar a cinco categorías de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 18, a fin de unificarla con la clasificación más usual de categorización de vulnerabilidad de cada variable.

Tabla 18. Categorías de vulnerabilidad encontradas.

Valores	Categorías
10.45 – 30.45	Muy baja
30.46 – 50.45	Baja
50.46 – 70.45	Moderada
70.46 – 90.45	Alta
90.46 – 110.45	Muy alta

El mapa de la Figura 111 representa una síntesis de la vulnerabilidad de las costas de Campeche. La zona sur del estado presenta alta vulnerabilidad, la zona central se caracteriza por vulnerabilidad moderada y; dos sectores en el norte muestran baja vulnerabilidad y 2 más vulnerabilidad alta.



Figura 111. Vulnerabilidad costera para el estado de Campeche.

6.5.3 Evaluación de la vulnerabilidad costera del estado de Campeche por el método Jerárquico Analítico

Se seleccionaron 15 variables y se clasificaron en dos categorías: variables físicas y variables sociales (Tabla 19). Estos parámetros se derivaron de la adquisición, análisis y procesamiento de bases de datos SIG, datos de teledetección, modelado numérico, datos de campo y bases de datos de institutos, que pertenecen al área de estudio en consideración. El número y tipología de las variables clave se pueden modificar de acuerdo con el área de estudio, las necesidades específicas y los datos disponibles (De Serio et al., 2018; Ramieri et al., 2011; Shanganlall et al., 2019). Para este estudio, se consideró que las variables físicas y sociales tienen la misma contribución en la vulnerabilidad costera, por lo que la clasificación es sólo para fines de identificación y en el cálculo del IVC esta clasificación se omitirá.

Tabla 19. Variables físicas y sociales utilizadas en este estudio.

	Variable	Fuente
Física	Elevación	Modelo Digital de Elevaciones (Instituto EPOMEX)
	Duna	Datos de campo Datos de literatura
	Altura de duna	Datos de campo Datos de literatura
	Geomorfología	Imágenes satelitales
	Pendiente costera	Modelo Digital de Elevaciones (Instituto EPOMEX)

Social	Altura de ola significativa	NOAA WAVEWATCH III model (ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/)
	Cambio de línea de costa	Imagen satelital (https://earthexplorer.usgs.gov/)
	Manglar	Imagen satelital (Google Earth), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)
	Vegetación diferente a manglar	Imagen satelital (Google Earth), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)
	Arrecife de coral	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Datos de literatura
	Distancia a la costa	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Modelo Digital de Elevaciones (Instituto EPOMEX)
	Densidad de población	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
	Material de vivienda	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
	Protección artificial	Datos de campo, imagen satelital, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
	Tipo de infraestructura	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

La definición de clases y la asignación de puntajes es un paso necesario para la normalización y adición de indicadores. La base de datos incluye información cuantitativa y cualitativa; a los valores (información cuantitativa) de cada variable se les asignó una clasificación de vulnerabilidad basada en rangos de valores. Cada variable se clasificó del 1 al 5, lo que representa una vulnerabilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, respectivamente. En otras palabras, un valor de 1 representa la vulnerabilidad más baja y 5 representa la vulnerabilidad más alta. Las variables cualitativas se clasificaron de acuerdo con la característica que representan (clases categóricas) (Tabla 20).

Tabla 20. Criterios de clasificación de vulnerabilidad.

Parámetro	Clasificación de vulnerabilidad				
	Muy bajo (1)	Bajo (2)	Moderado (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Elevación (EL)	NA	> 10 m	> 4 m and ≤ 10 m	> 1 m and ≤ a 4 m	≥ 1 m
Duna (DU)	NA	Duna con vegetación	Con duna	Sin duna	NA

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

Altura de duna (DH)	NA	> 5 m	> 2 m and ≤ 5 m	≤ 2 m	NA
Geomorfología (GE)	NA	Acantilado, cantil o playa rocosa	Playa de arena o grava	Costa de fango	NA
Pendiente costera (CS)	> 1.0	0.50 - 1.0	0.10 - 0.50	0.05 - 0.10	< 0.05
Altura de ola significativa (SWH)	< 0.55 m	0.55 m - 0.85 m	0.85 m - 1.05 m	1.05 m - 1.25 m	> 1.25 m
Cambio de línea de costa (CC)	> 2.0 m	1.0 m to 2.0 m	-1.0 m to 1.0 m	-2.0 m to -1.0 m	< -2.0 m
Manglar (MA)	Con manglar	NA	NA	NA	Sin manglar
Vegetación diferente a manglar (VDM)	Con vegetación	NA	NA	NA	Sin vegetación
Arrecife de coral (CR)	Con arrecife	NA	NA	NA	Sin arrecife
Distancia a la costa (DC)		> 4 km	> 1 km and ≤ 4 km	> 500 m and ≤ 1 km	≤ 500 m
Densidad de población (PD)	Dispersa	NA	NA	NA	Concentrada
Material de vivienda (HM)	Concreto	NA	NA	NA	Madera y otros
Protección artificial (AP)	Con protección	NA	NA	NA	Sin protección
Tipo de infraestructura (TI)	Rural	NA	NA	NA	Urbana

Se aplicó una encuesta a un grupo de expertos de diferentes áreas de investigación: manejo de zonas costeras, arqueología acuática, manejo de arrecifes, planificación territorial, política pública ambiental, cambio climático, vulnerabilidad social y costera, modelación pesquera y biogeoquímica. La encuesta consistía en ordenar las variables de mayor a menor influencia en la vulnerabilidad de la zona costera (ANEXO VI). La información se compiló y se analizó para construir una matriz de comparación (Tabla 21).

Tabla 21. Matriz de comparación de variables.

DU	VDM	CR	HM	DH	AP
7	7	8	8	9	9
6	7	7	8	8	9
5	6	7	7	8	8
5	5	6	7	7	8
4	5	5	6	7	7
4	4	5	5	6	7
3	4	4	5	5	6
3	3	4	4	5	5
2	3	3	4	4	5
1	2	3	3	4	4
0.50	1	2	3	3	4
0.33	0.50	1	2	3	3
0.33	0.33	0.50	1	2	3
0.25	0.33	0.33	0.5	1	2
0.25	0.25	0.33	0.33	0.5	1
41.67	48.42	56.17	63.83	72.5	81

	GE	CS	CC	DC	SWH	EL	MA	PD	TI
GE	1	2	3	3	4	4	5	5	6
CS	0.50	1	2	3	3	4	4	5	5
CC	0.33	0.50	1	2	3	3	4	4	5
DC	0.33	0.33	0.50	1	2	3	3	4	4
SWH	0.25	0.33	0.33	0.50	1	2	3	3	4
EL	0.25	0.25	0.33	0.33	0.5	1	2	3	3
MA	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	1	2	3
PD	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	1	2
TI	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	1
DU	0.14	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50
VDM	0.14	0.14	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33
CR	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33
HM	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25
DH	0.11	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.20	0.25
AP	0.11	0.11	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.20
Sum	3.99	5.88	8.77	11.64	15.52	19.38	24.23	29.07	34.87

Teniendo la matriz de comparación, se calculó un vector de prioridad el cuál es el vector propio normalizado de la matriz. Esto se hace dividiendo cada una de las columnas por la suma correspondiente (Tabla 22). En el siguiente paso, se calculan los valores promedio de cada fila y se usan como pesos en la jerarquía de objetivos. Para facilitar y acelerar el cálculo, todos los pasos se integraron en rutinas desarrolladas en el software MATLAB.

Tabla 22. Matriz normalizada de las variables.

AP	Sum	Mean	100
0.11	3.02	0.20	20.10
0.11	2.42	0.16	16.10
0.10	1.94	0.13	12.90
0.10	1.58	0.11	10.50
0.09	1.28	0.09	8.50
0.09	1.04	0.07	7.00
0.07	0.84	0.06	5.60
0.06	0.68	0.05	4.60
0.06	0.56	0.04	3.70
0.05	0.44	0.03	3.00
0.05	0.36	0.02	2.40
0.04	0.28	0.02	1.90
0.04	0.29	0.02	1.50
0.03	0.18	0.01	1.20
0.01	0.15	0.01	1.00

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

	GE	CS	CC	DC	SWH	EL	MA	PD	TI	DU	VDM	CR	HM	DH
GE	0.25	0.34	0.34	0.26	0.26	0.21	0.21	0.17	0.17	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12
CS	0.13	0.17	0.23	0.26	0.19	0.21	0.17	0.17	0.14	0.14	0.15	0.13	0.13	0.11
CC	0.08	0.09	0.11	0.17	0.19	0.16	0.17	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11
DC	0.08	0.06	0.06	0.09	0.13	0.16	0.12	0.14	0.12	0.12	0.10	0.11	0.11	0.10
SWH	0.06	0.06	0.04	0.04	0.06	0.10	0.12	0.10	0.12	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10
EL	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.08	0.10	0.09	0.10	0.08	0.09	0.08	0.08
MA	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.07	0.09	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07
PD	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07
TI	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06
DU	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.05	0.06
VDM	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.04
CR	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
HM	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
DH	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
AP	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

La matriz debe ser coherente, por lo tanto, se calcula el índice de Consistencia CR con la Ecuación 6.2 y el índice de consistencia *CI* se expresa mediante la Ecuación 6.3.

Los valores de *RI* para valores diferentes de *n* pueden obtenerse de Saaty & Tran (2007), como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores de *RI*, donde *n* es el orden de la matriz.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

Siguiendo las ecuaciones (6.2) y (6.3) se obtuvo una relación de consistencia menor a 0.1 (Tabla 24), y se puede considerar para un cálculo adicional.

Tabla 24. Cálculo de la relación de consistencia (CR).

Variables	Valor
λ_{max}	16.90
n	15
CI	1.59
RI	0.14
CR	0.09

Los pesos derivados del uso de AHP se utilizan para calcular el IVC. El IVC se estima de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$IVC = \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (6.6)$$

donde *IVC* es el índice de vulnerabilidad para un área determinada; w_i es el peso del criterio *i*; v_i es el puntaje de vulnerabilidad bajo el criterio *i* y *n* es el número total de criterios.

Los valores calculados del IVC se clasifican dentro de cinco categorías, de manera similar a la clasificación de cada criterio; para resaltar los diferentes niveles de vulnerabilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Finalmente, se procesaron en un SIG y se preparó un mapa de vulnerabilidad costera para su uso futuro en la planificación y gestión costera.

Los resultados muestran la variabilidad de la vulnerabilidad de los asentamientos de la costa de Campeche y demuestran la importancia de las variables analizadas. Geomorfológicamente, la costa sur está formada por playas arenosas, que representan el 22% del área de estudio sujeta a vulnerabilidad moderada, el 2% tiene una vulnerabilidad alta y el resto presenta baja vulnerabilidad, principalmente la costa central y norte.

En las variables físicas relacionadas con los manglares y las dunas, la costa presenta una vulnerabilidad muy alta; ya que el 84% carece de manglares y una alta vulnerabilidad debido a la ausencia de dunas en el 84% del área analizada. Sin embargo, parte de esta vulnerabilidad se compensa ya que el 47% tiene vegetación diferente al manglar.

Incluso cuando la altura de ola se considera baja, puede presentar un peligro cuando se acompaña de una marejada ciclónica. En el área de estudio se presentan alturas de ola menores de 0.55 m y mayores de 1.25 m; en base a estos valores, el 31% del área se ve afectada por olas con alturas entre 0.85 m a 1.05 m, 56% por alturas mayores a 1.05 m y 13% para alturas menores a 0.85 m.

Los resultados obtenidos a través del análisis de la costa permiten explorar la dinámica temporal y espacial del cambio costero y la variabilidad geomorfológica a lo largo de la playa. Esta investigación revela que el sur del estado muestra tasas negativas que indican erosión, mientras que la zona central muestra acreción.

Como resultado del análisis de la pendiente costera, se encontró que el 27% del área tiene una vulnerabilidad de baja a muy baja, el 39% de vulnerabilidad moderada y el 34% de alta a muy alta. También se encontró que el área carece de protección natural por arrecifes de coral debido a su ausencia.

De acuerdo con la metodología de evaluación, se encontraron que 32 asentamientos están ubicados en un nivel de elevación por debajo de los 10 m, es decir, 63% de las poblaciones analizadas se encuentran entre vulnerabilidad moderada y muy alta; el resto está en la cota 10 m con baja vulnerabilidad. Así mismo, el 43% de los asentamientos presentan una alta vulnerabilidad cuando se clasifican dentro del grupo de infraestructura urbana. Con respecto al material de vivienda, se encontró que el 78% de las viviendas presentan material de concreto como material predominante.

Los núcleos de población presentan una baja vulnerabilidad ya que se encontraron 29 poblaciones con una población dispersa, lo que indicaría poco desarrollo de la costa en estudio. De los 51 asentamientos poblacionales, sólo 6 cuentan con protección artificial. Con respecto a la distancia a la costa, el 18% presenta vulnerabilidad alta a muy alta, el 10% presenta vulnerabilidad moderada y el resto vulnerabilidad de baja a muy baja.

Es más realista suponer que cada criterio puede tener una contribución diferente a la vulnerabilidad costera (Bagdanavičiūtė et al., 2015), por esta razón se empleó un método de proceso de jerarquía analítica (AHP) para calcular la importancia relativa de cada criterio; los pesos están presentados en la Tabla 25. Se observa que la geomorfología es la variable que tiene la mayor contribución a la vulnerabilidad (0.20 de peso), mientras que la altura de duna y la protección artificial tienen el menor peso (0.01). Dado que el índice de consistencia no excedió 0.1, la matriz fue aceptada como consistente.

Tabla 25. Pesos obtenidos del proceso AHP.

	Variable	Pesos
Física	Elevación	0.07
	Duna	0.03
	Altura de duna	0.01
	Geomorfología	0.20
	Pendiente Costera	0.16
	Altura de ola significativa	0.08
	Cambios de línea de costa	0.13
	Manglar	0.06
	Vegetación diferente a manglar	0.02
	Arrecife de coral	0.02
Social	Distancia a la costa	0.11
	Densidad de población	0.05
	Material de vivienda	0.02
	Protección artificial	0.01
	Tipo de infraestructura	0.04

En la Figura 112, se presenta un mapa de resultado. Este mapa representa la clasificación obtenida después de aplicar el AHP y calcular el IVC; los valores de IVC calculados variaron entre 1.42 y 4.76, y se

dividieron en cinco intervalos correspondientes a cinco clases de vulnerabilidad (Tabla 26), a fin de unificar esta clasificación con la clasificación de vulnerabilidad para cada variable (Tabla 20).

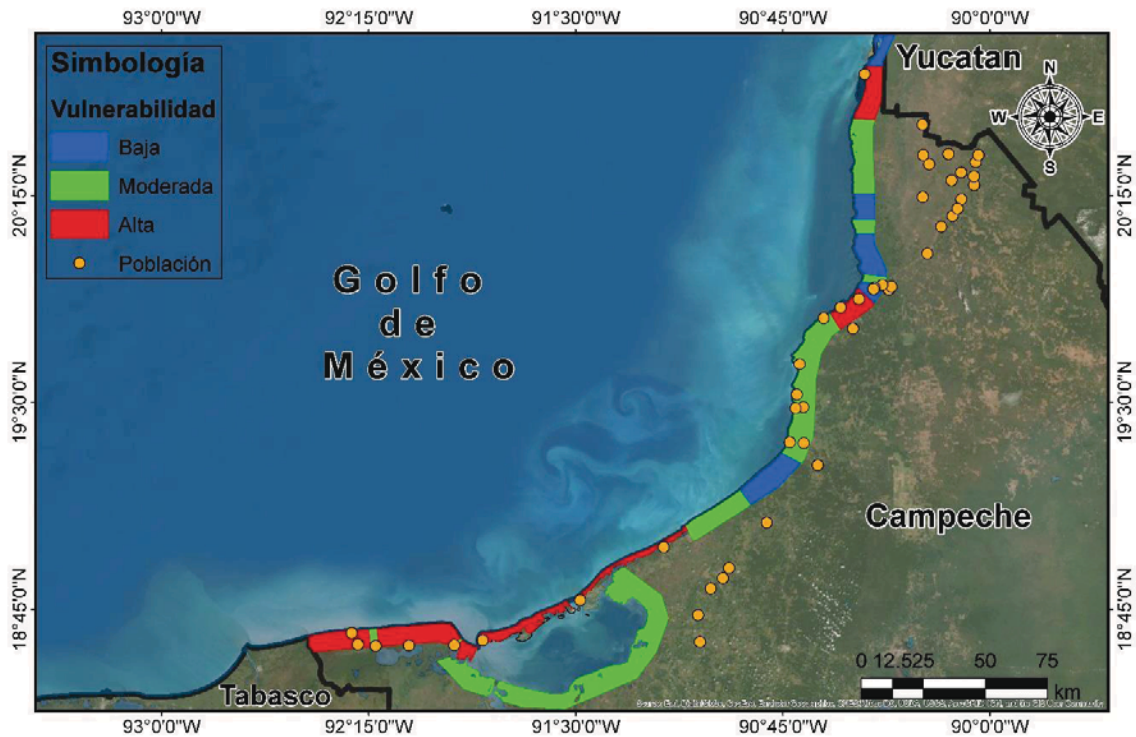


Figura 112. Vulnerabilidad costera para el estado de Campeche.

Para este estudio, la zona costera se dividió en 51 sectores de acuerdo con las AGEB identificadas y analizadas. En el área se identificaron tres categorías: vulnerabilidad alta, vulnerabilidad moderada y vulnerabilidad baja. Según esta opción, el 35% de la costa presenta una vulnerabilidad baja (color azul), el 41% se clasifica de vulnerabilidad moderada (color verde) y el 24% de la costa se encuentra con vulnerabilidad alta (color rojo). Los sectores con alta vulnerabilidad se agrupan en el sector sur del área de estudio.

Tabla 26. Valores del índice de vulnerabilidad costera para los cinco grupos de vulnerabilidad.

Clases de Vulnerabilidad	Rango de IVC
Muy alta	4.09 – 4.76
Alta	3.42 – 4.09
Moderada	2.75 – 3.42
Baja	2.09 – 2.75
Muy baja	1.42 – 2.09

7

ÍNDICE DE ACTUACIÓN Y SEGMENTOS LITORALES JERÁRQUICOS

7.1 INTRODUCCIÓN

Para establecer las zonas del litoral que requieren acciones de intervención, en este capítulo se desarrolla el análisis y evaluación de un índice de urgencia. Dicho índice se enfoca en el análisis de variables inherentes al medio físico.

Para evaluar la zona costera se retoma la división en sectores realizados en el Capítulo 8. Cada variable se dividió en categorías y el índice se calculó como una sumatoria del valor específico de cada variable. Tras la evaluación del índice de urgencia se obtuvieron cuatro categorías de urgencia; sin embargo, para la zona costera del estado de Campeche, sólo dos categorías son representativas. Los resultados se presentan en un mapa de urgencia.

7.2 MARCO CONCEPTUAL

Posterior a la evaluación de las celdas litorales y tras haber cuantificado el nivel de vulnerabilidad de la costa del estado de Campeche, se requiere establecer un *índice de urgencia* pensado en la actuación antrópica y la identificación de zonas prioritarias; que se base en elementos del medio físico. La evaluación de este índice permitiría definir medidas de mitigación de la erosión por causas “naturales”.

Las medidas propuestas deben armonizar con el medio y ser compatibles entre sí, por lo que se debe realizar posteriormente una caracterización a gran escala que incluya la parte antrópica, proponiendo así partir del análisis del uso de suelo en la zona de estudio.

La elección de una alternativa está determinada por los criterios establecidos por la comunidad; que puede considerar la propiedad, infraestructura, ecología, recreación, financiamiento, economía, entre otros; sin embargo, en el presente estudio se consideran el medio físico y la pérdida de vidas humanas como elementos clave para la elección de una alternativa.

Los elementos inherentes al medio físico y a la población humana asentada en la zona de estudio, que se consideran para establecer criterios de actuación son:

- 1) Vulnerabilidad
- 2) Uso de suelo
- 3) Características del suelo
- 4) Pendiente media del terreno
- 5) Batimetría
- 6) Distancia a fuente de sedimento
- 7) Distancia a sumidero
- 8) Densidad de población

7.3 VARIABLES, INFORMACIÓN Y BASES DE DATOS

7.3.1 Definición de variables y su evaluación

Para determinar el nivel de urgencia para la actuación se analizarán las variables que a continuación se describen y caracterizan (Figura 113).

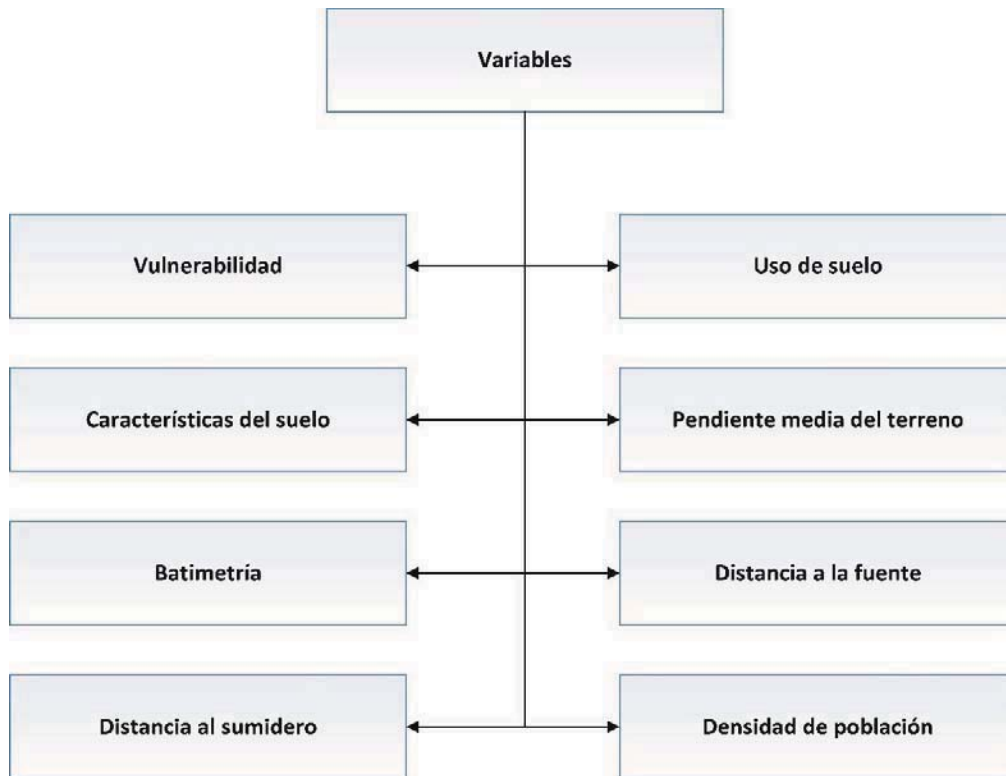


Figura 113. Variables seleccionadas para el análisis del índice de actuación.

- **Vulnerabilidad:** Las evaluaciones de la vulnerabilidad costera son esenciales para manejar las amenazas costeras (Kantamaneni et al., 2019). Cuando una región vulnerable se ve afectada por un peligro, existe un riesgo potencial que debe abordarse; los riesgos reciben una calificación para estimar el nivel de vulnerabilidad, por lo que, al estimar una vulnerabilidad costera en particular, se requiere un enfoque integrado que distinga entre: peligro, vulnerabilidad y riesgo (Gilard, 2016). La vulnerabilidad está relacionada con la exposición física de una zona y de la población al peligro y se basa en la capacidad del entorno para hacer frente y recuperarse del peligro (Coburn, 2001; Cutter et al., 2003; Poompavai & Ramalingam, 2013); la capacidad de afrontamiento muestra la preparación de la comunidad para adaptarse al cambio y cómo usan efectivamente los recursos existentes para construir resiliencia y soportar los impactos de un desastre (Cutter et al., 2003; Poompavai & Ramalingam, 2013). Aquí se consideran cinco grupos de vulnerabilidad: Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta, en función de los resultados obtenidos de la evaluación de la vulnerabilidad para la zona costera de Campeche.

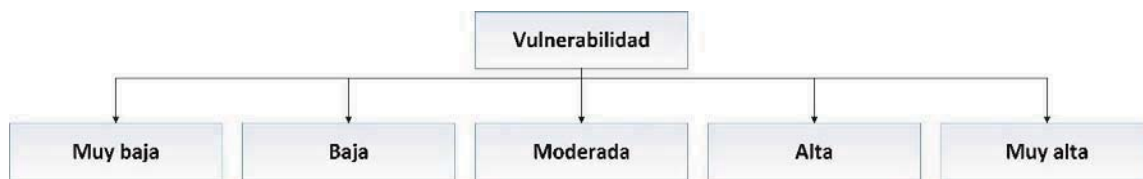


Figura 114. Clasificación de la variable vulnerabilidad.

- **Uso de suelo:** Los usos de suelo, son formas de ocupación de la tierra y se refieren a la gestión y modificación de un entorno natural (Caldas et al., 2018). Un mapa de uso de suelo es esencial para comprender las clases del uso del suelo en una región en particular y su aportación para aumentar o disminuir la vulnerabilidad de un área (Murali et al., 2013). El uso de suelo de una región se atribuye a las actividades antrópicas, así como a la variabilidad climática (Murali et al., 2006); ya que el uso de suelo influye en el sistema ecológico, por lo que la urbanización estimula los cambios en el uso del suelo de las áreas no urbanizadas a las áreas urbanizadas (Miladan et al., 2019). De acuerdo con Jana & Bhattacharya (2013), la protección de un área dependerá de si el área es lo suficientemente importante en aspectos económicos, culturales y ambientales (ecológicos y biológicos). Al tratarse de aspectos físicos de la zona, el uso de suelo en la zona se ha agrupado en seis categorías, dando mayor peso a las áreas naturales: área urbana, menor importancia (1); agricultura, nivel 2; área sin vegetación, 3; pastizal, 4; selva, 5; y manglar, como el uso más importante (6).

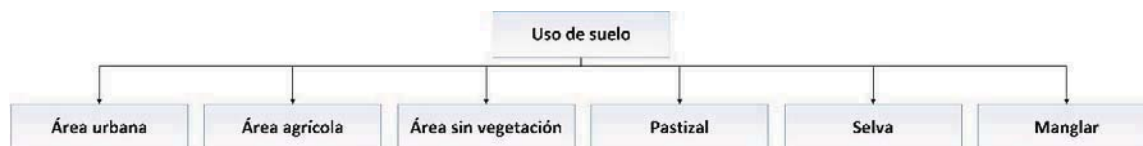


Figura 115. Clasificación de la variable uso de suelo.

- **Características del suelo:** La estructura del suelo determina la porosidad y la infiltración, la erodabilidad¹⁶, la rotación de carbono, la pérdida de gas nitrógeno y otros procesos (Boruvka et al., 2002; Six et al., 2000); e influye en el crecimiento de las plantas directa e indirectamente (Anger & Caron, 1998; Boruvka et al., 2002). La estabilidad de la estructura del suelo, por lo tanto, representa un importante indicador de la calidad del suelo. Esto resulta de los efectos de las diferentes propiedades del suelo, las prácticas de manejo del suelo y los factores ambientales (Six et al., 2000); así, la degradación del suelo puede verse afectada por los tipos de uso de suelo (Ezeaku, 2013; Onwudike, 2015). Por otra parte, la textura del suelo representa la proporción relativa de contenido de arena, limo y arcilla. Los suelos con alto porcentaje de arcilla forman agregados muy estables resistentes al desprendimiento. Por otro lado, los suelos ligeros como los arenoso o gruesos son fáciles de separar ya que tienen bajo contenido de materia orgánica, resultando en su incapacidad para formar agregados muy estables (Das & Agarwal, 2002; Sharma et al., 2012). Por lo tanto, suelos con más contenido de arena y altas pendientes son propensos a deslizamientos o disgregaciones, causando daños severos a las tierras circundantes (Patanakanog,

¹⁶ Es un índice que indica la vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión y que depende de las propiedades intrínsecas de cada suelo. Cuanto mayor sea la erodabilidad mayor porcentaje de erosión.

2001; Sharma et al., 2012). Las características del suelo se han vuelto esenciales para la gestión ambiental.

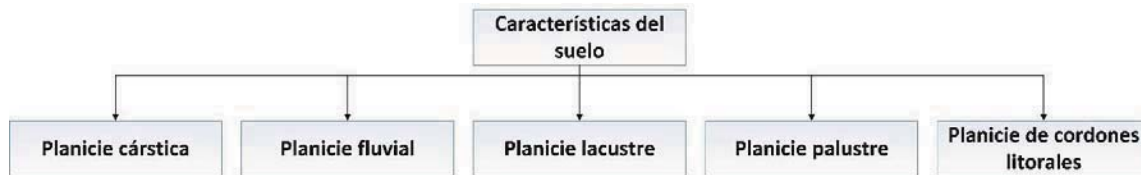


Figura 116. Clasificación de la variable características del suelo.

- **Pendiente media del terreno:** La elevación es el grado de inclinación de una región con respecto al océano; su medición ayuda a identificar la vulnerabilidad de la región (Kantamaneni et al., 2019). Se usa para describir la medición de la inclinación, gradiente o pendiente del terreno (Sankari et al., 2015) y está vinculada a la susceptibilidad de la costa a la inundación (Ahammed et al., 2016; Kumar & Kunte, 2012; Murali et al., 2013; Thieler & Hammar-Klose, 2000); este parámetro es importante para decidir el grado en que las tierras corren el riesgo de inundarse por marea de tormenta o durante un tsunami (Ahammed et al., 2016; Kumar & Kunte, 2012).

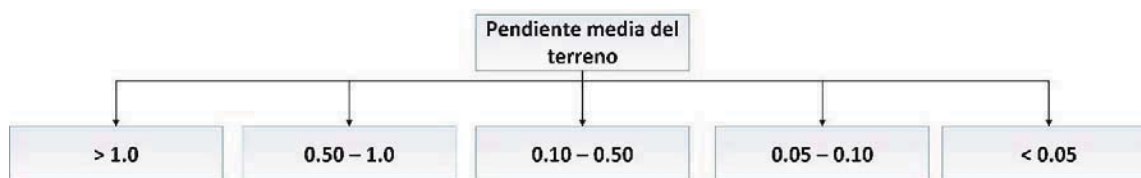


Figura 117. Clasificación de la variable pendiente media del terreno.

- **Batimetría:** Muestra la profundidad desde la costa hacia el océano abierto, es el equivalente submarino de las curvas de nivel en tierra (Sankari et al., 2015). Esta variable se relaciona con la altura de las olas. Cuanto mayor sea la batimetría, mayor será el riesgo para la costa debido al aumento del nivel del mar y la altura de la marejada (Kantamaneni et al., 2019). Las investigaciones recientes indican que los bajos, crestas y bancos de arena sumergidos afectan los patrones de refracción y altura de las olas, corrientes costeras y el transporte de sedimentos (Hulscher, 1996; Thompson et al., 2015; Trowbridge, 1995; Warner et al., 2014). Estas anomalías en el fondo marino indican la disponibilidad y el movimiento de arena dentro del entorno cercano a la costa, lo que puede estar directamente relacionado con la estabilidad de la costa. Analizar la batimetría puede ayudar a identificar las vulnerabilidades de erosión actuales y futuras debido al corto plazo (para huracanes, y tormentas extremas) y riesgos a largo plazo (aumento del nivel del mar) (Thompson et al., 2015). Además de que los impactos por cambios antropogénicos, como cambios locales en la batimetría causado por la erosión, sedimentación y obras hidráulicas son mayores que los causados por el cambio climático (Ramieri, Hartley, Barbanti, Duarte Santos, et al., 2011; von Storch & Woth, 2008).

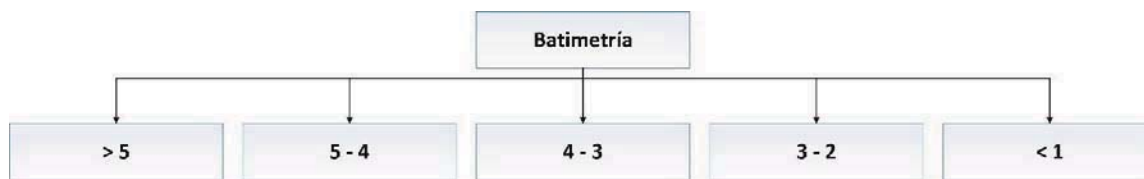


Figura 118. Clasificación de la variable batimetría.

- Distancia a la fuente:** Debido a su relación en las siguientes líneas se hablará indistintamente de fuente y sumidero; por lo que en el apartado de distancia al sumidero se hará mención de un ejemplo de sumidero. La morfología costera varía en base a las fuentes o sumideros de sedimentos que afectan su respuesta a futuros cambios en las condiciones de frontera (nivel del mar o lluvia/escorrentía) y por lo tanto requieren consideración en las evaluaciones costeras, ya sea de la dinámica del ecosistema o la vulnerabilidad de los asentamientos y la infraestructura (Rogers & Woodroffe, 2012). La erosión de acantilados sedimentarios representan una importante fuente de arena para la formación de playas, dunas y terrazas costeras (Muehe, 2010). La relación entre las tasas de suministro de sedimentos y las tasas de aumento del nivel del mar es central para comprender la respuesta geomórfica. El excedente o déficit de sedimento de una costa durante un periodo se considera “balance de sedimento”. Se produce un balance de sedimento positivo cuando el sedimento ganado en una costa supera el sedimento perdido durante el mismo periodo, con el resultado neto siendo progradación de la costa o aumento de la elevación de la costa; por el contrario, la regresión en escala geológica, o erosión en escala de eventos, está asociada con un balance de sedimento negativo. Las contribuciones al balance de sedimentos se pueden considerar en términos de “entradas”, “salidas” e intercambios que ocurren dentro del sistema o “trasferencias dentro del sistema”. Las principales entradas y salidas pueden variar dependiendo de la influencia predominante de la energía de un río, de las olas o de la marea (Rogers & Woodroffe, 2012).



Figura 119. Clasificación de la variable distancia a la fuente.

- Distancia al sumidero:** Un ejemplo de sumidero son los grandes campos de dunas representan un balance de sedimento negativo que de lo contrario producirían progradación de la costa (Muehe, 2010).

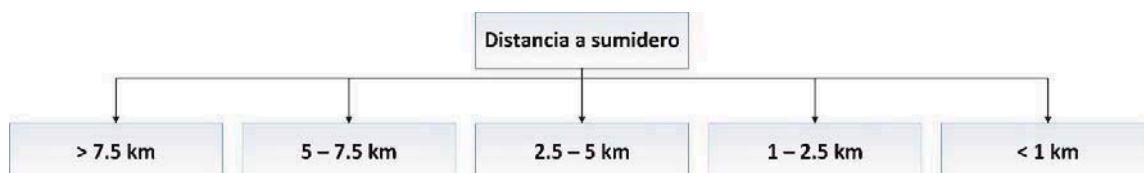


Figura 120. Clasificación de la variable distancia a sumidero.

- **Densidad de población:** Basado en el análisis se retoma esta variable y se considera el número de habitantes por kilómetro cuadrado de la zona costera, ya que proporciona una medición más directa de las presiones e impactos del desarrollo humano en la zona costera. Este indicador tiene dos propósitos: cuantifica un importante impulsor de la presión del ecosistema costero, y también cuantifica un componente importante de la vulnerabilidad al aumento del nivel del mar y otros peligros costeros. Una mayor densidad de población aumenta las presiones sobre los ecosistemas costeros; como la conversión del hábitat, cambio de uso de suelo, cargas de contaminantes y la introducción de especies invasoras. Estas presiones conducen a la pérdida de biodiversidad, blanqueamiento de corales, hipoxia, erosión, reducción de la calidad del agua y amenaza para la salud humana. Esta variable es la relación entre el número de habitantes y el área total de la aldea, asentamiento o ciudad; mientras que las personas vulnerables son el resultado de la división entre el número de personas vulnerables dividido por la población total (Handayani et al., 2017). En resumen, la densidad de población influye en el daño que puede ocurrir cuando se presentan eventos peligrosos (Rasch, 2015); cuando más densamente poblada es un área, mayor es la susceptibilidad a daños.

La población puede seleccionarse como un subíndice de variables socioeconómicas (Hegde & Reju, 2007). La población costera puede considerarse como una variable “económica” (Devoy, 1992; Dilley & Rasid, 1990; Gornitz et al., 1997; Jana & Bhattacharya, 2013; McLaughlin et al., 2002; Rivas & Cendrero, 1994) porque las personas en áreas densamente pobladas actúan para proteger sus propiedades de la erosión. Son reacios a abandonar sus propiedades e infraestructura que se han construido durante muchos años. Por otro lado, las áreas donde viven pocas personas pueden no sufrir la misma presión o la misma necesidad de protección. Al mismo tiempo, la población costera también puede interpretarse como una variable directa “inductora de erosión” (Hegde & Reju, 2007; Jana & Bhattacharya, 2013; McLaughlin et al., 2002) porque la presencia de un gran número de personas cerca de la costa puede producir impactos perjudiciales en el área costera. Amabas opiniones de la población en relación con la vulnerabilidad costera son complementarias, ya que cada una aumenta el efecto de la otra en el aumento o disminución de la vulnerabilidad. Los mapas de densidad de población se crearon utilizando datos censales. Las zonas costeras que tienen una alta densidad de población se consideran “muy vulnerables” y las áreas de baja densidad “poco vulnerables”.



Figura 121. Clasificación de la variable densidad de población (Hab/km²).

7.4 EVALUACIÓN DE ÍNDICE DE ACTUACIÓN

Este índice identifica la importancia de un área, de acuerdo con sus características físicas y relacionadas a la erosión y a la población. Es importante tener en cuenta que la importancia o la urgencia de la intervención en un área no implica que será la primera en intervenir.

Se consideraron ocho variables, cada una de las cuales se clasificó y se le asignó a cada una un valor de clasificación (Tabla 27). Para facilitar y acelerar el cálculo, todos los pasos se integraron en rutinas desarrolladas en el software MATLAB.

Tabla 27. Síntesis de variables, clasificación y valores específicos.

VARIABLES	Clasificación	Valores específicos	VARIABLES	Clasificación	Valores específicos
Vulnerabilidad	Muy baja	1	Batimetría	> 5.0 m	1
	Baja	2		5.0 – 4.0 m	2
	Moderada	3		4.0 – 3.0 m	3
	Alta	4		3.0 – 2.0 m	4
	Muy alta	5		< 2.0 m	5
Uso de suelo	Área urbana	1	Distancia a fuente	< 1 km	1
	Agricultura	2		1 – 2.5 km	2
	Área sin vegetación	3		2.5 – 5 km	3
	Pastizal	4		5 – 7.5 km	4
	Selva	5		>7.5 km	5
	Manglar	6	>7.5 km	1	
Características del suelo	Planicie cárstica	1	Distancia a sumidero	5 – 7.5 km	2
	Planicie fluvial	2		2.5 – 5 km	3
	Planicie lacustre	3		1 – 2.5 km	4
	Planicie palustre	4		< 1 km	5
	Planicie de cornodes litorales	5		1.03 – 6.03	1
Pendiente media del terreno	>1.0	1	Densidad de población	6.03 – 11.03	2
	0.50 – 1.0	2		11.03 – 16.03	3
	0.10 – 0.50	3		16.03 – 21.03	4
	0.05 – 0.10	4		> 21.03	5
	< 0.05	5			

El valor del índice se obtiene de la suma aritmética del valor específico de cada variable y se puede expresar con la ecuación:

$$II = \sum_{i=1}^n SV_i \quad (7.1)$$

Tras la aplicación de la ecuación, un valor mínimo de 8 y un máximo de 41 se obtuvo. Tomando como base los criterios propuestos para la categorización de los resultados del IVC, aquí se consideró la división del rango en 4 partes iguales como lo propone Gornitz et al. (1991), de ahí que se obtuvieron cuatro categorías representativas (Tabla 28):

Tabla 28. Grupos obtenidos de los resultados de la evaluación del índice de intervención.

Valor	Categorías
8 – 16.25	Baja Importancia
16.25 – 24.5	Importancia moderada
24.5 – 32.75	Alta importancia
32.75 – 41	Muy alta importancia

En la Figura 122 se presenta un resumen de la clasificación de acciones para la costa de Campeche. Dos categorías de intervenciones se obtuvieron. Está claro que la mayor urgencia se encuentra en la parte sur del estado.



Figura 122. Nivel de urgencia de actuación (intervención) para la costa del estado de Campeche.

7.5 SEGMENTOS LITORALES JERÁRQUICOS

7.5.1 Evaluación de segmentos litorales jerárquicos

Los límites obtenidos en la caracterización de las celdas litorales (Ver Sección 6.3), los límites obtenidos en el índice de vulnerabilidad (Ver Sección 8.4) y, los obtenidos en el índice de actuación (Ver Sección 9.4); se sobrepusieron en un mapa, obteniendo los segmentos costeros.

Estos segmentos son clasificados como baja, media o alta prioridad en función de las actividades económicas, la población y los ambientes naturales presentes en la zona. Los Segmentos Litorales Jerárquicos (SLJ) para la costa del estado de Campeche son presentados en la Figura 123; donde el rojo representa alta prioridad, el amarillo medio y el verde baja prioridad.

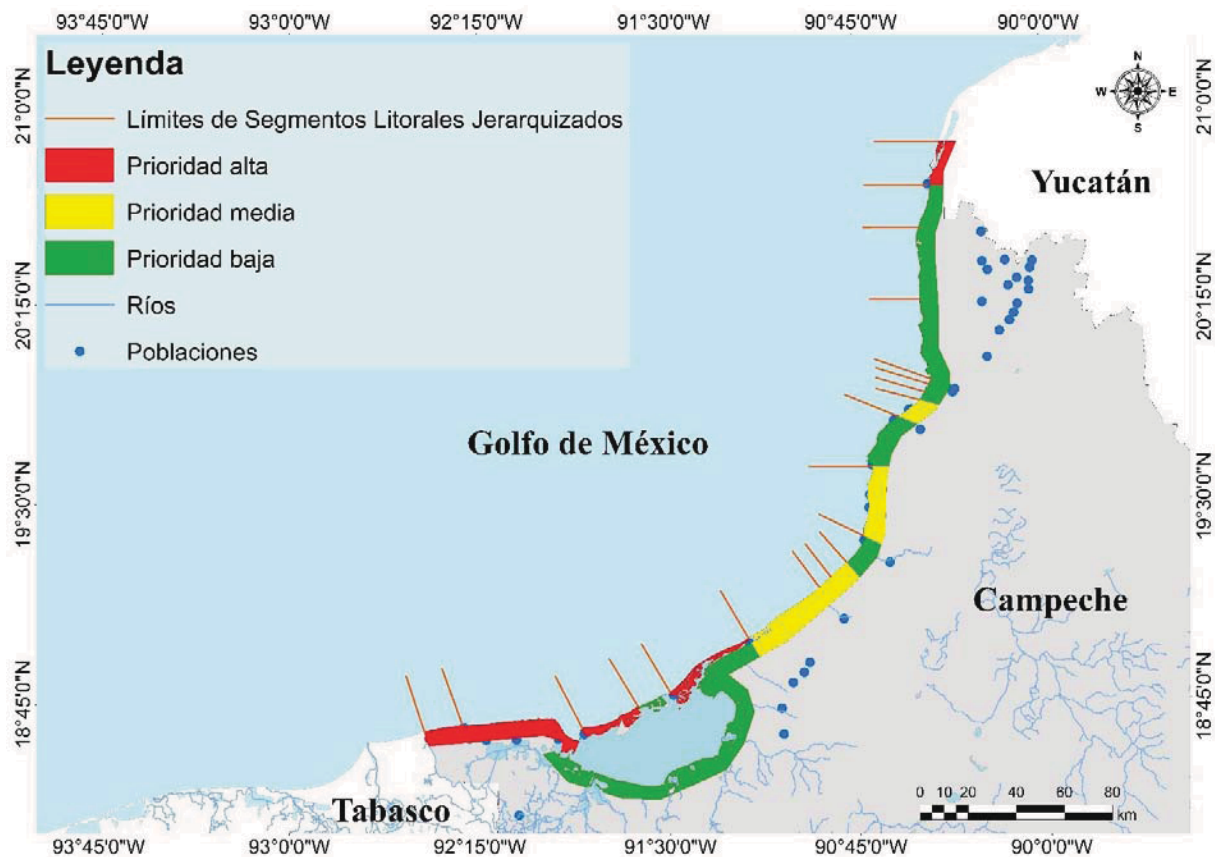


Figura 123. Segmentos Litorales Jerárquicos identificados para la costa de Campeche.

8

MODELADO NUMÉRICO

8.1 INTRODUCCIÓN

Para identificar las variaciones de la zona costera es necesario analizar el oleaje y el viento, ya que estos dos agentes se encargan de regular y conducir los procesos de erosión y depositación de sedimento en las playas. Es por ello que la caracterización de estos agentes debe incluir la variación de los diferentes estados del mar que pueden presentarse en un lapso de tiempo y los patrones extremos y medios.

Para la caracterización del clima marítimo se empleó la base de datos WaveWatch III (Tolman, 2009)(WW3- <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>), se realizó análisis extremal y medio para conocer las características del oleaje que influye sobre el comportamiento de las playas de Campeche.

Posteriormente se generaron modelos topobatimétricos de alta resolución y se simularon las condiciones de oleaje, marea, viento y descarga de ríos a fin de reproducir las condiciones que modifican las playas.

Se obtuvieron mapas de superficie libre, velocidades y dirección de corrientes. En el ANEXO VII, se presentan gráficos comparativos de los diferentes escenarios simulados para diferentes puntos de observación a lo largo del litoral, así como mapas de elevación de superficie libre y de dirección y magnitud de corriente.

Finalmente se evaluaron las acciones de intervención: “Do – nothing”, Retiro de estructuras y Beach nourishment para las zonas de alta prioridad de intervención identificadas en los capítulos anteriores. Los resultados de las simulaciones servirán para reevaluar la vulnerabilidad costera a fin de valorar si estas acciones ayudan a disminuir la erosión, la vulnerabilidad y la urgencia de actuación.

8.2 DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Comprender los procesos costeros e implementar una planificación acorde a las necesidades podría permitir que el estado de Campeche desarrolle turismo y urbanizaciones en armonía con el medio ambiente.

Por consiguiente, se decidió en primera instancia considerar todo el litoral del estado para simular las condiciones hidrodinámicas, así como la propagación del oleaje. Posteriormente se identificaron 8 sectores que (Figura 124), por su importancia económica, ecológica y las tasas de erosión que presentan, así como el nivel de vulnerabilidad y su urgencia de actuación merecen ser simulados a detalle; las zonas se enlistan a continuación:

- a) Isla Arena
- b) San Francisco de Campeche
- c) Ciudad del Sol y alrededores
- d) Sabancuy
- e) Isla Aguada
- f) Ciudad del Carmen
- g) Puerto Rico
- h) Nuevo Campechito

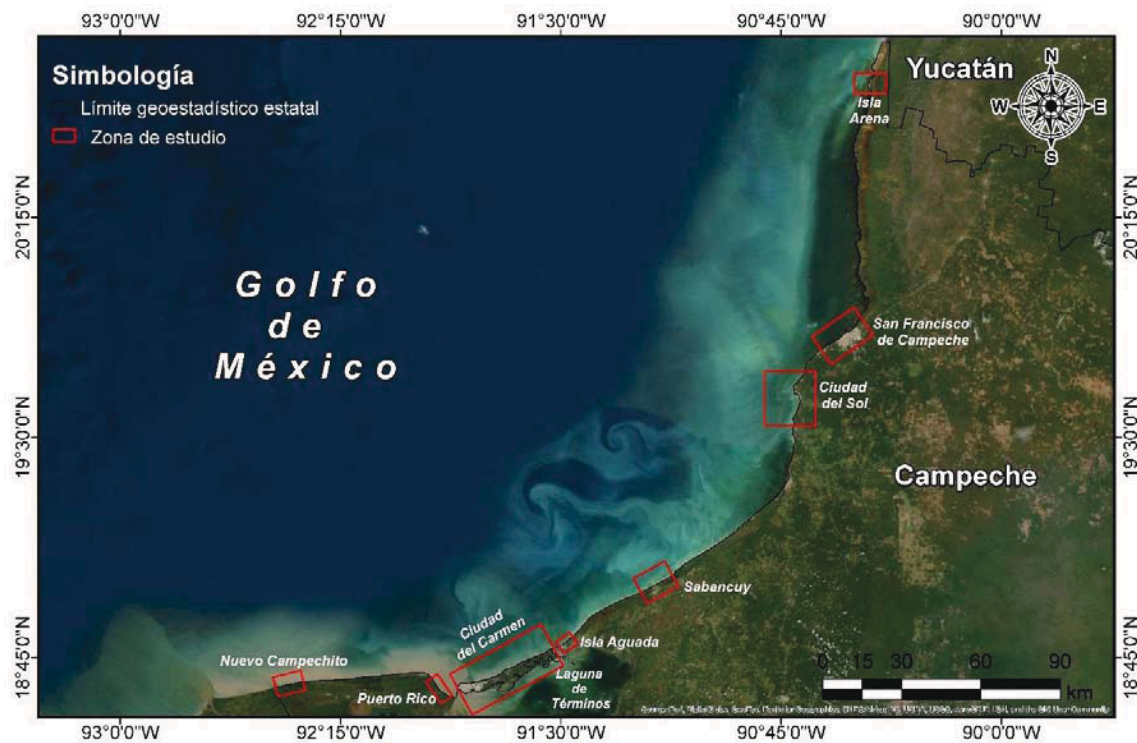


Figura 124. Zonas de estudio consideradas para la simulación numérica.

8.3 MODELO TOPOBATIMÉTRICO

Para la generación del modelo topobatimétrico, se obtuvo información de diversas fuentes: un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a una resolución de 20 m (Vega-Serratos et al., 2013), Carta Náutica “Gulf of Mexico Barra Tupilco to Isla Piedra” (NIIMA, 1981), Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO, 2018) y medición de perfiles de playa (Figura 125).

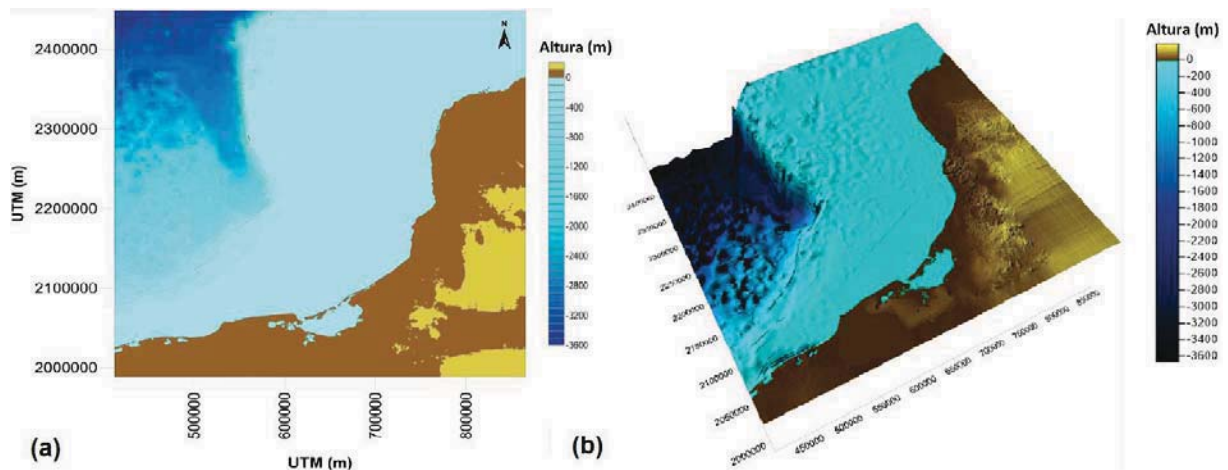


Figura 125. Modelo topobatimétrico del estado de Campeche y sector del Golfo de México. a) Vista 2D; b) Vista 3D. Se observa la caída en profundidad hacia el norte del dominio.

8.4 MODELO HIDRODINÁMICO

Para la simulación de la hidrodinámica de la costa del estado de Campeche se utilizó el modelo *Delft3D*, desarrollado por Delft Hydraulics en los Países Bajos. Aquí se hace uso del modelo hidrodinámico (módulo *FLOW*) que resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo la hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el $k - l$ o el $k - \epsilon$ (Uittenbogaard, van Kester, & Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial (horizontal) del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, entrada de ríos, entre otros) y por la cercanía a las zonas de mayor interés.

En las simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con un sistema coordinado tipo sigma o “ σ ”, donde las capas se dividen proporcionalmente y están limitadas por dos planos, de los cuales uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo.

El número de capas en la vertical es constante para la totalidad del área de estudio. La integración temporal usada por el esquema de solución numérica (*método Cyclic*) se basa en el método ADI (*Alternating Direction Implicit*). Este esquema no impone restricciones al intervalo temporal de cálculo.

Se consideró un intervalo temporal apropiado determinado por el tipo de problema involucrado y estimado con el cálculo del número de Courant – Friedrichs – Lewy (CFL) para no afectar a la calidad de solución (Delft3D - Flow, 2011).

8.4.1 Malla

Para el modelo hidrodinámico se elaboró una malla de cálculo en el módulo *RGFGRID*. Una malla rígida regular de 1699 x 1089 elementos en dirección *X* y *Y* respectivamente (Figura 126). La malla contiene 1,850,211 elementos cuadrados; cada elemento mide 200 m de lado para un área de 40,000 m². El dominio cubre 339.8 km en sentido *X* y 217.8 km hacia aguas profundas (sentido *Y*) para un área de 74,008.44 km² y se encuentra rotado 57° en sentido antihorario con respecto al origen del sistema coordenado convencional.

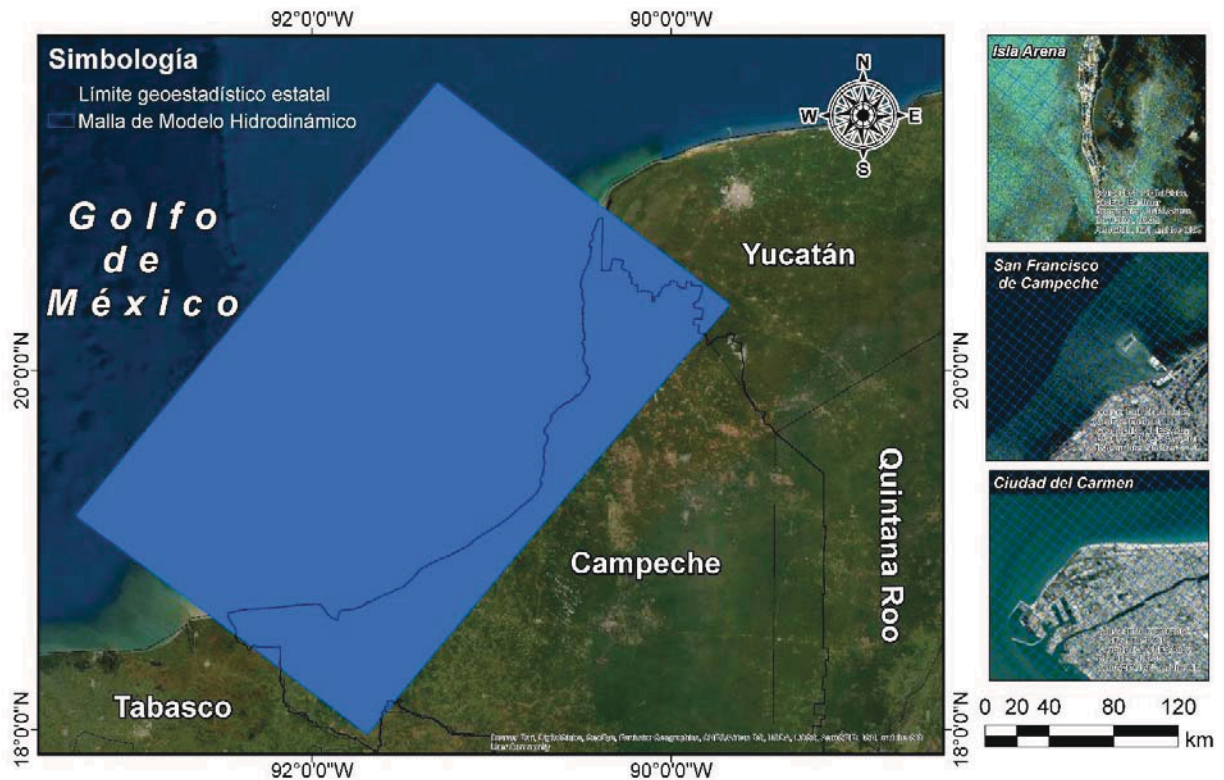


Figura 126. Malla de cálculo empleada para el modelo hidrodinámico.

Posteriormente se requirió asignarle valores topobatemétricos a la malla, por lo que se utilizó el módulo *QUICKIN*; a través de este módulo se elaboró un archivo en formato **.dep*, que contiene valor de altura para cada nodo de la malla (Figura 126).

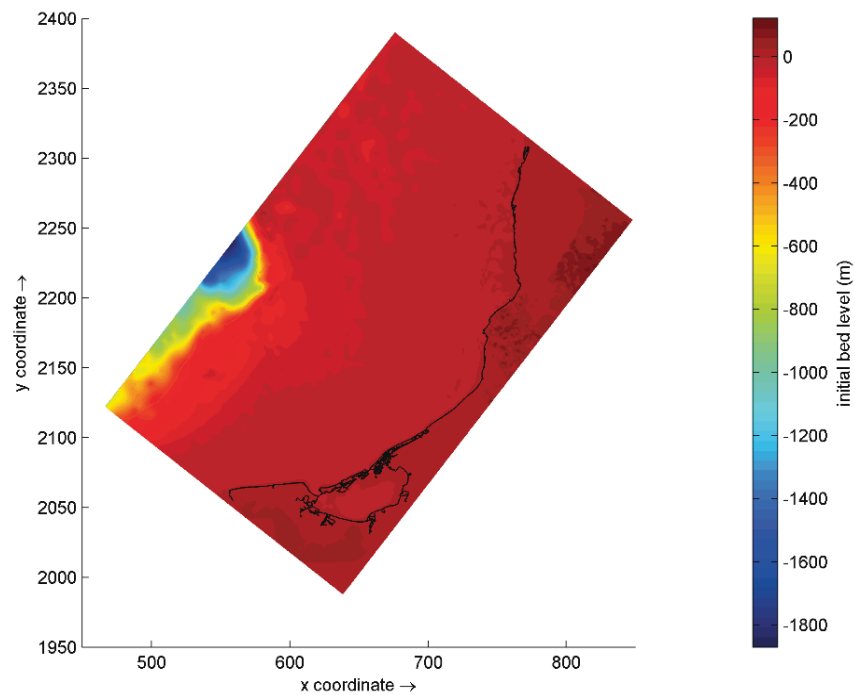


Figura 127. Modelo topobatimétrico generado en el módulo QUICKIN

8.4.2 Modelo

Para las condiciones hidrodinámicas se requirió los siguientes datos de entrada:

- Marea:

Se utilizó el *delftdashboard*; una interfaz de usuario gráfica basada en Matlab que permite generar las condiciones de entrada para un modelo y se encuentra acoplada al modelo Delft3D (Figura 128); se generaron las fronteras y sus respectivas condiciones para el modelo hidrodinámico de la costa de Campeche, a partir de la malla y el archivo *.dep generado.

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

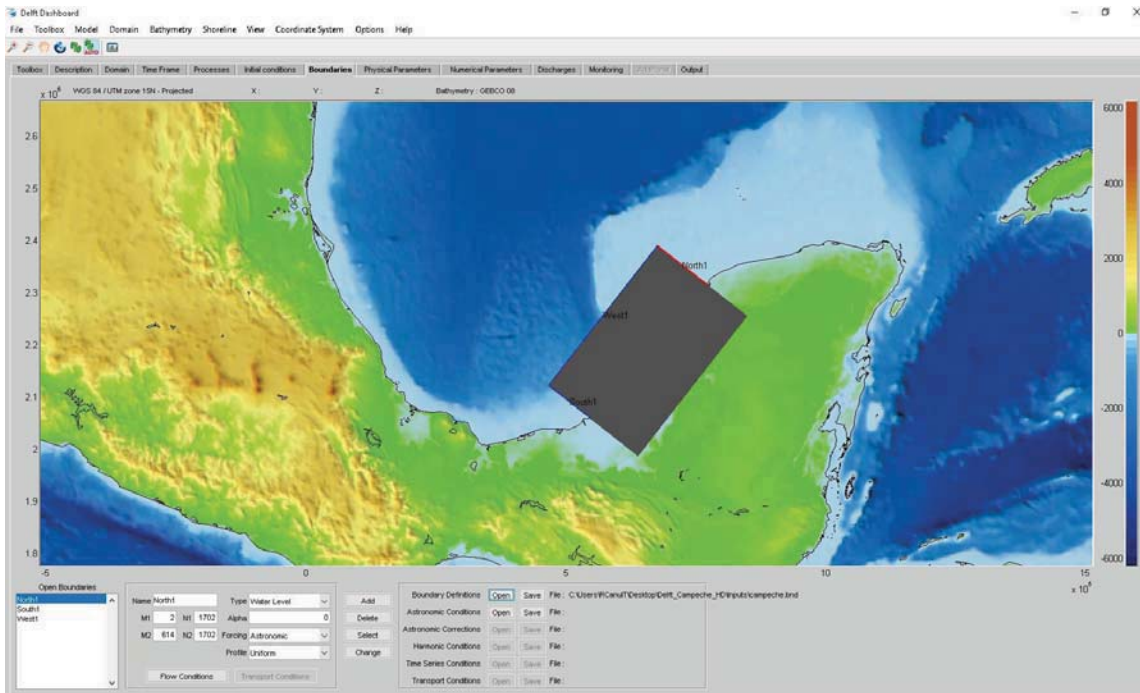


Figura 128. Interfaz de delftdashboard; en la figura se presenta la malla del estado de Campeche y las 3 fronteras generadas: North, South y West.

En la Tabla 29 se muestra las fronteras generadas y su tipo.

Tabla 29. Fronteras generadas para el dominio.

Frontera	Tipo de frontera
North	Water Level
South	Water Level
West	Current

A través de este módulo se obtienen las condiciones de la marea astronómica. En la Tabla 30, se presentan a modo de ejemplo los valores de las componentes para un conjunto de frontera; cada frontera se considera formada por 2 conjuntos, por lo que se generan las componentes para ambos conjuntos.

Tabla 30. Componentes de marea astronómica para el conjunto de frontera North1A, tomados del modelo TPXO 7.2 incluido en la base de datos “Tide Database” de delftdashboard.

Componente	Conjunto North1A	
	Amplitud	Fase
M2	0.079438509	256.83730
S2	0.018474779	266.77332
N2	0.021048258	241.12974
K2	0.005898147	231.00730
K1	0.164292330	26.45472

O1	0.158262160	19.31561
P1	0.049438134	26.03439
Q1	0.035860242	6.24962
MF	0.012262339	354.95895
MM	0.005658599	349.42346
M4	0.000370115	201.38362
MS4	0.000322247	204.83098
MN4	0.000041795	141.27622

- Descarga:

Para el modelo se consideraron los 4 ríos más importantes en el estado (Figura 129) y de los cuales se tiene información, tres descargan en la Laguna de Términos y uno en el Golfo de México; debido a la escala del modelo sólo se considera la descarga para cada río de forma puntual y constante, para ello se consideró el valor de la descarga promedio máxima registrada que han sido reportadas por Kuc Castilla (2015) y Ramírez (2015) (Tabla 31):



Figura 129. Ríos considerados en el modelo hidrodinámico.

Tabla 31. Valores de descarga para los principales ríos del estado de Campeche.

Río	Caudal (m3/s)
Palizada	460
Candelaria	143
Mamantel	12
Champotón	90

- Viento:

Los datos de viento se obtuvieron de la base de datos del modelo WAVEWATCH III™ (Ver Sección 10.4), para el periodo 2005 – 2019 (Figura 130). La serie de datos obtenida fue analizada y clasificada por estación climática: primavera, verano, otoño e invierno; así como un valor medio (denominado anual) y una clasificación regional por época climática: secas, lluvias y nortes (Yáñez-Arancibia & Day, 1982); así mismo se simula el viento del Huracán Janet (Escudero et al., 2014).

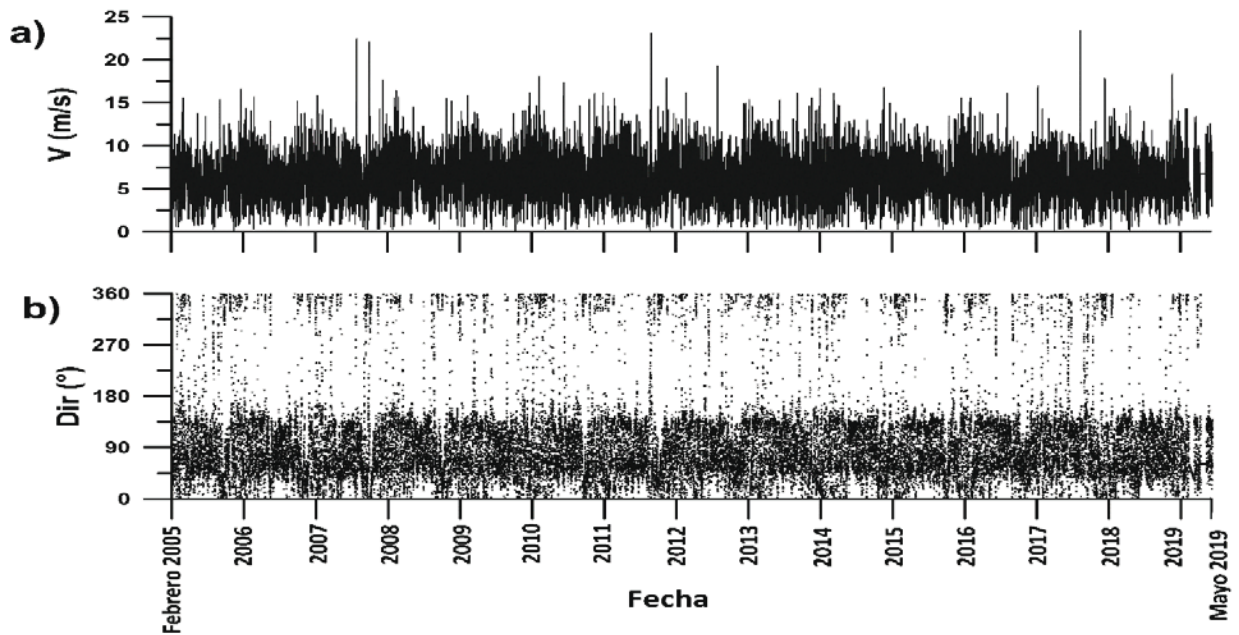
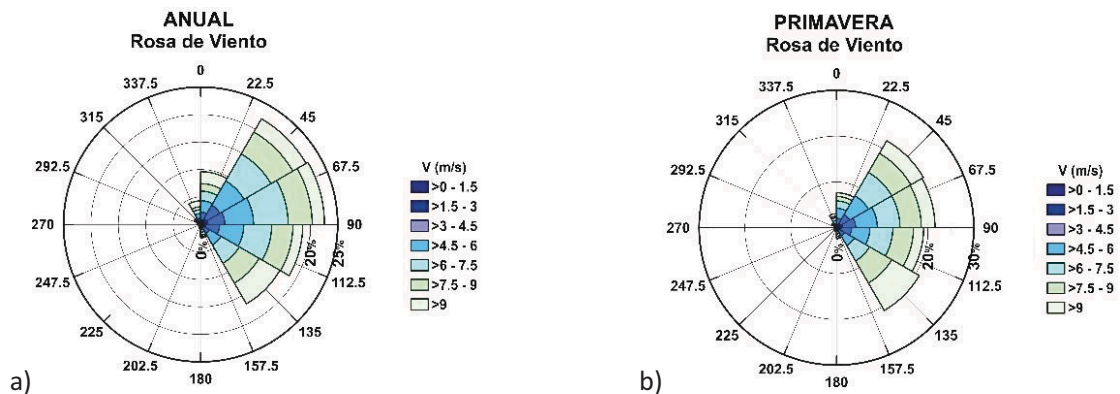


Figura 130. Serie de viento para febrero 2005 - mayo 2019.

En la Figura 131 se presentan las rosas de viento y en la Tabla 32 los escenarios generados para la simulación.



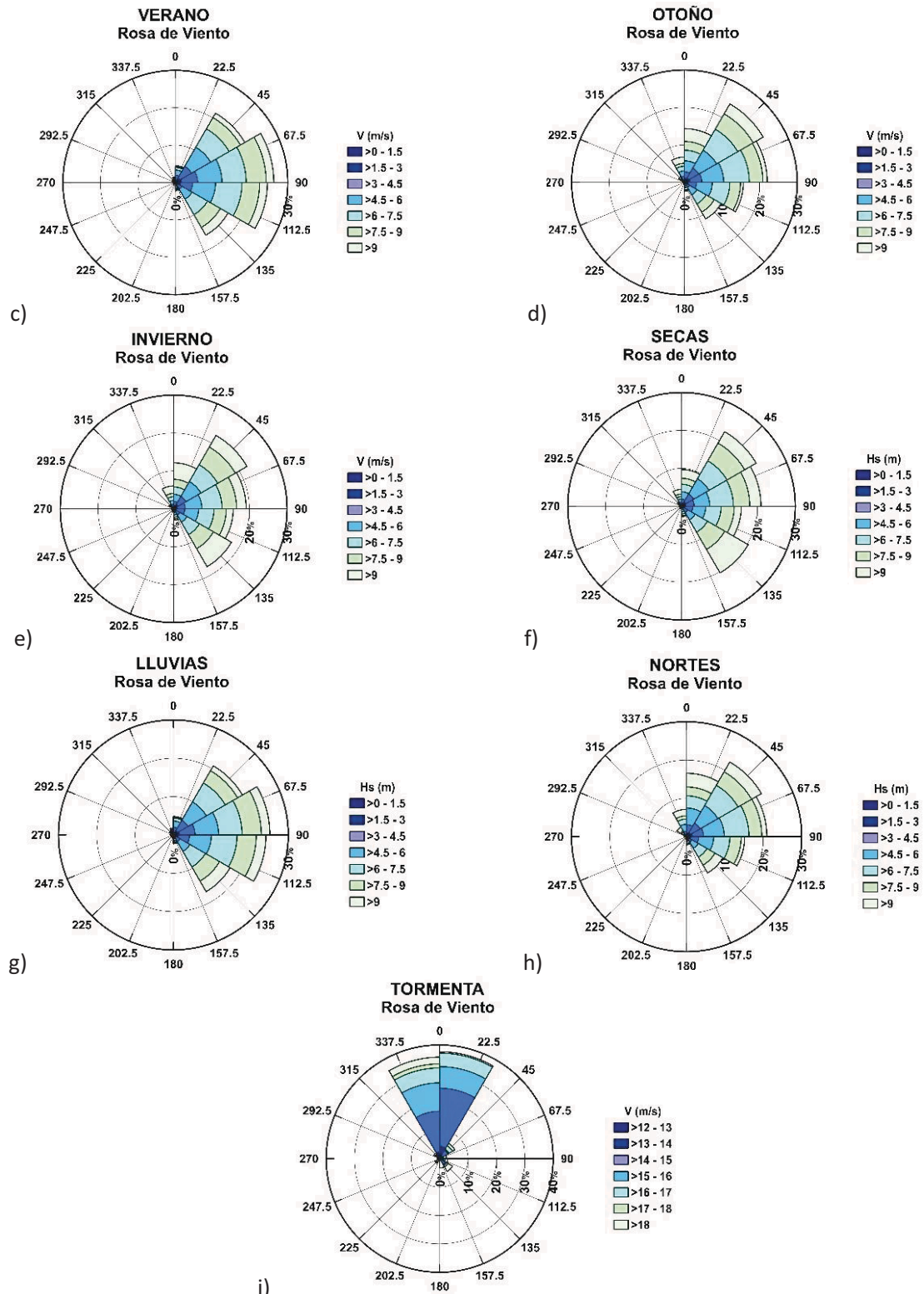


Figura 131. Rosa de oleaje para las diferentes estaciones y épocas climáticas: a) anual, b) primavera, c) verano, d) otoño, e) invierno, f) secas, g) lluvias, h) nortes, i) tormenta.

Se observa que en general el viento que se presenta en el litoral del estado de Campeche no excede de los 7 m/s a excepción del escenario de “*Tormentas*”, donde el viento puede alcanzar velocidades cercanas a los 15 m/s. En lo que se refiere a la dirección, hay una predominancia de la dirección NE, seguida de las direcciones ENE y ESE; sólo las direcciones N y NNE se presentan para los escenarios de “*Tormenta*” y “*Huracán Janet*”, respectivamente.

Tabla 32. Escenarios generados para las condiciones de viento.

Época	Velocidad (m/s)	Dirección	
		Sentido	(°)
Anual	6.63	ENE	67.5
Primavera	6.96	ENE	67.5
Verano	6.53	ESE	112.5
Otoño	6.61	NE	45
Invierno	6.89	NE	45
Secas	6.83	NE	45
Lluvias	6.72	ESE	112.5
Nortes	6.53	NE	45
Tormentas	14.52	N	360
Huracán Janet	35.7	NNE	22.5

En la Figura 132, se presenta la ubicación de los 21 puntos de observación para los modelos generados. Los puntos PO2, PO3, PO4, PO5, PO6 y PO10, se ubican sobre las poblaciones costeras más importantes del estado: Isla Arena, San Francisco de Campeche, Champotón, Sabancuy, Isla Aguada y Ciudad del Carmen, respectivamente. Los puntos PO7, PO8, PO11 y PO12 se localizan en las bocas de la Laguna de Términos: Boca de Isla Aguada y Boca de Zacatal, respectivamente. Los puntos restantes se ubican cerca de las descargas de los ríos, y en la zona central y perimetral de la laguna.

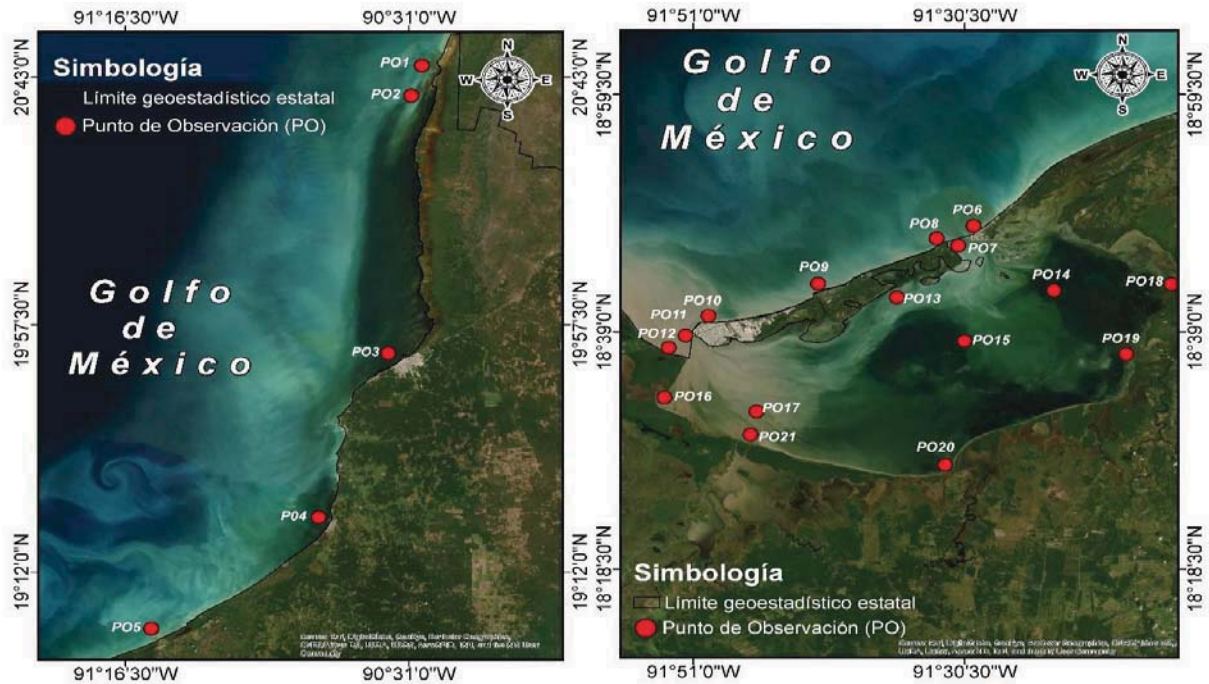


Figura 132. Puntos de Observación para el modelo Hidrodinámico.

El periodo de simulación fue de 48 horas, con un paso de tiempo de cálculo de 1 minuto y un paso de guardado de resultado de 15 min. Se obtuvieron mapas de nivel de agua, de ahora en adelante “Water Level” para las condiciones de bajamar y pleamar (Figura 133); así como los niveles para los 21 puntos de observación, en la Figura 134, se presentan a manera de ejemplo los gráficos para 4 puntos de observación.

De forma general, se puede decir, que los niveles de agua para los diferentes escenarios permanecen constantes. Sin embargo; para una mejor interpretación los resultados pueden agruparse en función de la altura presentada, en 4 grupos: 1) Otoño – Invierno, 2) Tormentas, 3) Huracán y 4) escenarios restantes.

El grupo 4, presenta alturas de pleamar entre 0.35 m y 0.40 m a lo largo del litoral; mientras que el grupo 1 muestra un ligero incremento de 5 cm. Para el grupo 2 se observa que hacia la zona norte del estado (PO1 y PO2) los niveles decrecen debido al ángulo de incidencia del viento que genera un empuje de la columna de agua hacia el sur del estado; en la zona centro los niveles de agua se asemejan a los del grupo 1; hacia el sur hay un incremento en promedio de 25 cm en la elevación de la superficie libre. Para el grupo 3, el escenario es de un huracán categoría 1¹⁷ con velocidad de viento de 35.7 m/s (128.52 km/h), que genera una sobreelevación de la columna de agua en promedio de 1.54 m para el punto P010 – Playa Norte (Ciudad del Carmen); en los puntos de observación ubicados dentro de la laguna, los valores de elevación de la columna de agua son mayores esto debido a dos factores principales: la acumulación de agua por empuje del viento y la

¹⁷ De acuerdo a la escala de huracanes de Saffir – Simpson, en la que un huracán categoría 1 presenta velocidad de viento en el rango de 33 – 42 m/s.

descarga de los ríos, ejemplo es el punto PO21 en el que, la sobreelevación en promedio alcanza altura de 2.52 m.

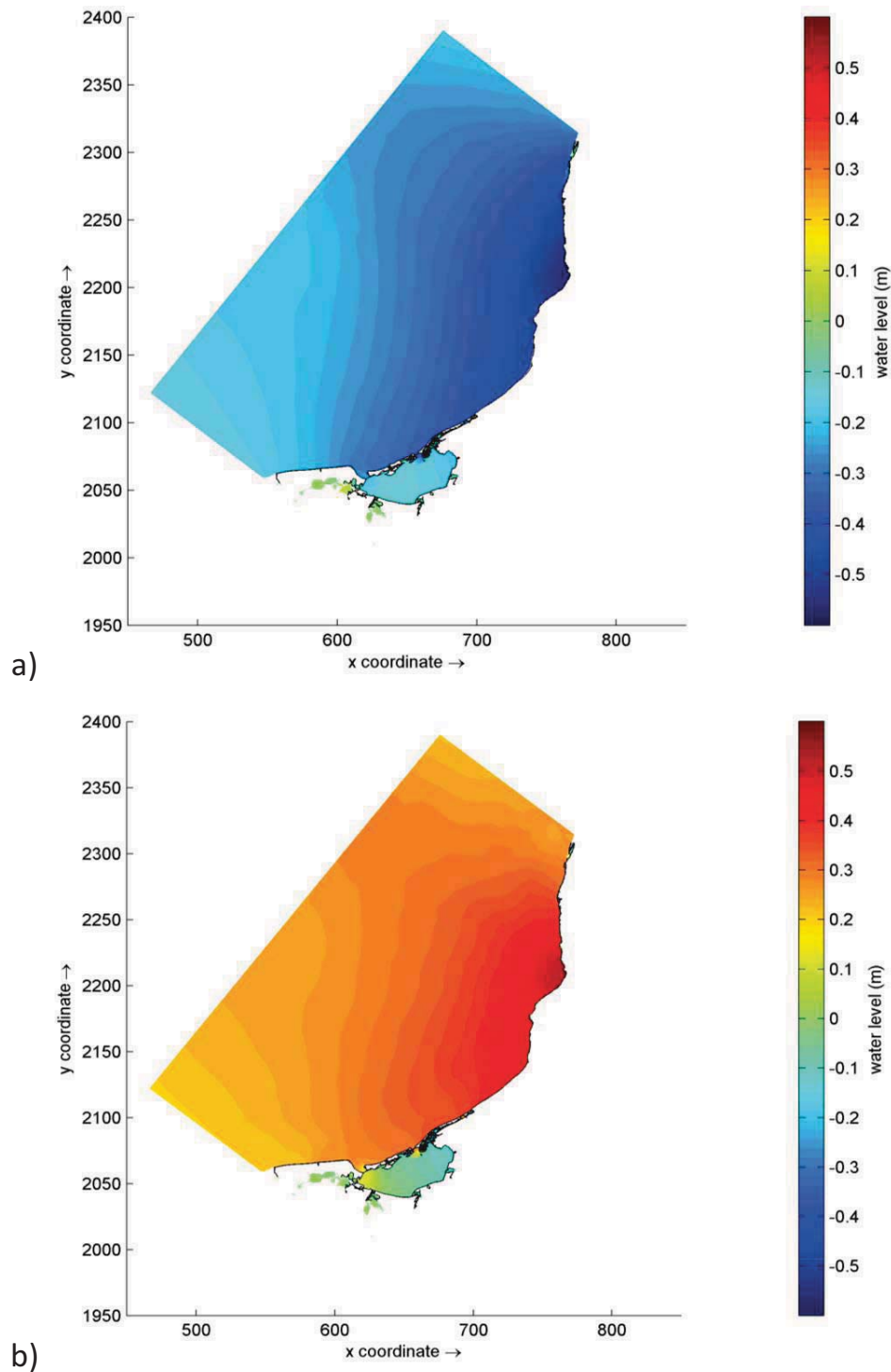


Figura 133. Mapas de Superficie Libre para el escenario anual. a) Nivel de bajamar, b) Nivel de pleamar.

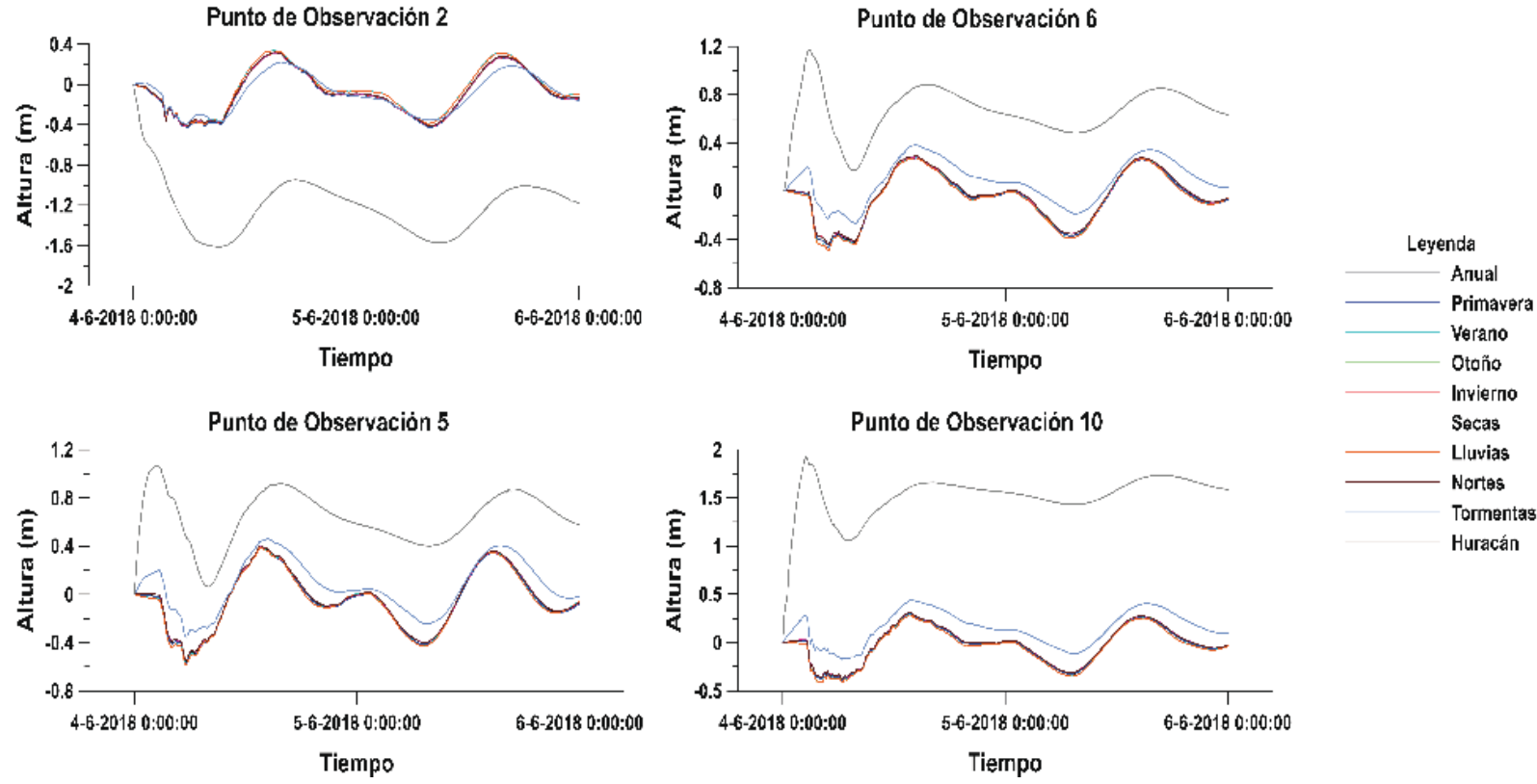


Figura 134. Niveles de agua para diferentes puntos de observación: PO2 - Isla Arena, PO5 - Sabancuy, PO6 - Isla Aguada, PO10 - Playa Norte (Ciudad del Carmen).

Con respecto a la velocidad; en la zona norte y central las velocidades oscilan entre 0.2 y 0.3 m/s a lo largo de las estaciones y épocas climáticas, aumentando a 0.4 m/s en tormentas. En la zona sur, en la región de la Laguna de Términos es donde se identifican las mayores velocidades; durante la mayor parte del año las velocidades oscilan entre 0.2 a 0.6 m/s, mientras que durante el paso de un evento extremo pueden presentarse velocidades por arriba de 1 m/s. Es importante mencionar que no sólo varía la magnitud de la velocidad, sino también el campo de acción; en eventos extremos es mayor la zona de incidencia (Figura 135).

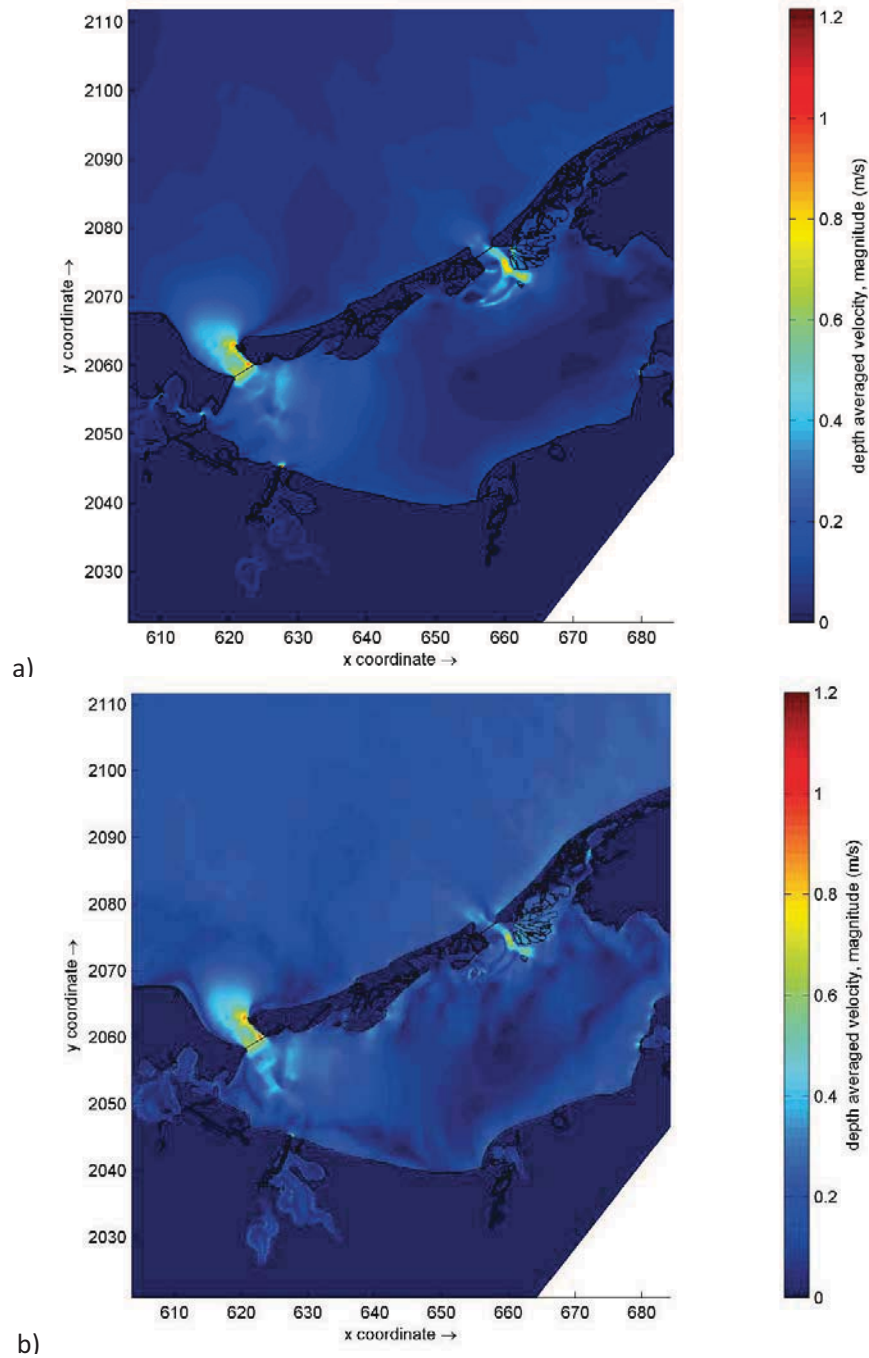


Figura 135. Magnitud de velocidad: a) Escenario anual, b) Escenario de Tormenta.

8.5 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DE CAMPECHE

El modelo de predicción de oleaje que se utilizó para caracterizar el régimen medio del clima marítimo es el WAVEWATCH III™. El modelo WAVEWATCH III™ (Tolman, 1997, 1999, 2009) es un modelo de tercera generación que ha sido desarrollado por el Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) del Environmental Modeling Center (EMC) y el National Center for Environmental Prediction (NCEP). Se basa en los modelos WAVEWATCH I y WAVEWATCH II desarrollados por Delft University of Technology y NASA Goddard Space Flight Center, respectivamente. Este modelo está basado en el modelo WAM (Komen et al., 1994; WAMDIG, 1988); sin embargo, difiere de sus predecesores en muchos puntos importantes, como las ecuaciones de gobierno, la estructura del modelo, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas. Además, está evolucionando de un modelo de ola a uno de modelado de olas, lo que permite un desarrollo fácil de enfoques físicos y numéricos adicionales para el modelado de olas.

Este modelo resuelve la ecuación de balance de densidad de acción espectral de fase aleatoria para espectros de dirección de número de onda. La suposición implícita de esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corriente) así como el campo de la onda en sí, varían en escalas de tiempo y espacio, que son mucho más grandes que las escalas de variación de una sola onda. A partir de la versión 3.14 se incluyeron opciones de términos fuente para aguas extremadamente poco profundas (zona de surf), así como el mojado y secado de puntos de la malla. Mientras que la física de la zona de surf implementada sigue siendo rudimentaria, implica que el modelo de onda ahora puede aplicarse a aguas someras arbitrarias.

Tanto NCEP como Delft University of Technology ponen a disposición de la comunidad investigadora los modelos anteriores y los resultados de otros varios modelos globales y locales.

MMAB actualmente mantiene dos clases de Hindcast de WAVEWATCH®:

1. Un pronóstico de 30 años generado como un conjunto de datos homogéneos de vientos de alta resolución por hora del NCEP Climate Forecast System Reanalysis and Reforecast (CFSRR). El periodo de tiempo abarca desde 1979 hasta 2009. Es un Hindcast generado con una versión única del modelo y un campo de viento de fuerza estadísticamente consistente y es adecuado para usos en estudios climáticos.
2. Un conjunto de datos en curso producido al volver a ejecutar el modelo desde los campos de viento operaciones para producir los conjuntos de datos de nowcast de mejor estimación. Este es un conjunto de datos Hindcast estadísticamente no homogéneo, porque los modelos subyacentes se actualizan periódicamente. Este modelo utiliza la multimalla del modelo de onda espectral operativa WAVEWATCH® con vientos NCEP operaciones y campos de hielo como campos de forzamiento de entrada. El modelo se ejecuta después del final de cada mes, con todos los datos disponibles. Se tienen datos disponibles de:
 - a. NWW3: de julio de 1999 a noviembre de 2007 (archivo histórico, con brechas)
 - b. Multigrid: de febrero de 2005 a septiembre de 2018.

El modelo consta de 9 cuadrículas rectilíneas y regionales anidadas. Se desarrollan utilizando la batimetría ETOPO – 1 (AMANTE Y EAKINS, 2009), junto con la versión 1.1.0 de la base de datos de la línea de costa de alta resolución jerárquica global e independiente (GSHHS). Las cuadrículas de

resolución más alta se han enmascarado para mejorar la eficiencia del modelo y sólo proporcionan datos cerca de la costa. Las cuadrículas son:

- Global 30 min (glo_30m)
- Artic Ocean 30 min (ao_30m)
- NW Atlantic 10 min (at_10m)
- US West Coast 10 min (wc_10m)
- East Pacific 10 min (ep_10m)
- Alaska 10 min (ak_10m)
- Gulf of Mexico and NW Atlantic 4 min (at_4m)
- US West Coast 4 min (wc_4m)
- Alaskan 4 min (ak_4m)

Información disponible en http://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/prod-multi_1.php

La salida del modelo se encuentra en formato grib2 y contiene dato cada 3 horas de:

- viento: componente U del viento, componente V del viento (m/s)
- hs: altura significativa de la combinación de wind waves and swell (m)
- tp: periodo medio (s) de onda primaria
- dp: dirección de onda primaria (grados verdaderos, es decir 0 grados = provenientes del Norte; 90 grados = provenientes del Este)

Además, a partir de febrero de 2017:

- pdir: dirección de swell waves (grados verdaderos)
- phs: altura significativa de swell waves (m)
- ptp: periodo medio de swell waves (s)

Se puede tener acceso a los datos grib2 y descargarlos desde el servidor FTP: ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1

Para automatizar la descarga de los datos se desarrolló un programa en la plataforma del Software Matlab® (ANEXO V); el programa se enfoca en la descarga de los datos de hs, tp, dp, U y V de cualquiera de las 9 mallas con las que cuenta el modelo y para cualquier periodo comprendido entre 2005 – 2019 (mayo).

El programa descarga la información para el periodo solicitado de una malla en análisis, proyecta esta información en un mapa precargado en la interfaz del programa, con las coordenadas proporcionados ubica el punto de la malla más cercano. Compila, ordena y genera archivos en formato *.txt; además de realizar la estadística del oleaje y gráficos. Esta información es útil para los ingenieros costeros y tomadores de decisiones que tienen que realizar diseño de infraestructura portuaria, diseño de estructuras de protección costera, análisis de vulnerabilidad y riesgo costero, así como estudios de manejo costero.

Para la costa de Campeche, se descargó información de 1 punto de interés a 200 km de la costa aproximadamente y a una profundidad de 1,700 m (Figura 136), en las coordenadas 20.1667° N - 92.50° W. Para dicha información se realizó el análisis que a continuación se describe.

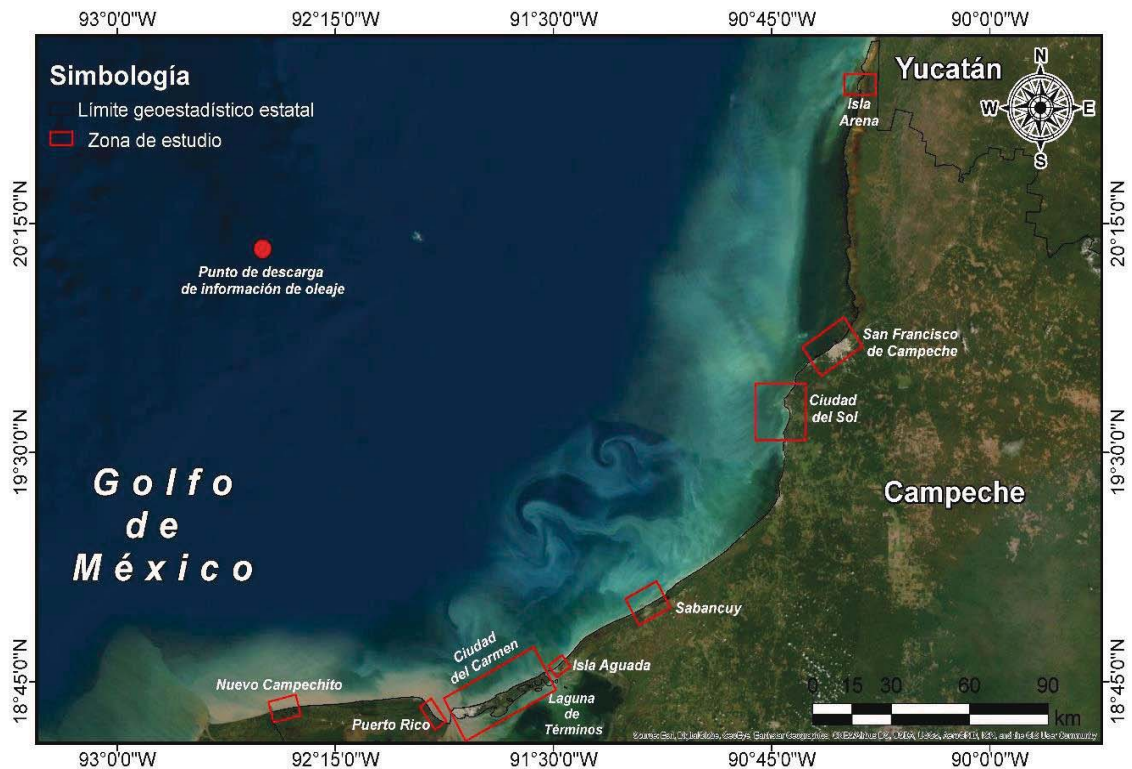


Figura 136. Ubicación del punto de descarga de información de oleaje.

8.5.1 Estadística del clima marítimo

Debido a la necesidad de describir las condiciones del mar a lo largo de los años en las costas del estado de Campeche, se determinó realizar un análisis de largo plazo, en el cual se consideran parámetros de oleaje como: altura significativa (H_s), energía (E), periodo (T) y dirección media (θ_H); y del viento: velocidad (V_w) y dirección (θ_w). El análisis se realiza para encontrar el valor de la distribución de la altura de ola significativa y su respectivo periodo de retorno a lo largo de varios años. A pesar de que no existe un método universal que sea aceptado por todos para determinar las condiciones de mar, el análisis de largo plazo puede realizarse tomando: 1) los valores máximos de series anuales, 2) las magnitudes de los picos de los temporales; 3) solamente considerando todos los datos registrados durante un periodo de observación (series completas) o; 4) utilizar los valores que sobrepasan cierto umbral. La serie datos empleada va de 2005 a 2019 (Figura 137).

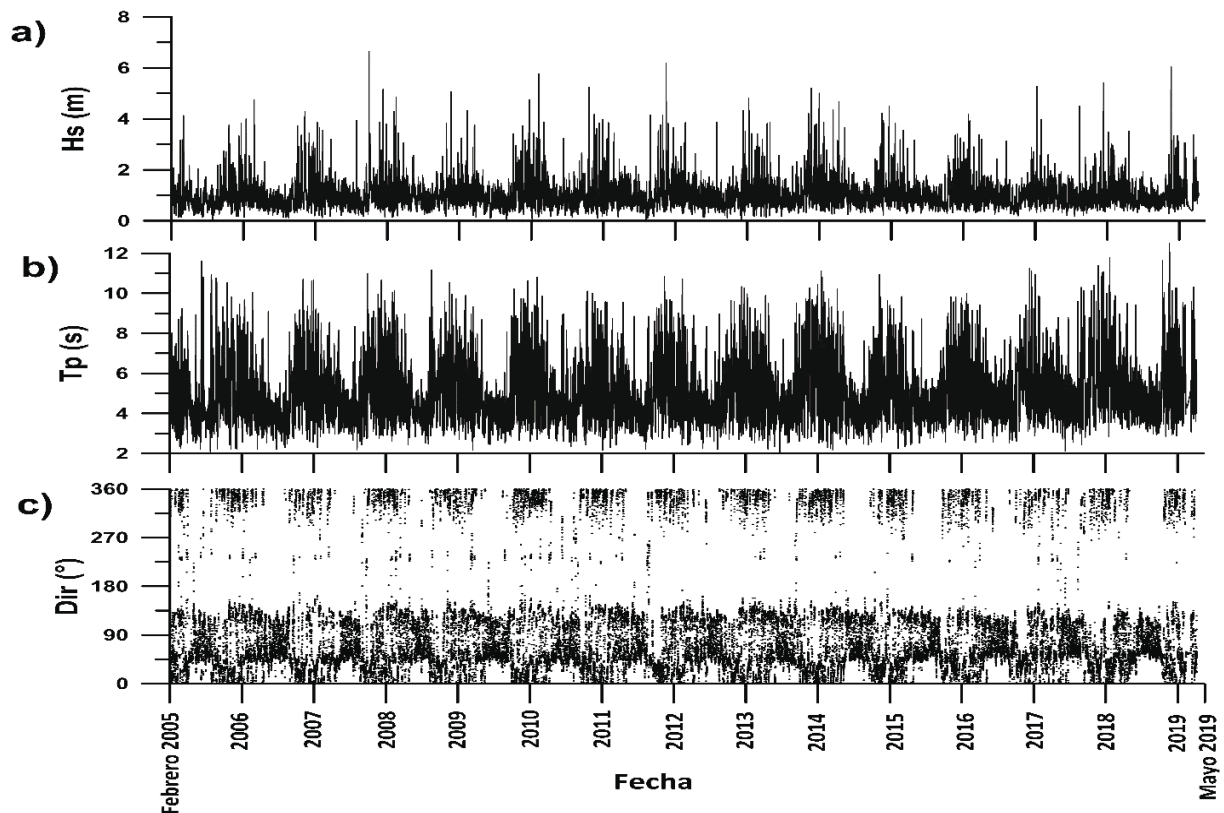


Figura 137. Serie temporal de oleaje obtenida del modelo WaveWatch III.

8.5.2 Análisis de regímenes medio y extremal

Para determinar la estadística del clima marítimo a partir de una serie de datos de oleaje; de acuerdo con Boccoti (2000); Holgben (1990); Holthuijsen (2007); Ruíz (2009); Silva (2005), se debe estimar la probabilidad de la función de densidad conjunta; que comúnmente, se realiza mediante la clasificación de los valores observados y los resultados se pueden exponer de manera gráfica por medio de histogramas de H_s y T en sus respectivos sectores de θ_H por periodos que pueden ser por año, temporada o de forma mensual. Los histogramas se pueden modificar, agregando la cuantificación total de los valores observados en cada dirección de propagación, así como del periodo y a partir de ello, obtener gráficas de probabilidad conjunta que relacionen la altura de ola significativa con el periodo de la ola o la dirección ($p(H_s, T)$ o $p(H_s, \theta_H)$) Ruiz (2009). En la Figura 138, se muestran las gráficas de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ y $p(H_s, \theta_H)$, correspondientes a la serie de datos. Se aprecia que las alturas de ola que arriban a la costa, se encuentran en un rango de 0.5 a 4 m y los valores de periodo medio van desde los 2 a los 10 segundos; la dirección de propagación del oleaje dominante se encuentra en 4 sectores, siendo la dirección NE, la dirección a partir de la cual, la costa recibe más oleaje.

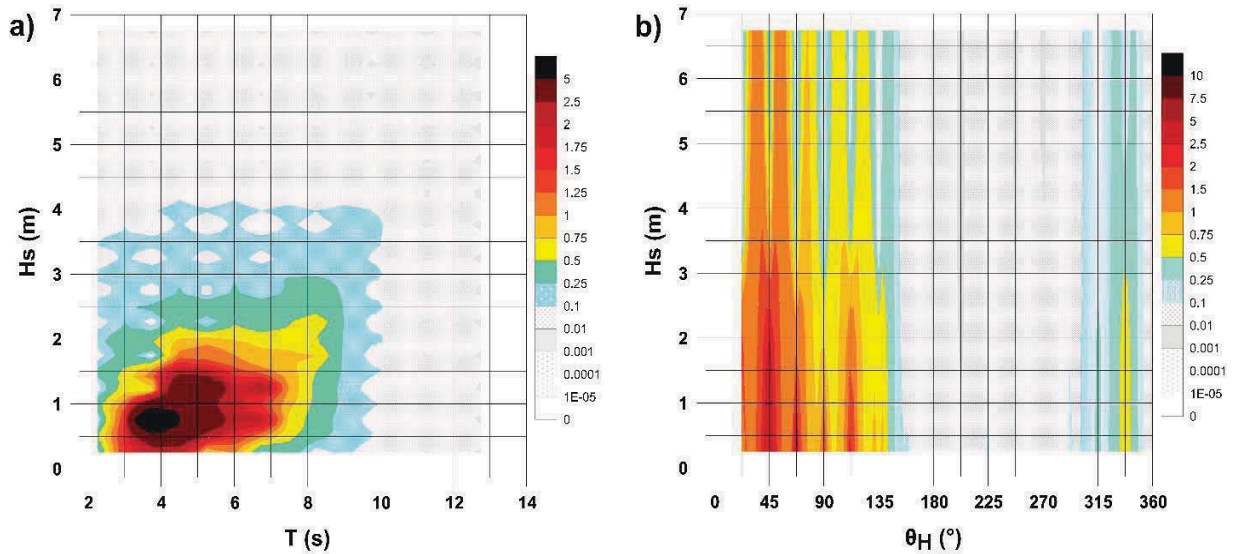


Figura 138. Gráficas de probabilidad conjunta: a) altura de ola significativa - periodo medio, b) altura de ola significativa - dirección de propagación; observaciones de febrero 2005 - mayo 2019.

Para presentar la magnitud y la frecuencia de altura de ola con respecto a su dirección es mediante el uso de rosas de oleaje, que permiten de forma rápida y sencilla, identificar la frecuencia de incidencia y la dirección de propagación del oleaje (Ruíz, 2009); las rosas pueden ser presentadas de forma anual o estacional. En la Figura 139 se observa que 32% del oleaje que se presenta anualmente, proviene de la dirección Norte – Este (NE – 45°); mientras que el 15% proviene de Nornoreste (NNE – 22.5°).

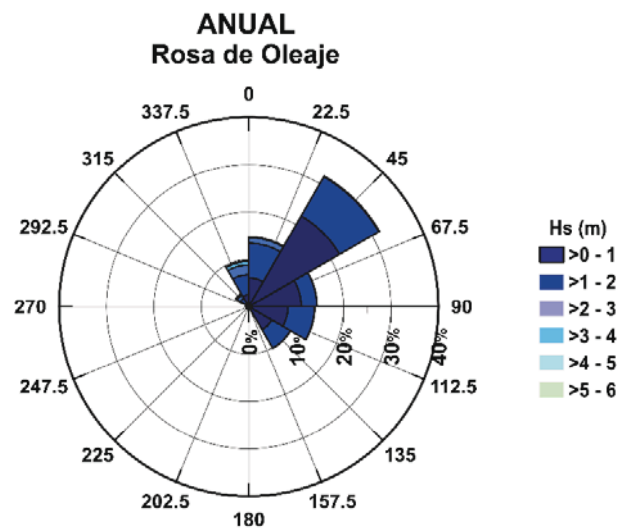


Figura 139. Rosa de oleaje para las observaciones de febrero 2005 - mayo 2019.

El oleaje a largo término es un concepto que se aplica al estudio estadístico de una colección de datos cubriendo el máximo número de años posible. A diferencia del oleaje a corto término, proceso que se puede suponer estacionario, aleatorio y gaussiano, la estructura del oleaje a largo término es un reflejo de las características climatológicas, tanto locales como distantes. Esta descripción

estadística del oleaje, denominada en términos generales “a largo término” suele plantearse para dos intervalos específicos de tiempo: el correspondiente al año climático medio (que estudia las condiciones climáticas más frecuentes, o medias) y el que abarca períodos de tiempo mucho mayores, de decenas de años (que estudia las condiciones más severas o extremas).

El análisis extremal se centra en la caracterización de los eventos extremos o temporales para una zona de estudio, es decir, un subconjunto de datos dentro del total del registro. El objetivo principal del análisis es poder determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marítima determinada en función del riesgo asignado y su vida útil, siendo necesario conocer o estimar la altura de ola significativa asociada a una cierta probabilidad de excedencia dentro del periodo de vida del proyecto. Para determinar dicha altura se necesita modelar el comportamiento estadístico de aquellos valores de la serie de altura significativa, que por su magnitud pueden poner en riesgo la obra.

En el análisis extremal los métodos más utilizados para modelar los valores extremos o máximos de una variable pueden clasificarse en dos grupos según la información que utilizan:

- 1) Método de la muestra total o método de la distribución inicial: fue propuesto por Draper (1963) y revisado por Goda (1979). La idea de este método es estimar el oleaje extremal a partir del clima de oleaje medio y se utiliza cuando el tiempo de registro es corto (inferior a 3 o 4 años). El método parte de toda la información de oleaje (altura de ola) registrada en un periodo determinado y se apoya en la función de distribución de probabilidad de no excedencia de un año climático medio (régimen medio). Existen distintas aproximaciones en función del tipo de datos de partida (visual o instrumental).
- 2) Método de los valores pico: es el más utilizado, aunque requiere un conjunto de datos mucho más extenso en el tiempo puesto que parte de los valores máximos registrados en un periodo de tiempo determinado, que puede ser de un año o bien el máximo de una acción de temporal, se diferencian dos grupos:
 - a) Método de los máximos anuales: este método consiste en seleccionar tan sólo el valor máximo anual de la altura de ola en cierto punto de la costa a lo largo de muchos años. Es decir, para cada año seleccionar la máxima altura de ola que se produjo. Si se hiciese durante muchos años, se conocería aproximadamente la probabilidad de superar cierta altura de ola.
 - b) Método de la serie de duraciones parciales o método de los valores pico (*POT; Peak Over Threshold*): con este método se aprovecha mejor la información disponible y se hacen estimaciones más exactas. Además, es un método más fiable que el de máximos anuales cuando la información disponible corresponde a un periodo inferior a 20 años. El método POT se basa en suponer que los máximos que superan un cierto umbral y que están separados por un cierto intervalo de tiempo (normalmente de dos a cuatro días) son independientes entre sí. Esto implica que si en un año ha habido temporales muy importantes no es a causa de que los sucesos extremos tiendan a concentrarse en ciertos años, sino que esta concentración ha sido por azar. si los temporales son independientes, el hecho de que en un año haya habido un gran temporal no significa que la probabilidad de que se mismo año existieran otros temporales importantes sea mayor (o menor). Aceptada la hipótesis, la muestra a analizar estará constituida, pues, por lo máximos locales o bien por los picos temporales que superen un determinado umbral de altura

(H_0). En cualquier caso, los máximos seleccionados deben cumplir la condición de independencia. Para este método se define el número medio de temporales al año (λ) como la relación entre el número total de temporales registrados (N_T) y el tiempo efectivo de medida (T_{ef}):

$$\lambda = \frac{N_T}{T_{ef}} \quad (8.1)$$

En el método POT será importante seleccionar el umbral de manera que todos los picos pertenezcan a la misma población. Si se escoge un umbral muy bajo algunos máximos pertenecerán a temporales secundarios, que nada tienen que ver con el tipo de temporales que dan los mayores valores (esto nunca puede asegurarse, aunque puede ser cierto en algunos lugares). En cambio, si ese umbral es muy alto se obtienen muy pocos datos y se pierde información. Por lo general, se intenta que el umbral de altura de ola se establezca según las características climáticas del área de estudio. El método POT será con el que se realizará el análisis (Figura 140).

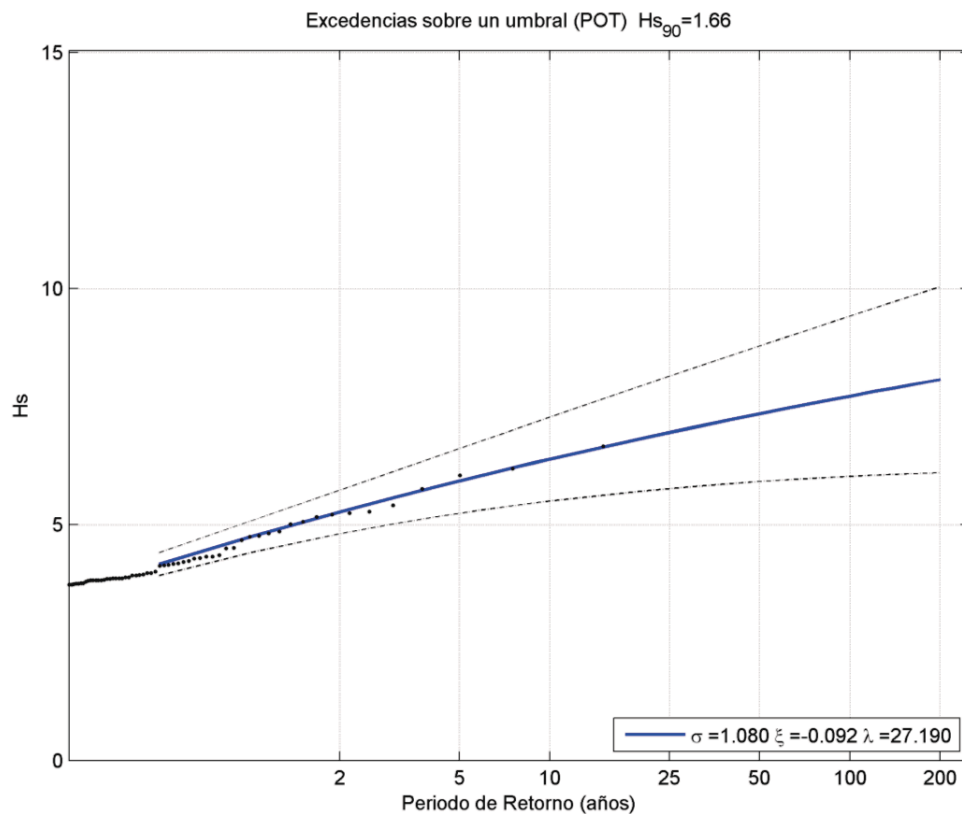


Figura 140. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.

El análisis extremal se realiza ajustando alguna curva a partir de la información del histograma (Figura 141) y extrapolando esa curva a una probabilidad de ocurrencia o excedencia; debido a que no existe una teoría única que indique exactamente qué tipo de curva se debe emplear para la extrapolación, la elección de ésta es totalmente empírica (Ruíz, 2009).

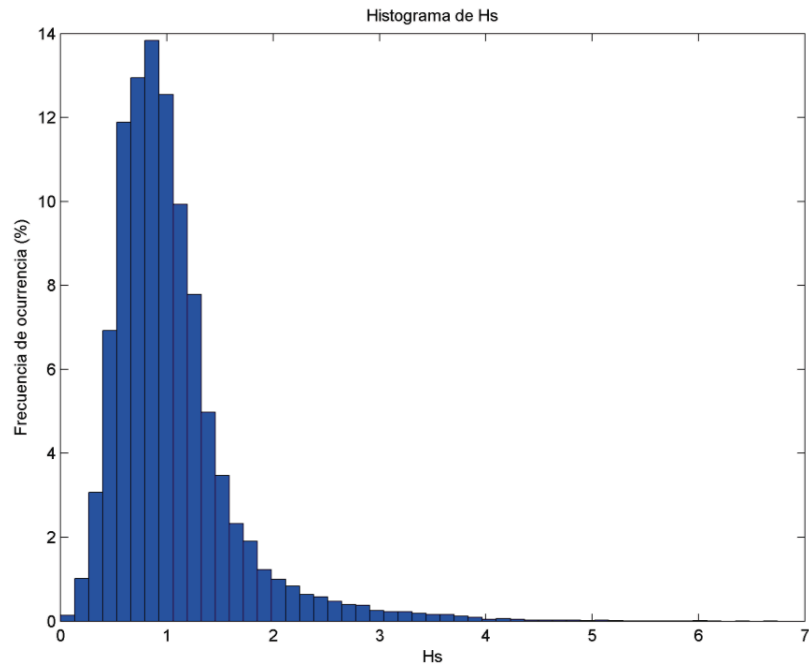


Figura 141. Histograma de frecuencias para la serie de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.

Por ello, se deben elegir distribuciones diferentes (entre ellas: normal, Log normal, Weibull, Rayleigh, Fisher – Tippet I o Gumbel, Fisher -Tippet II, Fisher - Tippet III) y calcular sus respectivos parámetros; los valores de esas variables se estiman ajustando las distribuciones elegidas a los datos. La distribución que ajuste lo datos de la mejor manera, será entonces, la que se usará para la extrapolación.

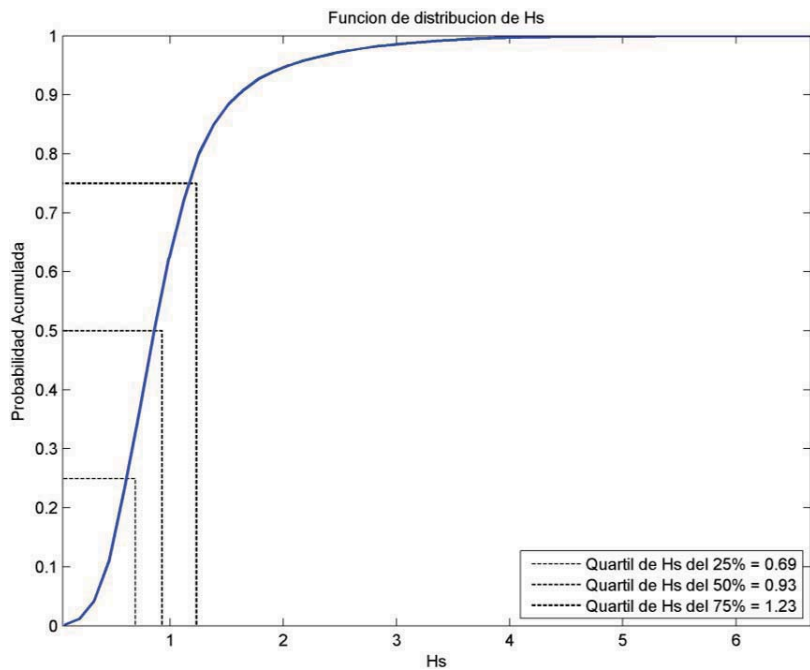


Figura 142. Función de distribución acumulada para la serie de datos de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.

Para facilitar la evaluación, acerca de qué tipo de ajuste "por revisión visual" se recomienda utilizar la función de distribución acumulada (Figura 142) que la probabilidad de la función de densidad; ya que cuando se representa gráficamente la distribución acumulada en las escalas propias de la distribución elegida, ésta aparecerá como una línea recta alrededor de las observaciones (alturas de ola) (Figura 143).

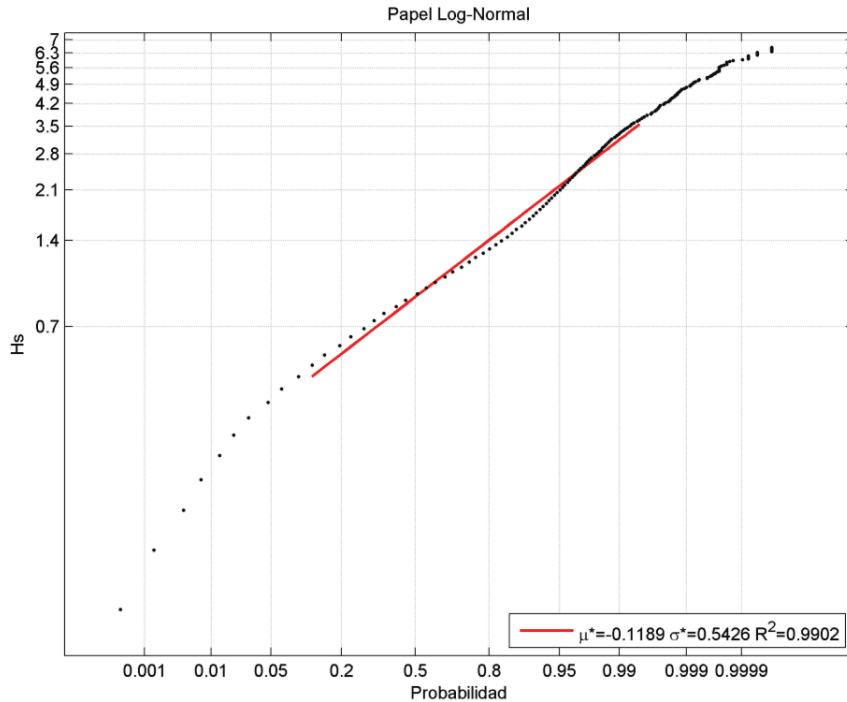


Figura 143. Distribución Log Normal para la serie de datos de oleaje febrero 2005 - mayo 2019.

Para ajustar las distribuciones de probabilidad a las observaciones, se requiere que se determine una probabilidad de no excedencia que tome en cuenta la frecuencia de las observaciones o los momentos estadísticos; dicha probabilidad puede definirse como:

$$F(H_s) = 1 - x_i \quad i = 1, 2, \dots, n. \tag{8.2}$$

donde $F(H_s)$ es la probabilidad de no excedencia de una altura de ola significativa dada, es decir $F(H_s) = Pr(\bar{H}_{s,j} \leq H_{s,i})$; x es una expresión de punteo (probabilidad de excedencia de: Blom, Grigorten, Petruskas, Goda, Weibull, Bernard, Hanzen), i es la posición del valor en N observaciones. Debido a que la altura de ola se considera como una variable aleatoria con una función de distribución $F(H_s)$, se asume que el valor de $H_{s,i}$ puede también reconocerse como una variable aleatoria; por ende, su función de distribución o probabilidad de no excedencia es una variable aleatoria. Las técnicas de punteo se encuentran basadas en determinar la frecuencia de las observaciones correspondientes a $H_{s,i}$, ya sea por medio de la media, mediana o moda de la variable $F(H_s)$; dicha frecuencia de punteo es independiente de la función de distribución elegida.

Cuando se establecen los valores de las probabilidades de las observaciones, es posible ajustar las distribuciones de una manera subjetiva (por revisión visual) u objetiva con un procedimiento teórico

– formal, por ejemplo, usando las técnicas: a) de mínimos cuadrados, b) el máximo valor de las observaciones o c) de momentos. La técnica de mínimos cuadrados minimiza la suma de las diferencias cuadradas entre las observaciones la distribución de probabilidad; por otro lado, la técnica del máximo valor observado maximiza la probabilidad en que las observaciones se toman a partir de la distribución y la técnica de los momentos calcula los parámetros de la distribución, de tal manera que los momentos de orden inferior y la distribución, tienen los mismos valores (Ruíz, 2009).

El ajuste por “revisión visual” se considera el procedimiento subjetivo más sencillo de aplicar, ya que solamente se representan gráficamente los valores en escalas adecuadas, tanto en el eje de las abscisas como en el de las ordenadas y si los datos pertenecen a la distribución que corresponden a las escalas, los valores mostrarán cierto ajuste a lo largo de la recta de la distribución.

La extrapolación de la distribución a largo plazo (Figura 140) proporciona la probabilidad que un valor máximo no observado de la altura de ola significativa se exceda, pero no se indica cuando tal evento sucedería; no obstante, lo señalado anteriormente, la posible eventualidad de que un escenario se presente, puede ser determinada mediante el conocimiento del periodo de retorno.

El intervalo de recurrencia (o periodo de retorno) se define entonces, como el intervalo de tiempo promedio (en años) durante el cual, cierta altura de ola se espera será igualada o excedida y éste puede ser estimado a partir de la función de distribución acumulada de largo plazo, siempre y cuando se conozca la duración promedio por excedencia del escenario o evento (Ruíz, 2009).

8.6 MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Para simular la evolución de olas aleatorias generadas por el viento en estuarios, lagos, entre otros; se puede usar el modelo *SWAN* de tercera generación, *SWAN* es el acrónimo de *Simulating Waves Nearshore* (Booij et al., 1999; Holthuijsen et al., 1993; Ris et al., 1999).

Este modelo *SWAN* es el sucesor del modelo estacionario de segunda generación *HISWA*. El modelo *SWAN* tiene una serie de ventajas en comparación con *HISWA* y también supera en gran medida las limitaciones del modelo *HISWA*. Las principales características de *SWAN* con respecto a la física y la numérica son:

1. La física en *SWAN* está explícitamente representada con formulaciones de vanguardia.
2. El modelo *SWAN* es completamente espectral en frecuencias y direcciones ($0^\circ - 360^\circ$).
3. Los cálculos de onda en *SWAN* son incondicionalmente estables debido a los esquemas totalmente implícitos que se han implementado.
4. La cuadrícula computacional en *SWAN* no tiene que estar orientada en la dirección de onda media, por lo que la malla puede manejar todas las direcciones de onda.

Otros aspectos, que pueden ser importantes en aplicaciones prácticas del módulo son:

1. *SWAN* puede realizar cálculos en una malla curvilínea (si el módulo *FLOW* utiliza esta cuadrícula, el acoplamiento entre *SWAN* y *FLOW* es perfecto).
2. Las fuerzas de onda se pueden calcular en el gradiente del tensor de radiación (en lugar de en la tasa de disipación como el modelo *HISWA*).

3. La salida se puede generar en términos de espectros de onda unidimensionales y bidimensionales en *SWAN*.

El modelo *SWAN* se basa en la ecuación de equilibrio de acción espectral discreta y es completamente espectral (en todas las direcciones y frecuencias). Esto último implica que se pueden acomodar campos de ondas aleatorias de cresta corta que se propagan simultáneamente desde direcciones muy diferentes (por ejemplo, un mar de viento con oleaje superpuesto). *SWAN* calcula la evolución de ondas aleatorias de cresta corta en regiones costeras con corrientes ambientales, de aguas profundas, intermedias y un poco profundas. El modelo *SWAN* tiene en cuenta la propagación (refractiva) debido a la corriente y a la profundidad y representa los procesos de generación de olas por el viento, la disipación debido al whitecapping, la fricción de fondo y la ruptura de onda inducida por la profundidad e interacciones onda – onda no lineal (tanto cuádruples como triadas) explícitamente con formulaciones de vanguardia. El bloqueo de ondas por corrientes también se representa explícitamente en el modelo.

Para evitar un tiempo de cómputo excesivo y lograra un modelo robusto en aplicaciones prácticas, se han aplicado esquemas de propagación totalmente implícitos. El modelo *SWAN* ha sido validado y verificado con éxito en varios casos de laboratorio y de campo (complejos). Fue desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos). (Deltares, 2014).

8.6.1 Malla

Para el modelo *WAVE* se elaboró un conjunto de mallas de cálculo en el módulo *RFGRID*. Se clasificaron en mallas principal, secundaria, terciaria y cuaternaria (Figura 144). Si bien el modelo no es capaz de representar correctamente el fenómeno de difracción, aquí se empleó toda vez que el dominio y tamaño de celdas es muy grande, las ondas a simular son pequeñas y en ondas de cresta corta y amplia dispersión direccional, la importancia de la difracción es relativamente pequeña; y por el momento no se está analizando a detalle el efecto de la difracción detrás de estructuras costeras.

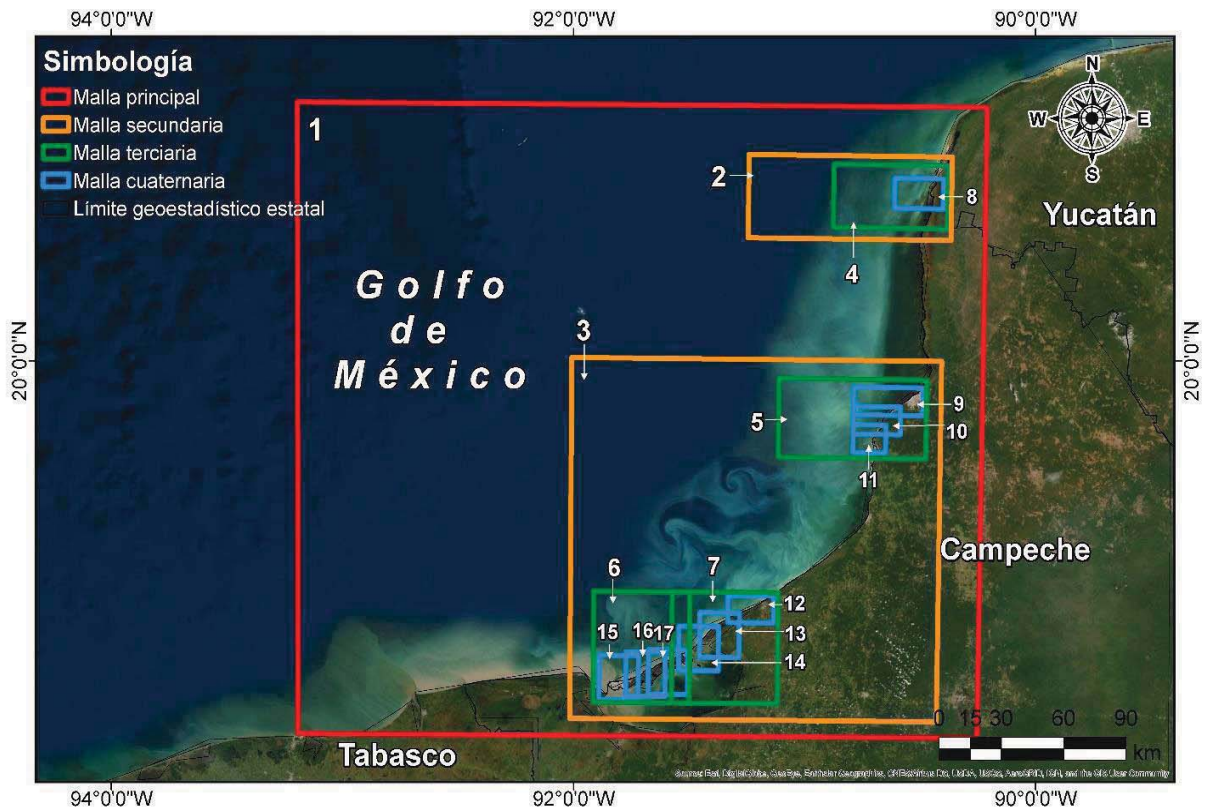


Figura 144. Mallas utilizadas en el modelo WAVE.

La malla principal es una malla rígida de 388 x 364 elementos en dirección X y Y, respectivamente. La malla contiene 141,232 elementos cuadrados; cada elemento mide 800 m de lado para un área de 64,000 m². El dominio cubre 309.6 km en sentido X y 290.4 km hacia aguas profundas (sentido Y) para un área de 903 km². En la Tabla 39 se describen las mallas empleadas en el modelo.

Tabla 33. Descripción de las mallas empleadas en el modelo WAVE.

Malla	Tipo	Número de elementos	Resolución de elementos (m)	Área del dominio (km ²)
388x364 (1)	Principal	141,232	800 x 800	90,388.48
420x417C (3)	Secundaria	175,140	400 x 400	28,022.40
229x96C2 (2)	Secundaria	21,984	400 x 400	3,517.44
220x256Terminos1 (6)	Terciaria	56,320	200 x 200	2,252.80
242x256Terminos2 (7)	Terciaria	61,952	200 x 200	2,478.08
258x146IA (4)	Terciaria	37,668	200 x 200	1,506.72
335x182Se (5)	Terciaria	60,970	200 x 200	2,438.80
220x140IAM1 (8)	Cuaternaria	30,800	100 x 100	308
315x128SM1 (9)	Cuaternaria	40,320	100 x 100	403.20
213x128SM2 (10)	Cuaternaria	27,264	100 x 100	272.64
148x128SM3 (11)	Cuaternaria	18,944	100 x 100	189.44
180x205M1 (15)	Cuaternaria	36,900	100 x 100	369
180x205M2 (16)	Cuaternaria	36,900	100 x 100	369

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

180x205M3 (17)	Cuaternaria	36,900	100 x 100	369
180x205M4 (14)	Cuaternaria	36,900	100 x 100	369
180x205M5 (13)	Cuaternaria	36,900	100 x 100	369
209x125M6 (12)	Cuaternaria	26,125	100 x 100	261.25

8.6.2 Escenarios de simulación numérica

El oleaje es la fuente de energía que originan los distintos procesos morfológicos que configuran las zonas litorales; es por ello que es importante comprender el comportamiento de las playas ante la acción del oleaje y cómo las olas llegan a interactuar con el medio marino – terrestre.

Las costas sufren el embate de olas, en condiciones normales y en situaciones de tormentas o eventos meteorológicos extraordinarios (extremos). Para este trabajo se analiza el efecto del oleaje en estaciones climáticas, épocas climáticas y oleaje extremo.

En la Tabla 34, se muestran las condiciones de oleaje para los 15 casos a simular de la propagación del campo de oleaje en la franja costera del estado de Campeche.

Tabla 34. Condiciones de oleaje a simular.

Escenario	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Anual	0.93	4.5	45 (NE)
Primavera	0.91	4.5	45 (NE)
Verano 01	0.8	4.5	67.5 (ENE)
Verano 02	0.7	4.5	45 (NE)
Otoño 01	1	5	22.5 (NNE)
Otoño 02	0.81	4	45 (NE)
Invierno 01	1.07	4.5	45 (NE)
Invierno 02	1.1	4.5	22.5 (NNE)
Tormenta 01	2.11	8.25	337.5 (NNW)
Tormenta 02	2.14	8.25	360 (N)
Secas	1	4.25	45 (NE)
Lluvias 01	0.79	4.25	45 (NE)
Lluvias 02	0.82	3.75	67.5 (ENE)
Nortes	1.02	3.75	22.5 (NNE)
Huracán Janet	10.3	12.4	360 (N)

Las mallas empleadas para la simulación de propagación de oleaje son más finas que la utilizada en la modelo *FLOW*, esto con la intención de obtener resultados más finos.

En las Figuras 145, 146 y 147 se presentan los resultados para la propagación del oleaje empleando la malla principal. Para una mejor interpretación, se dividió el litoral en tres zonas: Norte, Centro y Sur. La zona Norte abarca de Isla Arena a San Francisco de Campeche; la zona Centro se ubica entre San Francisco de Campeche y Sabancuy; y la zona Sur de Sabancuy a Nuevo Campechito. En los escenarios de la Figura 145, se observa que la altura de ola en la zona Norte no sobrepasa los 0.10 m; en la zona Centro se mantienen estos valores con excepción de los escenarios Anual y Verano

02, en los cuales hay un incremento en la altura pudiendo alcanzar alturas de 0.20 m; en la zona Sur el oleaje impacta con una mayor altura pudiendo llegar hasta 0.30 m.

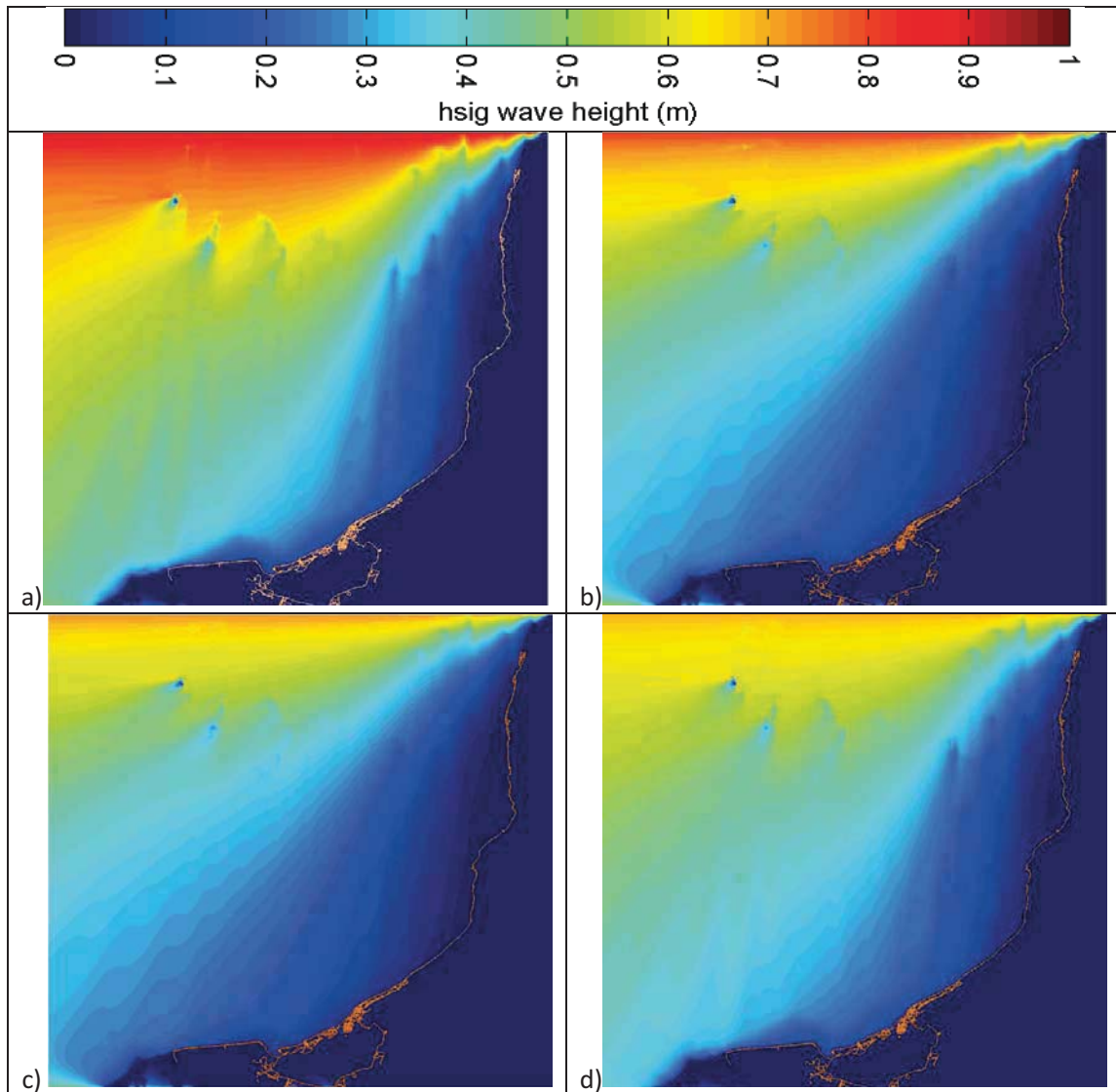


Figura 145. Altura de ola significativa. a) Anual, b) Primavera, c) Verano 01, d) Verano 02.

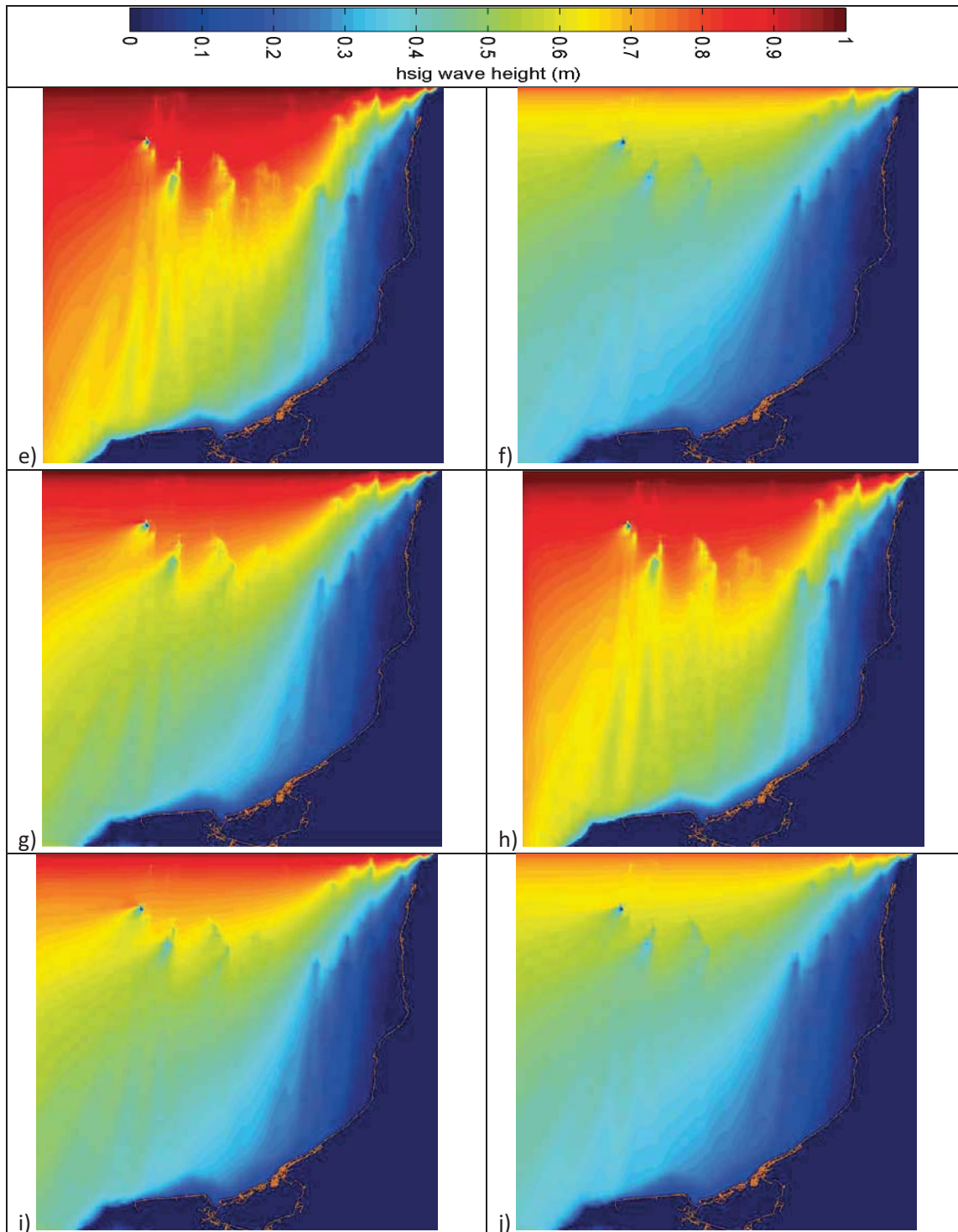
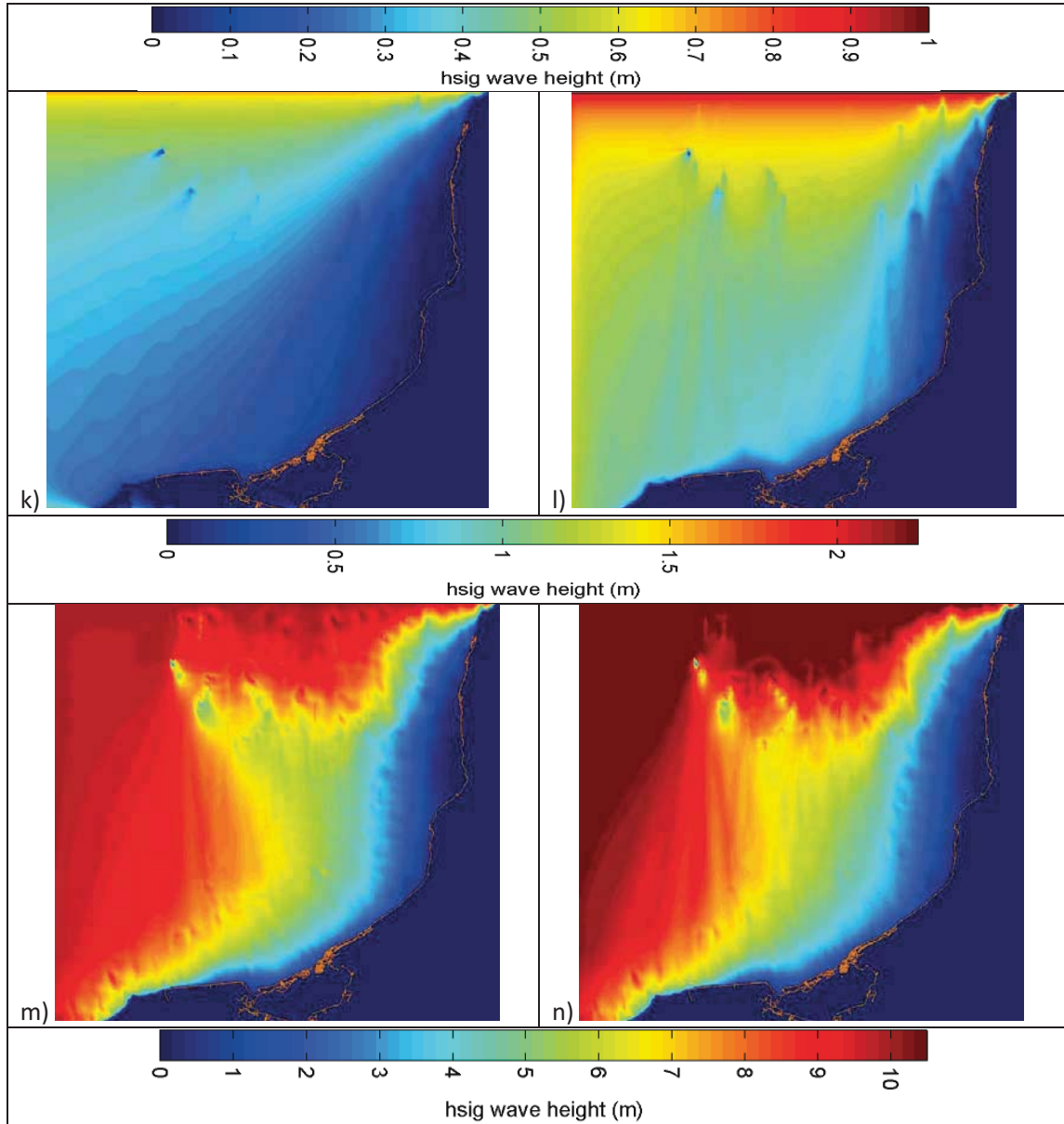


Figura 146. Altura de ola significativa. e) Otoño 01, f) Otoño 02, g) Invierno 01, h) Invierno 02, i) Secas, j) Lluvias 01. Continuación.

En la Figura 146, se presentan la altura de ola para los escenarios de otoño a lluvias. Los escenarios Otoño 01 e Invierno 02 son los que presentan alturas de ola de hasta 40 cm en la zona Sur; los escenarios Otoño 02 y Lluvias 01 presentan alturas en la franja costera de la zona Norte menores a

10 cm, y en las zonas Centro y Sur en el rango de 10 y 20 cm. Los escenarios Invierno 01 y secas presentan condiciones similares en las alturas de ola significativa, alcanzando alturas entre 10 y 20 cm en la zona Sur y menores a 10 cm en la zona Norte y Central.



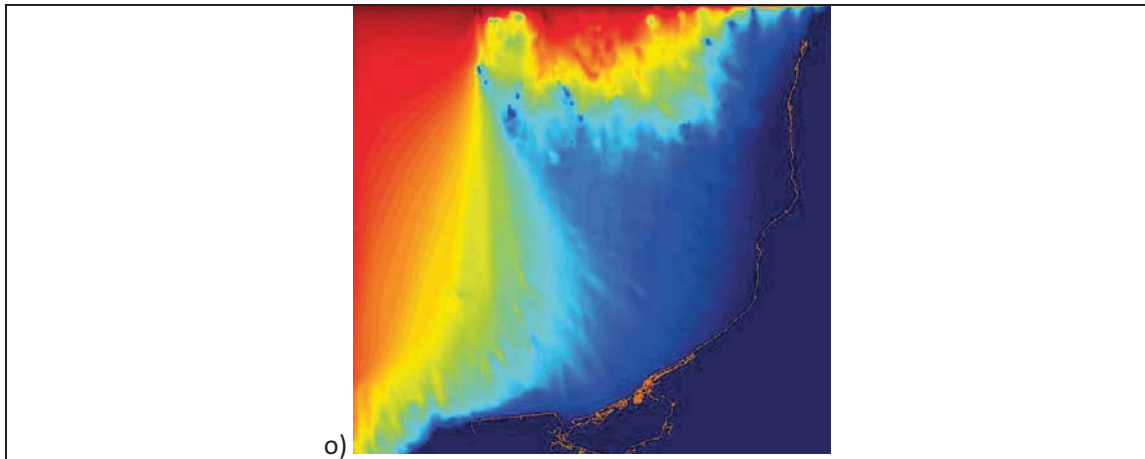


Figura 147. Altura de ola significativa. k) Lluvias 02, l) Nortes, m) Tormentas 01, n) Tormentas 02, o) Huracán Janet. Continuación.

De los escenarios presentados en la Figura 147, el de Lluvias 02 es el que presenta las menores alturas de ola para todo el litoral; el escenario de Nortes genera olas de hasta 40 cm para la zona Sur, mientras que para las zonas Norte y Central este valor no excede los 20 cm; en los escenarios de Tormenta, la zona Sur puede verse afectada por alturas de ola cercanos a 1 m; mientras que en el escenario del Huracán Janet, la zona Sur vuelve a ser la más afectada con alturas de ola cercanas a los 2 m, mientras que las zonas Norte y Centro reciben olas de hasta 1 m de altura. La Figura 148 presenta la altura de ola para las zonas de Isla Arena, Sabancuy y Nuevo Campechito, para tres escenarios: Anual, Tormenta y Huracán; se observa que la zona Sur es la que recibe mayores alturas de ola, mientras que la zona Norte es una zona protegida.

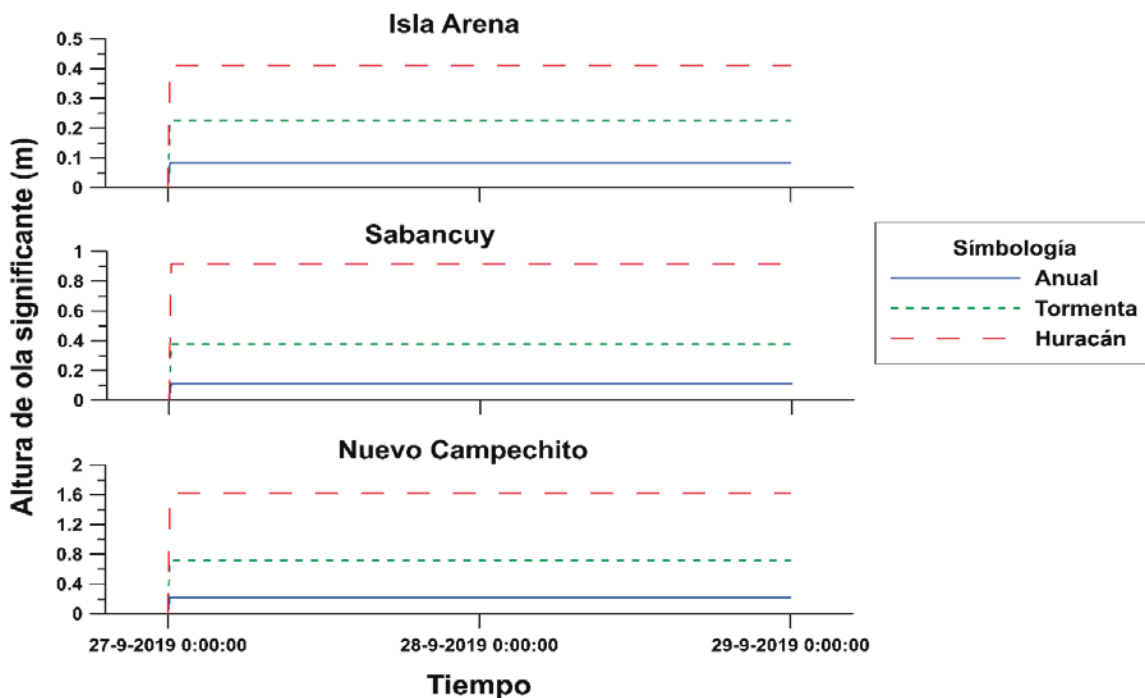


Figura 148. Altura de ola (m) para Isla Arena, Sabancuy y Nuevo Campechito. Se aprecia una línea recta ya que los datos que se presentan son estacionarios.

8.7 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS EN LA COSTA

Debido a las limitantes del modelo Delft3D, consistentes en el tamaño del dominio, el número de elementos en el dominio y la resolución de los elementos; dificulta poder simular de forma simultánea las condiciones de marea, viento, oleaje y descarga. Por la razón anterior se optó por generar una malla no robusta que permitiera reproducir las condiciones deseadas con resultados útiles para los fines de este apartado.

Se empleó el modelo *FLOW* acoplado con el modelo *WAVE*; el período de simulación fue de 48 horas, con un paso de tiempo de cálculo de 1 minuto y un paso de escritura de resultados de 15 minutos. Se obtuvieron resultados para todo el dominio y para 17 puntos de observación (Figura 150).

8.7.1 Malla

Se elaboró una malla de cálculo rígida de 93 x 60 elementos. La malla contiene 5,580 elementos cuadrados; cada elemento mide 3,620 m de lado para un área de 13.104 km². El dominio cubre 336.66 km x 217.20 km para un área de 73,122.55 km² (Figura 149).

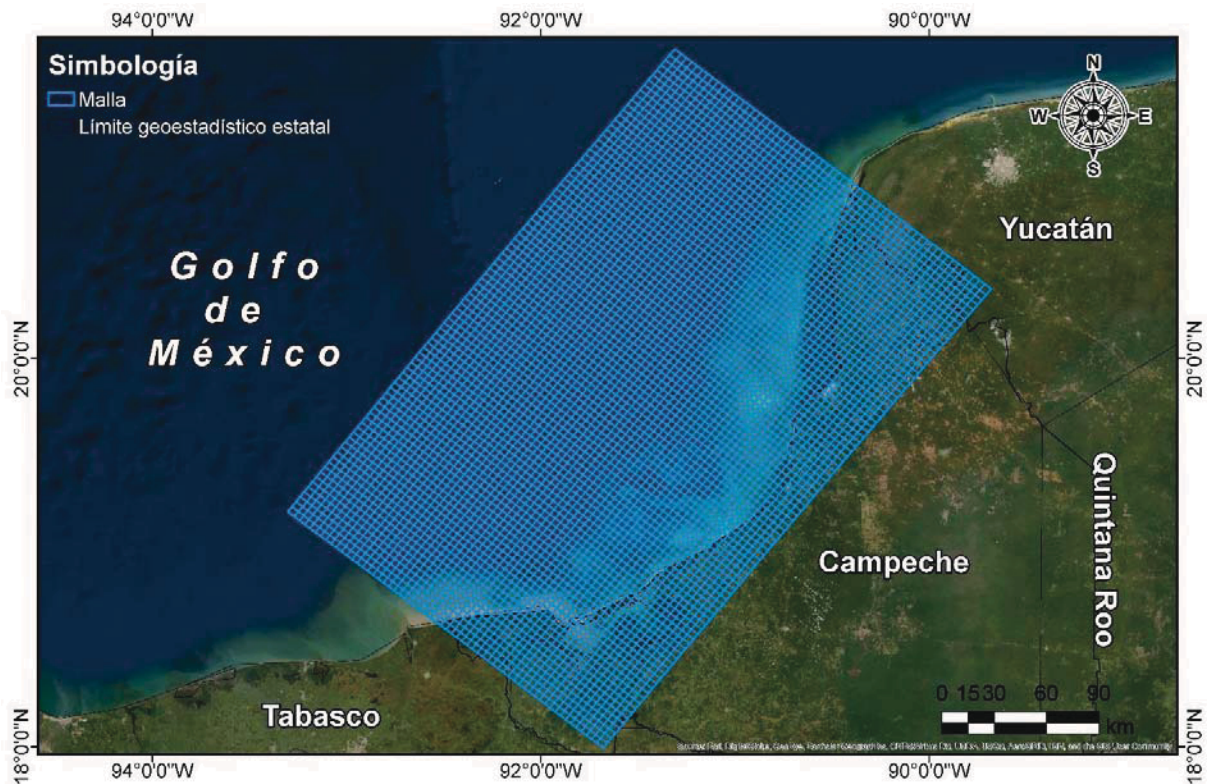


Figura 149. Malla empleada en el modelo acoplado.

8.7.2 Escenarios de simulación numérica

Partiendo de los escenarios generados para el viento en la sección 11.3.2 y para el oleaje en la sección 11.6; y considerando los resultados de las simulaciones presentados en las mismas secciones, se eligieron los escenarios siguientes (Tabla 35):

Tabla 35. Escenarios para simulación.

Escenario	Oleaje			Viento	
	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)	Vel (m/s)	Dir (°)
Anual	0.93	4.5	45	6.63	67.5
Primavera	0.91	4.5	45	6.96	67.5
Verano	0.8	4.5	67.5	6.53	112.5
Otoño	1	5	22.5	6.61	45
Invierno	1.1	4.5	22.5	6.89	45
Secas	1	4.25	45	6.83	45
Lluvias	0.82	3.75	67.5	6.72	112.5
Nortes	1.02	3.75	22.5	6.53	45
Tormentas	2.14	8.25	360	14.52	0
Huracán Janet (1955)	10.3	12.4	360	35.7	0

Las condiciones de frontera utilizadas son las mismas que las presentadas en la Tabla 29; a diferencia de las simulaciones generadas en la sección 11.3.2, aquí no se consideran las descargas de los ríos, toda vez que se observó que no generan cambios significativos en el comportamiento de la hidrodinámica litoral, pero sí en el comportamiento de la hidrodinámica de la Laguna de Términos, tema que no es de interés primordial en este trabajo.

En resumen, los forzamientos empleados en las simulaciones son: marea, viento y oleaje para 10 escenarios característicos del litoral del estado de Campeche.

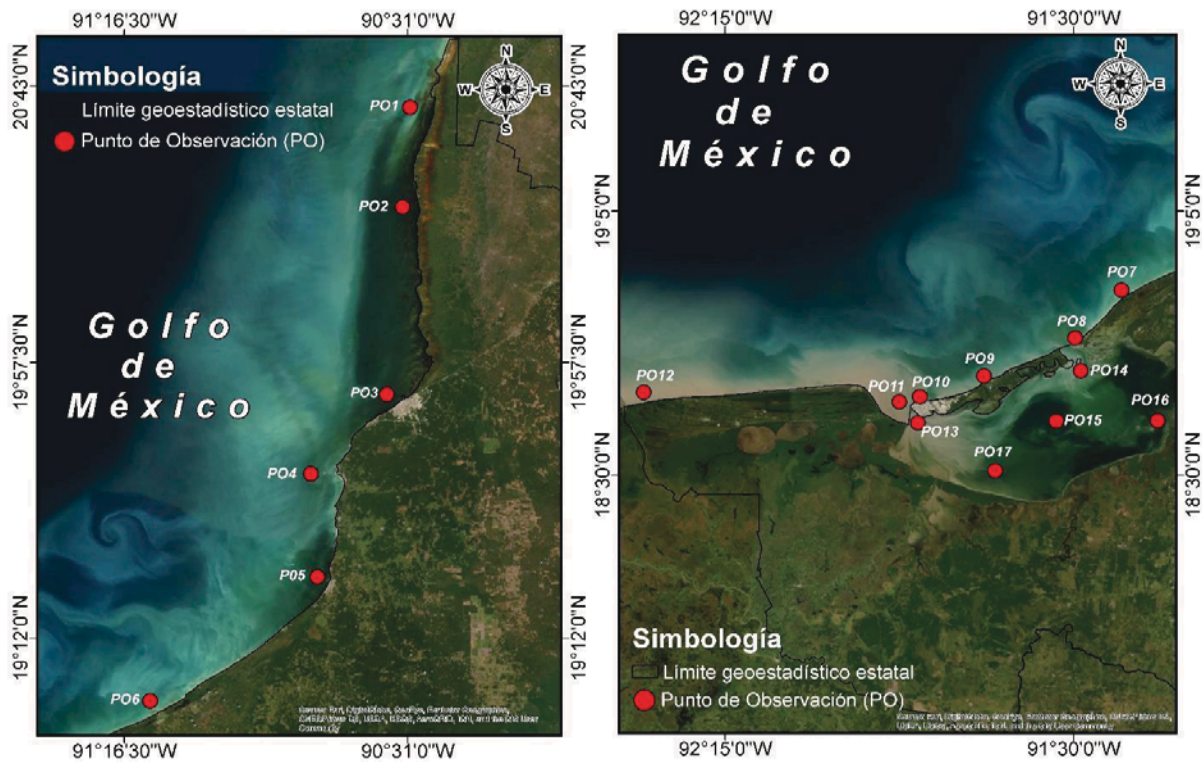


Figura 150. Puntos de observación empleados en el análisis de resultados de las simulaciones.

De las simulaciones de los escenarios se obtuvieron mapas de “Superficie Libre”, así como mapas de la velocidad y dirección de las corrientes. Para cada punto de observación se obtuvieron los niveles de elevación.

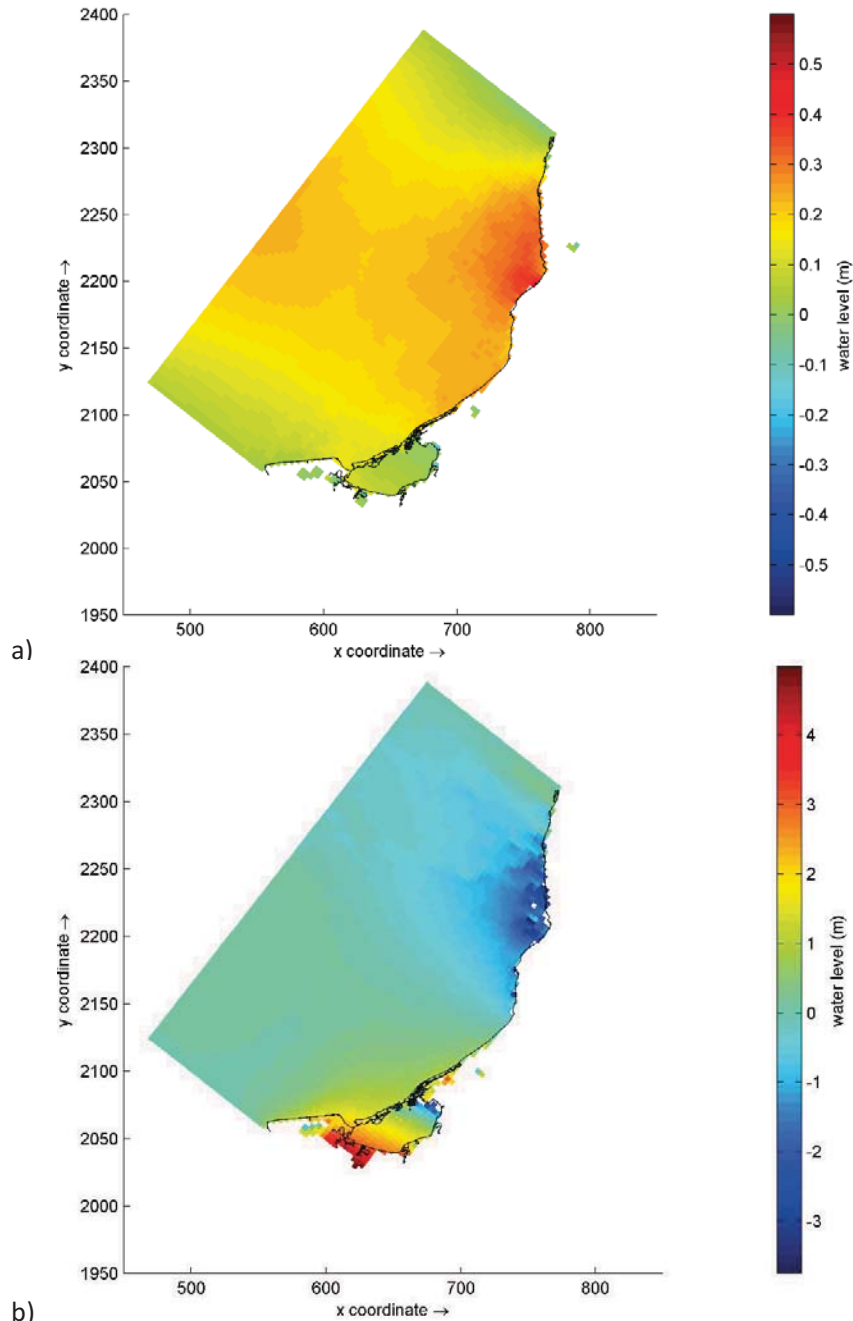


Figura 151. Mapas de Superficie Libre para los escenarios: a) Anual, b) Huracán.

De los resultados obtenidos de los puntos de observación, se aprecia que las variaciones del nivel del agua entre escenarios (excluyendo Tormentas y Huracán) son mínimas. Las variaciones visibles se presentan en los escenarios de Primavera y Lluvias, donde hay un decremento en los niveles de elevación (5 cm en promedio), en general el valor de pleamar alcanza alturas de 0.40 m. Durante el

escenario de Tormenta, la elevación incrementa en promedio 20 cm (ejemplo, los puntos PO6, PO8 y PO10), este incremento es visible durante el periodo de bajar, ya que el nivel del agua tiende a permanecer constante y no reproduce visiblemente el ciclo de bajar y pleamar (Figura 153). El punto PO1, tiene un comportamiento diferente debido a la configuración de la línea de costa ya que esta posición le permite estar casi paralela a la dirección del viento y la incidencia del oleaje; además esta zona es muy somera debido a la presencia de manglar.

En el escenario de Huracán, los niveles se incrementan y pueden alcanzar valores superiores al metro de altura (ejemplo, punto PO10); esta sobre-elevación se denomina “marea de tormenta¹⁸”. En la Figura 152, se presentan una comparación entre los diferentes niveles obtenidos de las simulaciones.

Se observa que en condiciones normales y de calma, el oleaje puede tener poca influencia en los cambios costeros (comparación de las líneas azul y roja); sin embargo, ante la presencia de eventos extremos (tormentas y huracanes), el oleaje toma relevancia ya que la elevación alcanza valores similares a los de marea en condiciones normales, esta condición genera un incremento en la energía de rompiente de las olas, un cambio en la dirección y en la magnitud de velocidad de las corrientes costeras.

Al generarse estos cambios se generan condiciones para modificar la línea costera, generando sectores con procesos erosivos y otros con procesos de depositación; así como una modificación en el tamaño del tamaño del sedimento de las playas.

Los resultados obtenidos, para el caso del Huracán Janet, ha sido validado con lo reportado por Escudero et al. (2014) que señala que la marea de tormenta más desfavorable generada por el Huracán Janet es de 1.9 m con viento proveniente del Norte.

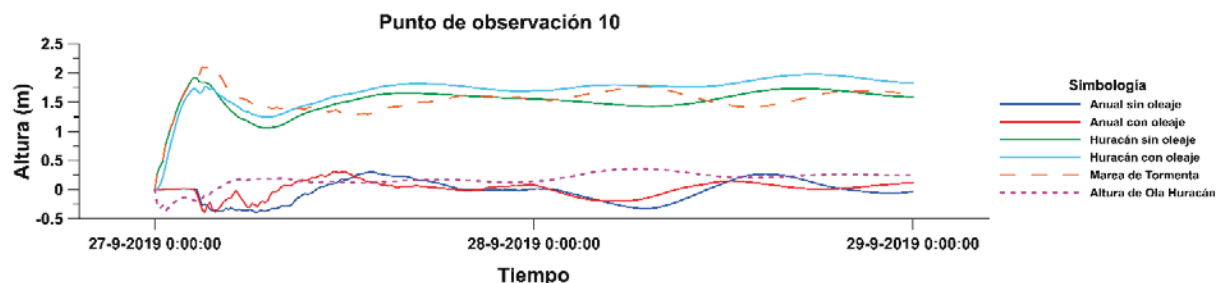


Figura 152. Comparación de los diferentes niveles obtenidos para el punto de observación 10.

En lo que respecta a la dirección y velocidad de corriente, se generaron mapas con flechas donde las flechas indican la dirección y el color la magnitud de la velocidad (Figura 154). En la columna izquierda se presentan las condiciones para bajar y la columna derecha las de pleamar. Las figuras a) y b) corresponden al escenario anual, las c) y d) al de tormenta y, las e) y f) al de huracán.

¹⁸ La marea de tormenta aquí está definida como el ascenso del nivel medio del mar originado por la disminución de la presión atmosférica y el apilamiento de agua asociada a los vientos de un fenómeno hidrometeorológico.

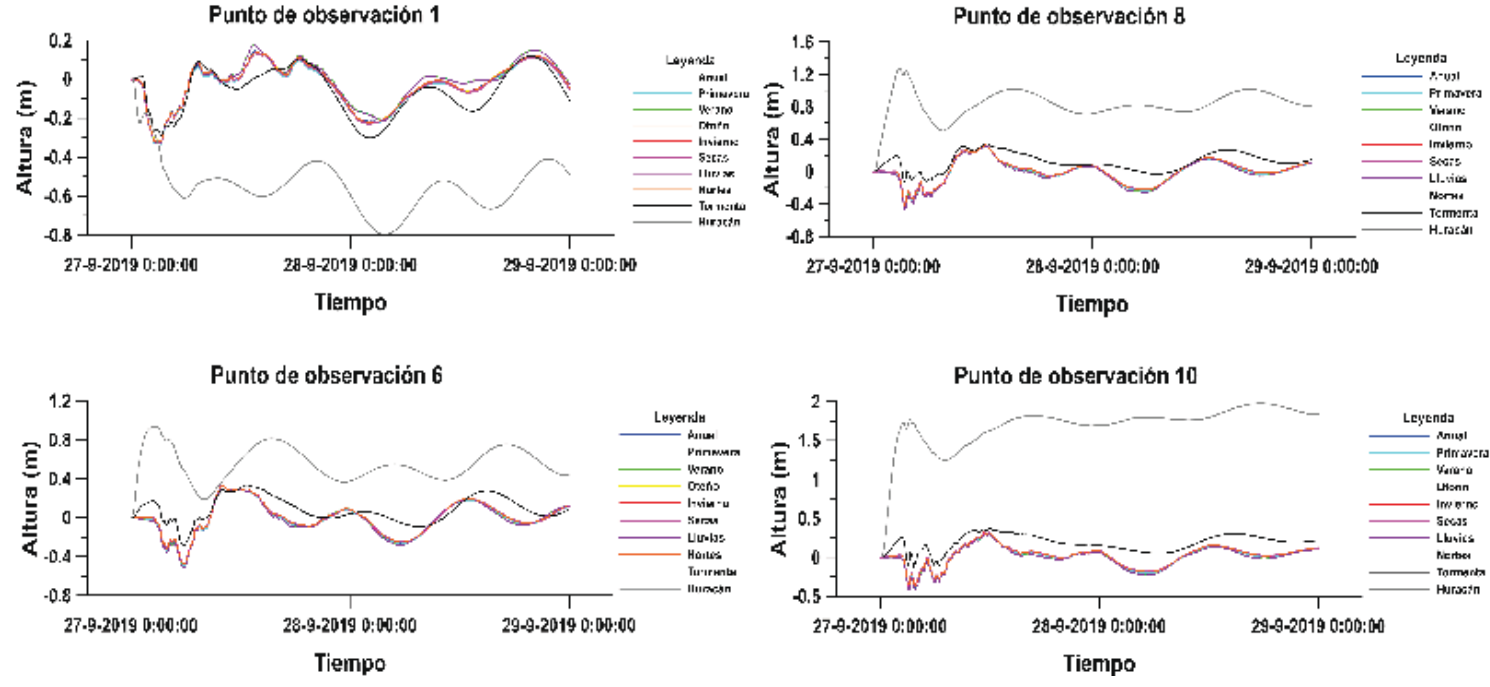


Figura 153. Niveles de agua para diferentes puntos de observación: P01 - Isla Arena, P06 - Sabancuy, P08 - Isla Aguada, P010 - Playa Norte (Ciudad del Carmen).

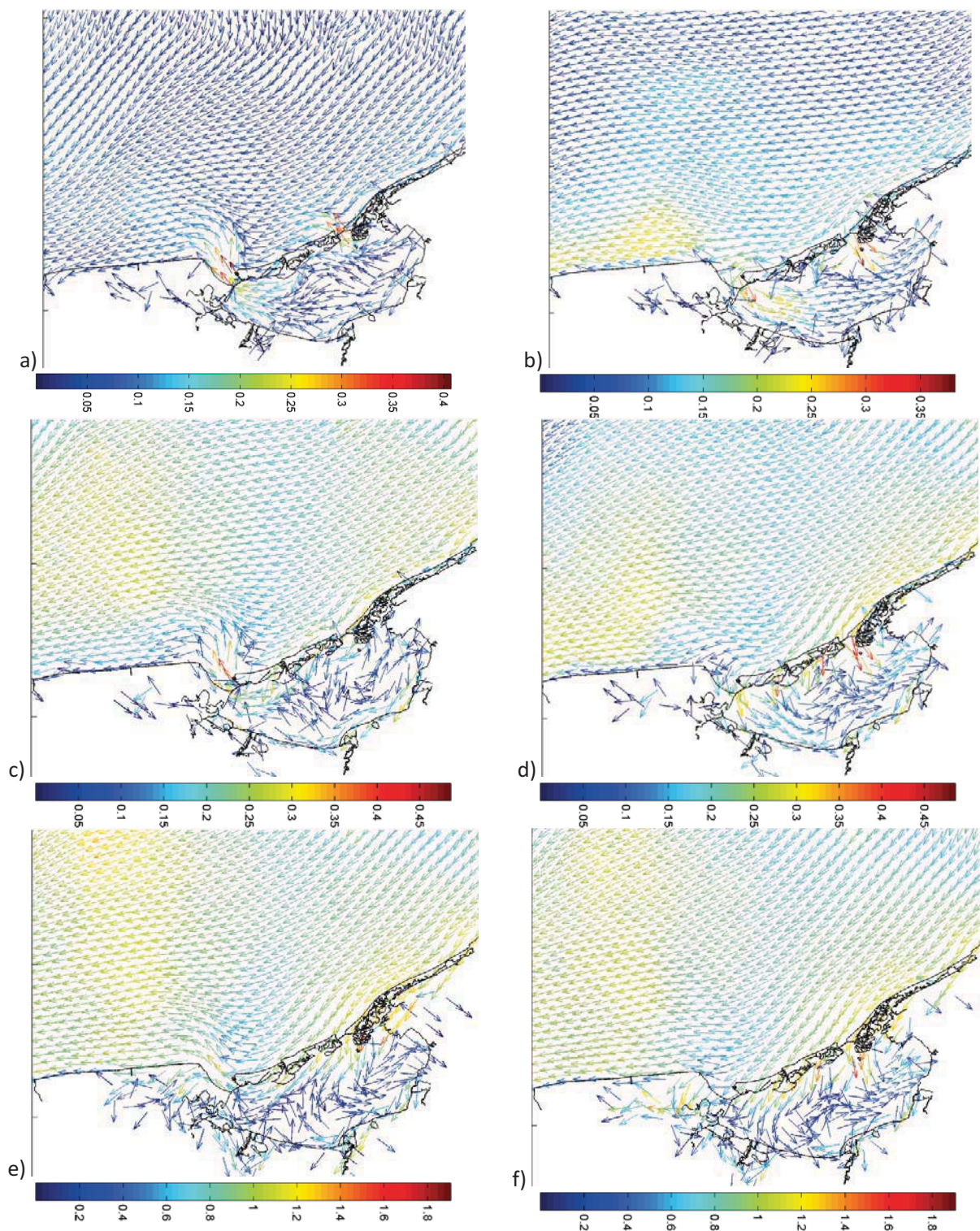


Figura 154. Velocidades de corriente: a) bajamar anual, b) pleamar anual, c) bajamar tormenta, d) pleamar tormenta, e) bajamar huracán, f) pleamar huracán. Las unidades de la escala son m/s.

A continuación, se hará una breve comparación entre tres escenarios: el anual, que se considera de calma y como base de comparación; el de tormentas, debido a que estas condiciones son

extraordinarias y tienen una mayor frecuencia de ocurrencia y; huracán, si bien la frecuencia de ocurrencia es muy baja, los daños generados por el impacto son de gran cuantía.

En el escenario Anual, las mayores velocidades se presentan en las bocas de la Laguna de Términos y no sobrepasan los 0.40 m/s; para la condición de bajamar las velocidades son paralelas a la costa y presentan una magnitud promedio de 0.10 m/s, mientras que para la condición de pleamar las velocidades aumentan hasta 0.25 m/s, siendo el incremento entre la zona de Atasta y Nuevo Campechito.

En el escenario de Tormenta, las velocidades presentan un ligero incremento; en la condición de bajamar, las velocidades pueden alcanzar valores de 0.30 m/s y la dirección es paralela a la costa, sin embargo, el flujo de salida de la Boca de Atasta genera un ligero cambio en la dirección de la corriente ocasionando que esta incida sobre la zona costera de Nuevo Campechito; en la condición de pleamar, las mayores velocidades se presentan en el flujo que entra a la laguna por la boca de Isla Aguada (0.45 m/s), las velocidades en la zona entre Sabancuy e Isla Aguada llegan alcanzar valores de 0.30 m/s y el flujo incide con un ángulo de 22.5° sobre la parte este de Isla del Carmen y en la zona de Atasta.

En el escenario de Huracán, las velocidades en algunas zonas alcanzan valores de hasta 1.4 m/s; para la condición de bajamar, las velocidades en general se encuentran en el rango de 1 a 1.2 m/s y el ángulo de incidencia es de 22.5° con respecto al Norte, la zona de Isla Aguada es la que presenta las mayores velocidades; en la condición de pleamar, las velocidades alcanzan los 1.4 m/s y se mantiene el ángulo de incidencia, la zona más afectada es el tramo de Sabancuy a Isla del Carmen, en Isla del Carmen se pueden alcanzar velocidades de 1.4 m/s y debido al ángulo de incidencia los daños son mayores: incremento en la superficie libre en el interior de la isla (inundación) y un mayor arrastre de sedimentos.

8.8 EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ACTUACIÓN

Con base en los resultados presentados en las secciones: 8.4, 9.4, 10.3. y 11.7.2, se ha seleccionado 8 zonas que son representativas de la costa del estado de Campeche para ser simuladas y evaluar medidas de actuación que generen una reducción del proceso erosivo y/o una recuperación del ancho de playa seca.

Se ha optado por evaluar las zonas simulando el impacto de tormentas y no de huracanes, ya que las primeras son más recurrentes y porque el último huracán que afectó las costas del estado fue Isidore que ocurrió en el año 2002. Los cambios generados por la recurrencia de tormentas son más fáciles de identificar, además que al ser paulatinos pueden generarse acciones adaptables o reductivas a estos cambios.

Las zonas seleccionadas, de norte a sur, son: 1) Isla Arena, 2) San Francisco de Campeche, 3) Ciudad del Sol y alrededores, 4) Sabancuy, 5) Isla Aguada, 6) Ciudad del Carmen, 7) Puerto Rico y 8) Nuevo Campechito (Figura 136).

Para la evaluación se hace uso del modelo *Xbeach*; es un modelo numérico de código abierto que se desarrolló originalmente para simular procesos e impactos hidrodinámicos y morfodinámicos en costas arenosas con tamaño de dominio de kilómetros y en la escala de tiempo de las tormentas. Desde entonces, el modelo se ha aplicado a otros tipos de costas y propósitos.

El modelo incluye los procesos hidrodinámicos de transformación de onda corta (refracción, descarga y ruptura), transformación de onda larga (onda de infragravedad) (generación, propagación y disipación), configuración inducida por onda y corrientes inestables, así como inundación. Los procesos morfodinámicos incluyen carga de fondo y transporte de sedimentos suspendidos, avalancha de la duna y actualización del fondo. Se han incluido efectos de la vegetación y de las estructuras duras. El modelo ha sido validado con una serie de casos analíticos, de laboratorio y de pruebas de campo utilizando un conjunto estándar de configuraciones de parámetros.

Xbeach tiene dos modos: un modo hidrostático y un modo no hidrostático. En el modo hidrostático, la variación de amplitud de onda corta se resuelve por separado de las ondas largas, las corrientes y el cambio morfológico. Esto ahorra un tiempo de cálculo considerable, con el coste de que la fase de ondas cortas no se simula. Un modelo más completo es el modelo no hidrostático que resuelve todos los procesos, incluidos los movimientos de onda corta, pero con una mayor demanda computacional (Deltares, 2015).

A continuación, se realizará una descripción de las condiciones de oleaje, topobatimetría y escenarios simulados para cada una de las zonas.

8.8.1 Isla Arena

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 20 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

Es importante señalar que toda la costa de Isla Arena se encuentra rigidizada por un malecón, que ha generado que el sedimento cambie su textura a lodoso y que la arena disponible haya comenzado a desplazarse.

En la Tabla 36, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 259,200 s.

Tabla 36. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Isla Arena.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Isla Arena	1	8	337.5

A continuación, se presentan los resultados de la simulación:

En la Figura 155, se presentan los cambios en la elevación del fondo marino; se aprecia una depositación de sedimento con un grosor de aproximadamente de 20 cm, especialmente en la zona

entre puertos. Esta depositación es originada por los cambios de pendiente en el fondo, justamente frente a la zona de puertos; estos últimos funcionan como trampa de sedimento y debido a la dirección de incidencia del oleaje genera el movimiento del sedimento hacia la costa para su acumulación.

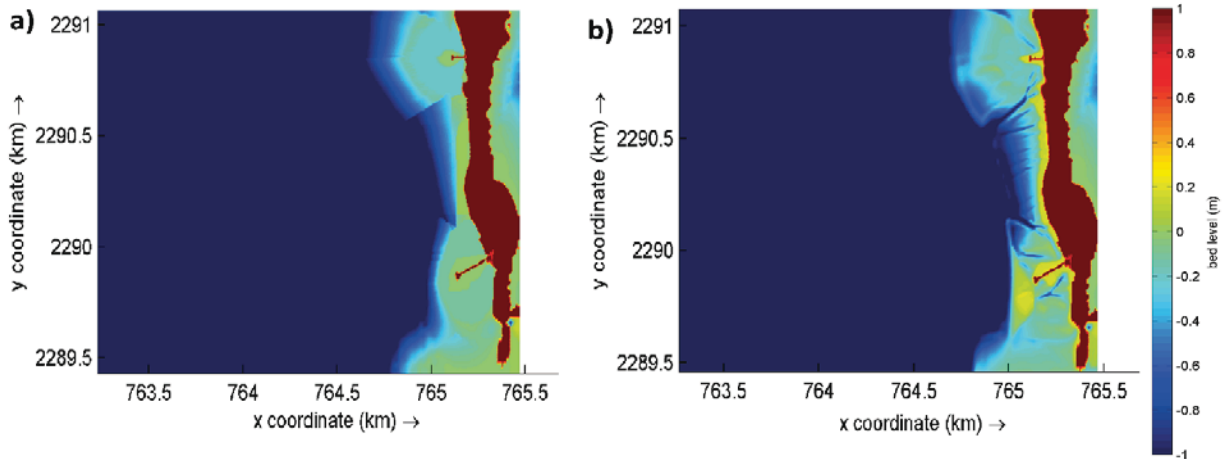


Figura 155. Bed Level. a) Valor inicial; b) Resultado de la simulación.

En la Figura 156, se observan las zonas de erosión y depósito de sedimento. Se observa una zona con una fuerte acumulación de sedimentos; sin embargo, este sedimento fue removido debido al cambio brusco de pendiente originando que el sedimento sea transportado en dirección a la costa. En la zona del Puerto más al sur, se observa que el mismo muelle genera una zona de erosión hacia el sur (canal) con valores de entre 20 y 40 cm de erosión.

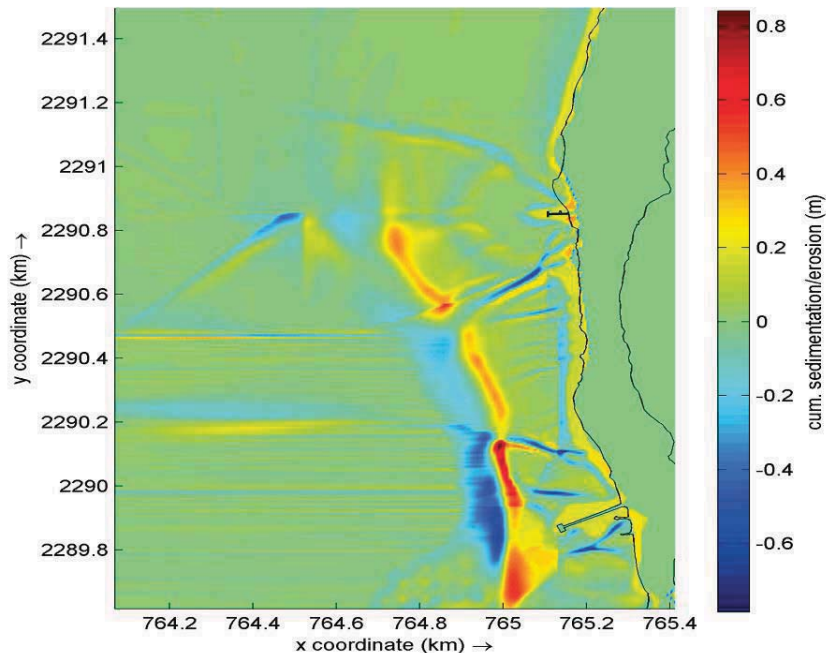


Figura 156. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.

Los resultados obtenidos del modelo corresponden a la altura media cuadrática (Hrms); para Isla Arena, en lo referente a Hrms, al ser una zona muy somera la altura de ola que llega a presentar es muy baja, con valores que no sobrepasan los 15 cm; sólo en la zona del cambio de pendiente se observa un incremento en la altura de ola a valores cercanos a 1 m de altura (Figura 157).

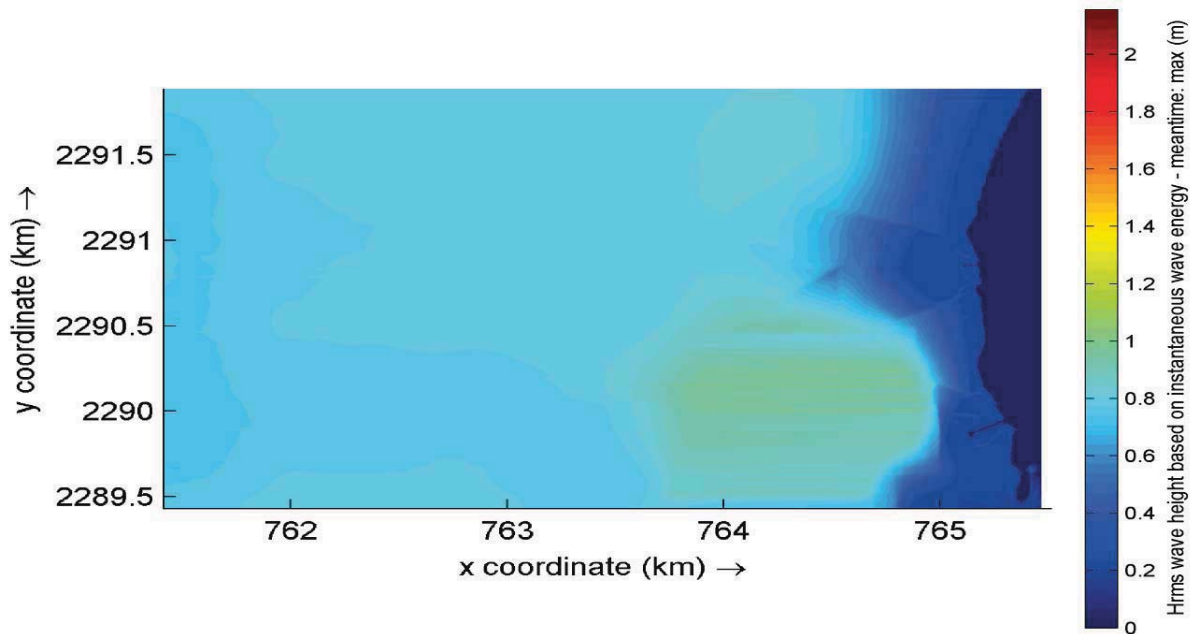


Figura 157. Altura de ola media cuadrática (Hrms).

Con respecto al campo de velocidades (Figura 158), se aprecia que las velocidades máximas alcanzan velocidades de 0.9 m/s. Al principio de la simulación las máximas velocidades se presentan en el puerto al norte y en la zona del cambio de pendiente brusco (cerca del puerto al sur), hacia al final del periodo de simulación y debido a la acumulación de sedimento la velocidad se ve reducida y se presenta una modificación en la dirección del campo de velocidades, en un principio la dirección era de 337.5° y debido a las zonas de acumulación esta dirección cambió a 270°.

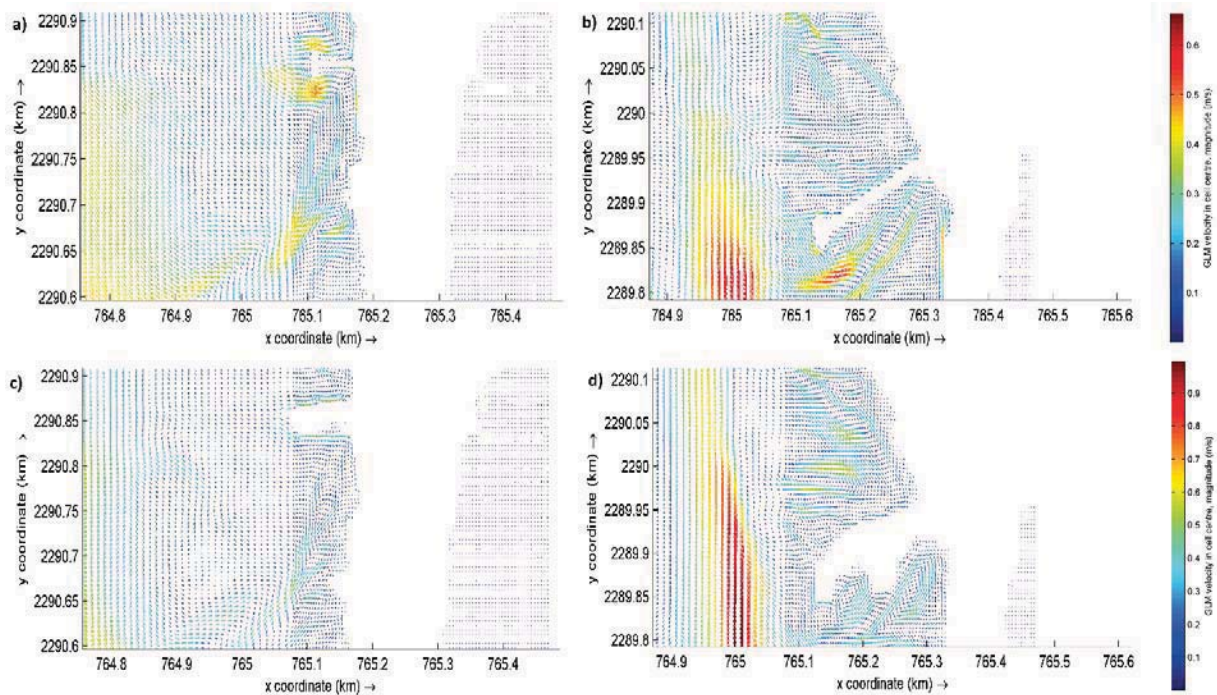


Figura 158. Campo de velocidades. a) Zona norte al inicio de la simulación, b) Zona sur al inicio de la simulación, c) Zona norte al final de la simulación, d) Zona sur al final de la simulación.

8.8.2 San Francisco de Campeche

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 160 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 37, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 37. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de San Francisco de Campeche.

Oleaje de Tormenta San Francisco de Campeche	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
	0.77	8	360

A continuación, se presentan los resultados de la simulación:

En la Figura 159, se presenta el resultado de los cambios en la batimetría, se observa que no hay cambio esto debido a las condiciones del fondo marino y de la costa que, entre otras cosas es una

zona rocosa sin sedimento fino (arena) y que toda la línea de costa se encuentra rigidizada por un malecón.

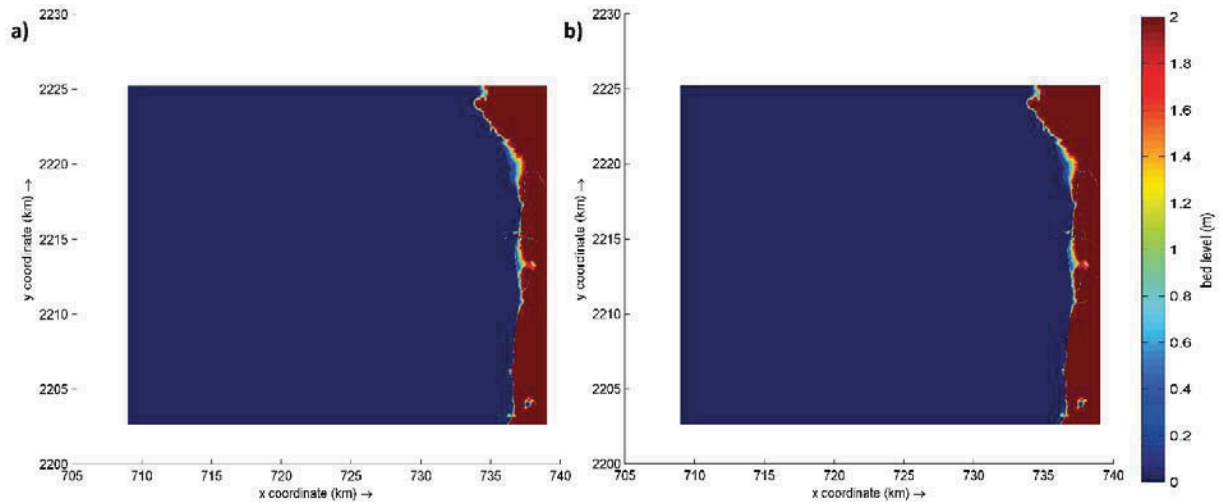


Figura 159. Bed level: a) Valor inicial; b) Resultado de la simulación.

En base a lo mencionado anteriormente, se aprecia que los niveles de erosión y depositación son iguales a cero (Figura 160).

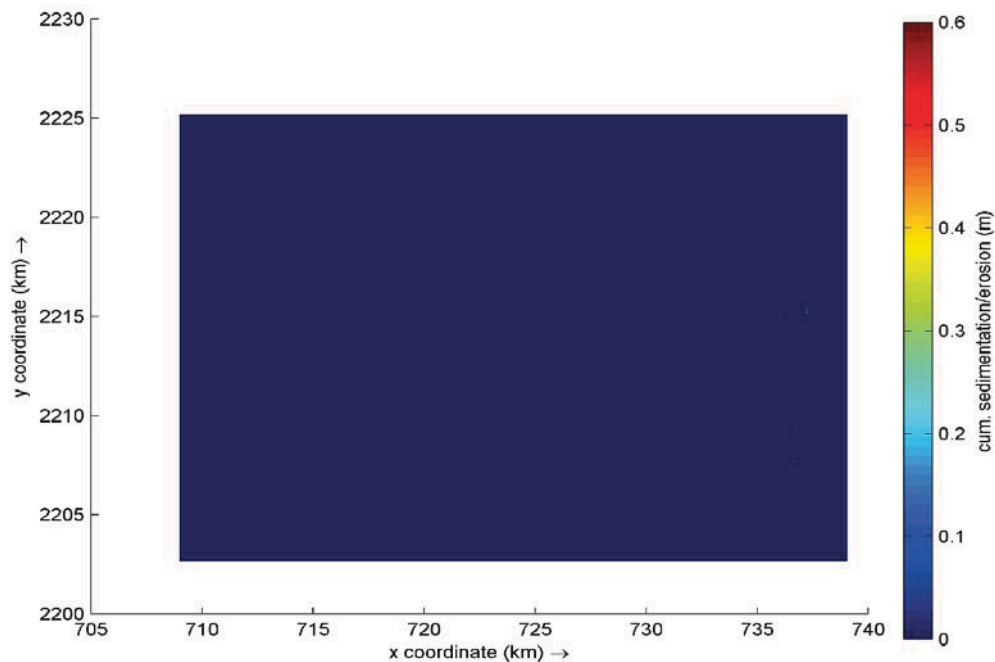


Figura 160. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.

Los valores de la altura de ola media cuadrática (H_{rms}) en la costa puede presentar valores en el rango de 20 a 30 cm; es importante señalar que aquí sólo se está analizando las condiciones de oleaje, por lo que las afectaciones en esta zona son referentes a inundaciones originadas principalmente por marea de tormenta y no así por oleaje (Figura 161).

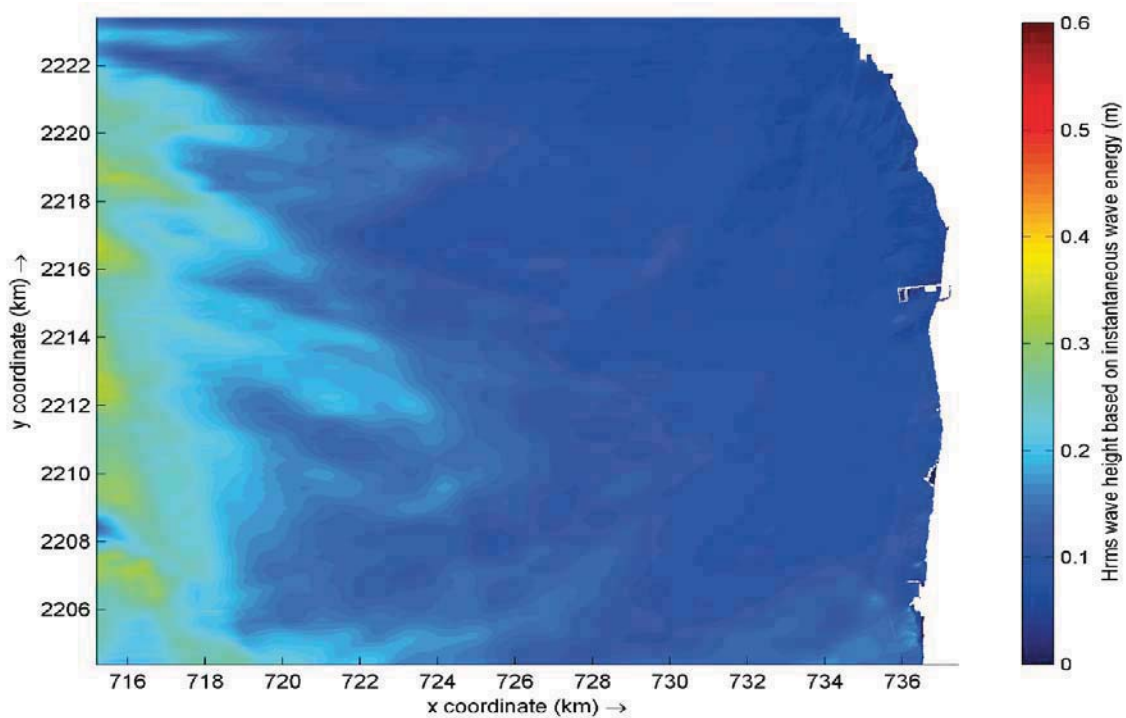


Figura 161. Altura de ola media cuadrática (Hrms).

En la Figura 162, se presentan las velocidades de 3 zonas de relevancia para el litoral de San Francisco de Campeche, por las actividades que en ellas se desarrollan. En la Figura 162a, se presenta las velocidades en todo el dominio y se aprecian que las velocidades máximas son de 0.25 m/s y las mínimas de 0.10 m/s.

En la Figura 162b, se presenta la dirección en la zona conocida como “Dársena de San Francisco de Campeche”, zona que pretende ser un punto de desarrollo urbano y turístico para la ciudad; aquí la dirección del oleaje tiende a rodear la estructura y a disminuir conforme se acerca a la costa con dirección de 200° en el sur de la estructura (parte baja de la imagen) y a 270° en el norte. La Figura 162c, es propiamente el sector centro del dominio, el malecón de la ciudad donde se realizan actividades lúdicas, se observa que las corrientes son paralelas a la costa y tiende en algunos puntos generar corrientes circulares debido a la forma artificial de la costa. En la Figura 162d, se aprecia el Puerto de Lerma, zona que además alberga la Capitanía de Puerto de Campeche y las instalaciones de la Séptima Zona Naval Militar de la Secretaría de Marina, las corrientes inciden a 270° y se desplazan conforme el contorno de la línea de costa.

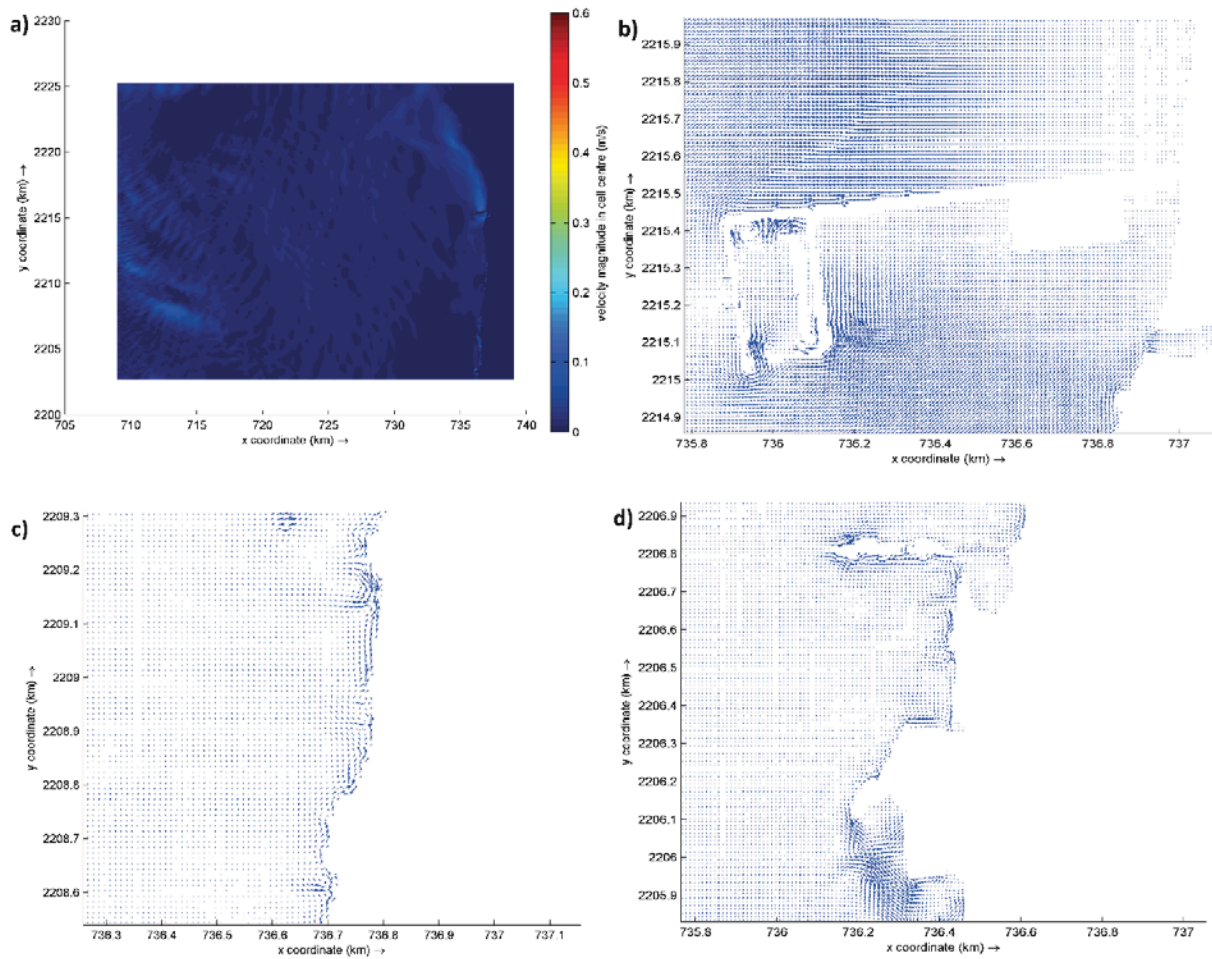


Figura 162. Campo de velocidades. a) Dominio en general, b) Zona de la Dársena de San Francisco de Campeche, c) Zona denominada Resurgimiento, d) Puerto pesquero de Lerma.

8.8.3 Ciudad del Sol y alrededores

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 80 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 38, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 38. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Ciudad del Sol y alrededores.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Ciudad del Sol	1.26	7.5	315

A continuación, se presentan los resultados de la simulación:

En la Figura 163, se presenta los cambios en el fondo marino para la zona de Ciudad del Sol. Esta zona se caracteriza por la presencia de 2 puertos: el Puerto pesquero de Payucán y el Puerto de Seybaplaya, este último enfocado a actividades petroleras y recientemente amplió sus operaciones a actividades turísticas.

Debido al tipo de terreno, que presenta escarpes y a la presencia de infraestructura portuaria reduce el espacio disponible para sedimento suelto de tipo arenoso y, aunado a la extensión del dominio se obtiene que el fondo marino no presenta cambios aparentes.

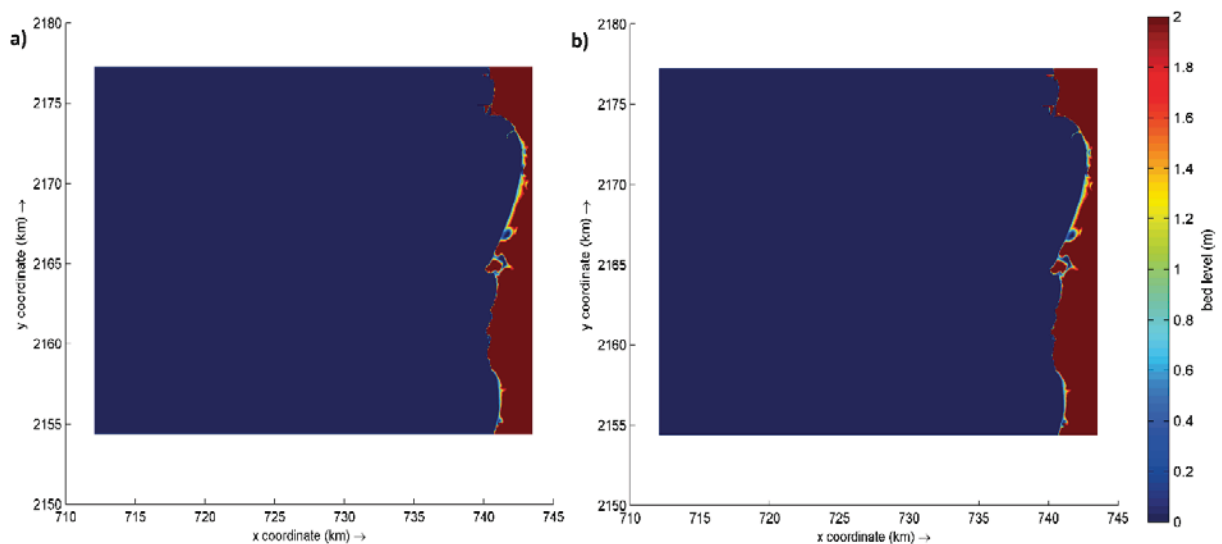


Figura 163. Bed level: a) Valor inicial, b) Resultado de la simulación.

Los valores de depositación y sedimentación en la zona de estudio son prácticamente nulos debido a las alturas que presentan los escarpes y la infraestructura presente (Figura 164).

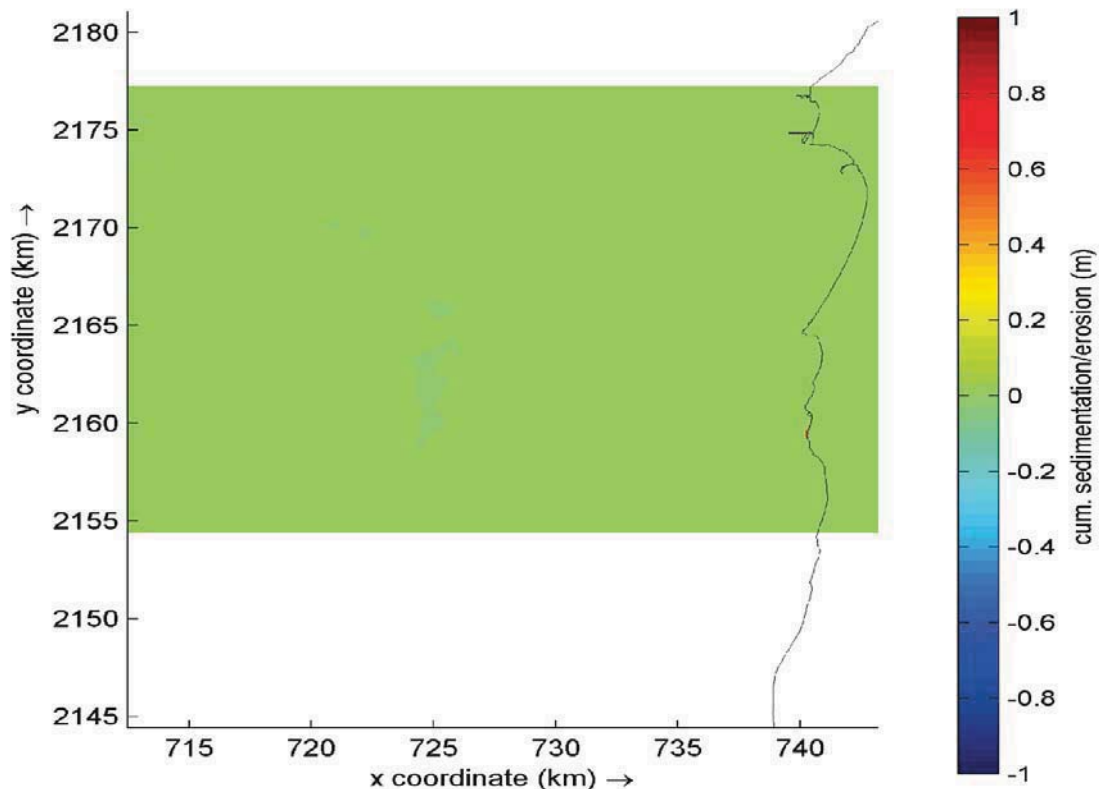


Figura 164. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.

En lo referente a la altura de ola media cuadrática (H_{rms}), de la Figura 165 se observa que la altura de ola incidente en la zona de puertos alcanza valores de 40 cm, mientras que en la zona sur de los puertos los valores descienden a valores de entre 30 y 20 cm.

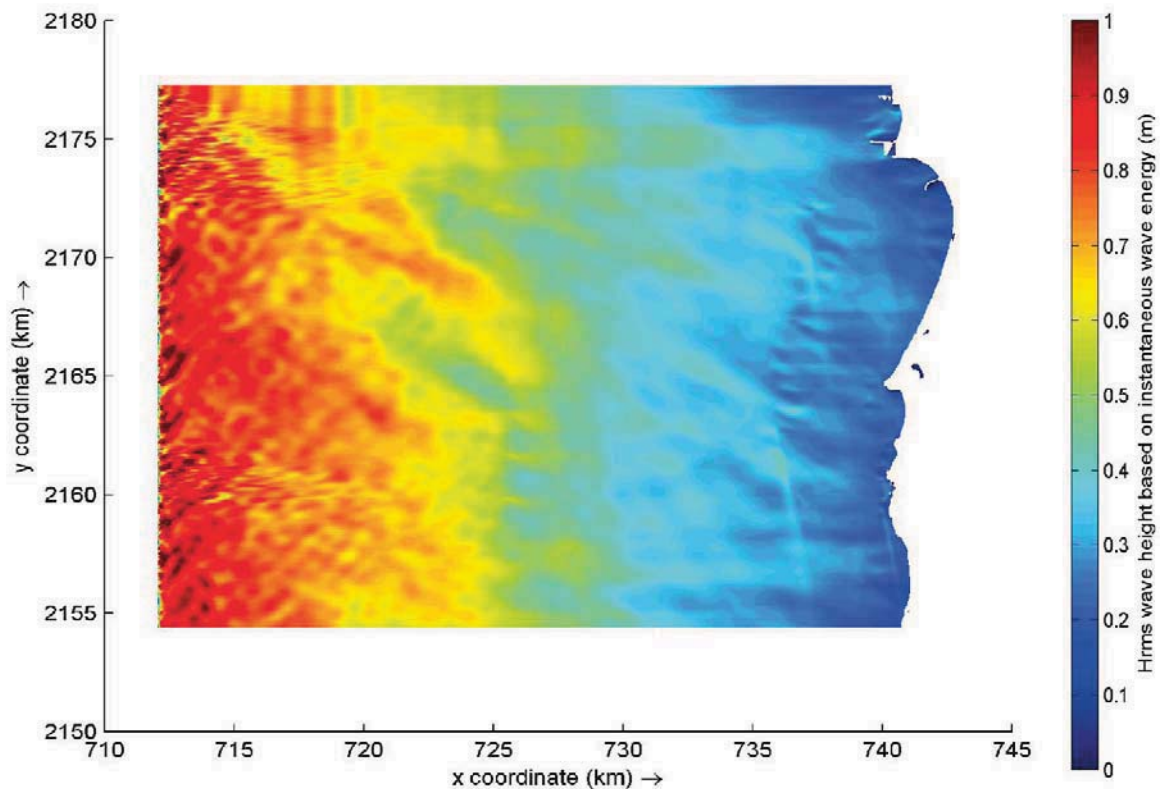


Figura 165. Altura de ola media cuadrática (Hrms).

Las velocidades generadas por el oleaje en la zona costera oscilan entre 20 y 15 cm/s. En la Figura 166a se presenta las velocidades para todo el dominio; en la Figura 166b se presenta un mapa del campo de dirección de la corriente alrededor del Puerto pesquero de Payucán, en esta zona el oleaje incide con ángulo de 270° y es a partir del puerto que la corriente sigue la configuración de la costa. En la Figura 166c, se presenta la zona del Puerto de Seybaplaya, la dirección de la corriente bordea el puerto. Finalmente, en la Figura 166d se presenta la zona de la comunidad de Ciudad de Sol, la corriente es paralela a la estructura, sin embargo, en la base de la zona expuesta las corrientes que vienen paralelas a la costa y las que vienen paralelas a la estructura se encuentran y generan pequeños remolinos, el morro de la estructura cumple su función y genera una desviación de la corriente.

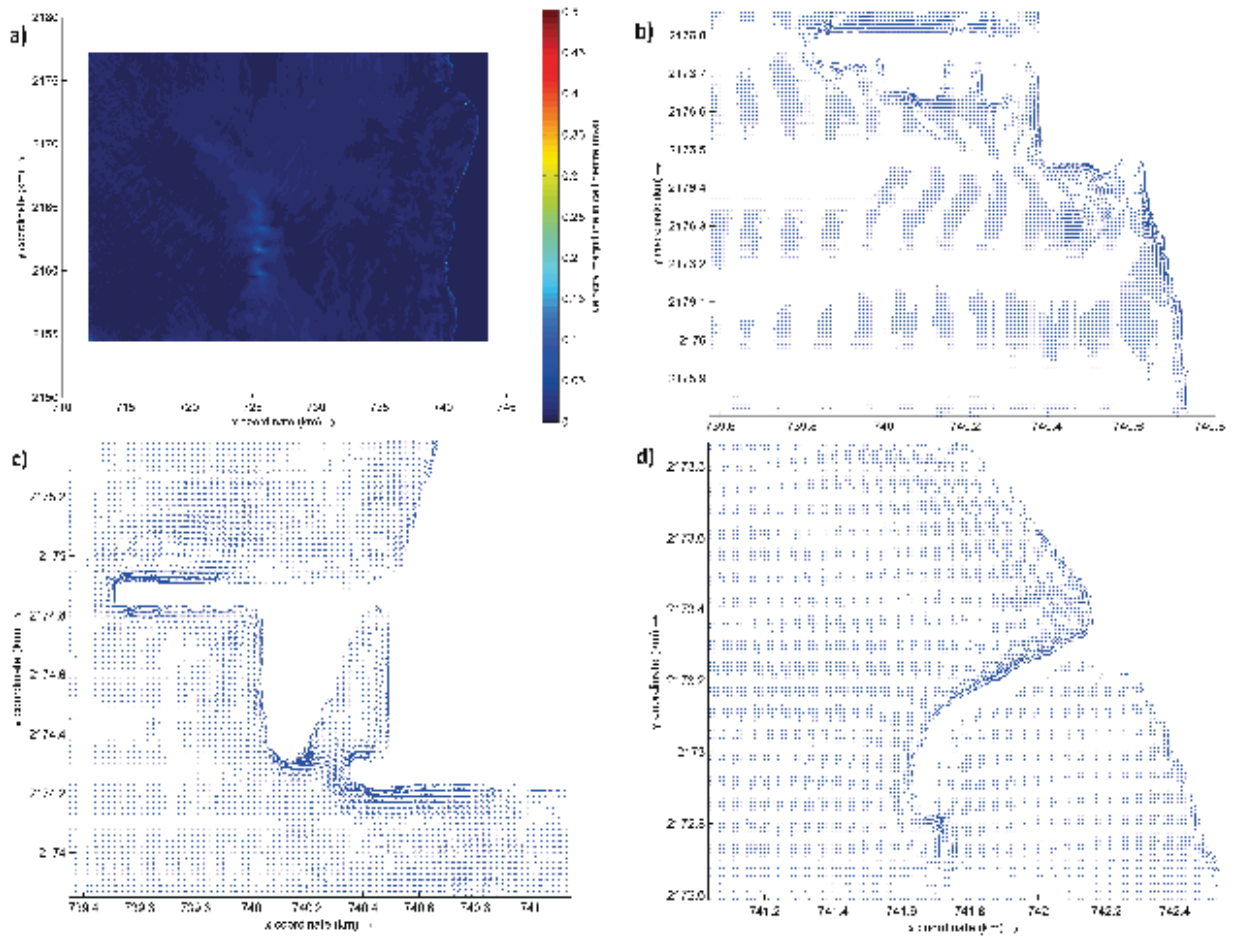


Figura 166. Campo de velocidades. a) Dominio en general, b) Zona del Puerto de Payucán, c) Zona del Puerto de Seybaplaya, d) Zona de puerto menor Seybaplaya.

8.8.4 Sabancuy

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 20 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 39, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 39. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Sabancuy.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Isla Arena	1.12	7.5	0

Los resultados de esta simulación no serán presentados en el cuerpo de este trabajo, debido a que forman parte de una línea de investigación actualmente en proceso.

8.8.5 Isla Aguada

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 160 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 40, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 40. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Isla Aguada.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Isla Aguada	1.40	8	337.5

En el caso específico de Isla Aguada se modeló el escenario “Do – nothing”, en las figuras siguientes se presentan los resultados para las variables: bed level, acumulación, hrms y velocidad. En la Figura 167 se presentan los cambios en la batimetría, en la Figura 167a se muestra el bed level inicial para el área de interés y en la Figura 167b se presenta los resultados de la simulación, se aprecia que hubo un cambio en las elevaciones de la costa, en el sector sur hubo un incremento de aproximadamente 0.5 m en los niveles, mientras que en la zona norte y central hubo un ligero retroceso de la costa y la elevación se redujo en aproximadamente 10 cm.

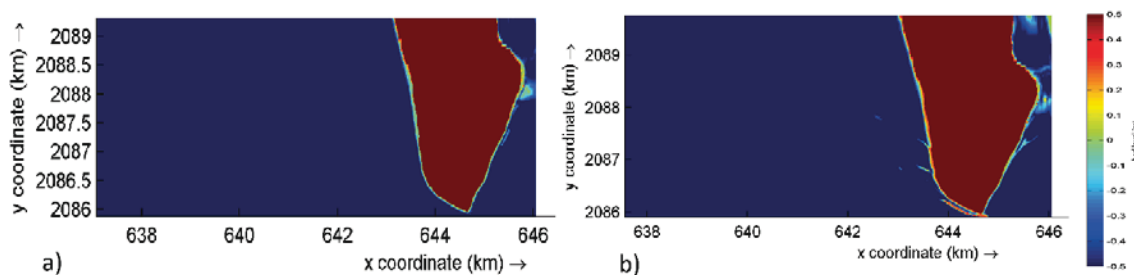


Figura 167. Bed level; a) Valor inicial, b) Valor final.

En la Figura 168 se presentan los valores de erosión y sedimentación; la Figura 168a es un mapa del dominio, en el que se aprecia que los mayores cambios se generan en el sector sur de la costa; la Figura 168b es un acercamiento a la zona con los principales cambios, se observa que hay una zona con erosión aproximadamente de -1, generando que este sedimento se acumule en una flecha con valores de elevación de 1 m, alcanzando valores de hasta 4 m hacia la derecha.

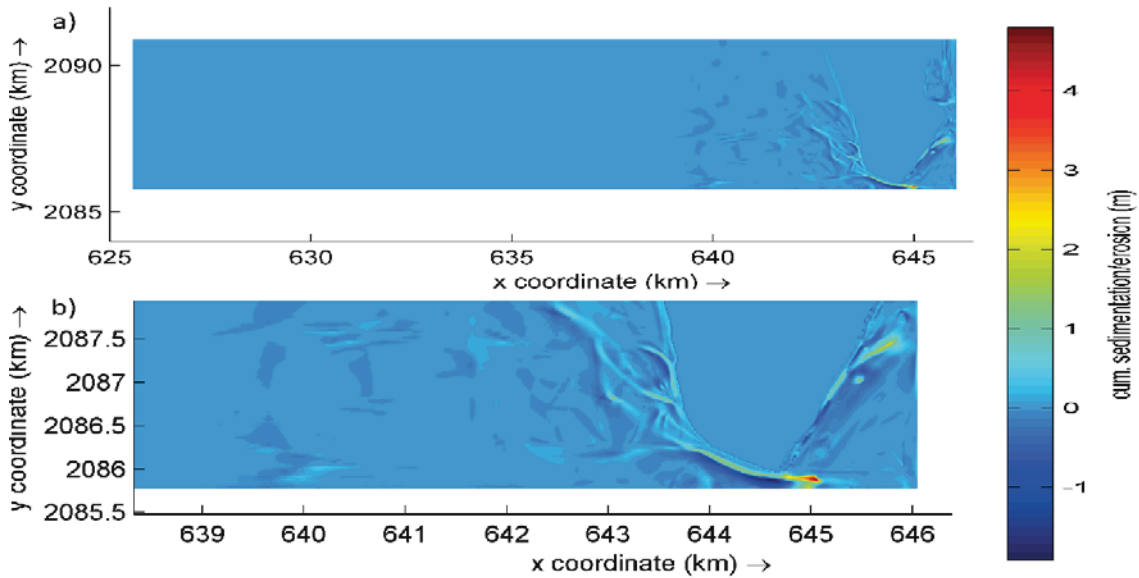


Figura 168. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) Zona general, b) Acercamiento a zona de interés.

En lo que respecta a la altura de ola media cuadrática (H_{rms}), en la Figura 169 se presenta un mapa de altura de ola, se observa que a la costa arriban olas con altura promedio de 0.5 m y hacia el sur de la zona de estudio prevalecen alturas en el rango de 1 a 1.5 m de altura.

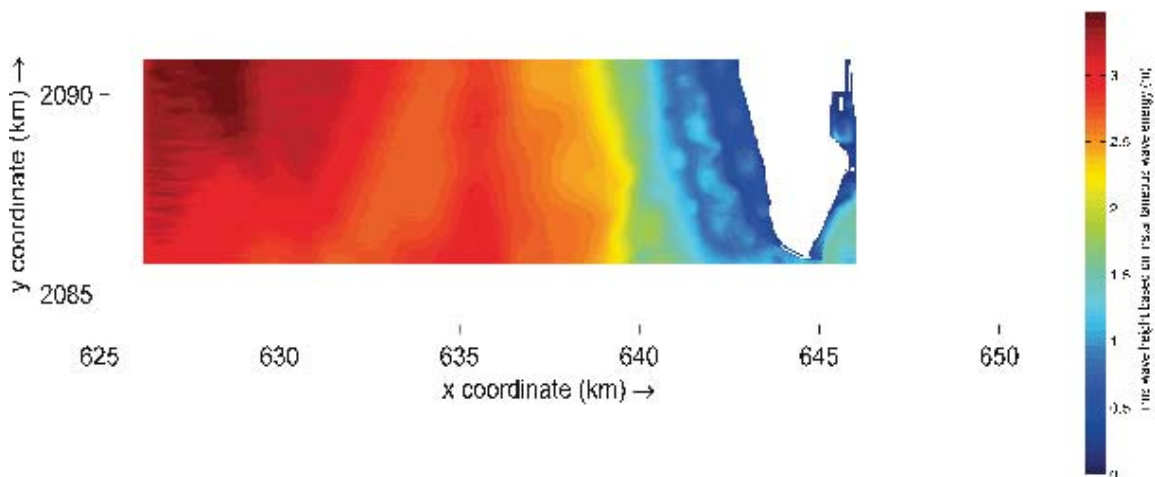


Figura 169. Altura de ola media cuadrática (H_{rms}).

La Figura 170, presenta mapas de velocidad y dirección de corrientes; la Figura 170a es un mapa de todo el dominio, se aprecia que la costa es la que presenta las mayores velocidades; la Figura 170b es un acercamiento al área de interés, se aprecian velocidades máximas entre 1.4 y 1.6 m/s paralelas

a la zona donde se forma la flecha y mínimas cercanas a 0.2 m/s, en la flecha; la Figura 170c presenta los vectores de dirección antes de la flecha (zona naciente) donde se ve un ligero cambio de dirección que genera un área de captura de sedimento; en la Figura 170d se presenta el cuerpo de la flecha, se aprecia que las corrientes hacia el lado de mar son paralelas a la barra, mientras que del lado de tierra los vectores se ven reducidos generando una zona de calma; la Figura 170e presenta la dirección de la corriente al final de la flecha, se aprecia una zona de acumulación de sedimento y un cambio de dirección de la corriente hacia el interior de la laguna.

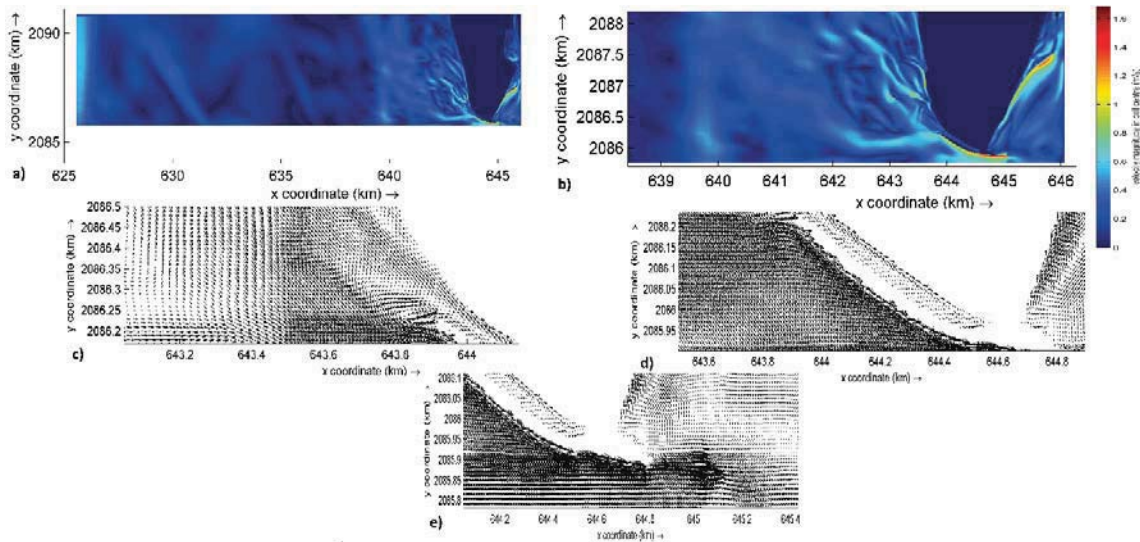


Figura 170. Campo de velocidades. a) Dominio general, b) Acercamiento a la zona de interés; c), d) y e) dirección de velocidades para el área de interés.

8.8.6 Ciudad del Carmen

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación y debido a la extensión del dominio se optó por dividir la zona en 6 sectores, en todos los casos las mallas generadas tuvieron las mismas características por lo que se empleó una malla cuya resolución es de 20 m en todo el dominio.

En la Tabla 41, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 41. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Ciudad del Carmen.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Isla del Carmen	1.12	7	22.5

Se simularon dos propuestas: a) No hacer nada, b) Relleno de playa; para la primera propuesta se simuló primeramente las condiciones de oleaje de tormenta sin marea de tormenta y posteriormente considerando la marea de tormenta, para la segunda propuesta se simuló esta última condición.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones para la zona que históricamente presenta las mayores tasas de erosión.

En la Figura 171, se presentan los resultados de los cambios en la topobatemetría para los diferentes escenarios simulados. Para los escenarios “Do – nothing”, se observa que el proceso erosivo se conserva y cuando se presenta la marea de tormenta estos valores se incrementan (se observa una disminución en la altura de la playa seca). Para el escenario “Beach Nourishment”, se genera una recuperación de la playa seca toda vez que con esta alternativa se genera una modificación en la velocidad y dirección de la corriente costera.

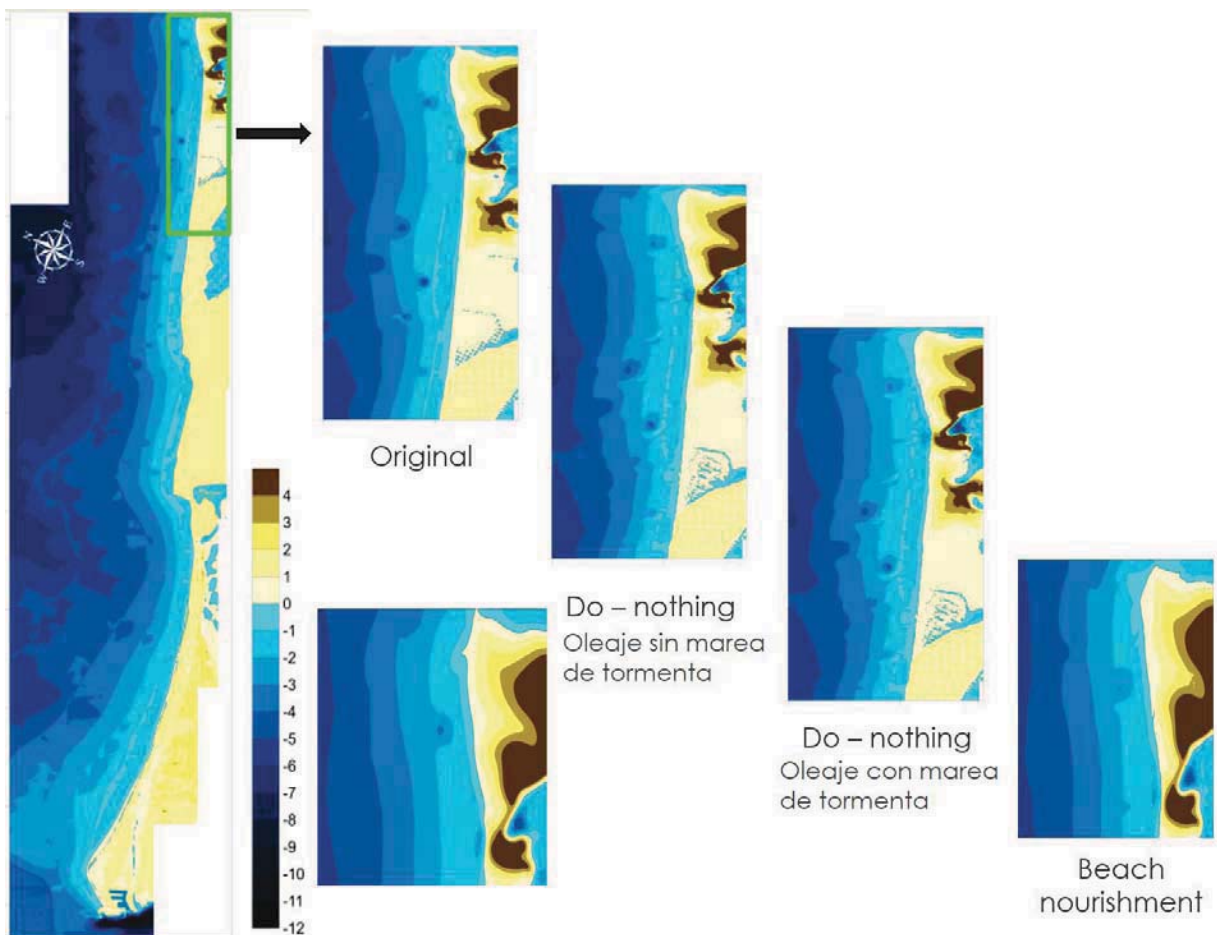


Figura 171. Bed level para las propuestas planteadas en la Isla del Carmen.

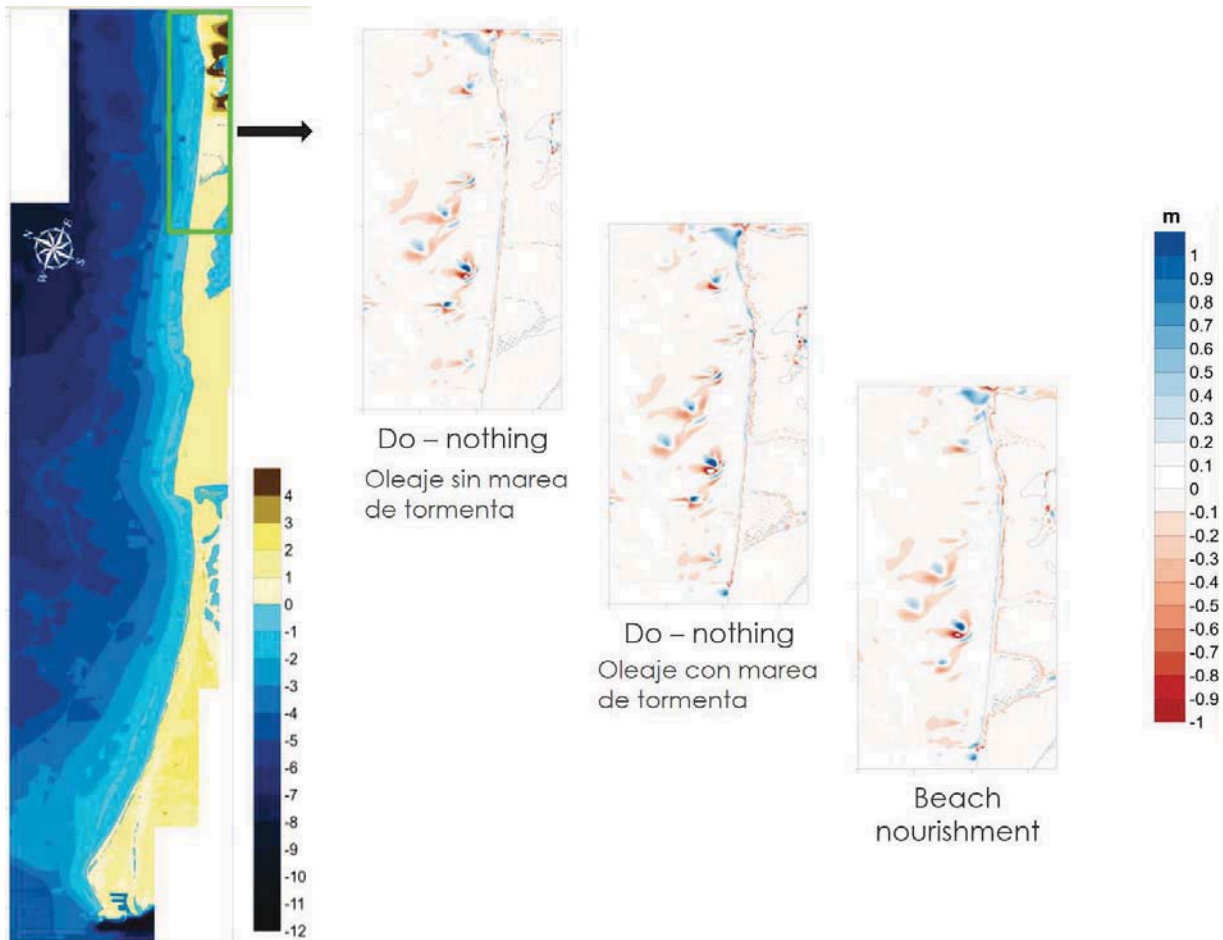


Figura 172. Niveles de erosión y acumulación de sedimento.

En la Figura 172, se presentan los niveles de erosión y acumulación de sedimento para los escenarios simulados; se aprecia que es en el escenario “Do nothing” donde hay mayor acumulación de sedimento en la zona sumergida, caso contrario se presenta en el escenario “Beach Nourishment” en el que el sedimento del relleno es desplazado hacia los laterales, generando un incremento de la zona seca. En el primer escenario los valores de acumulación rondan los 0.40 m; en el segundo escenario llega a los 0.70 m y las zonas de erosión se incrementan en la playa seca debido a la sobrelevación producto de la marea de tormenta; y en el tercer escenario la acumulación alcanza los 0.70 m y los valores de erosión se reducen a 0.30 m.

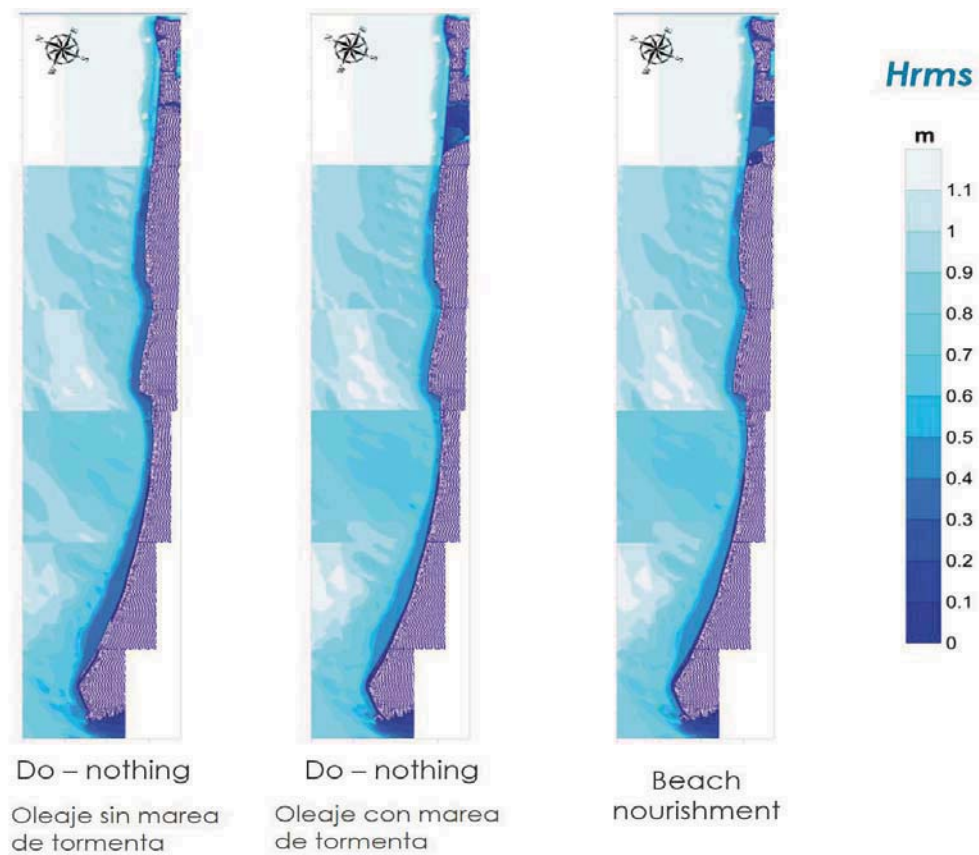


Figura 173. Altura de ola media cuadrática (Hrms) para la zona de estudio.

En lo que se refiere a la altura de ola media cuadrática (Hrms); en el escenario “Do - nothing” sin marea de tormenta, en la zona de rompiente se generan valores de 0.35 m; en el escenario “Do - nothing” considerando la marea de tormenta, la zona de rompiente se traslada hacia la playa seca y alcanza valores de 0.30 m; mientras que en el escenario “Beach Nourishment” los valores de la altura de ola oscilan los 0.2 y 0.3 m (Figura 173).

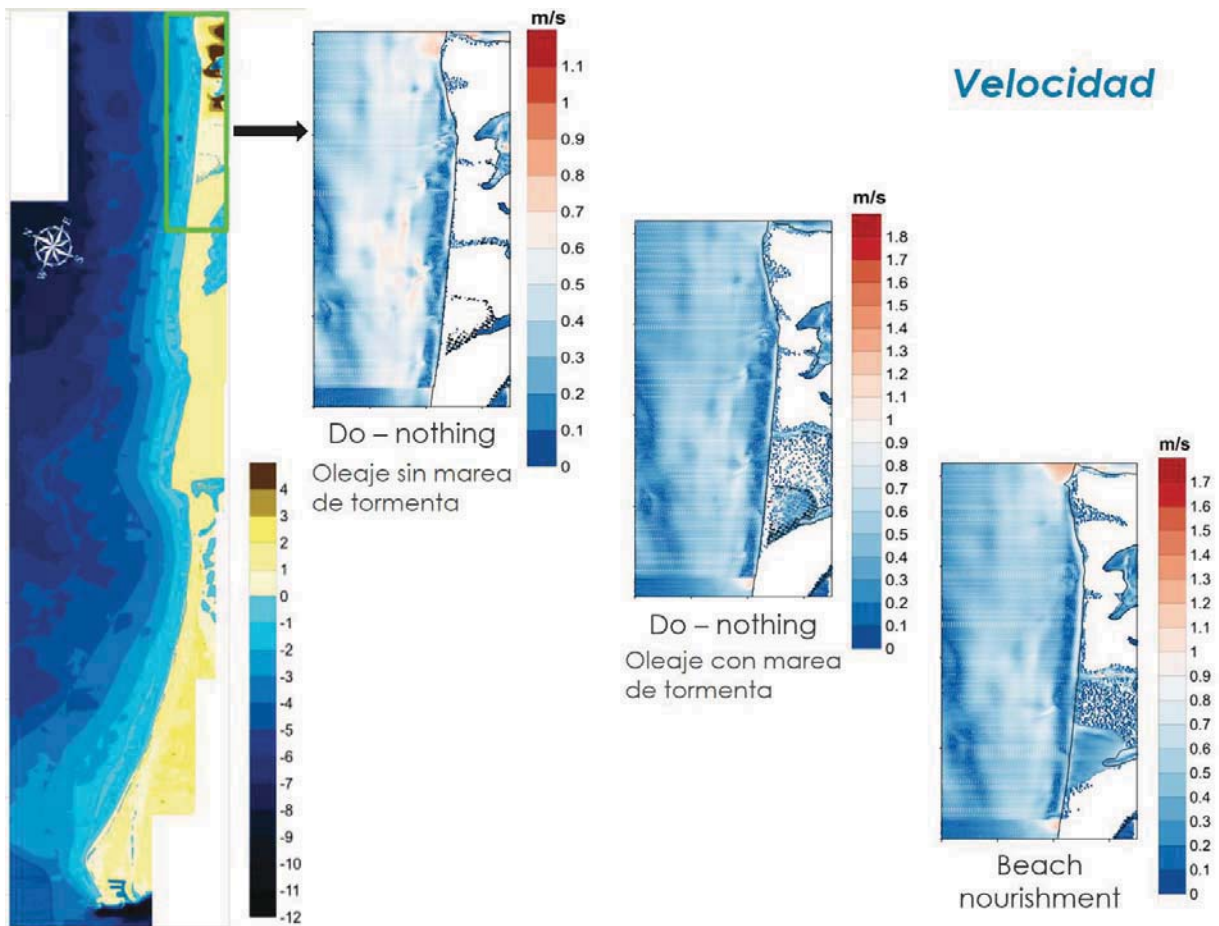


Figura 174. Magnitud de las velocidades que se presentan en la zona.

En la Figura 174 se presentan los mapas de velocidad; en el primer escenario se presentan velocidades en el rango de 0.7 y 0.8 m/s; en el segundo escenario las velocidades se reducen al rango entre 0.4 a 0.2 m/s; mientras que en el último escenario las velocidades se incrementan alcanzando valores de 1.2 m/s.

8.8.7 Puerto Rico

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 240 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 42, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 42. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Puerto Rico.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Puerto Rico	1.23	5	22.5

Se simuló la propuesta “Do nothing”; a continuación, se presentan los resultados de la simulación. En la Figura 175, se presentan los resultados para el bed level; se aprecia que no hay un cambio significativo en los niveles de la topobatemetría, sin embargo, al final de la simulación se aprecia un incremento de los valores de altura en promedio de 0.15 m, que indica una recuperación e incremento del ancho de playa seca.

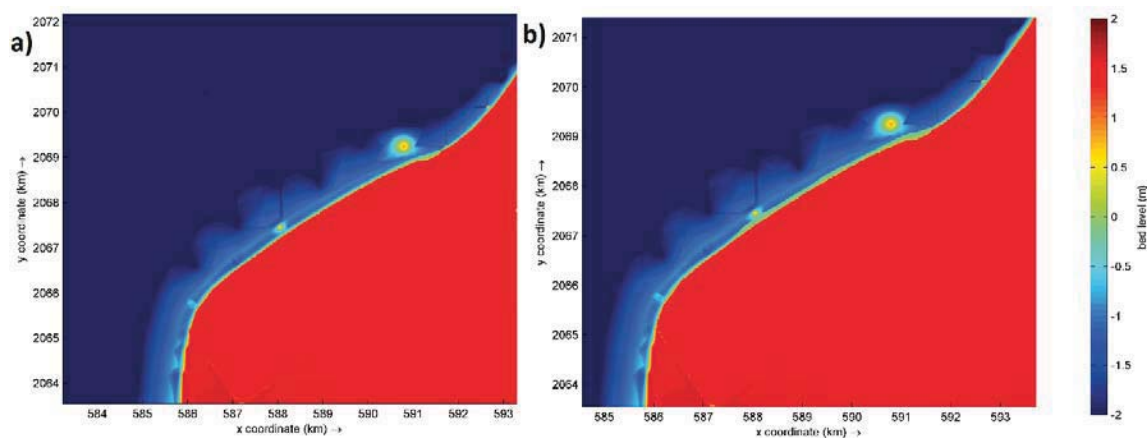


Figura 175. Bed level para la zona de Puerto Rico. a) Bed level inicial, b) Bed level al final de la simulación.

Lo mencionado anteriormente se aprecia de mejor forma en la Figura 176, con ayuda de la escala de colores se aprecia que el sedimento es transportado de la zona sumergida hacia la zona seca generando una acumulación de sedimento del orden de 0.1 m; mientras que en la zona sumergida se observa una acumulación de sedimento en promedio de 0.04 m.

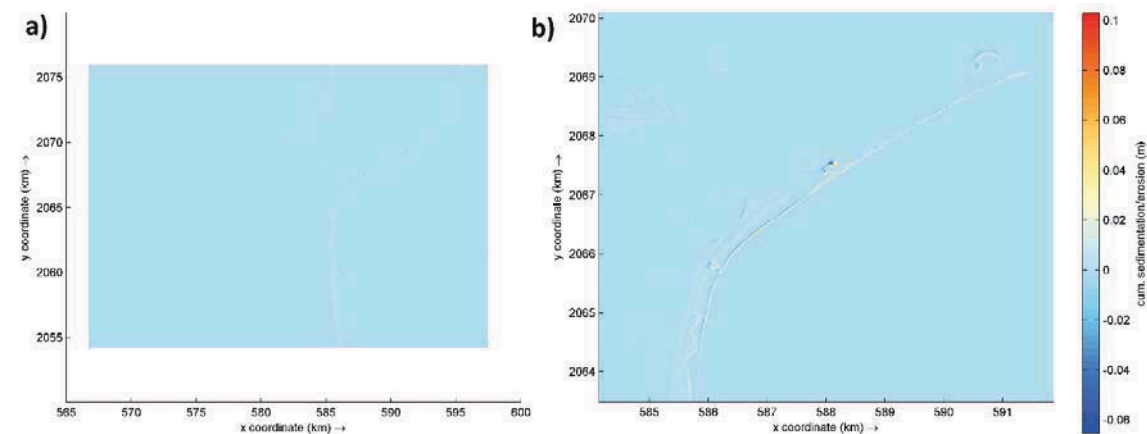


Figura 176. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) Mapa general de la zona. b) Mapa específico para la zona de mayor interés.

En lo referente a la altura de ola media cuadrática (H_{rms}), debido a la configuración de la batimetría a la costa llegan olas con alturas en el rango de 0.2 a 0.4 m; sólo en zonas específicas se pueden alcanzar valores de altura de ola de 0.6 m (Figura 177).

En la Figura 178, se presentan los mapas de velocidad y dirección de corriente generadas por el oleaje. En la Figura 178a se presentan las velocidades de la zona en general, se aprecia que las velocidades no superan los 0.25 m/s; en la Figura 178b, se presentan las velocidades en la costa, se aprecia magnitudes del orden de 0.25 a 0.30 m/s; en la Figura 178c, se presentan los vectores de dirección de la corriente, la corrientes se desplaza paralela a la costa en dirección Sureste – Noroeste (en el sentido de ubicación de la imagen), generando pequeños cambios en la dirección que propician una acumulación del sedimento fino.

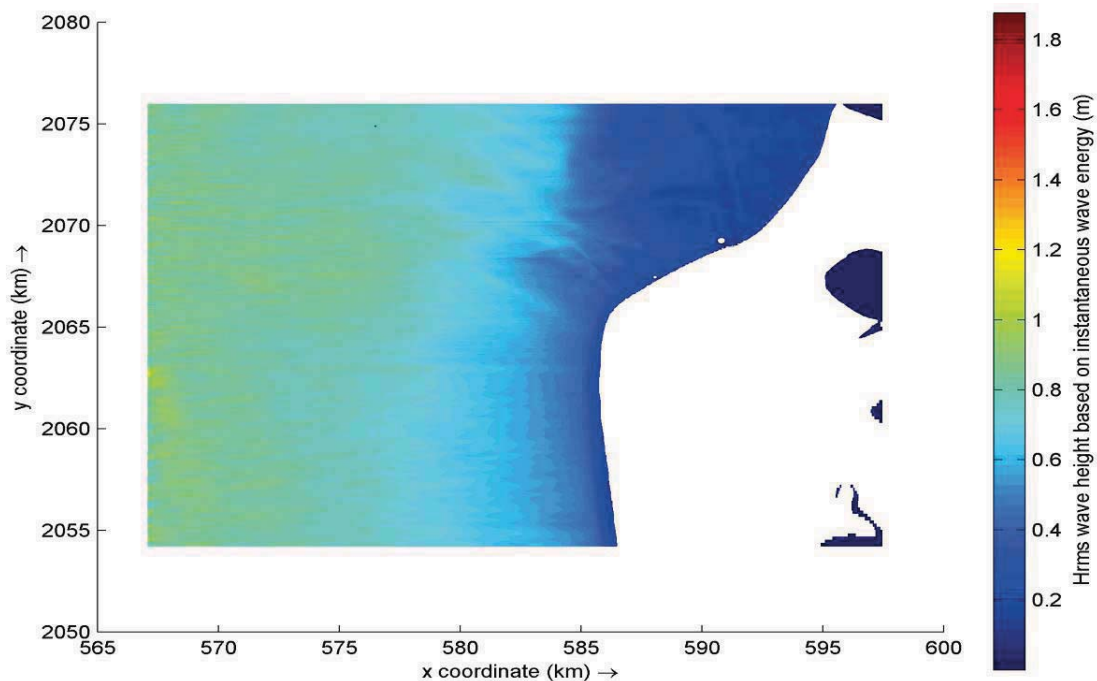


Figura 177. Altura de ola media cuadrática (H_{rms}) para la zona de estudio.

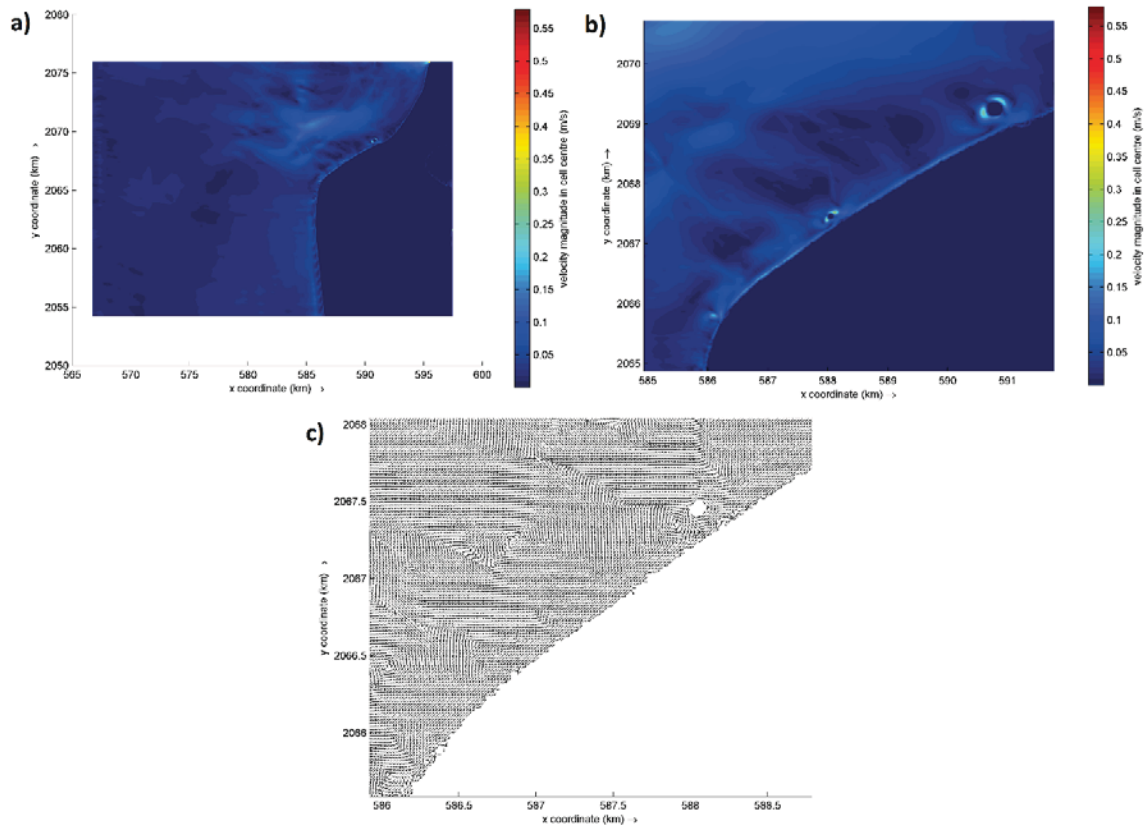


Figura 178. Magnitud de las velocidades. a) Mapa de velocidades para la zona en general. b) Mapa de velocidades para la zona de interés en específico. c) Mapa de dirección de corriente.

8.8.8 Nuevo Campechito

La obtención y análisis de los datos de oleaje se hicieron de la misma forma que la presentada en las secciones 11.4, 11.4.1 y 11.4.2. Se definió un umbral a través del método POT para encontrar aquellos valores de altura de ola que puedan considerarse como tormenta. Posteriormente se encontró el valor representativo de esos valores de tormenta y a través del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ se encontró el valor del periodo correspondiente a la altura encontrada; haciendo uso de la rosa de oleaje y del gráfico de probabilidad conjunta $p(H_s, \theta_H)$ se identificó la dirección de procedencia del oleaje (Anexo VIII).

El modelo topobatimétrico empleado para la simulación de la zona tiene una resolución de 5m, el dominio se extiende de aguas profundas hacia la zona costera. En esta simulación se empleó una malla cuya mínima resolución es de 20 m en aguas profundas, mientras que la máxima resolución de celda es de 5 m en la costa.

En la Tabla 43, se presenta el escenario de tormenta simulado para un periodo de 432,000 s.

Tabla 43. Datos de oleaje de tormenta para simulación para la zona de Nuevo Campechito.

Oleaje de Tormenta	Hs (m)	Tp (s)	θ_H (°)
Nuevo Campechito	1.20	7.5	22.50

Para esta zona se simularon tres escenarios: “Do – nothing”, “Retiro” y “relleno”. En la Figura 179 se presentan los valores iniciales de la simulación para cada escenario. Para el escenario “Do – nothing”, se genera una depositación a la entrada de la estructura de 0.40 m en promedio, el área con mayor depositación es al interior de la estructura (Figura 179b). Para el segundo escenario, no hay cambios significativos en el nivel topobatimétrico (Figuras 179c y 179d). En el tercer escenario, el sedimento es transportado hacia el sur, generando una depositación promedio de 0.20 m, se aprecia que el sedimento comienza a ser extendido hacia las laterales del relleno (Figura 179f).

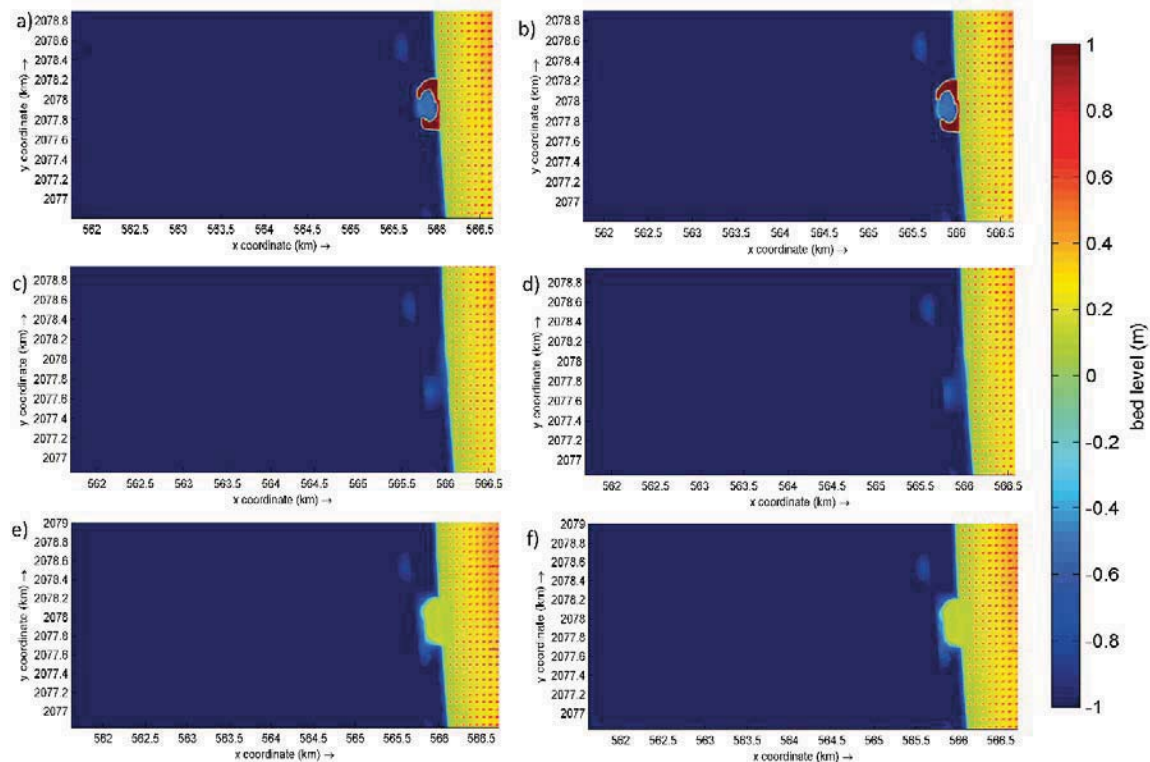


Figura 179. Bed level para los diferentes escenarios simulados. a) Bed level inicial escenario “Do - nothing”, b) bed level final escenario “Do - nothing”, c) bed level inicial escenario “retiro”, d) bed level final escenario “retiro”, e) bed level inicial escenario “relleno”, f) bed level final escenario “relleno”.

En lo que respecta a la erosión y sedimentación, para el escenario “do – nothing” (Figura 180a) se encontró que en la costa se generan un proceso erosión con valores cercanos a los 10 cm, así mismo se aprecia que la zona donde se deposita mayor sedimento es a la entrada de la estructura. En el escenario “relleno” (Figura 180b) se aprecia que el sedimento es transportado hacia el sur de la zona, con valores de sedimentación promedio de 0.10 m, hacia el norte también se produce una sedimentación con valores superiores a los 20 cm. Finalmente para el escenario “retiro” se observa una reducción de los procesos erosivos y de sedimentación, el sedimento que es erosionado producto de la rompiente de oleaje es transportado hacia la zona seca de la playa, en ambos casos los valores no superan los 5 cm. Con los resultados se afirma que el retiro de la estructura permitirá al sistema encontrar un equilibrio, mientras que una acción de intervención como un relleno de playa podría acelerar el proceso de llegar al equilibrio; dejar el sistema sin intervención sólo generará que el proceso erosivo se incremente.

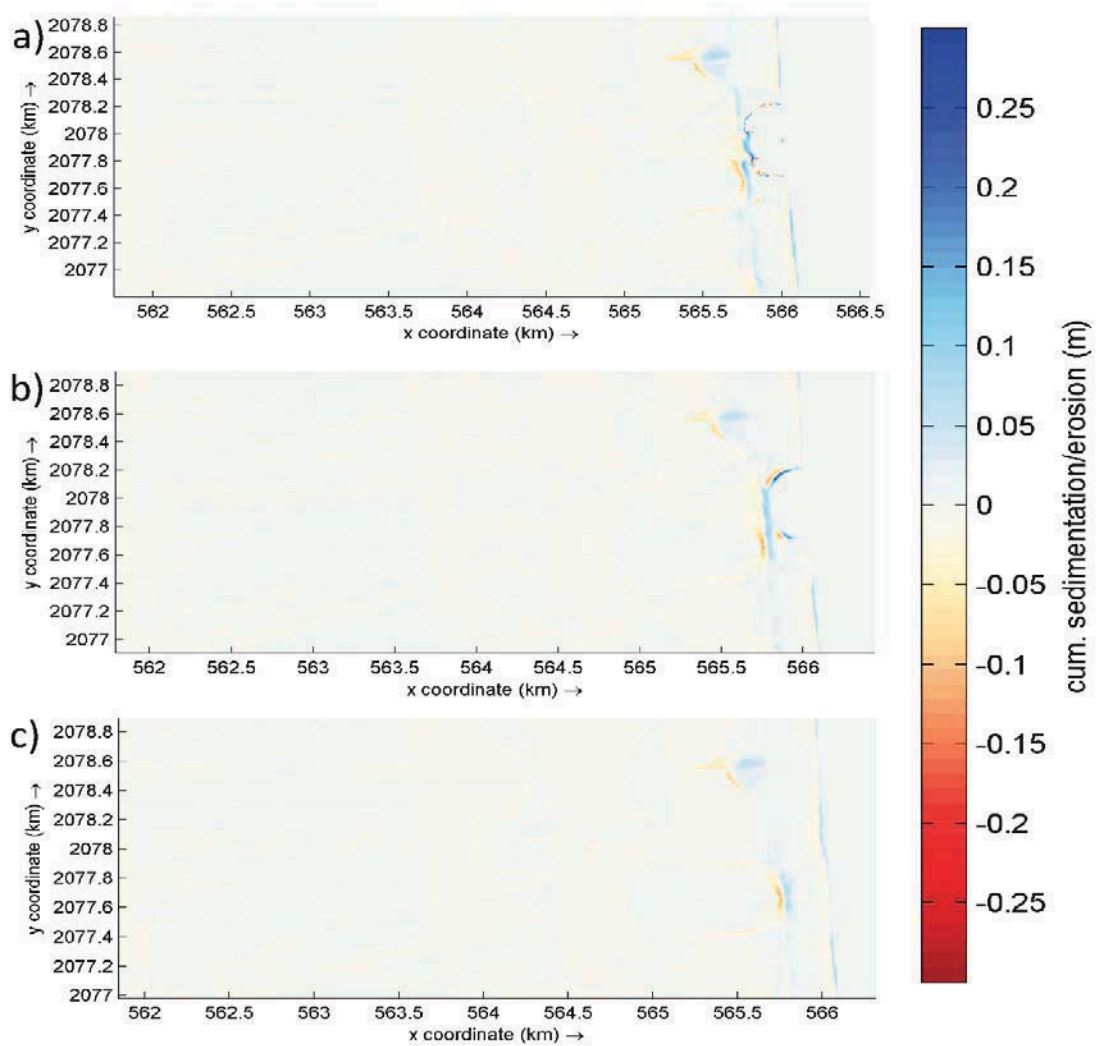


Figura 180. Niveles de erosión y acumulación de sedimento. a) escenario "Do - nothing", b) "relleno", c) "retiro".

La altura de ola media cuadrática (Hrms) que llega a la costa se presenta en la Figura 181. Para el primer escenario (Figura 181a) la altura de ola oscila entre 0.20 m y 0.40 m, y se genera una mayor intrusión de la ola en la playa. La Figura 181b, presenta las alturas para el escenario "retiro", aquí se reduce la inundación generada por el oleaje, así como una reducción de la altura de ola a valores cercanos a los 0.20m. Finalmente, la Figura 181c se refiere al escenario "relleno"; aquí la altura de ola que llega al relleno se encuentra en el rango de 0.40 m a 0.60m y la inundación generada en la costa es similar al del escenario anterior. A pesar de que la altura de ola es muy pequeña, la inundación generada se debe a la altura del terreno en la zona seca.

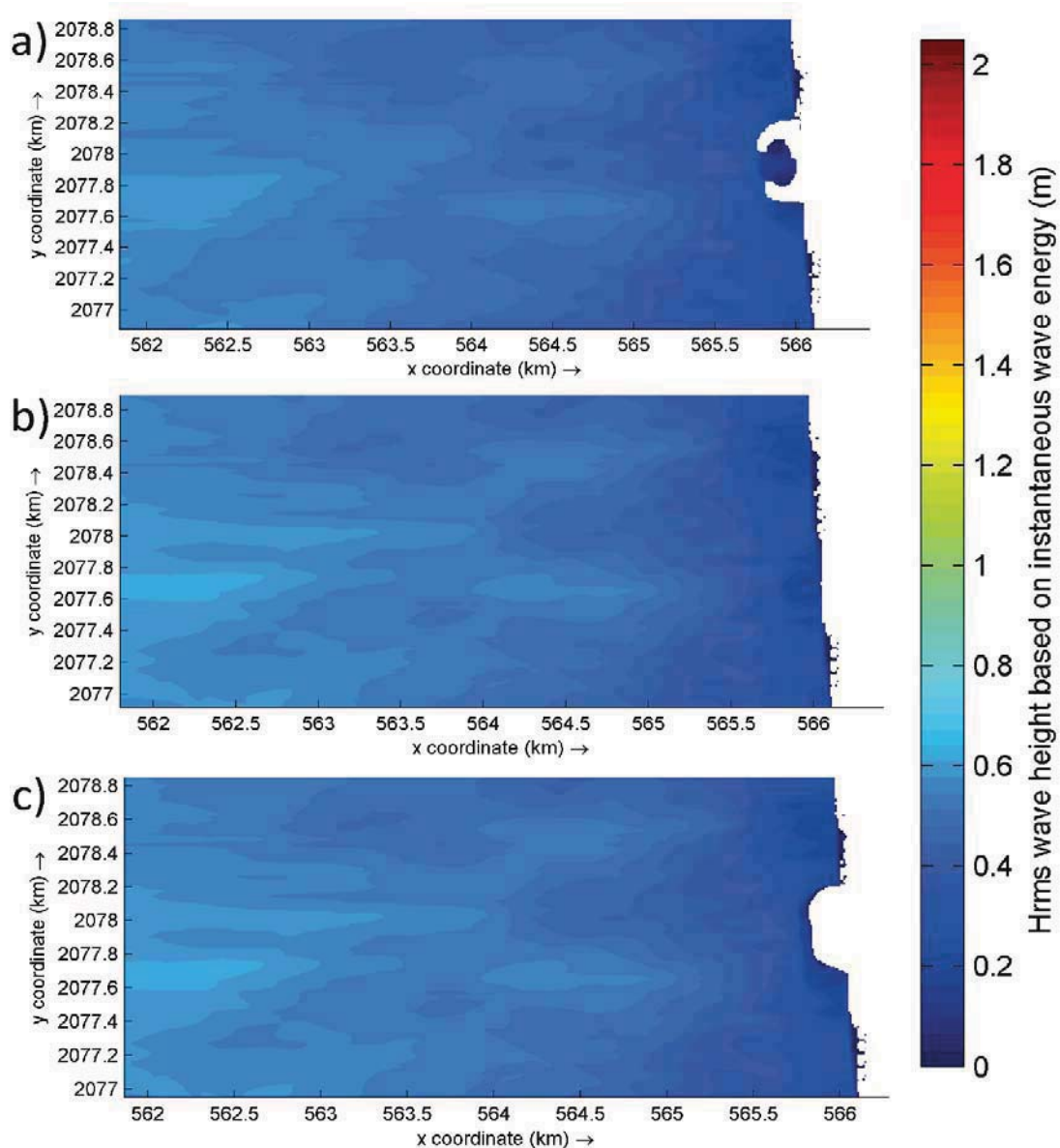


Figura 181. Altura de ola media cuadrática (H_{rms}) para la zona de estudio, para los escenarios: a) “Do – nothing”, b) “retiro”, c) “relleno”.

En la Figura 182 se presenta la magnitud de las velocidades para la zona de interés. La Figura 182a corresponde al escenario “do – nothing”, en este escenario las mayores velocidades se presentan en la base de la estructura con valores que alcanzan los 0.35 m/s, mientras que en la playa las velocidades alcanzan los 0.20 m/s. Para el escenario “retiro”, en la Figura 182b se presentan las velocidades y se aprecia que las velocidades en la línea costera son del orden de los 0.10 m/s y sólo se aprecia un segmento de costa que alcanza los 0.15 m/s. Para el tercer escenario, las velocidades en la costa se reducen a valores menores a los 0.10 m/s, sólo en algunos segmentos cercanos al relleno se alcanzan velocidades de 0.15m/s, las mayores velocidades (0.35 m/s) se generan a los costados del relleno.

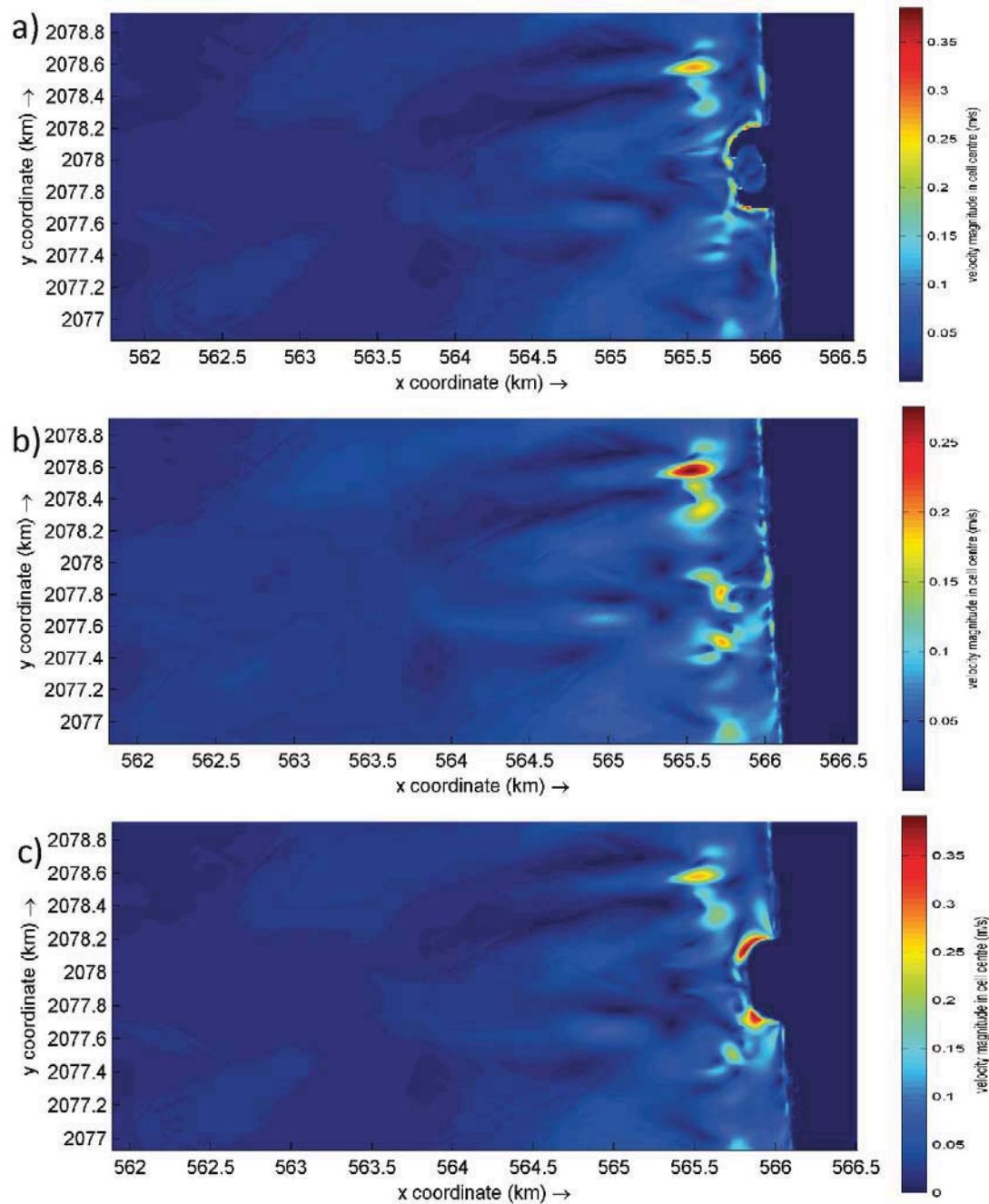


Figura 182. Magnitud de las velocidades para los escenarios: a) "Do - nothing", b) "retiro", c) "relleno".

La Figura 183 presenta la dirección de la corriente. La Figura 183a corresponde al primer escenario, aquí la corriente llega perpendicular a la costa, al entrar en contacto con la estructura se dirección es paralela a la estructura y en la costa el sentido de la corriente es alejarse de la estructura. La Figura 183b corresponde al segundo escenario, se observa la zona donde rompe el oleaje (próximo a la costa); en la costa la corriente genera unas pequeñas zonas de circulación especialmente en la zona de inundación, lo que infiere que la corriente genera escarpes en la playa. La Figura 183c corresponde al tercer escenario, aquí el comportamiento es muy similar al del primer escenario, sin

embargo, la gran diferencia radica en que la inundación en la costa disminuye, así como las velocidades, se infiere que el transporte del relleno es transportado hacia los costados y al reducir la velocidad de la corriente se deposita en las márgenes norte y sur del relleno.

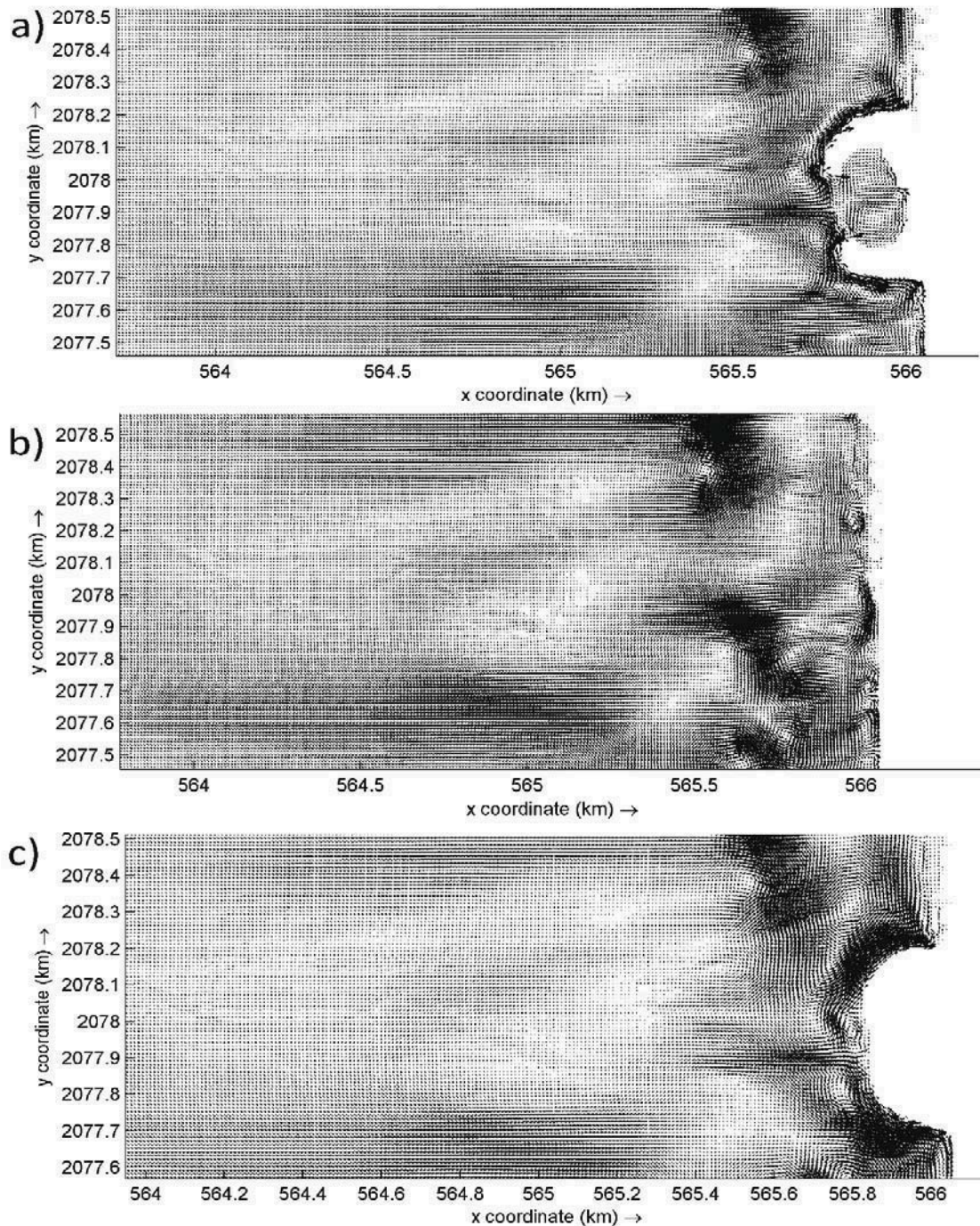


Figura 183. Dirección de la corriente para los escenarios: a) "Do - nothing", b) "retiro", c) "relleno".

8.8.9 Reevaluación de la vulnerabilidad costera e índice de actuación

Evaluadas las medidas de actuación, se procedió a evaluar nuevamente la vulnerabilidad y el índice de actuación para las zonas analizadas tomando en cuenta los datos de las simulaciones. De las 8 zonas analizadas, en tres de ellas: Isla Arena, San Francisco de Campeche y Ciudad del Sol debido a su importancia económica y social la reducción de la vulnerabilidad tiene un componente social de mayor peso cuya actuación implicaría la reubicación de la infraestructura urbana y la remoción de infraestructura portuaria por lo que su análisis queda fuera del alcance de este estudio.

Las zonas de Puerto Rico e Isla Aguada, en el tiempo que realizó esta investigación presentaban una tasa de recuperación y crecimiento del ancho de playa seca, por lo que se optó por la medida “Do – nothing”, en los resultados de los modelos se aprecia una tendencia de crecimiento de playa seca. De continuar con la tenencia, en un futuro la vulnerabilidad será modificada.

En las tres zonas restantes: Sabancuy, Ciudad del Carmen y Nuevo Campechito, se evaluó la colocación de un relleno de playa. Con los resultados de los modelos se aprecia una recuperación de la playa. Con la actuación propuesta se afectaron 5 parámetros: elevación, altura de duna, pendiente costera, cambio de línea de costa y protección artificial; en la Tabla 44 se presenta el análisis de vulnerabilidad para estas 3 zonas, aun cuando el valor de los 5 parámetros cambió, en algunos no implicó un cambio en su clasificación; las celdas sombreadas indican los valores de clasificación de estos parámetros y se observa un cambio de clasificación de vulnerabilidad. En la última fila de la tabla se presenta el valor del IVC calculado por el método AHP, en las 3 zonas la vulnerabilidad cambió de Alta a Moderada.

Tabla 44. Comparación de la vulnerabilidad de cada parámetro en análisis y el valor del Índice de Vulnerabilidad (IVC) antes y después de la actuación.

Parámetro	Sabancuy		Ciudad del Carmen		Nuevo Campechito	
	Actual	Futuro	Actual	Futuro	Actual	Futuro
Elevación (EL)	5	4	5	5	2	2
Duna (DU)	2	2	3	3	2	2
Altura de duna (DH)	3	3	4	3	3	3
Geomorfología (GE)	3	3	3	3	3	3
Pendiente costera (CS)	5	2	5	2	5	2
Altura de ola significativa (SWH)	5	5	4	4	5	5
Cambio de línea de costa (CC)	5	3	3	3	3	3
Manglar (MA)	1	1	1	1	1	1
Vegetación diferente a manglar (VDM)	5	5	5	5	1	1
Arrecife de coral (CR)	5	5	5	5	5	5
Distancia a la costa (DC)	3	3	5	5	5	5
Densidad de población (PD)	5	5	5	5	1	1
Material de vivienda (HM)	1	1	1	1	1	1
Protección artificial (AP)	1	1	1	1	5	1
Tipo de infraestructura (TI)	1	1	1	1	5	5
Índice de Vulnerabilidad (IVC)	ALTA (3.8)	MODERADA (2.99)	ALTA (3.72)	MODERADA (3.23)	ALTA (3.47)	MODERADA (2.95)

En lo que respecta al índice de actuación, éste se enfoca en las características físicas de la zona, por lo que las actuaciones sólo influyen en dos de los parámetros incluidos en el cálculo de dicho índice. Sin embargo, a pesar de los cambios la urgencia de actuación no se ve modificada en Sabancuy y

Nuevo Campechito; no así en Ciudad del Carmen, donde la urgencia en la actuación cambio de Alta Importancia a Importancia moderada, como se aprecia en la Tabla 45.

Tabla 45. Comparación de la clasificación de cada parámetro en análisis y el valor del Índice de urgencia antes y después de la actuación.

Parámetro	Sabancuy		Ciudad del Carmen		Nuevo Campechito	
	Actual	Futuro	Actual	Futuro	Actual	Futuro
Vulnerabilidad	4	3	4	3	4	3
Uso de suelo	1	1	1	1	5	5
Características del suelo	1	1	4	4	4	4
Pendiente media del terreno	5	3	5	3	5	3
Batimetría	5	5	4	5	4	5
Distancia a fuente	5	5	1	1	4	4
Distancia a sumidero	3	3	1	1	1	1
Densidad de población	5	5	5	5	5	5
Índice de Actuación	ALTA (29)	ALTA (26)	ALTA (25)	MODERADA (23)	ALTA (32)	ALTA (30)

9

APORTACIONES, CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1 APORTACIONES

La principal aportación de este trabajo de investigación consiste en la propuesta y aplicación de una metodología para evaluar la vulnerabilidad costera y establecer los sectores costeros que requieren una intervención prioritaria basado en el análisis de factores físicos y sociales, con el objetivo de controlar o disminuir la erosión. La metodología consta de varias fases, delimitación de celdas litorales, evaluación de la vulnerabilidad, identificar zonas prioritarias y evaluar las condiciones actuales y medidas de actuación. Con los resultados es posible identificar las zonas prioritarias del litoral del estado de Campeche.

Partiendo de la hipótesis de que las actuaciones realizadas en la costa, incrementan sistemáticamente su vulnerabilidad; por lo que un análisis a gran escala permitirá establecer una planeación que reduzca los efectos adversos de la escasa planeación y manejo costero estatal, con este trabajo de investigación se ha aportado información al estado del arte del sistema litoral de Campeche, se han generado herramientas para el análisis de la información y, se han propuesto y evaluado acciones para reducir la vulnerabilidad y que sirvan de base para establecer un programa de manejo costero estatal desde un enfoque a gran escala. A continuación, se enlista brevemente las aportaciones realizadas:

- Base de datos de los parámetros físicos más relevantes de las arenas de 10 playas de Campeche: Isla Arena, Playa Bonita, Payucán, Chenkán, Sabancuy, Isla Aguada, Puerto Real, Playa Norte, Zacatal y Nuevo Campechito para el año 2017, en total se recolectaron 258 muestras.
- Desarrollo y acoplamiento de un programa de cómputo para el análisis de la información generada en el procesamiento de las muestras de sedimentos.
- Base de datos de 97 perfiles de playa. Con esta información se obtiene pendiente, ancho de playa seca, y área de playa seca.
- Desarrollo de un programa de cómputo para descarga, análisis y generación de gráficos de datos de oleaje del modelo WaveWatchIII; mediante dicho programa se pueden determinar los principales parámetros del oleaje y viento, información correspondiente a las alturas y periodos significantes del oleaje, dirección asociada, velocidad y dirección del viento para diferentes estados de mar, frecuencias de ocurrencia, probabilidades conjuntas y de excedencia de altura y periodo de ola y vientos.
- División del litoral en celdas litorales con la combinación de diferentes criterios de análisis.
- Se desarrolló códigos para la digitalización y extracción de la línea de costa a partir de imágenes Landsat en Phyton.
- Se generó una base de datos robusta para las 15 variables empleadas en el cálculo de la vulnerabilidad del litoral.

- Evaluación de la vulnerabilidad costera del litoral del estado de Campeche, a partir de dos enfoques evaluativos.
- A partir del índice de urgencia se caracterizó el litoral en sectores identificando su urgencia de actuación.
- En combinación de los límites de celdas litorales, de la vulnerabilidad costera y sectores de urgencia, se obtuvo los segmentos litorales jerarquizados para el litoral del estado de campeche.
- Modelo topobatimétrico de alta resolución para la costa de Campeche.
- Simulación de 35 escenarios acoplados que incluyen las condiciones de frontera: oleaje, marea y viento para las 4 estaciones climáticas: primavera, verano, otoño e invierno; para las 3 épocas climáticas: secas, lluvias y nortes; para tormenta y huracán. La información puede ser utilizada para identificar patrones de corriente y comportamiento de oleaje a lo largo del litoral.
- Simulación de escenarios de intervención: “Do – nothing”, “Retiro” y “Relleno” para 9 sectores de la costa del estado.

9.2 CONCLUSIONES

A partir del análisis e interpretación de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, se obtuvieron las conclusiones siguientes:

- Los sedimentos en el norte del estado son más gruesos que los del sur; en promedio la mayoría de los sedimentos presentan una asimetría casi simétrica y son bien graduados, lo que implica una homogeneidad en el tamaño de las partículas; se observa una marcada transición en el tamaño de las partículas del norte hacia el sur.
- Los perfiles presentan una pendiente pronunciada debido a la pérdida de sedimento y la presencia de escarpios, especialmente en las playas de Sabancuy y Nuevo Campechito; la playa de Playa Norte es la que tiene el mayor ancho de playa seca; en promedio el ancho de playa seca para el litoral del estado de Campeche es de 50 m aproximadamente. Los cambios de pendiente se deben a la energía generada por la rompiente del oleaje de tormenta; cabe señalar que las mediciones se realizaron en época de “Nortes”.
- Tras el análisis de la evolución de la línea de costa para el periodo 1994 – 2018, se concluye que la zona norte del estado (de Isla Arena a San Francisco de Campeche) es dominada por un proceso de acreción con una tasa promedio de 5.12 m/año, debido a que la zona de manglar funciona como trampa de sedimentos; la zona centro (de San Francisco de Campeche a Sabancuy) presenta una tasa de acreción promedio de 0.25 m/año, esta zona puede ser dividida en dos sectores: antes del río Champotón y posterior al río, en el primer sector las actividades antrópicas de relleno y desarrollo portuario son las responsables de la acreción de la costa, mientras que en el segundo sector, estas actividades han incremento el proceso erosivo alcanzando tasas de retroceso de 4.58 m/año. La zona sur fue dividida en 3 sectores: en el primer sector domina el proceso de retroceso con una tasa de 7.97 m/año, siendo el km 45+000 de la Carretera Federal 180 el más afectado; en el segundo sector el proceso de acreción domina con una tasa de 7.14 m/año y es Playa Norte donde se genera

este fenómeno, en el tercer sector el proceso de retroceso es el dominante con tasas de 21.86 m/año afectando principalmente la zona de Atasta.

- Existen tres celdas litorales generales en Campeche, que dividen la costa en tres sectores con características muy particulares.
- Los expertos en la zona costera coinciden en que la geomorfología es la variable más importante que influye en la vulnerabilidad de un sector costero, seguido de la pendiente costera y el cambio de línea de costa; la zona sur del estado presenta una vulnerabilidad alta, mientras que el sector norte y centro hay predominancia de vulnerabilidad baja y moderada.
- En base a las características físicas de la zona costera, es la zona sur la que requiere una mayor atención, así como los sectores de Isla Arena y Seybaplaya; el resto del litoral su urgencia de intervención es moderada.
- De acuerdo a los segmentos litorales jerárquicos, los sectores de Isla Arena, Isla Aguada, Ciudad del Carmen, Zacatal – Nuevo Campechito son los que requieren una alta prioridad para la atención a los problemas físicos, sociales y económicos que presentan; seguidos de Sabancuy, Seybaplaya y San Francisco de Campeche; el resto del litoral presenta una baja prioridad.
- A partir de los modelos numéricos se concluye que el retiro de estructuras es una opción que permite la recuperación paulatina del sistema; así como la opción de relleno genera resultados promisorios para la recuperación de zonas con altas tasas de erosión. Sin embargo, el proceso erosivo natural del litoral del estado de Campeche puede definirse como cíclico y es la intervención antrópica la que ha generado que este fenómeno prevalezca, al bloquear la regeneración natural de las dunas costeras por la construcción de infraestructura.

9.3 RECOMENDACIONES

Este trabajo de investigación ha permitido evaluar aspectos físicos y sociales del litoral del estado de Campeche, con el objetivo de identificar los sectores vulnerables y cuales requieren una atención prioritaria, considerando a la erosión costera como el principal problema a resolver. Con base en la metodología, el trabajo y los resultados obtenidos es posible realizar algunas recomendaciones:

- Realizar planes de monitoreo permanente de playas, en función del uso de destino específico de cada una de ellas.
- Generar y ampliar la base de datos de sedimentos y perfiles de playa a fin de que puedan ser empleadas en la realización de cualquier proyecto costero,
- Generar un plan de manejo costero con un enfoque geomorfológico, que permita identificar claramente las fuentes y sumideros del litoral, las acciones que generan un déficit sedimentario, acciones de intervención que puedan desarrollarse y que incluyan diseño, tiempos de ejecución y un análisis costo – beneficio.
- Evitar en lo posible la rigidización de la costa; en caso contrario devolverle al sistema la flexibilidad a fin de permitir que en los ciclos de erosión y acreción el sistema pueda recuperarse y alcanzar un grado de estabilización, toda vez que se identificó que las playas arenosas del estado sufren de erosión crónica debido a la rigidización y alteración del sistema dunar por la construcción de la Carretera Federal 180.

- Si bien aquí se consideraron sólo tres alternativas de solución, no pueden considerarse éstas como las únicas soluciones, es recomendable evaluar la combinación de soluciones, por ejemplo, un relleno artificial que acelere el proceso de estabilización de una zona en combinación son soluciones rígidas (estructuras) que reduzcan la energía y protejan los puntos más vulnerables del nuevo frente playero y/o que emulen la función del sistema natural. Los rellenos deben ser realizados con el fin principal de estabilizar el sistema litoral y deben considerar el perfil de playa actual y las características del sedimento; mientras que las estructuras deben ser diseñadas con el objetivo de disminuir el efecto del oleaje, reforzar al perfil de playa para generar su desarrollo, no modificar el paisaje de la playa y obstaculizar en lo menor las corrientes litorales.
- Generar un ordenamiento litoral, toda vez que mediante el análisis de los proyectos sometidos mediante manifestaciones de impacto ambiental (MIAS) ante la SEMARNAT se identificó que no existe un control ni un programa de desarrollo costero.

9.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Al desarrollar este trabajo hubo apartados que debido al tiempo y los recursos humanos y económicos que demandaban debieron ser acotados. Sin embargo, son de importancia para el conocimiento del litoral de Campeche que debieran ser abordados en un futuro; por lo que el conocimiento generado sirve de base para futuros proyectos de investigación.

Entre las líneas de investigación que se dejan abiertas destacan:

- Caracterización mineralógica de los sedimentos de playa.
- Evaluación de la medida de restauración de dunas, que incluya la parte biológica.
- Evaluar la descarga sedimentaria de los ríos en las diferentes épocas y estaciones climáticas.
- Evaluación socio – económica de los escenarios de intervención.
- Diseño numérico de estructuras rígidas y no rígidas.
- Determinar los estados morfodinámicos de las playas desde una perspectiva a largo plazo que incluya el incremento del nivel del mar, así como el potencial de erosión de las playas
- Entender más extensamente cómo los procesos generados en las playas de Yucatán afectan la disposición de sedimentos en las costas de Campeche.

BIBLIOGRAFÍA

- (NIIMA), N. I. and M. A. (1981). Gulf of Mexico Barra Tupilco to Isla Piedra, scale 1:300,000. United States Government.
- 04CA2015UD072, M. P.-. (2015). *Manifestación de Impacto Ambiental del proyecto: Construcción de rompeolas con cubo de concreto simple para protección de acueducto paralelo Chicbul Carmen en el polígono Punta Julián, Municipio de Carmen.*
- 04CA2016UD046, M.-R. (2016). *Manifestación de Impacto Ambiental del proyecto: Extracción de arena frente a Playa Norte para la restauración y ampliación del recinto portuario Laguna Azul y la construcción de rompeolas norte en Ciudad del Carmen, Campeche.*
- Abuodha, P. A., & Woodroffe, C. D. (2006). Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. *Australian National Centre for Ocean Resources and Security University of Wollongong*, 1–18. <https://doi.org/2006>
- Agardy, T., Bridgewater, P., Crosby, M. P., Day, J., Dayton, P. K., Kenchington, R., ... Peau, L. (2003). Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13(4), 353–367. <https://doi.org/10.1002/aqc.583>
- Ahammed Kk, B., Mahendra, R., & Pandey, A. (2016). Geoinformatics & Geostatistics: An Overview Coastal Vulnerability Assessment for Eastern Coast of India, Andhra Pradesh by Using Geo-Spatial Technique. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 4(3). <https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000146>
- Al Bakri, D. (1996). A geomorphological approach to sustainable planning and management of the coastal zone of Kuwait. *Geomorphology*, 17(4), 323–337. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-555X\(96\)00009-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-555X(96)00009-8)
- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Alpuche Gual, L. (2014). *Clasificación de playas campechanas para su manejo integral y desarrollo sostenible.* Universidad Autónoma de Campeche.
- Amezcuca, I., Carreón, G., Marquez, J., Vidal, R. M., Burgués, I., Cordero, S., & Reid, J. (2007). Tenosique : análisis económico- ambiental de un proyecto hidroeléctrico en el Río Usumacinta. Serie Técnica No. 10. *Conservation Strategy Fund*, (10), 63. Retrieved from http://conservation-strategy.org/sites/default/files/field-file/10_Reid_Usumacinta.pdf
- Anfuso, G. (2004). Caracterización de celdas litorales en un tramo costero homogéneo del litoral de Cádiz. *Revista C & G*, 18(1–2), 25–36.
- Anfuso, G., Pranzini, E., & Vitale, G. (2011). An integrated approach to coastal erosion problems in northern Tuscany (Italy): Littoral morphological evolution and cell distribution. *Geomorphology*, 129(3), 204–214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.023>
- Angelotti, P. G. (2014). Acciones gubernamentales frente a los desastres provocados por fenómenos

- hidrometeorológicos en México. *Gestión y Ambiente*, 17(2), 69–83. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2906.9524>
- Anger, D. E., & Caron, J. (1998). Plant - induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochem.*, 42, 55–72.
- Aouiche, I., Daoudi, L., Anthony, E. J., Sedrati, M., Ziane, E., Harti, A., & Dussouillez, P. (2016). Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes: Input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco. *Geomorphology*, 254, 16–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.013>
- Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, 51, 3747–3763. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>
- Ashraful Islam, M., Mitra, D., Dewan, A., & Akhter, S. H. (2016). Coastal multi-hazard vulnerability assessment along the Ganges deltaic coast of Bangladesh—A geospatial approach. *Ocean & Coastal Management*, 127, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.03.012>
- Ávila García, P. (2007). Las cuencas hidrológicas de México y su vulnerabilidad socioambiental por el agua. In M. Á. Porrúa (Ed.), *Políticas de desarrollo regional. Agenda pra el desarrollo* (pp. 133–161). Mexico, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ayala Pérez, L. A. (2010). Ecosistemas marinos y costeros. Humedales Costeros. In G. J. Villalobos-Zapata & J. Mendoza-Vega (Eds.), *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. (p. 730). Campeche, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur.
- Bagdanavičiūtė, I., Kelpšaitė, L., & Soomere, T. (2015). Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas. *Ocean & Coastal Management*, 104, 124–135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.011>
- Bautista, F., Batllori - Sampedro, G., Palacio, G., Ortíz - Pérez, M., & Castillo - González, M. (2005). Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. In F. Bautista & G. Palacio (Eds.), *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales* (pp. 33–58). Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Bautista Zúñiga, F., Palacio Aponte, A. G., Mendoza Vega, J., Kú Quej, V. M., Pool Novelo, L., & Cantarell Jiménez, W. (2010). Suelos. In G. J. Villalobos-Zapata & J. Mendoza-Vega (Eds.), *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. (p. 730). Campeche, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur.
- Benedet, L., Dobrochinski, J. P. F., Walstra, D. J. R., Klein, A. H. F., & Ranasinghe, R. (2016). A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project. *Coastal Engineering*, 112, 69–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.02.005>

- Bird, E. C. F. (1993). *Submerging coasts : the effects of a rising sea level on coastal environments*. (J. Wiley, Ed.) (Coastal mo). Chichester.
- Bird, E. C. F. (1996). *Beach management*. Chichester, New York: John Wiley.
- Bitton, M. C. A., & Hesp, P. A. (2013). Vegetation dynamics on eroding to accreting beach-foredune systems, Florida panhandle. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(12), 1472–1480. <https://doi.org/10.1002/esp.3436>
- Bocconi, P. (2000). *Wave mechanics of ocean engineering* (volumen 64). Amsterdam: Elsevier Science.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Boruff, B. J., Emrich, C., & Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *Journal of Coastal Research (JCR)*, 2005(215), 932–943. Retrieved from <https://doi.org/10.2112/04-0172.1>
- Boruvka, L., Valla, M., Donatova, H., & Nemecek, K. (2002). Vulnerability of soil aggregates in relation to soil properties. (F. A. O. of the UN, Ed.).
- Bray, M. J., Carter, D. J., & Hooke, J. M. (1995). Littoral Cell Definition and Budgets for Central Southern England. *Journal of Coastal Research*, 11(2), 381–400. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4298347>
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability , Risk and Adaptation : A Conceptual Framework* (No. 38). Tyndal Centre for Climate Change Research.
- Bruun, P., Gerritsen, F., & Morgan, W. H. (1957). Florida Coastal Problems. In *Coastal Engineering Proceedings 1(6)* (pp. 463–509). <https://doi.org/https://doi.org/10.9753/icce.v6.26>
- Bryan, B., Harvey, N., Belperio, T., & Bourman, B. (2001). Distributed process modeling for regional assessment of coastal vulnerability to sea-level rise. *Environmental Modeling & Assessment*, 6(1), 57–65. <https://doi.org/10.1023/A:1011515213106>
- Butterlin, S., & Bonnet, F. (1963). Mapas Geológicos de la Península de Yucatán. In R. Orellana (Ed.), *El Clima de la Península de Yucatán: presente, pasado y futuro*. (pp. 9–10). México: Bol. AM.P.G. Vo. X nos.
- Caldas, M. A., Pissarra, C. T., Costa, C. R., Neto, C. F., Zanata, M., Parahyba, D. R., ... Pacheco, A. F. (2018). Flood Vulnerability, Environmental Land Use Conflicts, and Conservation of Soil and Water: A Study in the Batatais SP Municipality, Brazil. *Water*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101357>
- Carter, R. W. G. (1988a). *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. San Diego, CA: Academic Press Limited.
- Carter, R. W. G. (1988b). *Coastal Environments - An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines* (First). San Diego, CA: Academic Press Limited.
- Casco Montoya, R. (2004). La Zona Costera de México: Definición. In E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos-Zapata, I. Azuz Adeath, & F. Rosado May (Eds.), *El Manejo Costero en México* (pp. 1–

- 4). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- CEPAL. (2012). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Vulnerabilidad y Exposición*. Santiago de Chile: Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. Retrieved from www.cepal.org/ddsah
- Cinner, J. E., Huchery, C., Darling, E. S., Humphries, A. T., Graham, N. A. J., Hicks, C. C., ... McClanahan, T. R. (2013). Evaluating Social and Ecological Vulnerability of Coral Reef Fisheries to Climate Change. *PLOS ONE*, 8(9), e74321. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074321>
- Clark, J. R. (1995). *Coastal zone management handbook*. CRC Press.
- CM-IPCC. (1991). IPCC Common Methodology (CM). In IPCC Response Strategies Working Group Rijkswaterstaat (Ed.), *Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup*. The Hague. Retrieved from www.ipcc.ch
- Coburn, A. S. (2001). *Reducing the vulnerability of North Carolina's coastal communities: a model approach for identifying, mapping and mitigating coastal hazards. NCEM Report*.
- CONAGUA. (2015). *Programa Hídrico Regional 2014 - 2018 de la Península de Yucatán*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2017). Subdirección General Técnica.
- CONAGUA. (2018). *Atlas del Agua en México (2018th ed.)*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cooper, J. A. G., & McKenna, J. (2008). Social justice in coastal erosion management: The temporal and spatial dimensions. *Geoforum*, 39(1), 294–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.06.007>
- Crowell, M., & Leatherman, S. (1999). Coastal erosion mapping and management. *Journal of Coastal Research*, 28, 2–9.
- Cruz Ramírez, C. (2016a). *Evaluación de la vulnerabilidad en las costas mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cruz Ramírez, C. (2016b). *Evaluación de la vulnerabilidad en las costas mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529–539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Dall'Osso, F., & Dominey-Hoes, D. (2013). *Coastal Vulnerability to Multiple Inundation Sources - COVERMAR project*. Sidney Coastal Councils Group Inc. Retrieved from http://www.sydneycostalcouncils.com.au/sites/default/files/covermar_hazard_assessment_report.pdf
- Das, D., & Agarwal, R. (2002). Physical properties of soil. In *FUNDAMENTAL OF SOIL SCIENCE* (pp. 75–

- 77). New Delhi: Indian Society of Soil Science, IARI.
- Davis, R. (2017). Sediments of the Gulf of Mexico. In H. C. Ward (Ed.), *Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill* (pp. 165–215). Houston, TX, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, Rice University. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8>
- Dawson, R. J., Dickson, M. E., Nicholls, R. J., Hall, J. W., Walkden, M. J. A., Stansby, P. K., ... Watkinson, A. R. (2009). Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Climatic Change*, *95*(1), 249–288. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9532-8>
- De Serio, F., Armenio, E., Mossa, M., & Petrillo, F. A. (2018). How to Define Priorities in Coastal Vulnerability Assessment. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110415>
- Delft3D-Flow. (2011). Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual,. The Netherlands: Deltares.
- Deltares. (2014). *Delft3D - WAVE, User Manual* (3.05.34160). The Netherlands.
- Deltares. (2015). *Xbeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities*. (D. Roelvink, A. van Dongeren, R. McCall, B. Hoonhout, A. van Rooijen, P. van Geer, ... E. Quataert, Eds.).
- Denner, K., Phillips, M. R., Jenkins, R. E., & Thomas, T. (2015). A coastal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales. *Ocean & Coastal Management*, *116*, 478–490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.09.002>
- Devoy, R. J. N. (1992). Questions of Coastal Protection and the Human Response to Sea-level Rise in Ireland and Britain. *Irish Geography*, *25*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/00750779209478736>
- Devoy, R. J. N. (2008). Coastal Vulnerability and the Implications of Sea-Level Rise for Ireland. *Journal of Coastal Research (JCR)*, *2008*(242), 325–342. Retrieved from <https://doi.org/10.2112/07A-0007.1>
- Dias, W. P. S., Yapa, H. D., & Peiris, L. M. N. (2009). Tsunami vulnerability functions from field surveys and Monte Carlo simulation. *Civil Engineering and Environmental Systems*, *26*(2), 181–194. <https://doi.org/10.1080/10286600802435918>
- Dietrich, W. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water Resources Res.*, *18*(6), 1615–1626.
- Diez, J. J., Esteban, M. D., & Paz, R. M. (2009). Cancun-Nizuc Coastal Barrier. *Journal of Coastal Research*, 57–68. <https://doi.org/10.2112/06-0822.1>
- Diez, P. G., Perillo, G. M. E., & Piccolo, M. C. (2007). Vulnerability to Sea-Level Rise on the Coast of the Buenos Aires Province. *Journal of Coastal Research*, *23*(1), 119–126. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4300410>
- Dilley, R. S., & Rasid, H. (1990). Human response to coastal erosion: Thunder Bay, Lake Superior. *Journal of Coastal Research*, *6*(4), 779–788.
- Domínguez, L., Anfuso, G., & Gracia, F. J. (2005). Vulnerability assessment of a retreating coast in

- SW Spain. *Environmental Geology*, 47(8), 1037–1044. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1235-0>
- Doukakis, E. (2005). Coastal vulnerability and risk parameters. *Eur. Water*, 11(12), 3–7.
- Downing, T. E., Parwardhan, A., Klein, R. J. T., Mukhala, E., Stephen, L., Winograd, M., & Ziervogel, G. (2005). Assessing Vulnerability for Climate Adaptation. In B. Lim, E. Spanger-Siegrfried, I. Burton, E. Malone, & S. Huq (Eds.), *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures* (pp. 61–90). Cambridge: Cambridge University Press.
- Draper, L. (1963). *Derivation of a Design Wave from instrumental records of Sea Waves*. London, England: Proc. of the Institute of Civil Engineers.
- Duch, J. (1988). *La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico*. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán.
- Eakin, H., & Luers, A. L. (2006). Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1), 365–394. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144352>
- Ehrenfeld, J. G. (1990). Dynamics and processes of barrier island vegetation. *Reviews in Aquatic Sciences*, (2), 437–480.
- El-Asmar, H. M. (2002). Short Term Coastal Changes along Damietta-Port Said Coast Northeast of the Nile Delta, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 18(3), 433–441. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4299092>
- Escudero, M., Mendoza, E., Silva-Casarín, R., & Villatoro, M. (2014). Comparative risk assessment at Isla del Carmen and Cancun, Mexico. In *Coastal Engineering Proceedings 34*. <https://doi.org/https://doi.org/10.9753/icce.v34.management.10>.
- Ezeaku, P. I. (2013). Evaluating the Spatial Variability of Soils of Similar Lithology under Different Land Uses and Degradation Risks in a Guinea Savanna Agro-Ecology of Nigeria. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 5(5), 21–31. <https://doi.org/10.9790/2380-0552131>
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5, 3794. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- French, P. W. (1997). *Coastal and estuarine management* (Routledge). New York. <https://doi.org/10.4324/9780203437278>
- French, P. W. (2001). *Coastal defences: processes, problems and solutions*. Routledge, London.
- Furukawa, K., Wolanski, E., & Mueller, H. (1997). Currents and Sediment Transport in Mangrove Forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 301–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0120>
- Füssel, H.-M. (2007). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change

- research. *Global Environmental Change*, 17(2), 155–167.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., & Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7–29. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). (2018). Retrieved from <http://www.gebco.net>
- Gibbs, R., Matthews, M., & Link, D. (1971). Reply to a discussion of use and presentation of janke empirical formula for the settling velocity of spheres. *J. Sediment. Petrol.*, 41, 1146–1147.
- Gilard, O. (2016). Vulnerability and Risk. In *Climate Change and Agriculture Worldwide* (pp. 19–29). Nueva York, USA: Springer.
- Goda, Y. (1979). *A review on statistical interpretation of wave data* 18(1).
- Gornitz, V. (1990). Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 9(9), 201–237.
- Gornitz, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), 379–398.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O)
- Gornitz, V. M., Beaty, T. W., & Daniels, R. C. (1997). A coastal hazard database for US West Coast. Oak Ridge. Tennessee: Environmental Science Division, U.S. Department of Energy.
- Gornitz, V. M., Daniels, R. C., White, T. W., & Birdwell, K. R. (1994). The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research*, 12(12), 327–338.
- Gornitz, V. M., White, T. W., & Cushman, R. M. (1991). Vulnerability of the U.S. to future sea level rise. In *Proceedings of the Seventh Symposium on Coastal and Ocean Management* (pp. 2354–2368). Long Beach, CA, United States. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/5875484>
- Gutierrez, B. T., Williams, S. J., & Thieler, E. R. (2009). Basic approach for shoreline change projections. In J. G. Titus, K. E. Anderson, D. R. Cahoon, D. B. Gesch, S. K. Gill, B. T. Gutierrez, ... S. J. Williams (Eds.), *Coastal Sensitivity to Sea - Level Rise: A Focus on the Mid - Atlantic Region. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. (pp. 239–242). Washington D. C.: Environmental Protection Agency.
- Handayani, W., Rudiarto, I., Setyono, J. S., Chigbu, U. E., & Sukmawati, A. M. (2017). Vulnerability assessment: A comparison of three different city sizes in the coastal area of Central Java, Indonesia. *Advances in Climate Change Research*, 8(4), 286–296.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.11.002>
- Harvey, N., & Woodroffe, C. D. (2008). Australian approaches to coastal vulnerability assessment. *Sustainability Science*, 3(1), 67–87. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0041-5>
- Hegde, A. V., & Akshaya, B. J. (2015). Shoreline Transformation Study of Karnataka Coast: Geospatial Approach. *Aquatic Procedia*, 4, 151–156.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.021>
-

- Hegde, A. V., & Reju, V. R. (2007). Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India. *Journal of Coastal Research*, 23(5), 1106–1111. <https://doi.org/10.2112/04-0259.1>
- Hinkel, J., & Klein, R. J. T. (2006). Integrating Knowledge for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change. In L. McFadden, R. J. Nicholls, & E. C. Penning-Rowsell (Eds.), *Managing Coastal Vulnerability: An Integrated Approach* (pp. 61–77). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Hinkel, J., & Klein, R. J. T. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19(3), 384–395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.03.002>
- Holgben, N. (1990). Long term wave statistics. In B. LéMehuaté & D. Hanes (Eds.), *Ocean Engineering Science* (pp. 293–334). US: John Wiley and Sons.
- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. USA: cAMBRIDGE uNIVERSITY pRESS.
- Holthuijsen, L., Booij, N., & Ris, R. (1993). A spectral wave model for the coastal zone. In *Proceedings of 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans* (pp. 630–641). New Orleans.
- Huang, J.-C., Poor, P. J., & Zhao, M. Q. (2007). Economic Valuation of Beach Erosion Control. *Marine Resource Economics*, 22(3), 221–238. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42629556>
- Hulscher, S. J. M. H. (1996). Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C9), 20727–20744. <https://doi.org/10.1029/96JC01662>
- INEGI. (2010). INEGI. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/default.html>
- INEGI. (2015a). INEGI. Retrieved from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/poblacion/>
- INEGI. (2015b). No Title. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/default.html>
- IPCC. (2012). No Title. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 582.
- IPCC. (2014). Climate change 2014. In L. A. Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer (Ed.), *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (p. 151). Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (1996). Climate change 1995: the science of climate change. *Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press Meira Cambridge,, UK.
- Jacob, J. S. (2010). Urbanización resiliente - Primera respuesta al cambio climático en las costas del Golfo de México. *Impactos Del Cambio Climático Sobre La Zona Costera*, 67–60.
- Jana, A., & Bhattacharya, A. K. (2013). Assessment of Coastal Erosion Vulnerability around Midnapur-Balasore Coast, Eastern India using Integrated Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(3), 675–686.

<https://doi.org/10.1007/s12524-012-0251-2>

- Jáuregui, E. (1975). Los sistemas de tiempo en el Golfo de México y su vecindad en México. *Boletín Del Instituto de Geografía*1, 6, 14.
- Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, H., & Rodríguez-Revelo, N. (2014). Usos de las dunas y situación actual. In M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, H. Infante Mata, & N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico General de las Dunas Costeras de México* (p. 350). México: CONAFOR.
- Juárez León, A., & Torres, J. (2008). Identificación en Planta de Formas Costeras de Depósito, mediante el uso de percepción remota aeroespacial. *Noticias AMIP*, 4(15), 10–16.
- Kantamaneni, K., Rani, N. N. V. S., Rice, L., Sur, K., Thayaparan, M., Kulatunga, U., ... Campos, L. C. (2019). A systematic review of coastal vulnerability assessment studies along Andhra Pradesh, India: A critical evaluation of data gathering, risk levels and mitigation strategies. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020393>
- Kennedy, E. V., Perry, C. T., Halloran, P. R., Iglesias-Prieto, R., Schönberg, C. H. L., Wisshak, M., ... Mumby, P. J. (2013). Avoiding Coral Reef Functional Collapse Requires Local and Global Action. *Current Biology*, 23(10), 912–918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.020>
- Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M. S., & Khelfani, D. (2016). Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean and Coastal Management*, 132, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.010>
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511628955>
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing Fragility Functions for Tsunami Damage Estimation Using Numerical Model and Post-Tsunami Data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), 243–273. <https://doi.org/10.1142/S0578563409002004>
- Krauss, K. W., Doyle, T. W., Doyle, T. J., Swarzenski, C. M., From, A. S., Day, R. H., & Conner, W. H. (2009). Water level observations in mangrove swamps during two hurricanes in Florida. *Wetlands*, 29(1), 142. <https://doi.org/10.1672/07-232.1>
- Kuc Castilla, Á. G. (2015). *Caracterización Hidrodinámica de la Laguna de Términos, Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche.
- Kumar, A. A., & Kunte, P. D. (2012). Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, 64(1), 853–872. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0276-4>
- Kumar, A., Narayana, A. C., & Jayappa, K. S. (2010). Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west coast of India: A remote sensing and statistics-based approach. *Geomorphology*, 120(3), 133–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.023>
- Kumpulainen, S. (2006). Vulnerability Concepts in Risk Assessment. *Special Paper of the Geological*

- Survey of Finland*, (42), 65–74. Retrieved from http://arkisto.gsf.fi/sp/SP42/4_vulnera.pdf
- Kunte, P. D. (1994). Potential Usage of Remote Sensing Data in Studying the Behaviour of Shore Drift Along Kerala Coast, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38(6), 613–624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1042>
- Kunte, P. D., Jauhari, N., Mehrotra, U., Kotha, M., Hursthouse, A. S., & Gagnon, A. S. (2014). Multi-hazards coastal vulnerability assessment of Goa, India, using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 95, 264–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.024>
- Lara-Lara, J. R., Arreola-Lizárraga, J. A., Calderon-Aguilera, L. E., Camacho-Ibar, V. F., de la Lanza-Espino, G., Escofet-Giansone, A., ... Zertuche-González, J. A. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. In *Capital natural de México. Vol. 1. conocimiento actual de la biodiversidad* (Vol. 1, pp. 109–134). MEXICO: CONABIO. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432002000200006>
- Lesser, J. M., & Weidie, A. E. (1988). Region 25, Yucatan Peninsula. In *The Geology of North America* (pp. 237–241). The Geological Society of America.
- Liverman, D. M. (1990). Vulnerability to global environmental change. In R. E. Kasperson, K. Dow, D. Golding, & J. X. Kasperson (Eds.), *Understanding Global Environmental Change: The contribution of risk analysis and management* (pp. 27–44). Worcester, MA: The Earth Transformed Program, Clark University. Retrieved from <http://www.environment.arizona.edu/files/env/profiles/liverman/liverman-1990-kasperson-et-al.pdf>
- López, E. (1973). Estudio Geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de La Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1–3), 23–73.
- López Rosas, H., Moreno - Casasola, P., Infante Mata, H., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Martínez, M. L., ... Monroy, R. (2014). Campeche. In M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante Mata, N. Rodríguez Revelo, & J. C. Cruz González (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México* (pp. 169–180). CONAFOR.
- López Royo, M., Ranasinghe, R., & Jiménez, J. A. (2016). A Rapid, Low-Cost Approach to Coastal Vulnerability Assessment at a National Level. *Journal of Coastal Research*, 932–945. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00217.1>
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00054-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00054-2)
- Lugo-Hubb, J., Aceves Quesada, J. F., & Espinaza - Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista Del Instituto de Geología*, 9(2), 143–150.
- Lugo-Hubb, J., & García-Arizaga, M. T. (1999). Mapa de geomorfología de la Península de Yucatán, Escala 1:1 200 000. In G. de Fuentes & C. Y. Ordóñez (Eds.), *Atlas de procesos territoriales de Yucatán.*, Fac. Arq. / Univ. Aut. Yucatán, UADY-PROEESA.
- Luo, S., Cai, F., Liu, H., Lei, G., Qi, H., & Su, X. (2015). Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People’s Republic of China. *Ocean & Coastal Management*, 103, 134–

145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.08.008>
- Machain-Castillo. (1999). Composición y distribución de los sedimentos en la Sonda de Campeche y sureste de México. In D. Robadue, A. Oczkowski, R. Calderón, L. Bach, & M. Cepeda (Eds.), *Managing freshwater inflows to estuaries. Characterization of the region of the Terminos Lagoon: Campeche, Mexico*. Plus Draft 1 site profile. Draft for discussion.
- Mackay, R. C. (2017). Importance of coastal vegetation.
- Mahapatra, M., Ramakrishnan, R., & Rajawat, A. S. (2015). Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India. *Natural Hazards*, 76(1), 139–159. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1491-y>
- Mani Murali, R., Ankita, M., Amrita, S., & Vethamony, P. (2013). Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13(12), 3291–3311. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3291-2013>
- Mani Murali, R., Vethamony, P., Saran, A. K., & Jayakumar, S. (2006). Change detection studies in coastal zone features of Goa, India by remote sensing. *Current Science*, 91(6), 816–820.
- Martínez-Graña, A. M., Boski, T., Goy, J. L., Zazo, C., & Dabrio, C. J. (2016). Coastal-flood risk management in central Algarve: Vulnerability and flood risk indices (South Portugal). *Ecological Indicators*, 71, 302–316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.021>
- Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., García-Franco, J. G., Moctezuma, C., & Jiménez, C. D. (2006). Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation*, 33(2), 109–117. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0376892906002876>
- Martínez, M. L., Maun, M. A., & Psuty, N. P. (2004). The Fragility and Conservation of the World's Coastal Dunes: Geomorphological, Ecological and Socioeconomic Perspectives. In M. L. Martínez & N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes: Ecology and Conservation* (pp. 355–369). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_21
- McFadden, L., Penning - Rowsell, E., & Nicholls, R. J. (2007). Setting the Parameters: A Framework for Developing Cross - Cutting Perspectives of Vulnerability for Coastal Zone Management. In L. McFadden, R. J. Nicholls, & E. Penning - Rowsell (Eds.), *Managing Coastal Vulnerability* (p. 262). Oxford, UK: Elsevier.
- McIvor, A. L., Spencer, T., Moller, I., & Spalding, M. (2012). *Storm Surge Reduction by Mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report 2*. Cambridge, UK.
- McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. A. G. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, (36), 487–497. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.487>
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Tunstall, S., Veen, A. Van Der, Tapsell, S., ... Haase, D. (2007). Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, 189.
- Metzger, M. J., Leemans, R., & Schröter, D. (2005). A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(4), 253–267.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.06.011>

- Middelmann-Fernandes, M. H. (2010). Flood damage estimation beyond stage–damage functions: an Australian example. *Journal of Flood Risk Management*, 3(1), 88–96. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01058.x>
- Miladan, N., Ariani, F., Pertiwi, S. N. I., Setiawan, R., & Handayani, K. N. (2019). Land Use Vulnerability towards the Flood Risk in Surakarta City. *MATEC Web Conf.*, 280. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928001011>
- Miller, T. E. (2015). Effects of disturbance on vegetation by sand accretion and erosion across coastal dune habitats on a barrier island. *AoB PLANTS*, 7. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv003>
- Mokrech, M., Nicholls, R. J., Richards, J. A., Henriques, C., Holman, I. P., & Shackley, S. (2008). Regional impact assessment of flooding under future climate and socio-economic scenarios for East Anglia and North West England. *Climatic Change*, 90(1), 31–55. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9449-2>
- Moreno-Casasola, P. (1986). Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Vegetatio*, 65(2), 67–76. <https://doi.org/10.1007/BF00044876>
- Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa Rojas, E., & Travieso-Bello, A. C. (2006). *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal*. Xalapa, Ver. México: Instituto de Ecología A.C., Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015076188278> (v.1)
- Mu, E., & Pereyra-Rojas, M. (2017). *Practical Decision Making. An Introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) Using Super Decision v2*. Springer Brief in operations research. Switzerland: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33861-3>
- Muehe, D. (2010). Brazilian coastal vulnerability to climate change. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2), 1–11.
- Murali, M. R., Ankita, M., Amrita, S., & Vethamony, P. (2013). Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13(12), 3291–3311. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3291-2013>
- Nageswara Rao, K., Subraelu, P., Venkateswara Rao, T., Hema Malini, B., Ratheesh, R., Bhattacharya, S., ... Ajai. (2008). Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast, India through remote sensing and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 12(4), 195–207. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0042-2>
- Nguyen, T. (2015). Coastal vulnerability assessment: a case study in Kien Giang, western part of the Mekong River Delta in Vietnam. *Thesis Collection 1954-2016*, 393. Retrieved from <http://ro.uow.edu.au/theses/4382>
- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Woodroffe, C. D., & Hay, J. (2008). Climate change and coastal vulnerability assessment: Scenarios for integrated assessment. *Sustainable Science*, 3, 89–102. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0050-4>
- Nielsen, A. F., Lord, D. B., & Poulos, H. G. (1992). Dune Stability Considerations for Building Foundations. *Engineers Australia*, CE3(2).
- Nordstorm, K., Psuty, N., & Carter, R. W. G. (1990). *Coastal dunes: Form and process*. (J. Wiley, Ed.),

Earth Surface Processes and Landforms (Vol. 17). Chichester, New York: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/esp.3290170209>

- Núñez Gómez, J. C., Ramos Reyes, R., Barba Macías, E., Espinoza Tenorio, A., & Gama Campillo, L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México . *Investigaciones Geográficas* . scielomx .
- O’Brien, K., & Leichenko, R. (2001). The Dynamics of Vulnerability to Global Change. *Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*, pp. 10–11. Retrieved from <http://www.ihdp.unu.edu/docs/Publications/Secretariat/Update-Dimensions/Update-2-2001.pdf>
- Onwudike, S. U. (2015). Effect of land use types on vulnerability potential and degradation rate of soils of similar Lithology in a tropical soil of Owerri, Southeastern Nigeria. *International Journal of Soil Science*, 10(4), 177–185. <https://doi.org/10.3923/ijss.2015.177.185>
- Oropeza-Orozco, O., Sommer-Cervantes, I., Carlos-Gómez, J., Preciado-López, J. C., Ortiz-Pérez, M. A., & Lopez-Portillo, J. (2011). Assessment of Vulnerability and Integrated Management of Coastal Dunes in Veracruz, Mexico. *Coastal Management*, 39(5), 492–514. <https://doi.org/10.1080/08920753.2011.598817>
- Ortiz Pérez, M. A. (1992). Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche-Tabasco. *Investigaciones Geográficas*. scielomx.
- Ozturk, D., & Sesli, F. A. (2015). Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series. *Ocean & Coastal Management*, 118, 290–308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009>
- Özyurt, G., & Ergin, A. (2010). Improving Coastal Vulnerability Assessments to Sea-Level Rise: A New Indicator-Based Methodology for Decision Makers. *Journal of Coastal Research (JCR)*, 2010(262), 265–274. Retrieved from <https://doi.org/10.2112/08-1055.1>
- Palacio-Aponte, A. G., Medina-Media, V., & Bautista, F. (2005). Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. In F. Bautista & G. Palacio (Eds.), *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales* (p. 282). Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Pantusa, D., D’Alessandro, F., Riefolo, L., Principato, F., & Tomasicchio, R. G. (2018). Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. *Water* . <https://doi.org/10.3390/w10091218>
- Papathoma, M. (2003). *Assessing Tsunami Vulnerability Using GIS with Special Reference to Greece*. Coventry University.
- Patanakanog, B. (2001). *Landslide hazard potential area in 3 dimension by remote sensing and GIS technique*. Thailand: Land Development Department.
- Pendleton, E. A., Theiler, E. R., & Williams, S. J. (2004). Coastal vulnerability assessment of Cape Hatteras National Seashore (CAHA) to sea-level rise. *Open-File Report.U.S.Geological Survey 2004 - 1064*, 20. <https://doi.org/http://pubs.usgs.gov/of/2004/1064/images/pdf/caha.pdf>
- Pendleton, E. A., Thieler, E. R., & Jeffress Williams, S. (2004). *Coastal vulnerability assessment of*

- Cumberland Island National Seashore (CUIS) to sea-level rise. Open-File Report.* Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20041196>
- Pendleton, E. A., Thieler, E. R., & Williams, S. J. (2005). *Coastal vulnerability assessment of Channel Islands National Park (CHIS) to sea-level rise* (Online onl). *Open-File Report.* <https://doi.org/10.3133/ofr20051057>
- Penning-Rowsell, E. C., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., ... Green, C. (2003). *The Benefits of flood and coastal defence: techniques and data for 2003*. Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- Perry, E., Marín, L., McClain, J., & Velázquez, G. (1995). Ring of cenotes (Sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology*, 23(1), 17–20.
- Pistrika, A. K., & Jonkman, S. N. (2010). Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Natural Hazards*, 54(2), 413–434. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9476-y>
- Poompavai, V., & Ramalingam, M. (2013). Geospatial Analysis for Coastal Risk Assessment to Cyclones. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(1), 157–176. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0198-8>
- Posada Vanegas, G., Vega Serratos, B. E., & Silva-Casarín, R. (Eds.). (2013). *Peligros Naturales en el estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil*. Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM - Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED.
- Powers, M. C. (1953). A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *SEPM Journal of Sedimentary Research*. <https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Duarte Santos, F., Laihonon, P., Marinova, N., & Santini, M. (2011). *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Background Paper*. Copenhagen, DK.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M., ... Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Technical Paper 1/2011. European Environment Agency. *European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation*, 1–93. Retrieved from <http://www.oannes.org.pe/upload/201204171418031650971105.pdf>
- Ramírez Vargas, D. (2015). *Modelación de escenarios en las zonas inundables ante la construcción de un desvío carretero en la Ciudad de Champotón, Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche.
- Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Ranwell, D. S., & Rosalind, B. (1986). *Coastal dune management guide*. Abbots Ripton, Huntingdon: Institute of Terrestrial Ecology. Retrieved from <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/5233/>
- Rasch, R. J. (2015). Assessing urban vulnerability to flood hazard in Brazilian municipalities. *Environment and Urbanization*, 28(1), 145–168. <https://doi.org/10.1177/0956247815620961>

- Rebolledo Vieyra, M. V. (2010). Hidrología. In G. J. Villalobos-Zapata & J. Mendoza-Vega (Eds.), *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. (p. 730). Campeche, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El colegio de la Frontera Sur.
- Rendón-von Osten, J., Vargas, G., Benítez, J., Memije, M., & Acevedo, V. (2008). Fuentes de abastecimiento y cuerpos de agua del estado de Campeche. *Jaina Boletín Informativo*, 19(1), 48–53.
- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7667–7681. <https://doi.org/10.1029/1998JC900123>
- Rivas, V., & Cendrero, A. (1994). Human Influence in a Low-Hazard Coastal Area: An Approach to Risk Assessment and Proposal of Mitigation Strategies. *Journal of Coastal Research*, (ArticleType: research-article / Issue Title: Special Issue No. 12. COASTAL HAZARDS: PERCEPTION, SUSCEPTIBILITY AND MITIGATION / Full publication date: 1994 / Copyright © 1994 Coastal Education & Research Foundation, Inc.), 289–298. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25735605>
- Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2012). Incorporating estuaries as a source or sink of sediment within assessments of coastline risk and adaptation to climate change. In *21st NSW Coastal Conference* (pp. 1–16). Australia: ACS.
- Romieu, E., Welle, T., Schneiderbauer, S., Pelling, M., & Vinchon, C. (2010). Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications. *Sustainability Science*, 5(2), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11625-010-0112-2>
- Ruíz Martínez, G. (2009). *Determinación del Estado Morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Russell, J. (2003). *The on-line Risk and Vulnerability Assessment Tool*.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L., & Tran, L. T. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7), 962–975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.022>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, projection, and forecasting : applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Samsuddin, M., & Suchindan, G. K. (1987). Beach Erosion and Accretion in Relation to Seasonal Longshore Current Variation in the Northern Kerala Coast, India. *Journal of Coastal Research*, 3(1), 55–62. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4297248>
- Sankari, T. S., Chandramouli, A. R., Gokul, K., Surya, S. S. M., & Saravanel, J. (2015). Coastal Vulnerability Mapping Using Geospatial Technologies in Cuddalore-Pichavaram Coastal Tract,

- Tamil Nadu, India. *Aquatic Procedia*, 4, 412–418. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.055>
- Saxena, S., Geethalakshmi, V., & Lakshmanan, A. (2013). Development of habitation vulnerability assessment framework for coastal hazards: Cuddalore coast in Tamil Nadu, India—A case study. *Weather and Climate Extremes*, 2, 48–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.10.001>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. (2011). *Anuario estadístico estatal 2011, Sector Comunicaciones y Transportes. SCT - DGP*.
- Seingier, G., Espejel, I., & Almad, J. L. F. (2009). Cobertura vegetal y marginación en a costa mexicana. *Investigación Ambiental: Ciencia y Política Pública*, 1(1), 54–69.
- Semeoshenkova, V., Newton, A., Rojas, M., Piccolo, M. C., Bustos, M. L., Huamantincio Cisneros, M. A., & Berninsone, L. G. (2017). A combined DPSIR and SAF approach for the adaptive management of beach erosion in Monte Hermoso and Pehuen Co (Argentina). *Ocean & Coastal Management*, 143, 63–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.04.015>
- Shanganlall, A., Ferentinou, M., Karymbalis, E., & Smith, A. (2019). A Coastal Susceptibility Index Assessment of KwaZulu-Natal, East Coast of South Africa BT - IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 5. In A. Shakoor & K. Cato (Eds.) (pp. 93–100). Cham: Springer International Publishing.
- Sharma, L. P., Patel, N., Debnath, P., & Ghose, M. K. (2012). Assessing landslide vulnerability from soil characteristics—a GIS-based analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(4), 789–796. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0272-5>
- Shaw, J., Taylor, R. B., Forbes, D. L., Ruz, M. H., & Solomon, S. (1998). Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, (505), 1–79. <https://doi.org/10.1029/2007JA012726>
- Shepard, C. C., Crain, C. M., & Beck, M. W. (2011). The Protective Role of Coastal Marshes: A Systematic Review and Meta-analysis. *PLOS ONE*, 6(11), e27374. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027374>
- Sheppard, C., Dixon, D. J., Gourlay, M., Sheppard, A., & Payet, R. (2005). Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2), 223–234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.02.016>
- Shih, S.-M., & Komar, P. D. (1994). Sediments, Beach Morphology and Sea Cliff Erosion within an Oregon Coast Littoral Cell. *Journal of Coastal Research*, 10(1), 144–157. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4298199>
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del olaje* (volumen 49). México: Docencia. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Silva, R. (2007). *Caracterización morfodinámica y evaluación de alternativas para la recuperación de las playas de la zona norte de Quintana Roo. México. Proyecto Fondo Mixto Conacyt - Gobierno de Quintana Roo, QROO - 2003 - C02 - 12707*. D.F.
- Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., ... Govaere, G. (2014).

- Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, 1–16. <https://doi.org/10.2112/SI71-001.1>
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 64, 1042–1049.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/doi:10.1680/doms.25844>
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., & Beck, M. W. (2014). The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 90, 50–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007>
- Spalding, M., McIvor, A., Tonneijck, F. H., Tol, S., & van Eijk, O. (2014). *Mangroves for coastal defense. Guidelines for coastal managers & policy makers*. Wetlands International and The Nature Conservancy.
- Stallins, J. A., & Parker, A. J. (2003). The Influence of Complex Systems Interactions on Barrier Island Dune Vegetation Pattern and Process. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), 13–29. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93102>
- Su, S., Pi, J., Wan, C., Li, H., Xiao, R., & Li, B. (2015). Categorizing social vulnerability patterns in Chinese coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 116, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.026>
- Suleman, M. S., N’ Jai, A., Green, C. H., & Penning-Rowsell, E. C. (1988). *Potential Flood Damage Data: A Major Update (nicknamed the Update Report)*. London.
- Sulis, A., & Annis, A. (2014). Morphological response of a sandy shoreline to a natural obstacle at Sa Mesa Longa Beach, Italy. *Coastal Engineering*, 84, 10–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.014>
- Szlafsztein, C., & Sterr, H. (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 11(1), 53–66. <https://doi.org/10.1007/s11852-007-0003-6>
- Tate, E. (2013). Uncertainty Analysis for a Social Vulnerability Index. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(3), 526–543. <https://doi.org/10.1080/00045608.2012.700616>
- Thieler, E., & Hammer - Klose, E. (2008). *National assessment of coastal vulnerability to sea level rise: preliminary results for the U.S. Atlanta coast*. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/>
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (1999). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-593*. Woods Hole, Massachusetts. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/>
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (2000). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-178*. Woods Hole, Massachusetts. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/2000/of00-178/>

- Thieler, E. R., & Hammer - Klose, E. S. (1999). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea - level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast*. Woods Hole, Massachusetts. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4095/210075>
- Thieler, E. R., & Hammer - Klose, E. S. (2000). *National Assessment of Coastal vulnerability to Sea Level Rise: preliminary results for the US Gulf of Mexico coast*.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. Open-File Report*. Reston. Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>
- Thompson, D. M., Plant, N. G., & Hansen, M. E. (2015). *Analysis of bathymetric surveys to identify coastal vulnerabilities at Cape Canaveral, Florida. Open-File Report*. Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20151180>
- Tibbetts, J. R., & van Proosdij, D. (2013). Development of a relative coastal vulnerability index in a macro-tidal environment for climate change adaptation. *Journal of Coastal Conservation*, 17(4), 775–797. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0277-9>
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society. Environmental Monograph No. 1*. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies. University of Toronto. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2006.11.030>
- Tolman, H. L. (1997). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15 NOAA/NWS/NCEP/O MB Technical Note 151.
- Tolman, H. L. (1999). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166.
- Tolman, H. L. (2009). User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/CEP/MMAB Technical Note 276.
- Torresan, S., Critto, A., Dalla Valle, M., Harvey, N., & Marcomini, A. (2008). Assessing coastal vulnerability to climate change: comparing segmentation at global and regional scales. *Sustainability Science*, 3(1), 45–65. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0045-1>
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., & Marcomini, A. (2012). Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12(7), 2347–2368. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2347-2012>
- Trowbridge, J. H. (1995). A mechanism for the formation and maintenance of shore-oblique sand ridges on storm-dominated shelves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C8), 16071–16086. <https://doi.org/10.1029/95JC01589>
- Uittenbogaard, R. E., van Kester, J. A., & Stelling, G. S. (1992). *Implementation of three turbulence models in 3D - TRISULA for rectangular grids. Report Z81*. The Netherlands.
- Valderrama-Landeros, L. H., Martell-Dubois, R., Ressler, R., Silva-Casarín, R., Cruz-Ramírez, C. J., & Muñoz-Pérez, J. J. (2019). Dynamics of coastline changes in Mexico. *Journal of Geographical Sciences*, 29(10), 1637–1654. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1679-x>
- Valdmann, A., Kurennoy, D., & Soomere, T. (2008). Marine coastal hazards for the eastern coasts of the Baltic Sea. *Baltica*, 21(1), 3–12.

- Vega Serratos, B. E., Posada Vanegas, G., Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Martínez Reyes, A. A., Ramírez Vargas, D., ... Ruíz Martínez, G. (2013). Inundaciones por Desbordamiento de Ríos. In G. Posada Vanegas, B. Vega Serratos, & R. Silva Casarín (Eds.), *Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil*. (p. 202). Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM - Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED.
- Villasuso Pino, M. J., & Méndez - Ramos, R. (2000). *Modelo Conceptual del acuífero de la Península de Yucatán. Proyecto Población - Desarrollo - Medio ambiente*. Yucatán, México.
- von Storch, H., & Woth, K. (2008). Storm surges: perspectives and options. *Sustainability Science*, 3(1), 33–43. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0044-2>
- WAMDIG. (1988). The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775–1810. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2)
- Warner, J. C., List, J. H., Schwab, W. C., Voulgaris, G., Armstrong, B., & Marshall, N. (2014). Inner-shelf circulation and sediment dynamics on a series of shoreface-connected ridges offshore of Fire Island, NY. *Ocean Dynamics*, 64(12), 1767–1781. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0781-y>
- White, G. F. (1974). *Natural hazards, local, national, global*. London: Oxford University Press. Retrieved from <file://catalog.hathitrust.org/Record/000026825>
- Wielgus, J., Cooper, E.; Torres, R. y B. L. (2010). *Capital Costero : República Dominicana Estudios de caso sobre el valor económico de los ecosistemas costeros en la República Dominicana. Documento de Trabajo*. Washington D. C.: World Resources Institute. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/handle/minam/1798>
- Wilson, E. (1980). Physical Geography of the Yucatan Peninsula. In E. H. Museley & E. D. Terry (Eds.), *Yucatan: A World Apart*. USA: University of Alabama Press.
- Wolanski, E. (2007). Coastal protection in the aftermath of the Indian ocean tsunami: what role for forests and trees? *Proceedings of an FAO Regional Technical Workshop, Khao Lak, Thailand, 28-31 August 2006*, 157–179.
- Wolner, C. W. V, Moore, L. J., Young, D. R., Brantley, S. T., Bissett, S. N., & McBride, R. A. (2013). Ecomorphodynamic feedbacks and barrier island response to disturbance: Insights from the Virginia Barrier Islands, Mid-Atlantic Bight, USA. *Geomorphology*, 199, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.035>
- WRB, I. W. G. (2006). *World reference base for soil resource. World Soil Resources Reports No. 103*. Rome.
- Yáñez-Arancibia & Day, J. (1982). Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine system in the Gulf of Mexico. *Oceanologica Acta*, 5 (suppl.)(December 2015), 431–400.
- Yañez - Arancibia, A., Lara - Domínguez, A., Chavance, P., & Flores Hernández, D. (1988). Comportamiento ambiental de la Laguna de Términos. In A. Yáñez-Arancibia & W. Day (Eds.), *Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos* (pp. 27–40). México, D.F.: Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coas. Ecol. Inst. LSU. Editorial Universitaria.

- Yin, J., Yin, Z., Wang, J., & Xu, S. (2012). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *Journal of Coastal Conservation*, 16(1), 123–133. <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0180-9>
- Yoo, G., Hwang, J. H., & Choi, C. (2011). Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 54(7), 524–534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.04.001>
- Yoo, G., Kim, A. R., & Hadi, S. (2014). A methodology to assess environmental vulnerability in a coastal city: Application to Jakarta, Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, 102, 169–177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.018>
- Zhang, K., Liu, H., Li, Y., Xu, H., Shen, J., Rhome, J., & Smith, T. J. (2012). The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102–103, 11–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.021>

ANEXO I. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL CAMSIZER

TRATAMIENTO PREVIO AL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Previamente al análisis granulométrico se requiere secar la muestra de sedimento, ya que la humedad provoca adherencia de los granos del sedimento. El secado debe realizarse en condiciones controladas ya que una alta temperatura muy alta provocaría que el sedimento se cemente.

PROCESO DE SECADO

Se retiró la humedad de la muestra de sedimento empleando un horno Barnstead International (BI), modelo 3512, 120 volts, Amp. 6.6, 800 watts y 50/60 Hz. La muestra se depositó en una cápsula de porcelana y se calentó en la estufa por 12 horas a 60°C.



Figura 1. Horno empleado para el secado de muestras.

MUESTRA A ANALIZAR

Después del secado de la muestra, se pesaron 100 gr en una balanza OHAUS, Adventurer - Pro, modelo AV8101 con calibración interna y sensibilidad de 0.01 g, con una capacidad máxima de 8100 g.



Figura 2. Balanza empleada para el peso de la muestra a analizar.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO UTILIZANDO EL CAMSIZER

Para el análisis granulométrico de la muestra de sedimento se empleó el equipo CAMSIZER Restsch Technology.

El CAMSIZER es un equipo que emplea el análisis dinámico de imágenes para medir simultáneamente la distribución granulométrica, la forma de las partículas y otros parámetros; los sedimentos pasan entre la fuente de luz y las cámaras del equipo. Las sombras proyectadas por las partículas son ópticamente registradas, digitalizadas y procesadas, los resultados se envían al equipo de cómputo al que se encuentra conectado.



Figura 3. Equipo CAMSIZER, empleado para medir la distribución granulométrica.

El proceso se encuentra automatizado y permite medir un rango de 30 μm a 3.0 mm, los resultados obtenidos son comparables con los realizados a través del análisis por tamizado.

Para el análisis de las muestras se debe verter la muestra de sedimento (100 g) a través de una tolva de acero inoxidable que cae a un canal de alimentación; esta acción permite que las partículas se separen. Posteriormente las partículas se desplazan a través del canal de alimentación por efecto de la vibración que genera el equipo, y caen pasando por unas placas deflectoras que permiten que las partículas caigan sin turbulencia en el área de enfoque de cámaras.

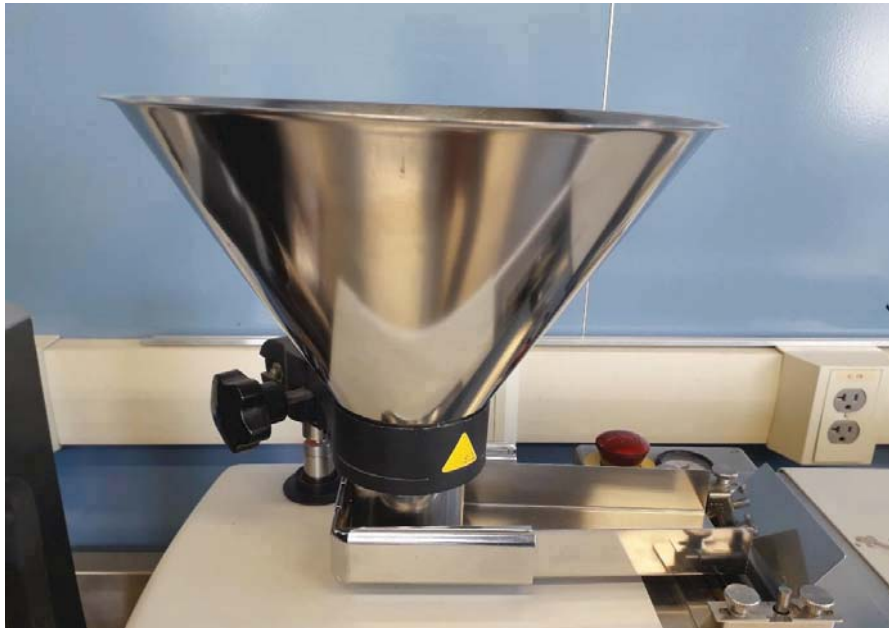


Figura 4. Tolva de acero inoxidable y canal de alimentación.

En el área de medición dos cámaras digitales (CCD) se reparten el registro de partículas: la cámara base (CCB) registra las partículas grandes, y la cámara zoom (CCD – Z) las partículas finas. Lo que permite mediante el software propio del equipo, obtener las curvas de distribución granulométrica en tiempo real. De esta forma se obtienen los diámetros representativos D_n así como el porcentaje (%) del material correspondiente a dicho diámetro.

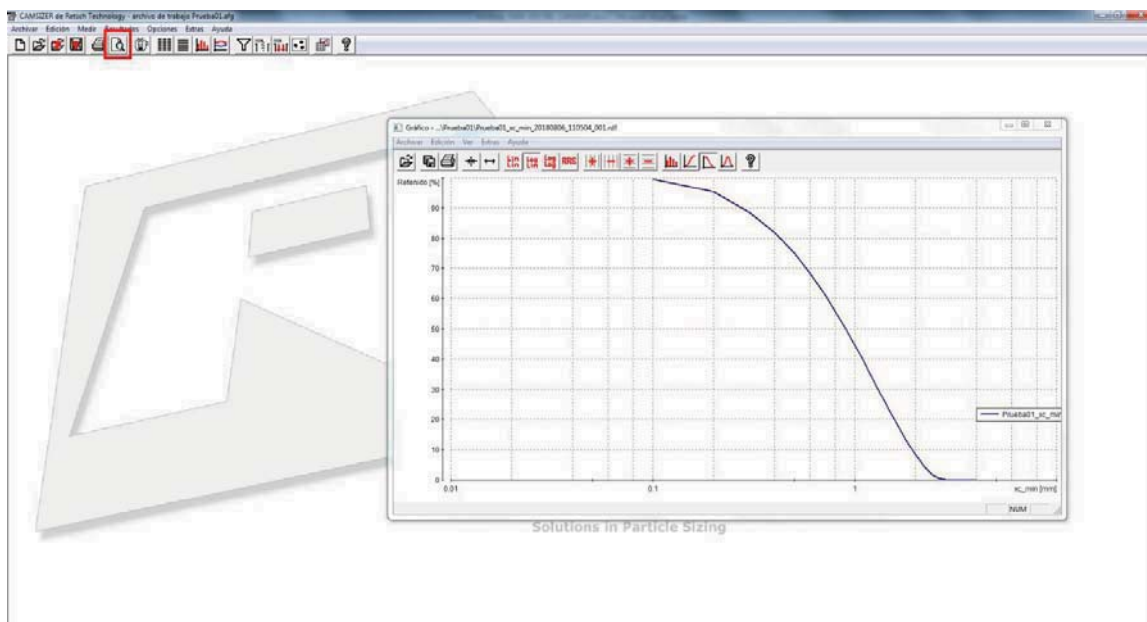
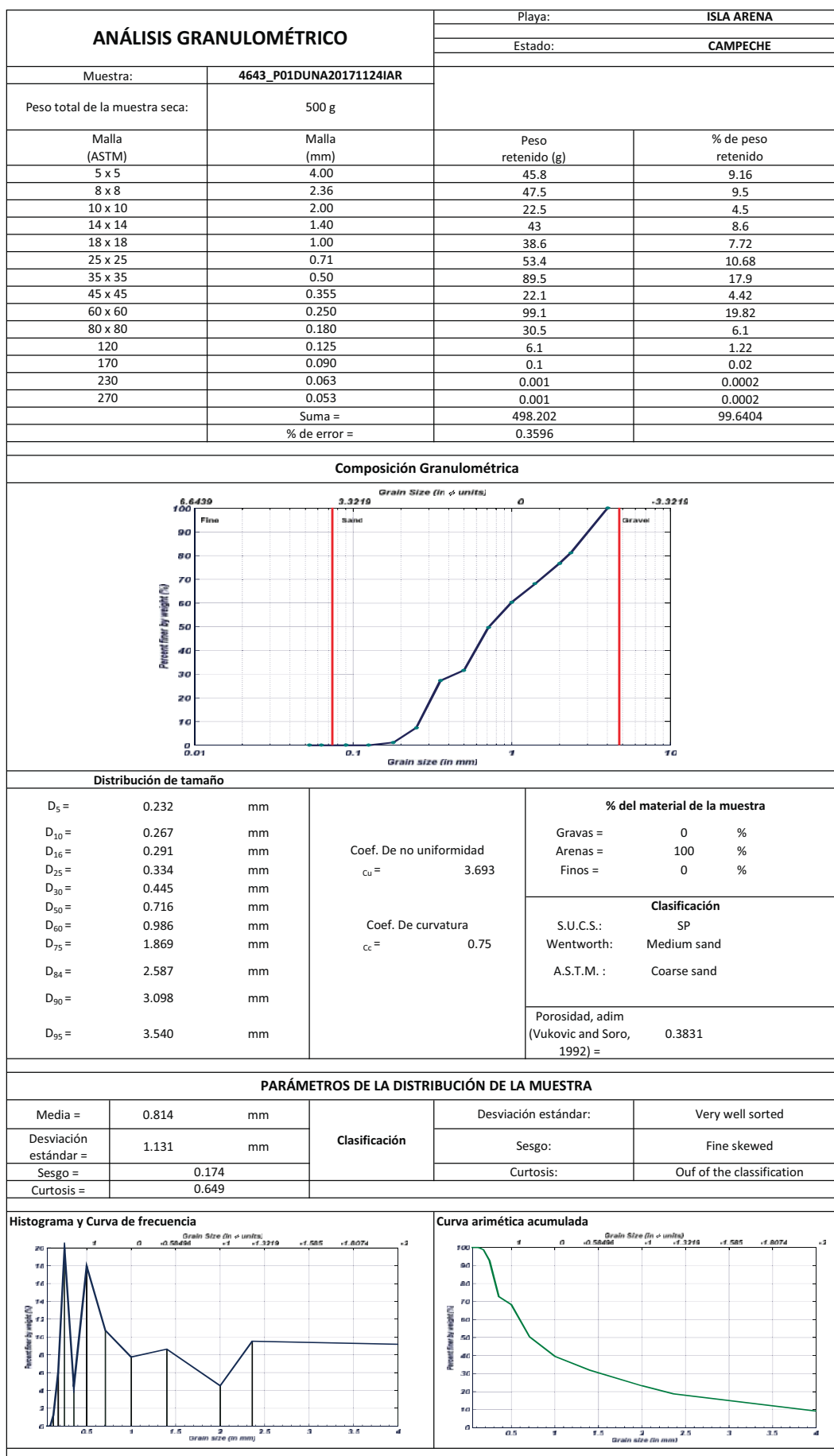


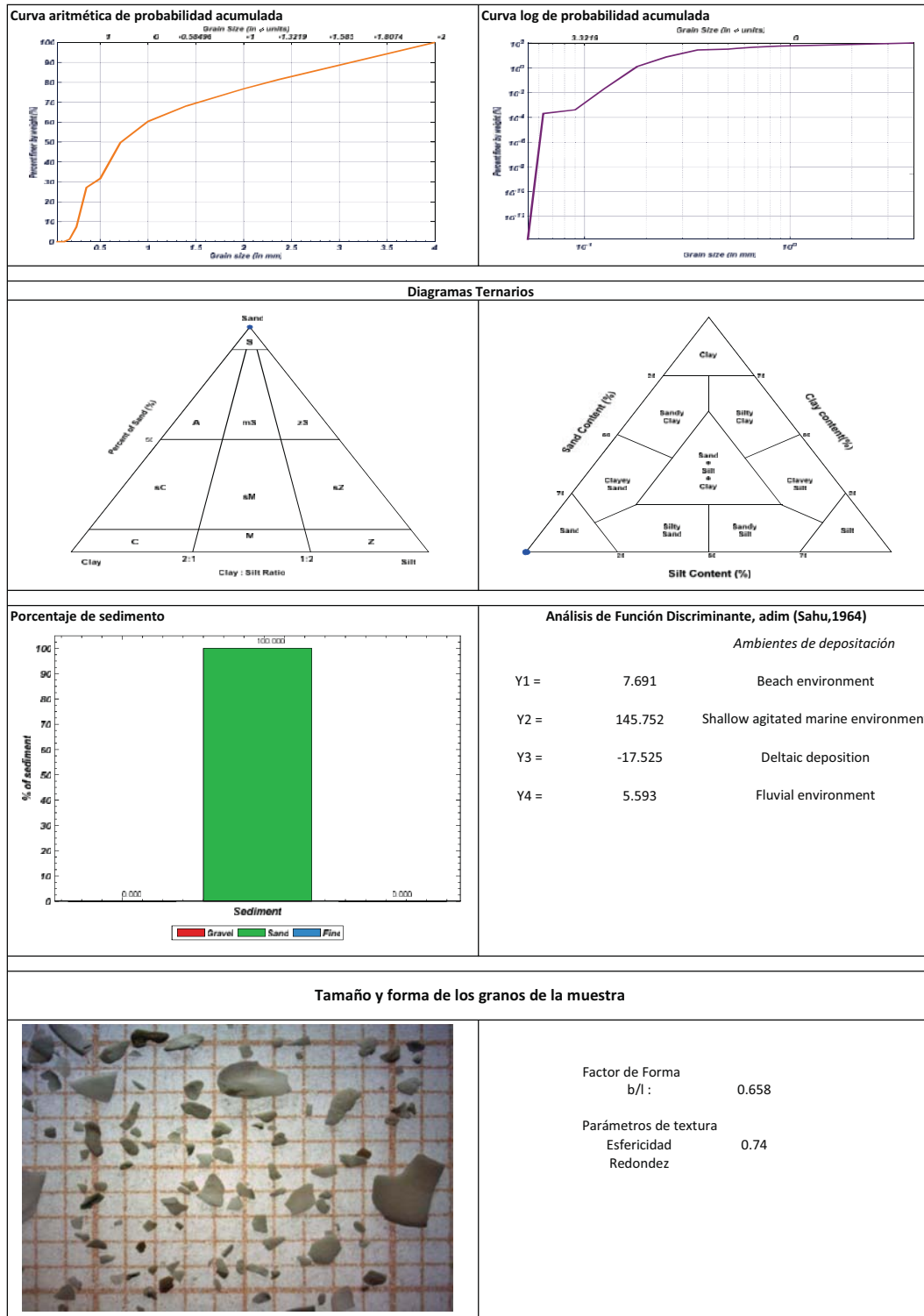
Figura 5. Curva de distribución obtenida mediante software del equipo.

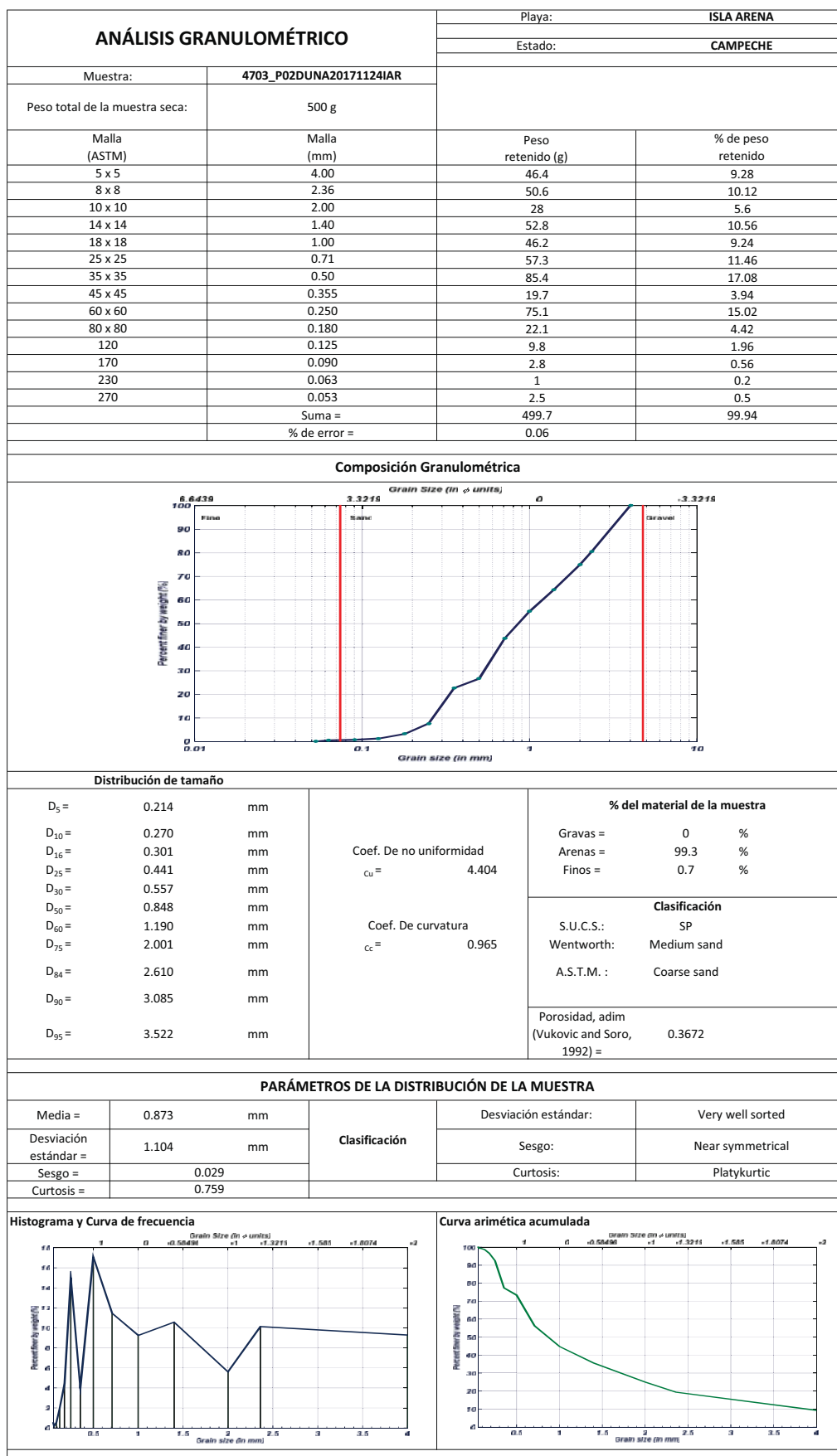
Así mismo se obtiene la redondez y esfericidad de las partículas que conforman la muestra.

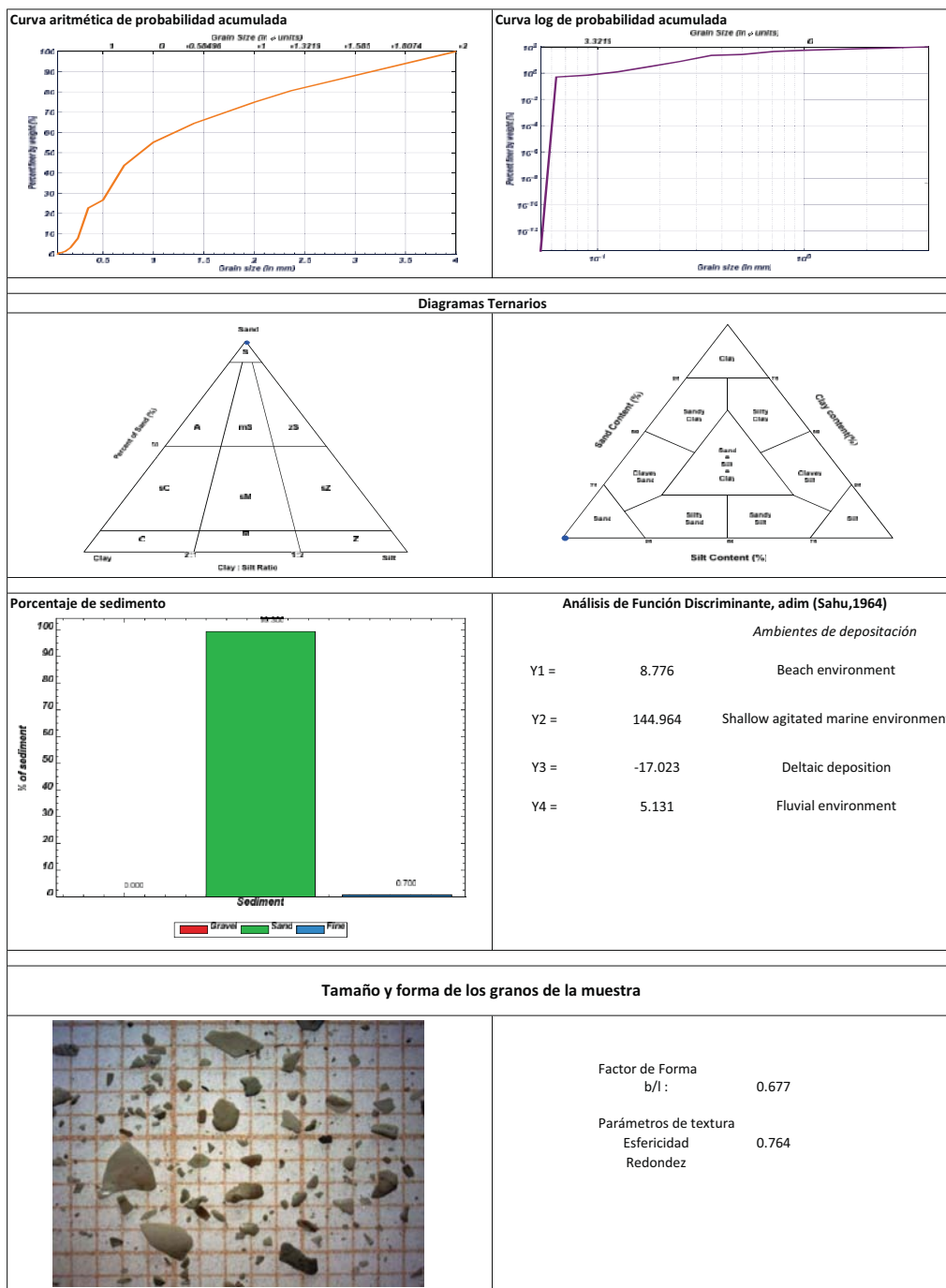
ANEXO II. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

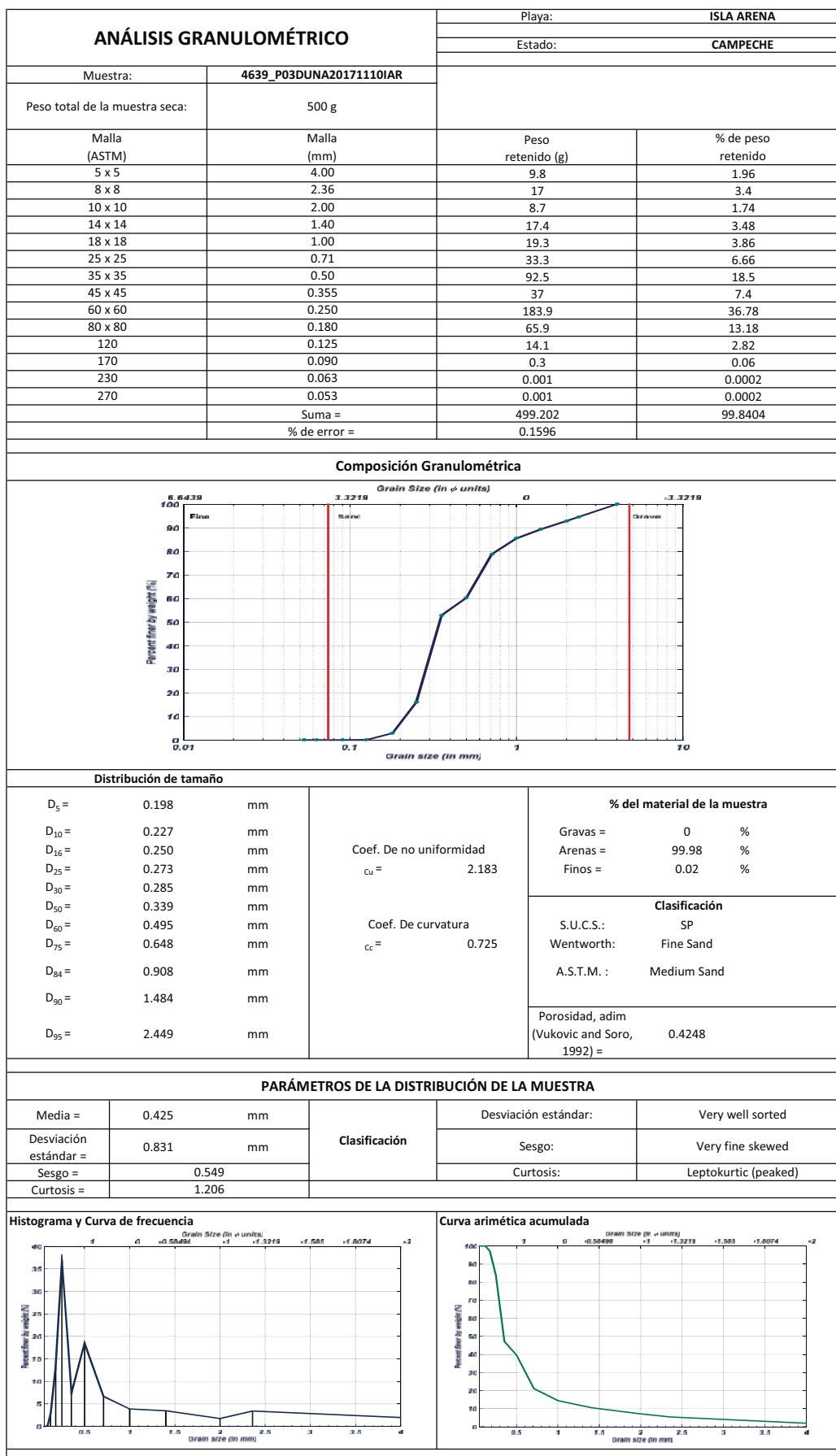
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

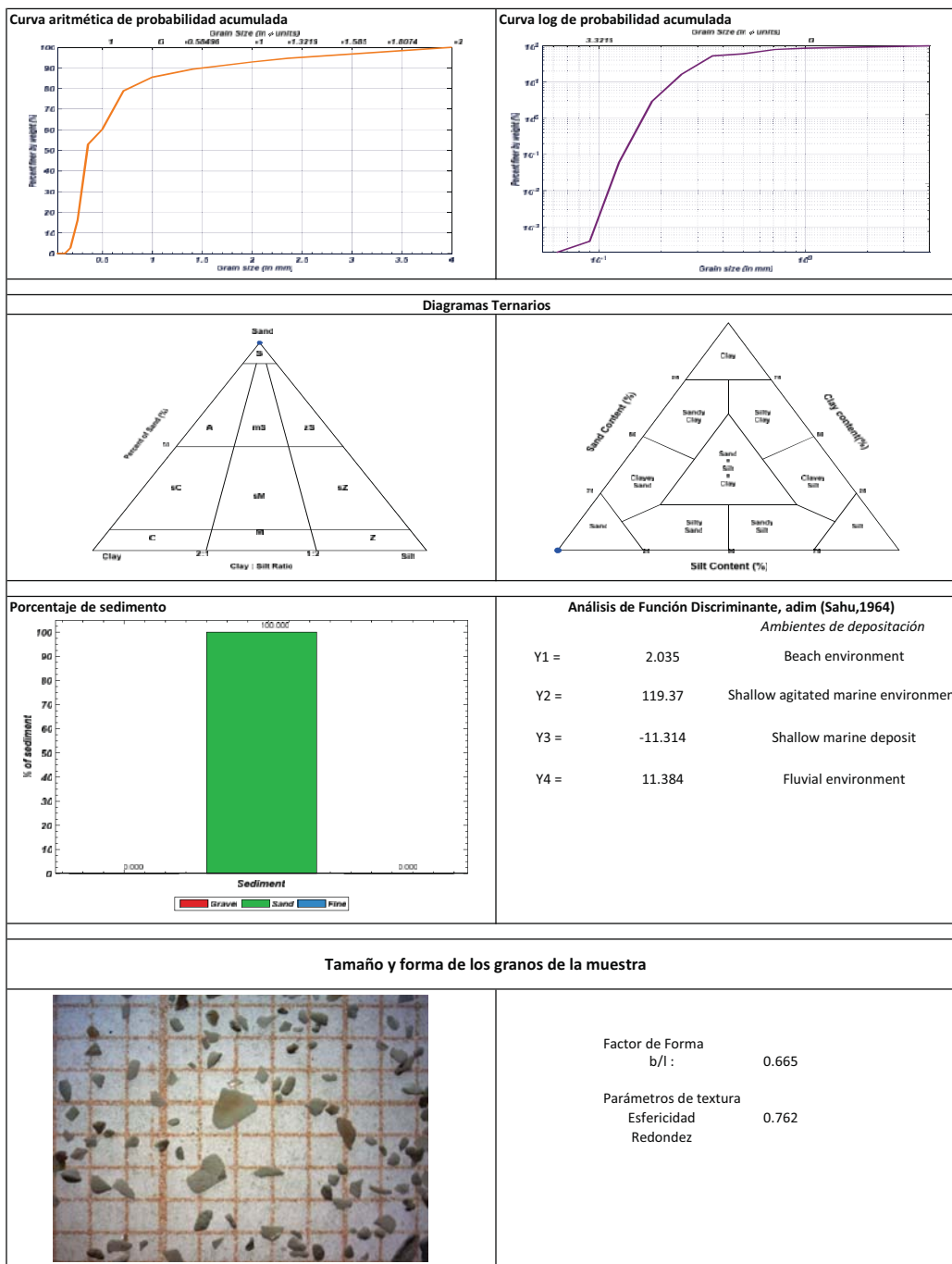


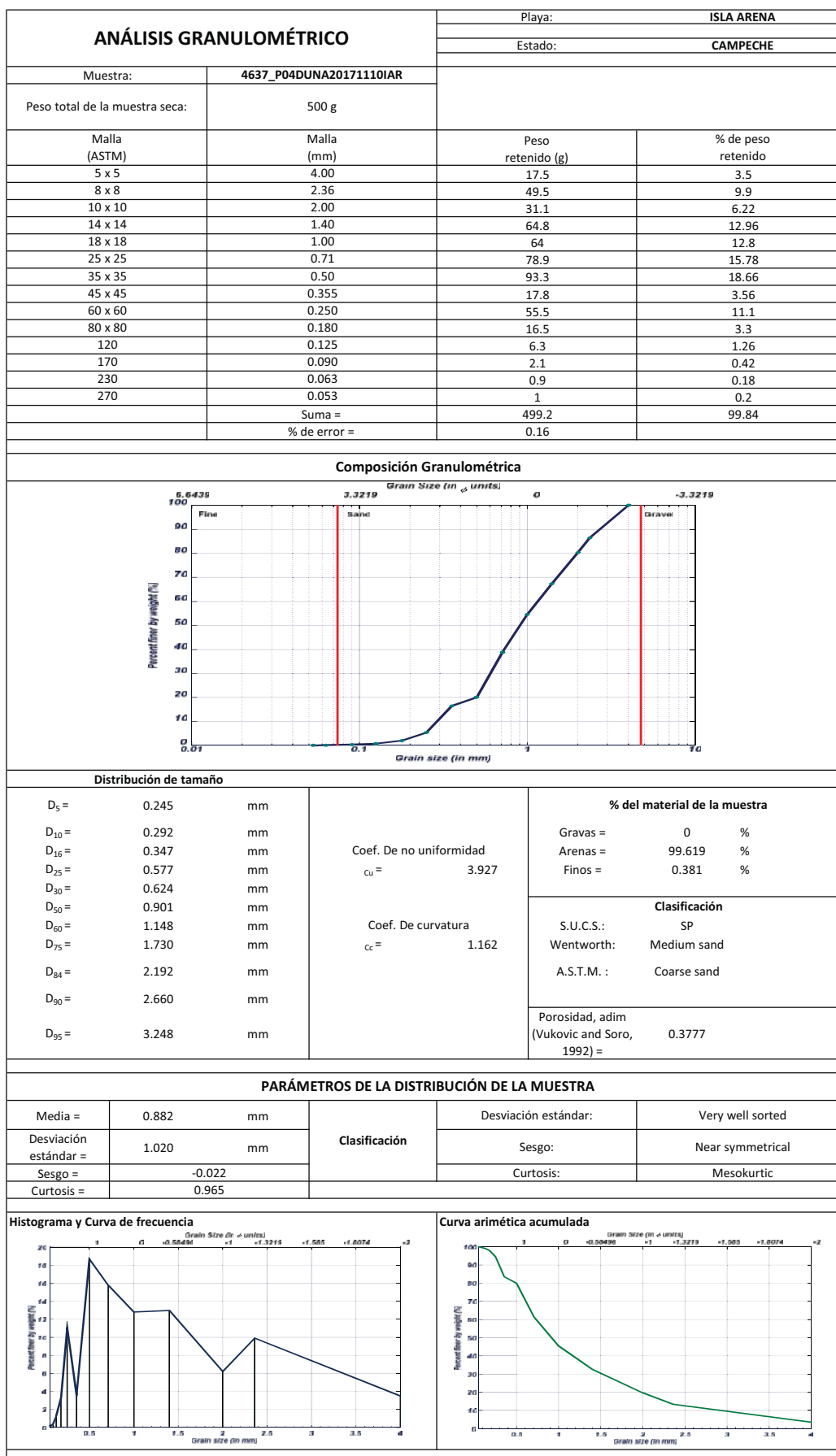


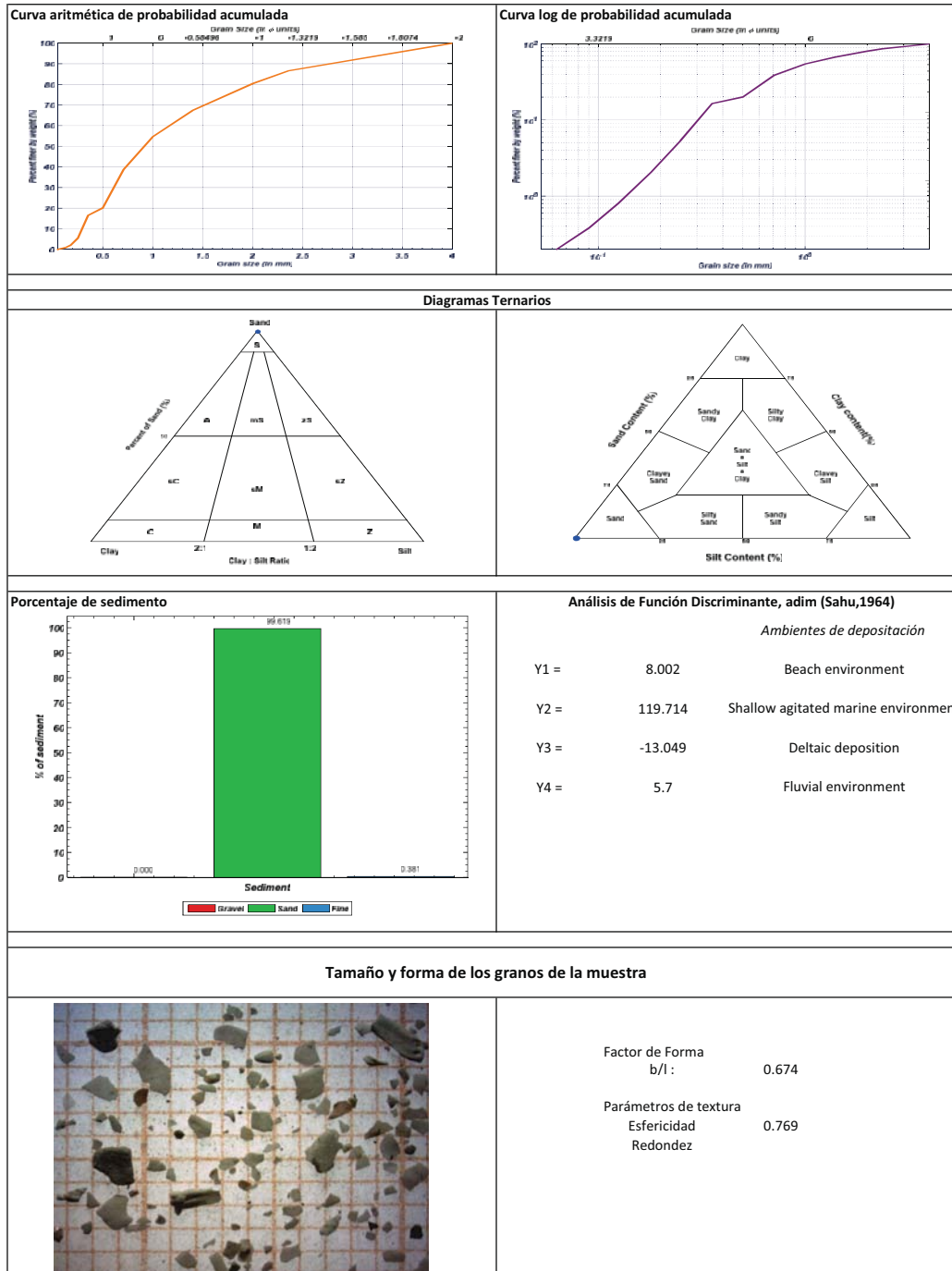


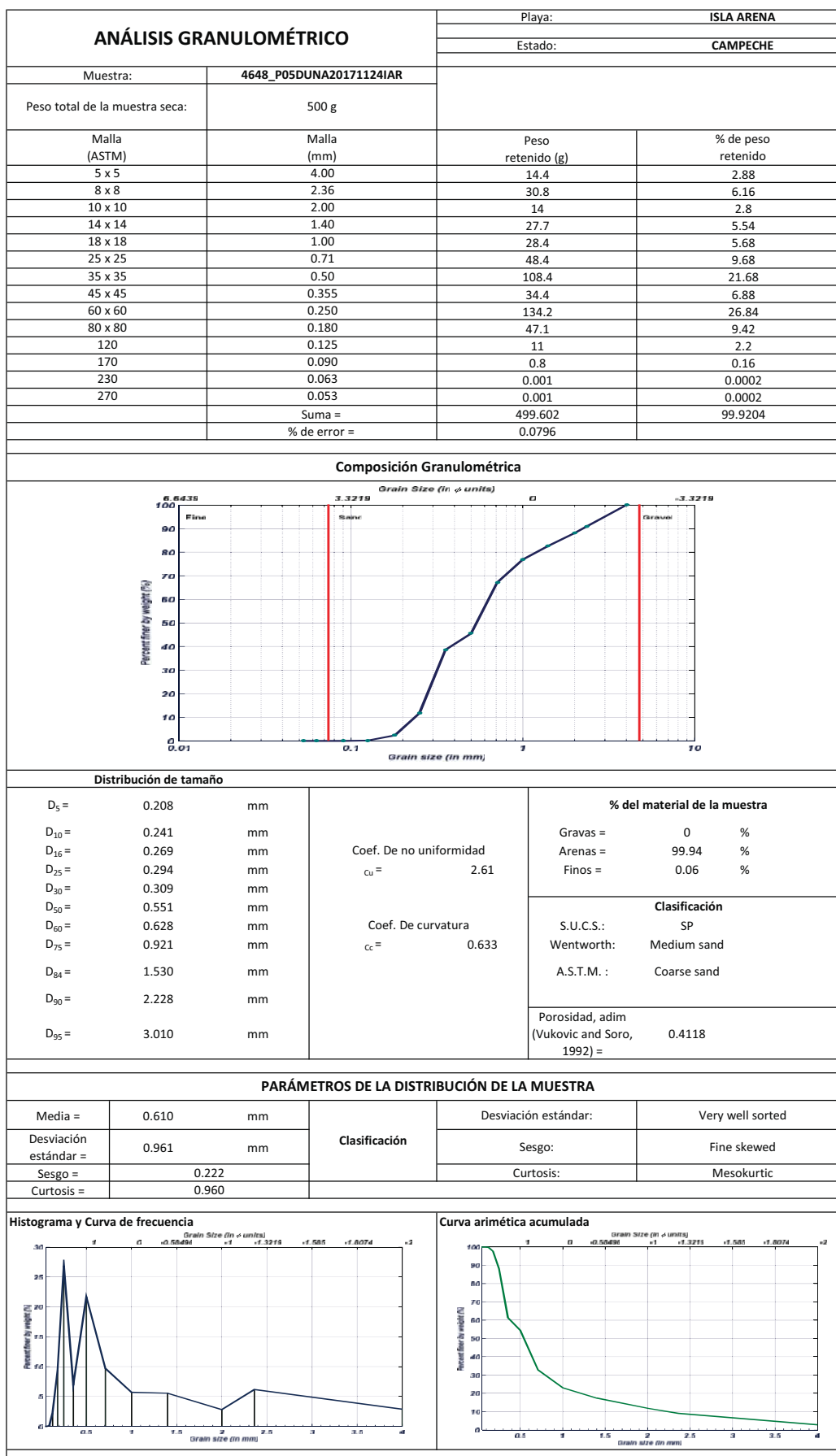


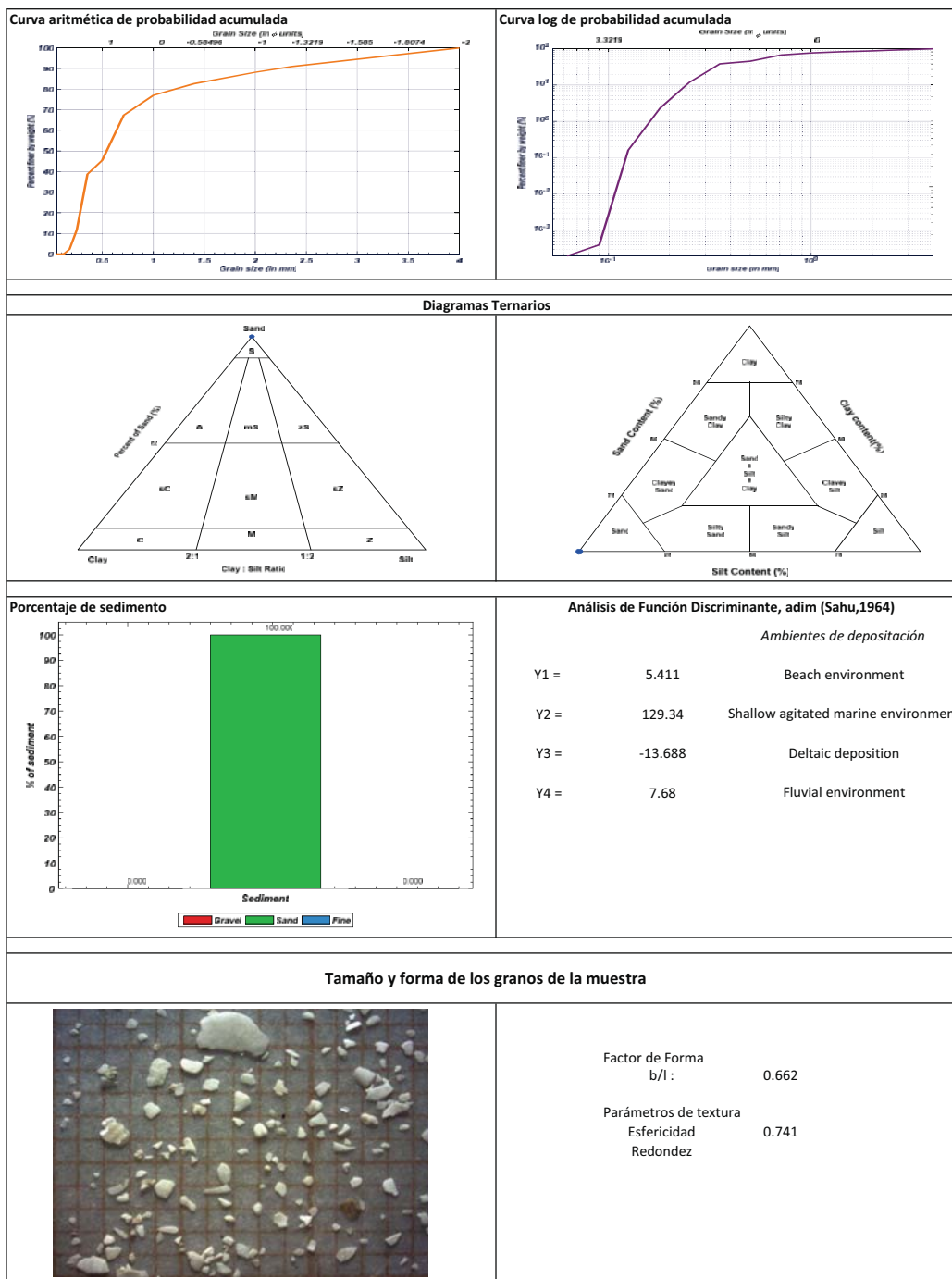






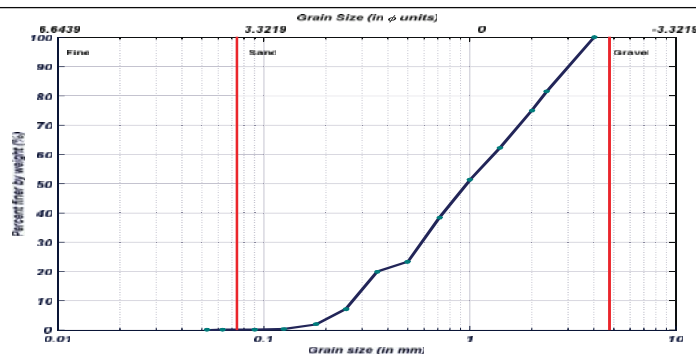






ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		Playa: ISLA ARENA	
		Estado: CAMPECHE	
Muestra:	4671_P06DUNA20171124IAR		
Peso total de la muestra seca:	500 g		
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso retenido
5 x 5	4.00	30.4	6.08
8 x 8	2.36	61.8	12.36
10 x 10	2.00	32.2	6.44
14 x 14	1.40	63.7	12.74
18 x 18	1.00	54.7	10.94
25 x 25	0.71	64.4	12.88
35 x 35	0.50	74.9	14.98
45 x 45	0.355	16.8	3.36
60 x 60	0.250	63.6	12.72
80 x 80	0.180	26.3	5.26
120	0.125	8	1.6
170	0.090	0.8	0.16
230	0.063	0.2	0.04
270	0.053	0.7	0.14
	Suma =	498.5	99.7
	% de error =	0.3	

Composición Granulométrica



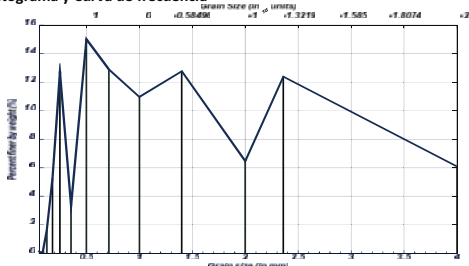
Distribución de tamaño

D ₅ =	0.227	mm	Coef. De no uniformidad $c_u = 4.789$	% del material de la muestra		
D ₁₀ =	0.273	mm		Gravas =	0	%
D ₁₆ =	0.310	mm		Arenas =	99.819	%
D ₂₅ =	0.535	mm		Finos =	0.181	%
D ₃₀ =	0.607	mm		Clasificación		
D ₅₀ =	0.965	mm		S.U.C.S.:	SP	
D ₆₀ =	1.308	mm		Wentworth:	Medium sand	
D ₇₅ =	1.998	mm		A.S.T.M.:	Coarse sand	
D ₈₄ =	2.532	mm		Porosidad, adim (Vukovic and Soro, 1992) =	0.3595	
D ₉₀ =	3.006	mm				
D ₉₅ =	3.469	mm				

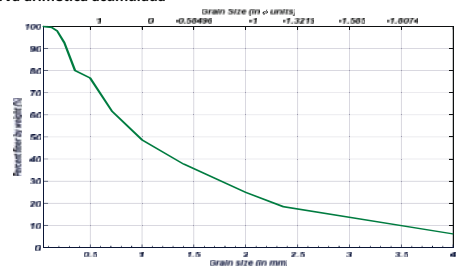
PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA

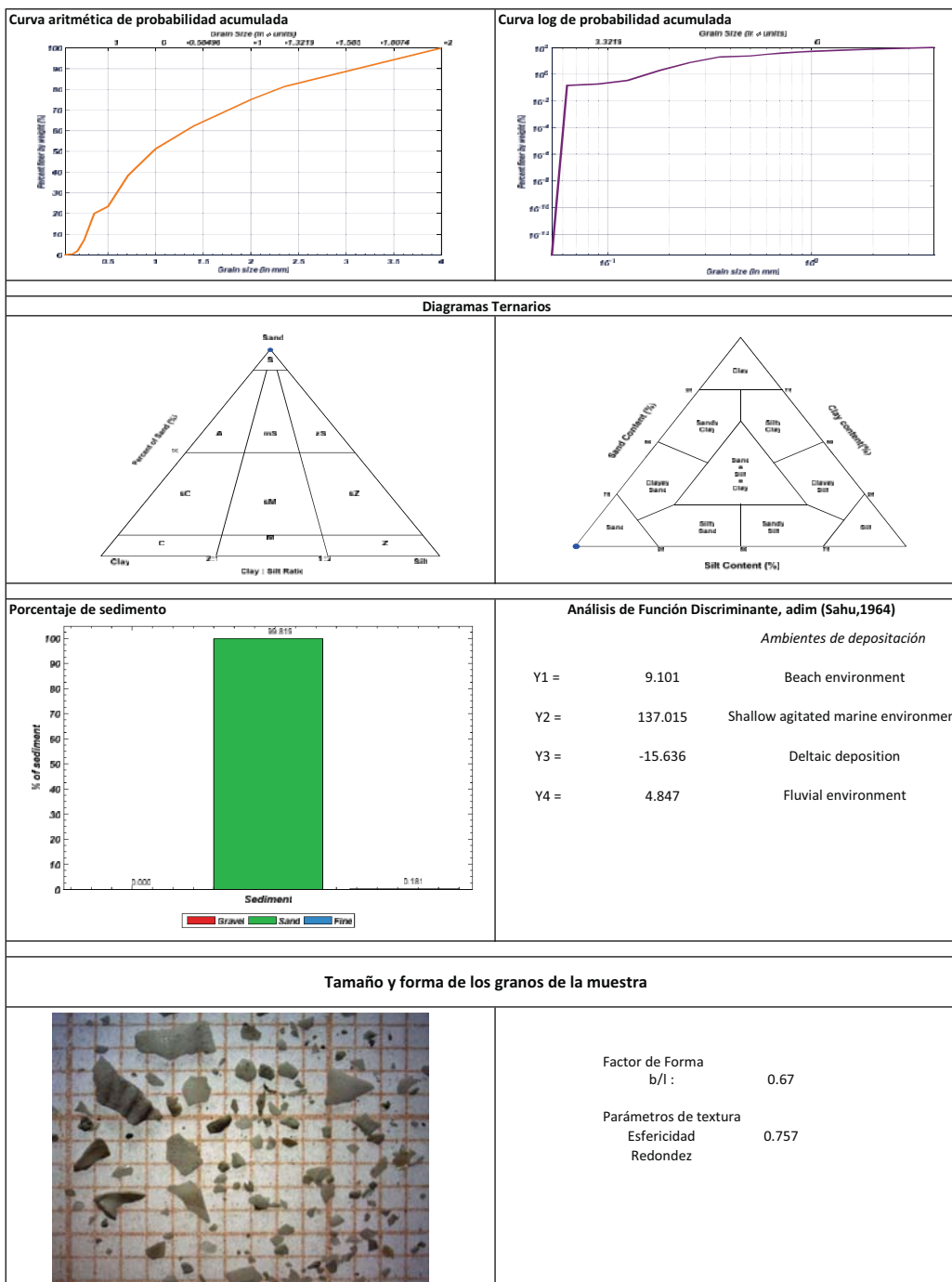
Media =	0.317	mm	Clasificación	Desviación estándar:	Very well sorted
Desviación estándar =	0.894	mm		Sesgo:	Fine skewed
Sesgo =	0.135			Curtosis:	Very leptokurtic
Curtosis =	1.804				

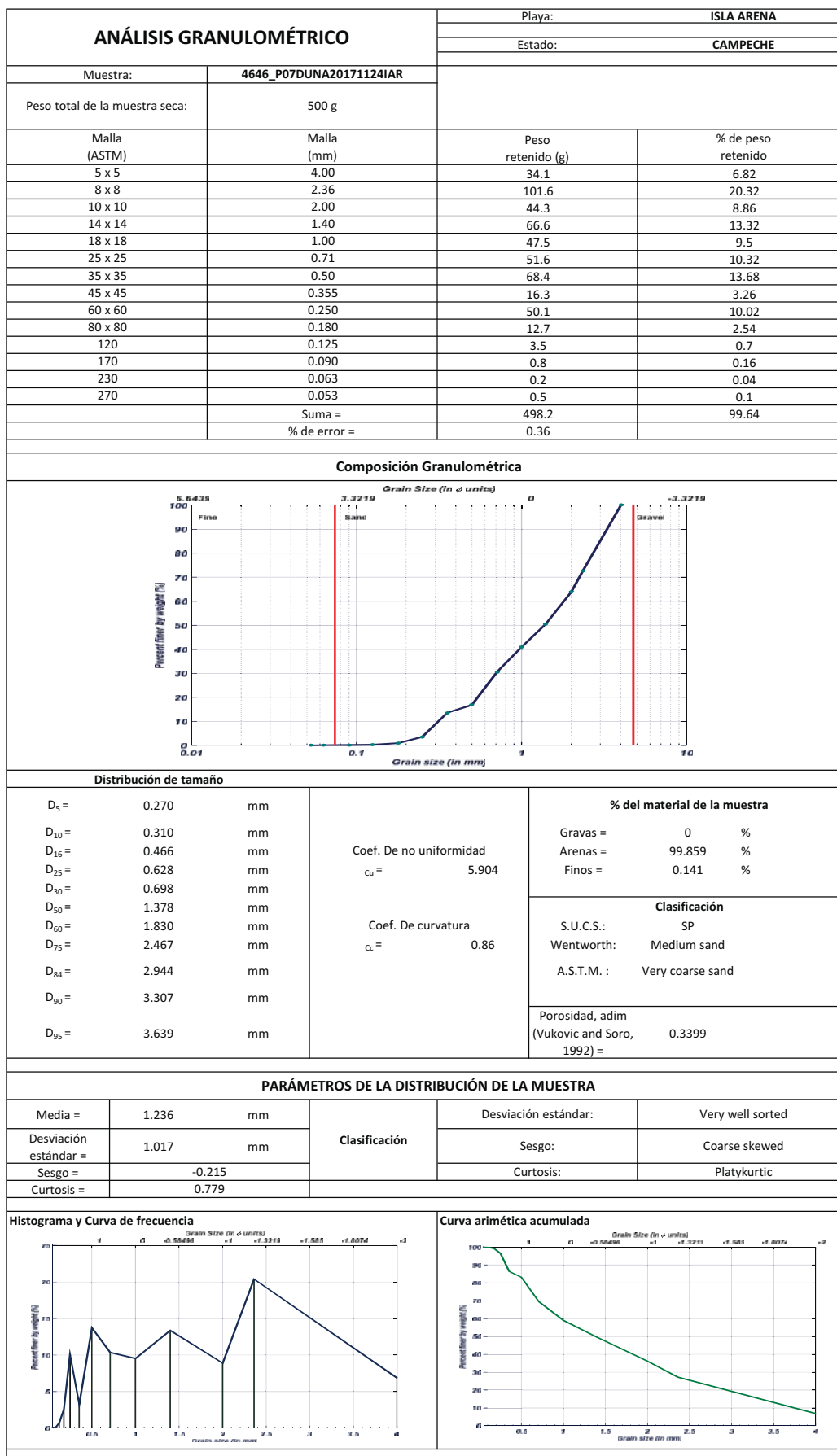
Histograma y Curva de frecuencia

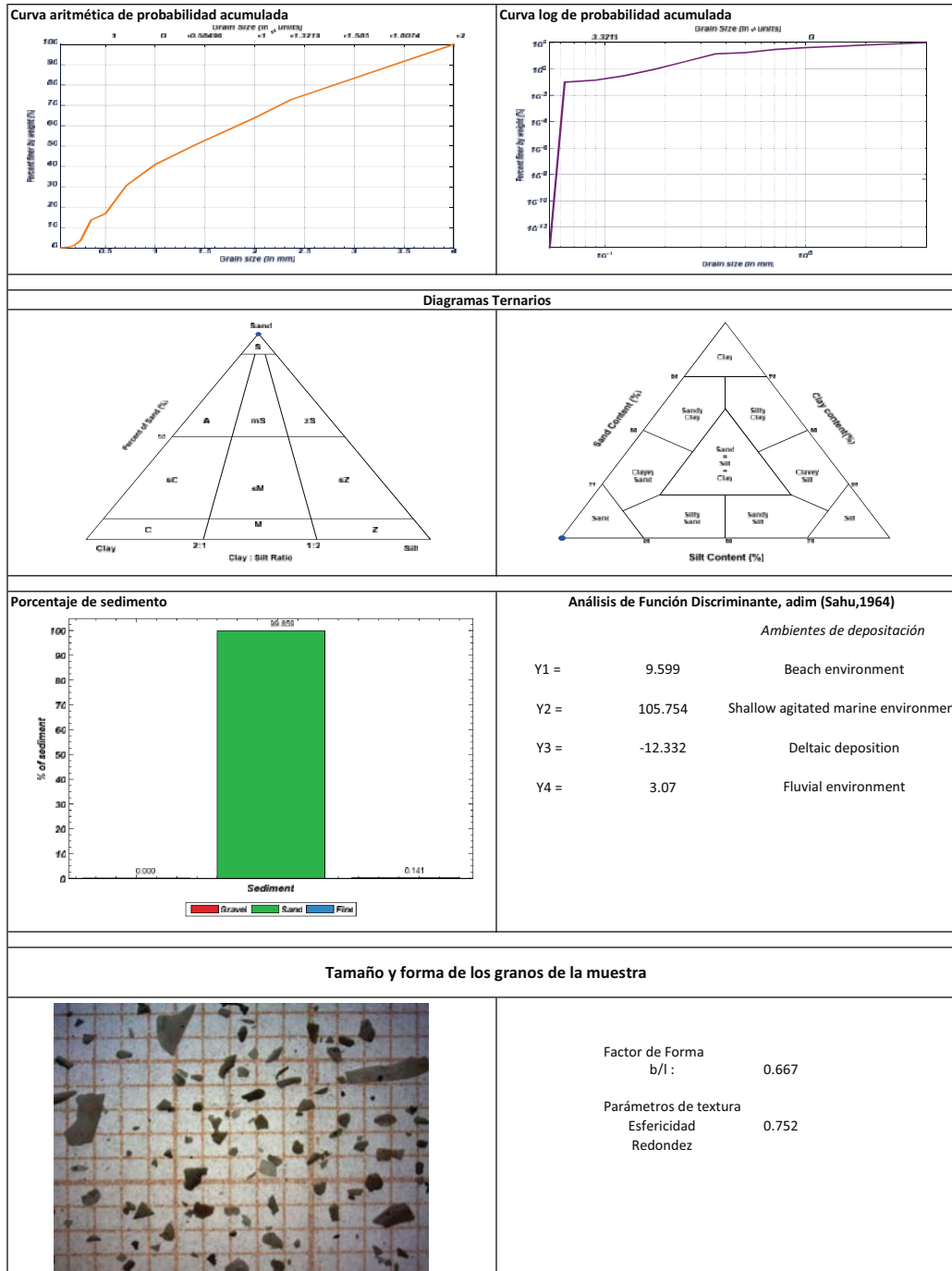


Curva aritmética acumulada

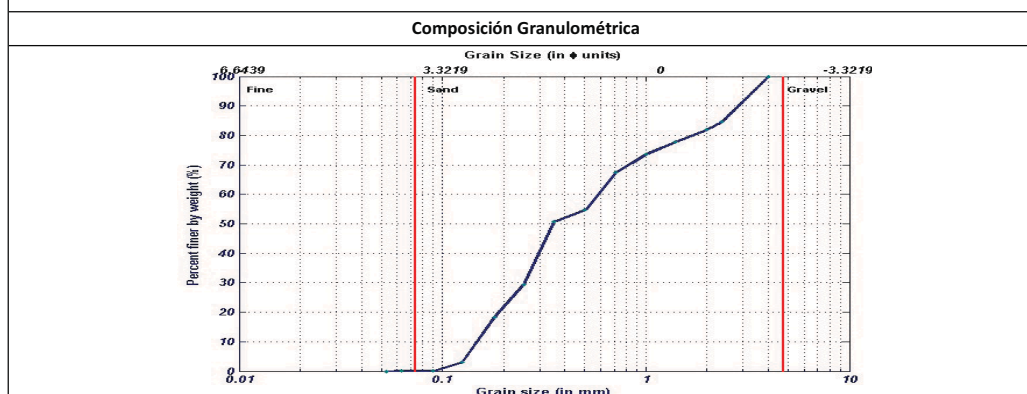






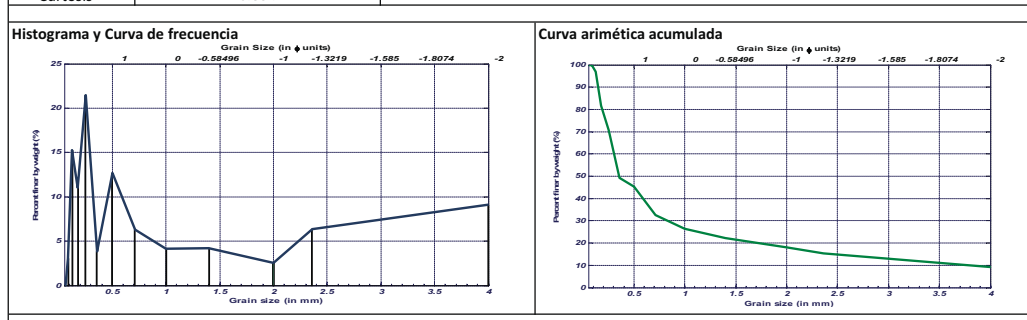


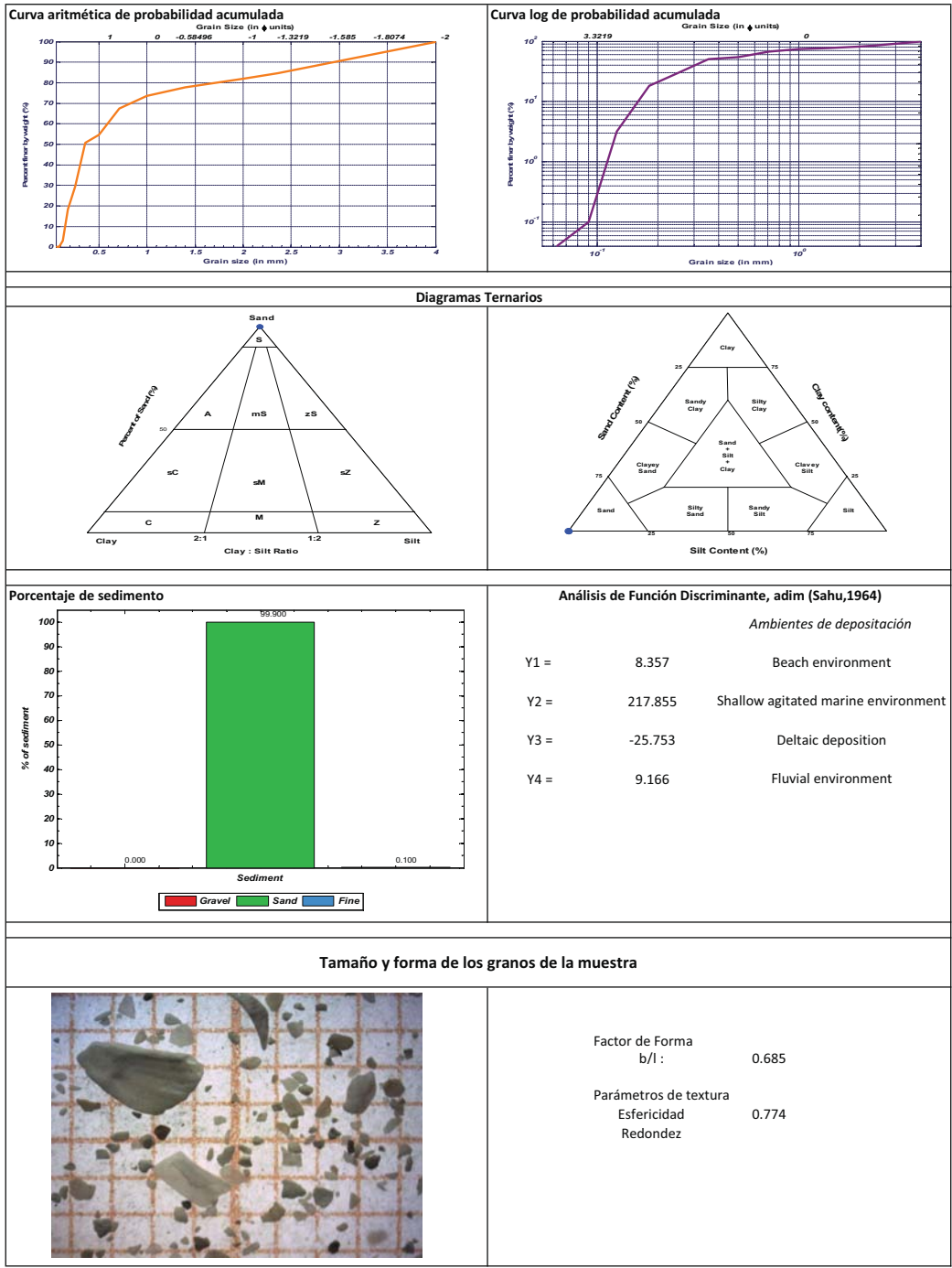
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		Playa: PLAYA BONITA	
		Estado: CAMPECHE	
Muestra:	4642_P01DUNA20171107PB		
Peso total de la muestra seca:	500 g		
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso retenido
5 x 5	4.00	45.4	9.08
8 x 8	2.36	31.8	6.36
10 x 10	2.00	12.6	2.52
14 x 14	1.40	21	4.2
18 x 18	1.00	20.7	4.14
25 x 25	0.71	31.3	6.26
35 x 35	0.50	63.4	12.68
45 x 45	0.355	19.1	3.82
60 x 60	0.250	107	21.4
80 x 80	0.180	54.9	10.98
120	0.125	76.1	15.22
170	0.090	15.2	3.04
230	0.063	0.3	0.06
270	0.053	0.2	0.04
	Suma =	499	99.8
	% de error =	0.2	

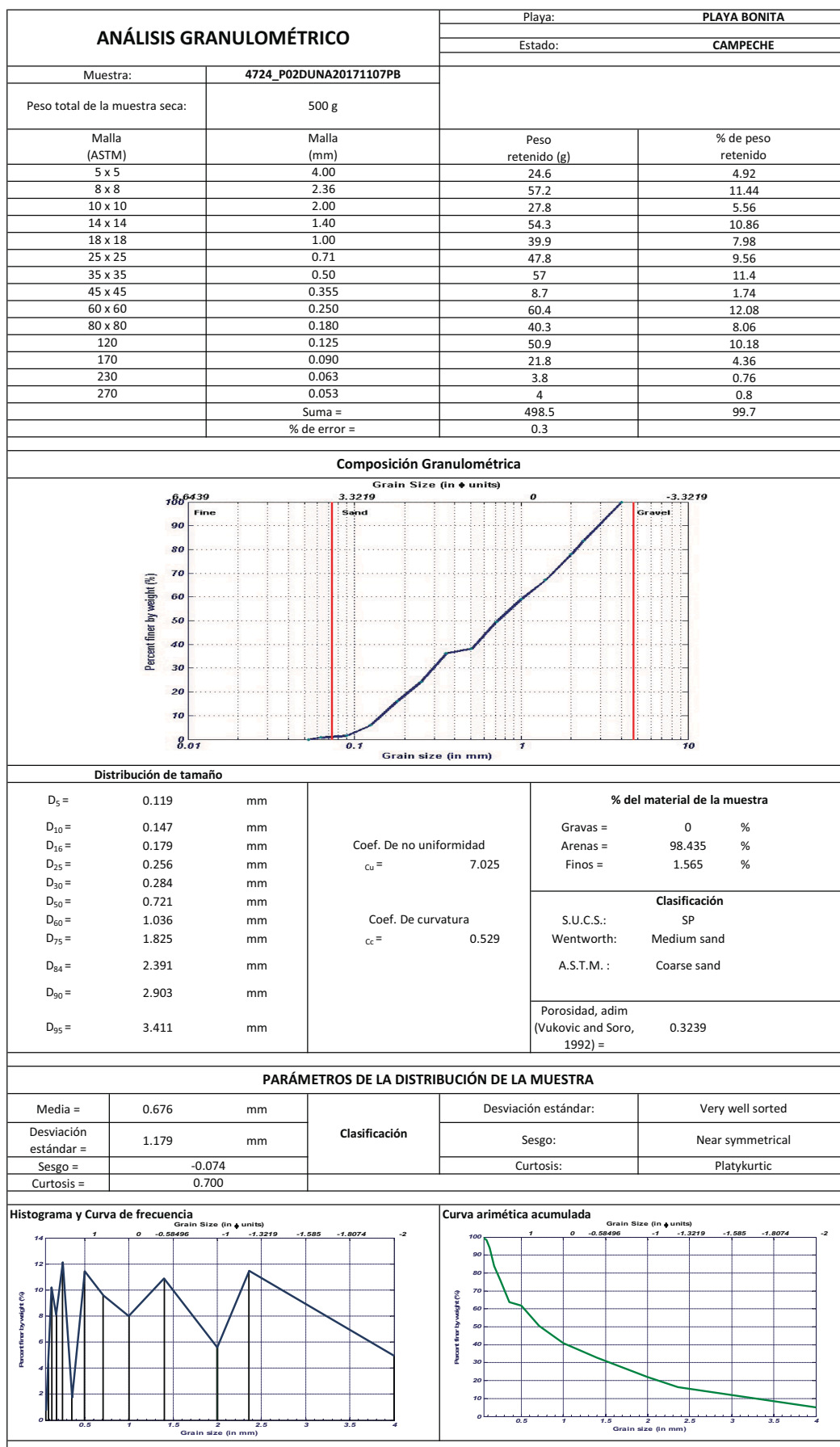


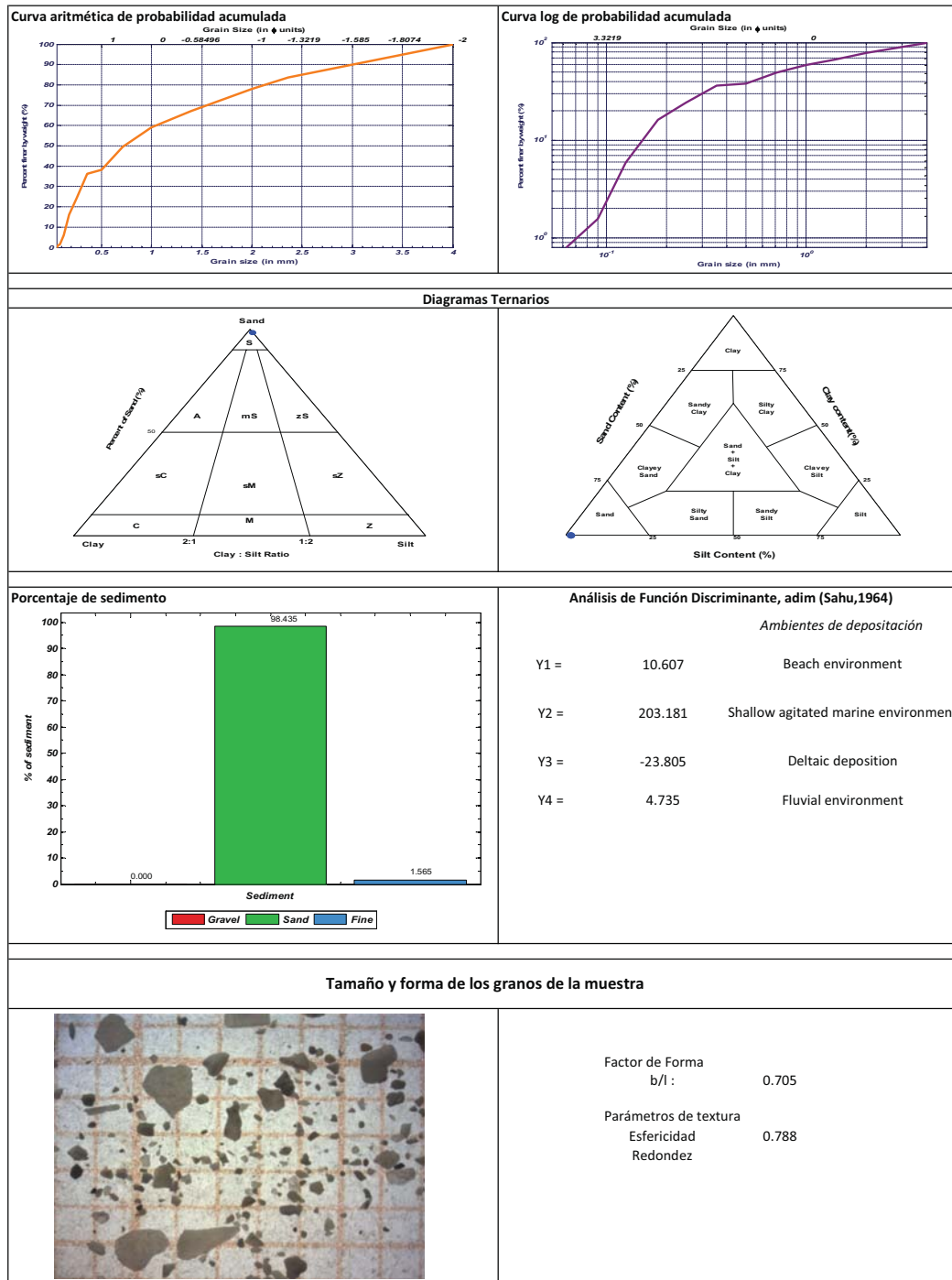
Distribución de tamaño			
D ₅ =	0.135	mm	% del material de la muestra Gravas = 0 % Arenas = 99.9 % Finos = 0.1 %
D ₁₀ =	0.153	mm	
D ₁₆ =	0.170	mm	
D ₂₅ =	0.221	mm	
D ₃₀ =	0.253	mm	
D ₅₀ =	0.346	mm	
D ₆₀ =	0.591	mm	
D ₇₅ =	1.105	mm	
D ₈₄ =	2.290	mm	
D ₉₀ =	3.025	mm	Clasificación S.U.C.S.: SP Wentworth: Medium sand A.S.T.M. : Coarse sand
D ₉₅ =	3.564	mm	
			Porosidad, adim (Vukovic and Soro, 1992) = 0.3793

PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA			
Media =	0.513	mm	Clasificación Desviación estándar: Very well sorted Sesgo: Very fine skewed Curtosis: Platykurtic
Desviación estándar =	1.200	mm	
Sesgo =	0.439		
Curtosis =	0.834		

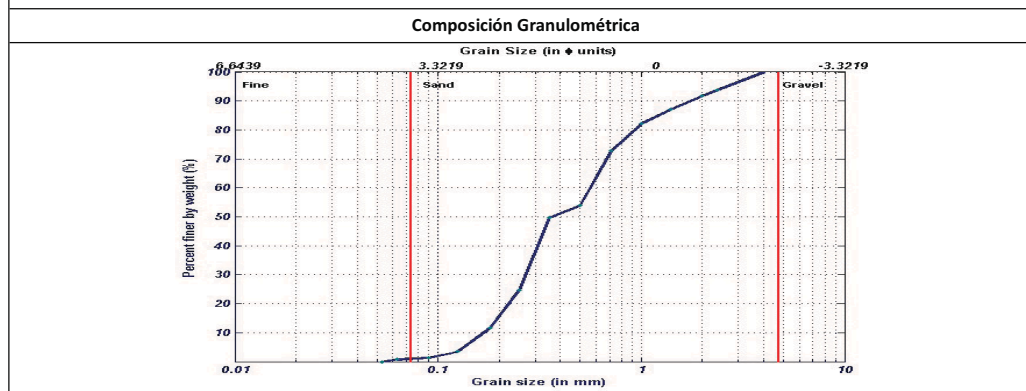






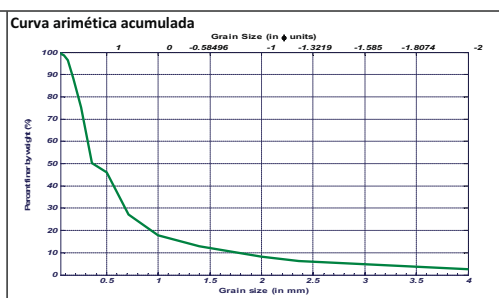
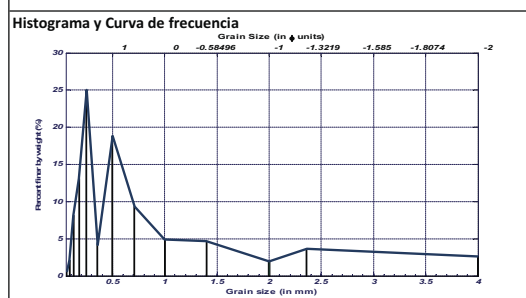


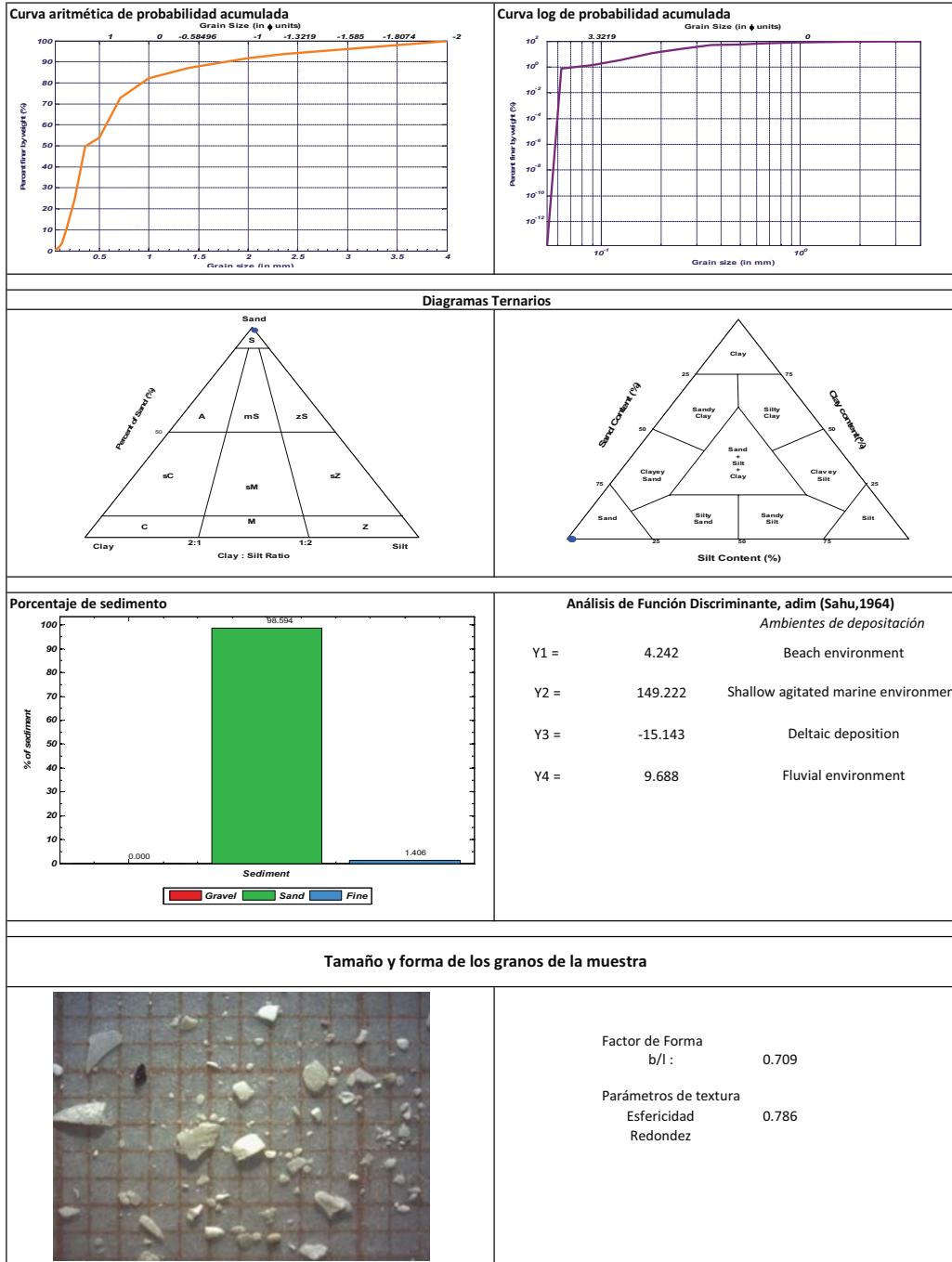
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		Playa: PLAYA BONITA	
		Estado: CAMPECHE	
Muestra:	4758_P03DUNA20171107PB		
Peso total de la muestra seca:	500 g		
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso retenido
5 x 5	4.00	13.1	2.62
8 x 8	2.36	18.3	3.66
10 x 10	2.00	9.8	1.96
14 x 14	1.40	23.3	4.66
18 x 18	1.00	24.3	4.86
25 x 25	0.71	46.5	9.3
35 x 35	0.50	93.9	18.78
45 x 45	0.355	20.8	4.16
60 x 60	0.250	124.8	24.96
80 x 80	0.180	65	13
120	0.125	40.6	8.12
170	0.090	10.6	2.12
230	0.063	3.2	0.64
270	0.053	3.8	0.76
	Suma =	498	99.6
	% de error =	0.4	



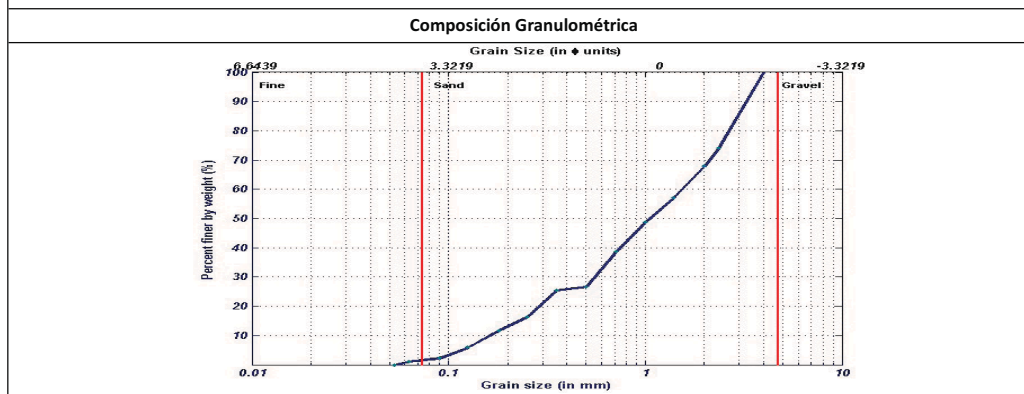
Distribución de tamaño			
D ₅ =	0.139	mm	<p style="text-align: center;">% del material de la muestra</p> <p>Gravas = 0 %</p> <p>Arenas = 98.594 %</p> <p>Finos = 1.406 %</p> <p style="text-align: center;">Clasificación</p> <p>S.U.C.S.: SP</p> <p>Wentworth: Medium sand</p> <p>A.S.T.M. : Medium Sand</p> <p>Porosidad, adim (Vukovic and Soro, 1992) = 0.3901</p>
D ₁₀ =	0.170	mm	
D ₁₆ =	0.205	mm	
D ₂₅ =	0.251	mm	
D ₃₀ =	0.270	mm	
D ₅₀ =	0.357	mm	
D ₆₀ =	0.581	mm	
D ₇₅ =	0.754	mm	
D ₈₄ =	1.118	mm	
D ₉₀ =	1.749	mm	
D ₉₅ =	2.645	mm	
		Coef. De no uniformidad	cu = 3.408
		Coef. De curvatura	cc = 0.734

PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA			
Media =	0.434	mm	<p style="text-align: center;">Clasificación</p> <p>Desviación estándar: Very well sorted</p> <p>Sesgo: Very fine skewed</p> <p>Curtosis: Leptokurtic (peaked)</p>
Desviación estándar =	0.884	mm	
Sesgo =	0.351		
Curtosis =	1.100		





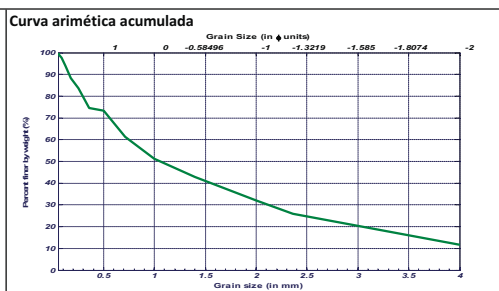
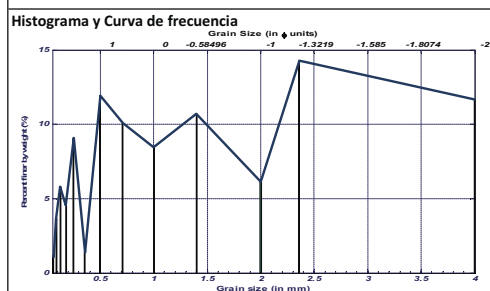
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		Playa: PLAYA BONITA	
		Estado: CAMPECHE	
Muestra:	4620_P04DUNA20171107PB		
Peso total de la muestra seca:	500 g		
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso retenido
5 x 5	4.00	58.2	11.64
8 x 8	2.36	71.2	14.24
10 x 10	2.00	30.6	6.12
14 x 14	1.40	53.3	10.66
18 x 18	1.00	42.1	8.42
25 x 25	0.71	50.3	10.06
35 x 35	0.50	59.5	11.9
45 x 45	0.355	6.9	1.38
60 x 60	0.250	45.3	9.06
80 x 80	0.180	22.7	4.54
120	0.125	28.9	5.78
170	0.090	18.2	3.64
230	0.063	5.3	1.06
270	0.053	6	1.2
	Suma =	498.5	99.7
	% de error =	0.3	

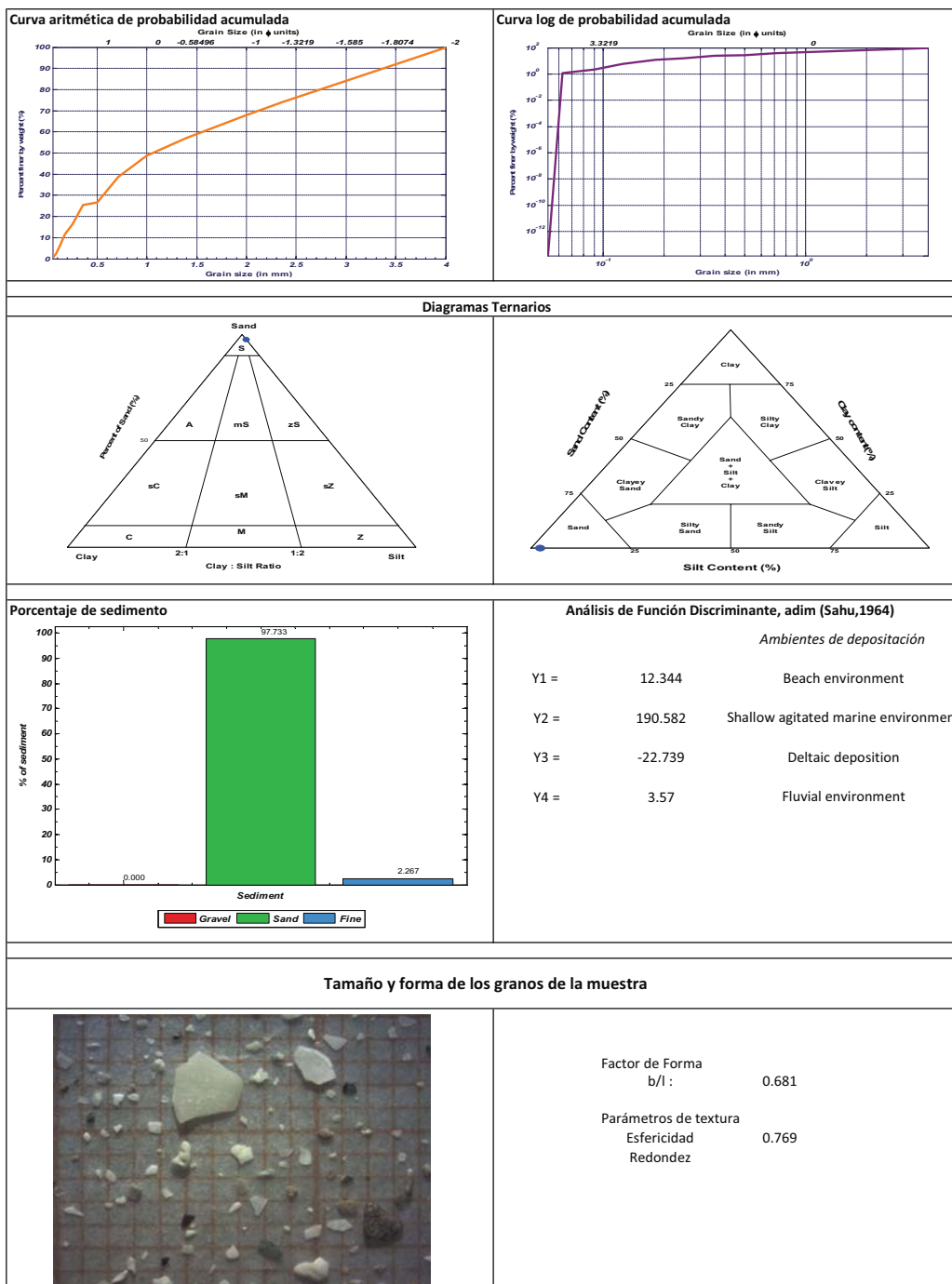


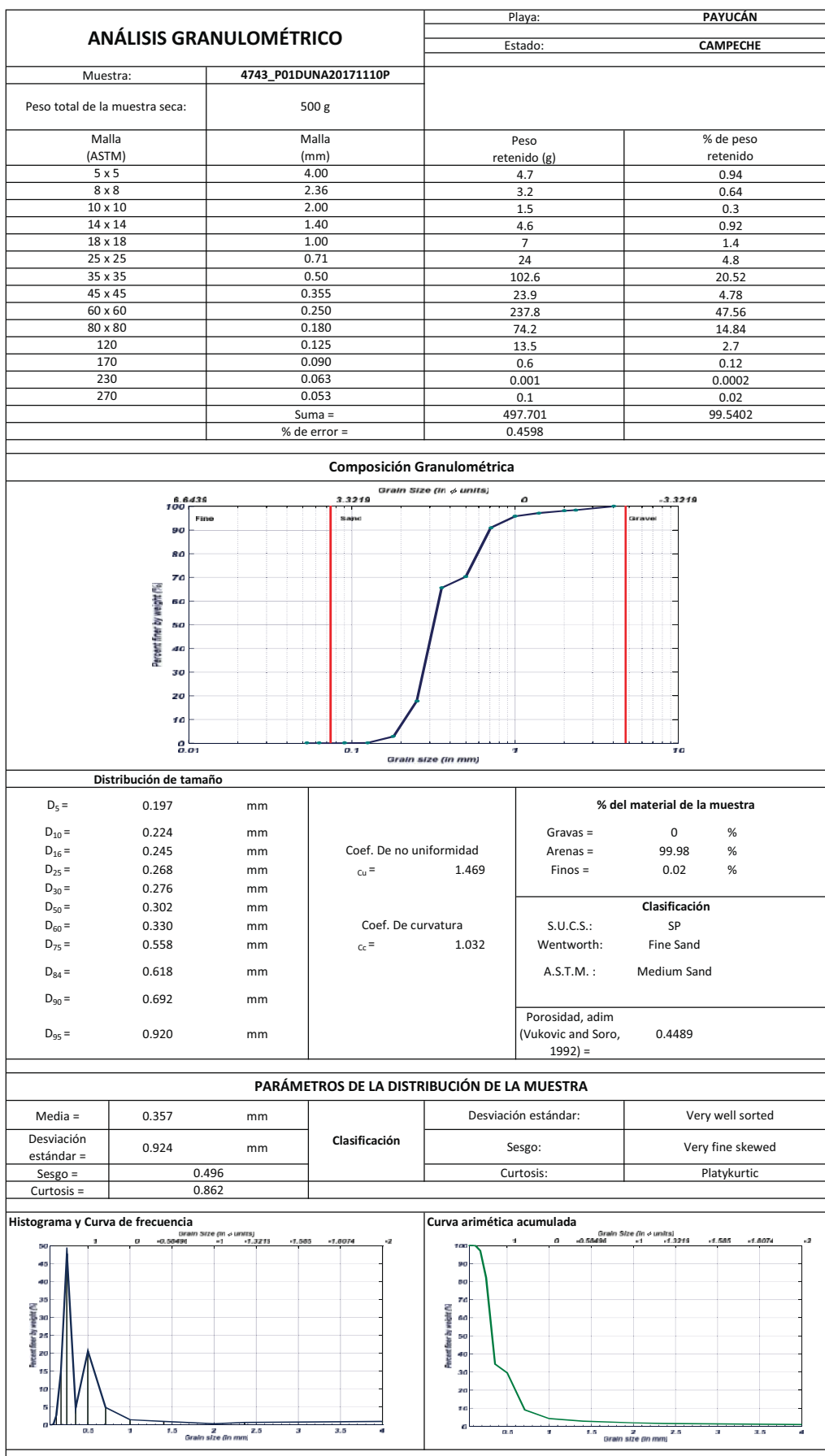
Distribución de tamaño			Coef. De no uniformidad		% del material de la muestra	
D ₅ =	0.117	mm	Cu =	9.572	Gravas =	0 %
D ₁₀ =	0.162	mm			Arenas =	97.733 %
D ₁₆ =	0.246	mm	Cc =	1.381	Finos =	2.267 %
D ₂₅ =	0.346	mm			Clasificación	
D ₃₀ =	0.588	mm	S.U.C.S.: SP			
D ₅₀ =	1.048	mm	Wentworth: Fine Sand			
D ₆₀ =	1.548	mm	A.S.T.M. : Medium Sand			
D ₇₅ =	2.418	mm	Porosidad, adim (Vukovic and Soro, 1992) =			
D ₈₄ =	2.970	mm	0.2978			
D ₉₀ =	3.348	mm				
D ₉₅ =	3.670	mm				

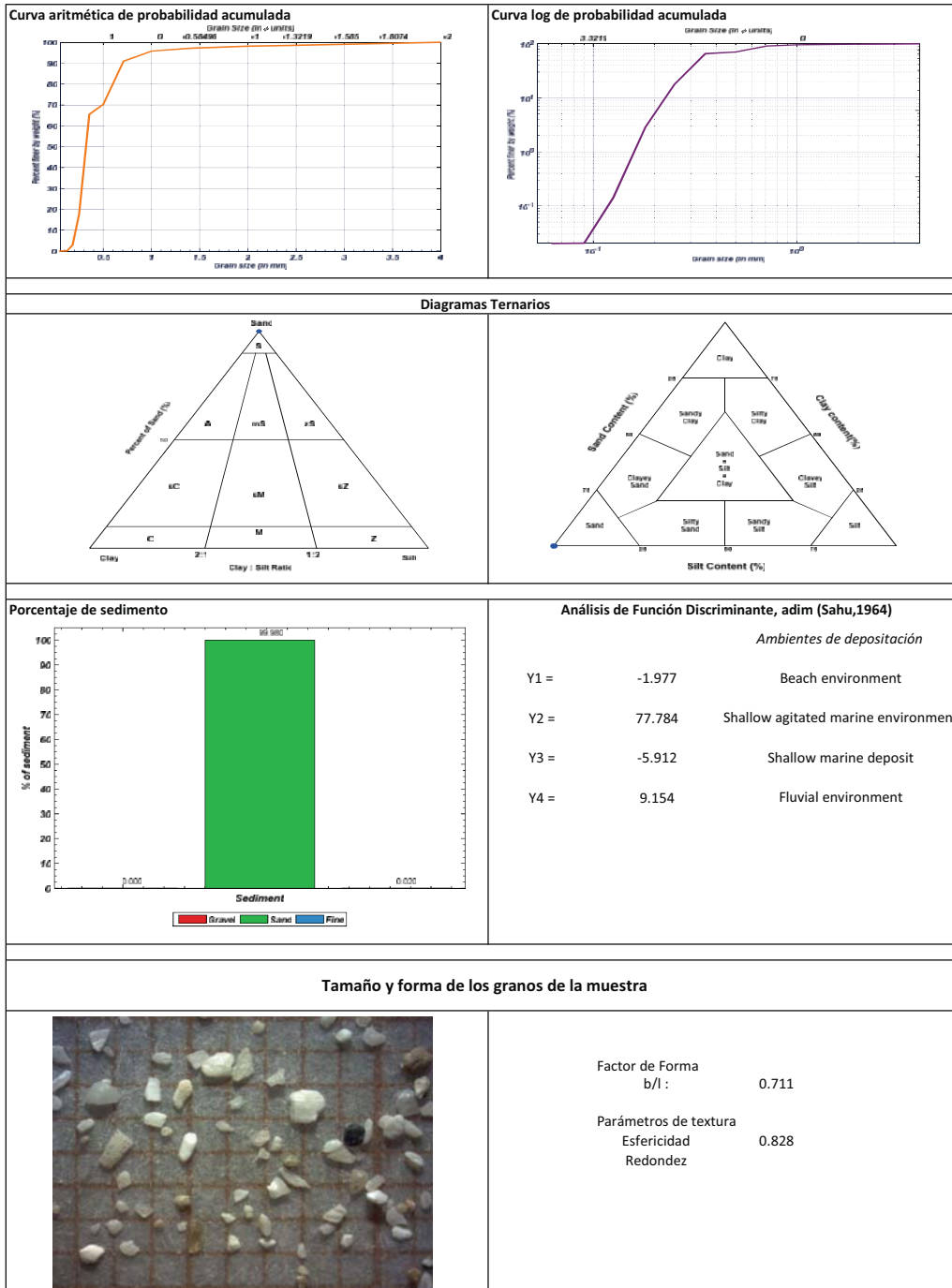
PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA

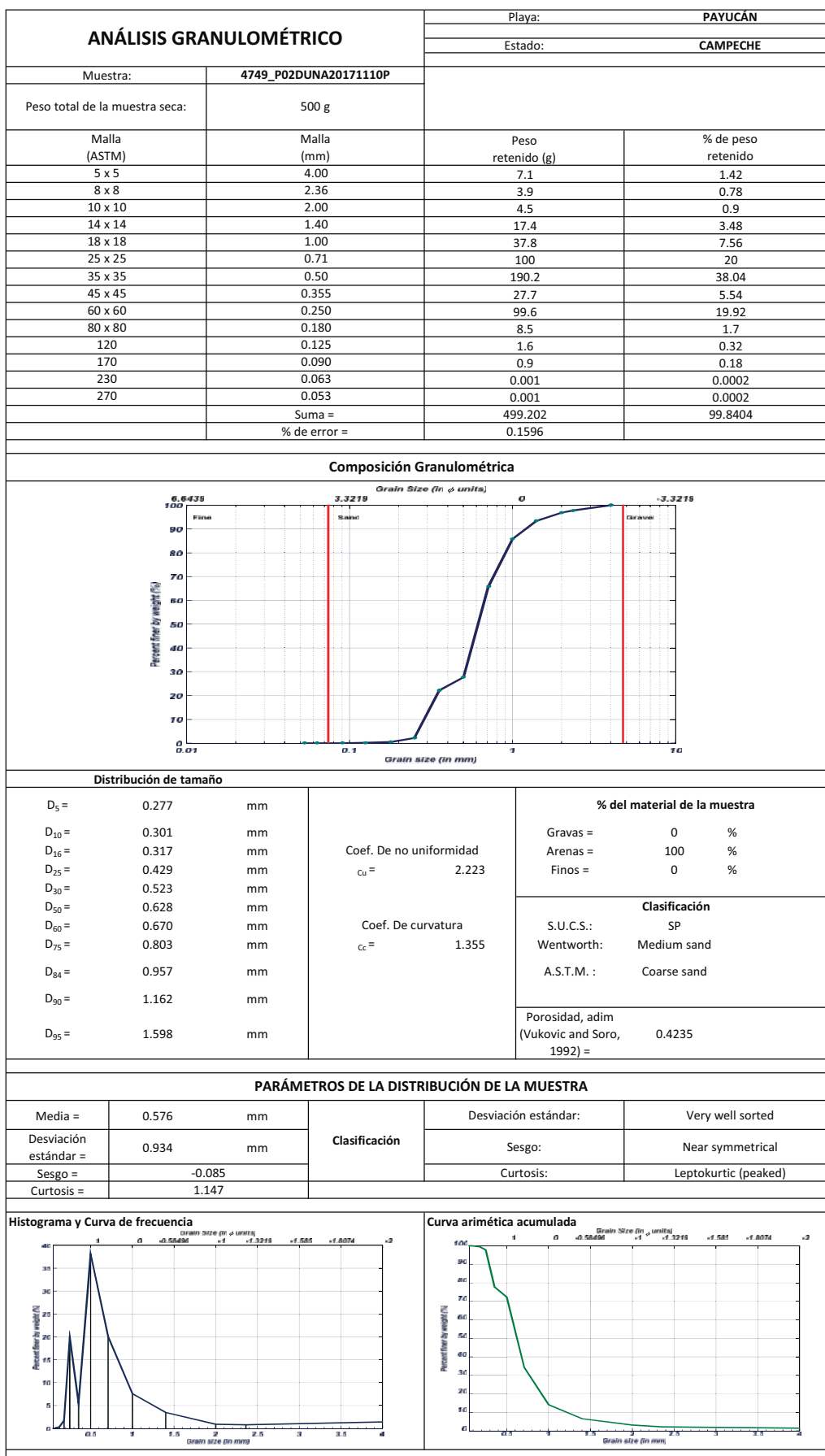
Media =		Clasificación	Desviación estándar:	
Media =	0.915 mm		Desviación estándar:	Very well sorted
Desviación estándar =	1.111 mm		Sesgo:	Coarse skewed
Sesgo =	-0.218		Curtosis:	Platykurtic
Curtosis =	0.726			

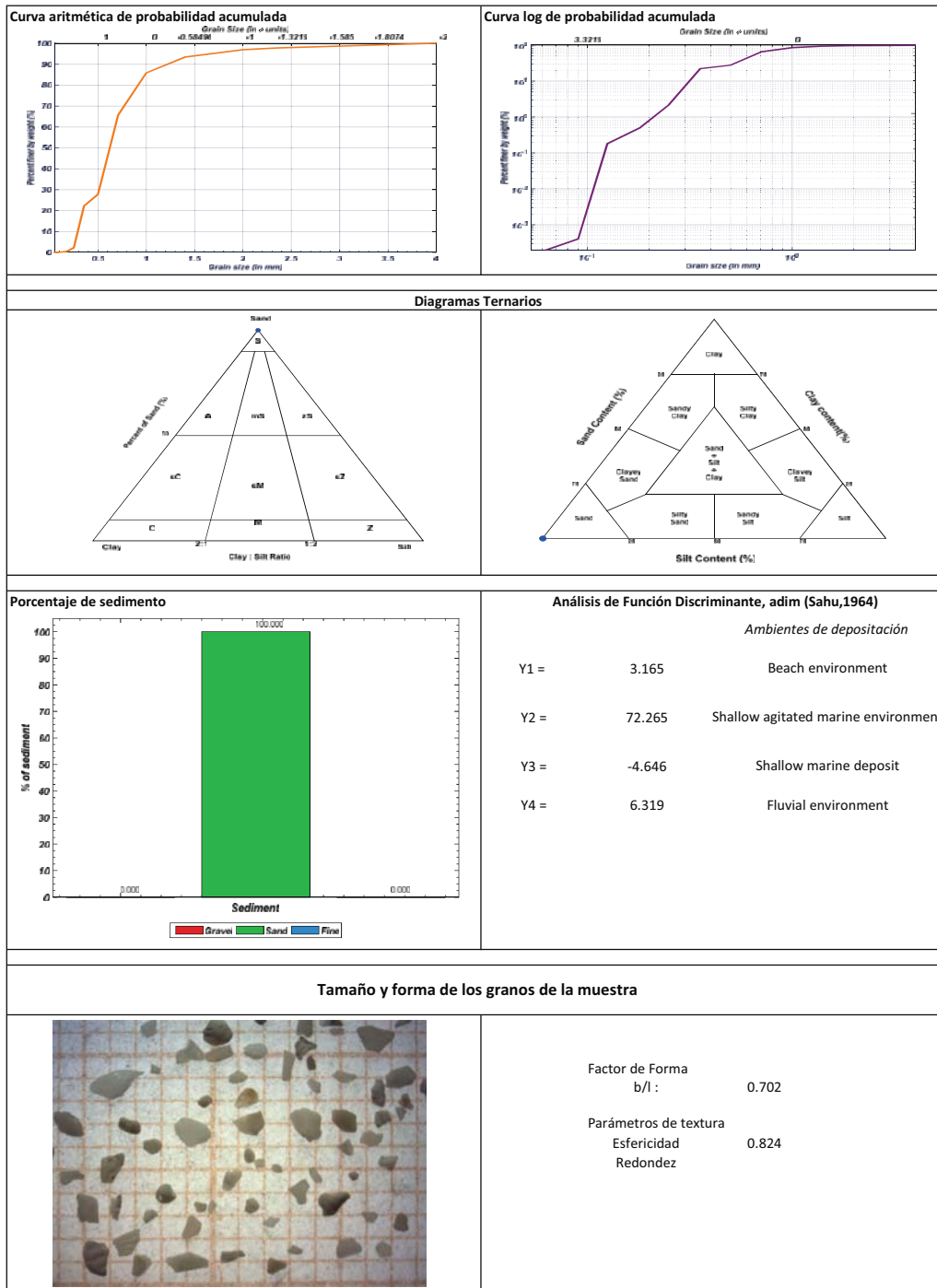


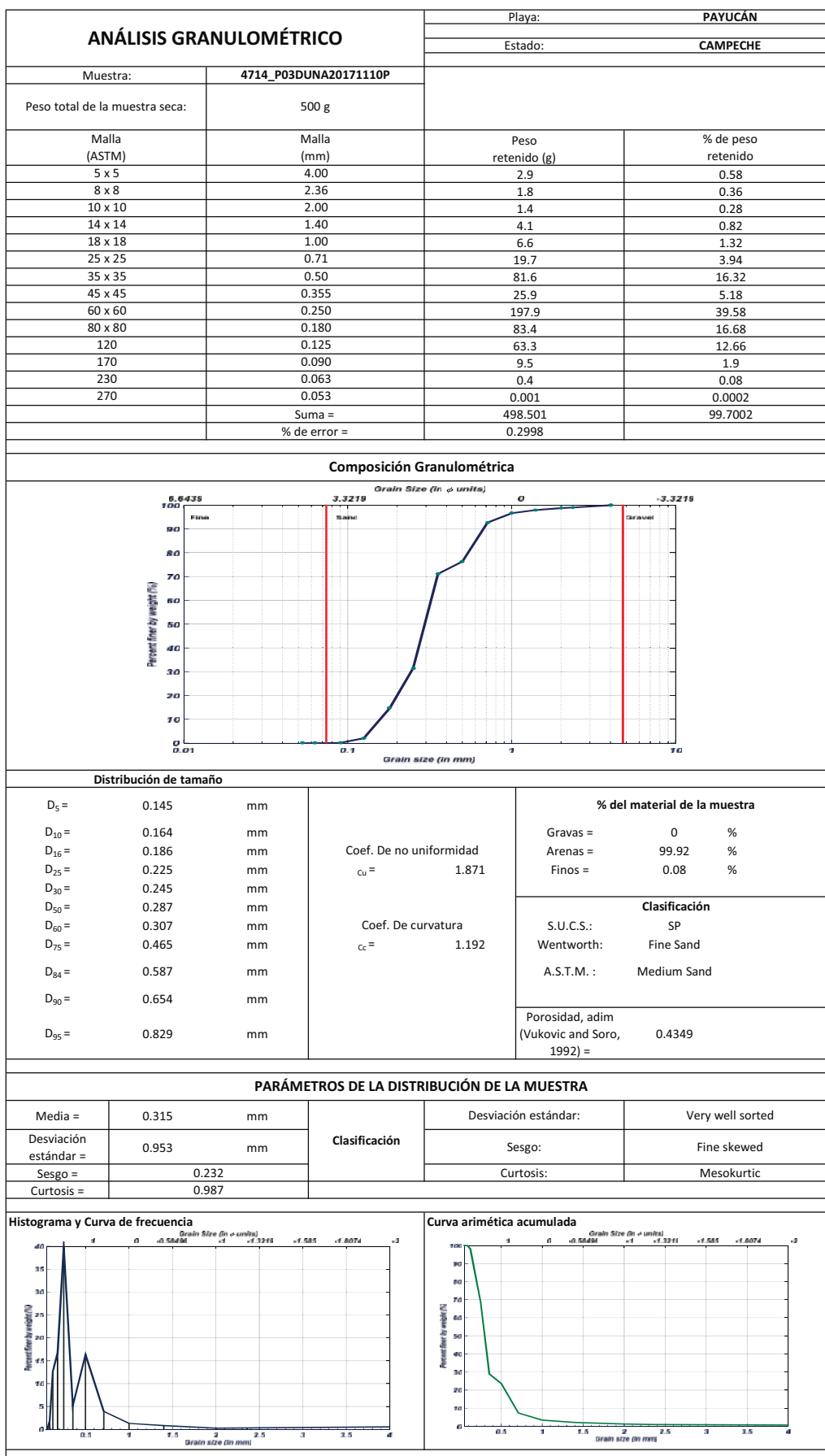


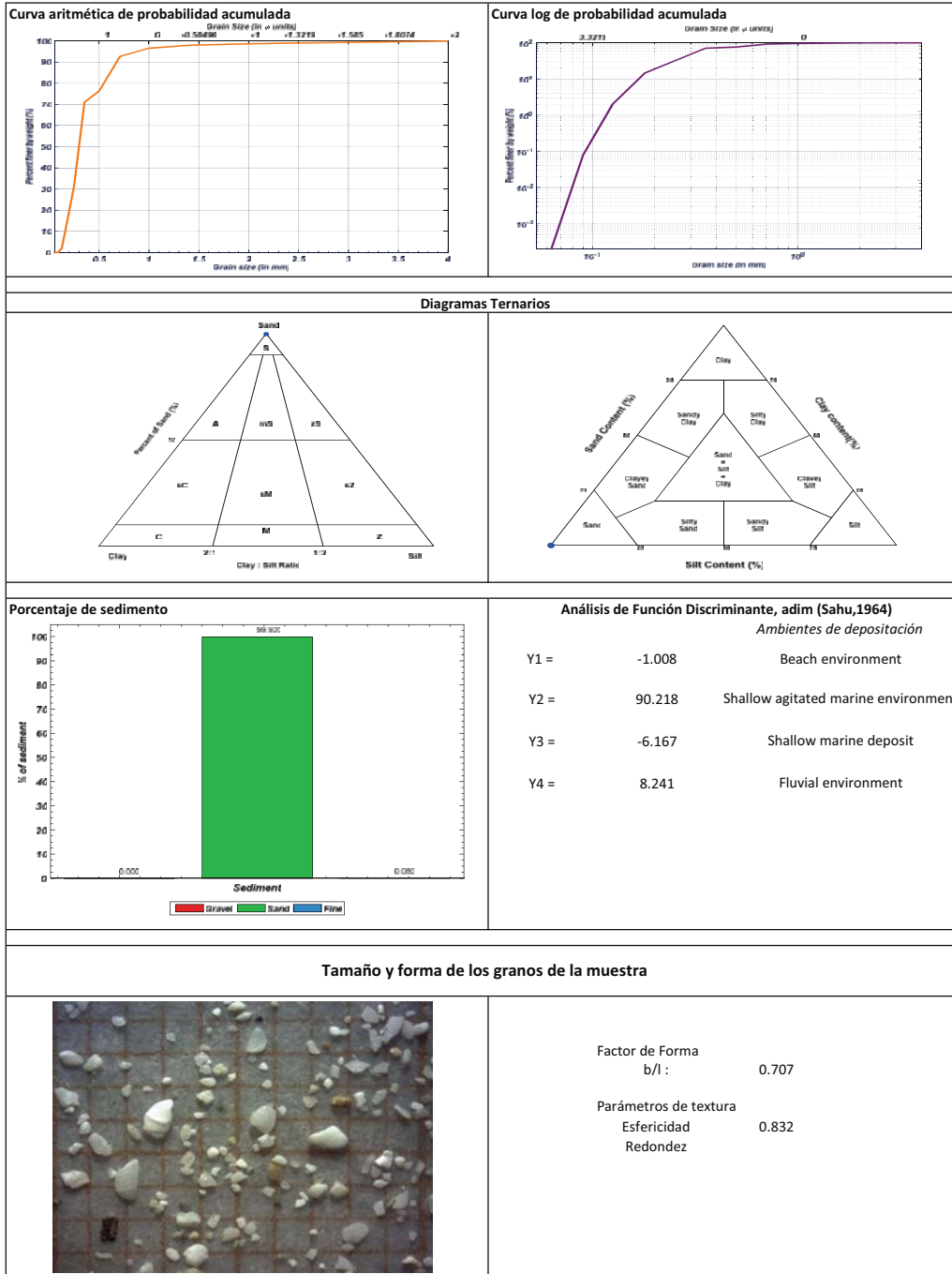


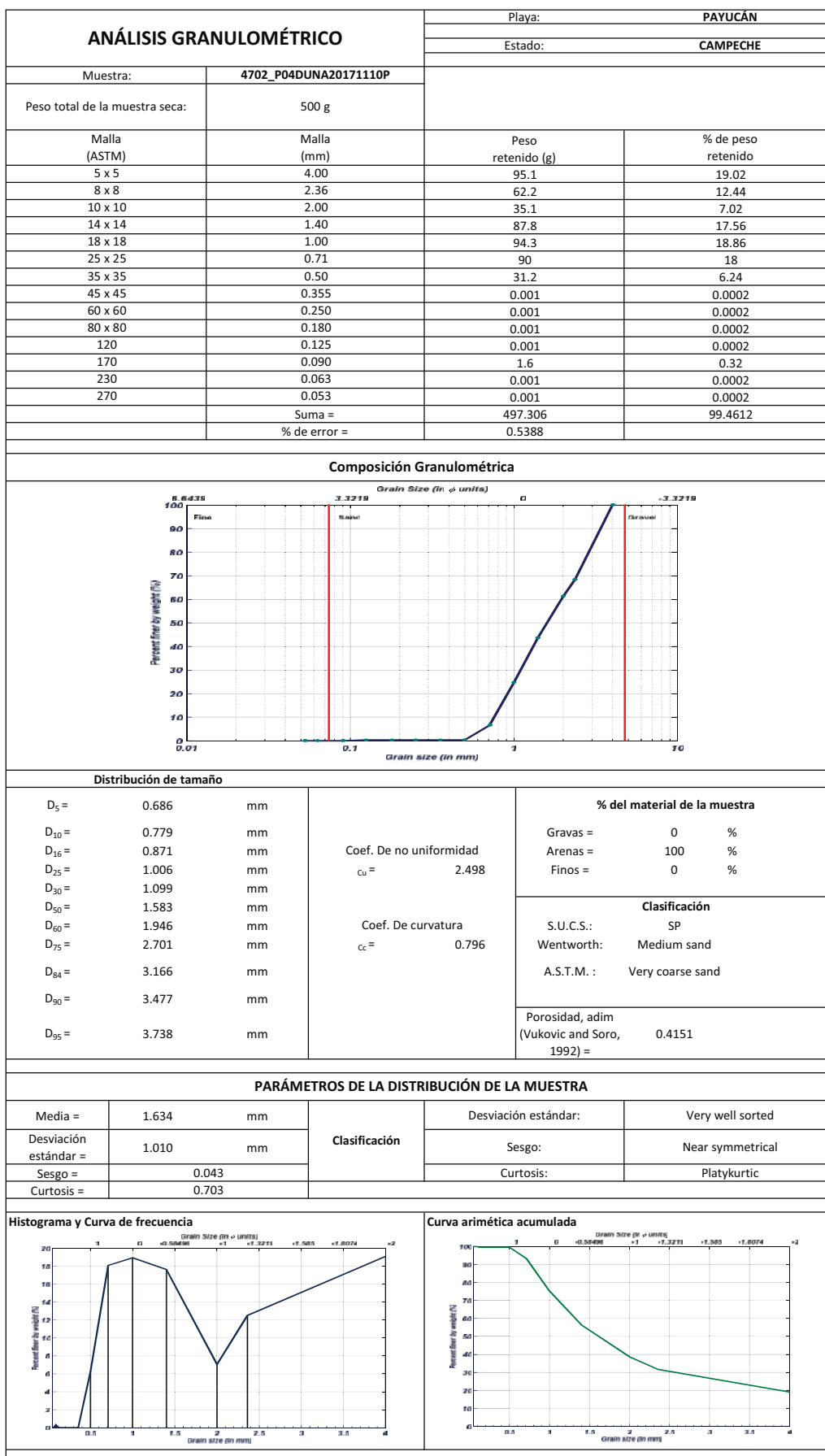


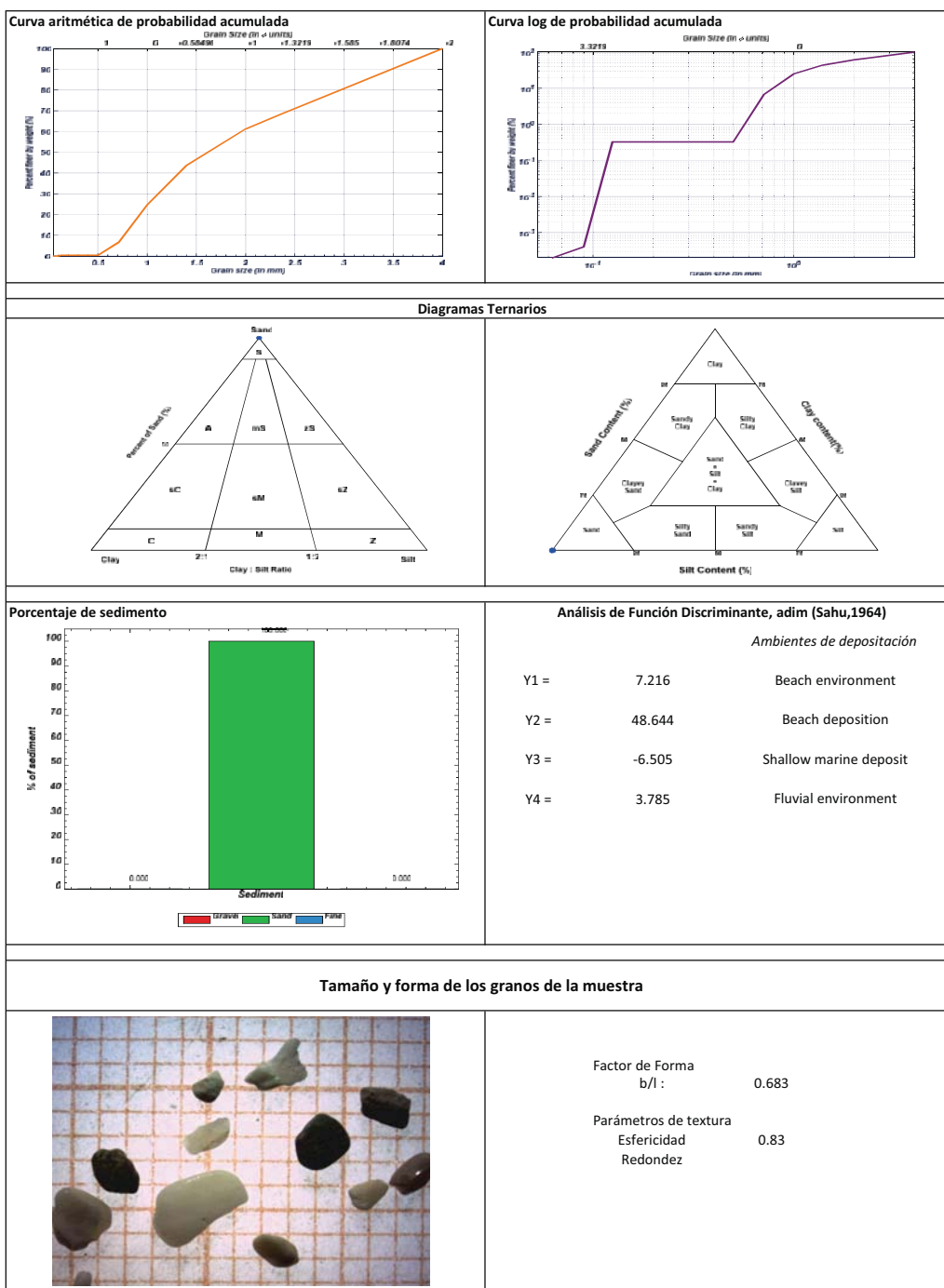


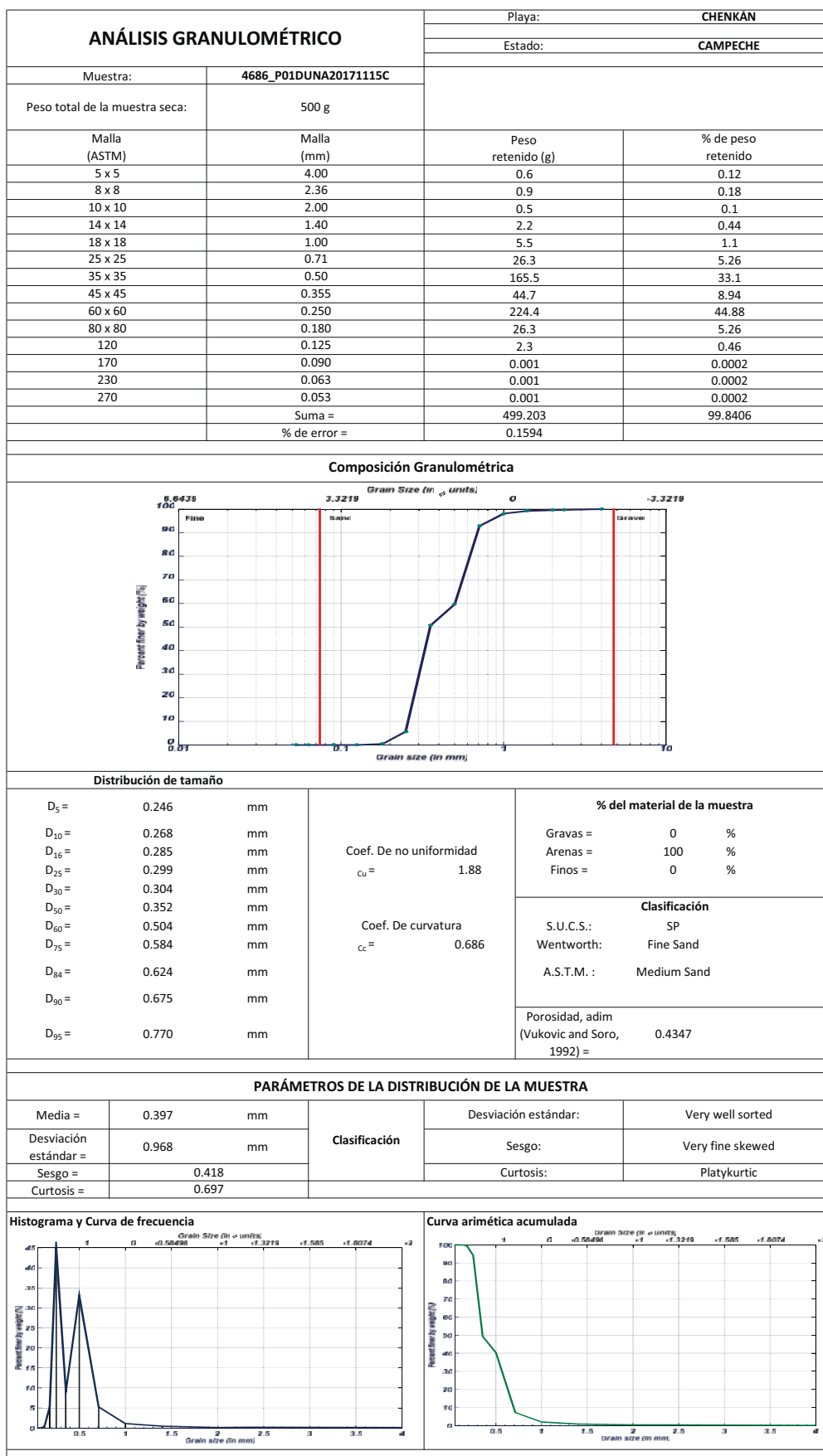


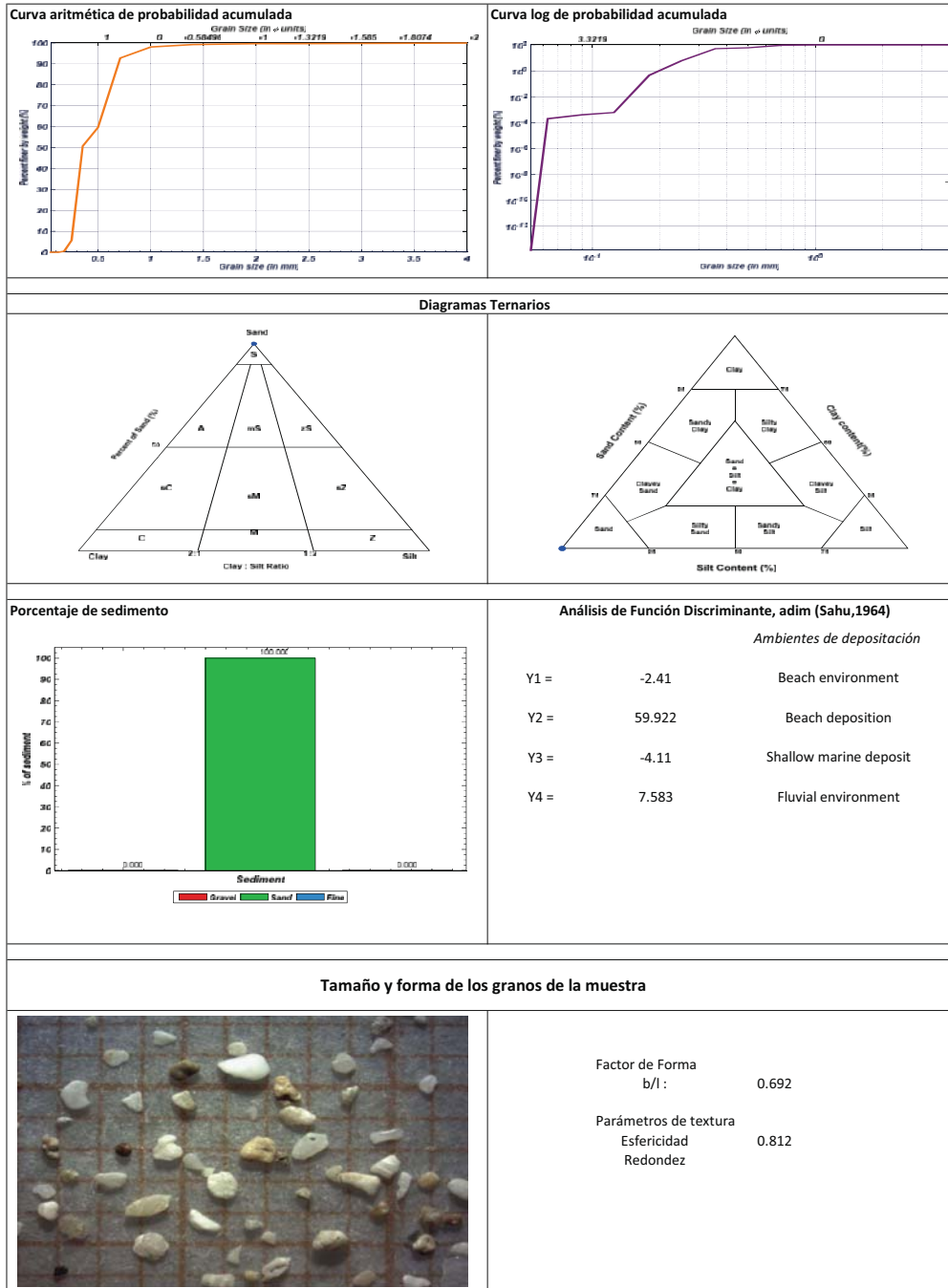


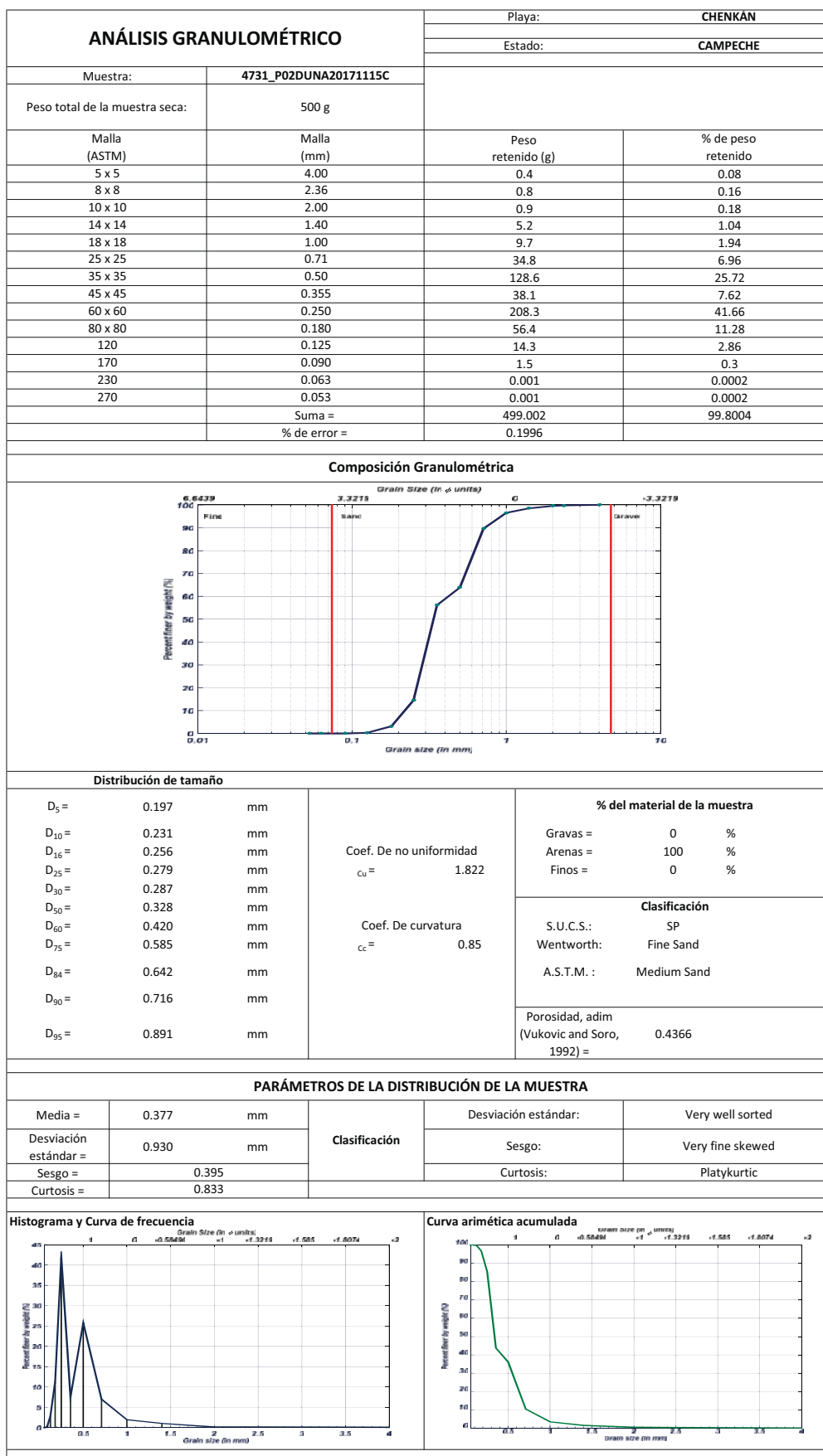


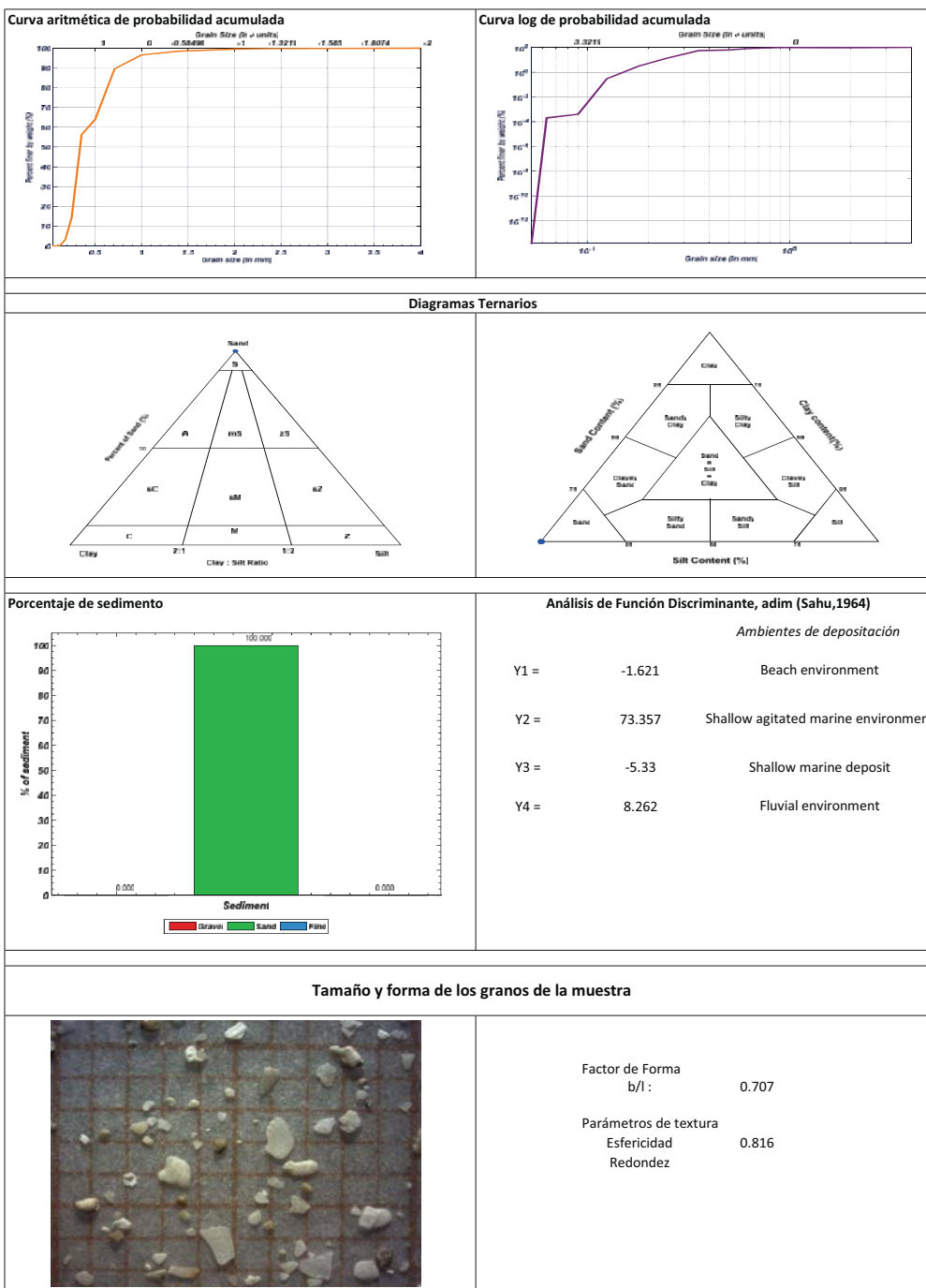


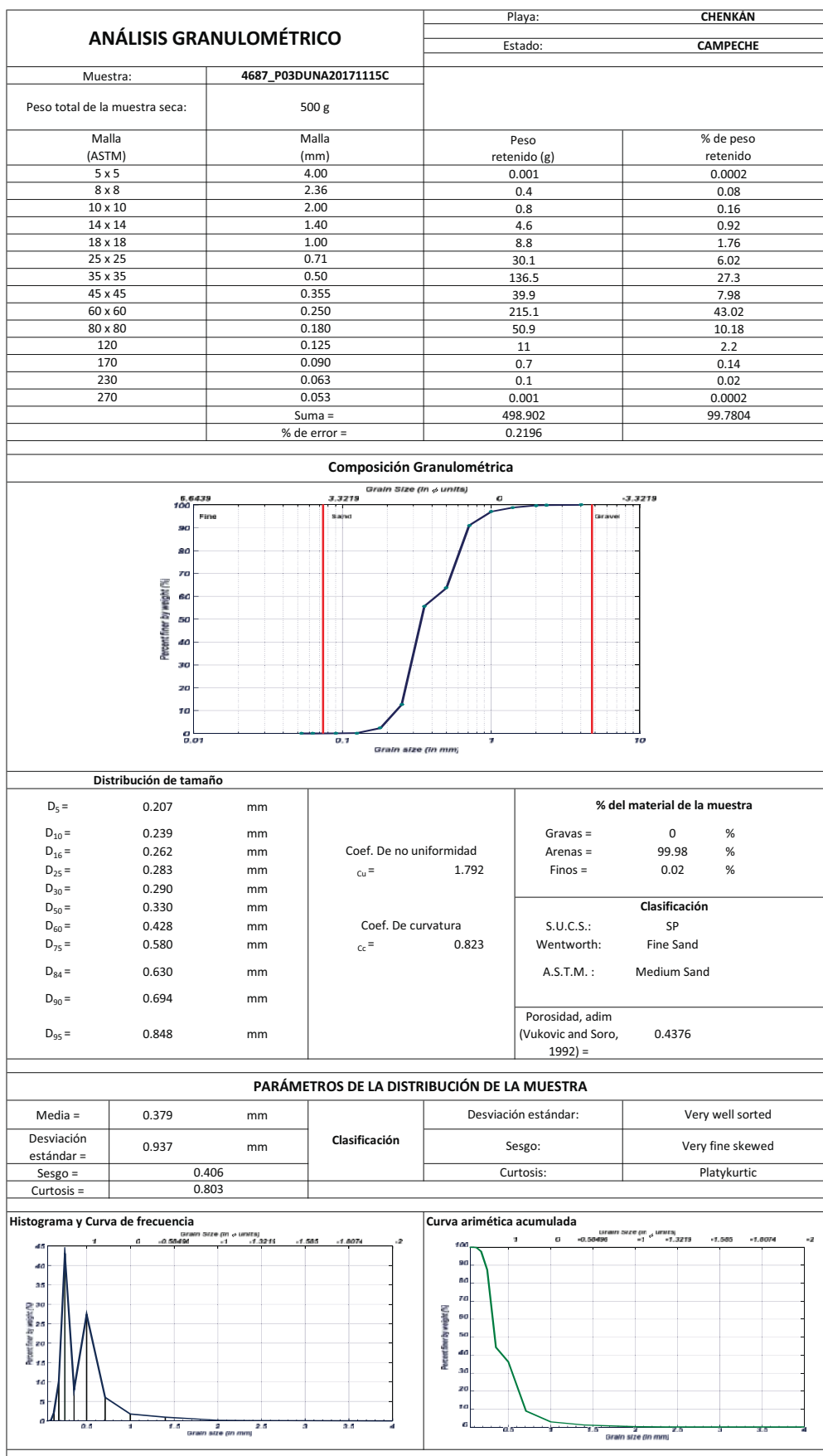


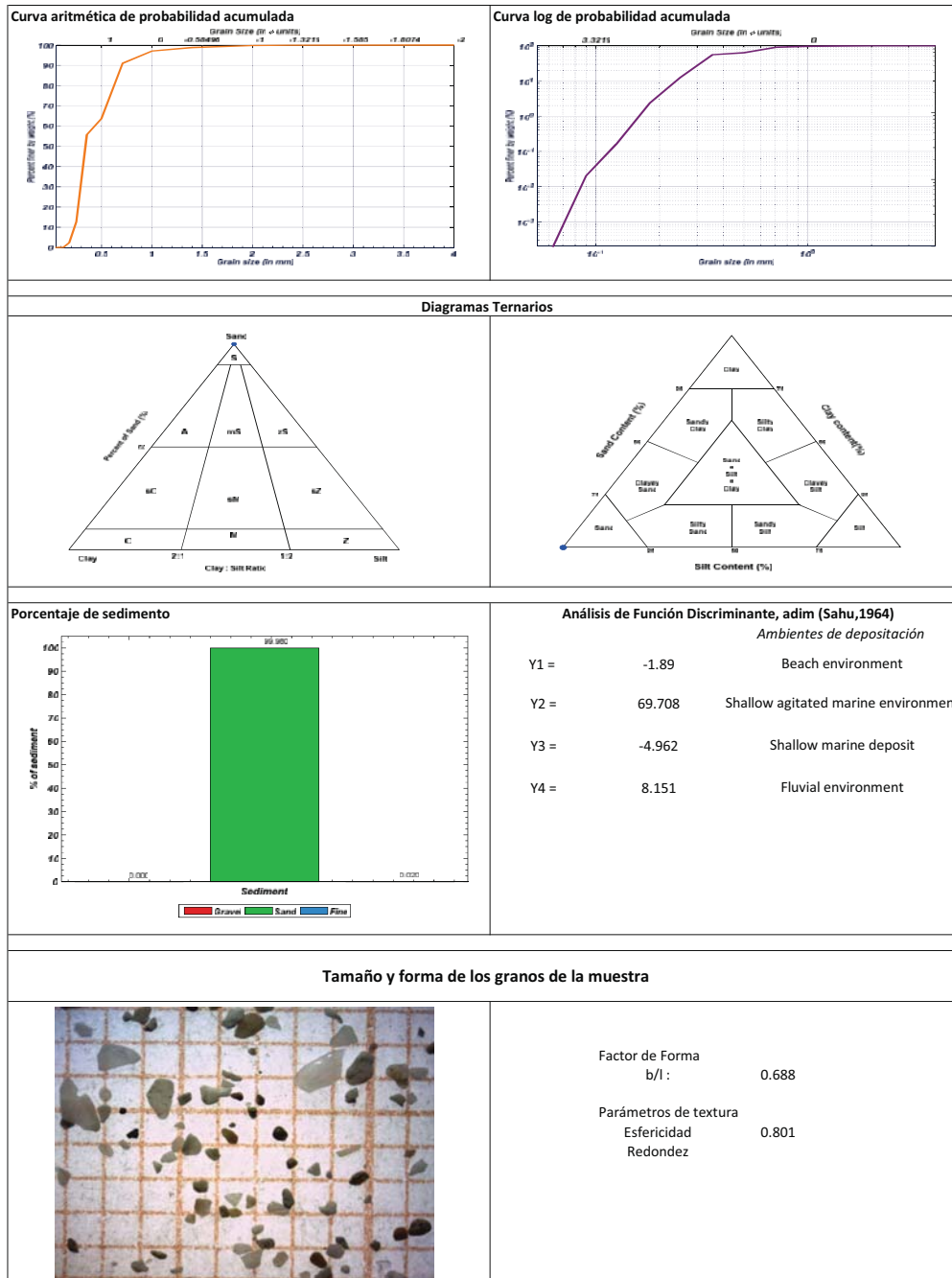


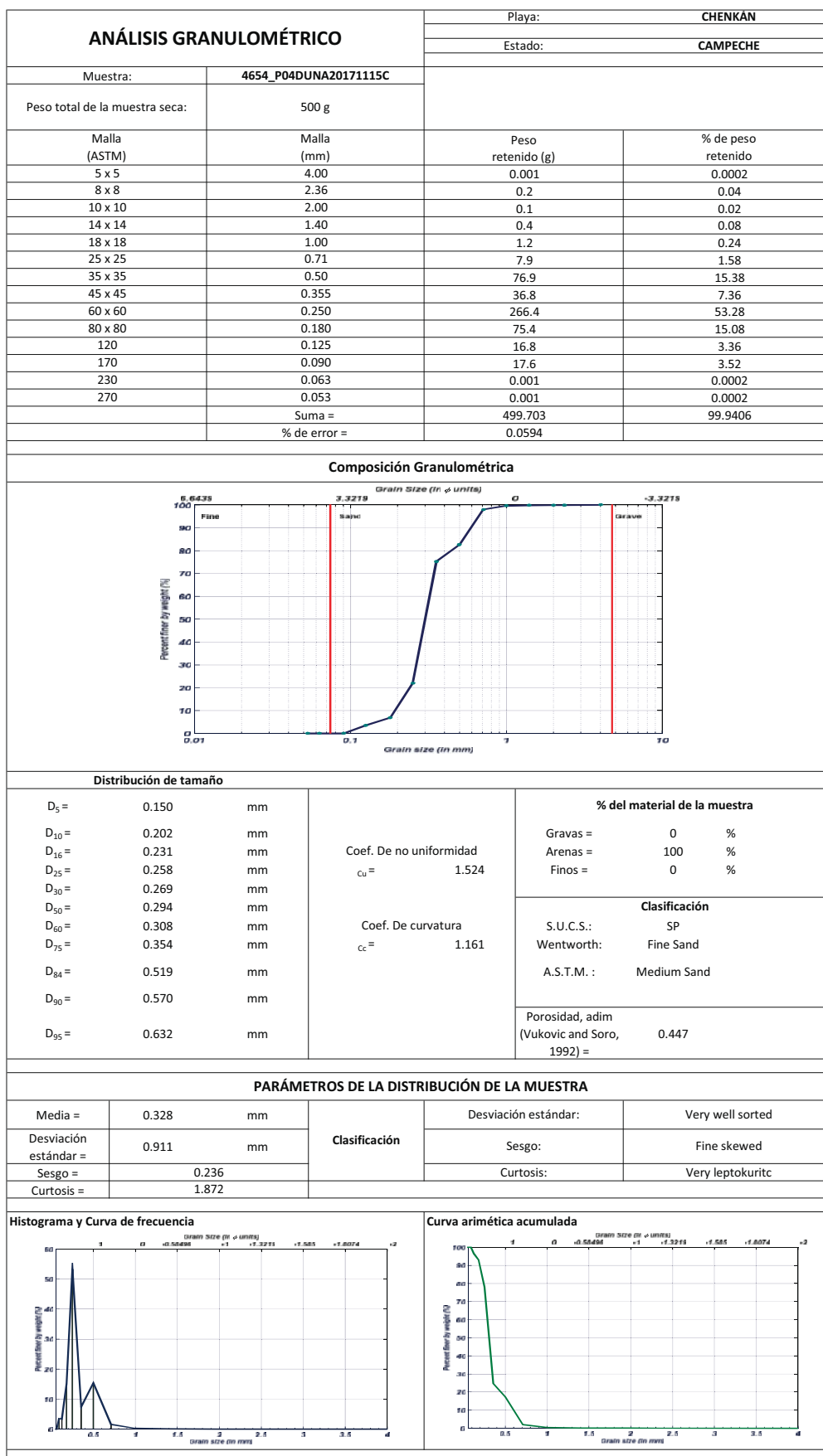


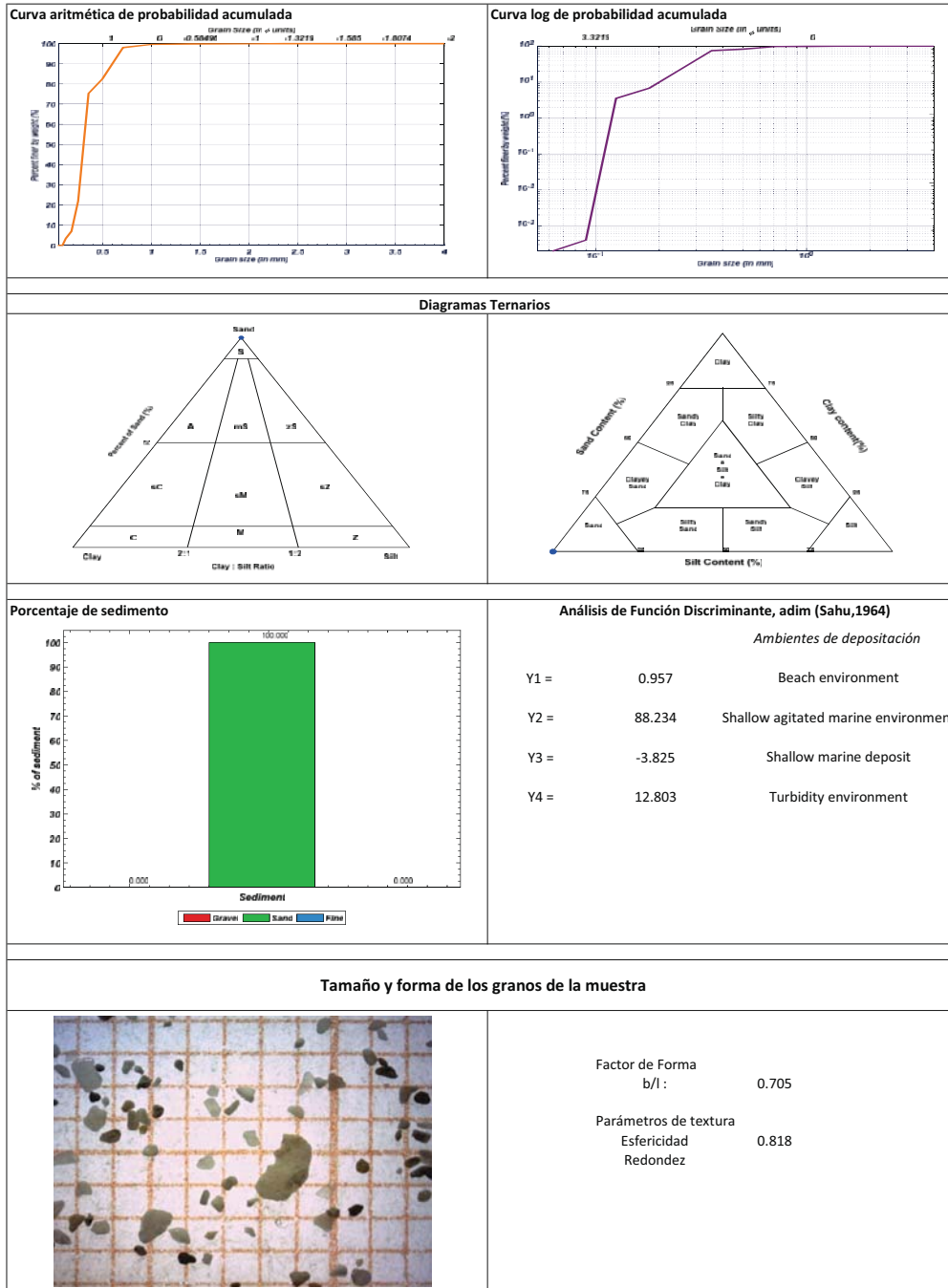


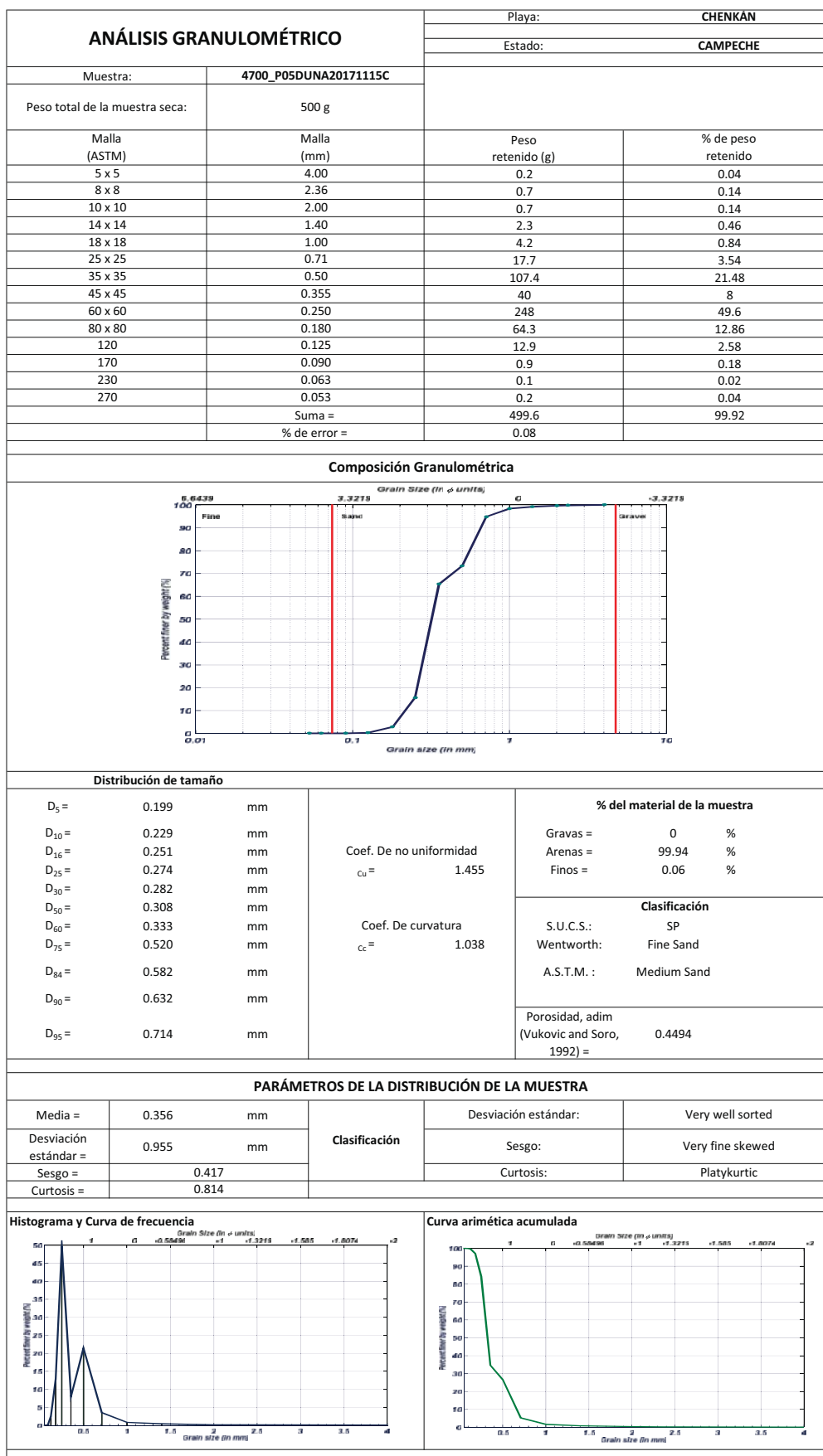


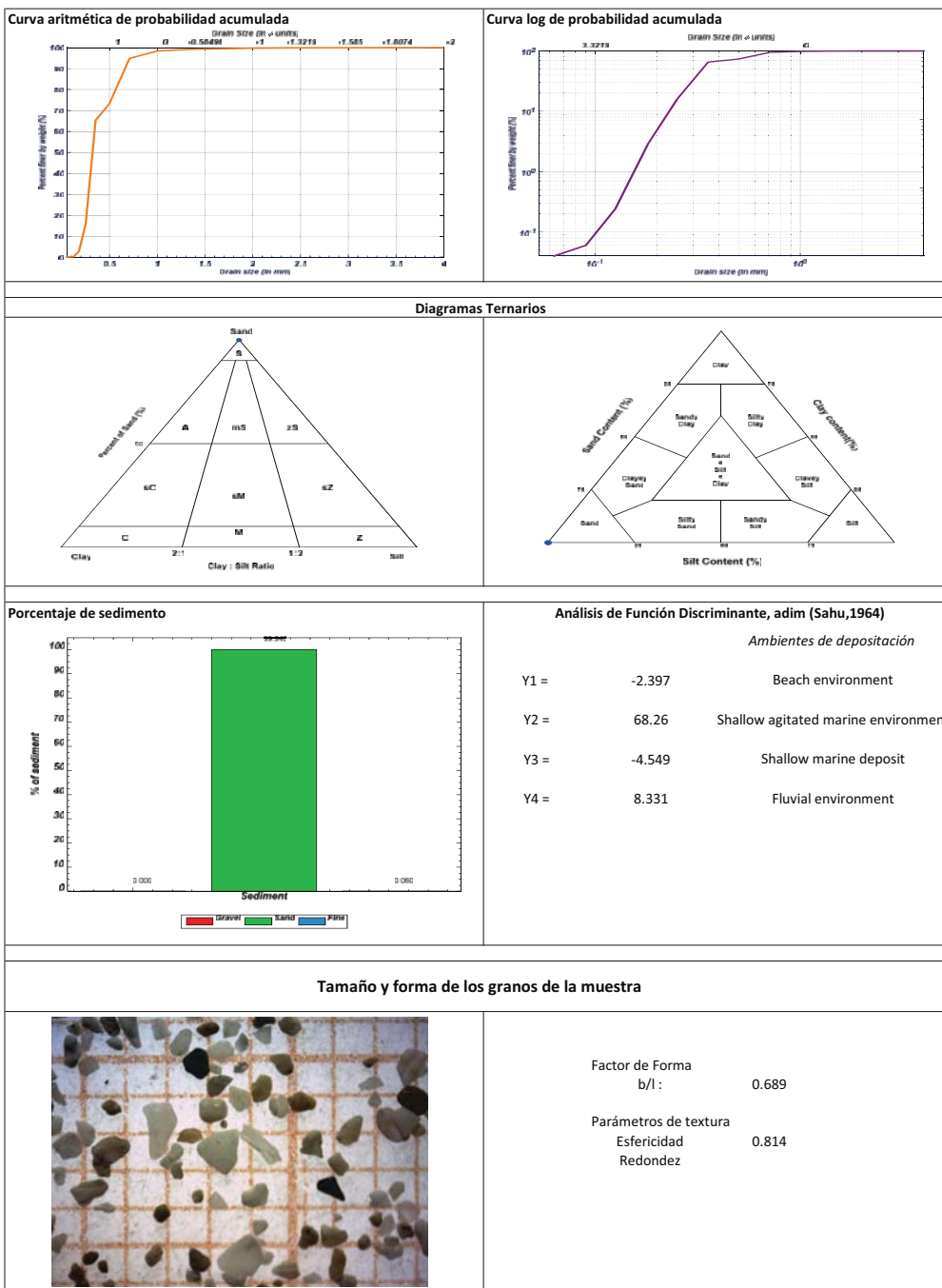


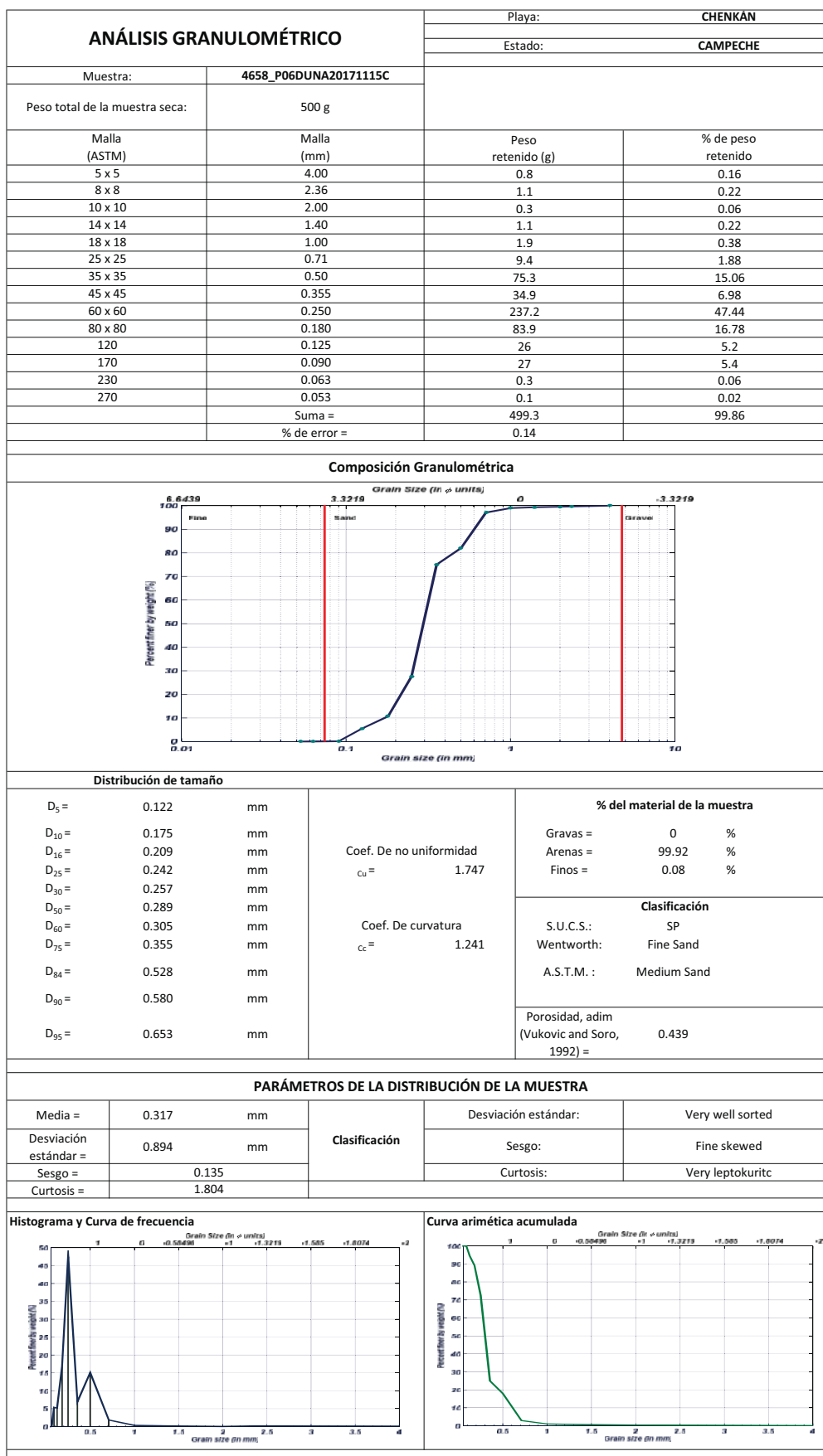


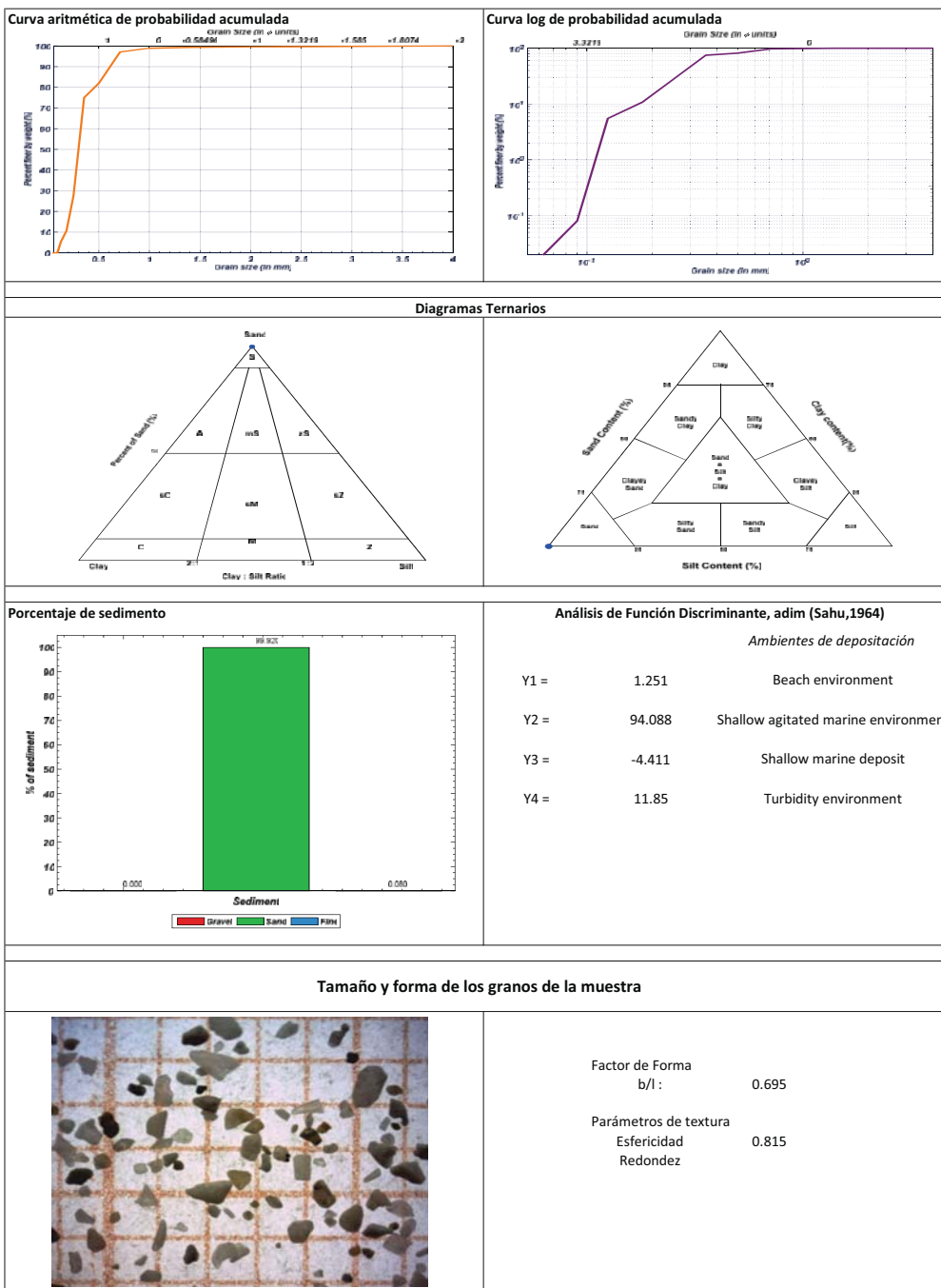


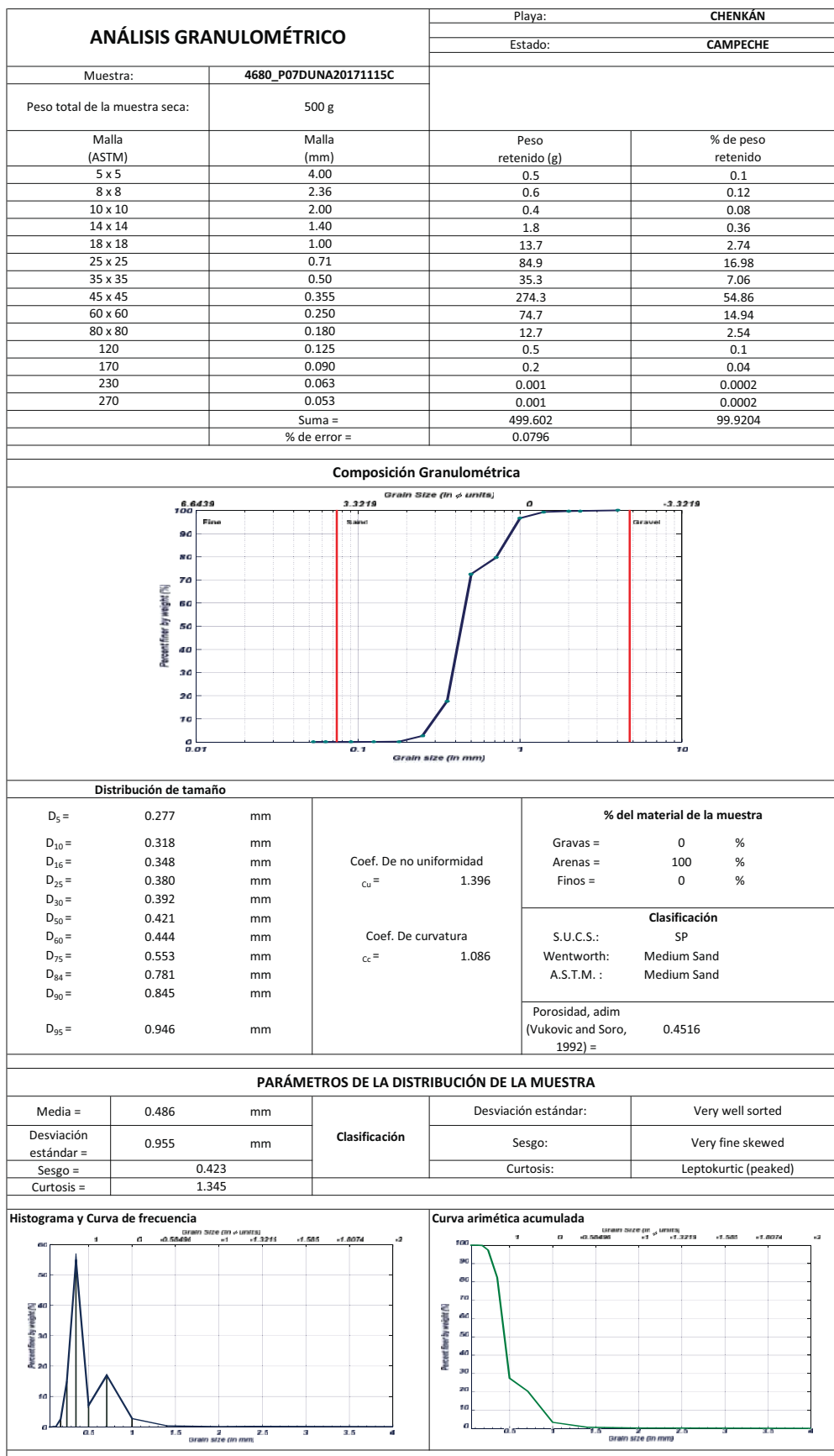


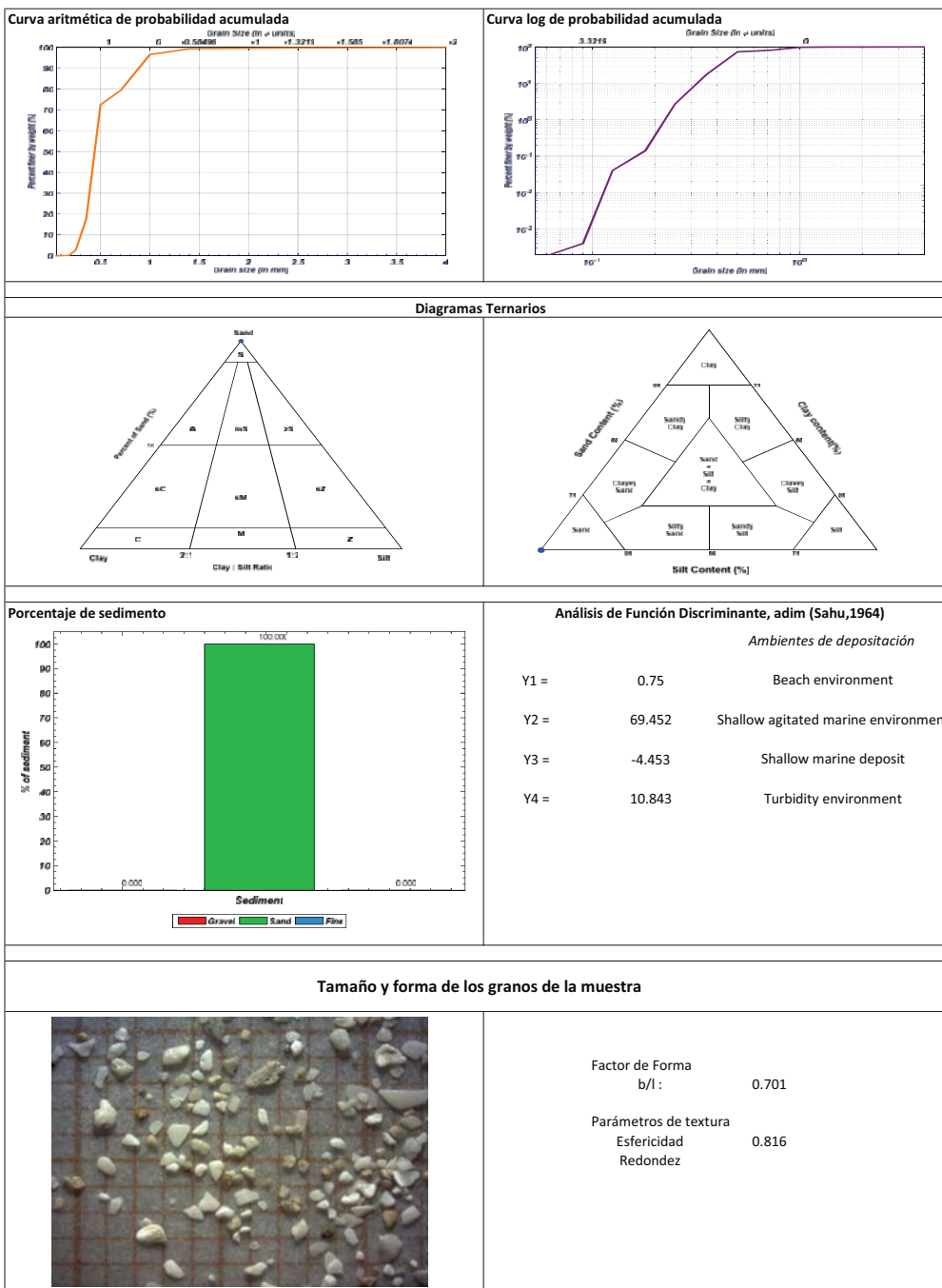


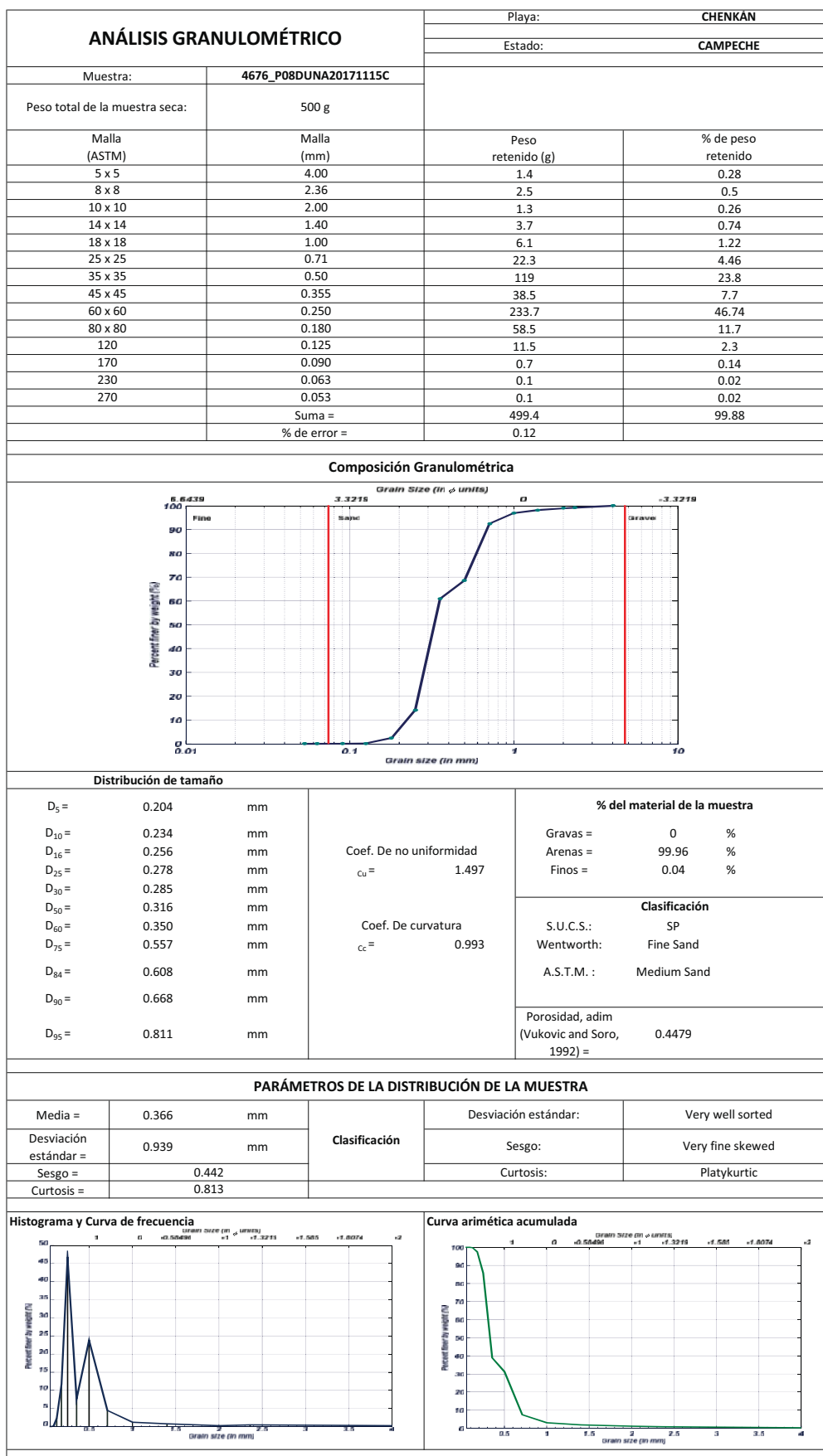


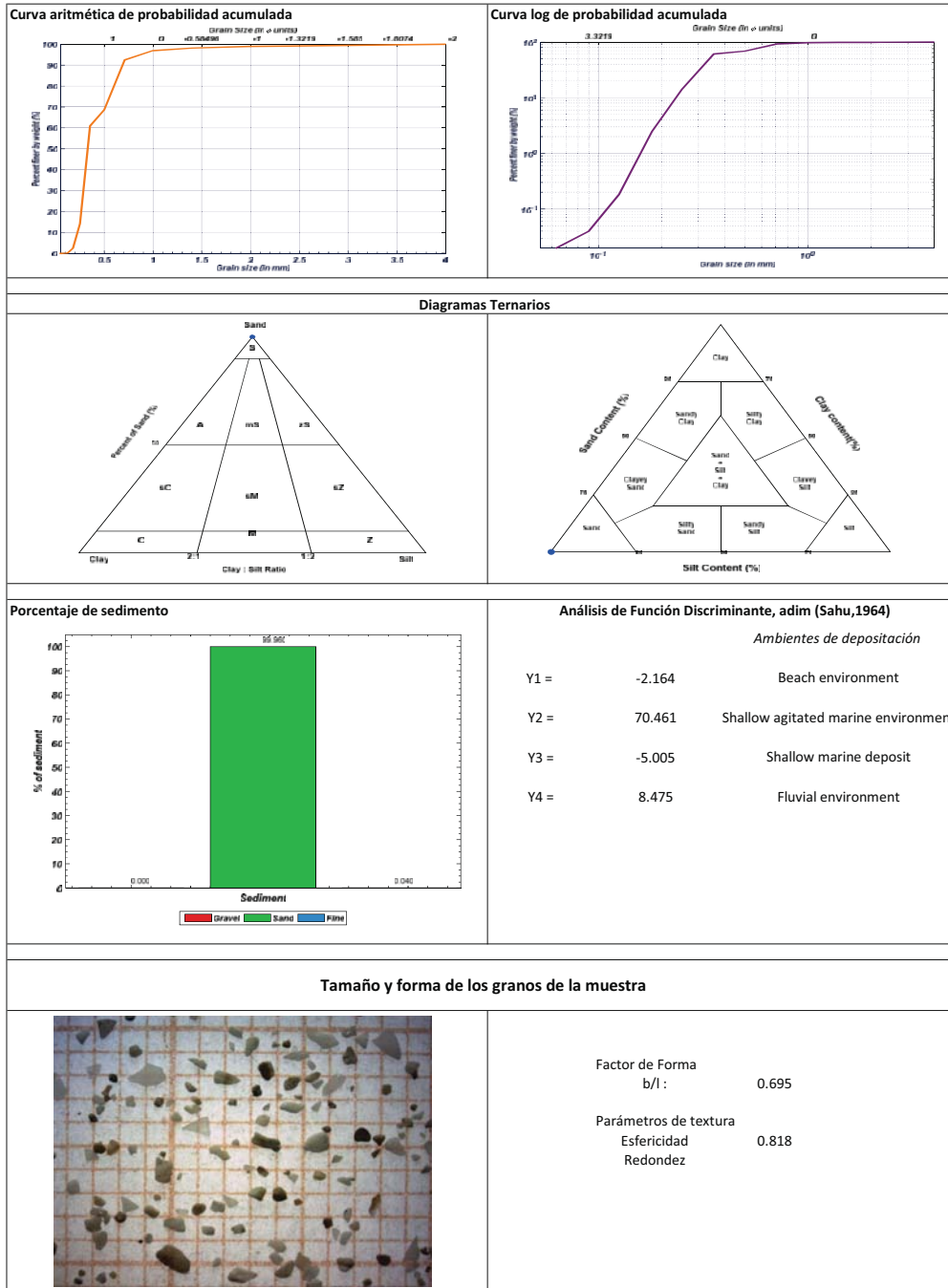


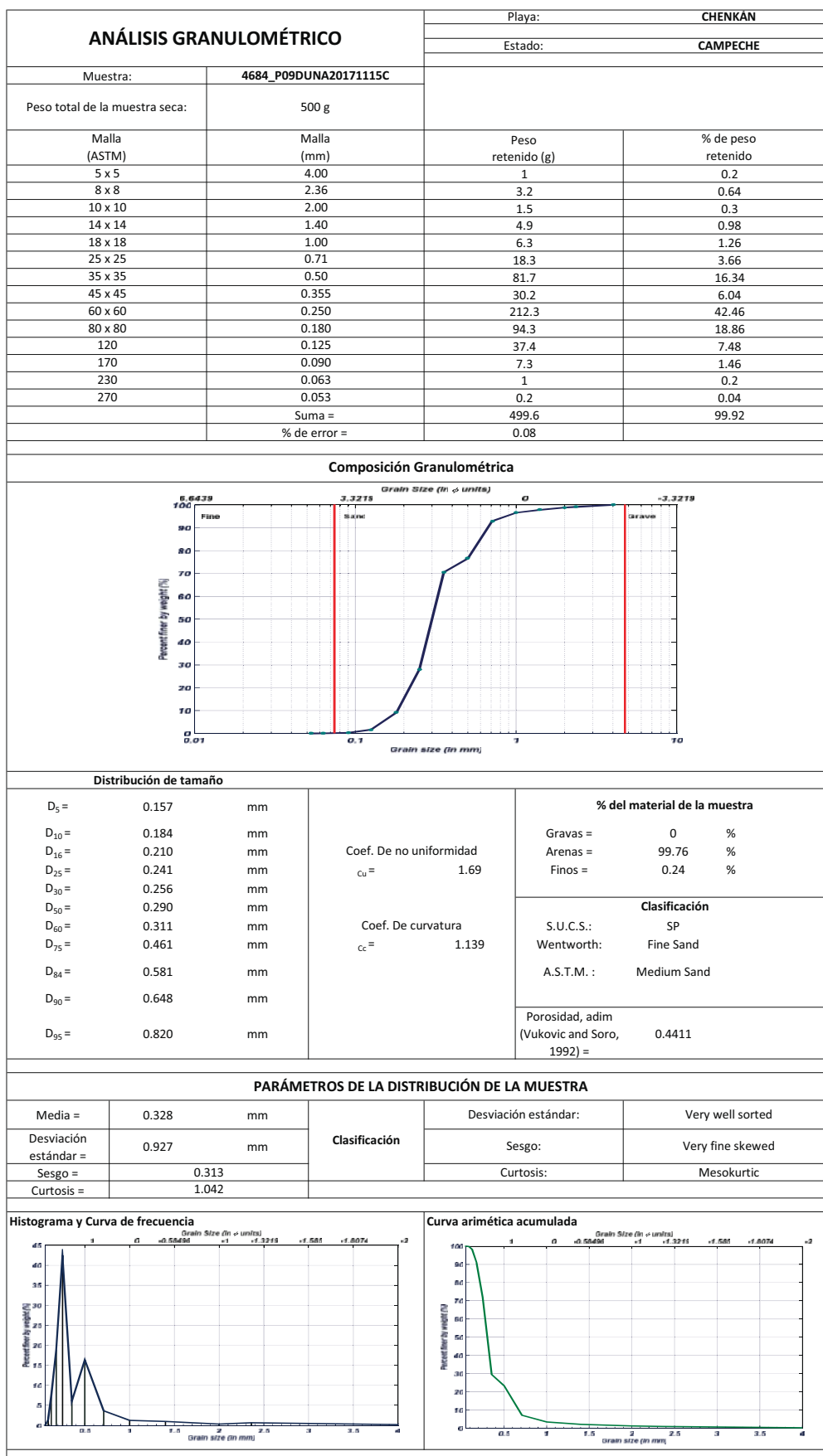


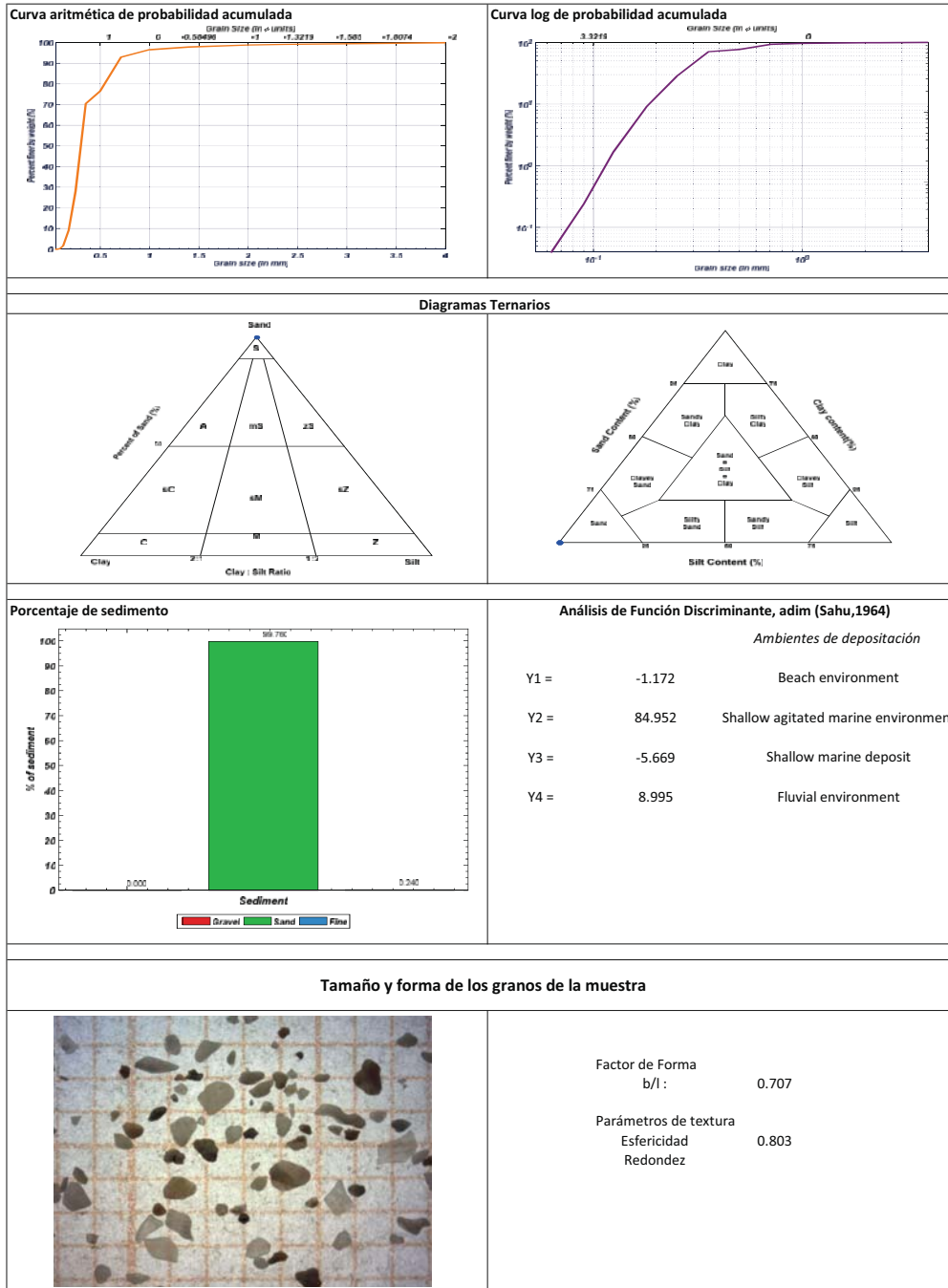


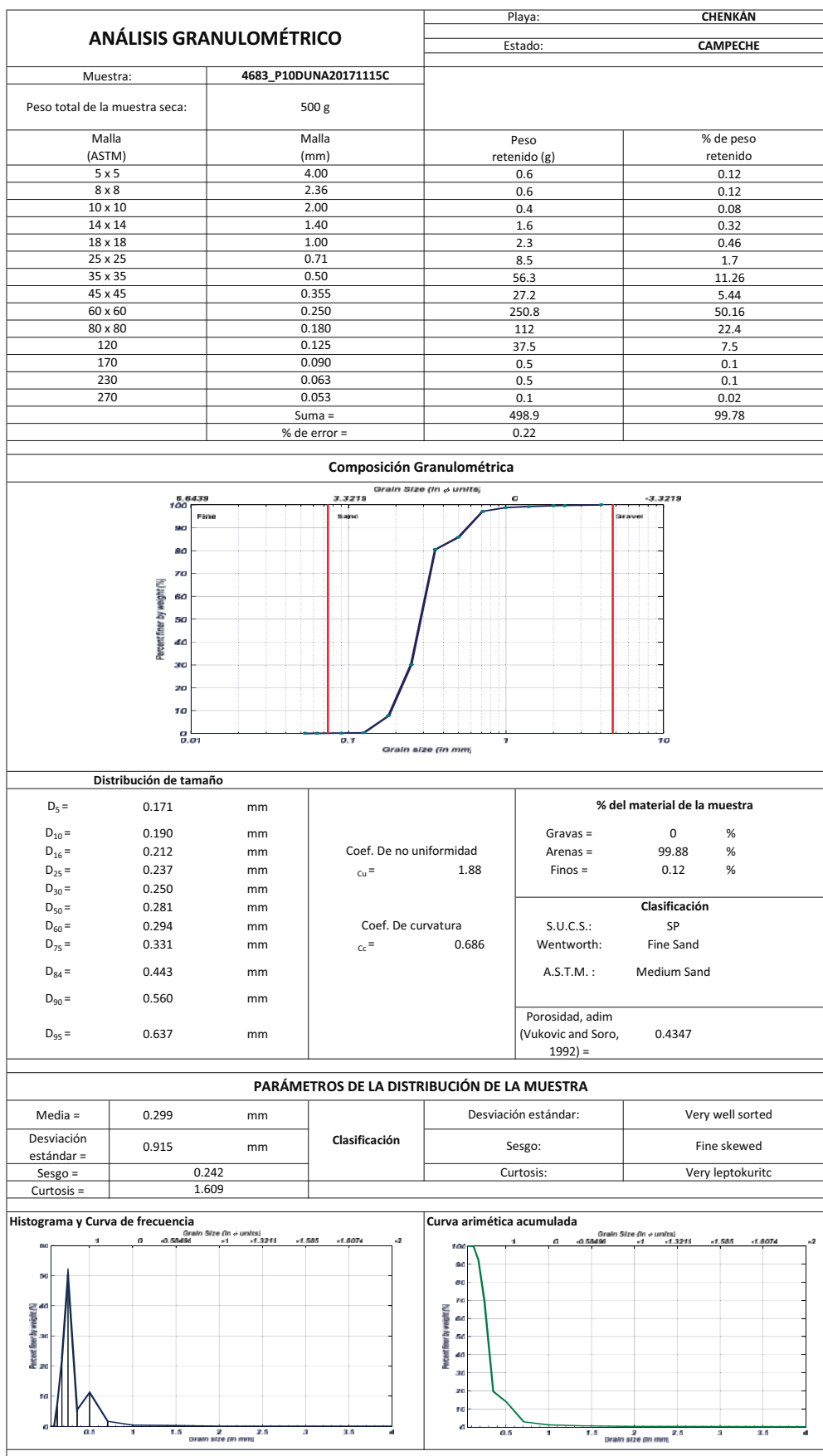


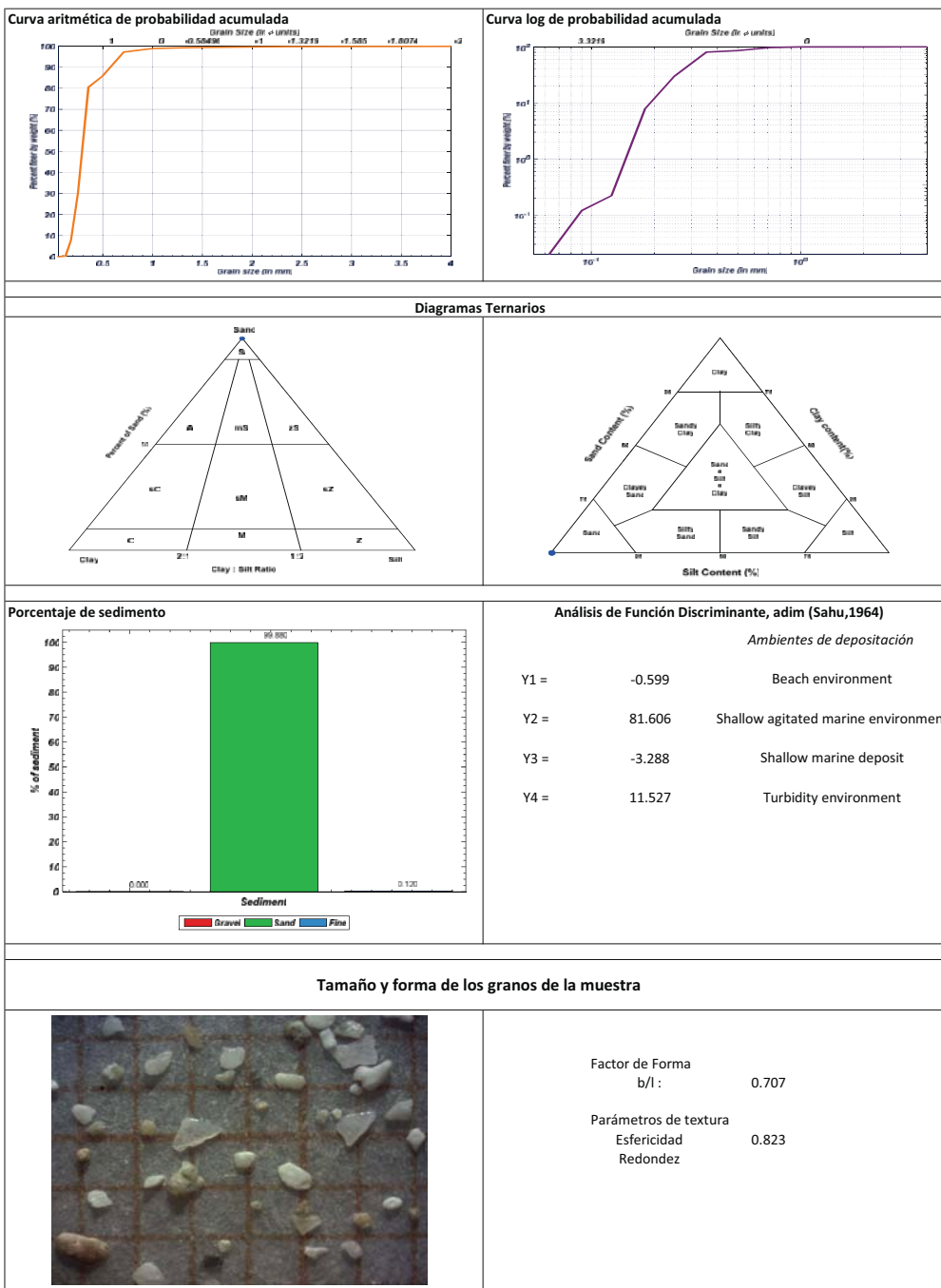


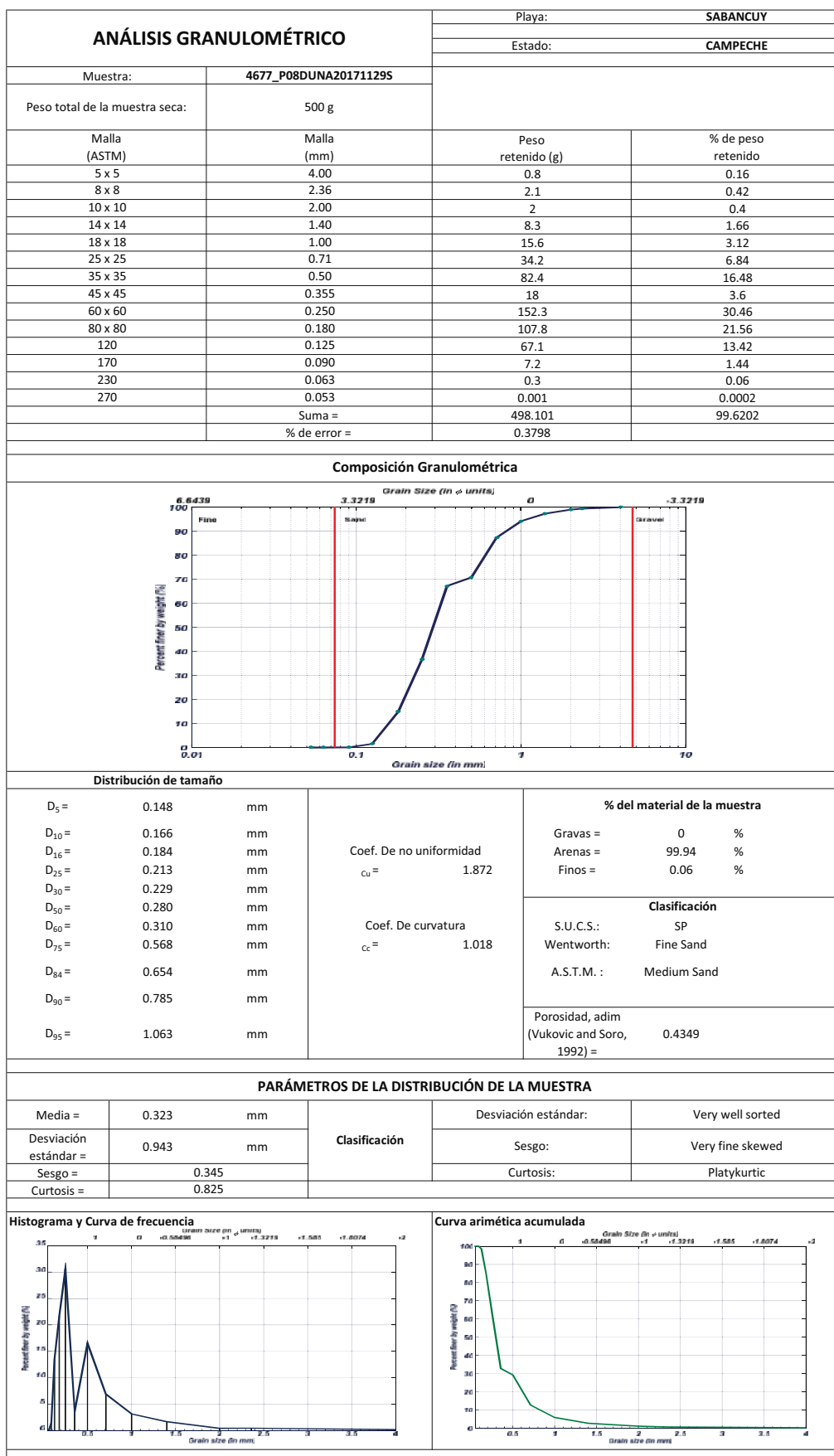


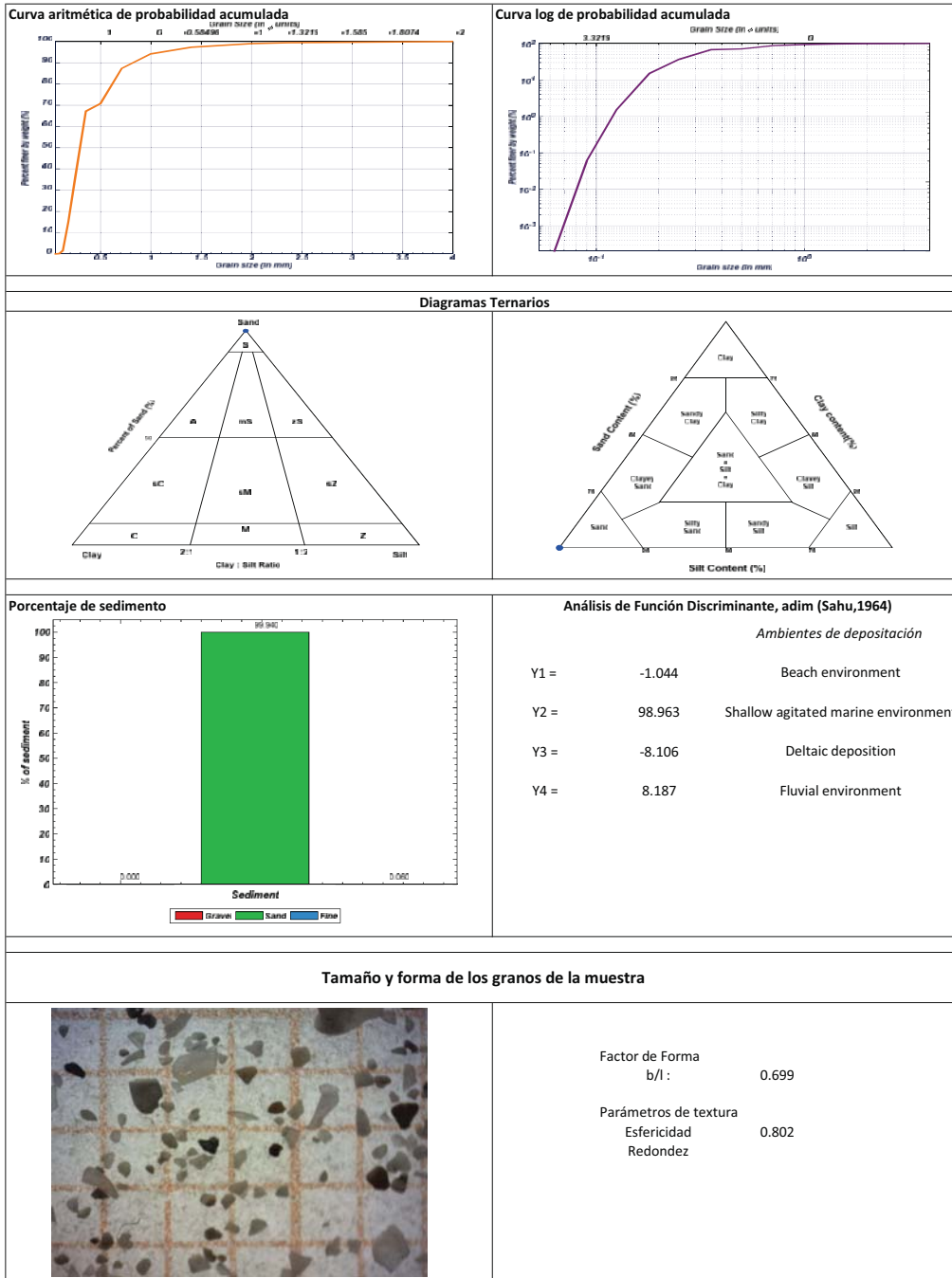


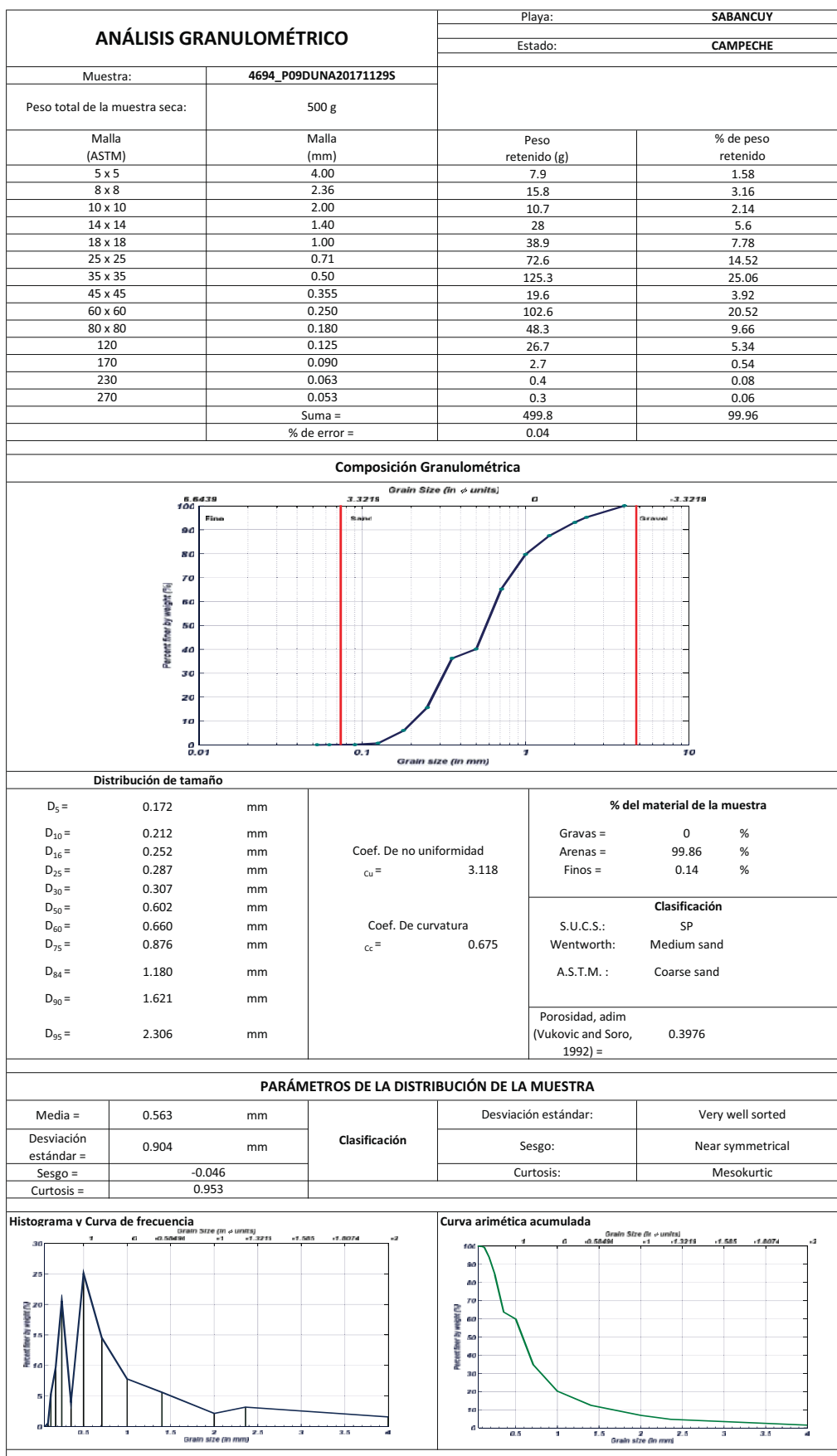


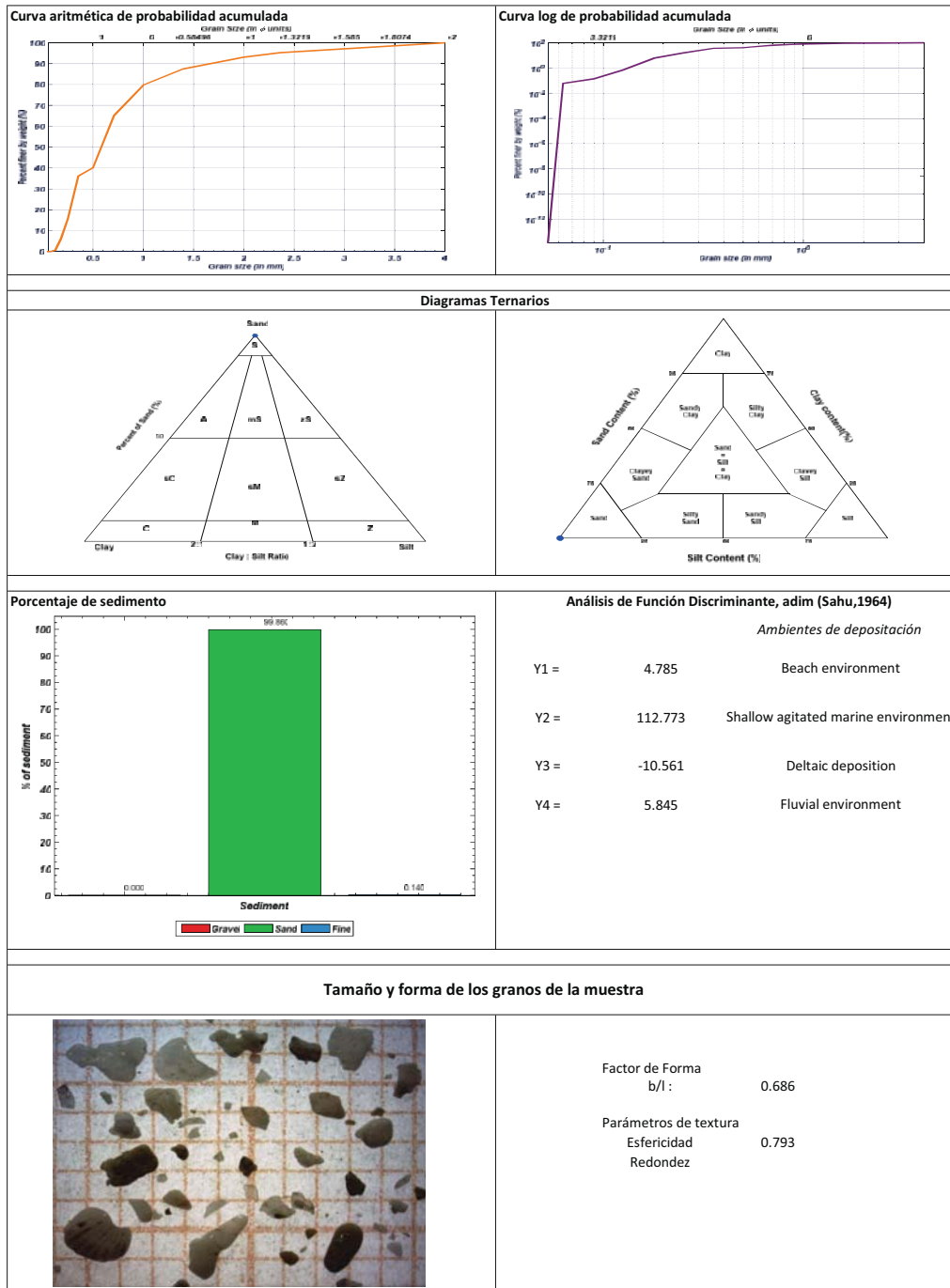


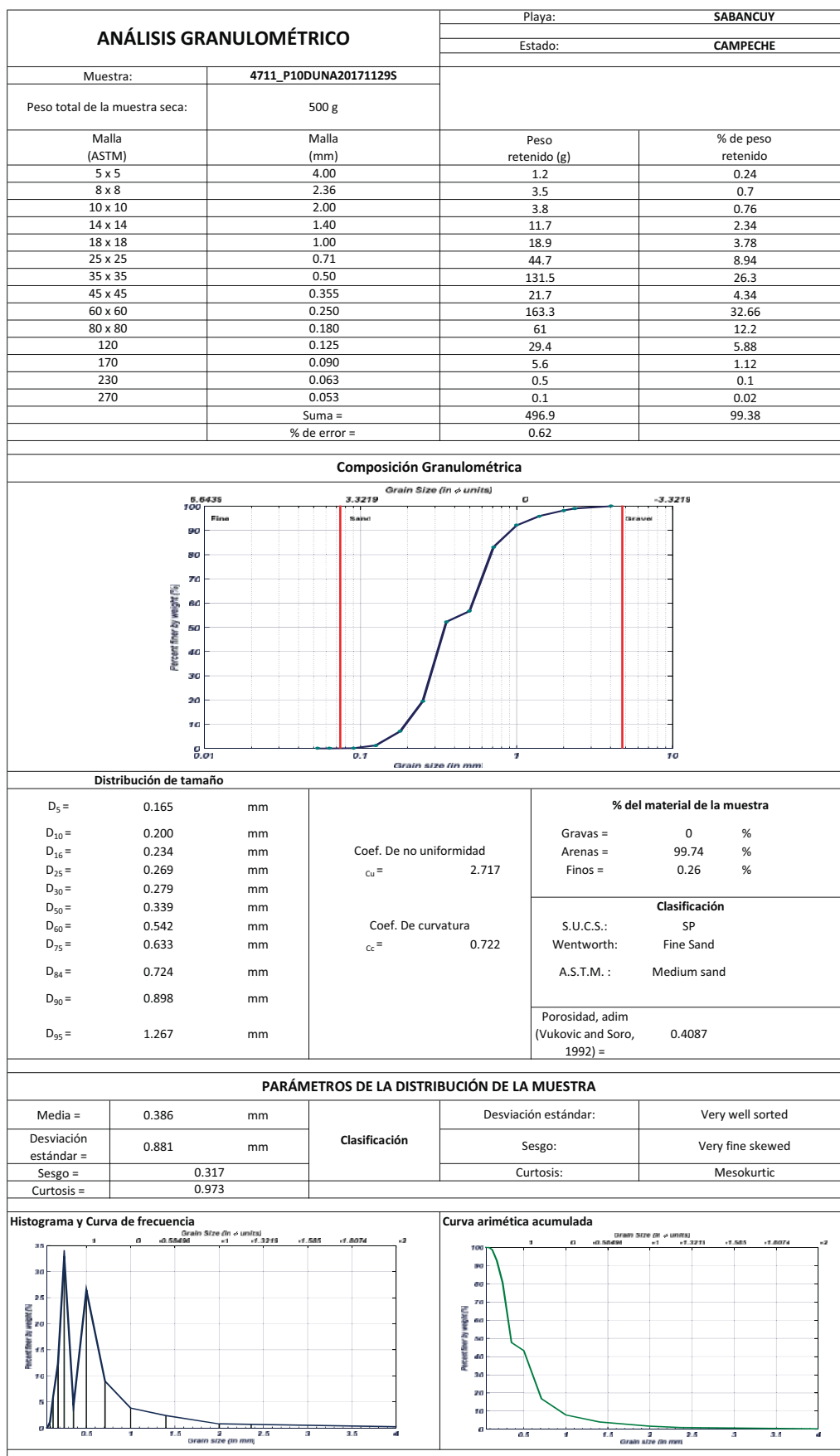




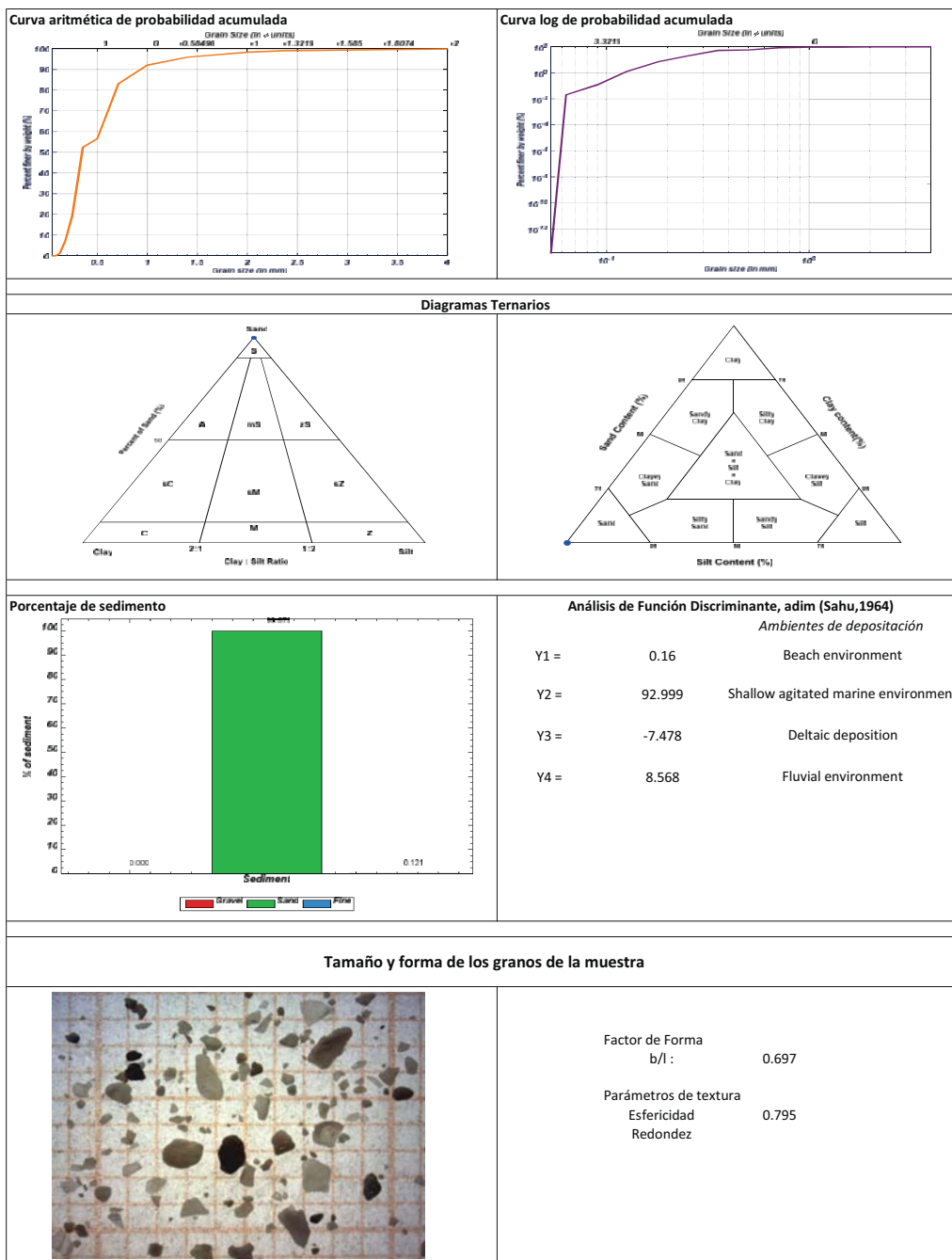


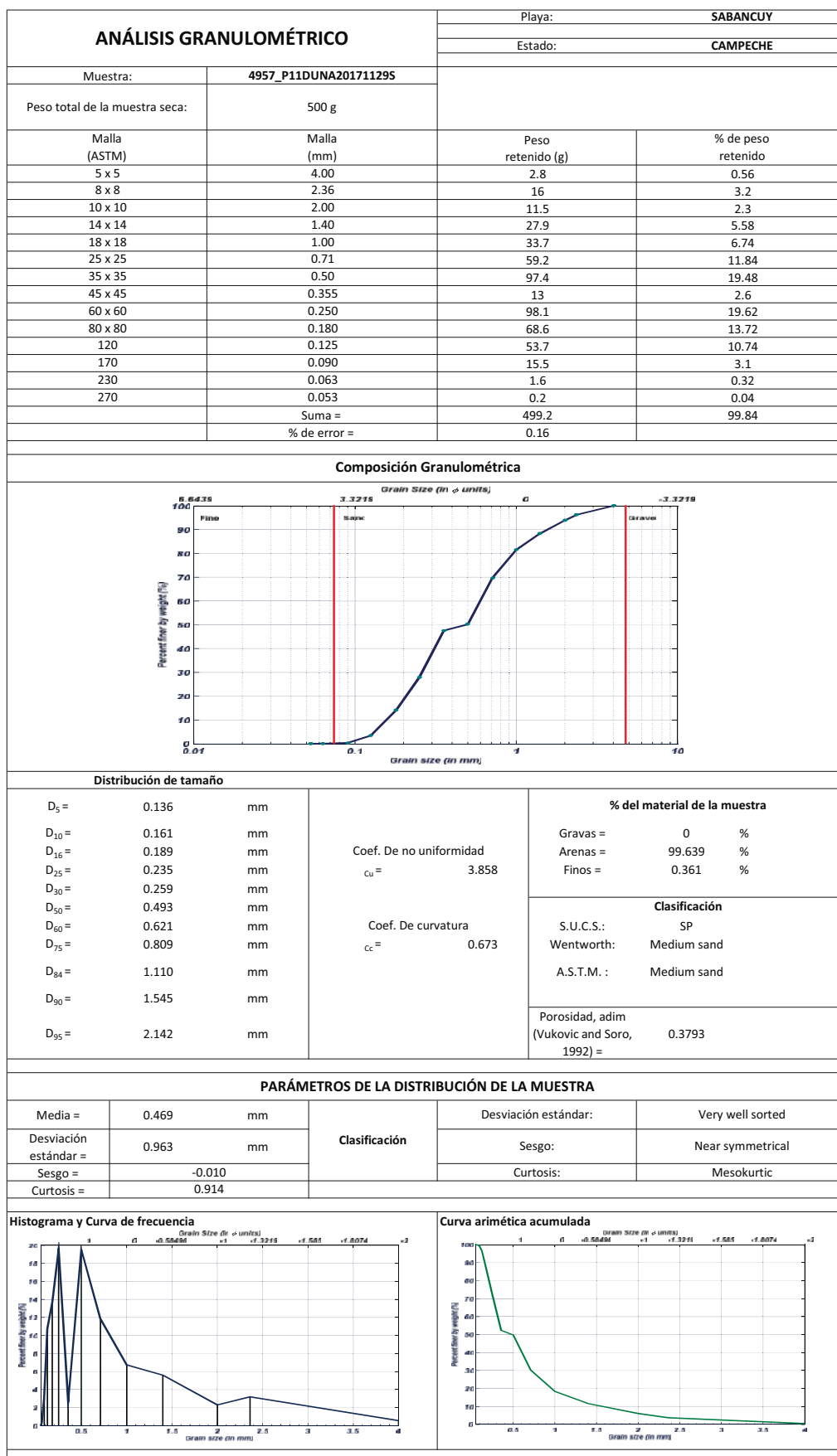


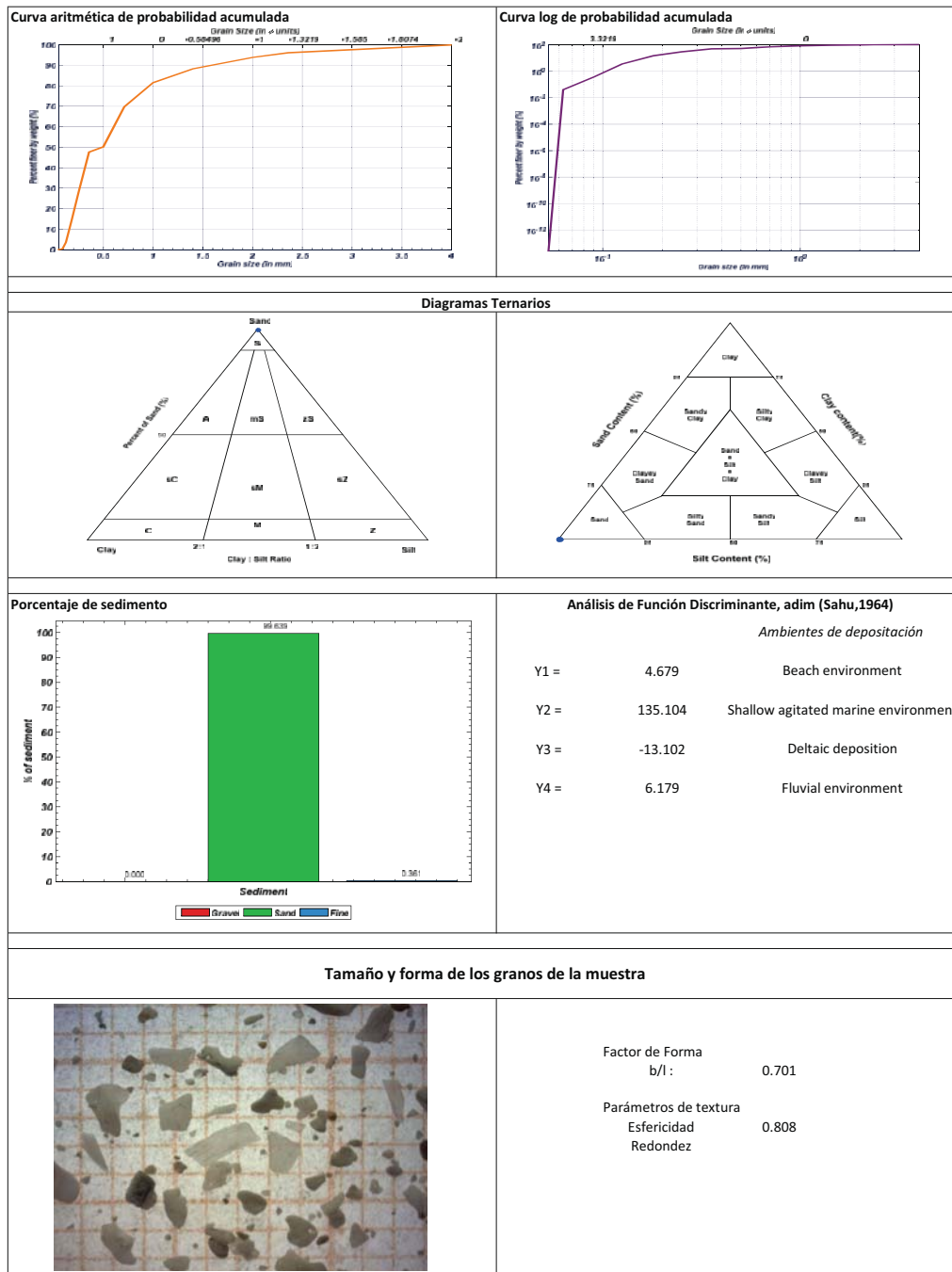


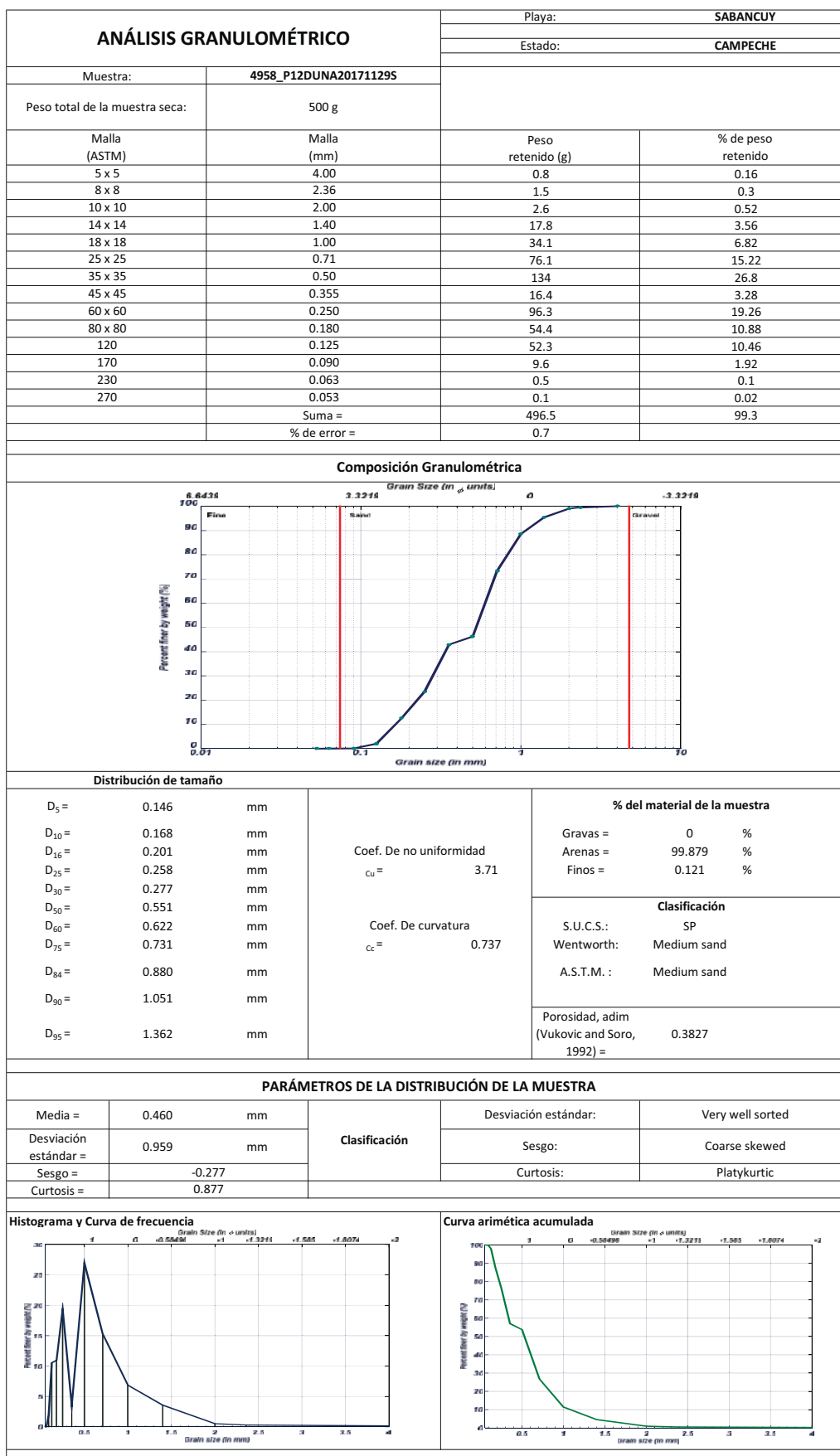


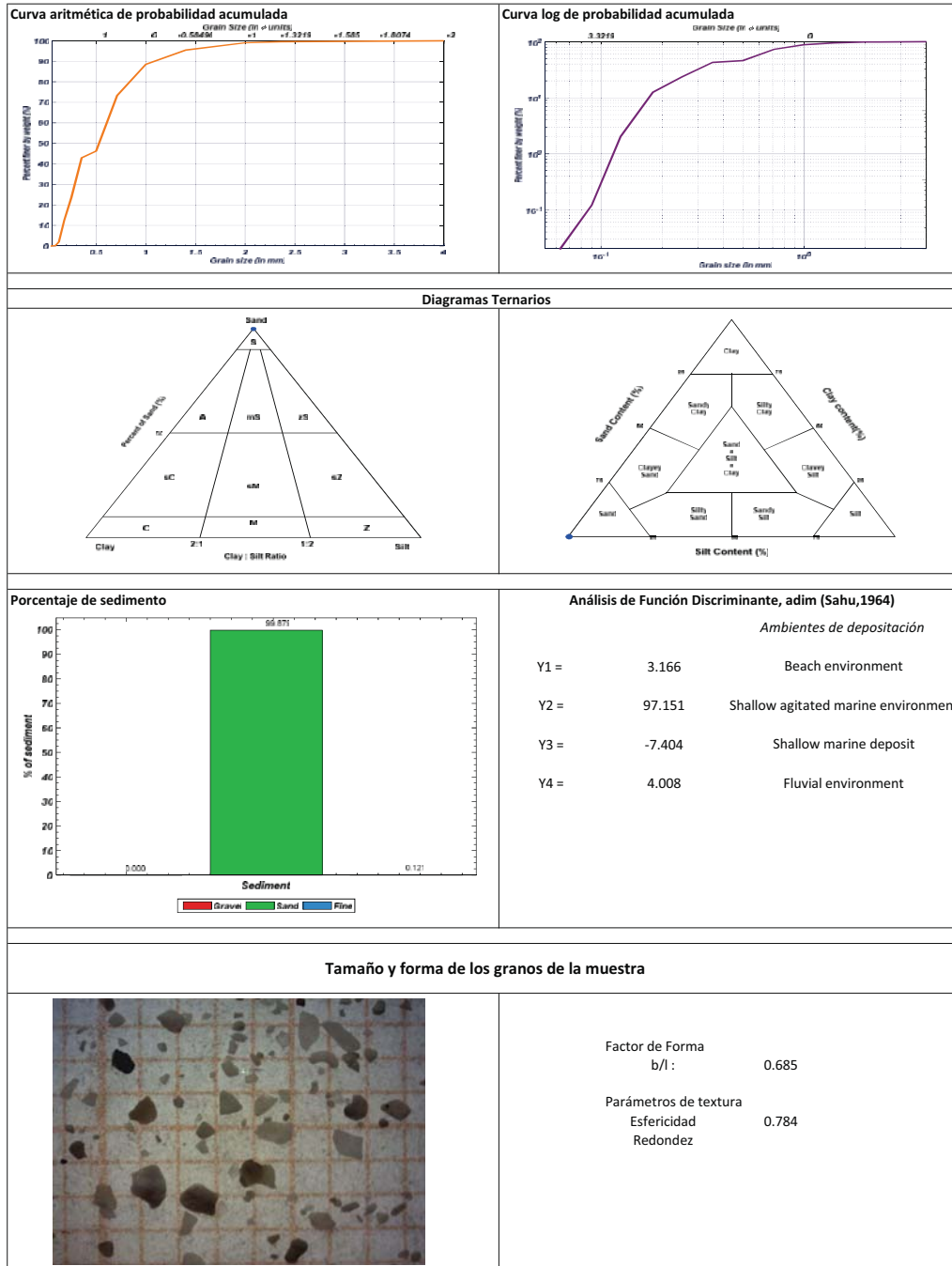
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

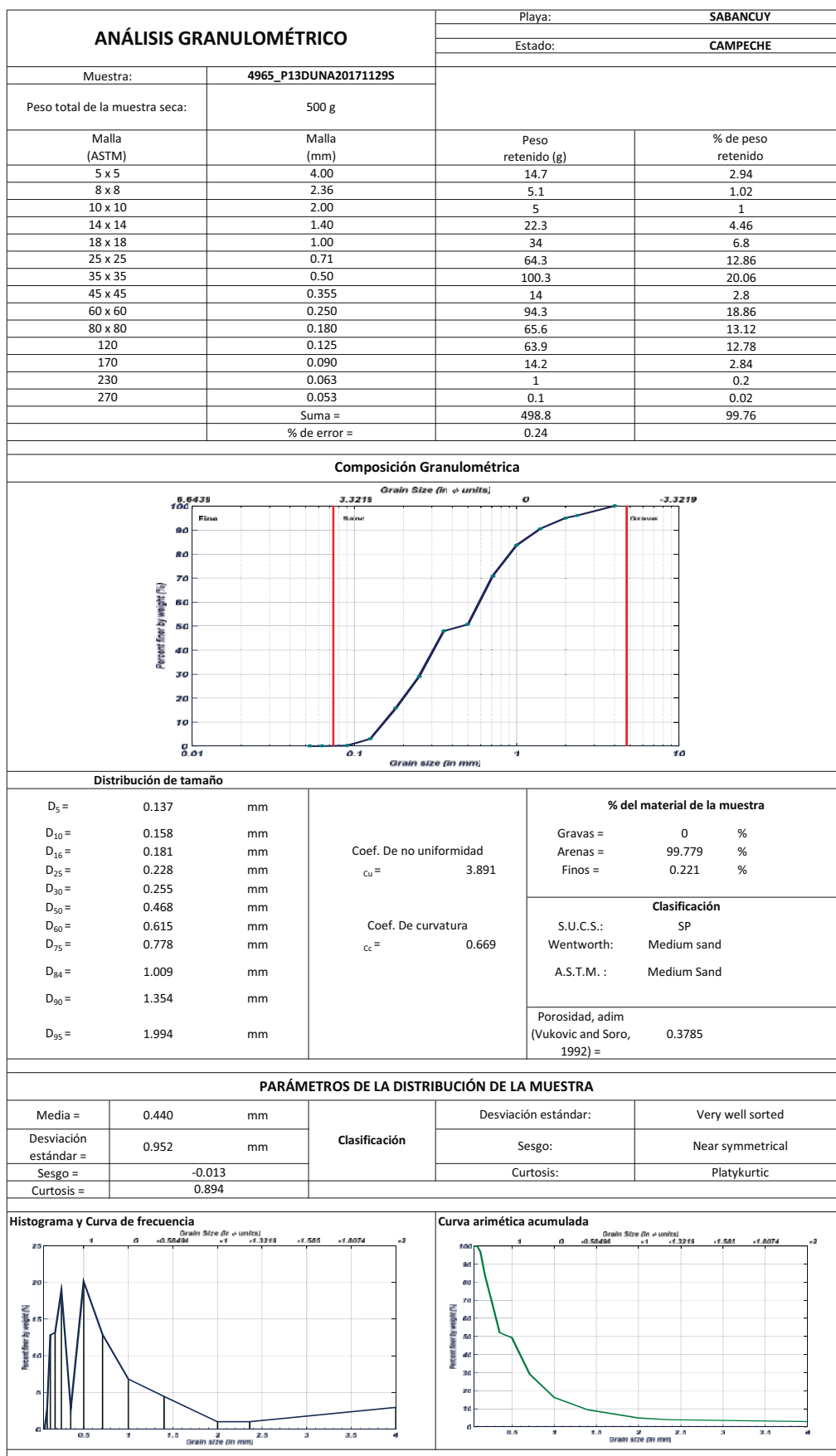


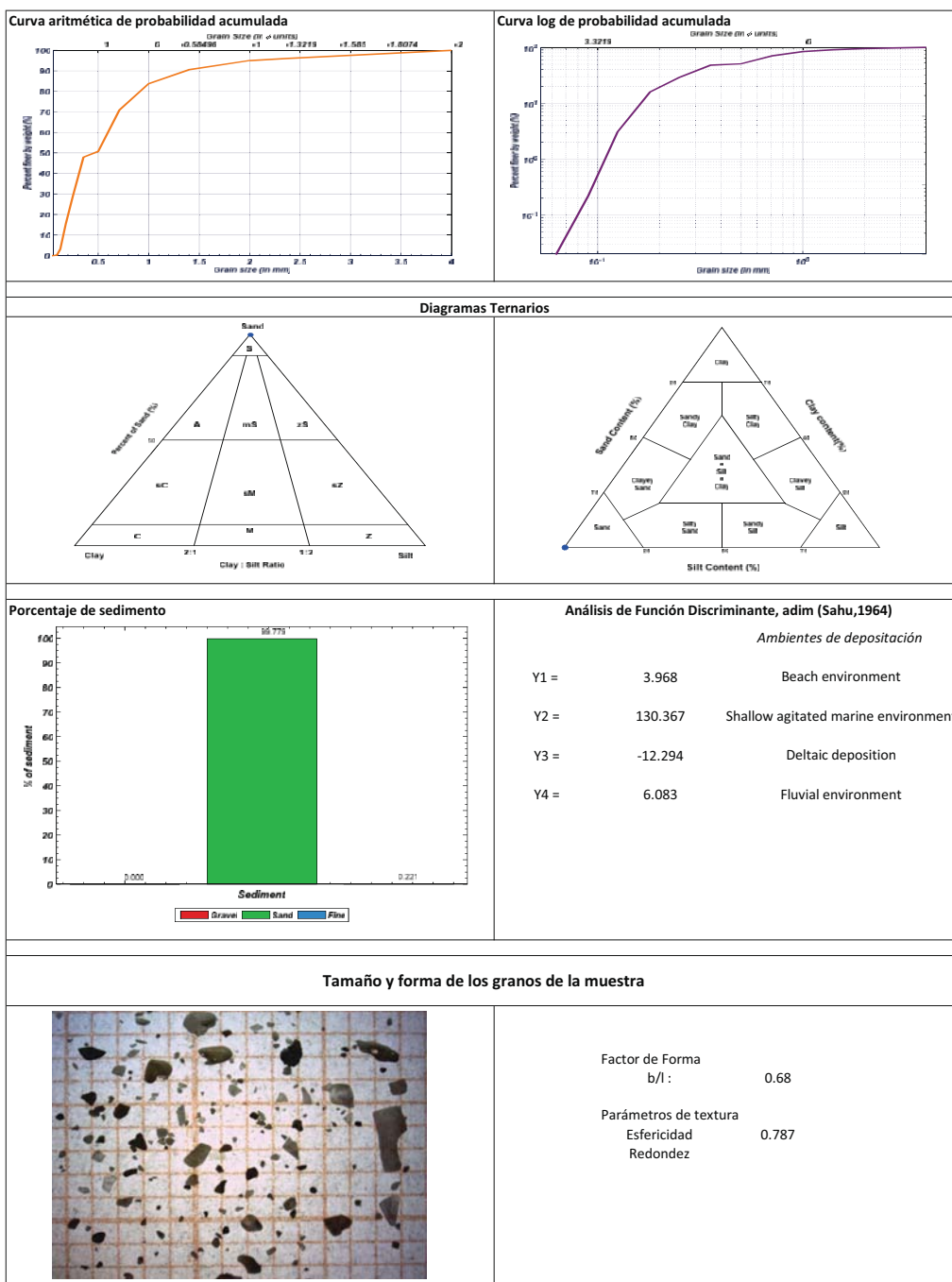


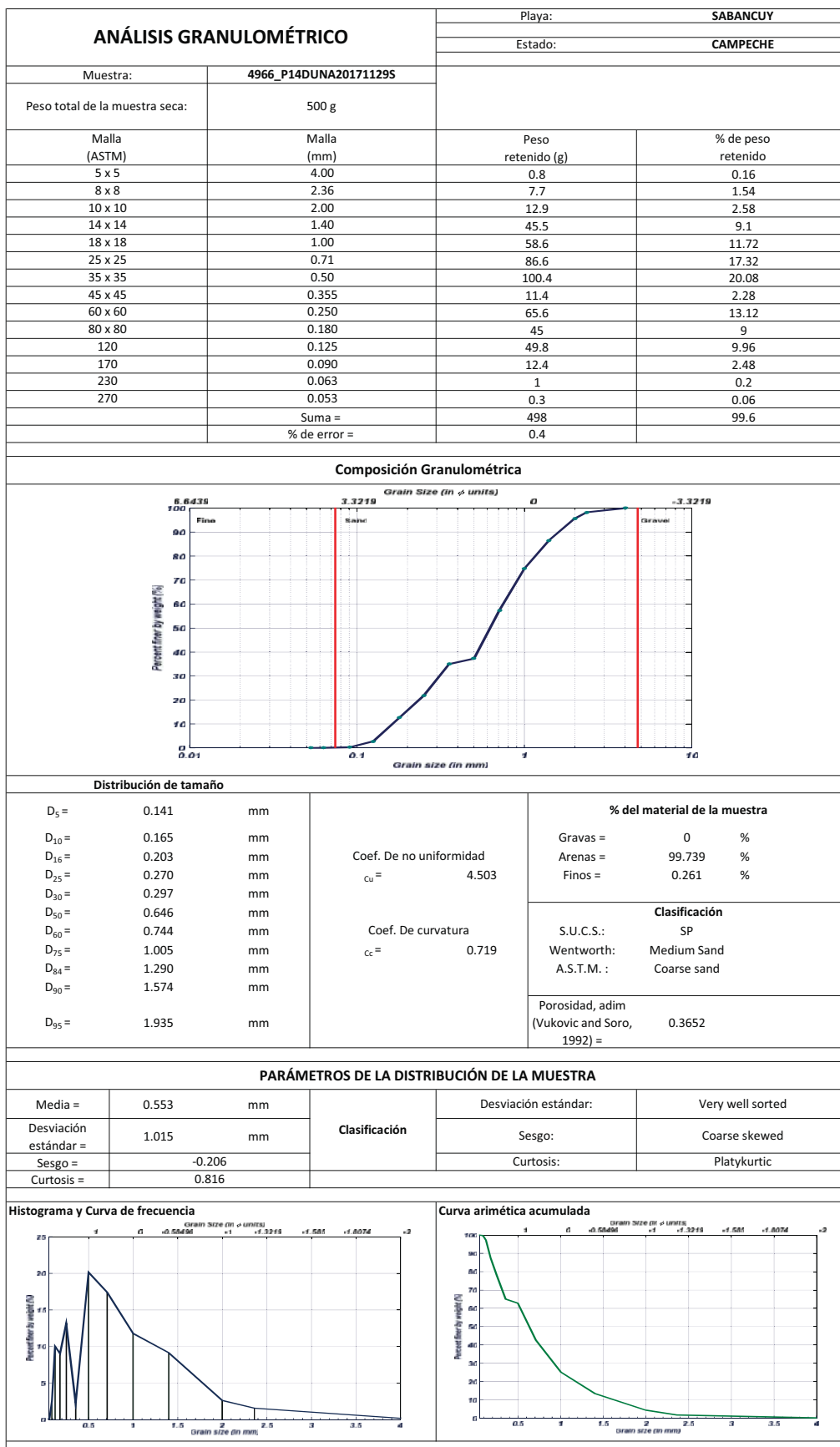


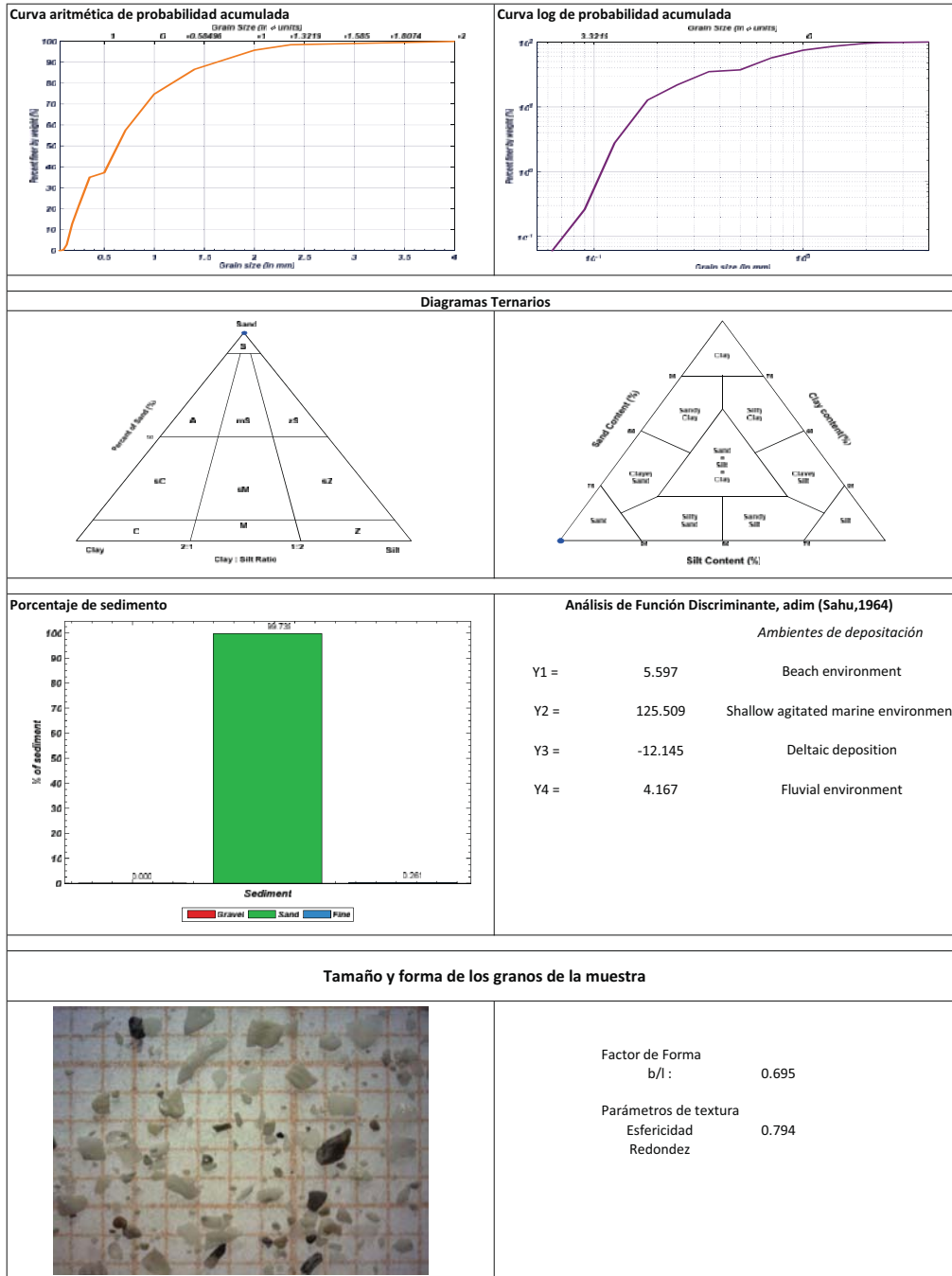


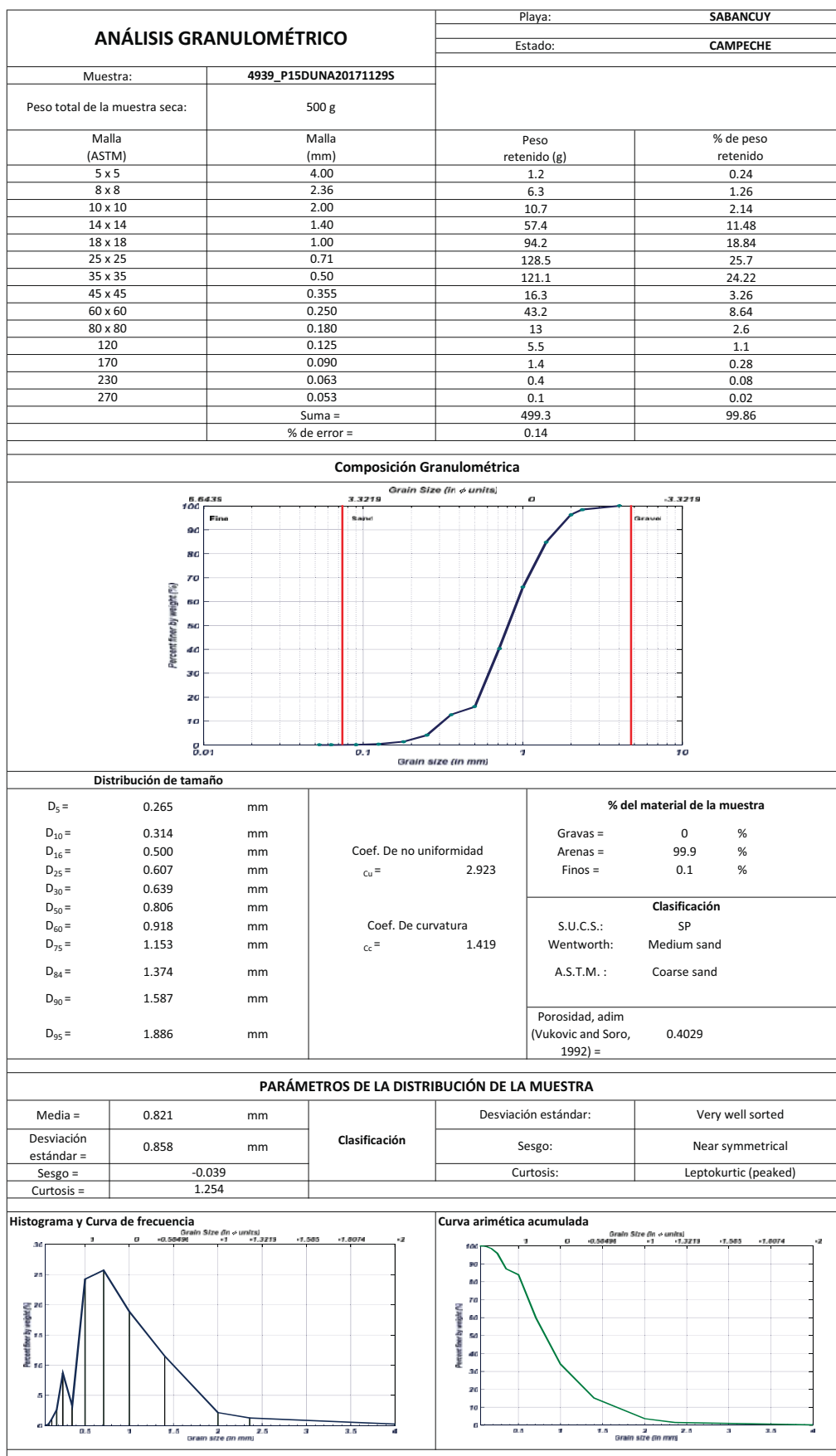




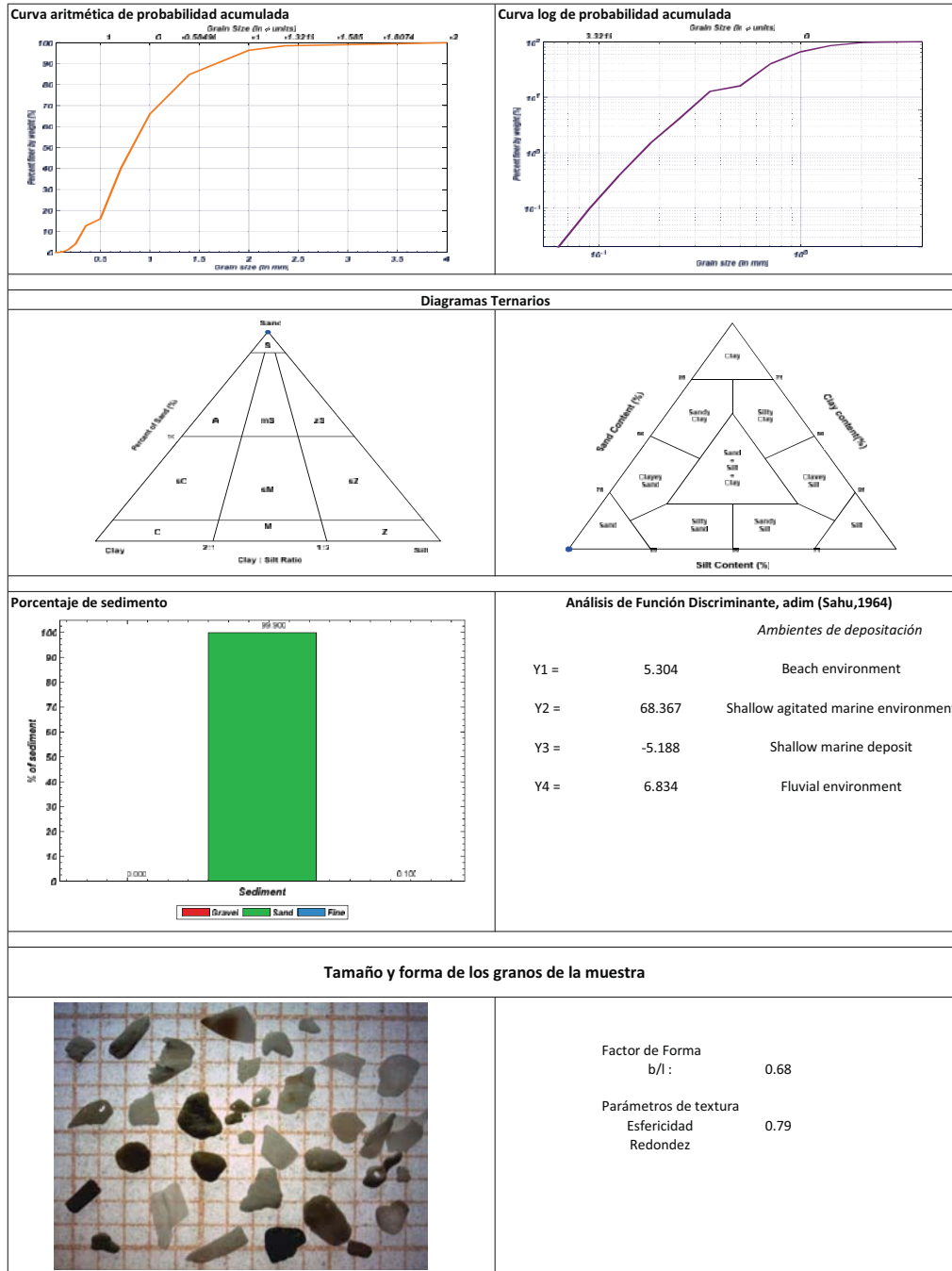


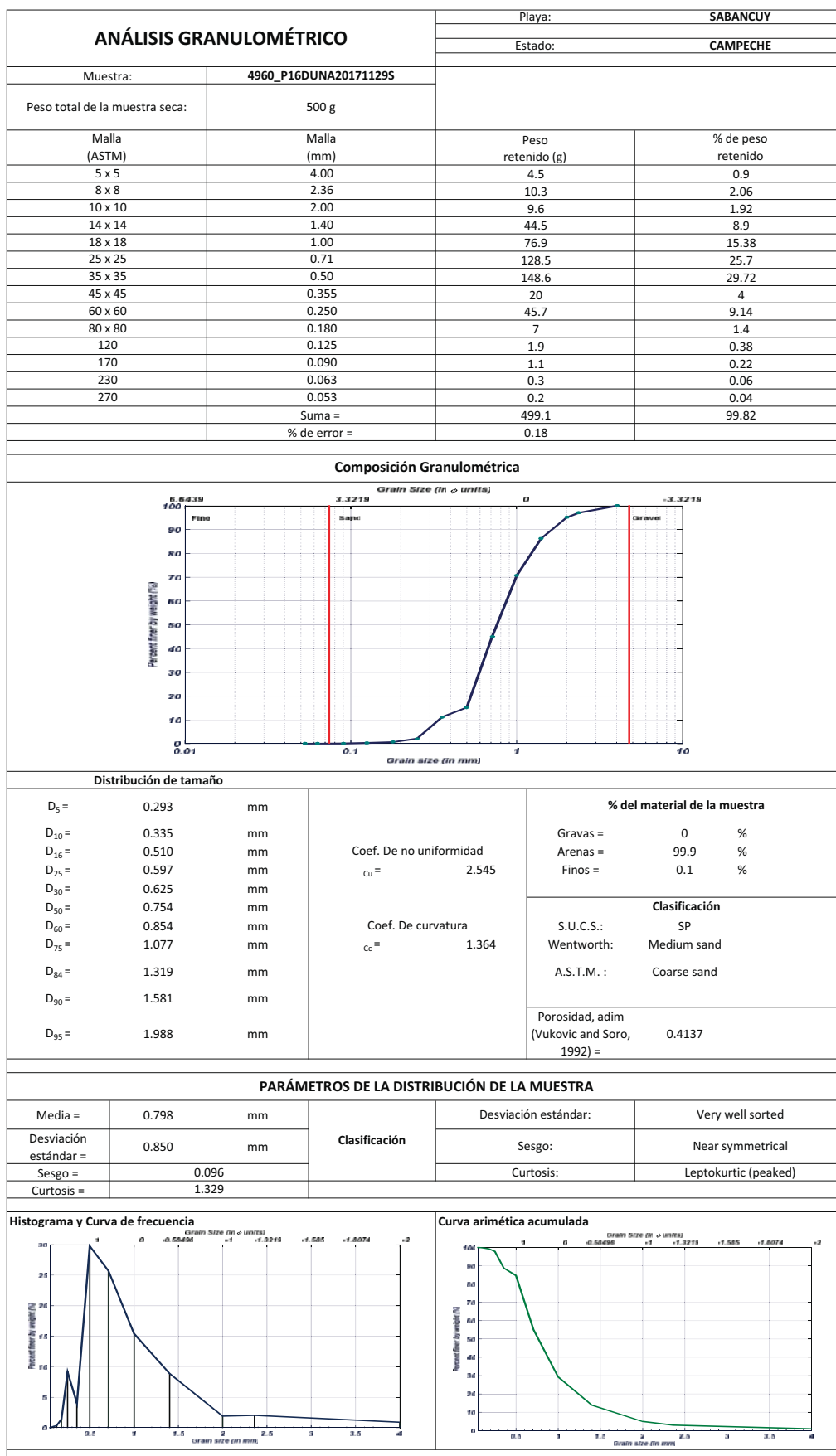


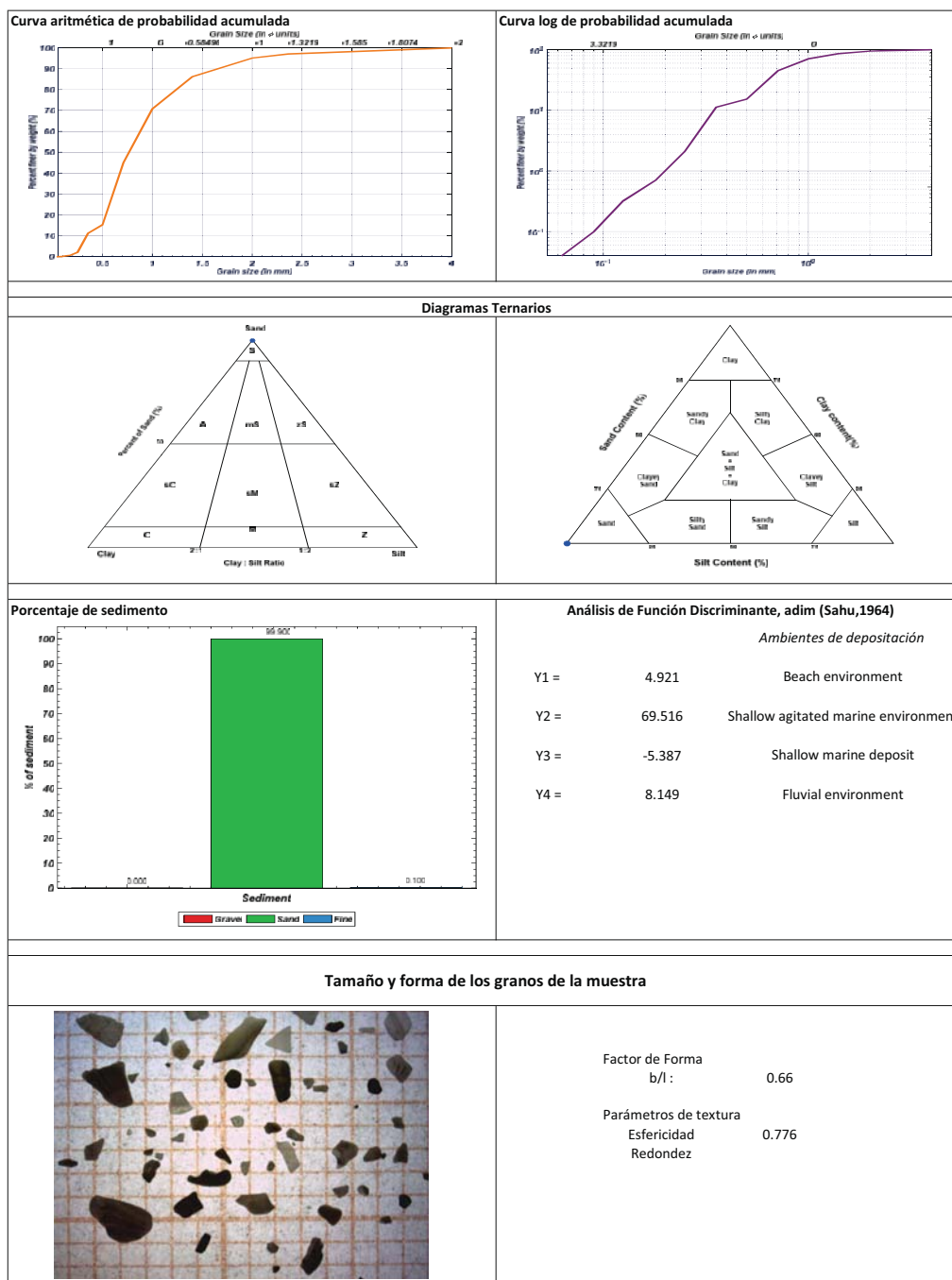


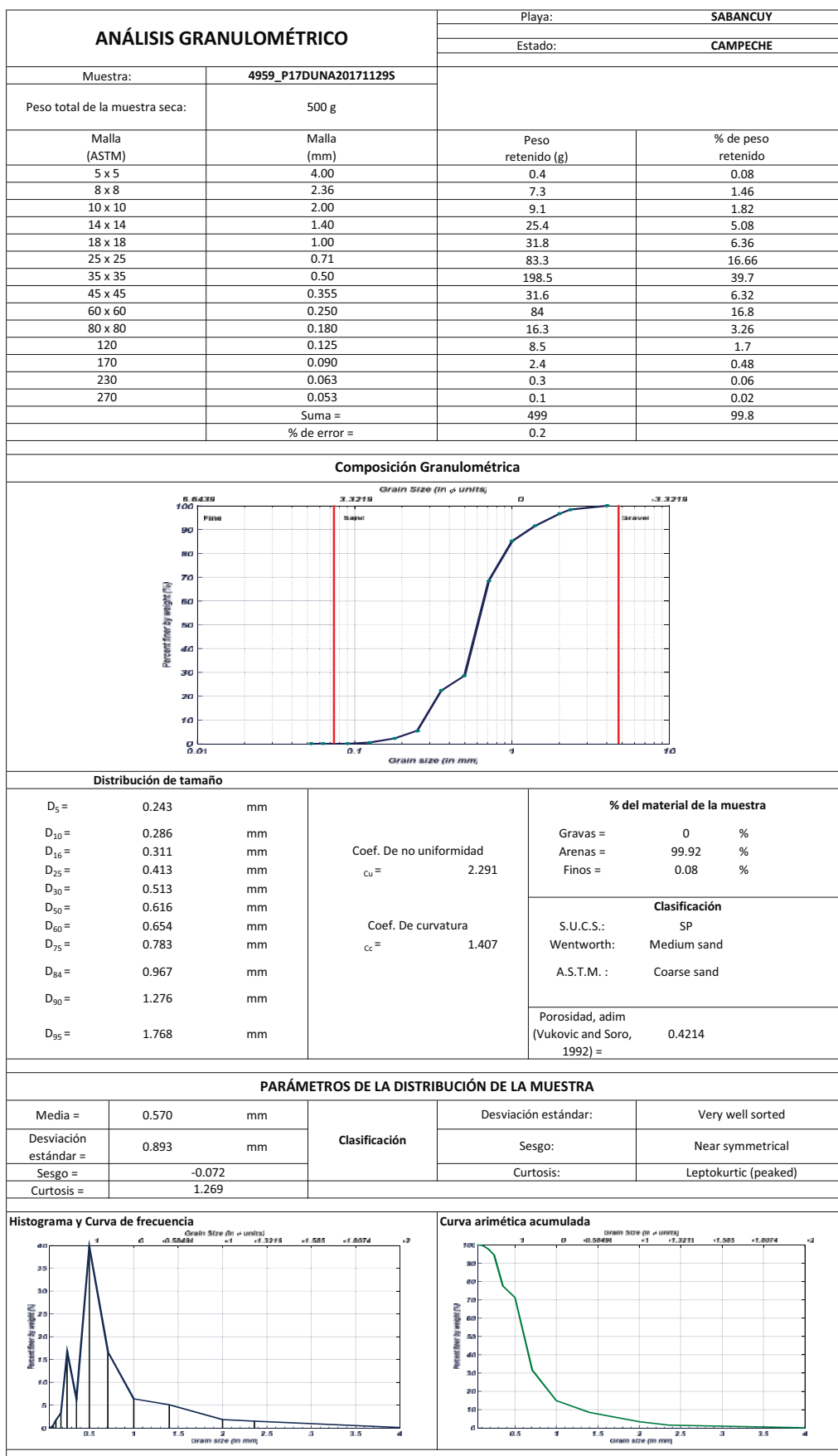


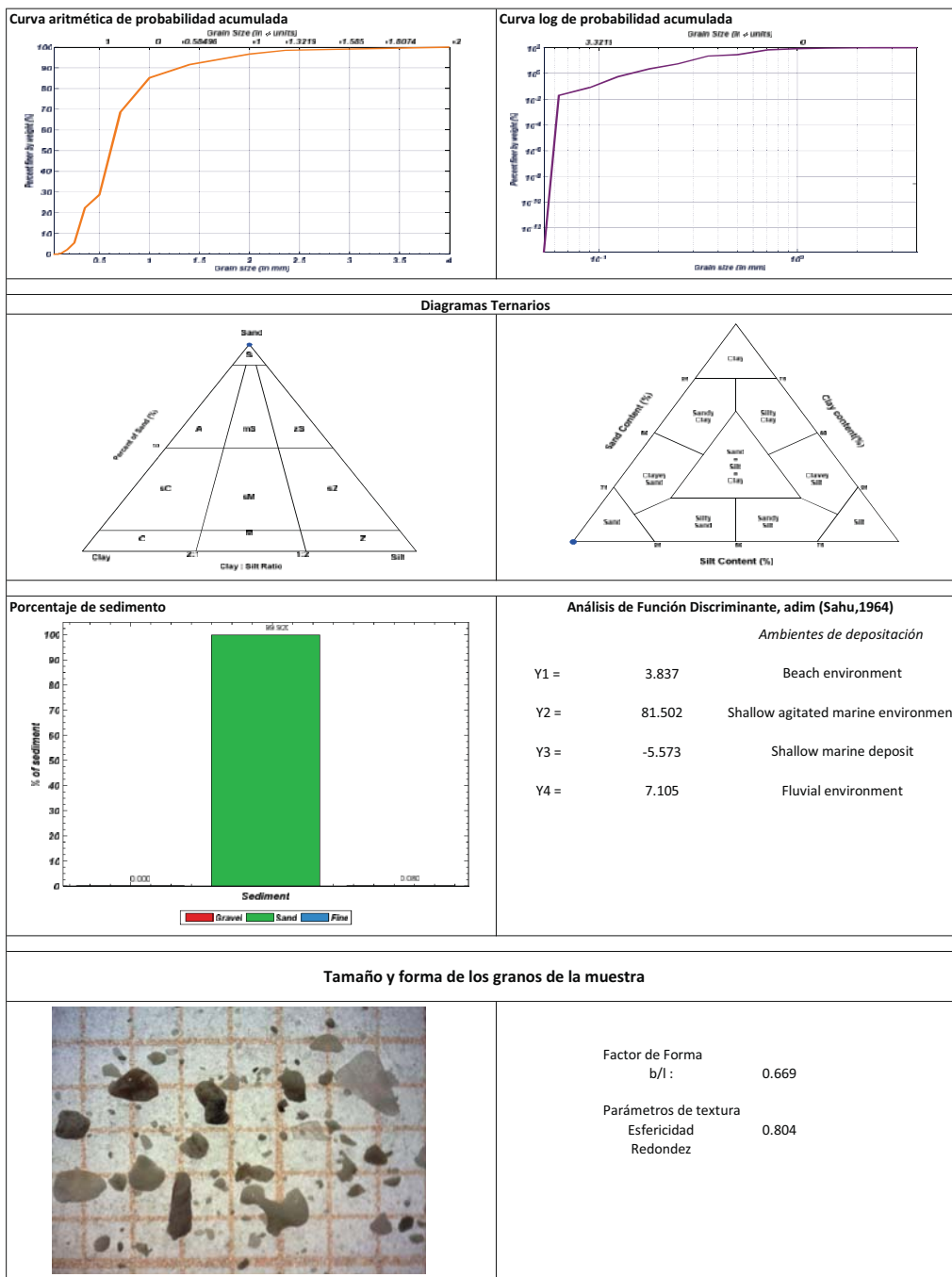
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

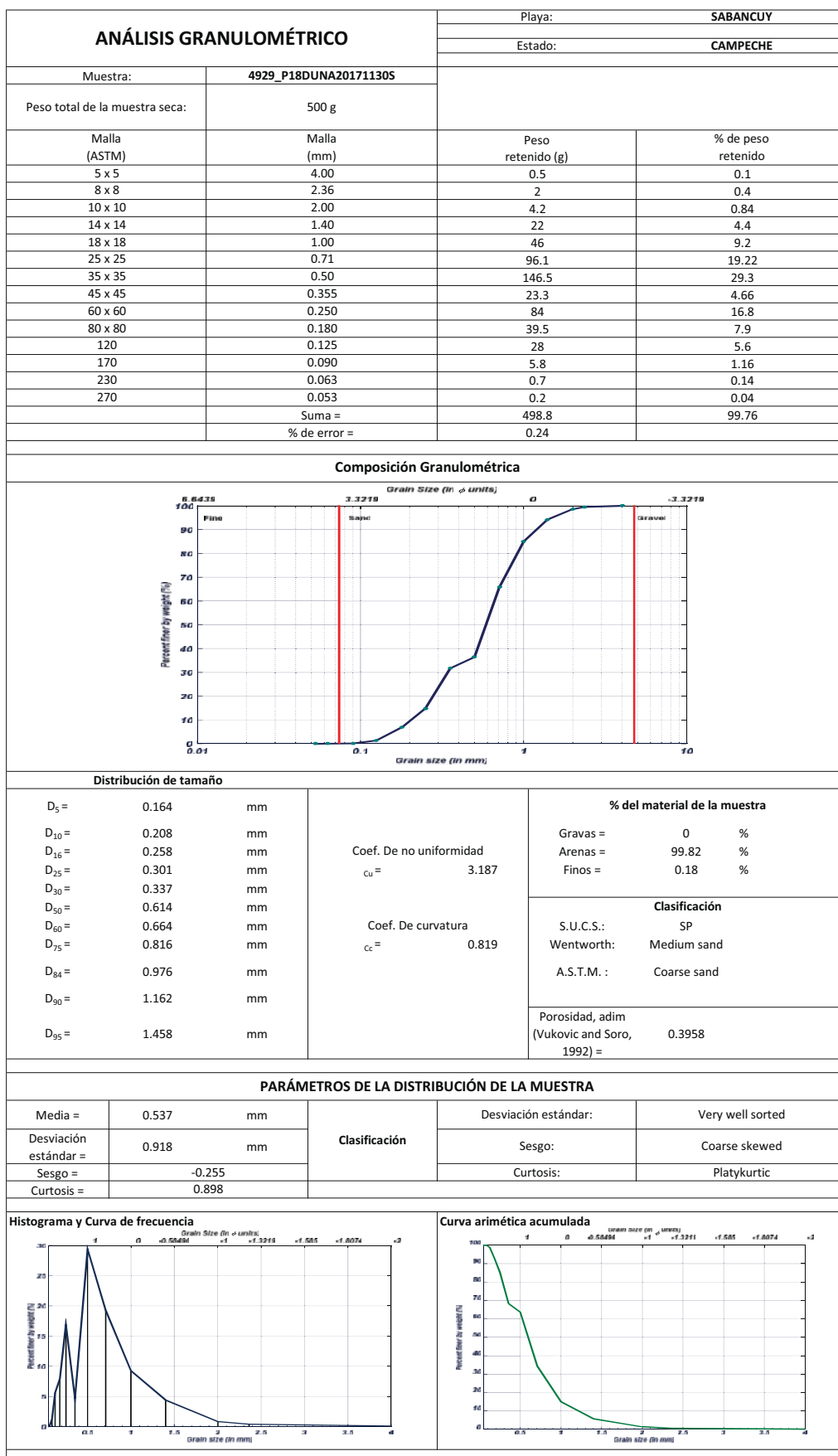


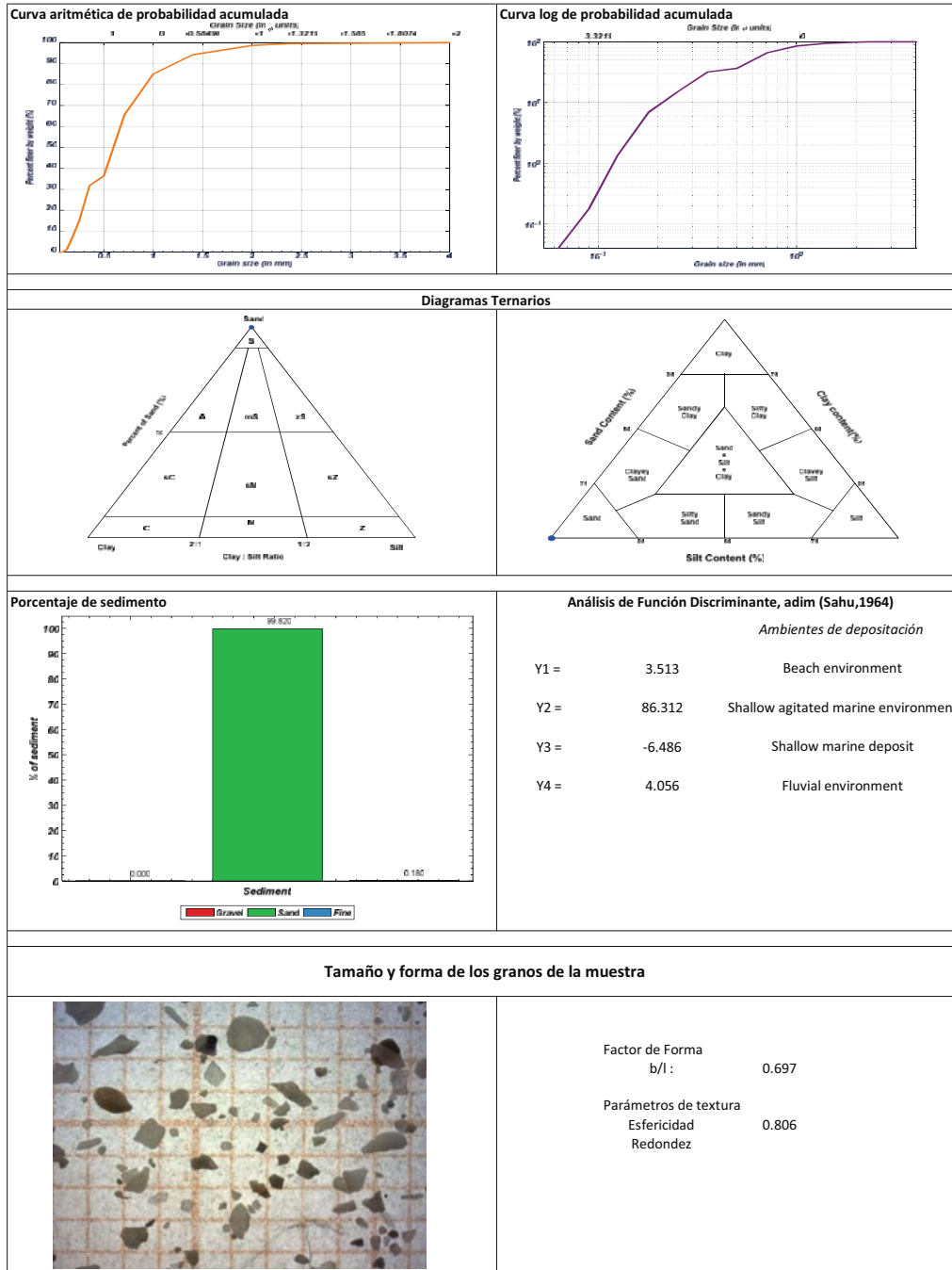


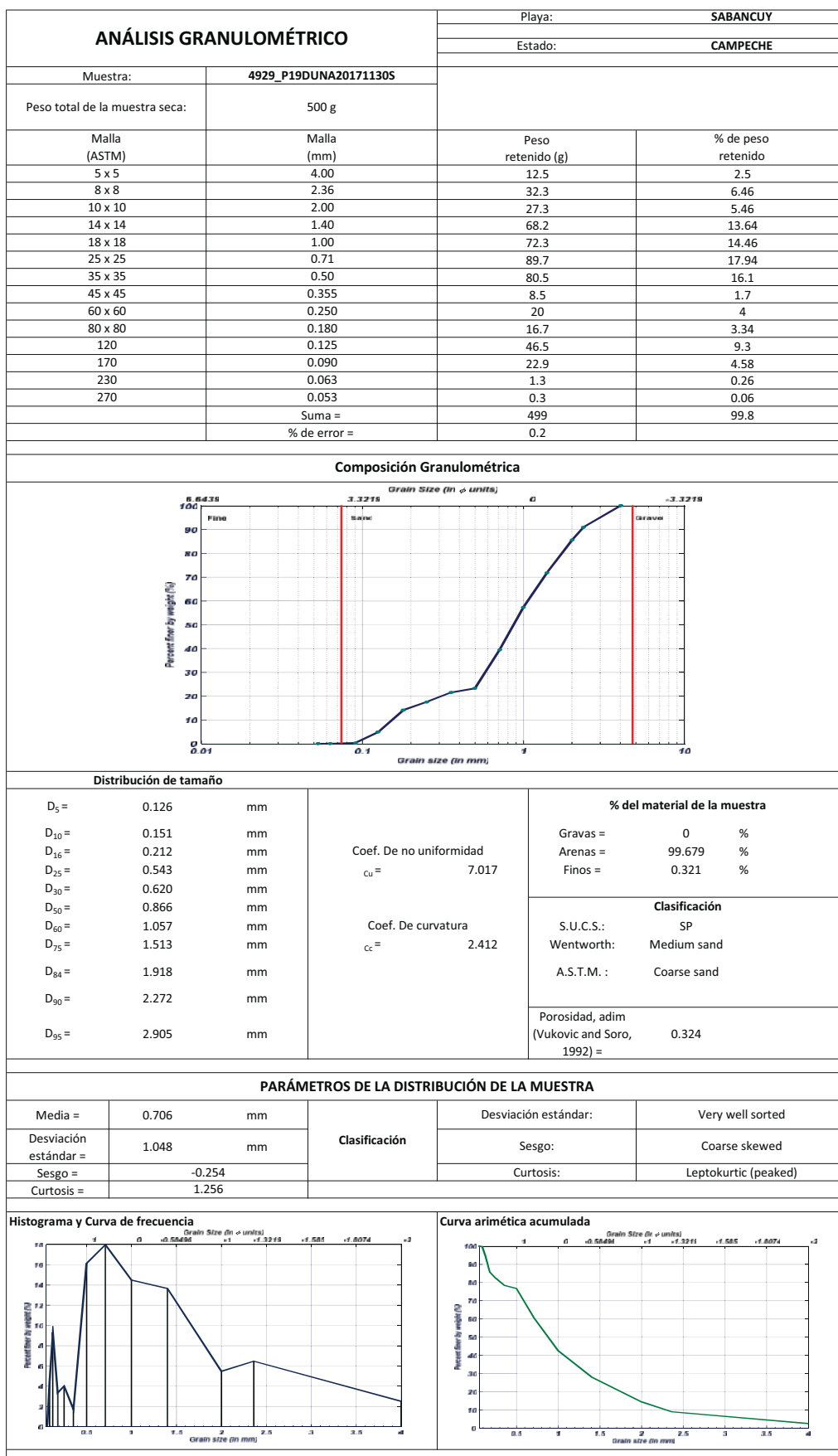




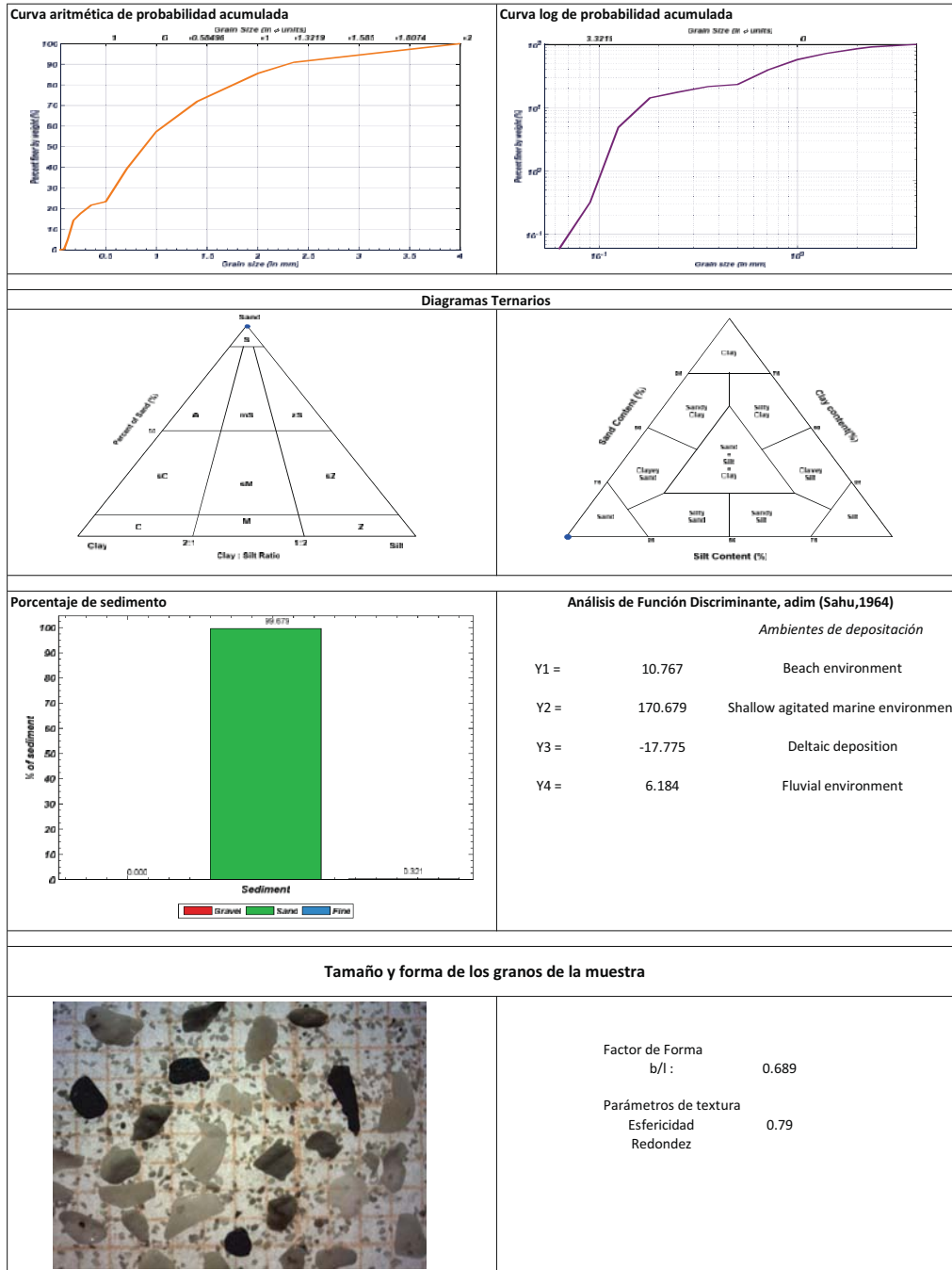


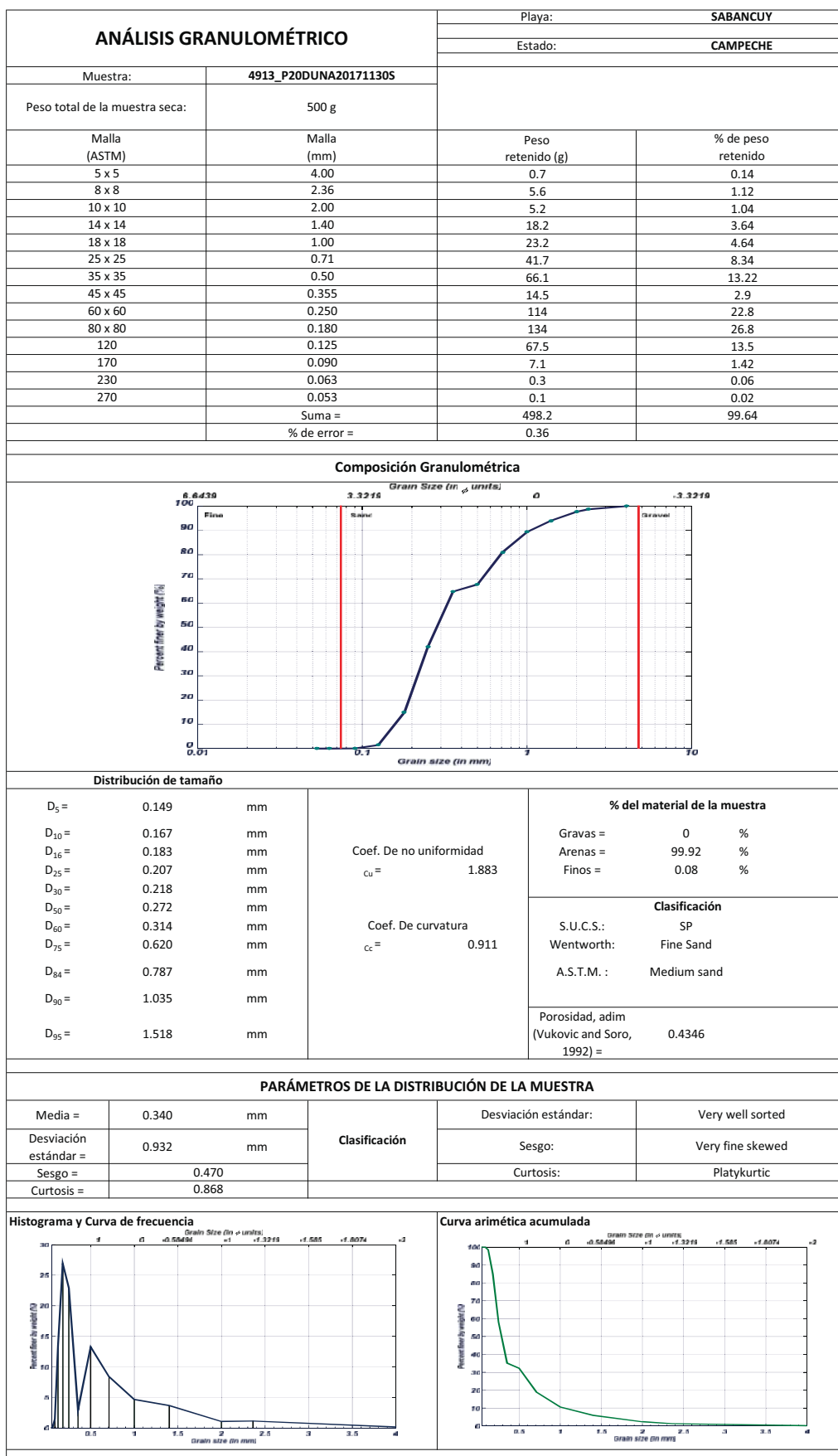


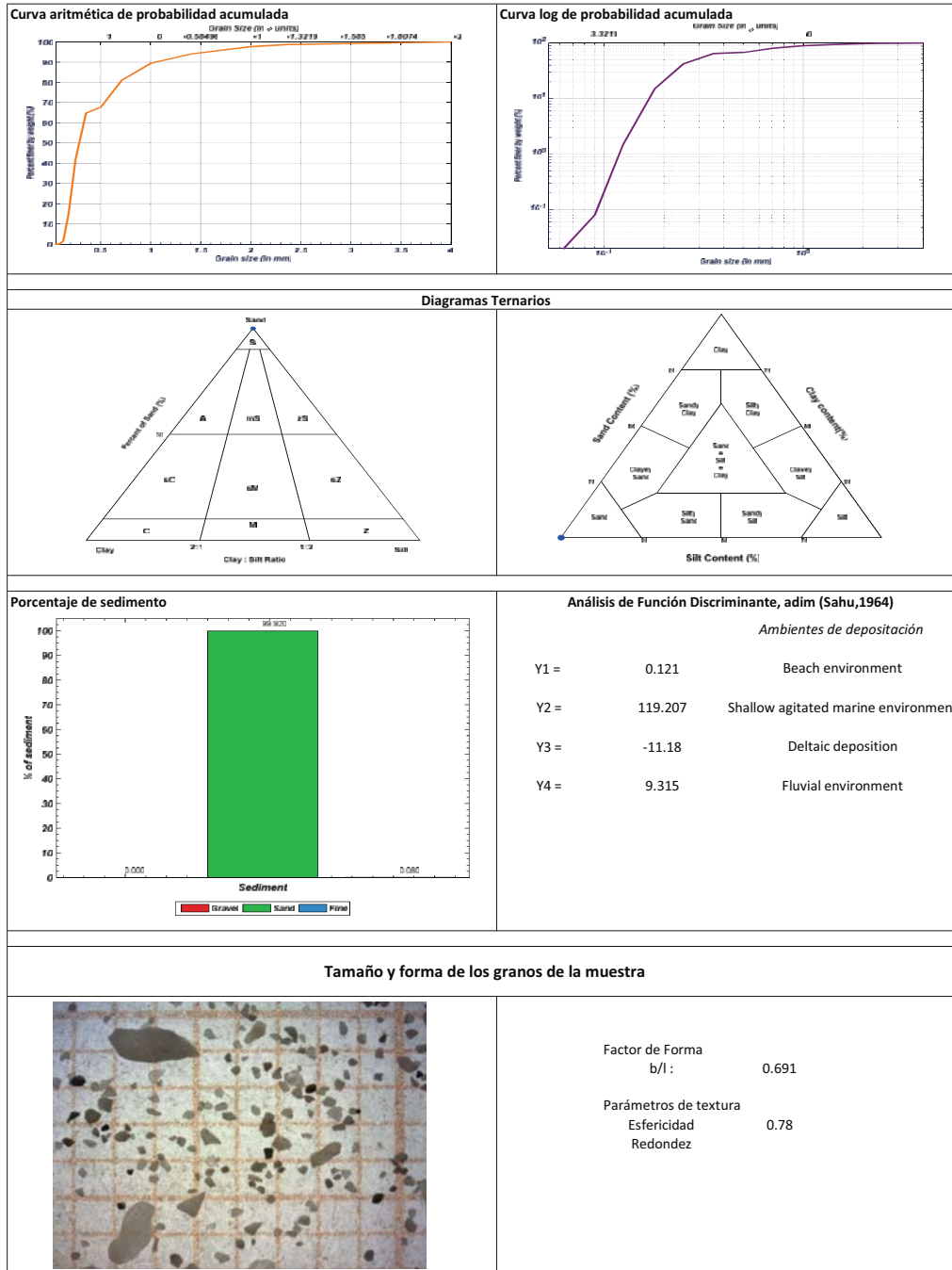


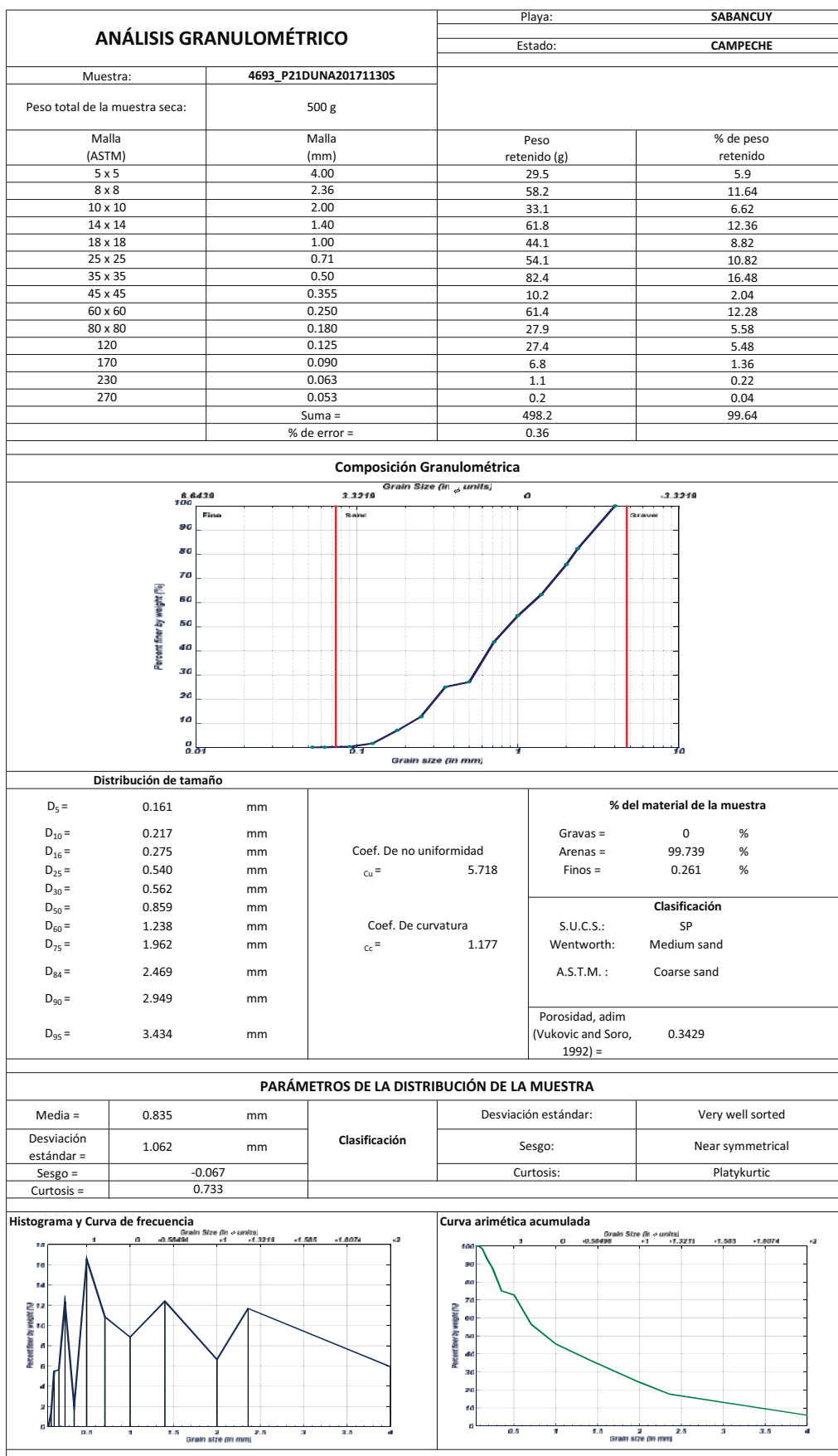


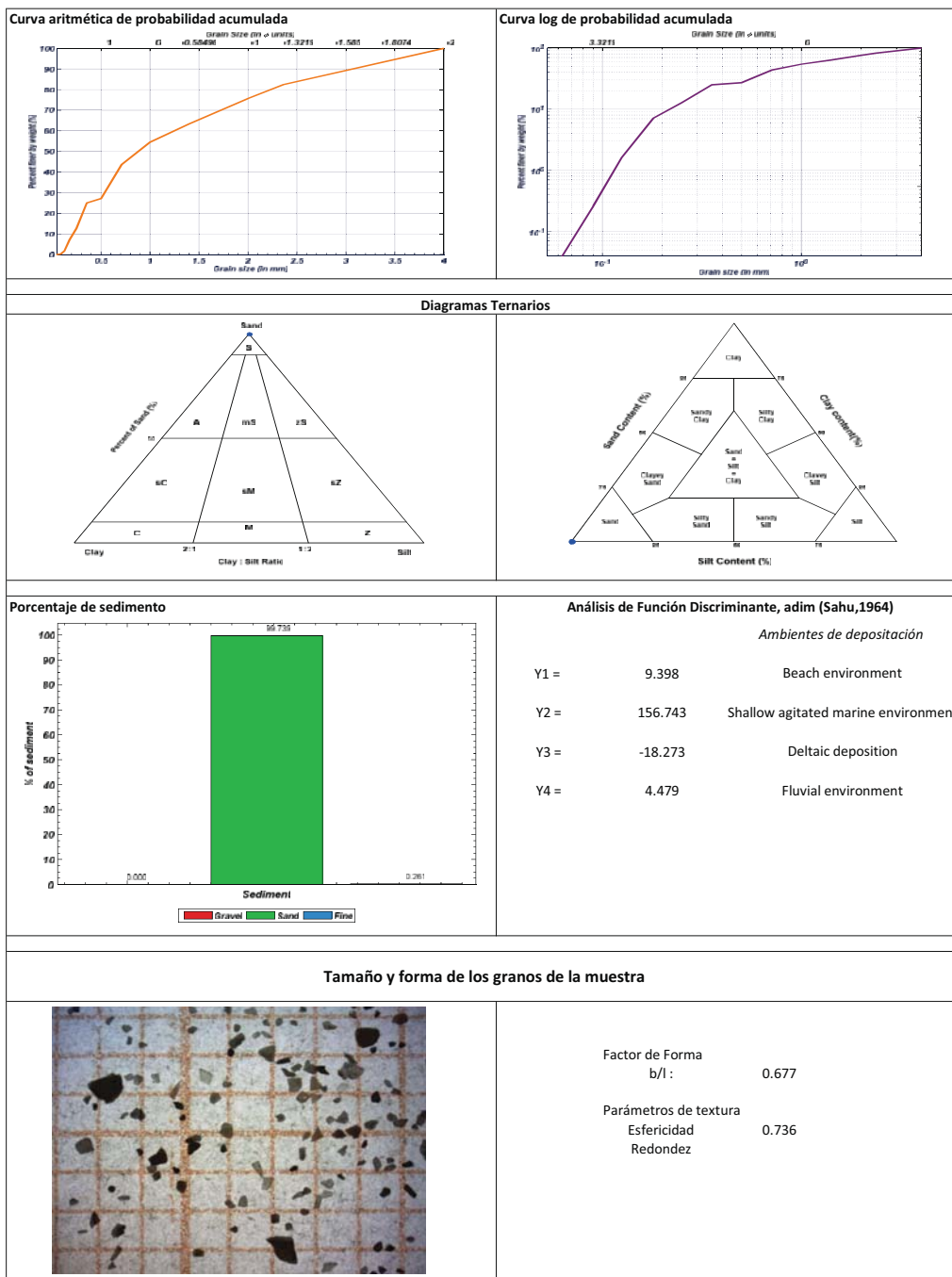
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

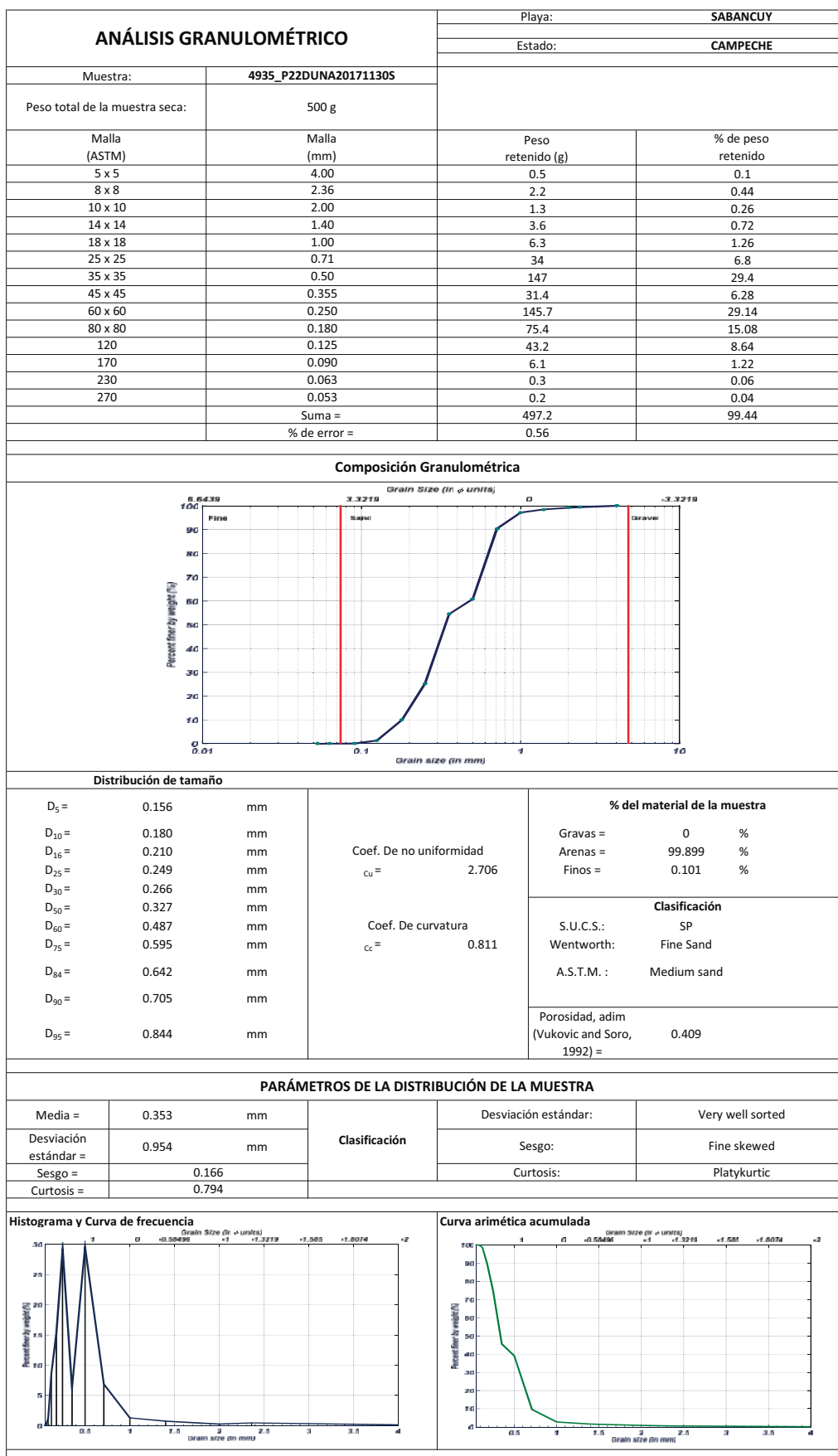


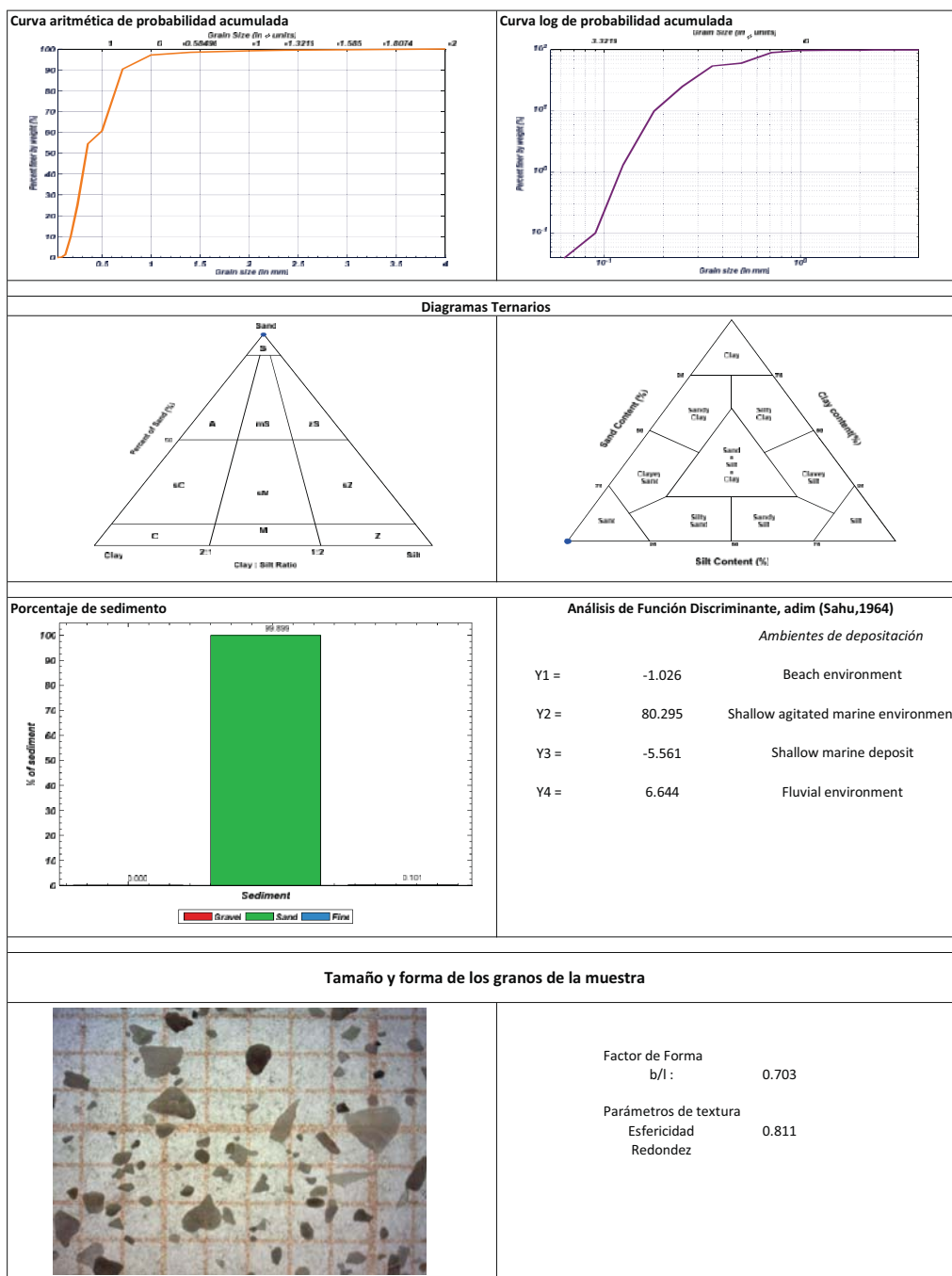


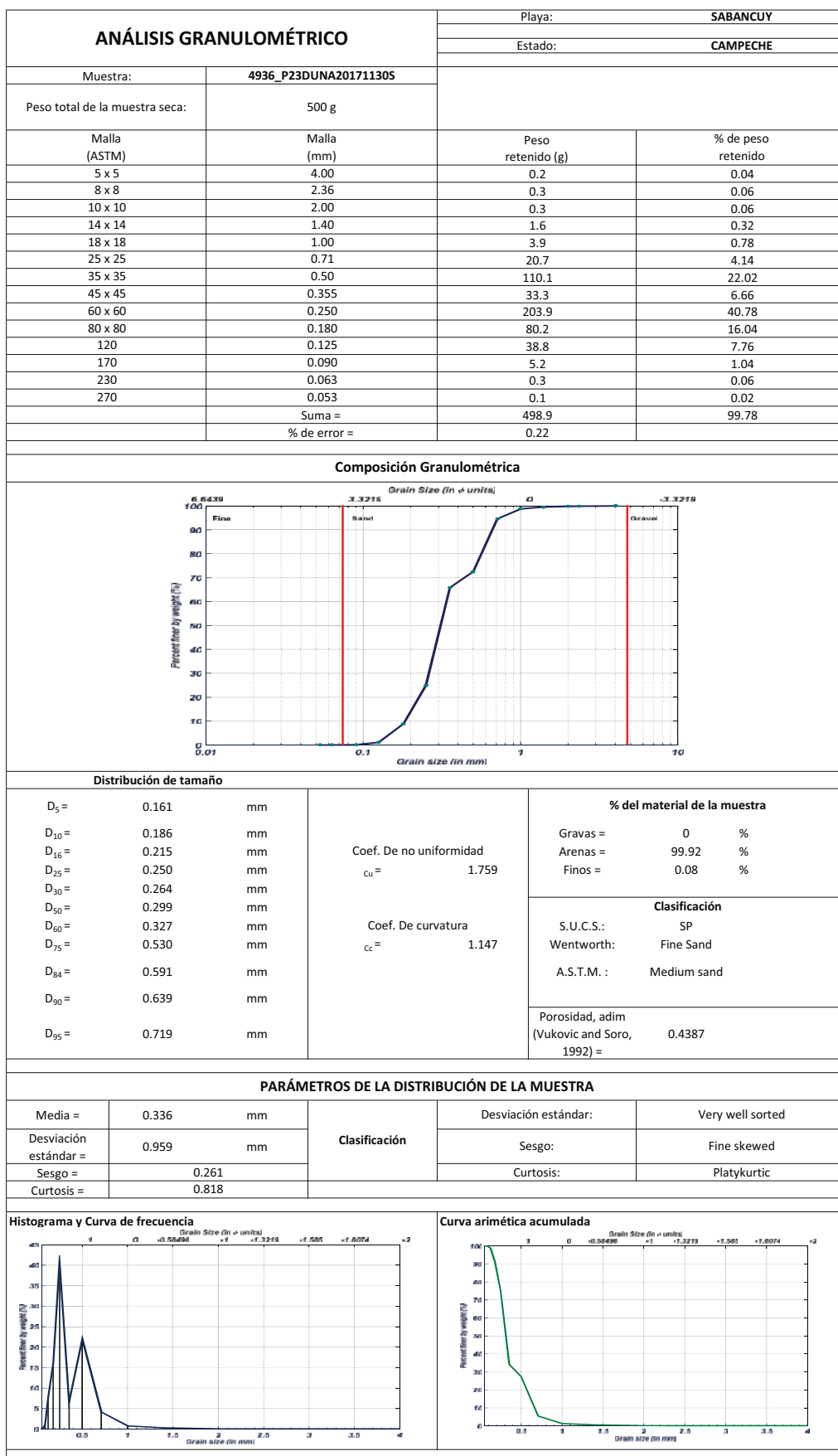


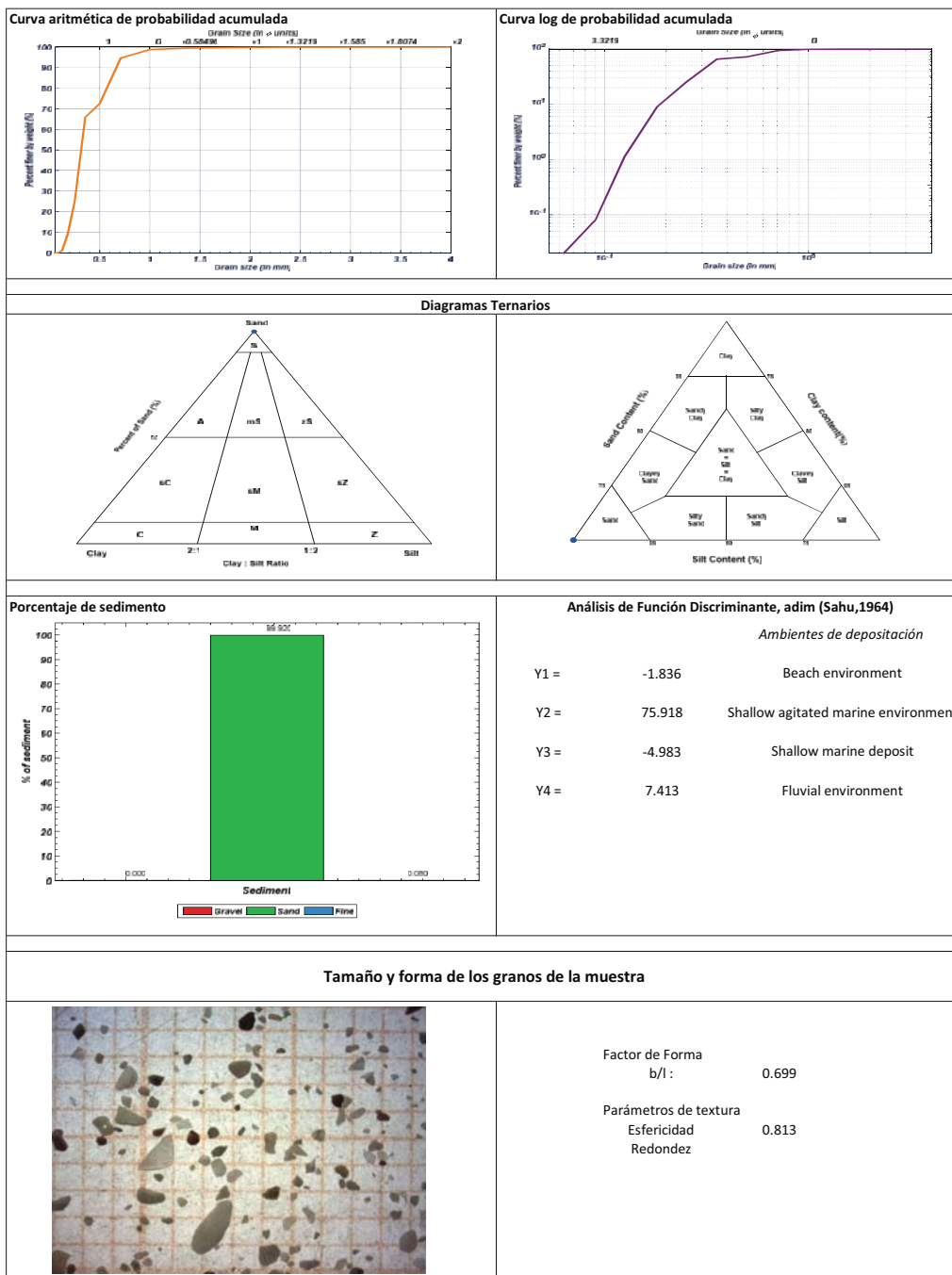


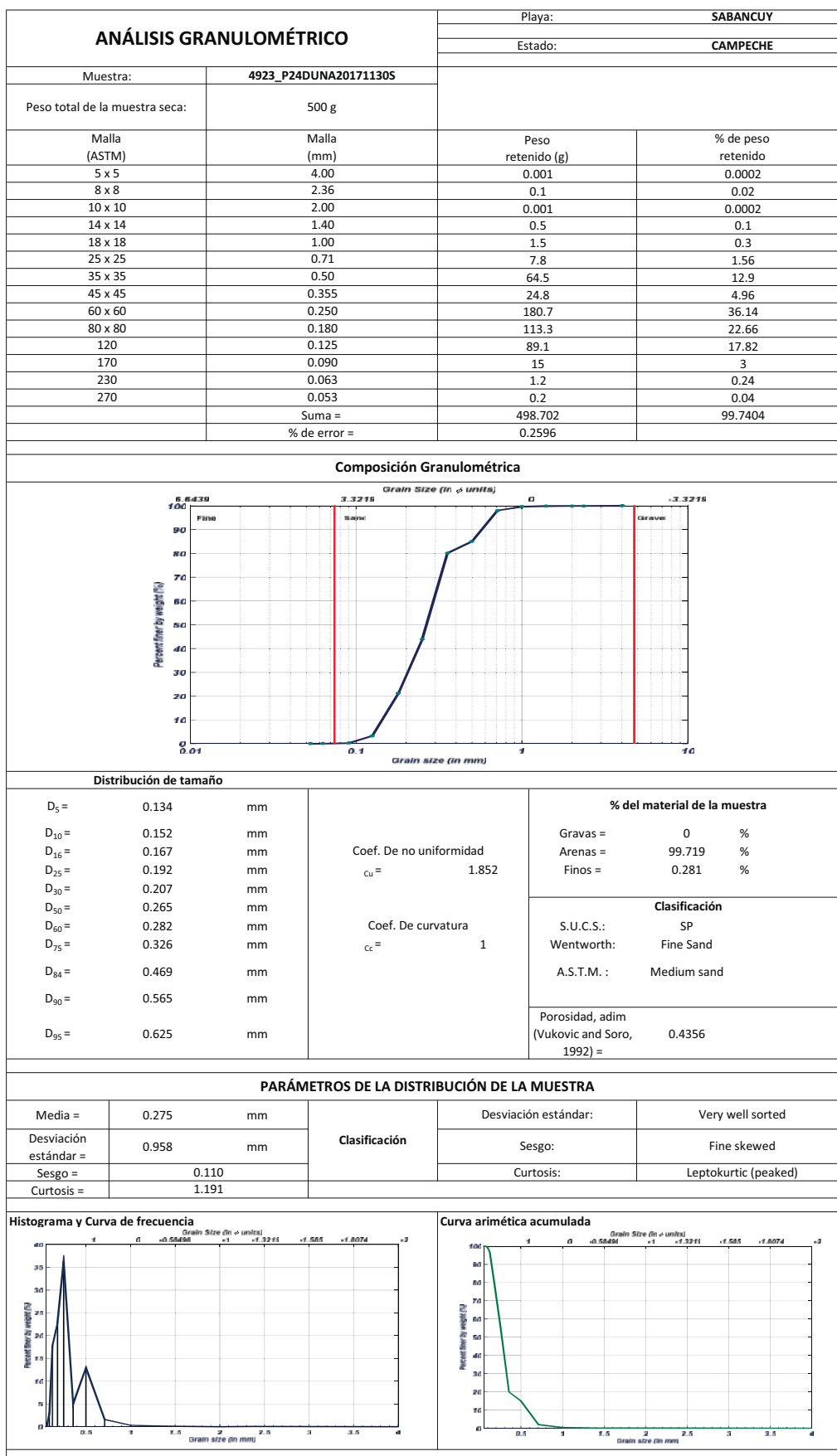


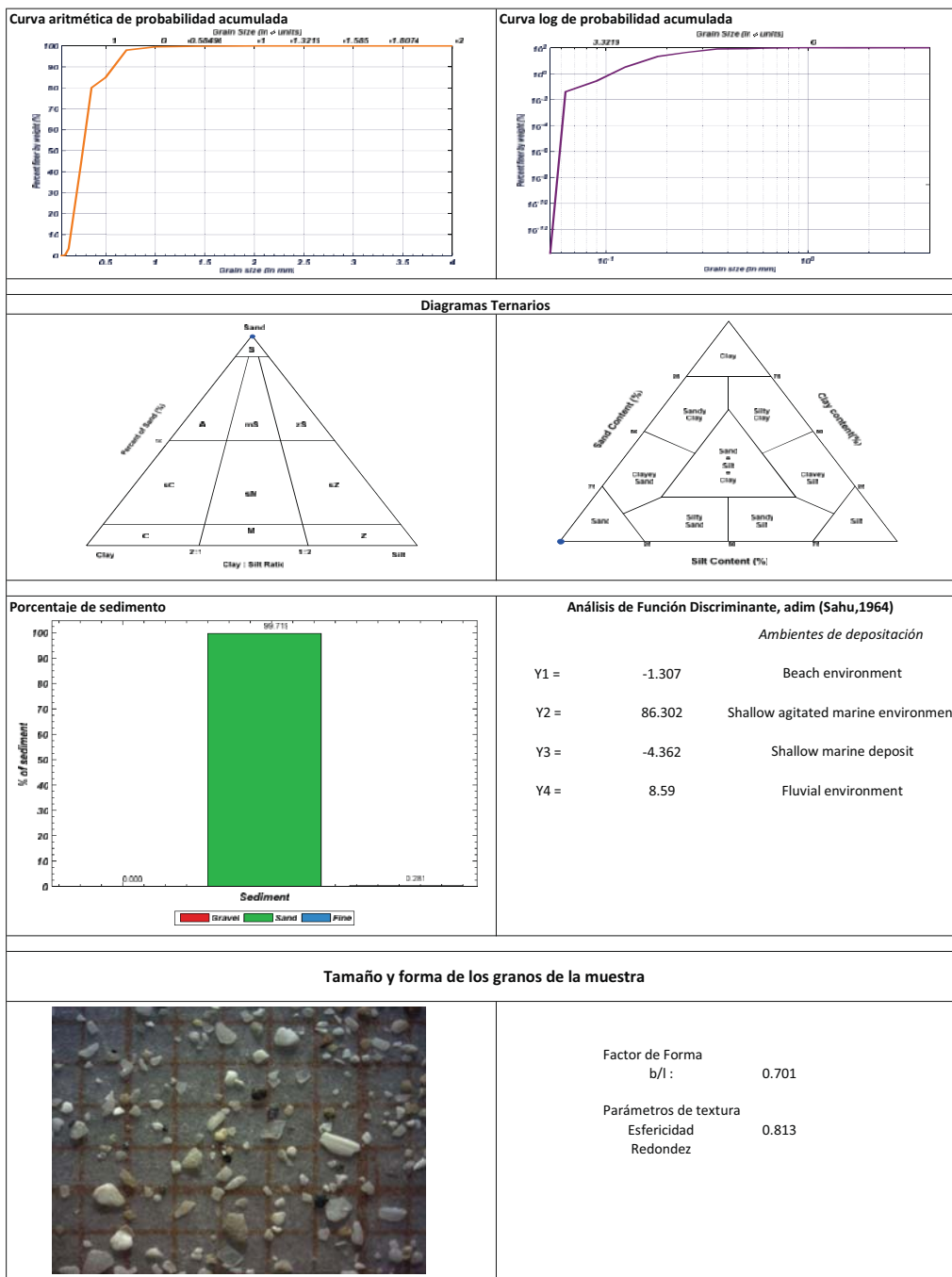


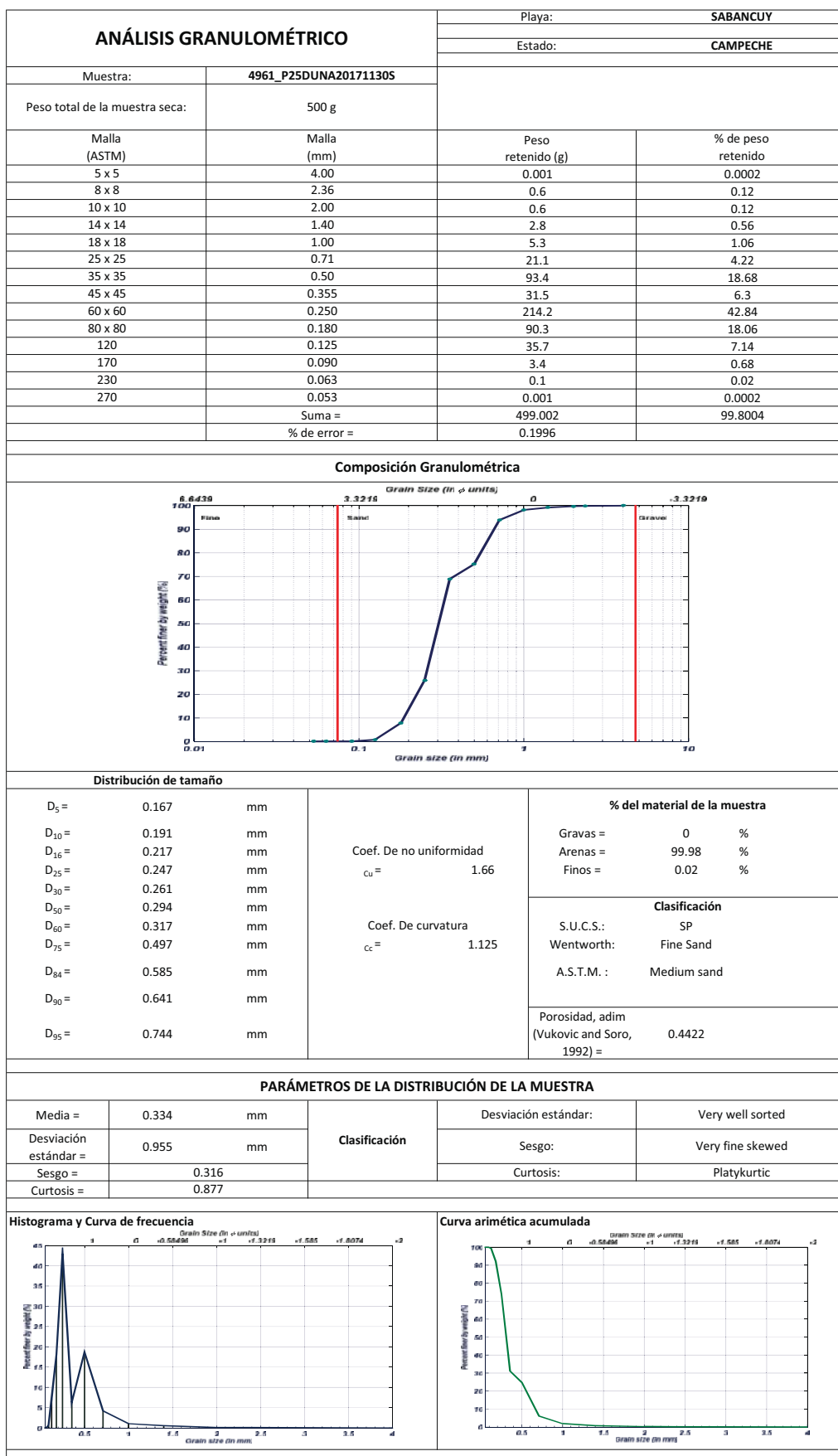


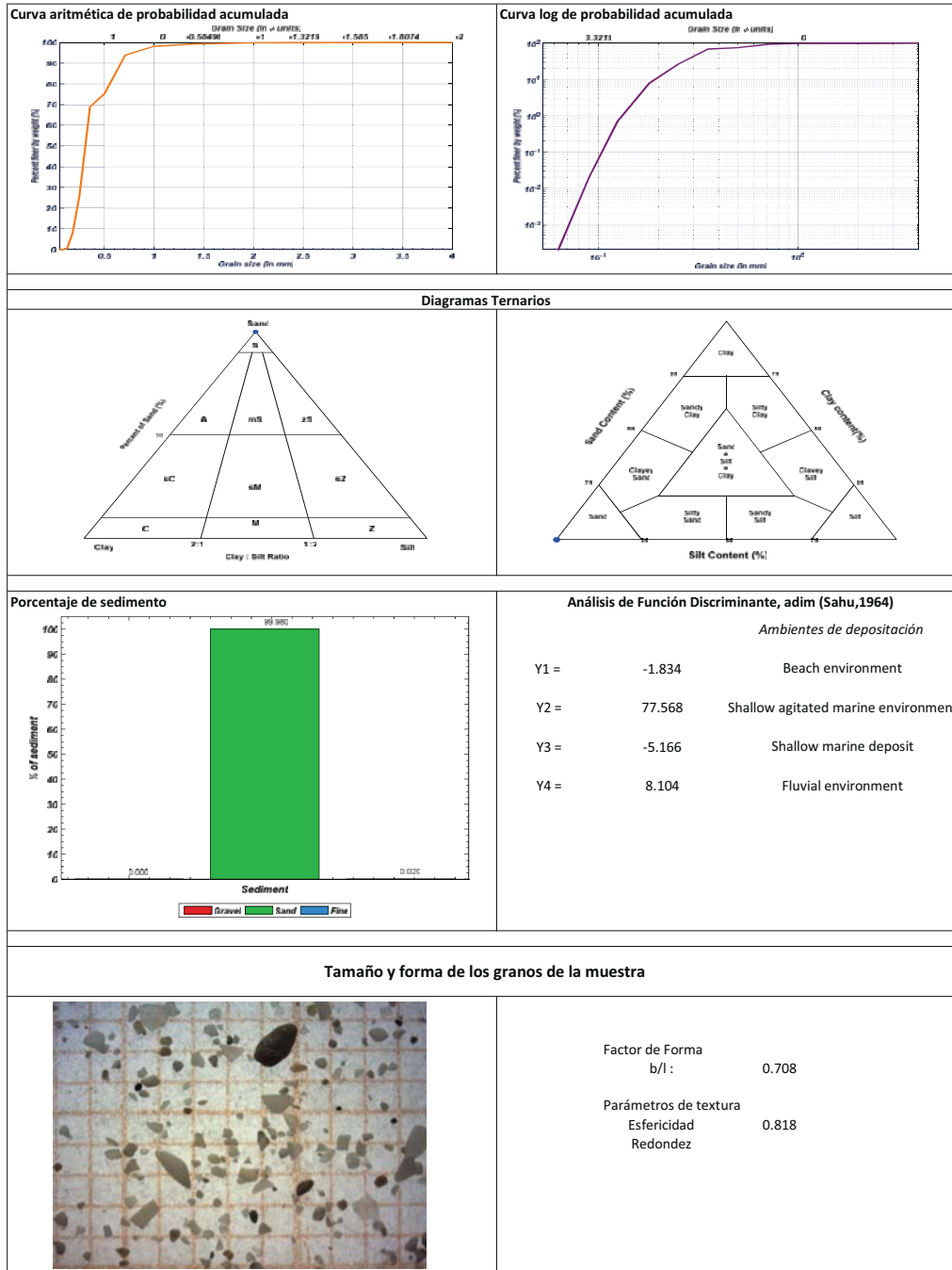


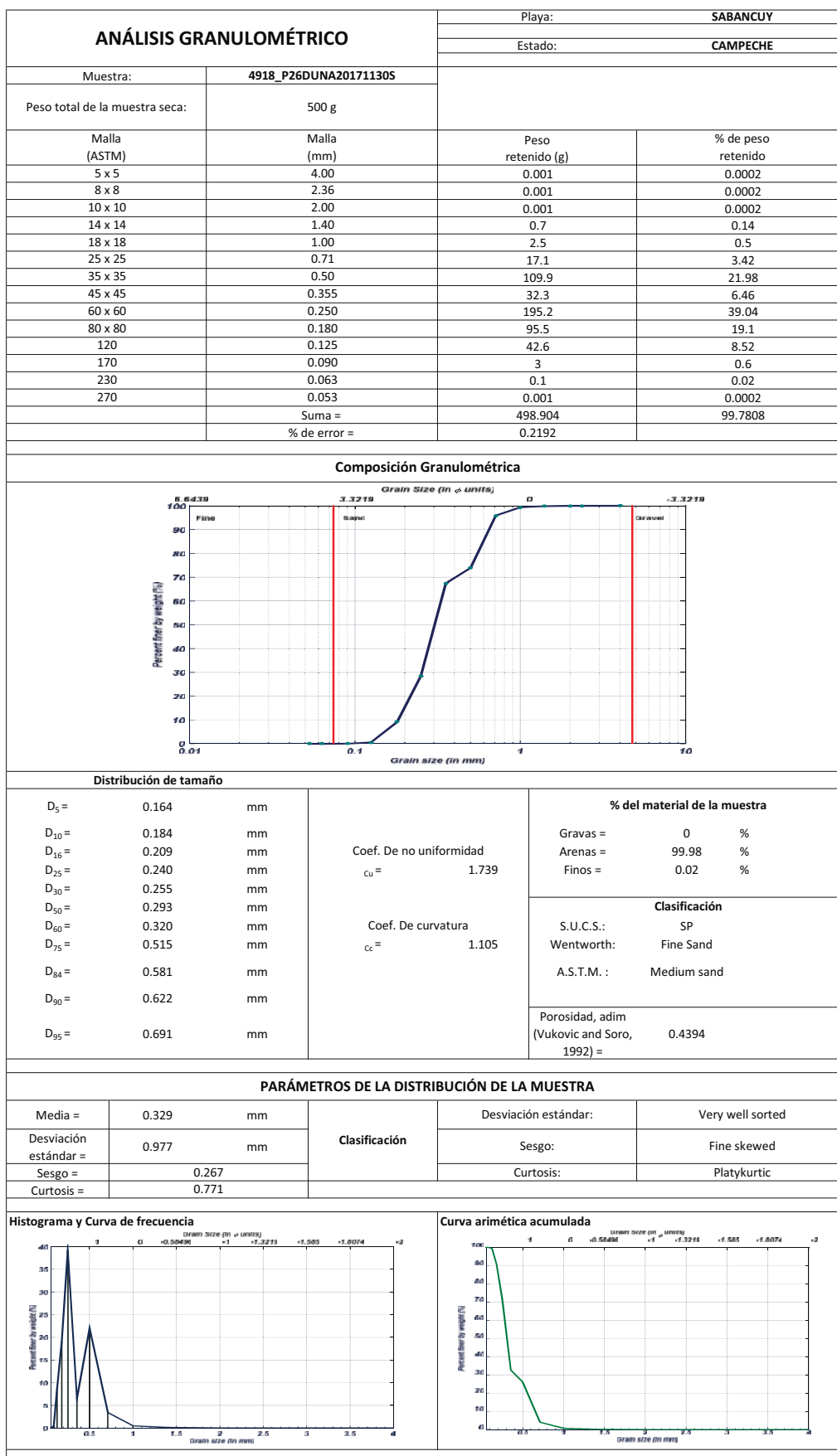


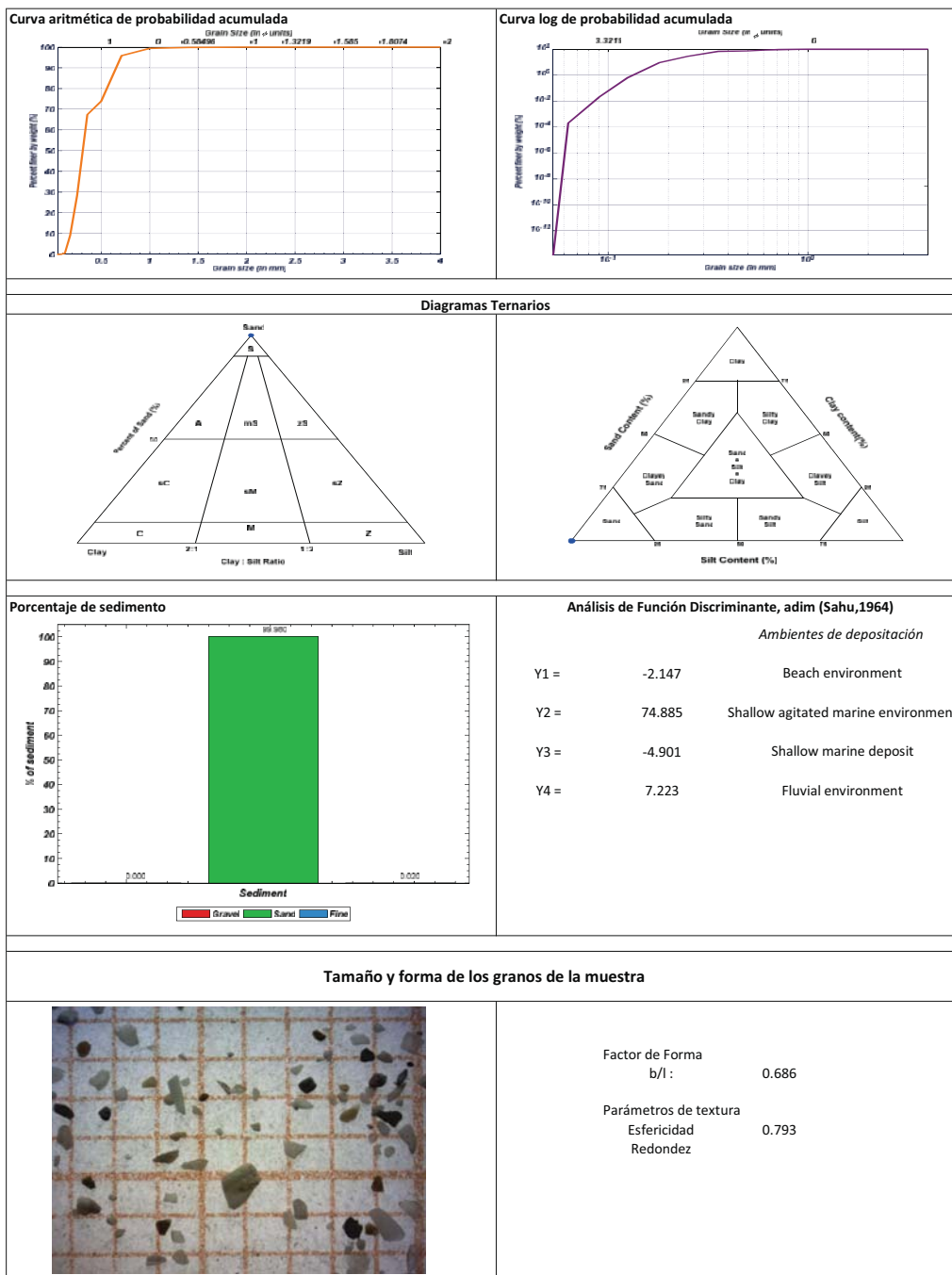


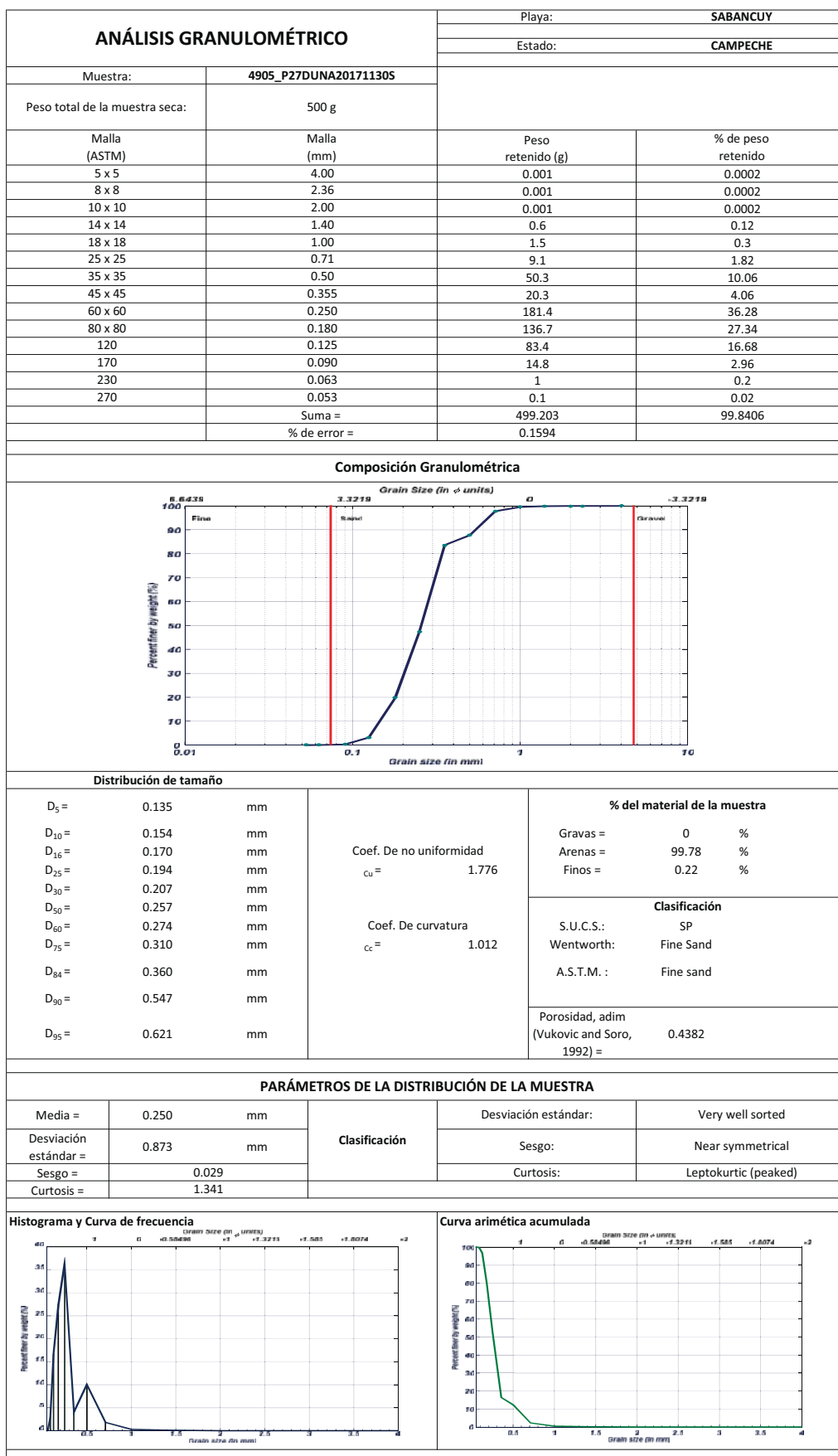


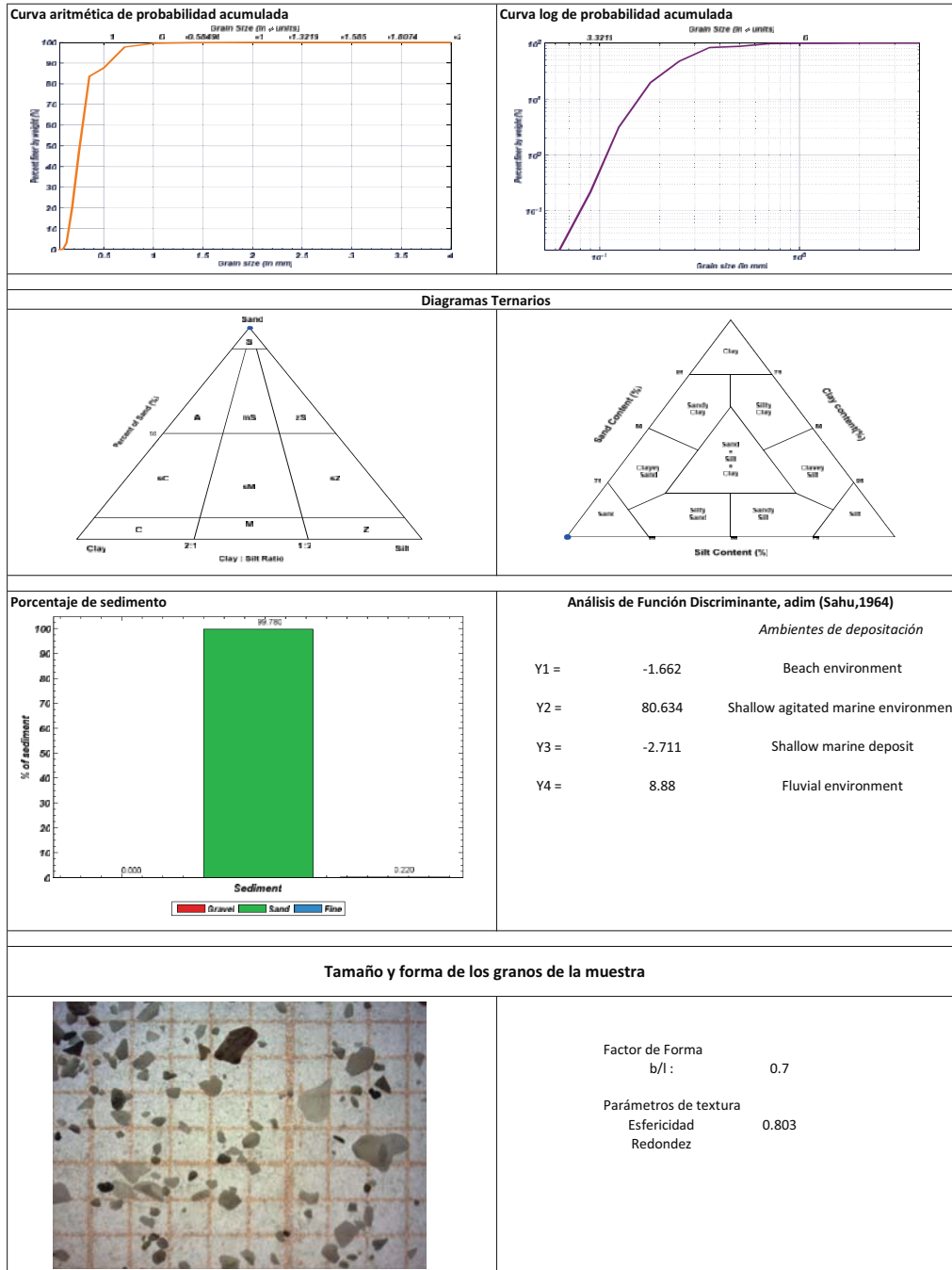


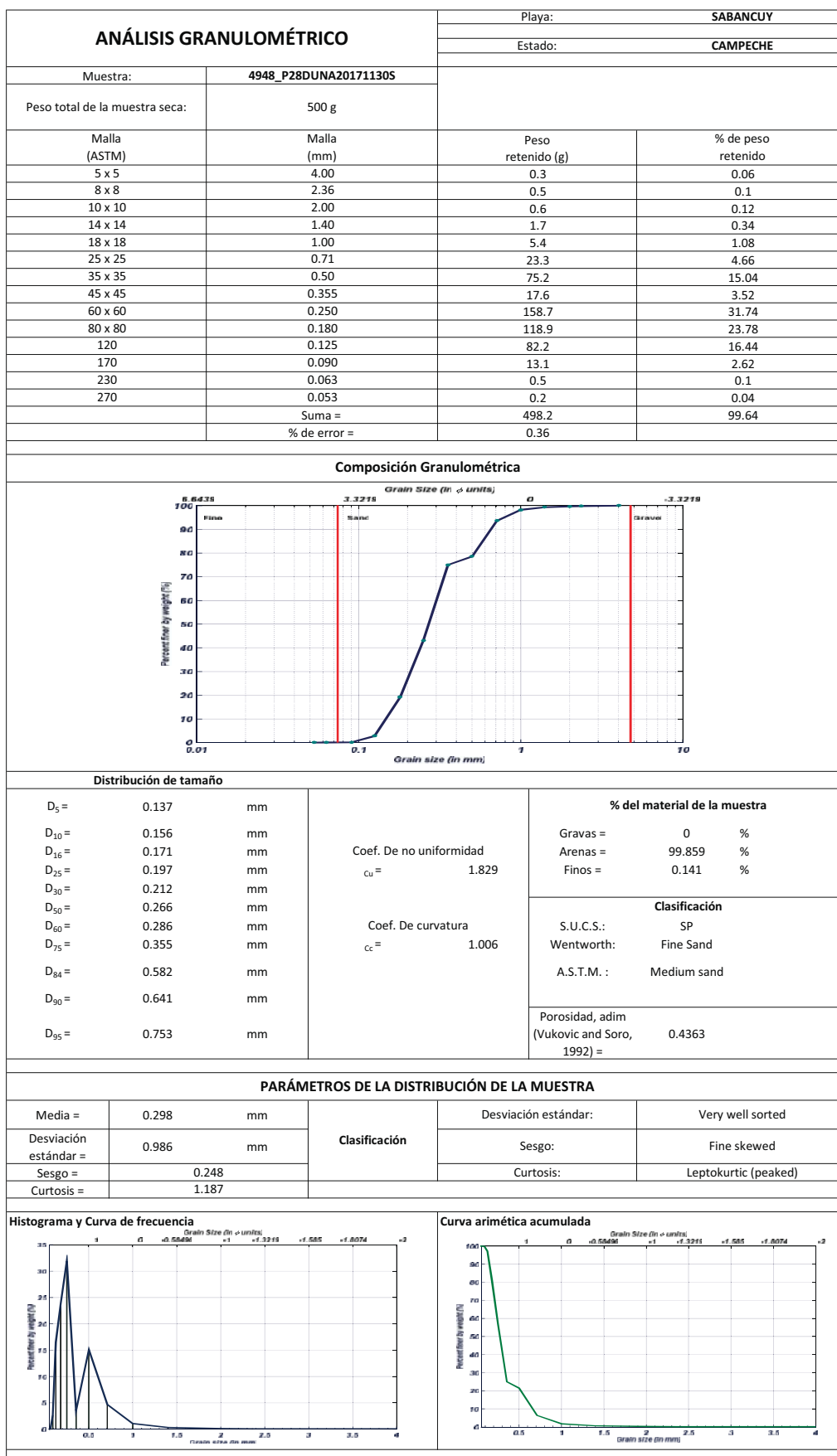




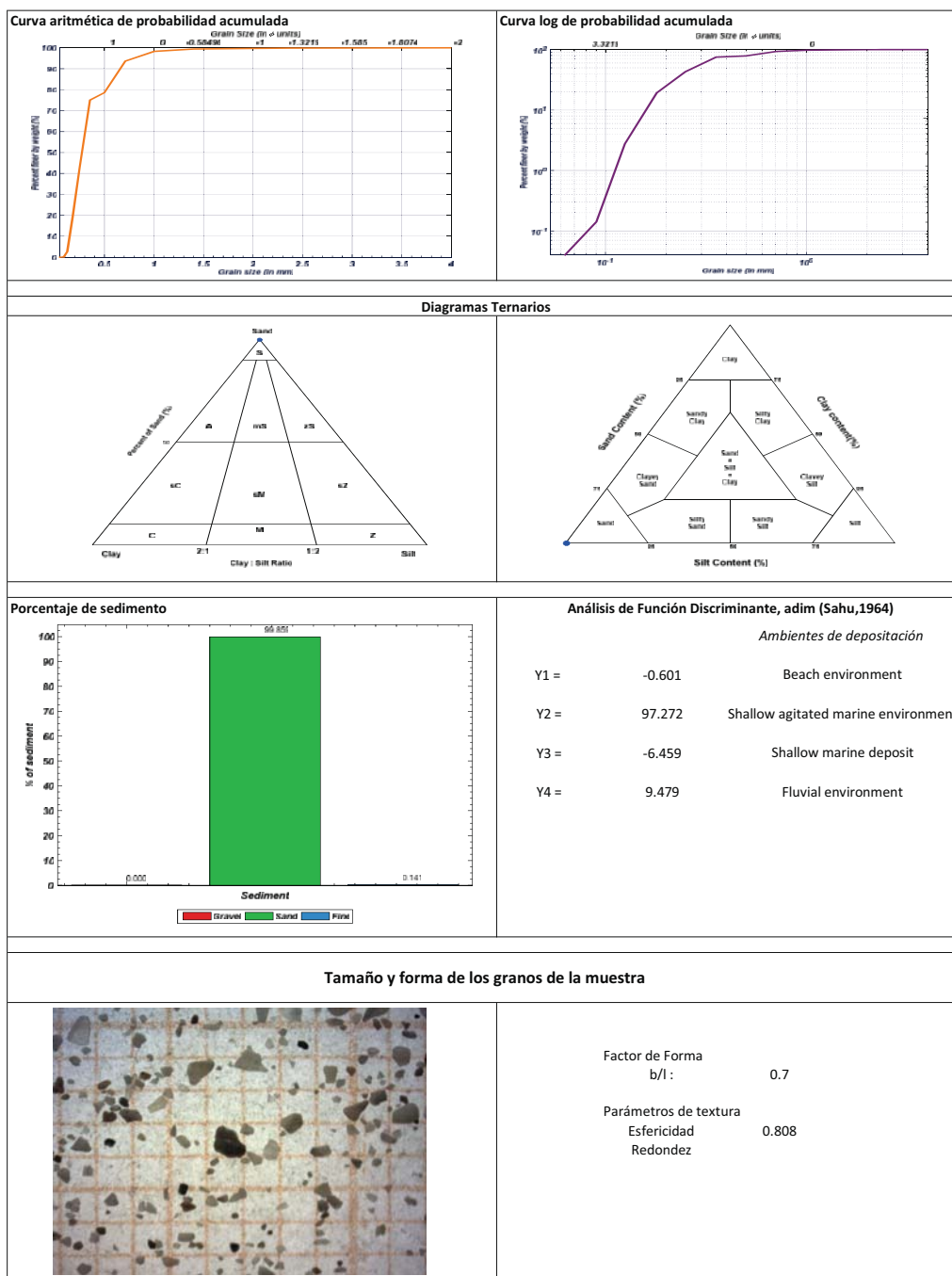


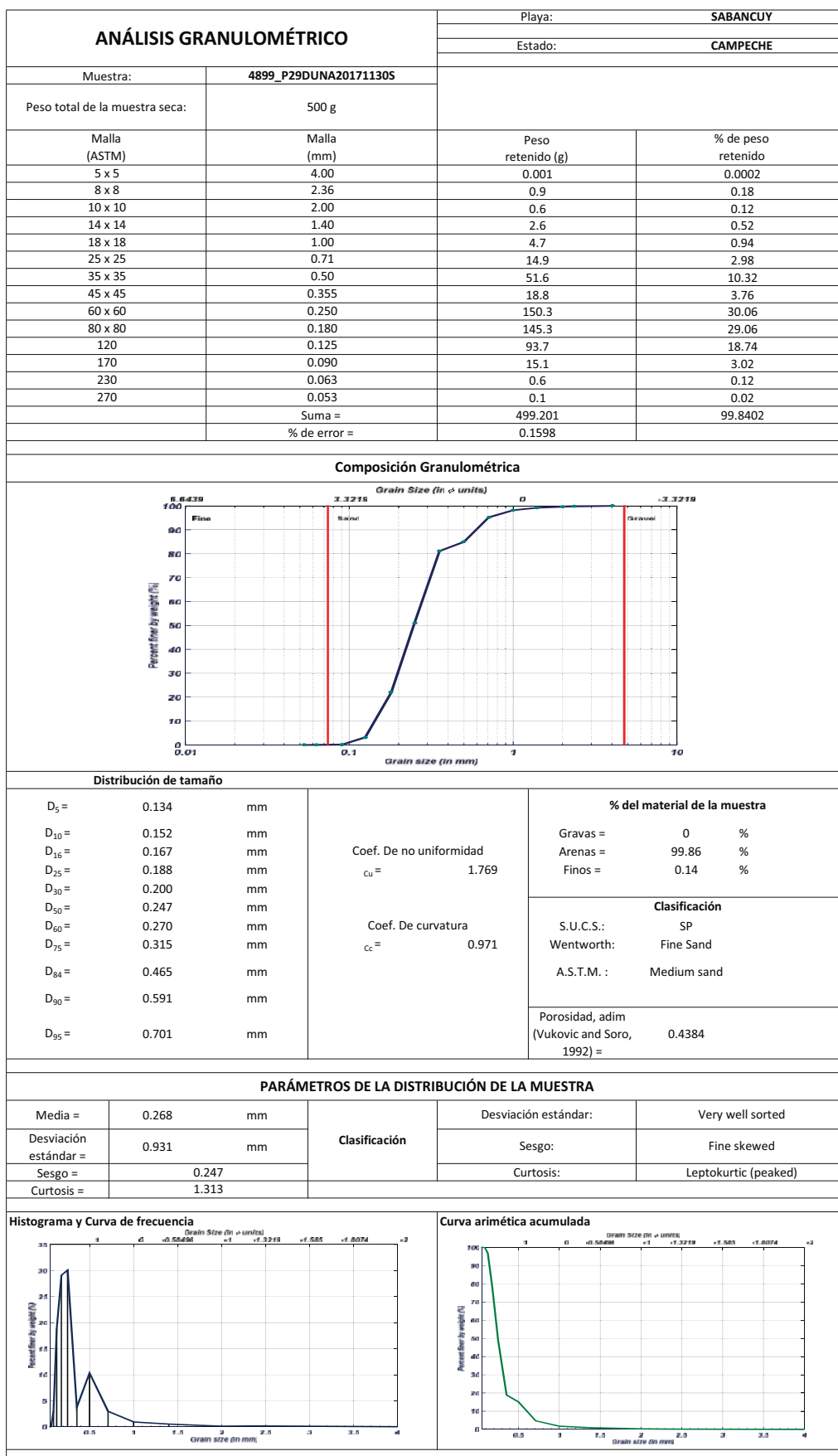


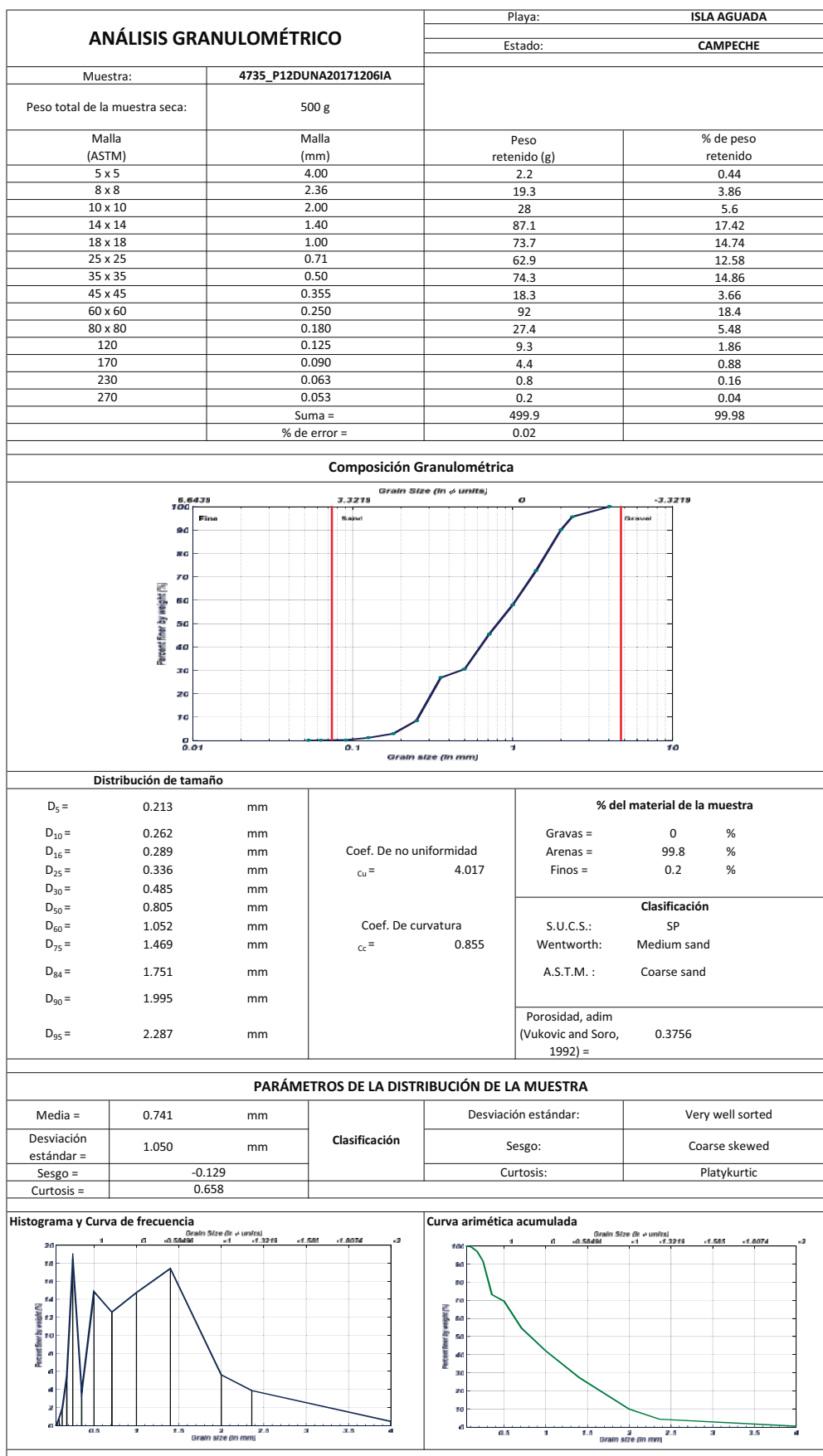




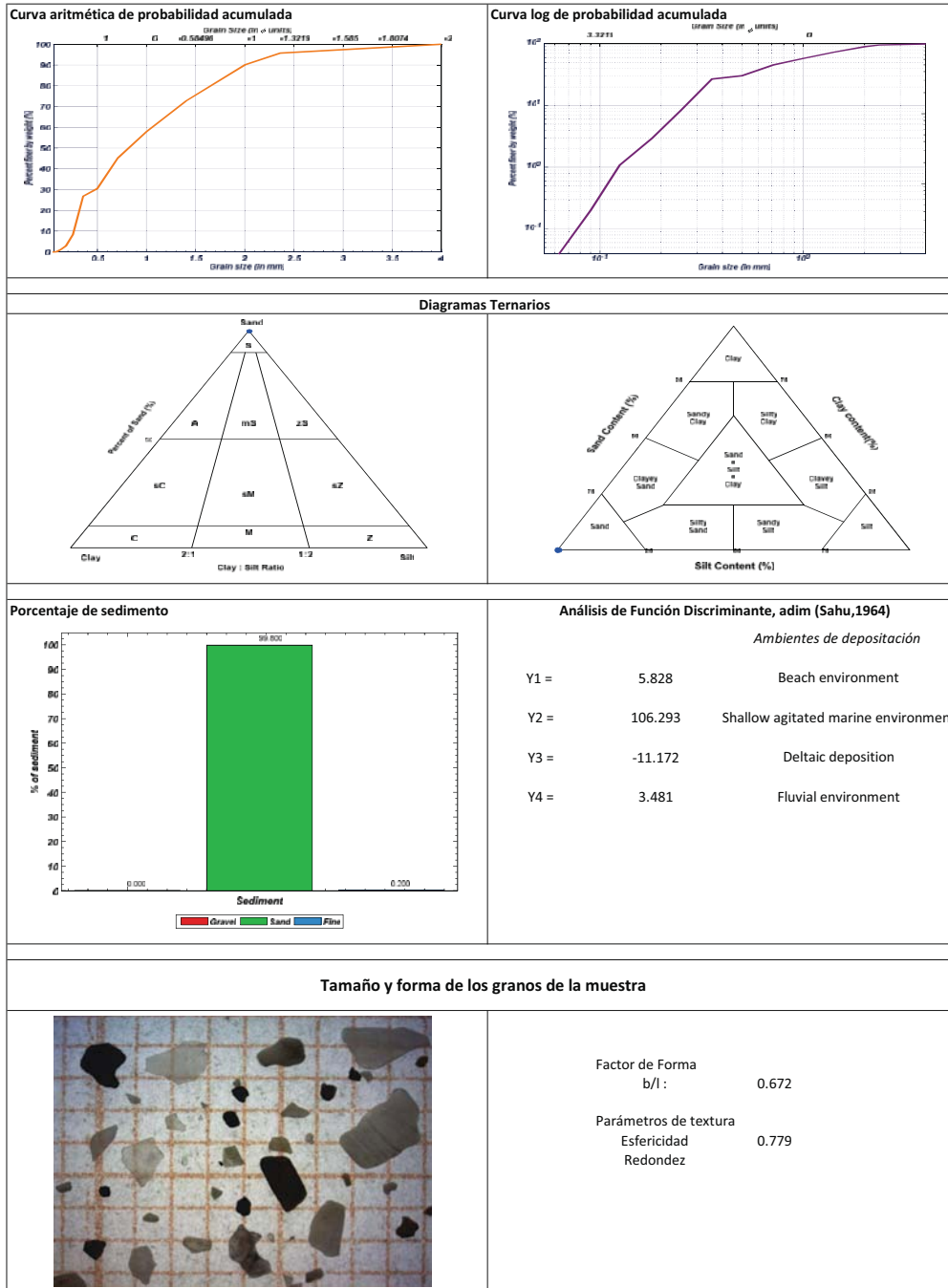
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

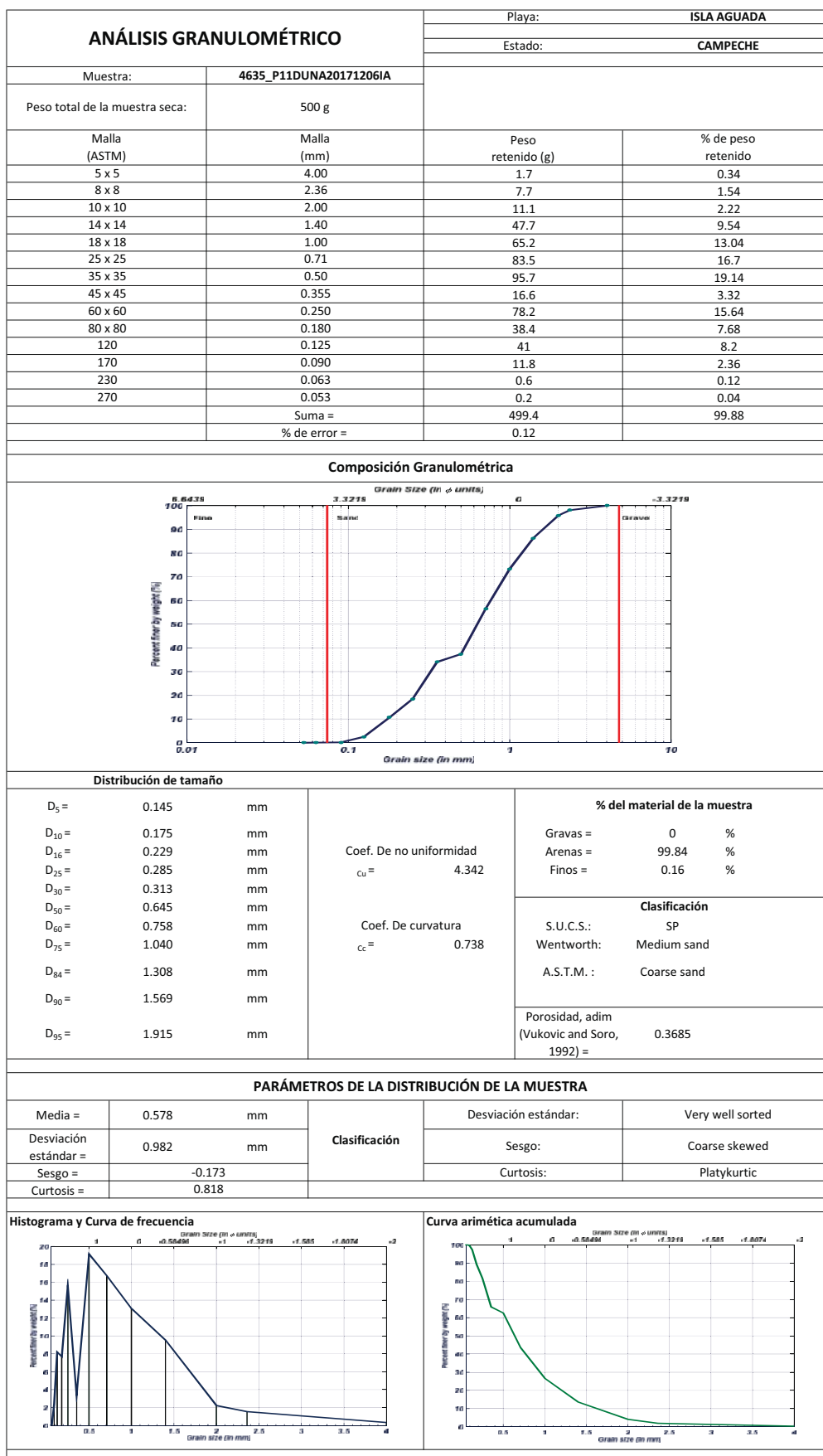


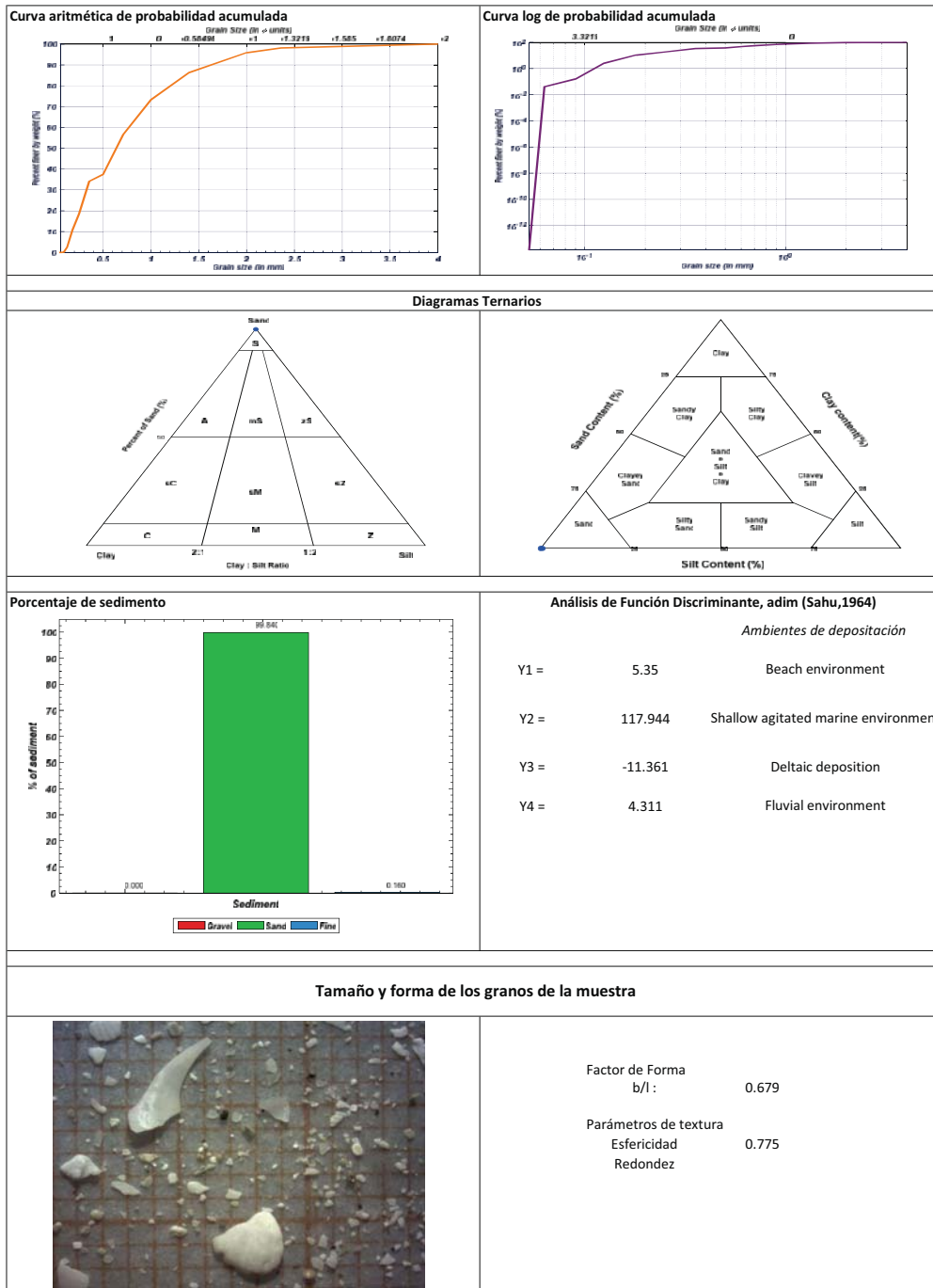


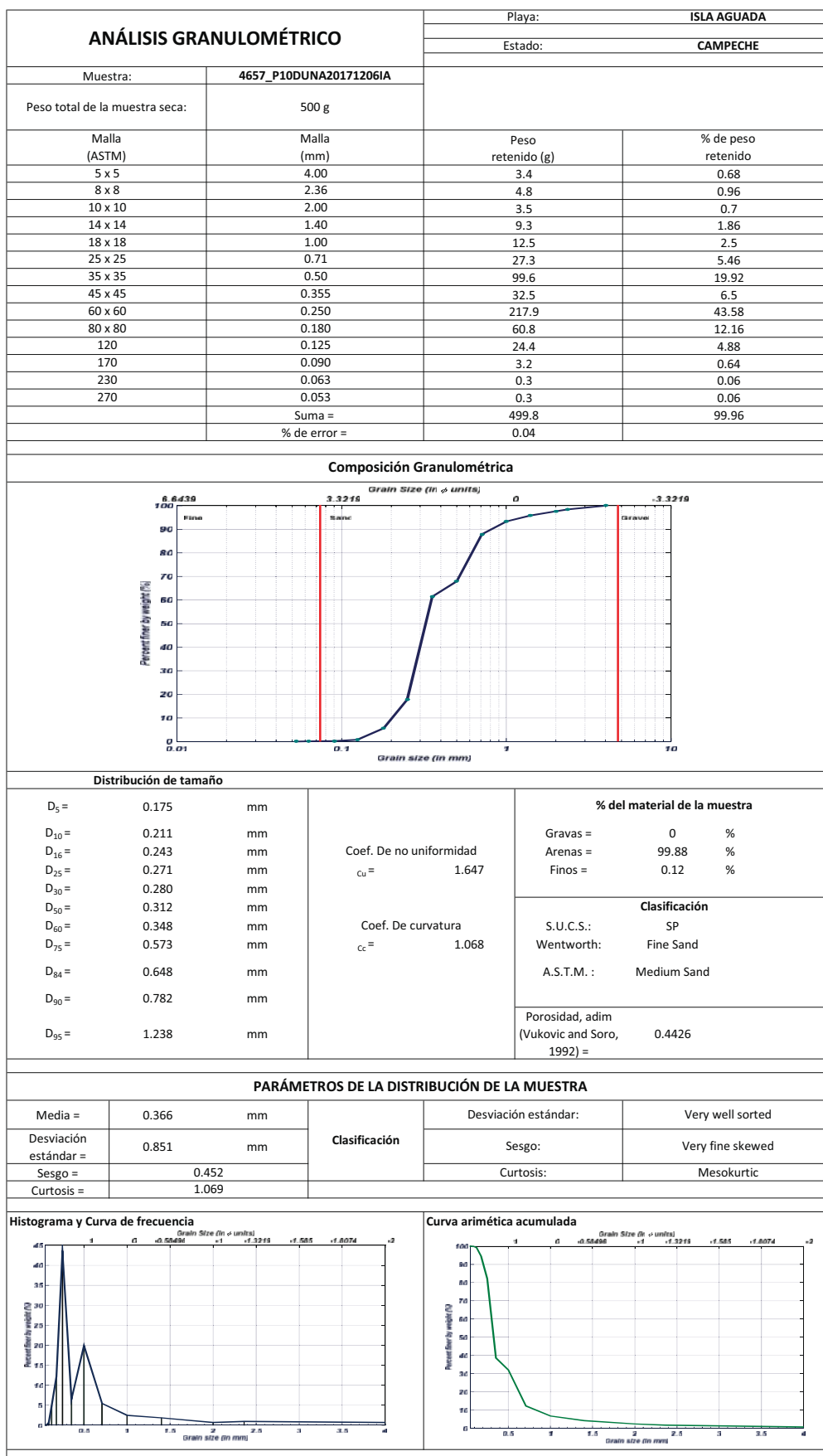


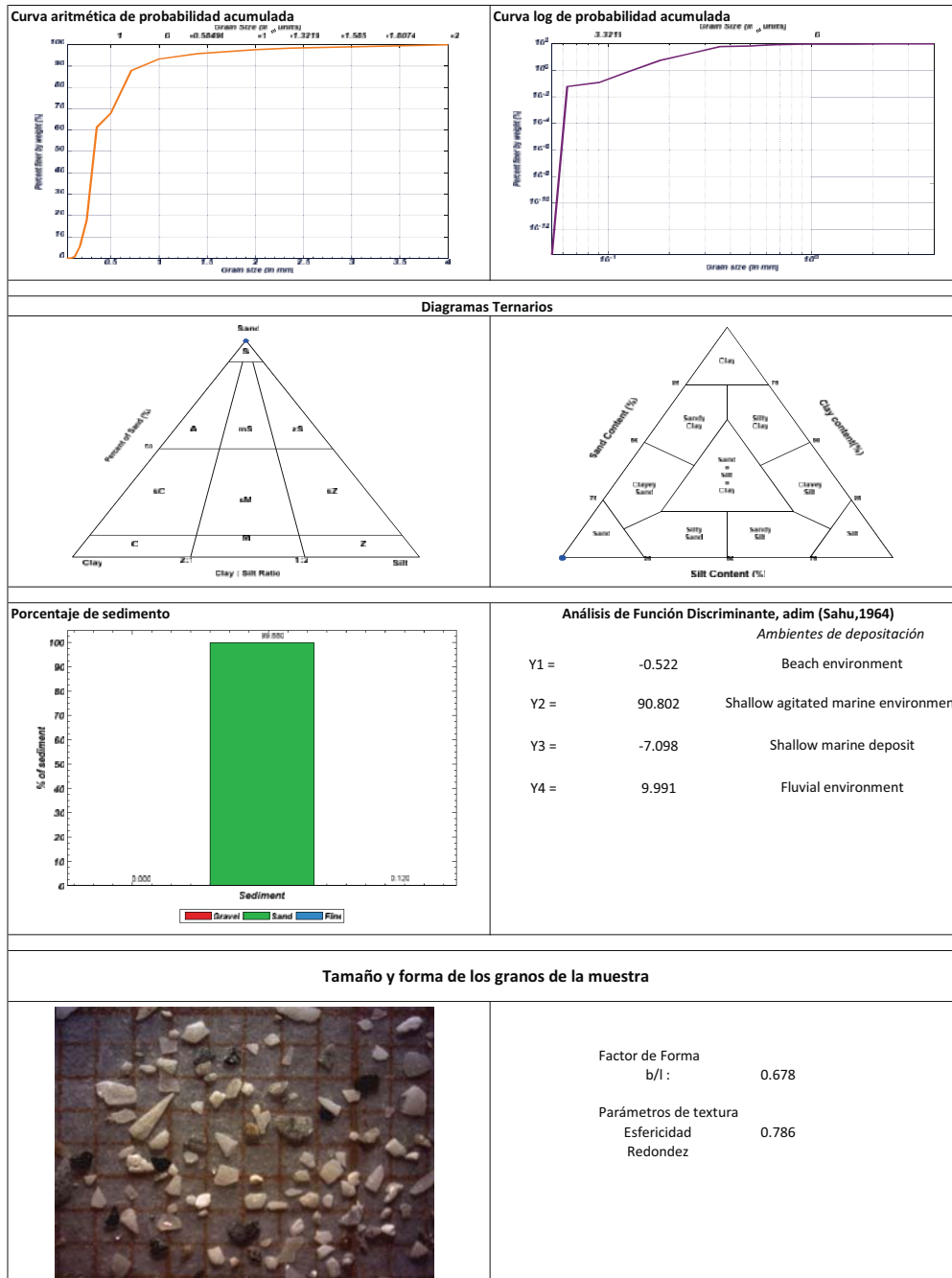
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

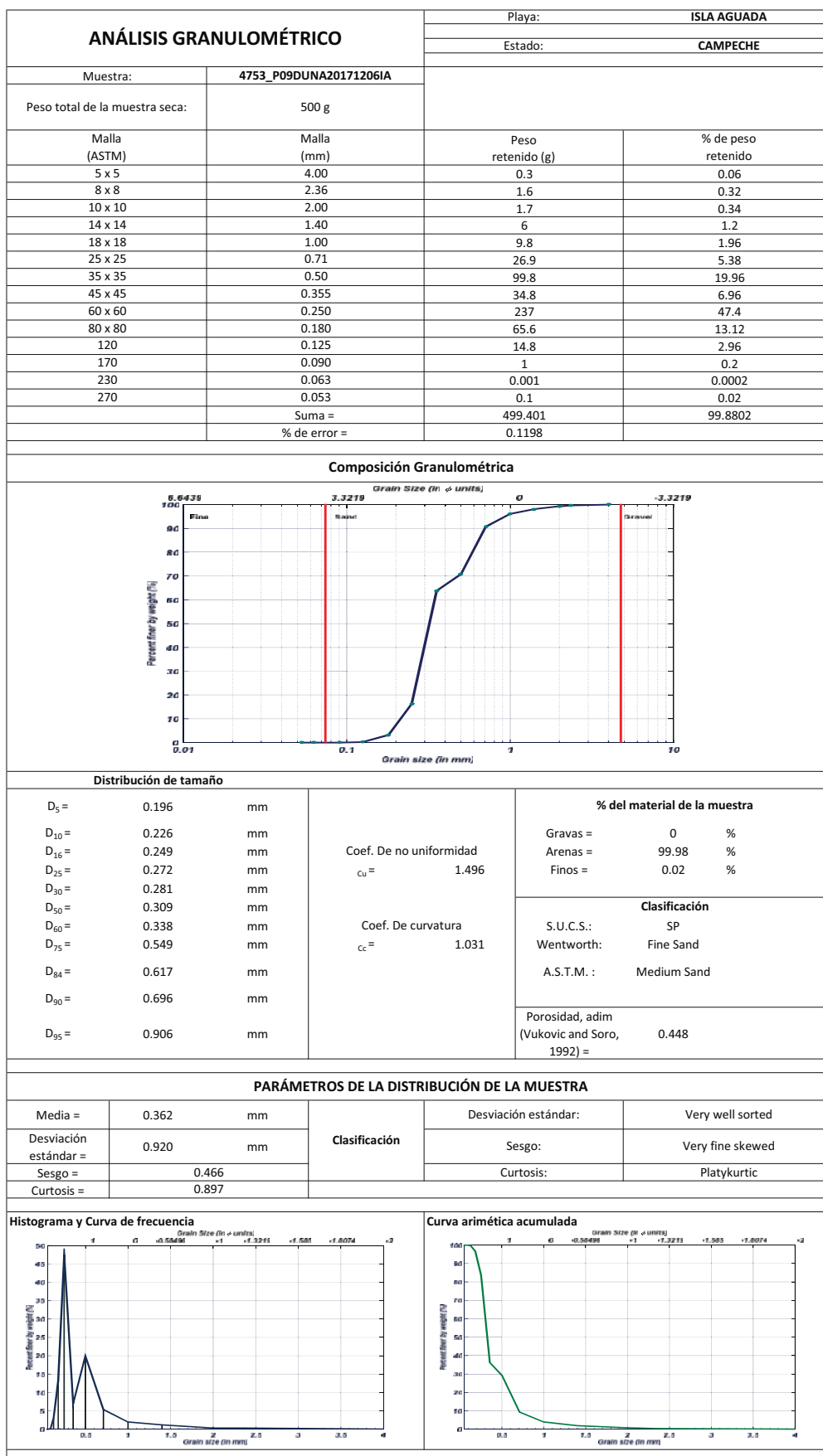


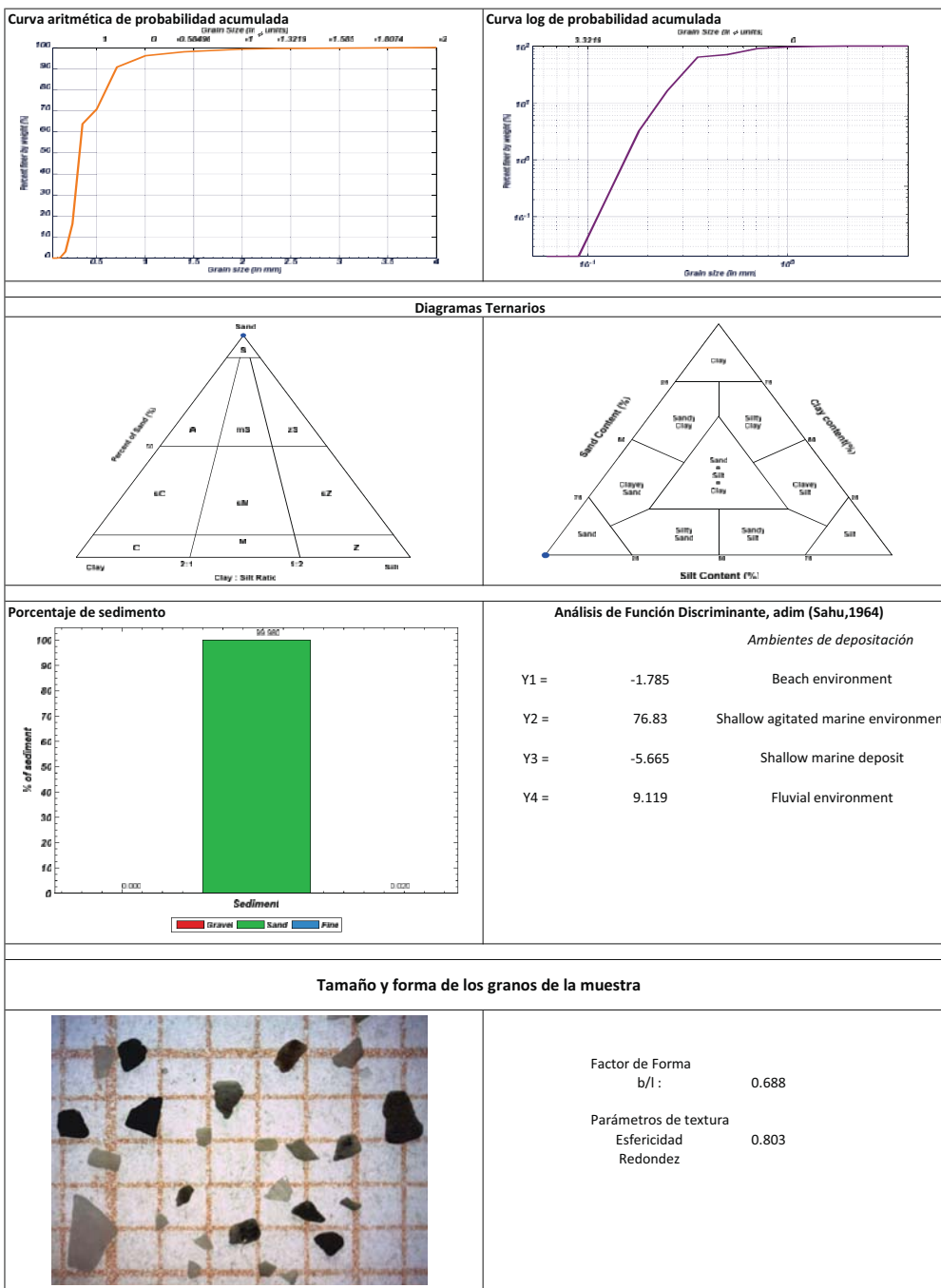


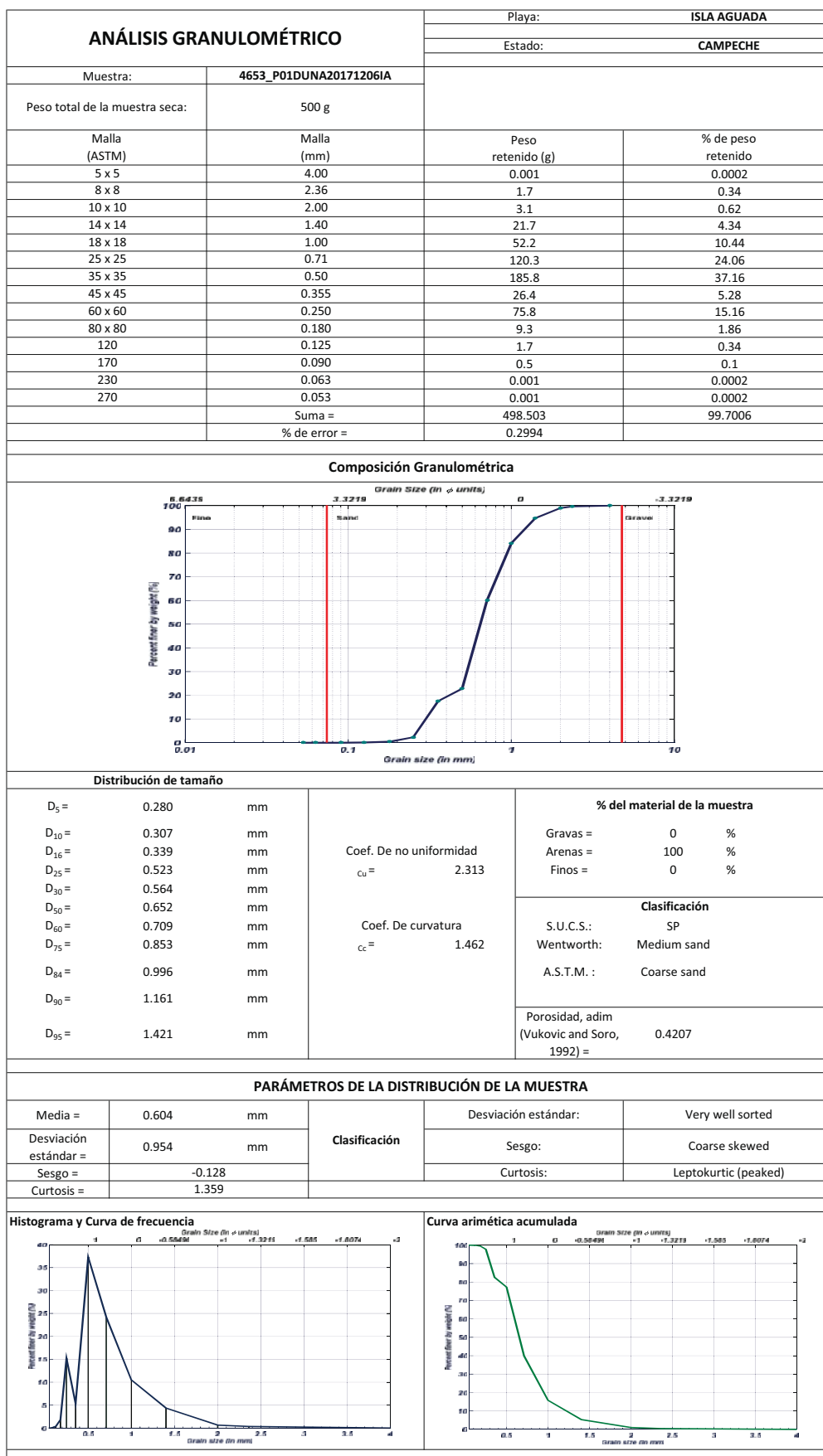


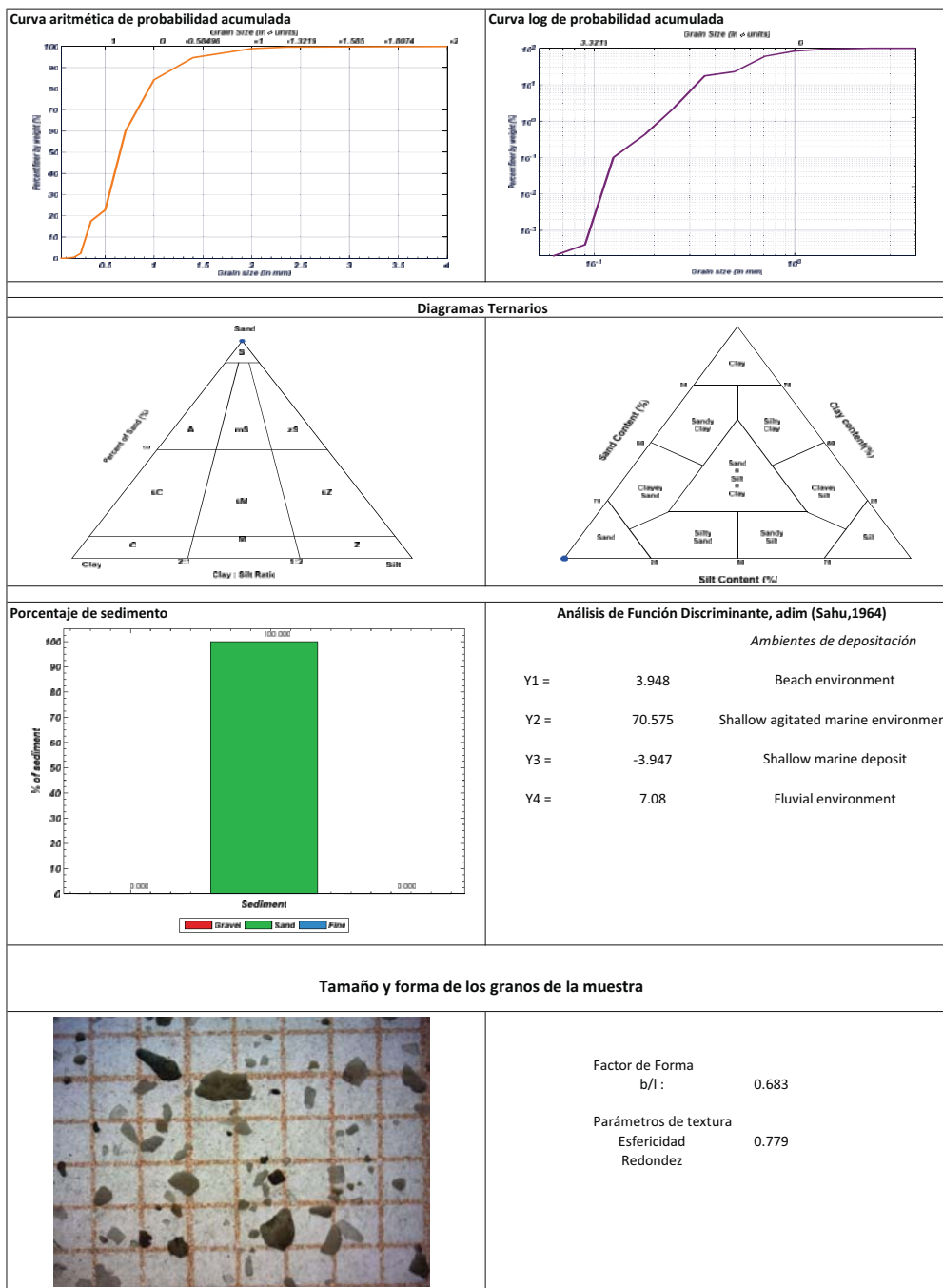


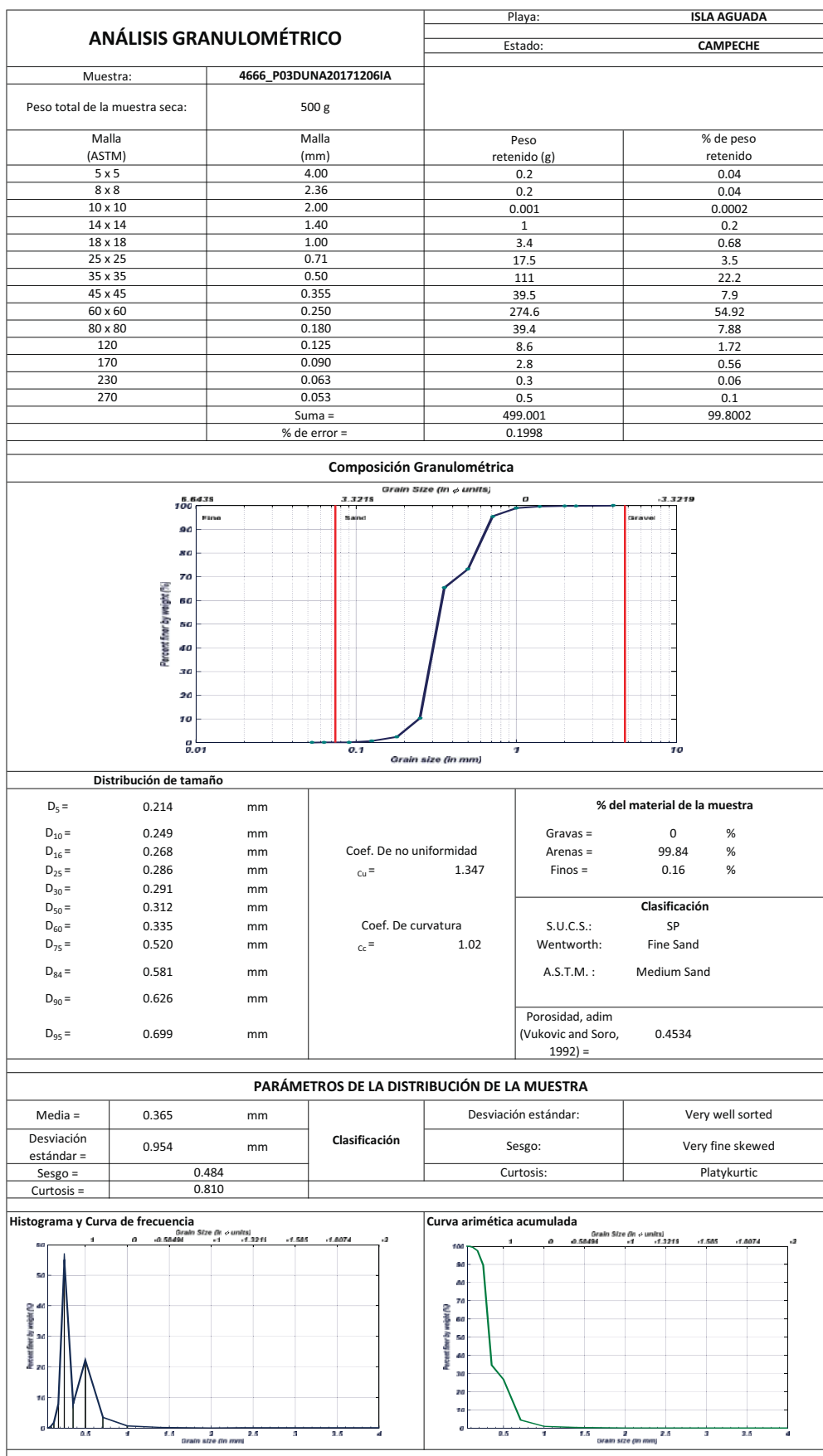


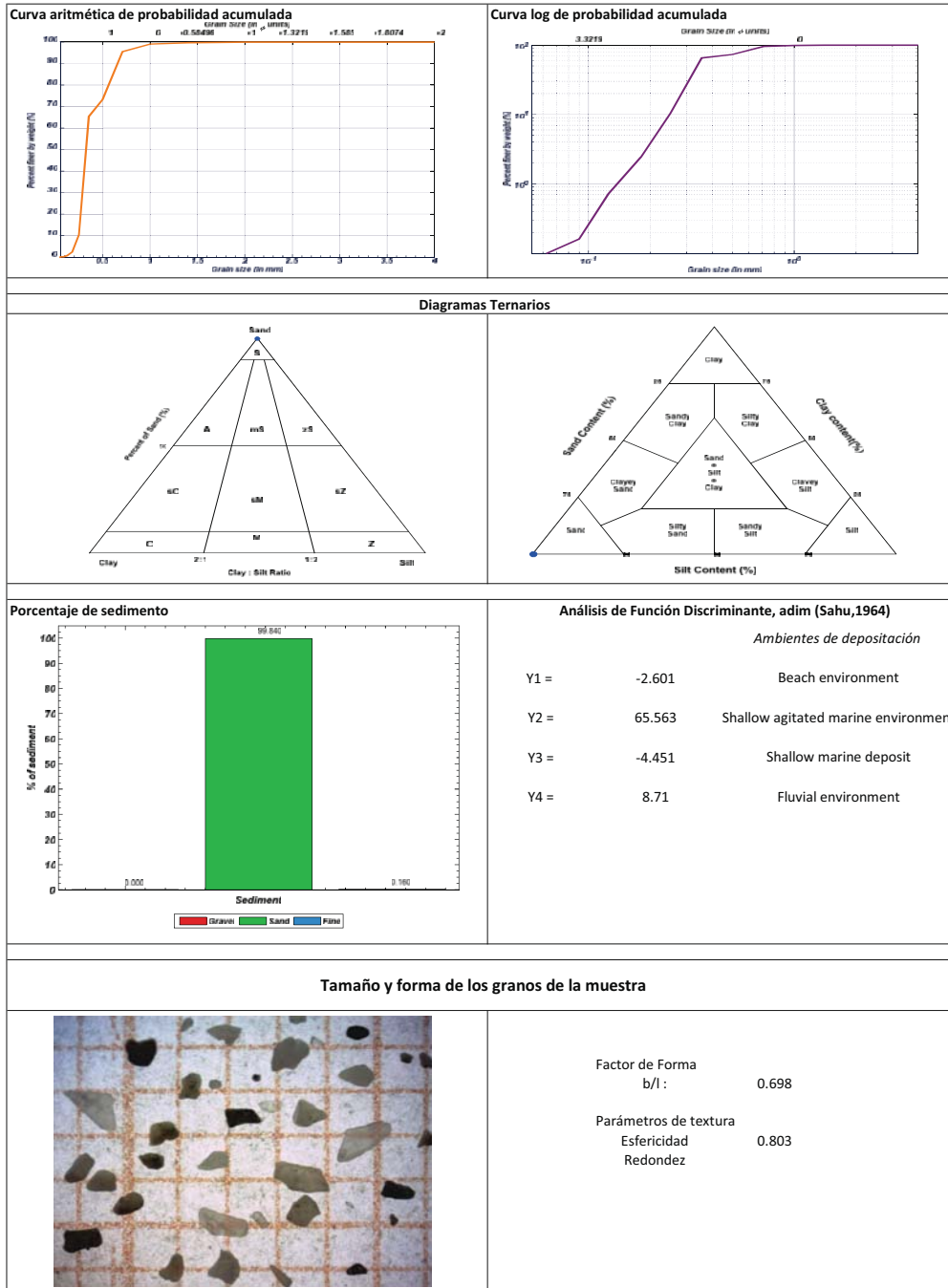


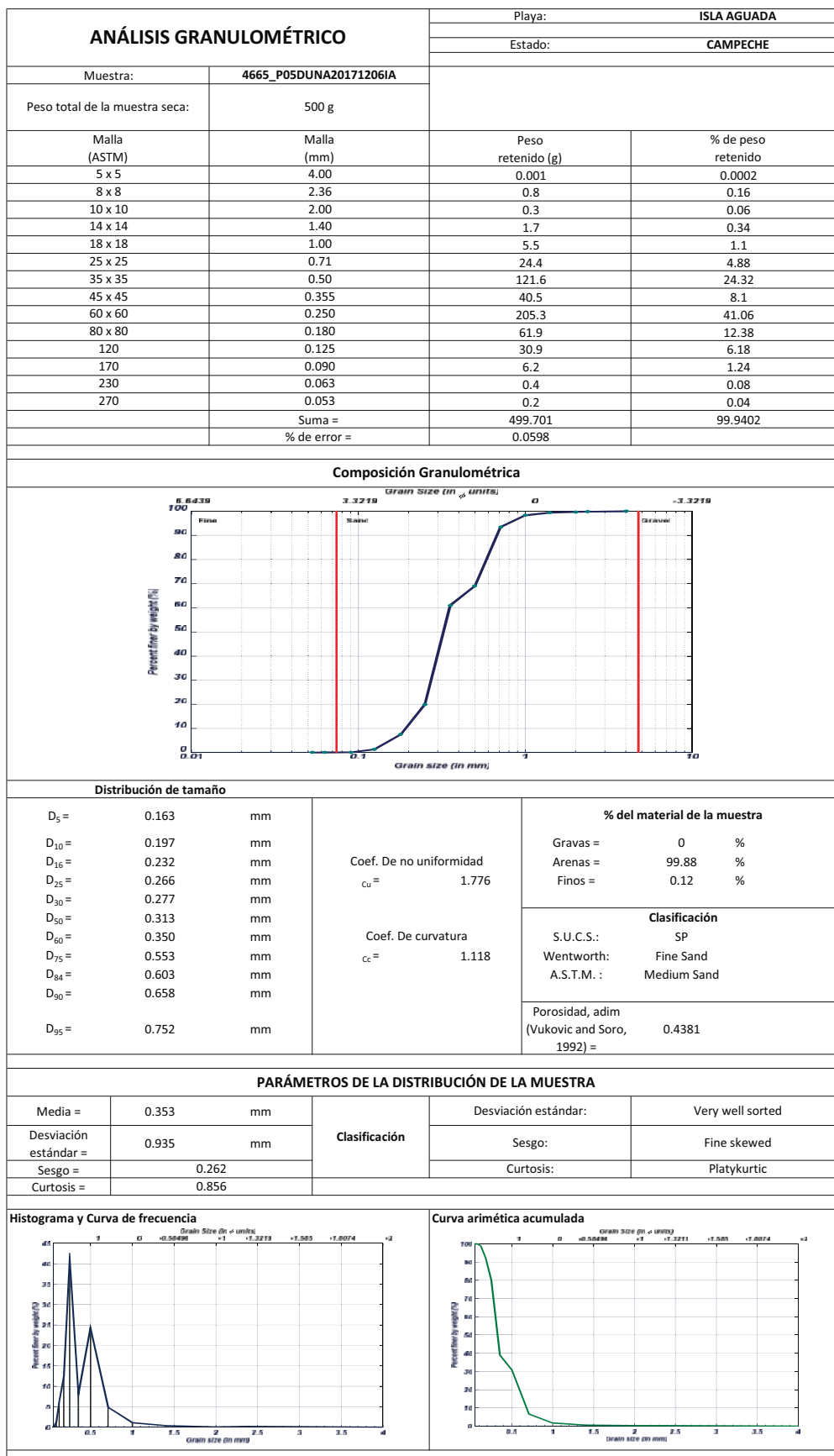


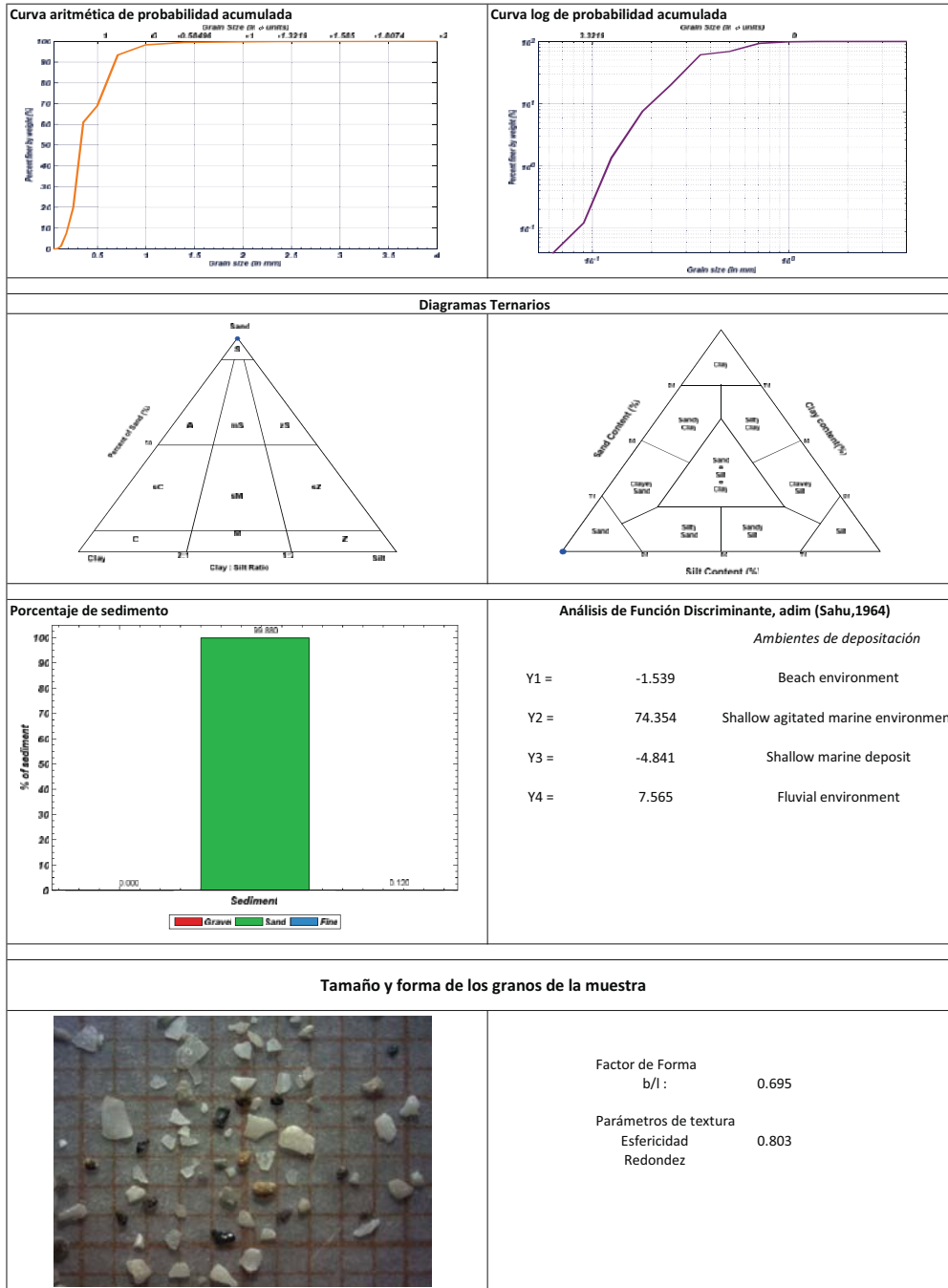


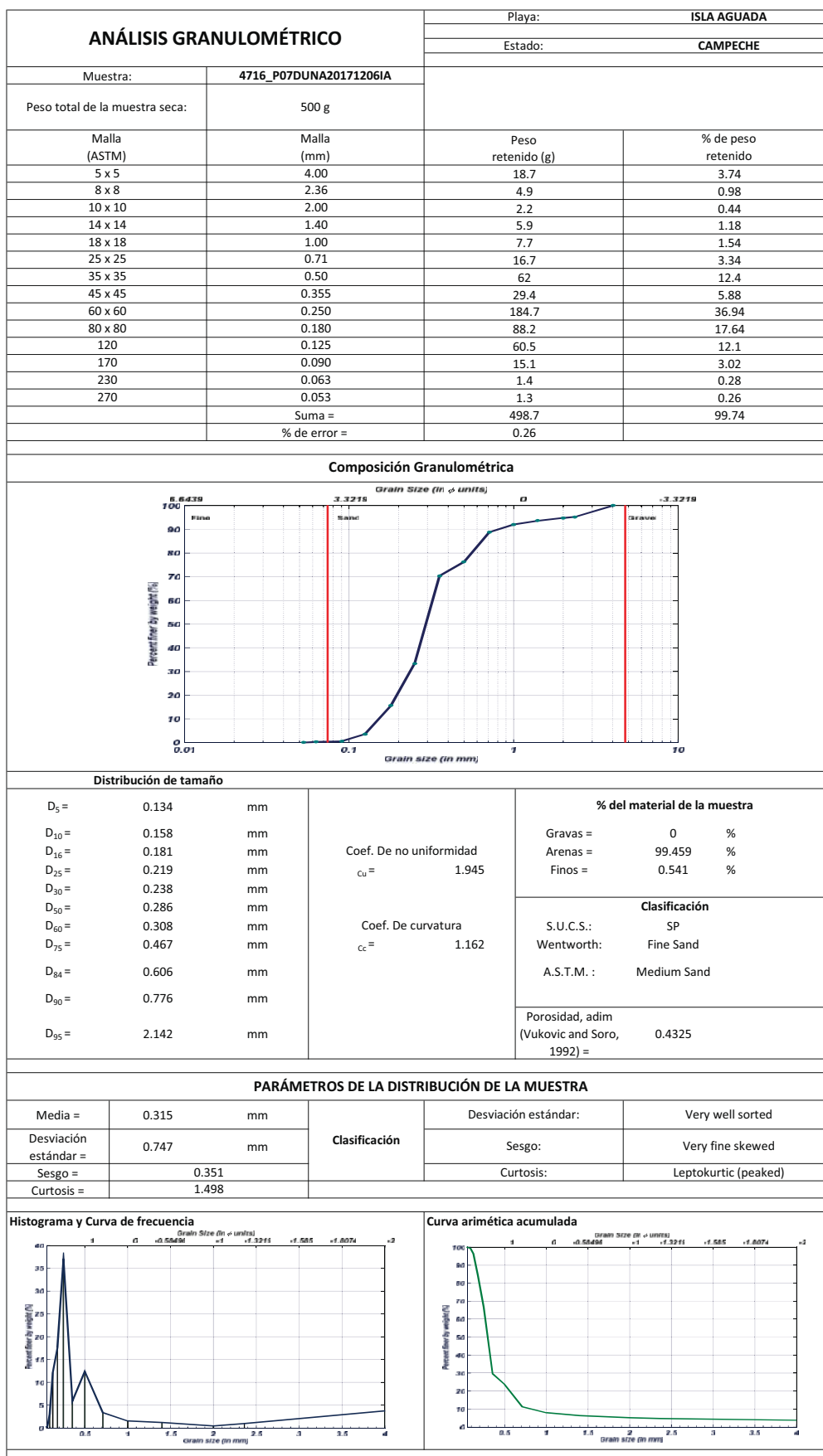


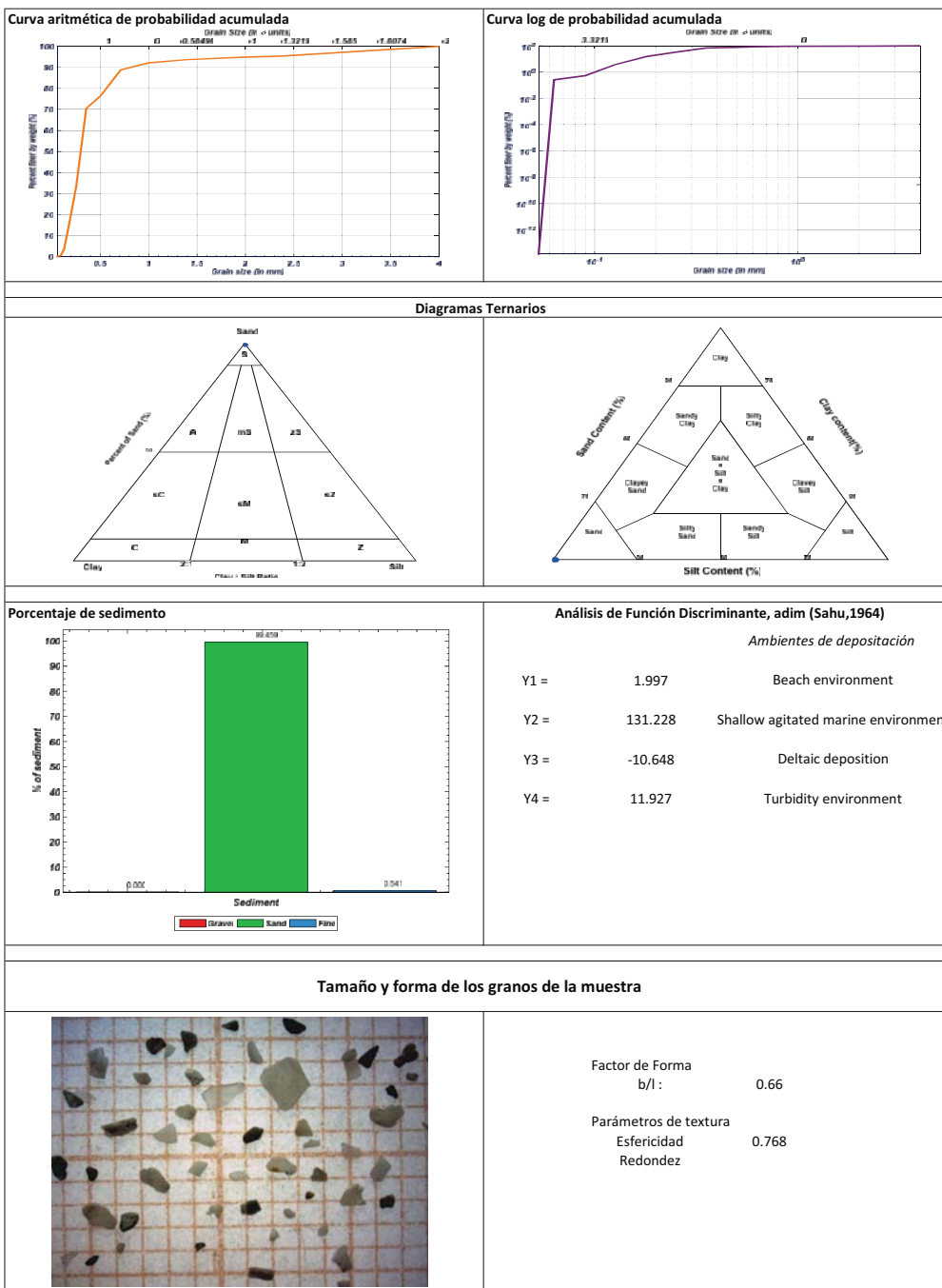


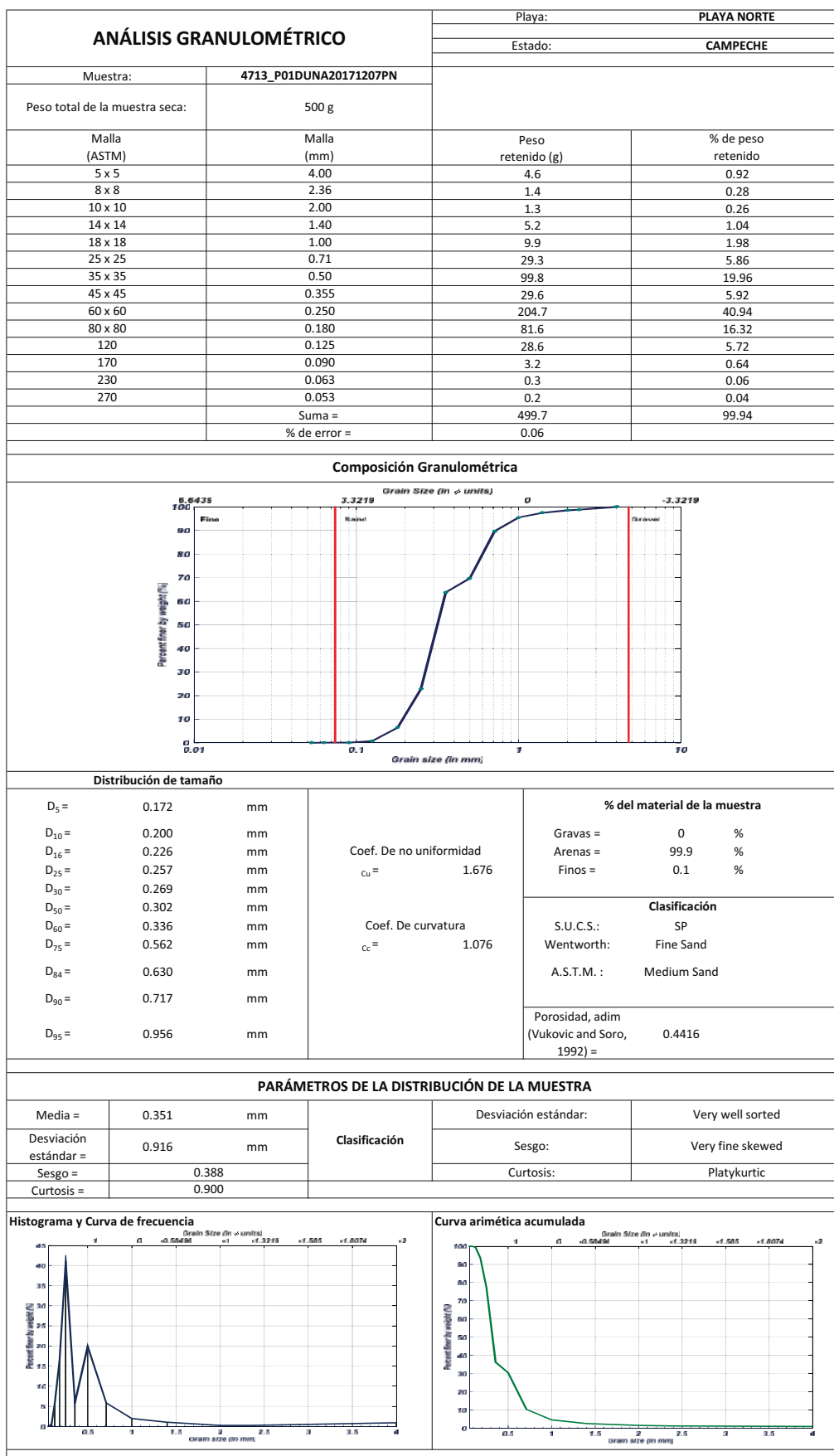


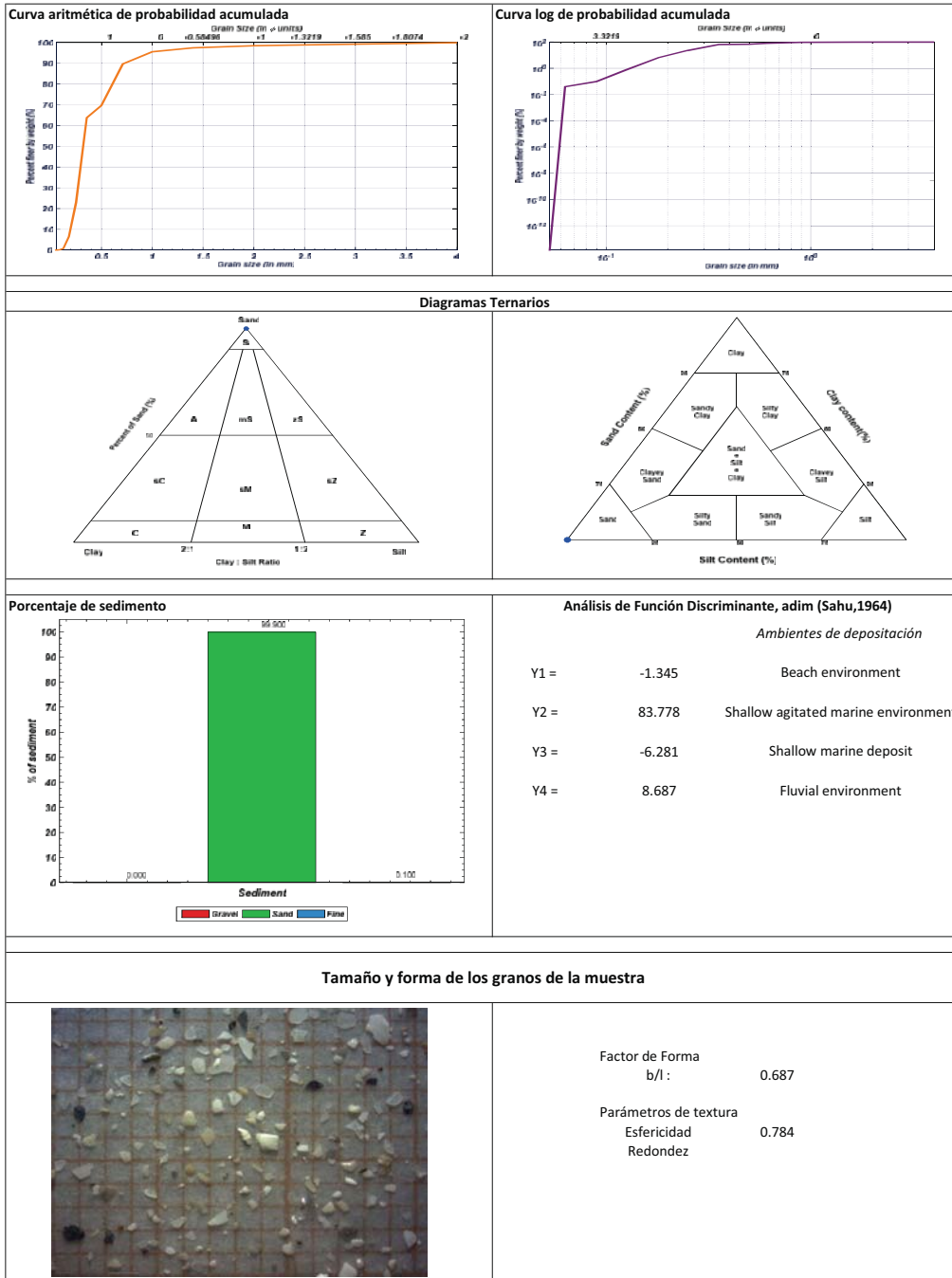


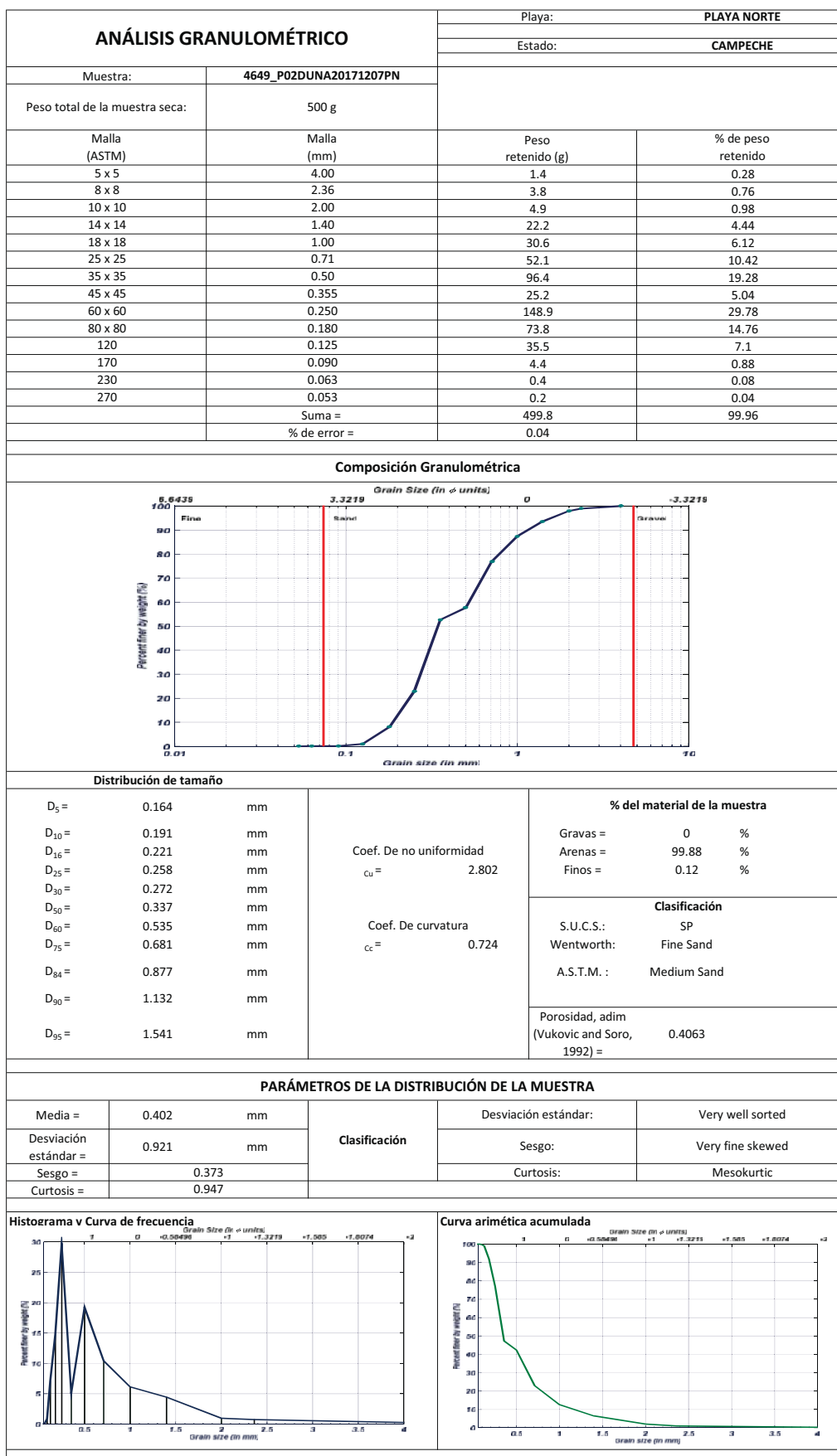


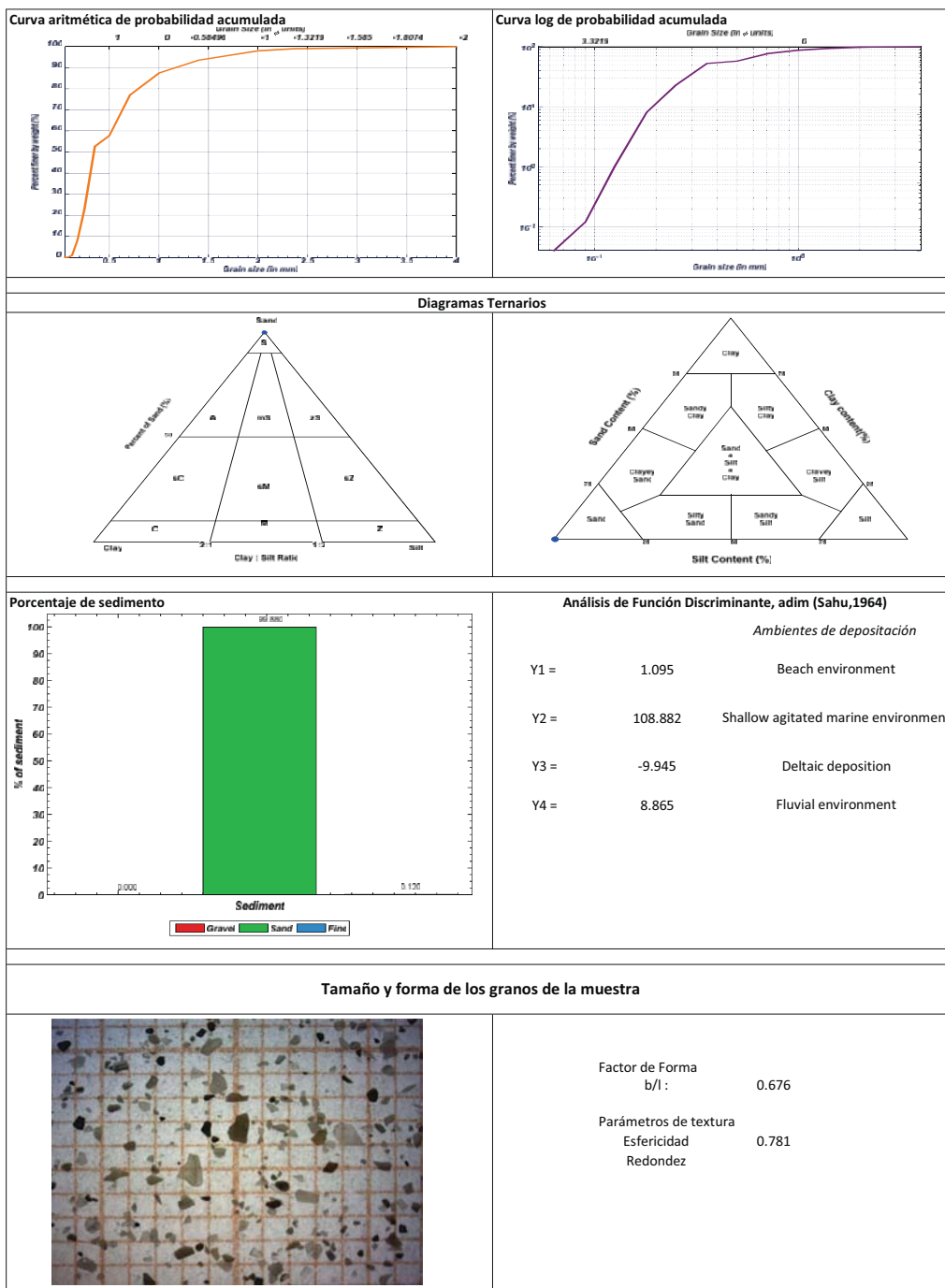


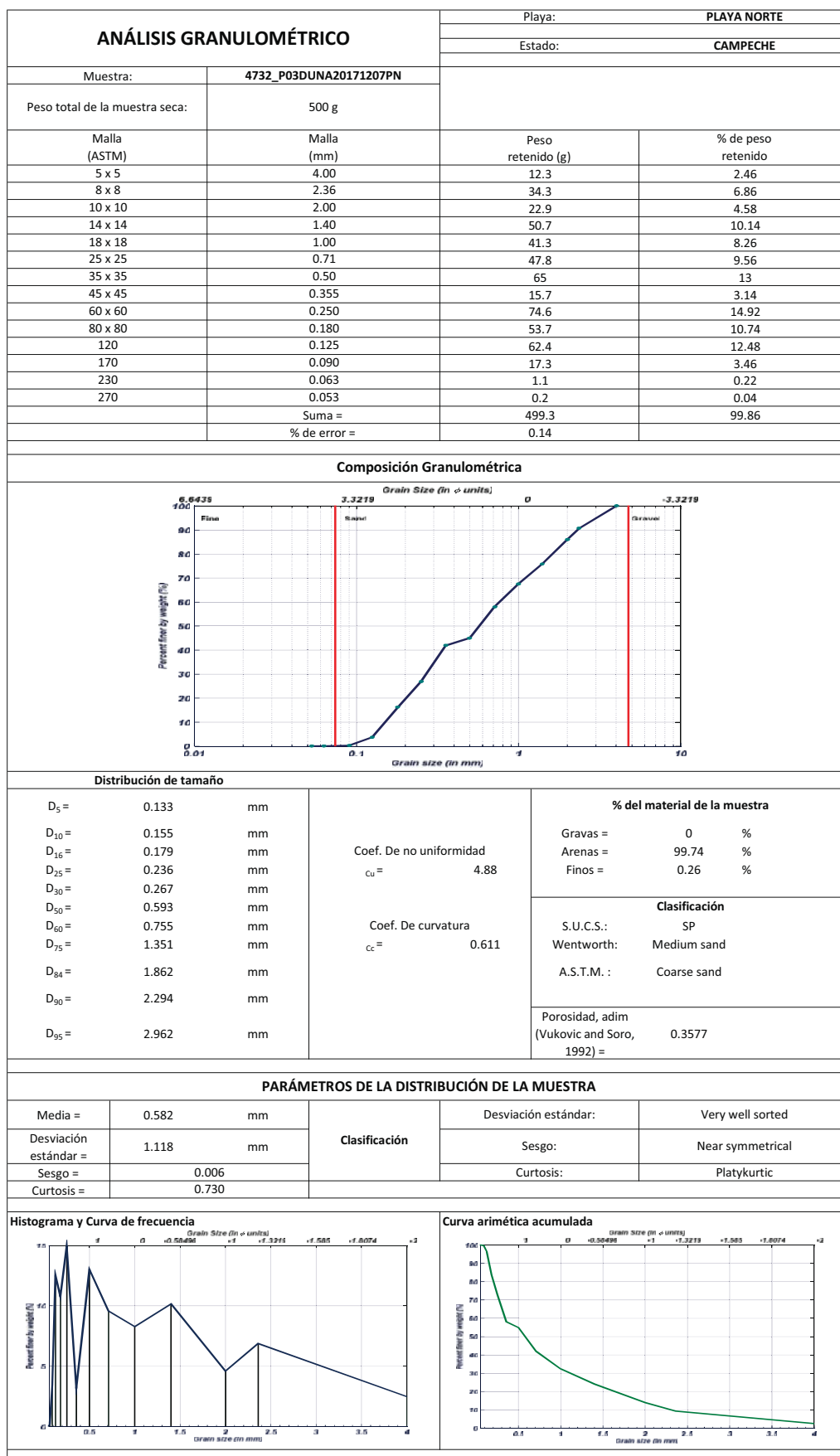


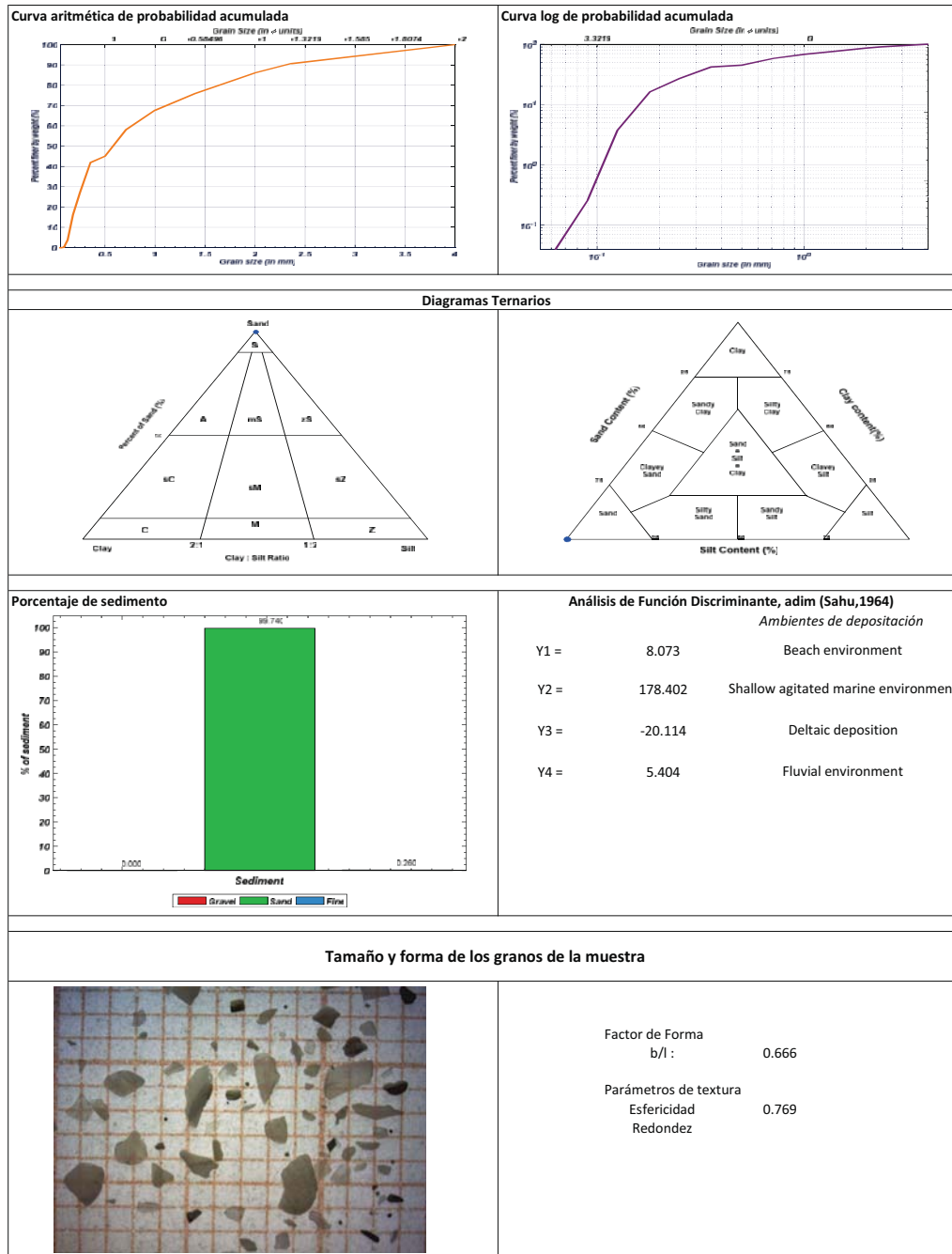


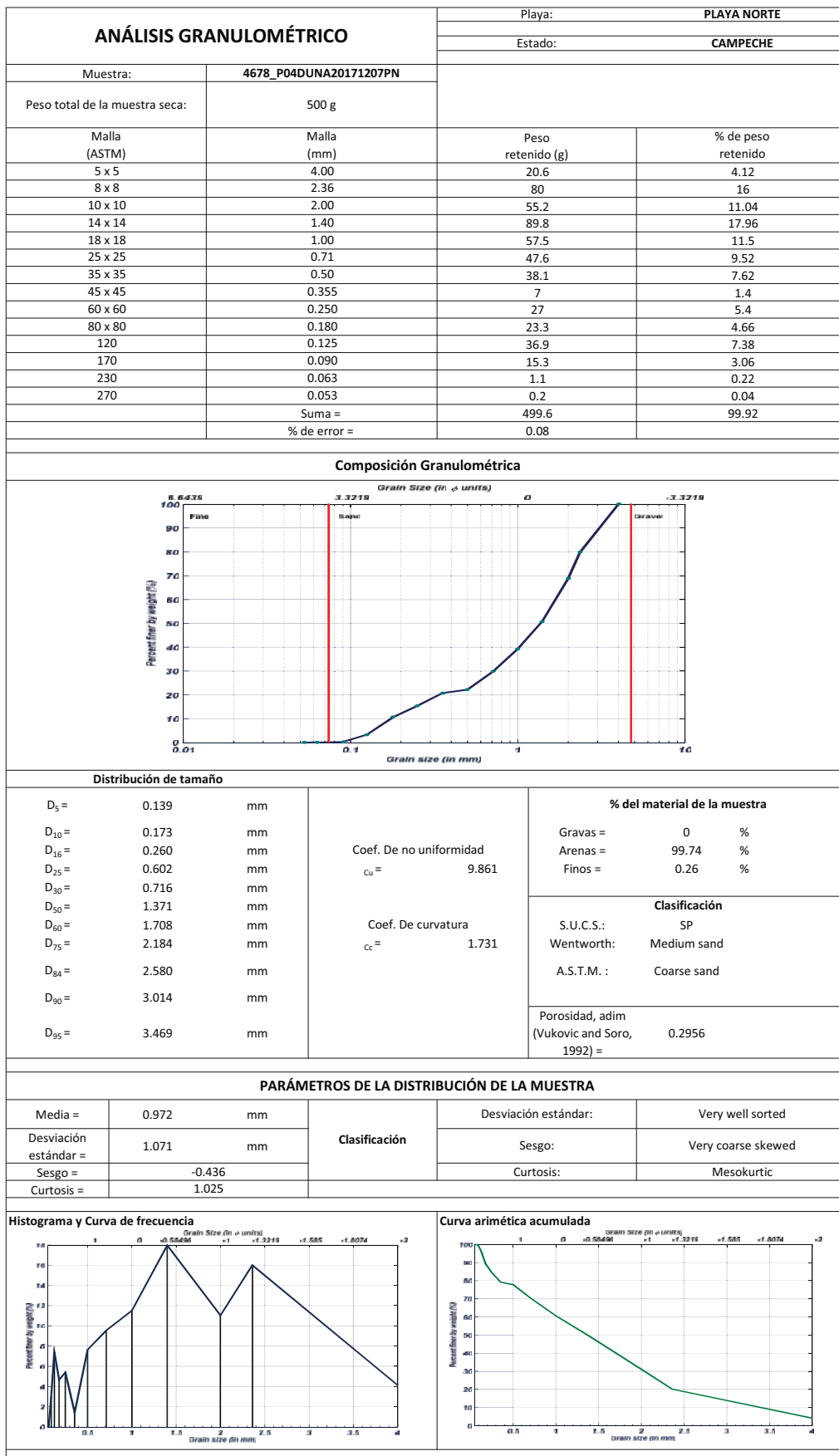


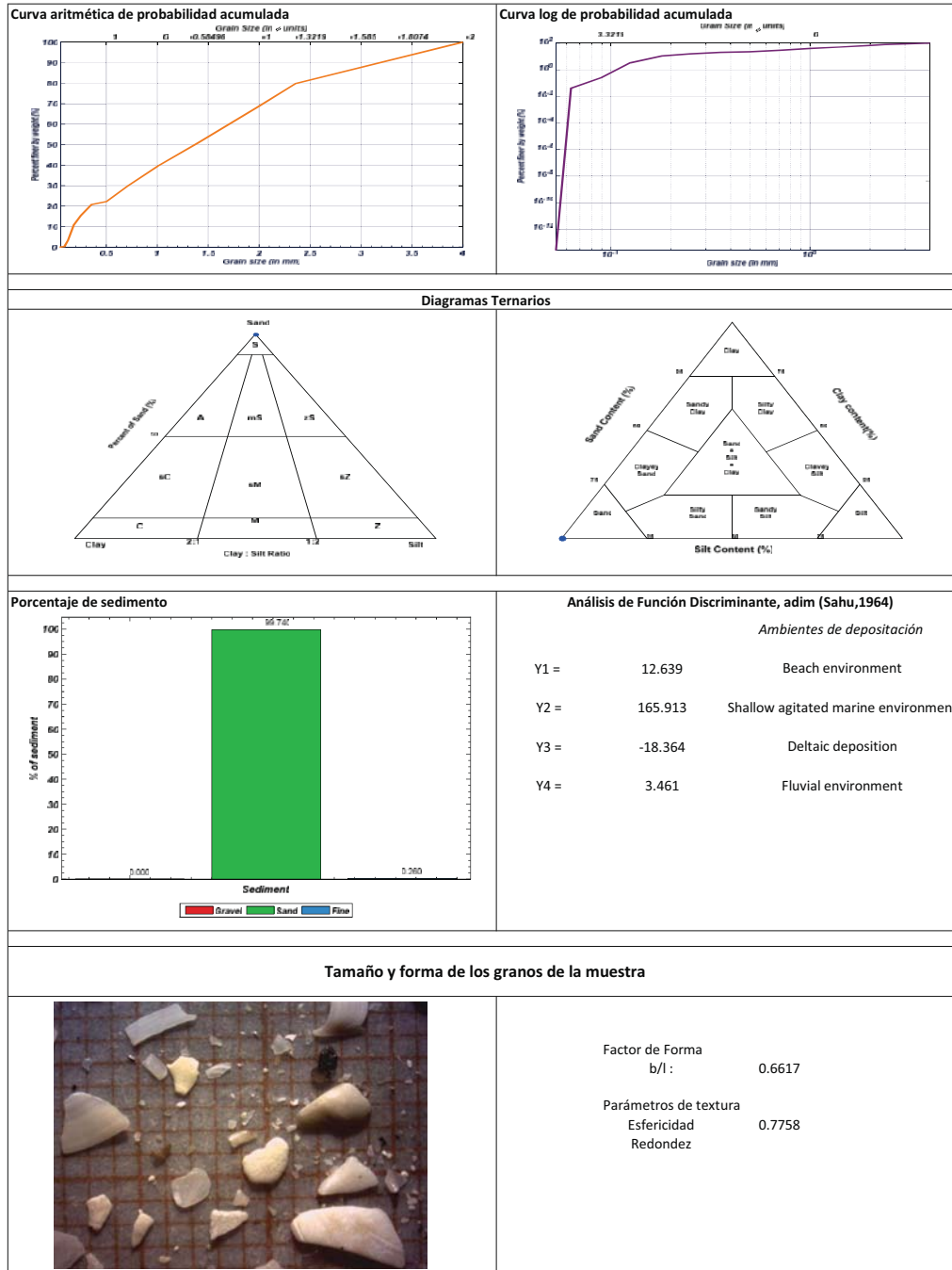


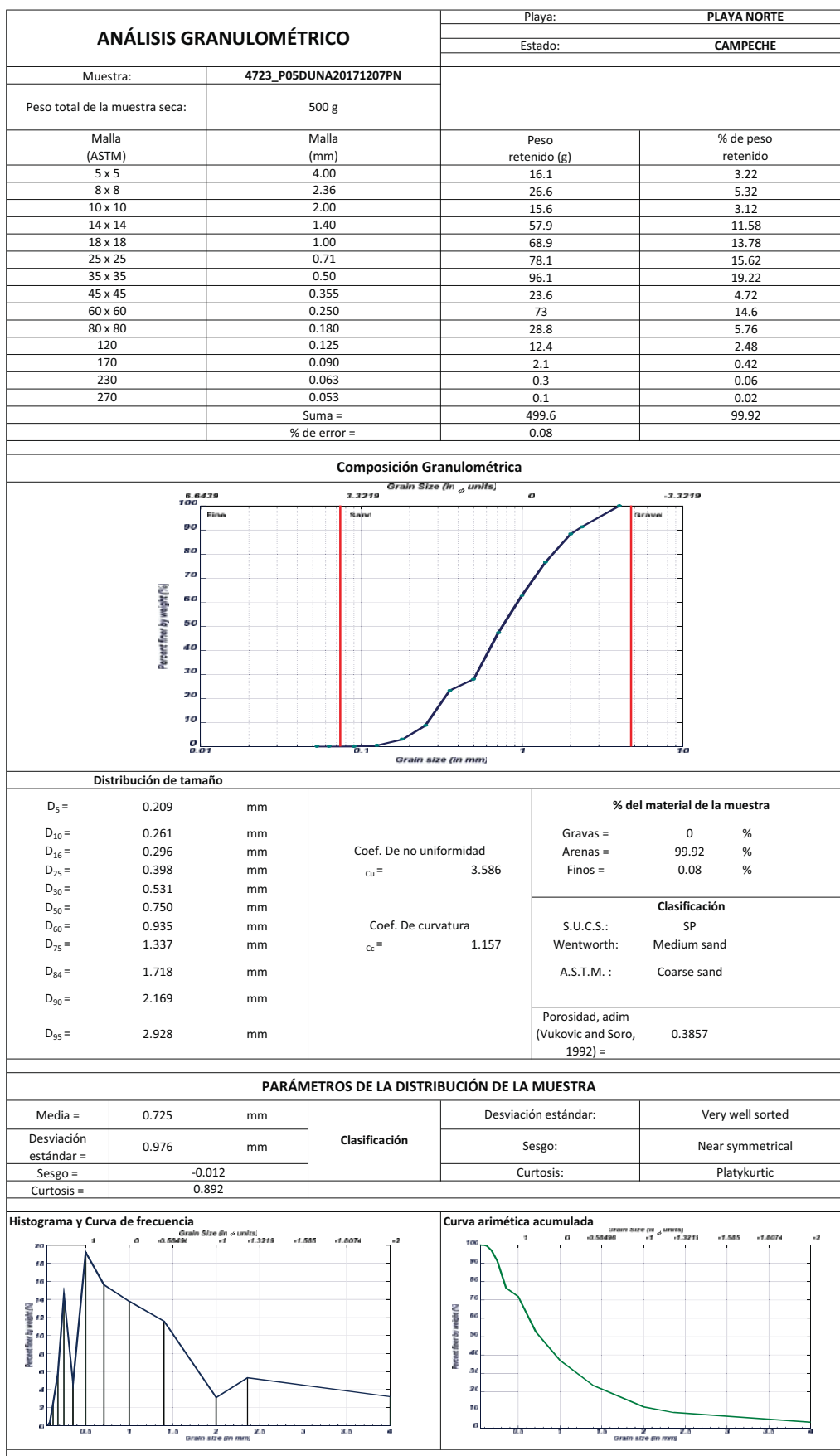


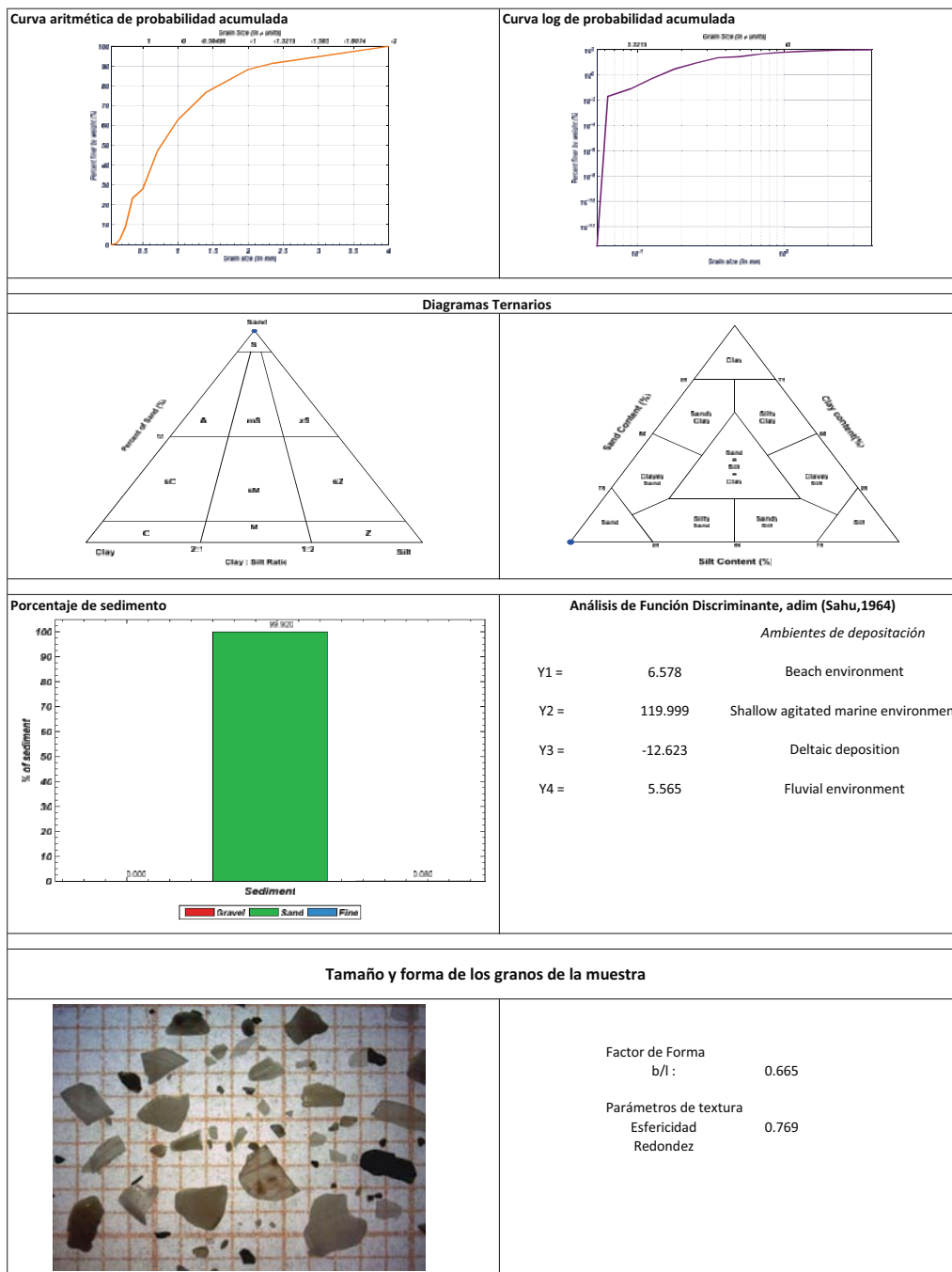


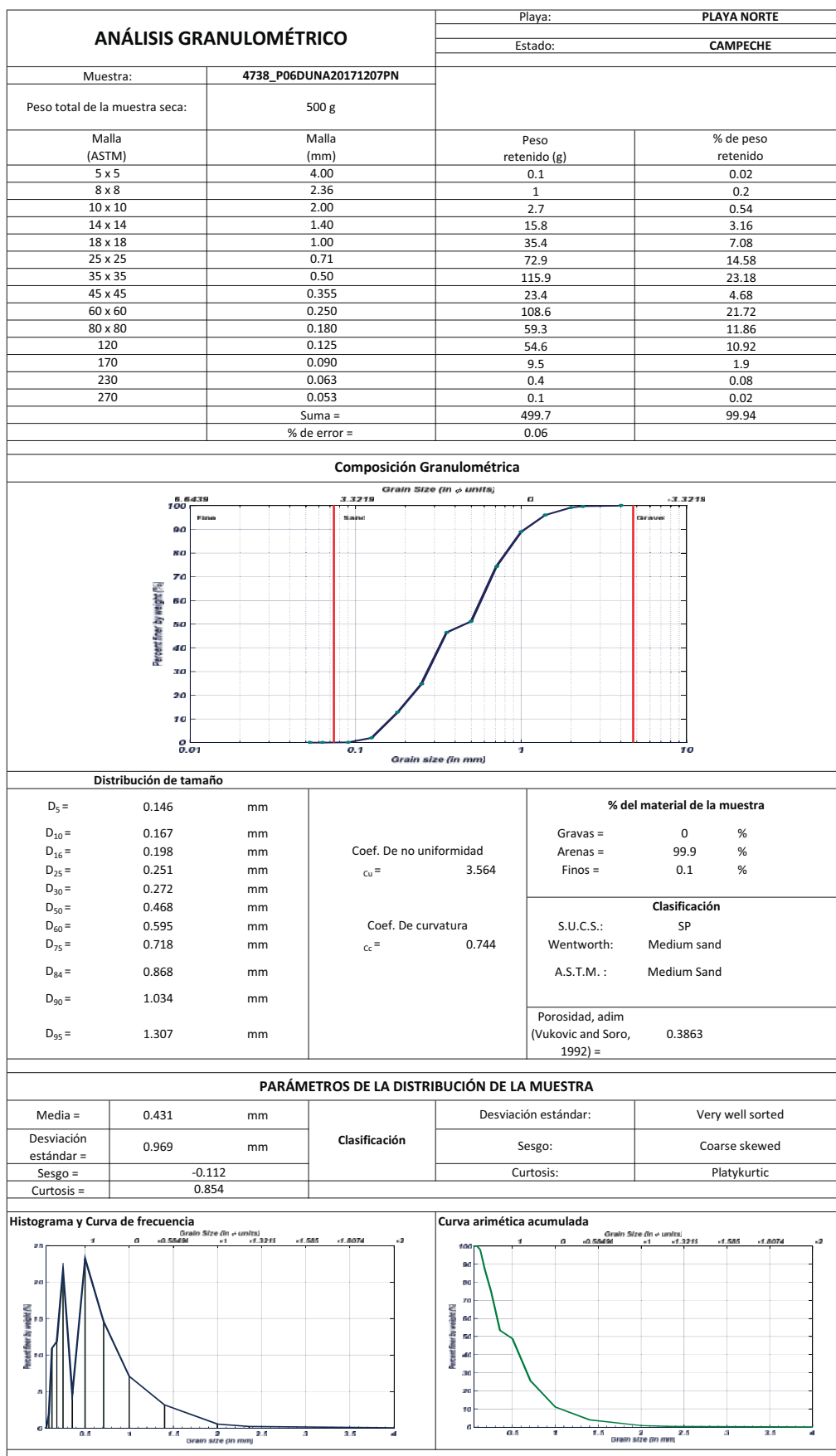


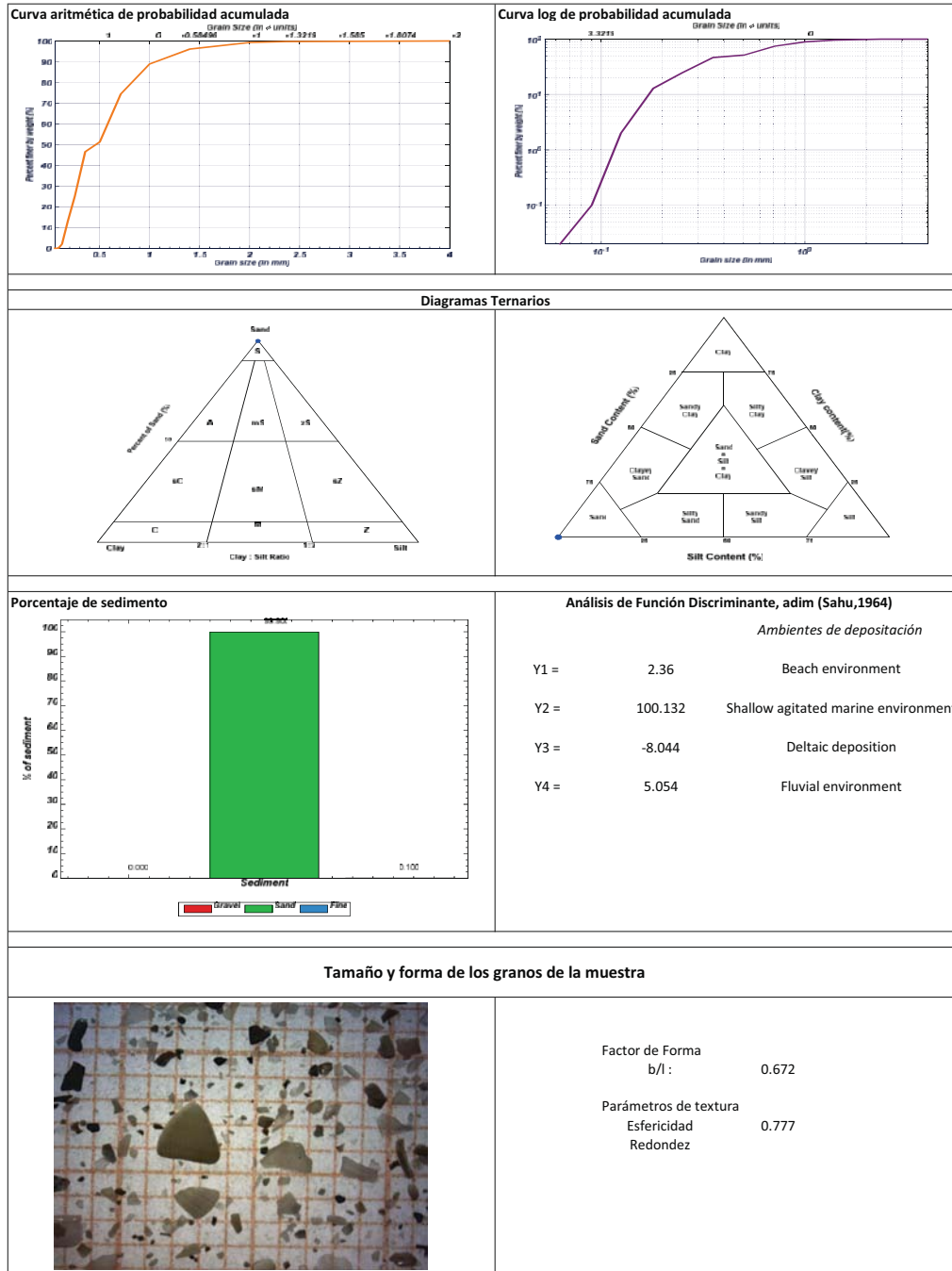


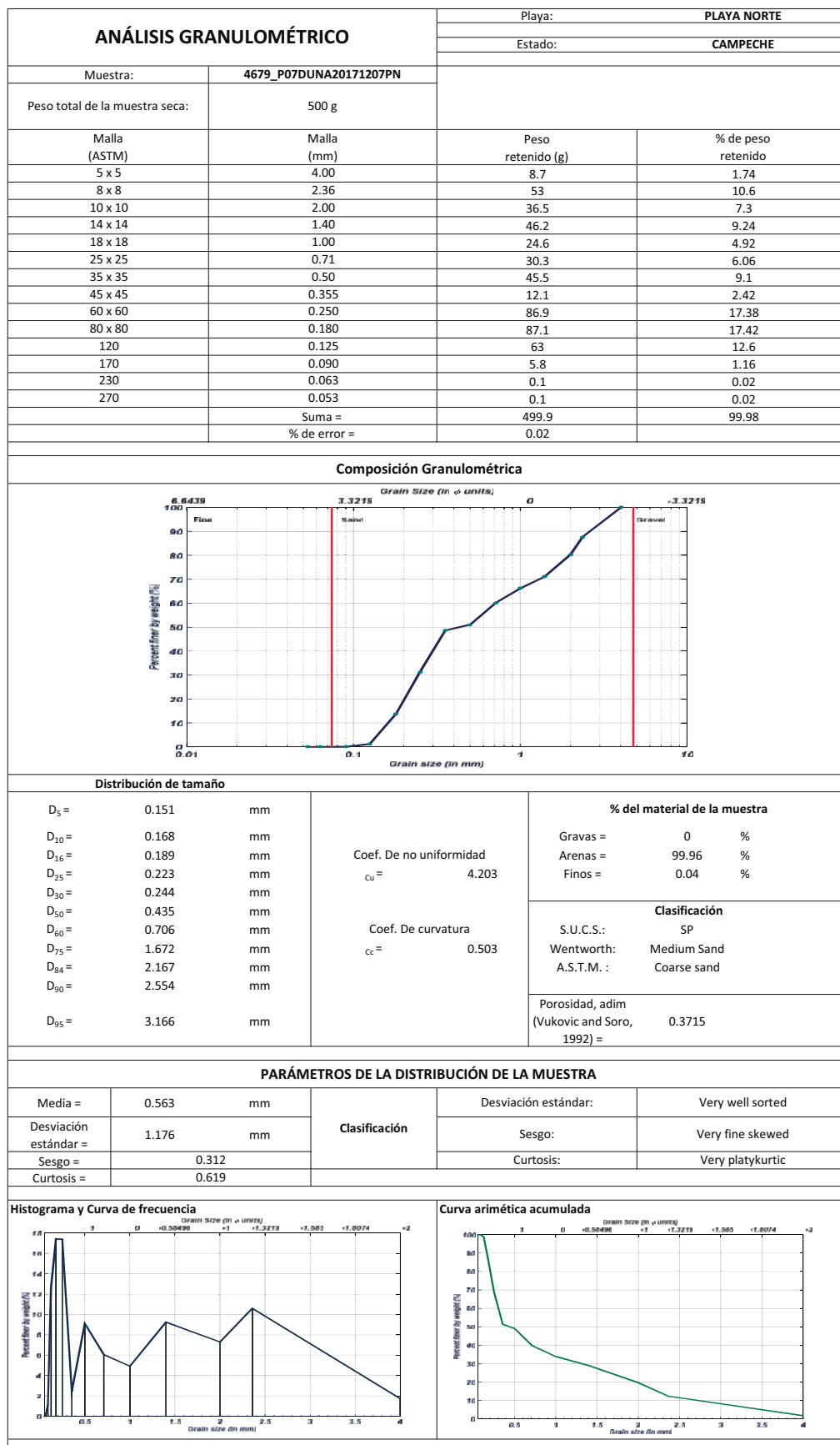


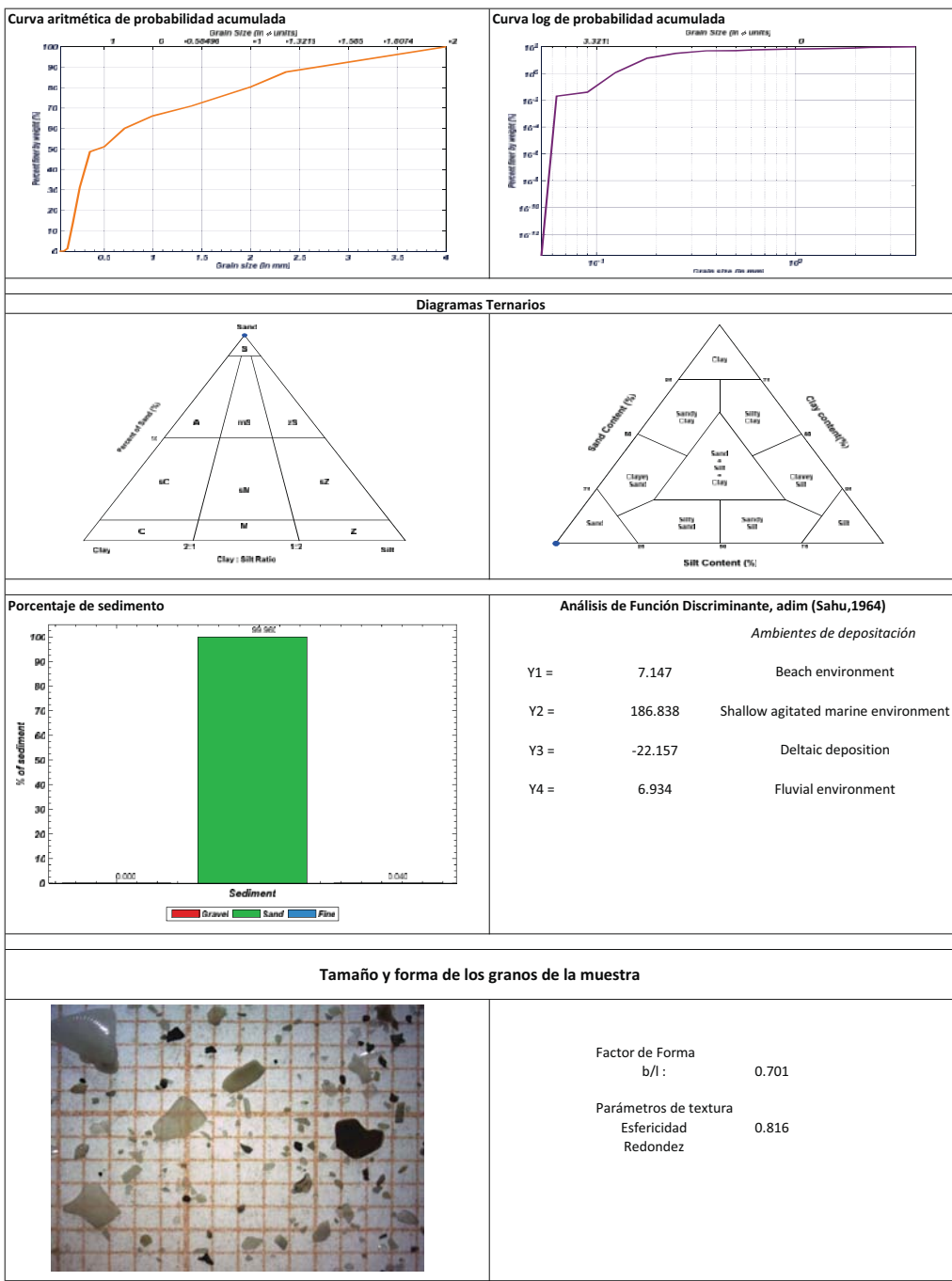


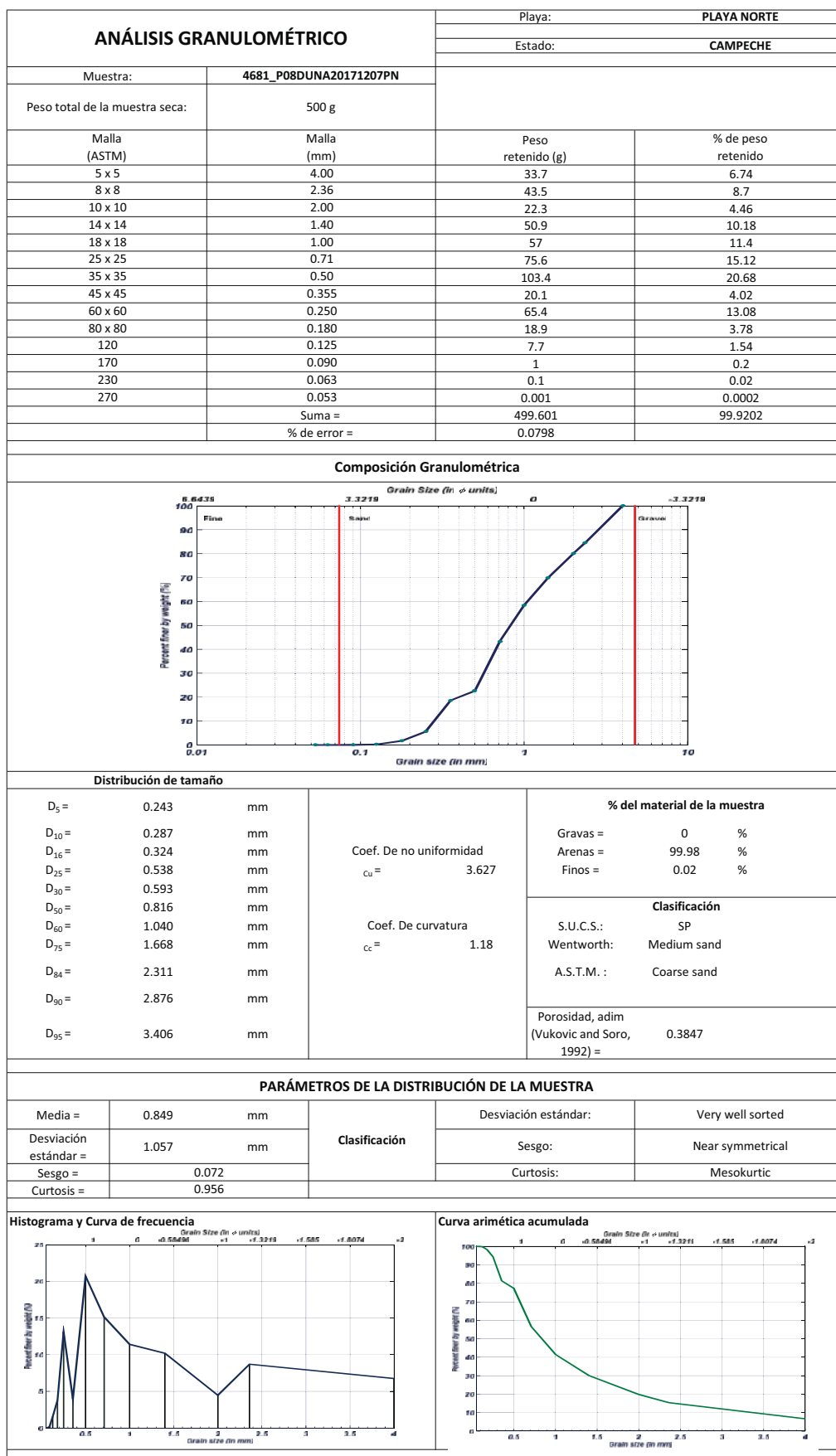


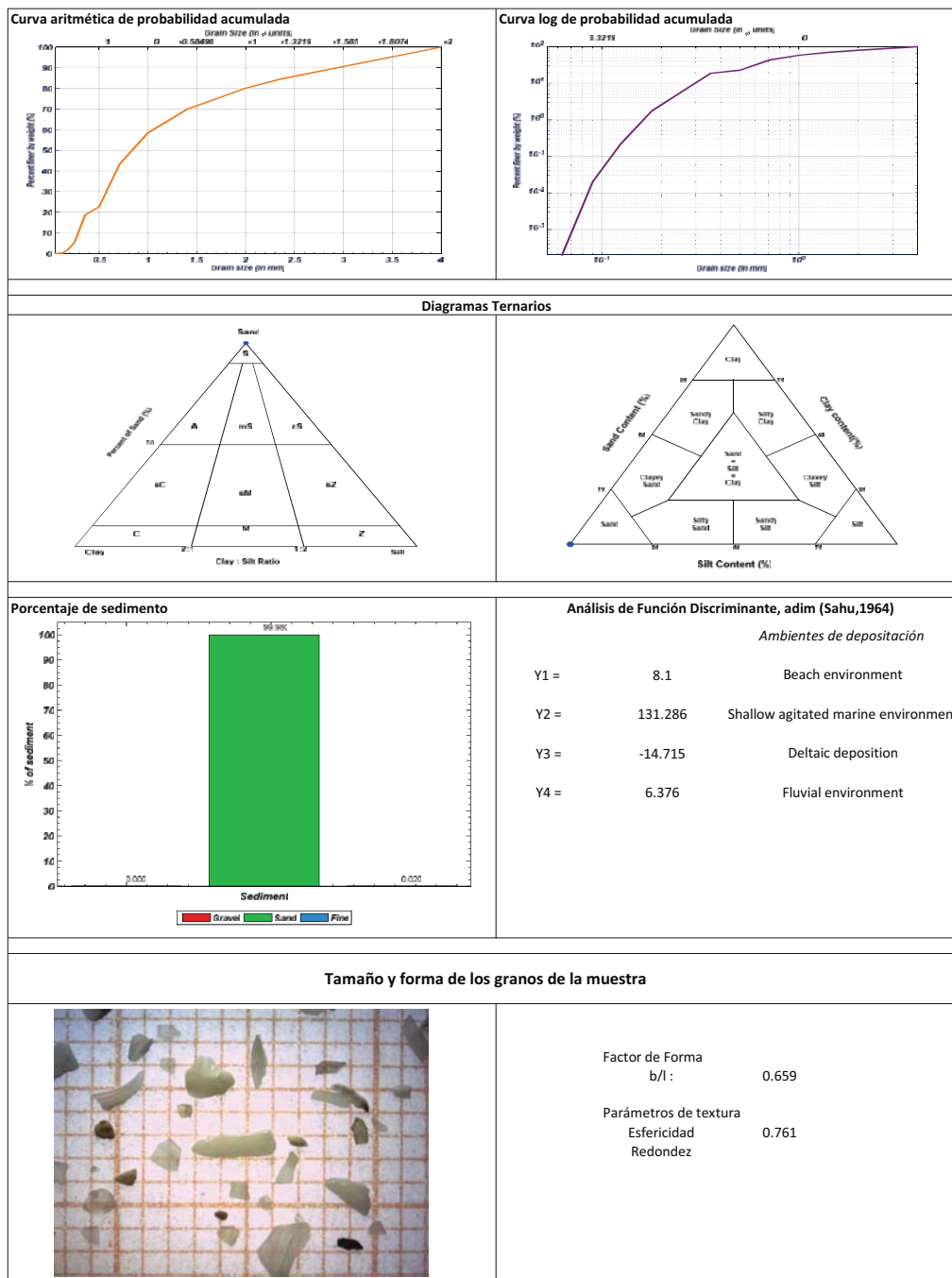


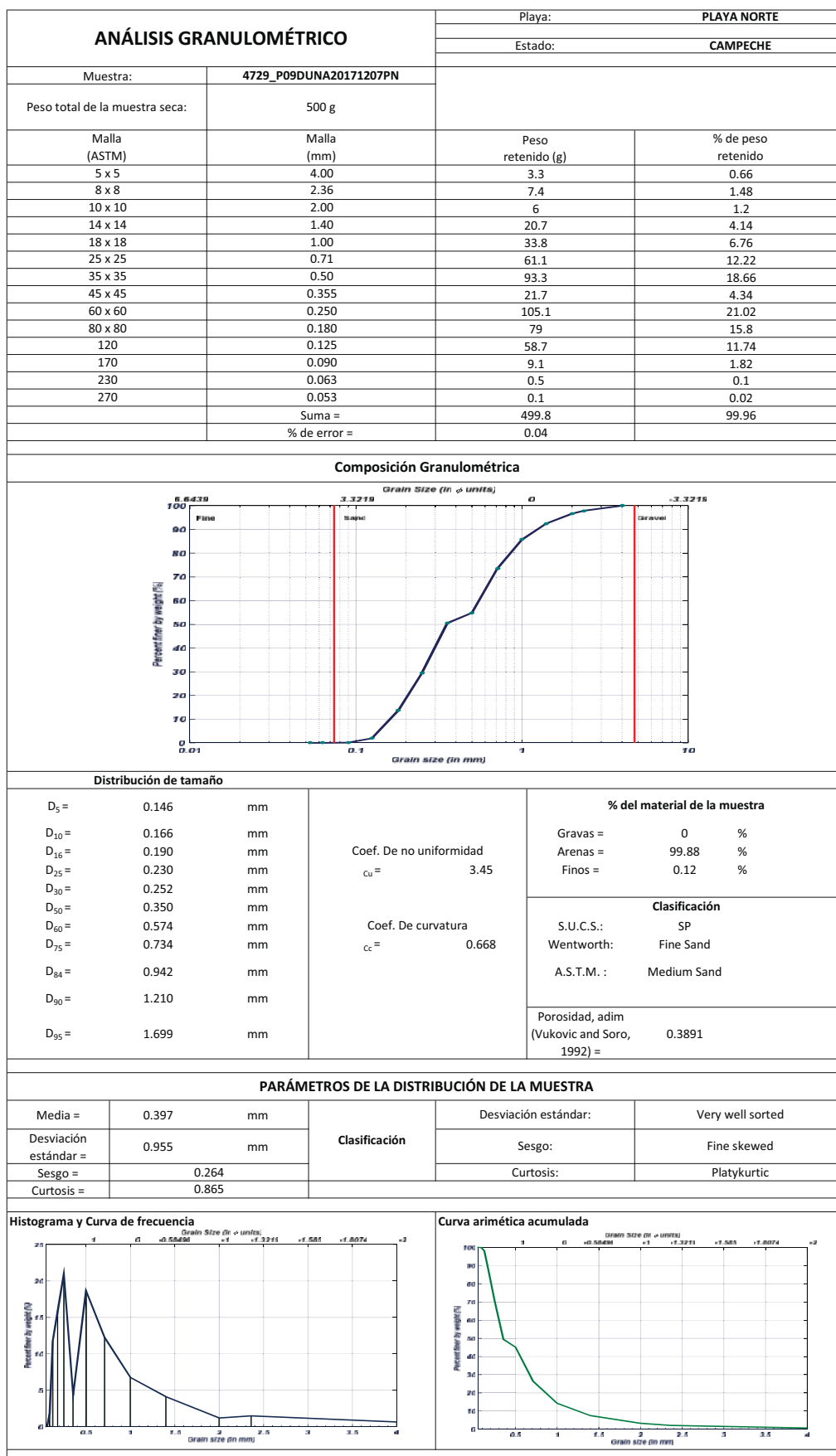


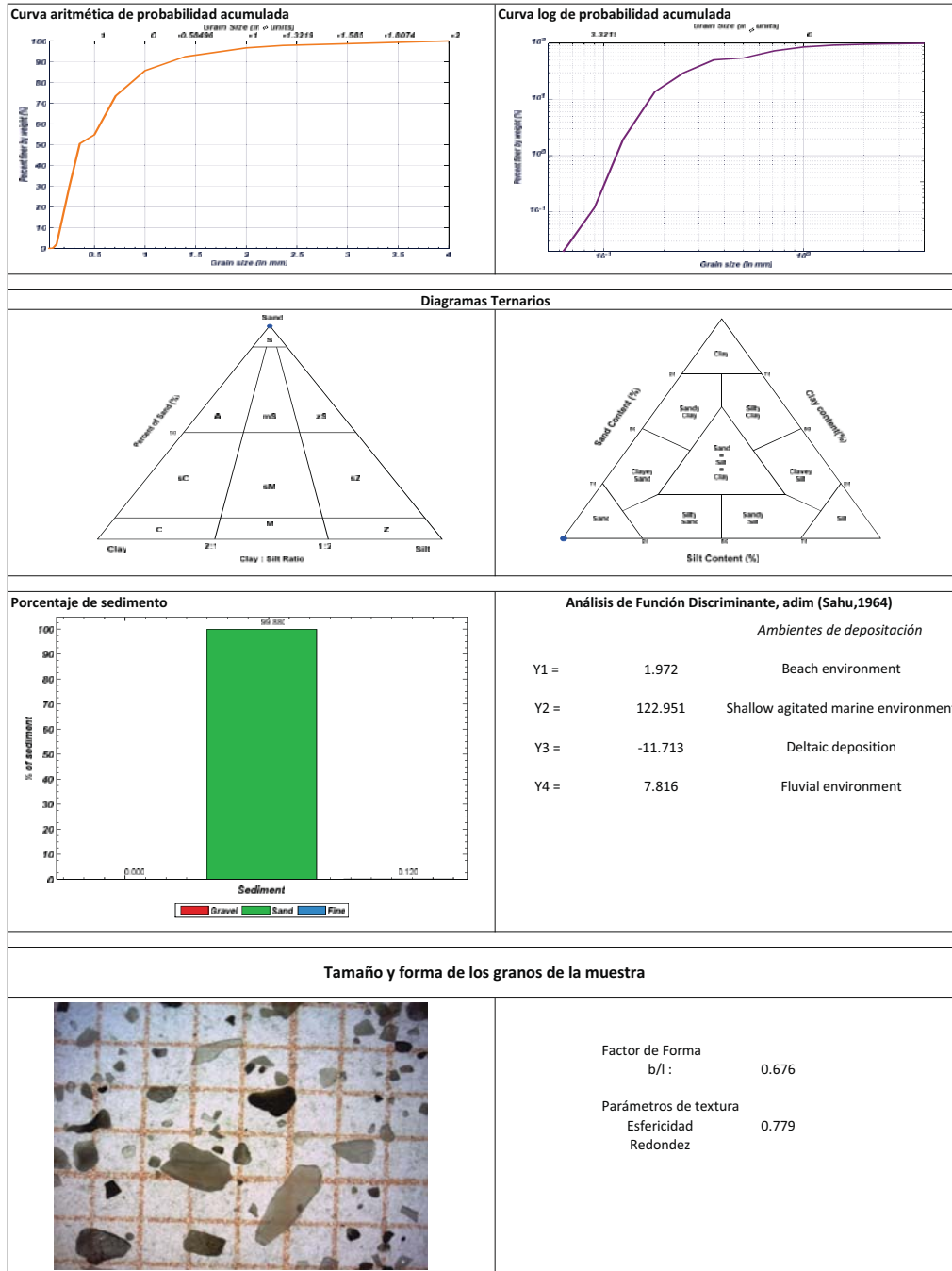


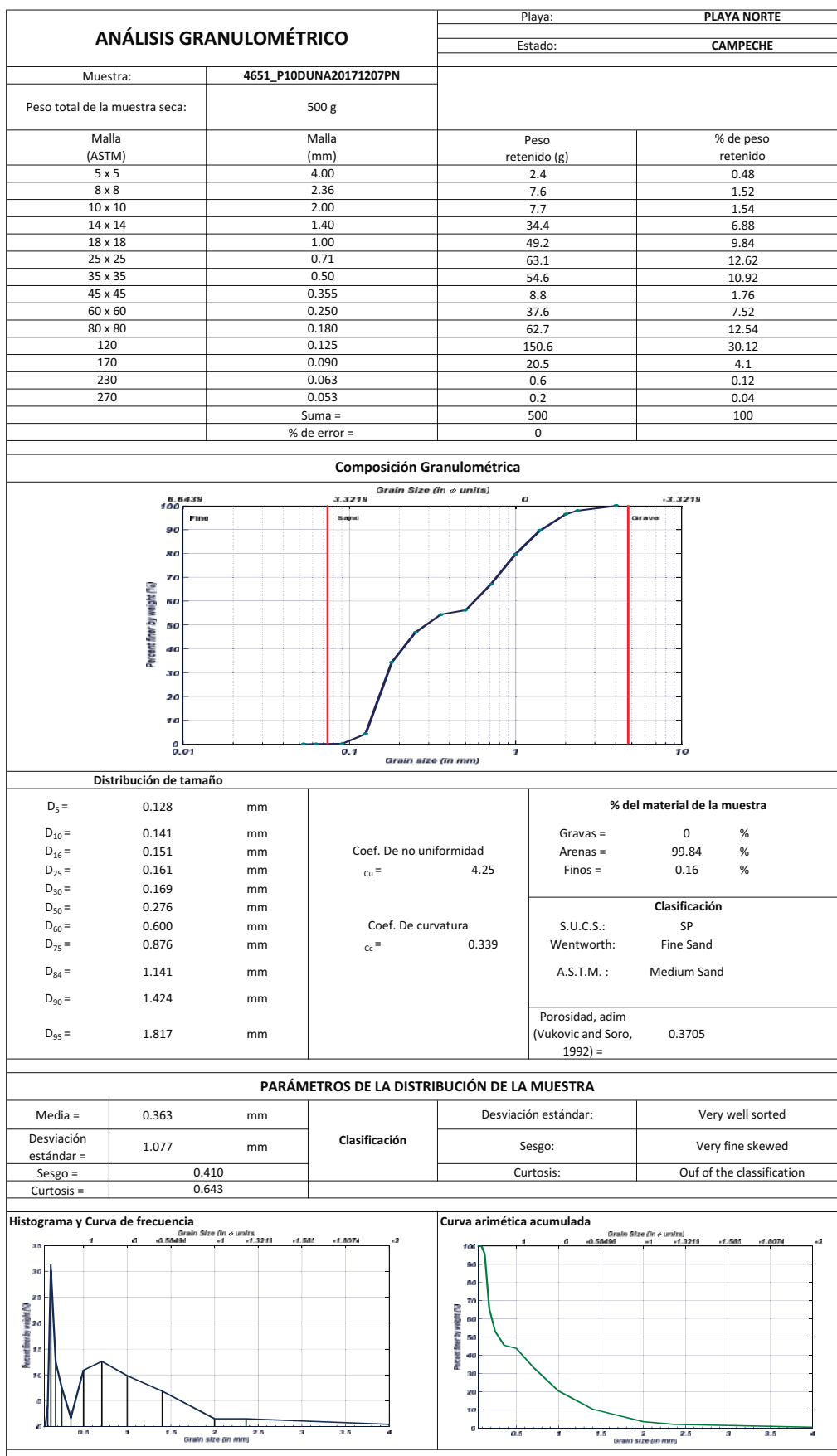


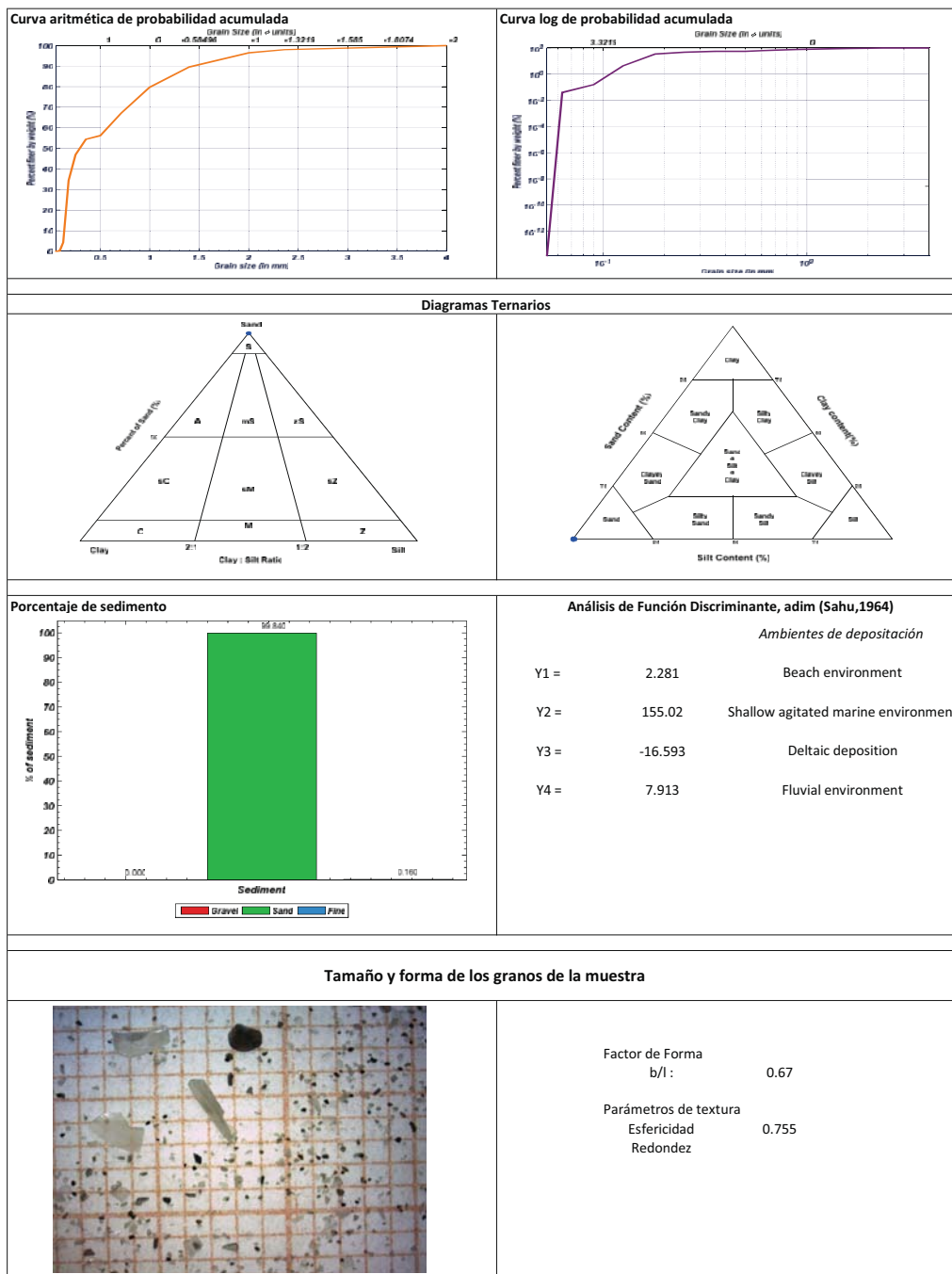


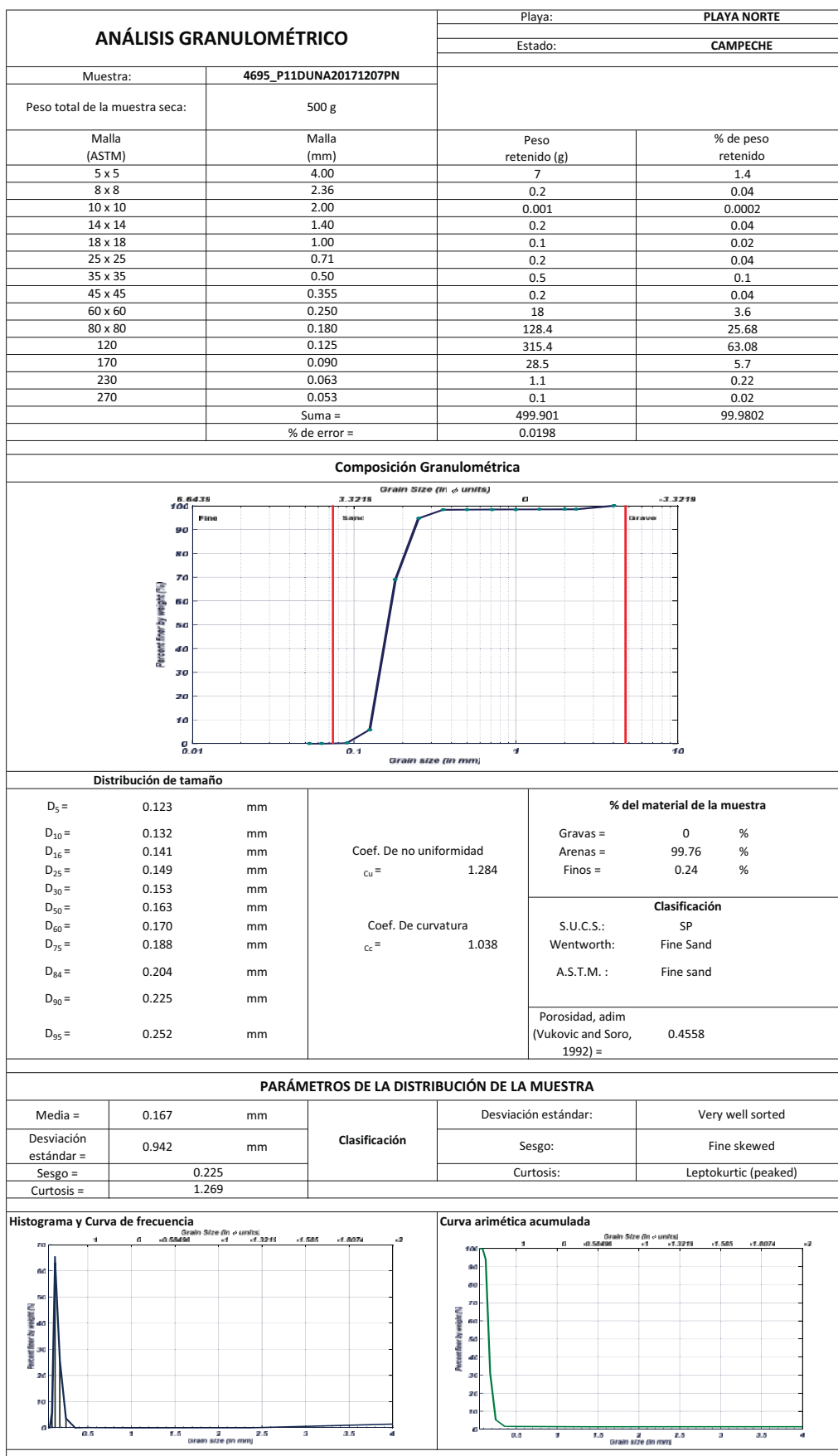


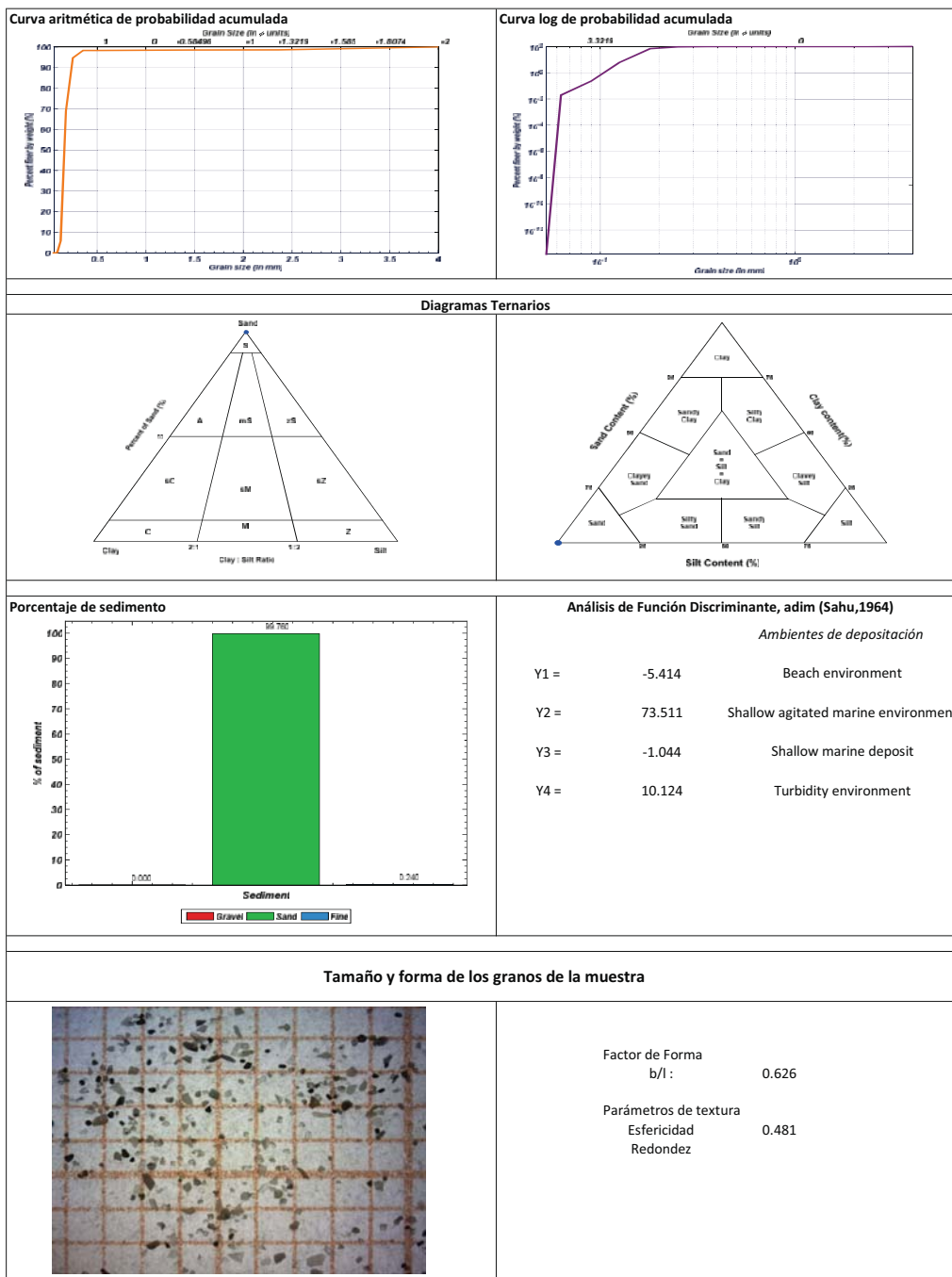


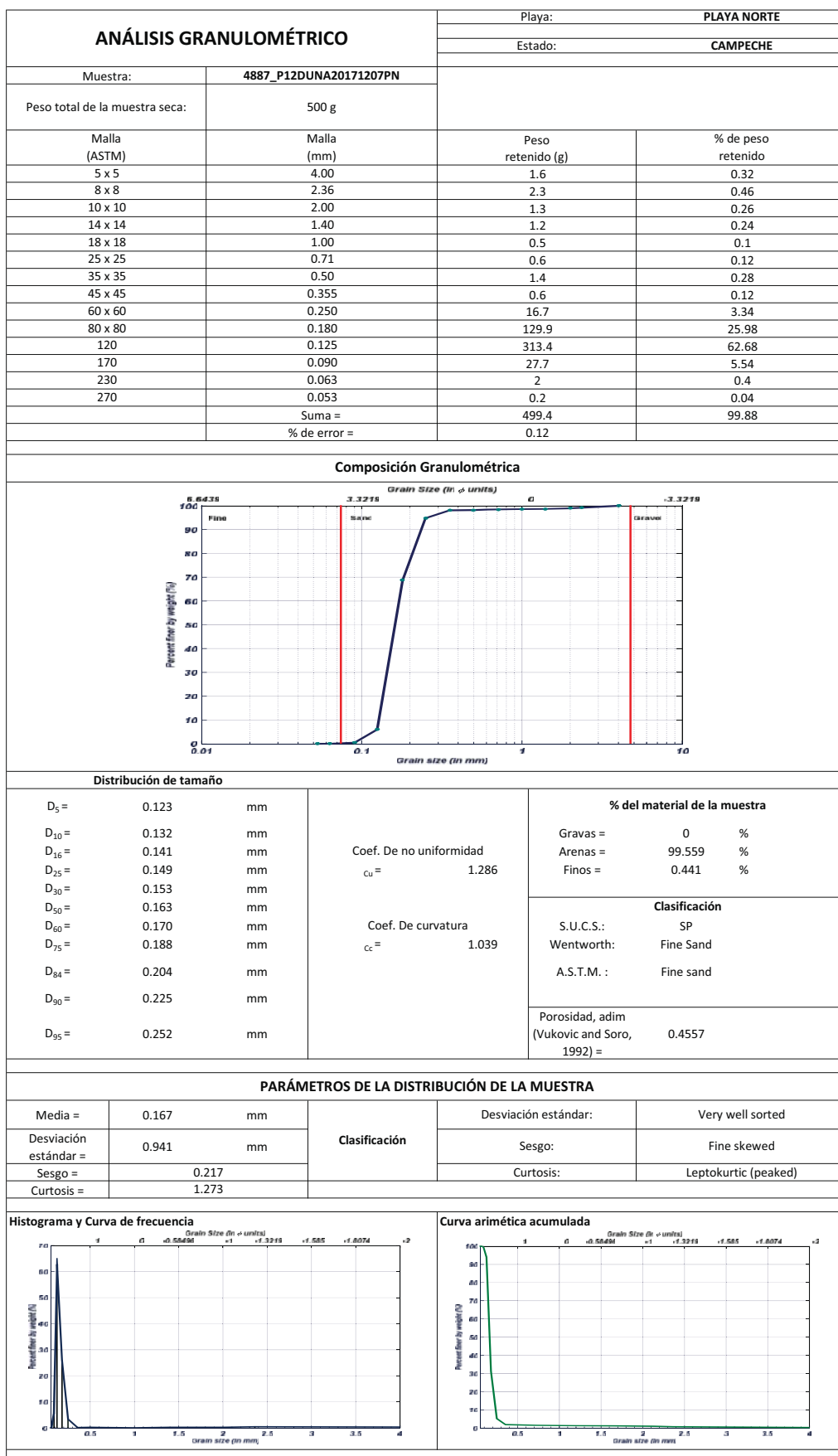


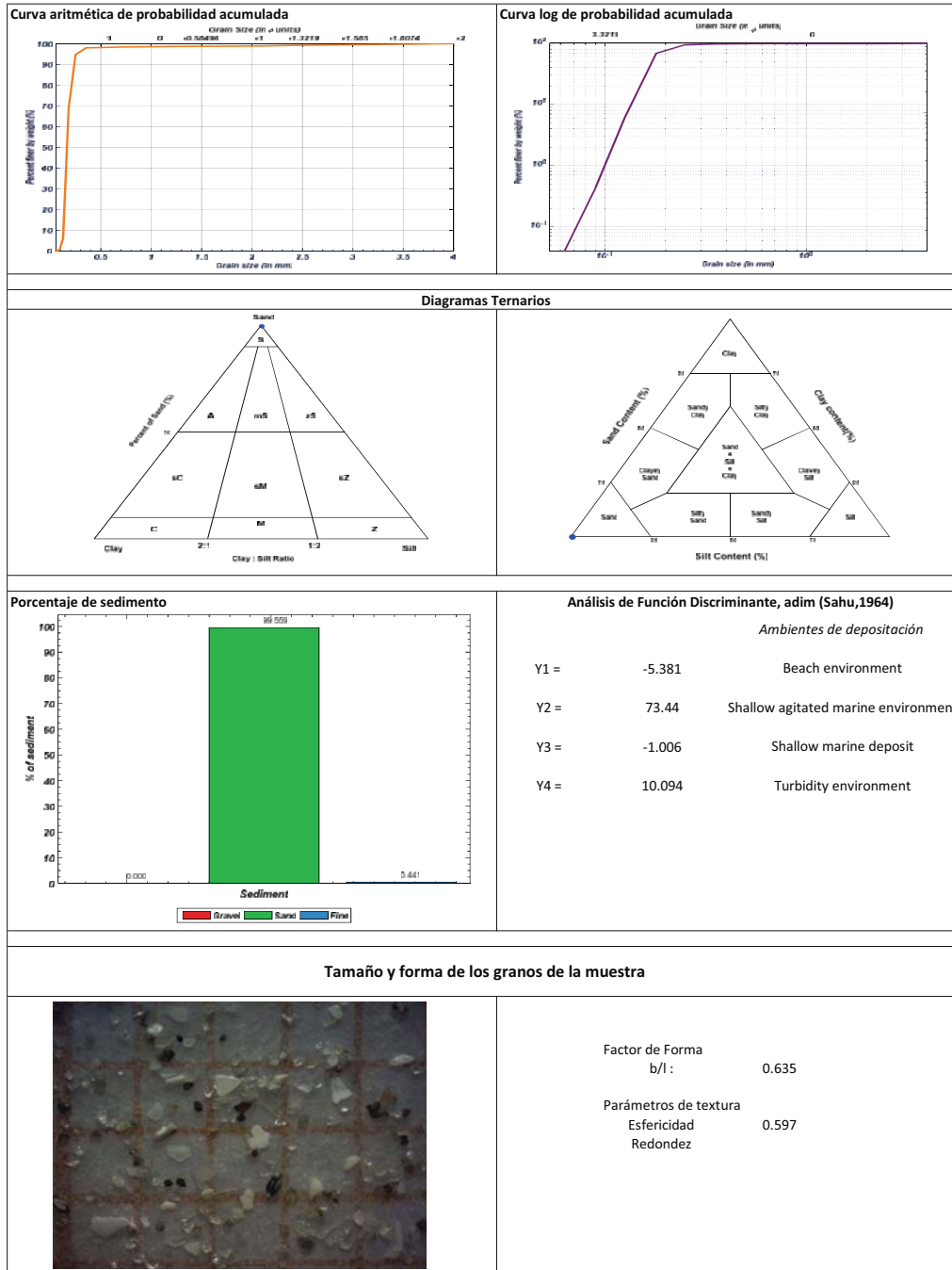


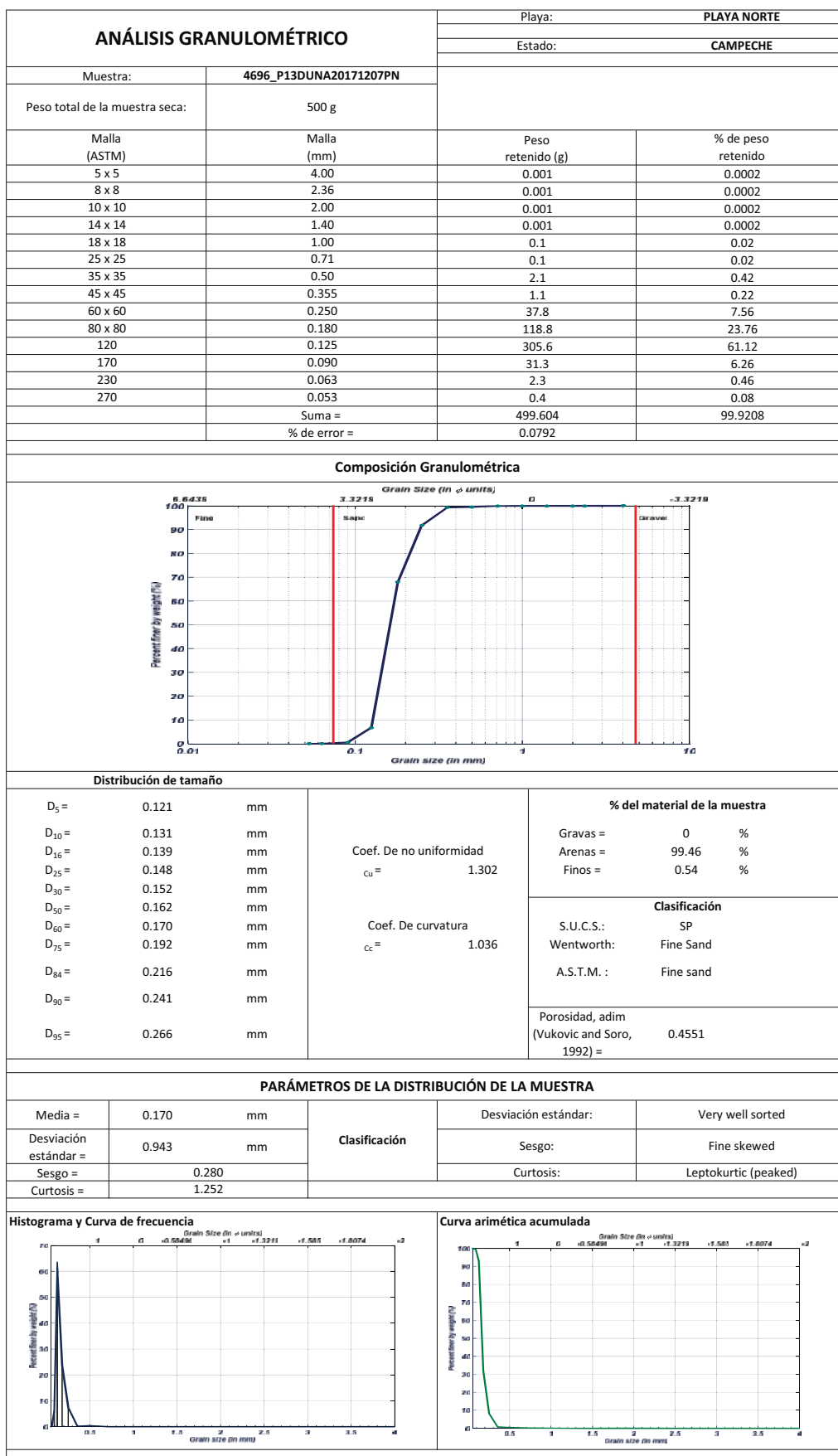


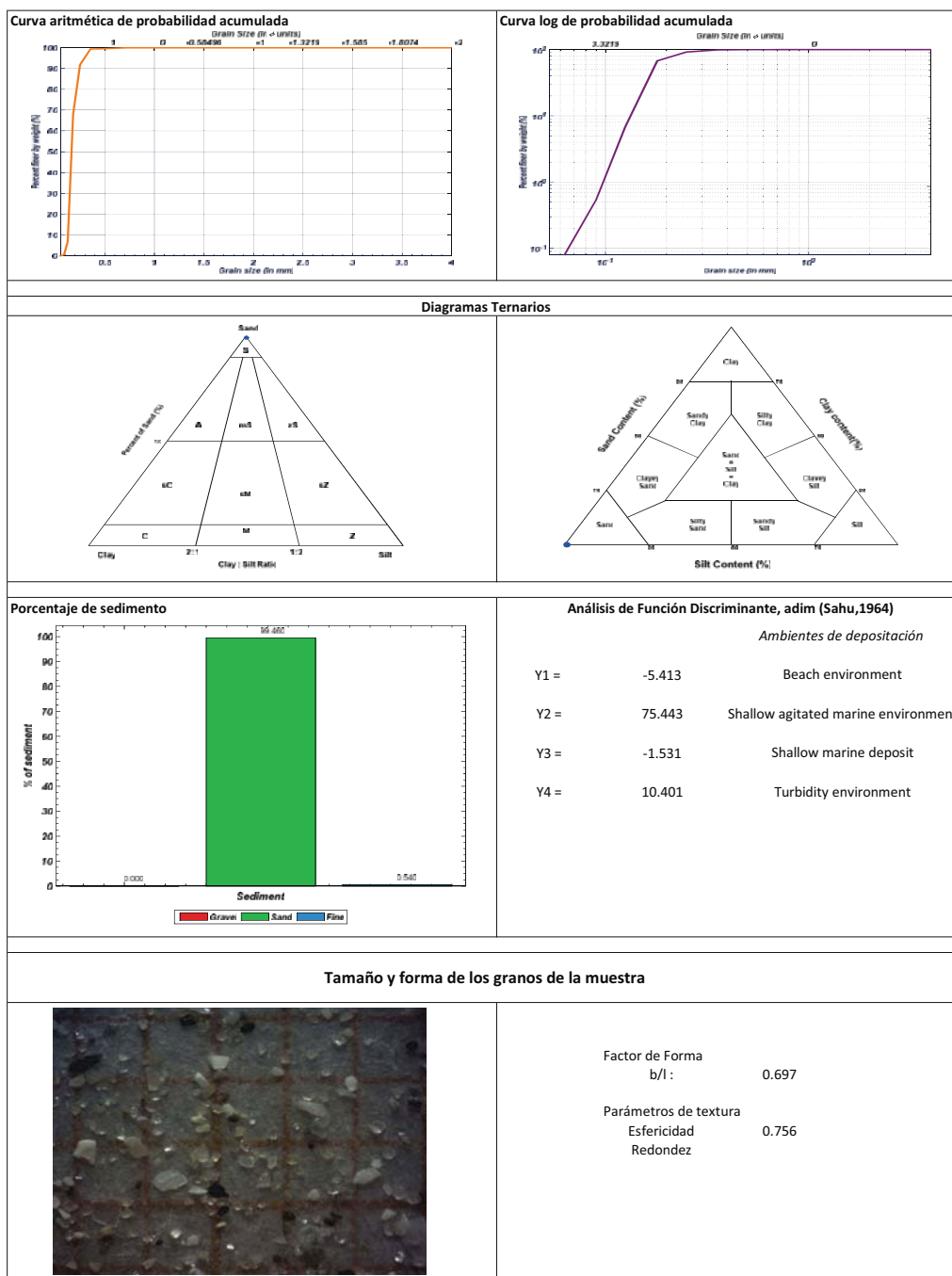


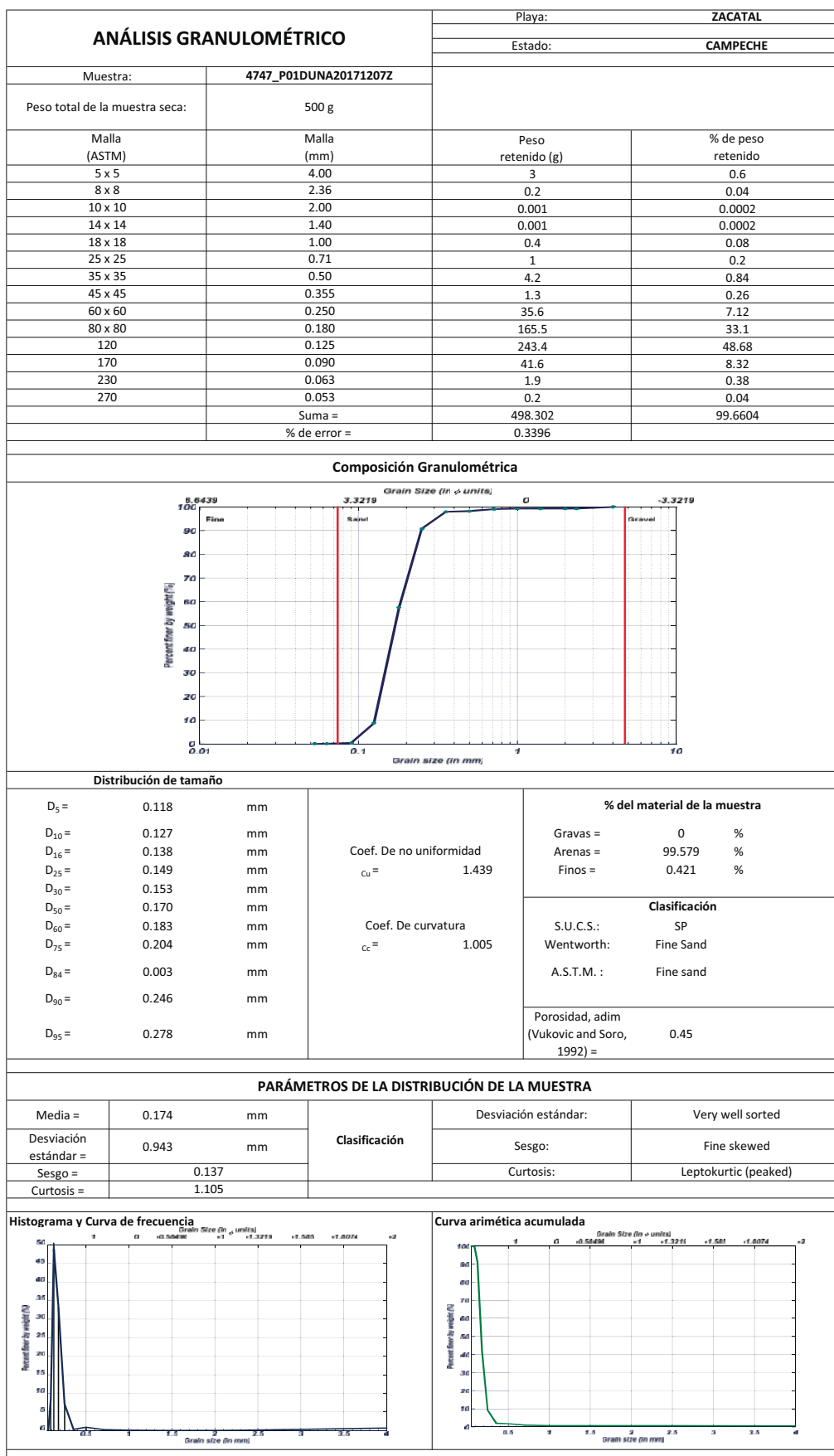


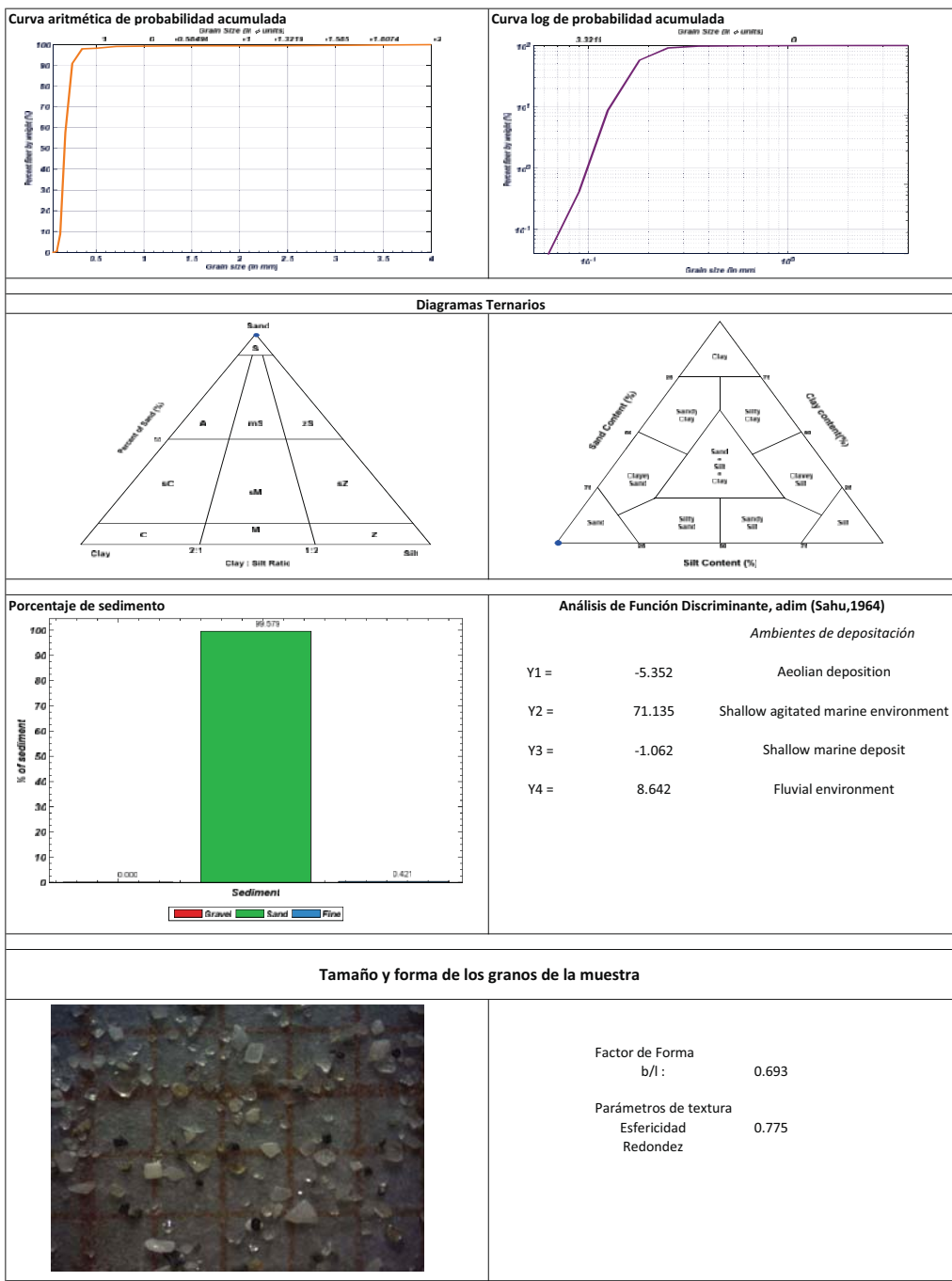


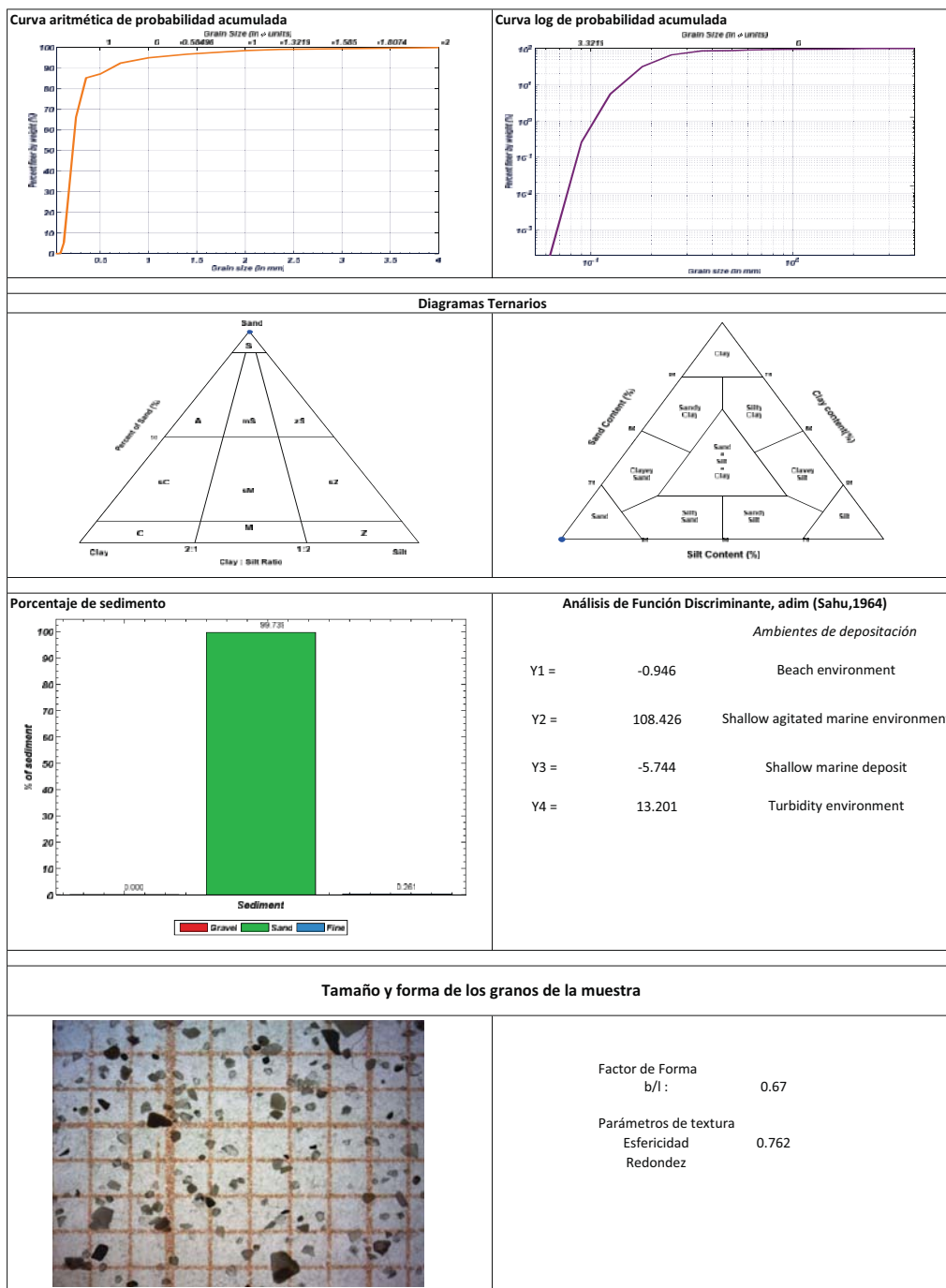


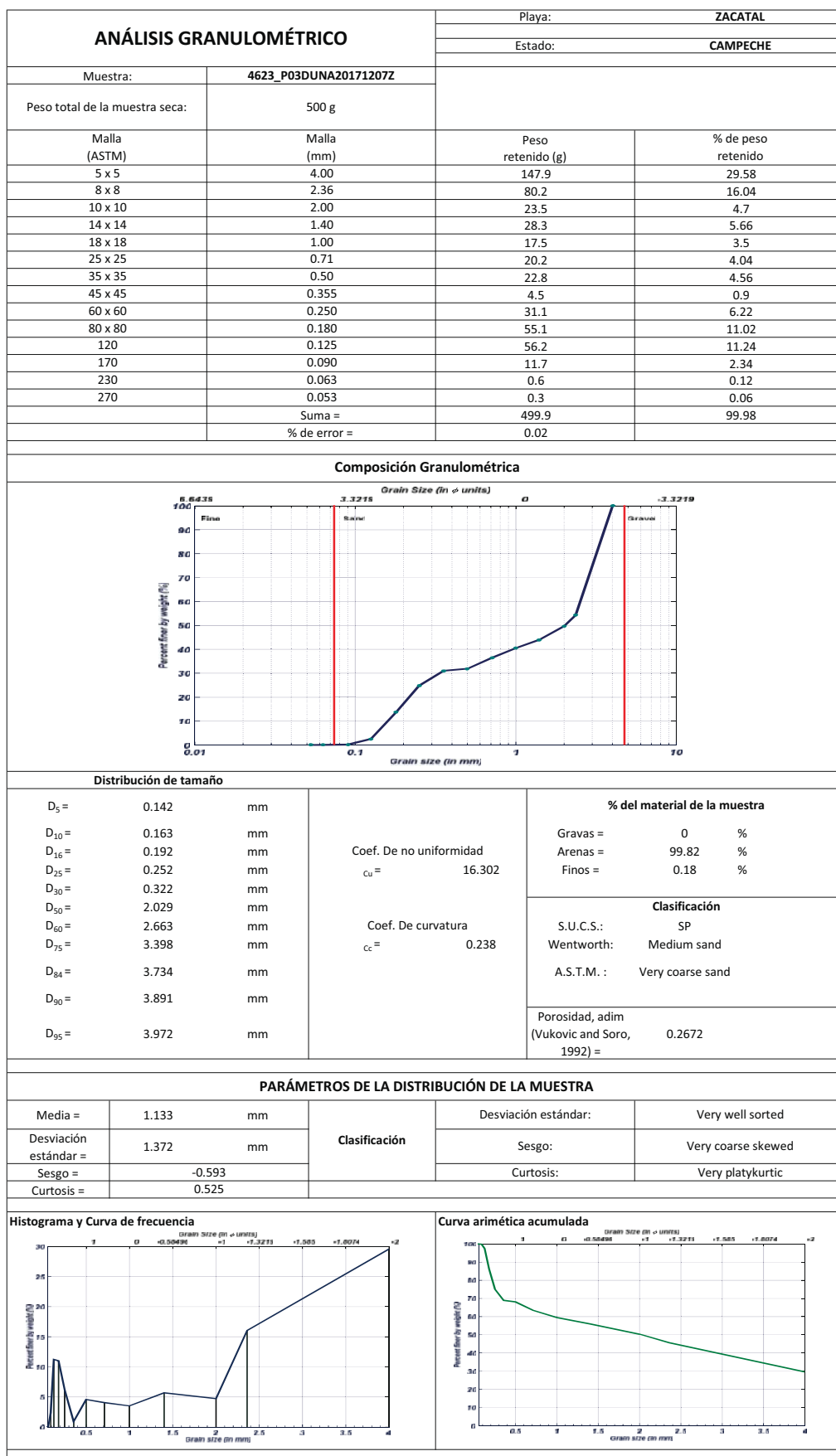


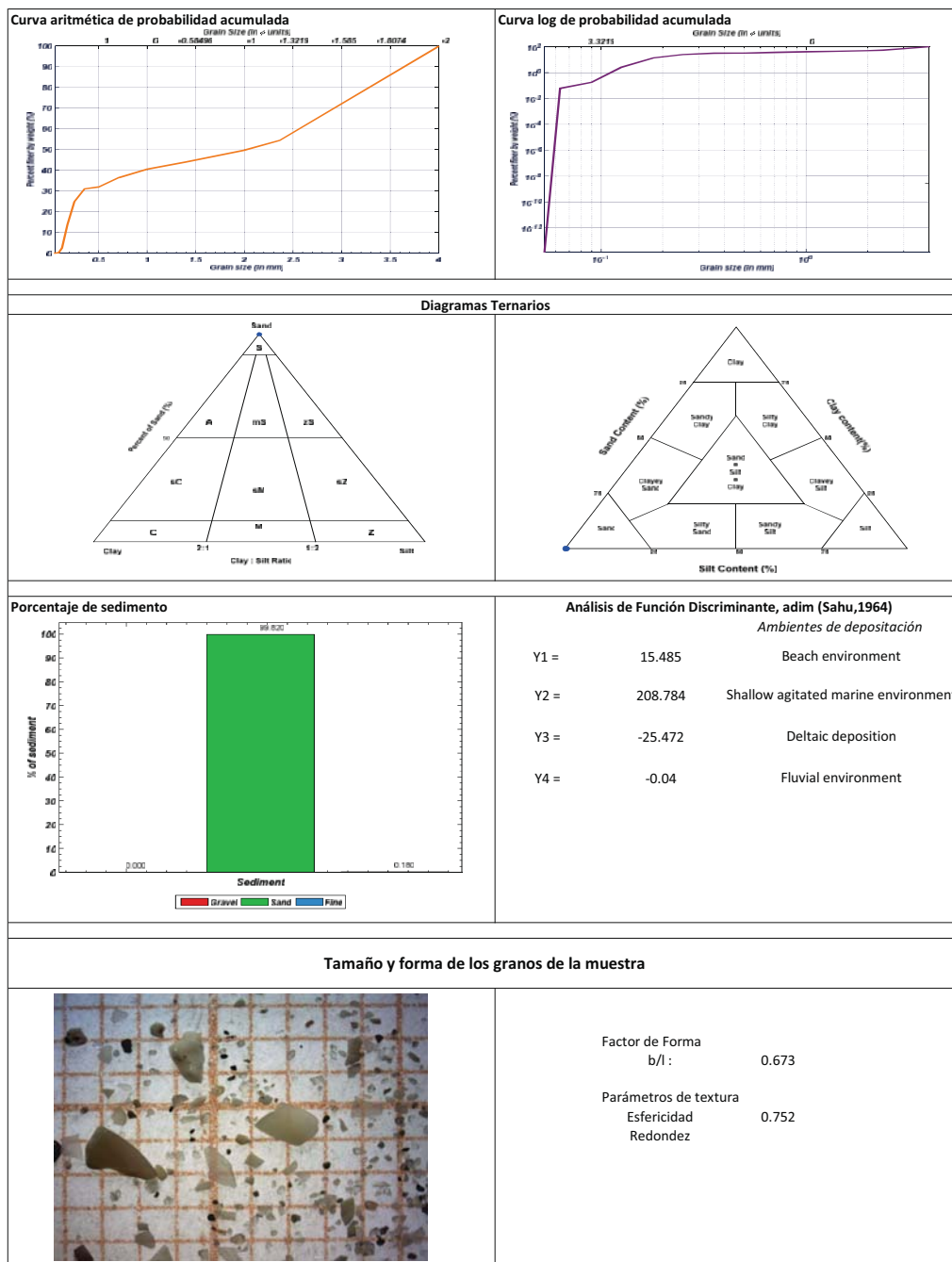


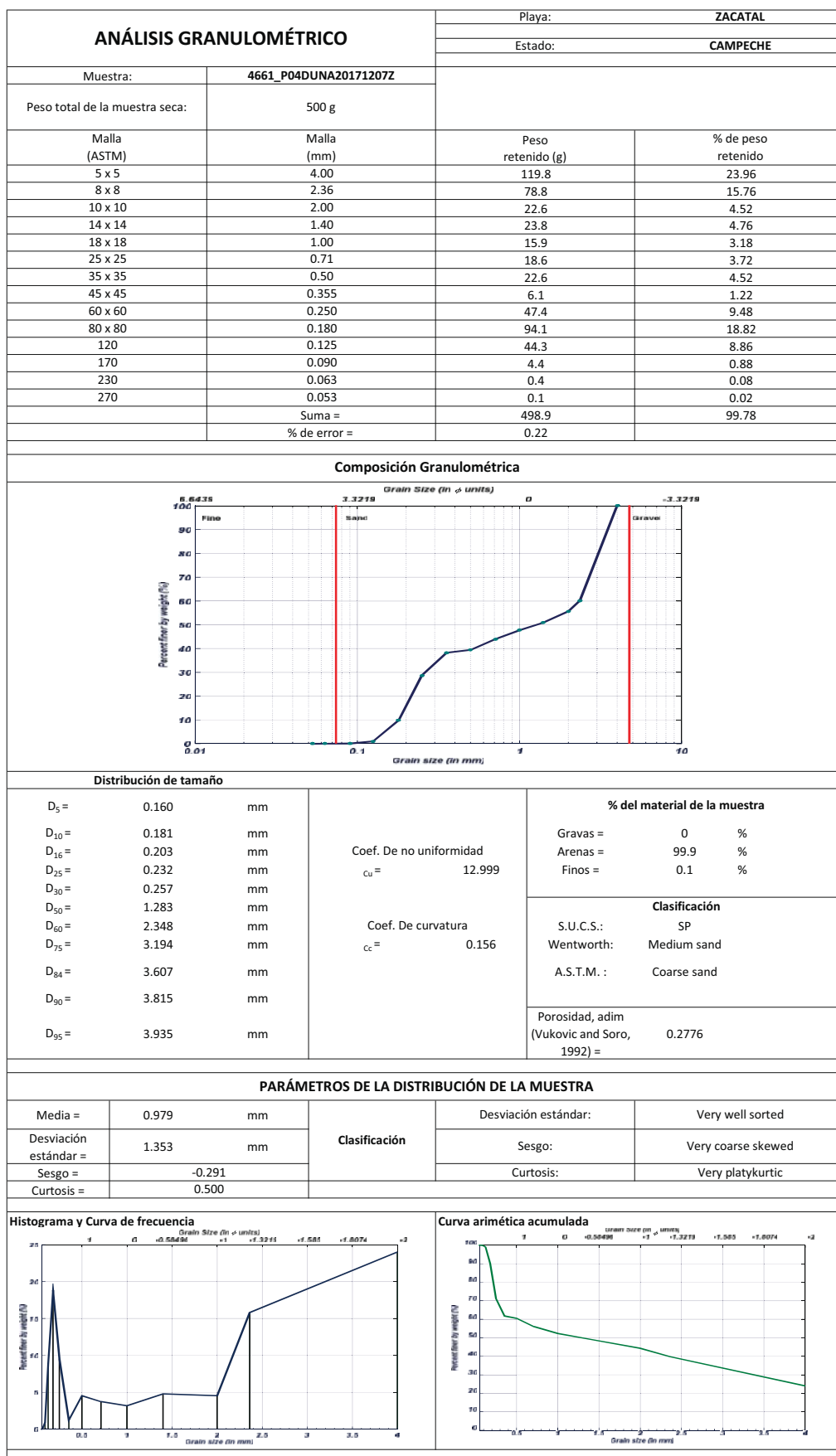


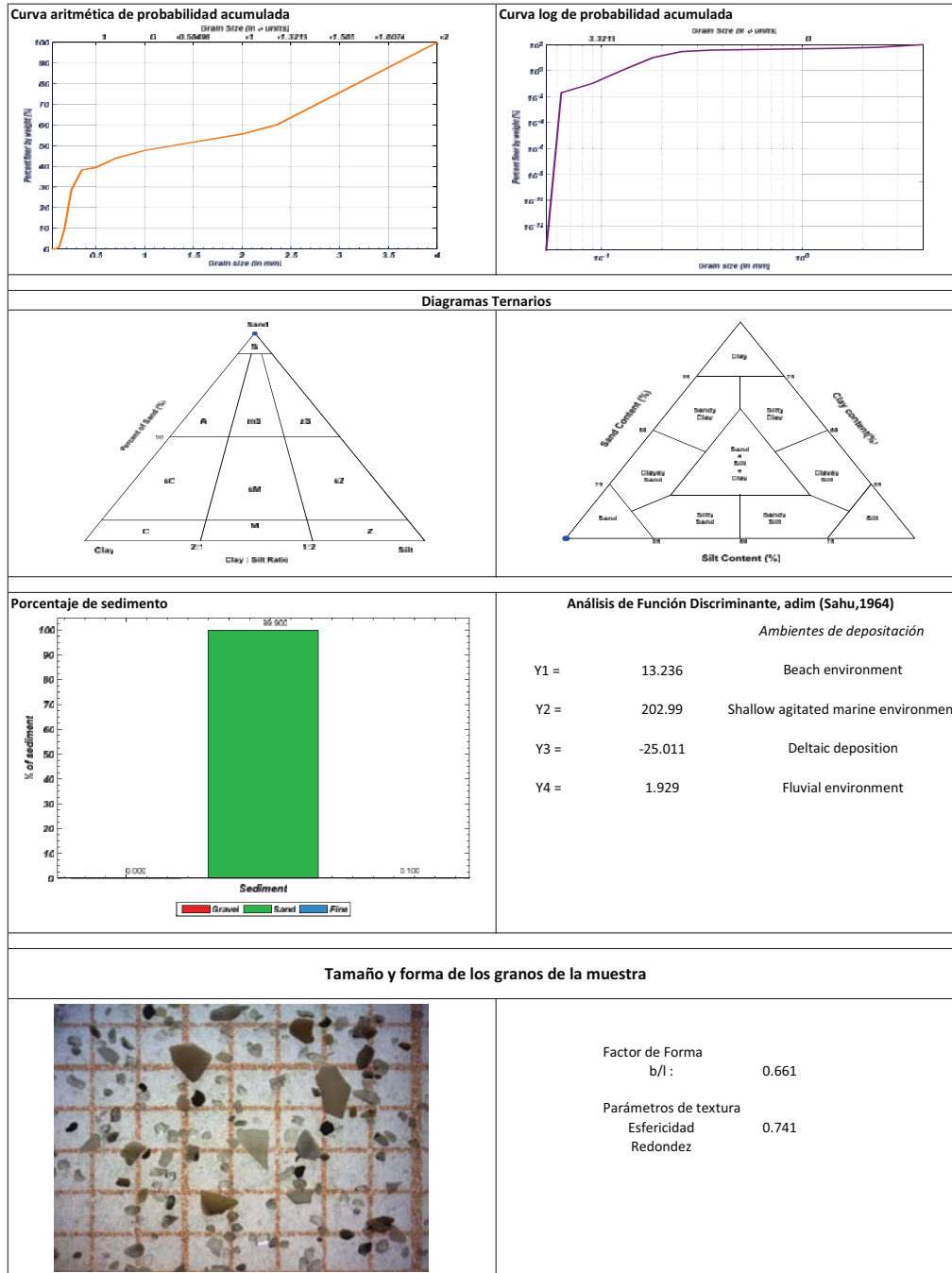


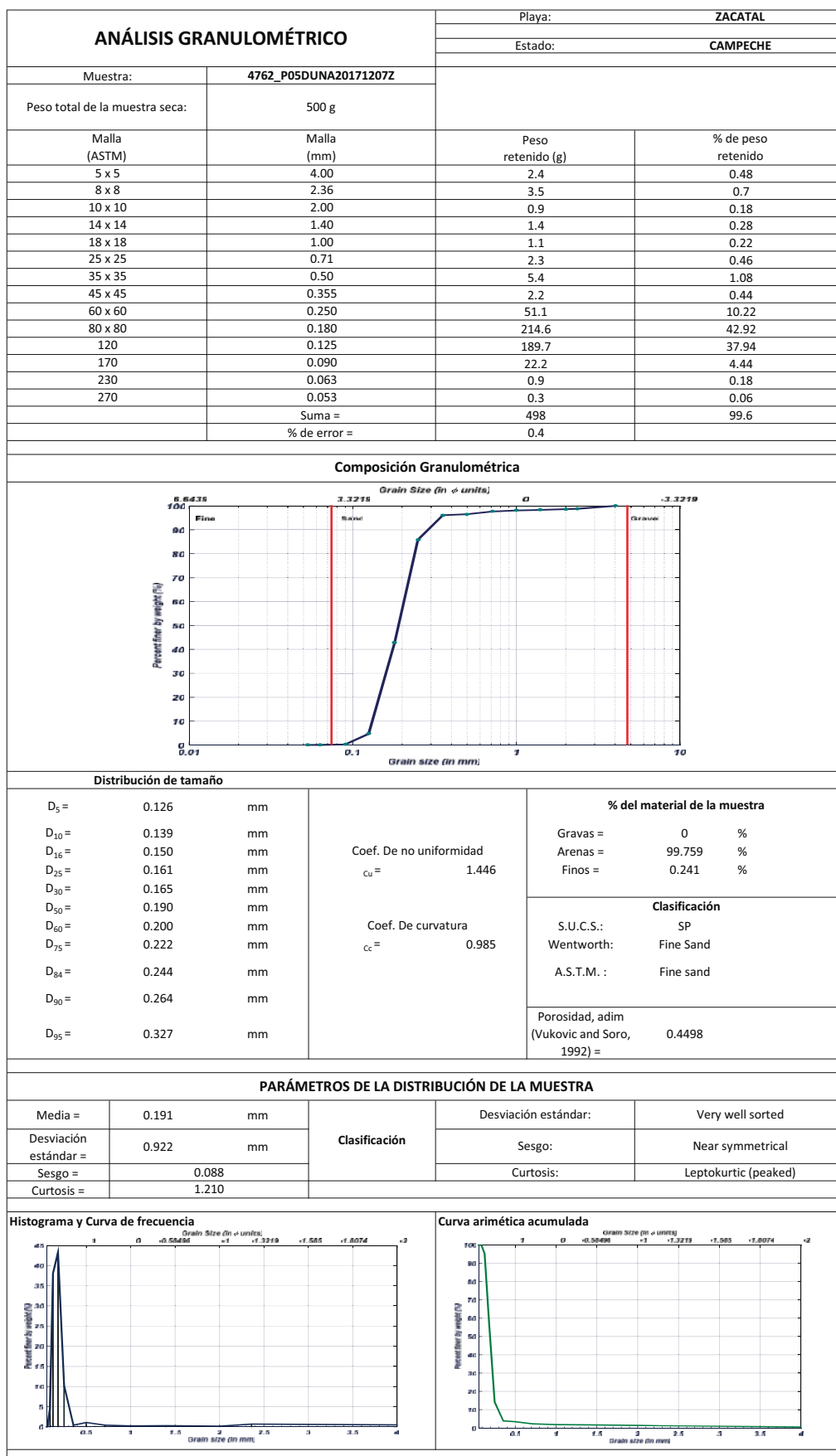


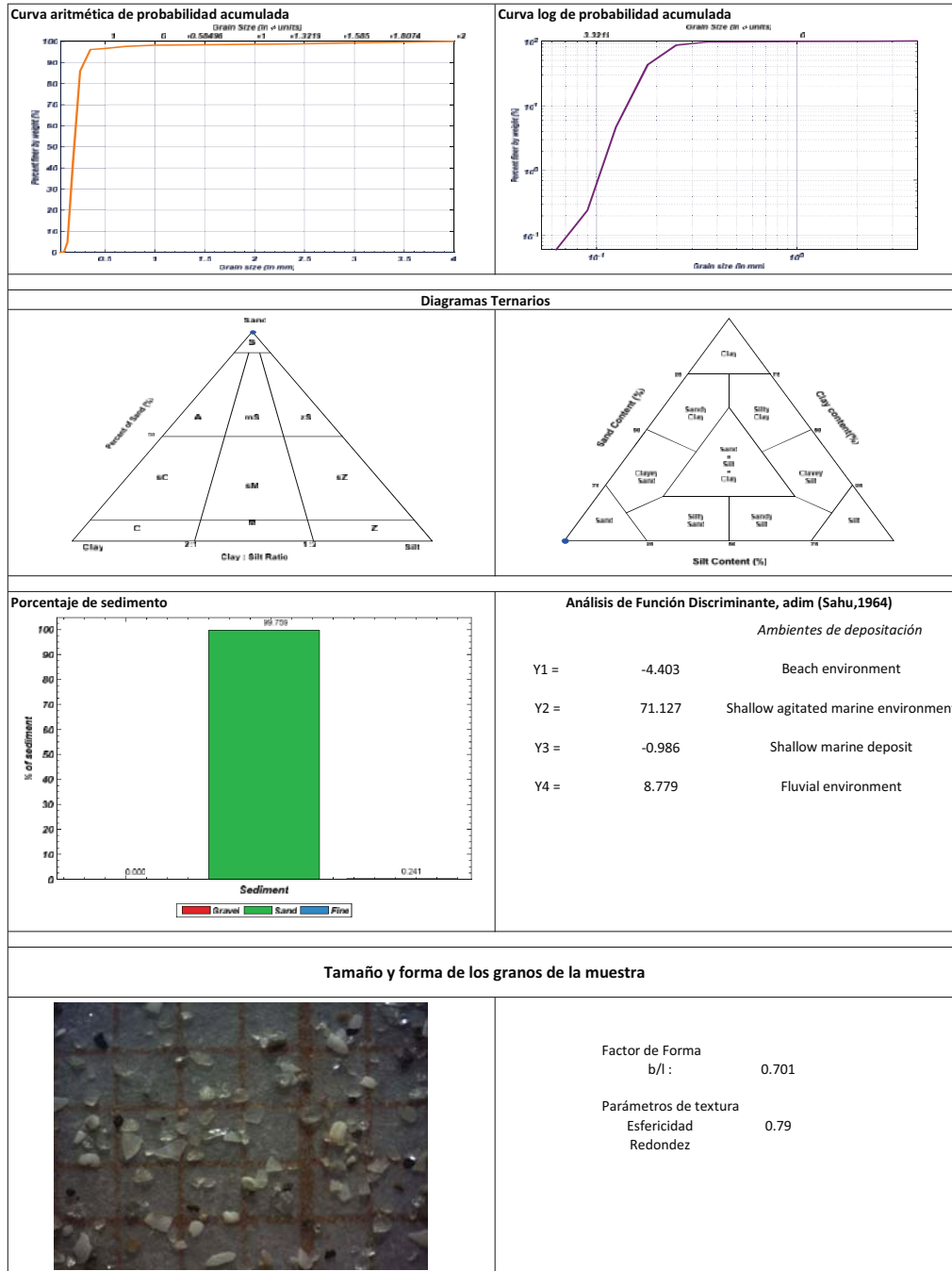


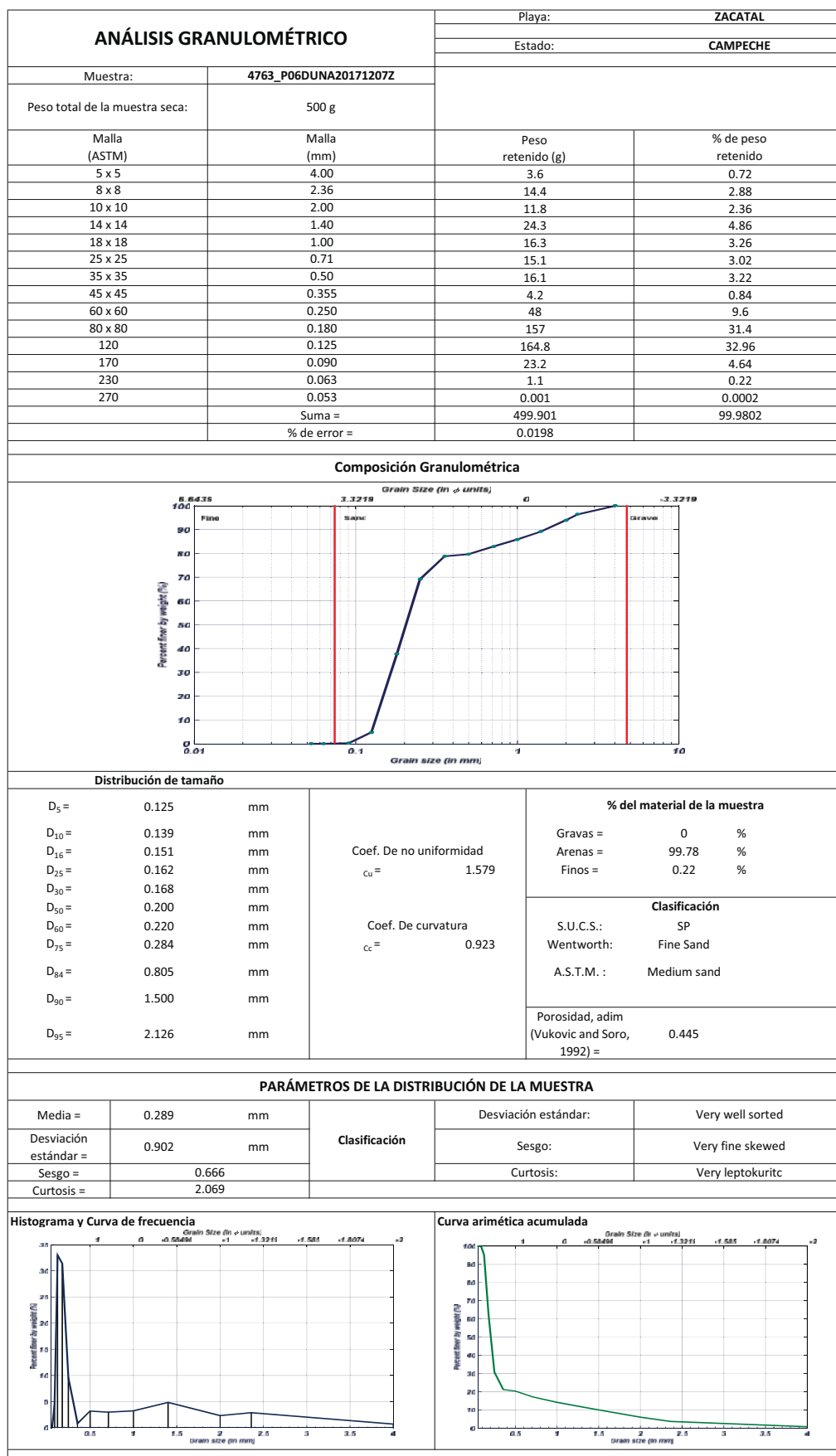


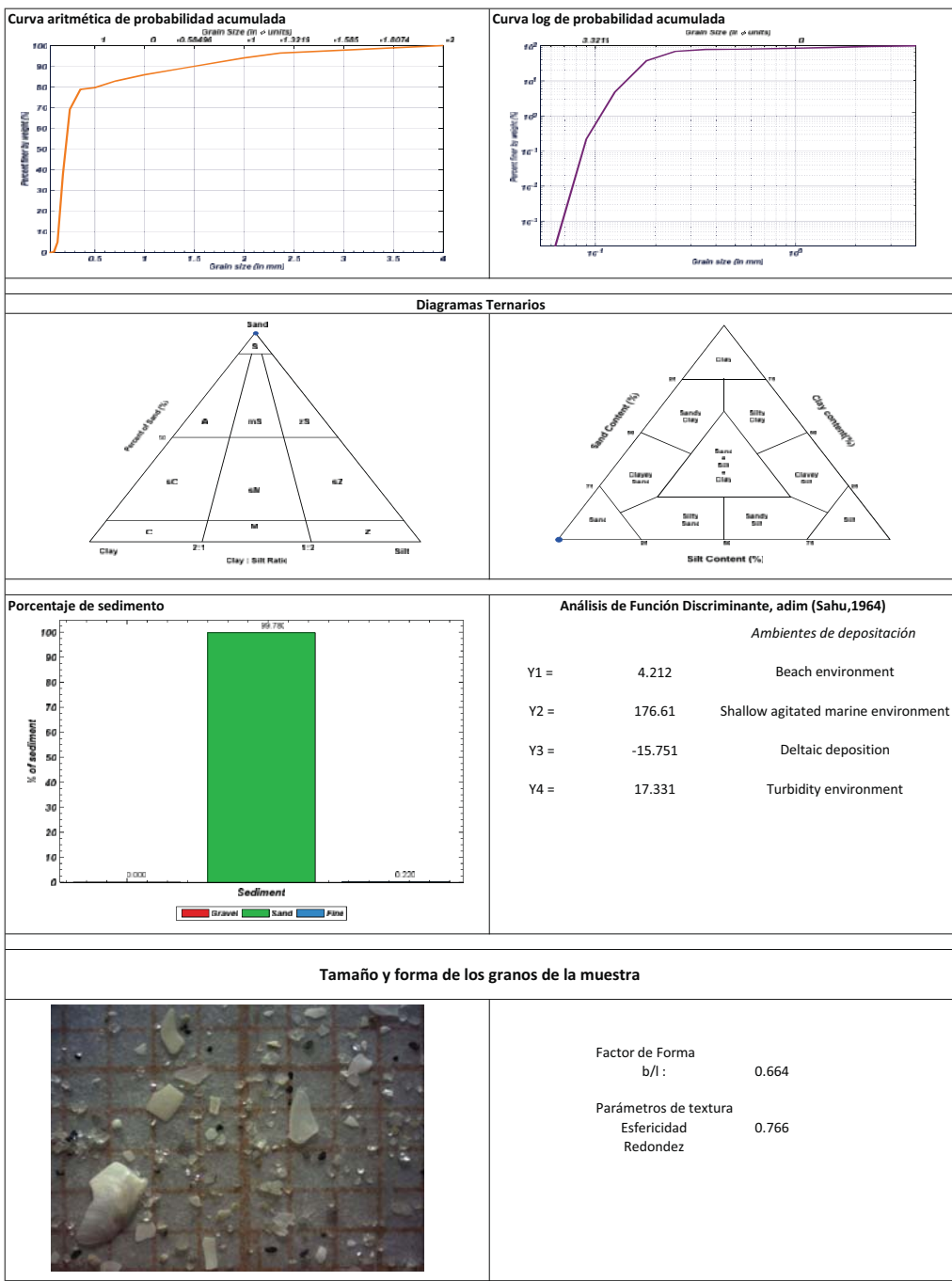


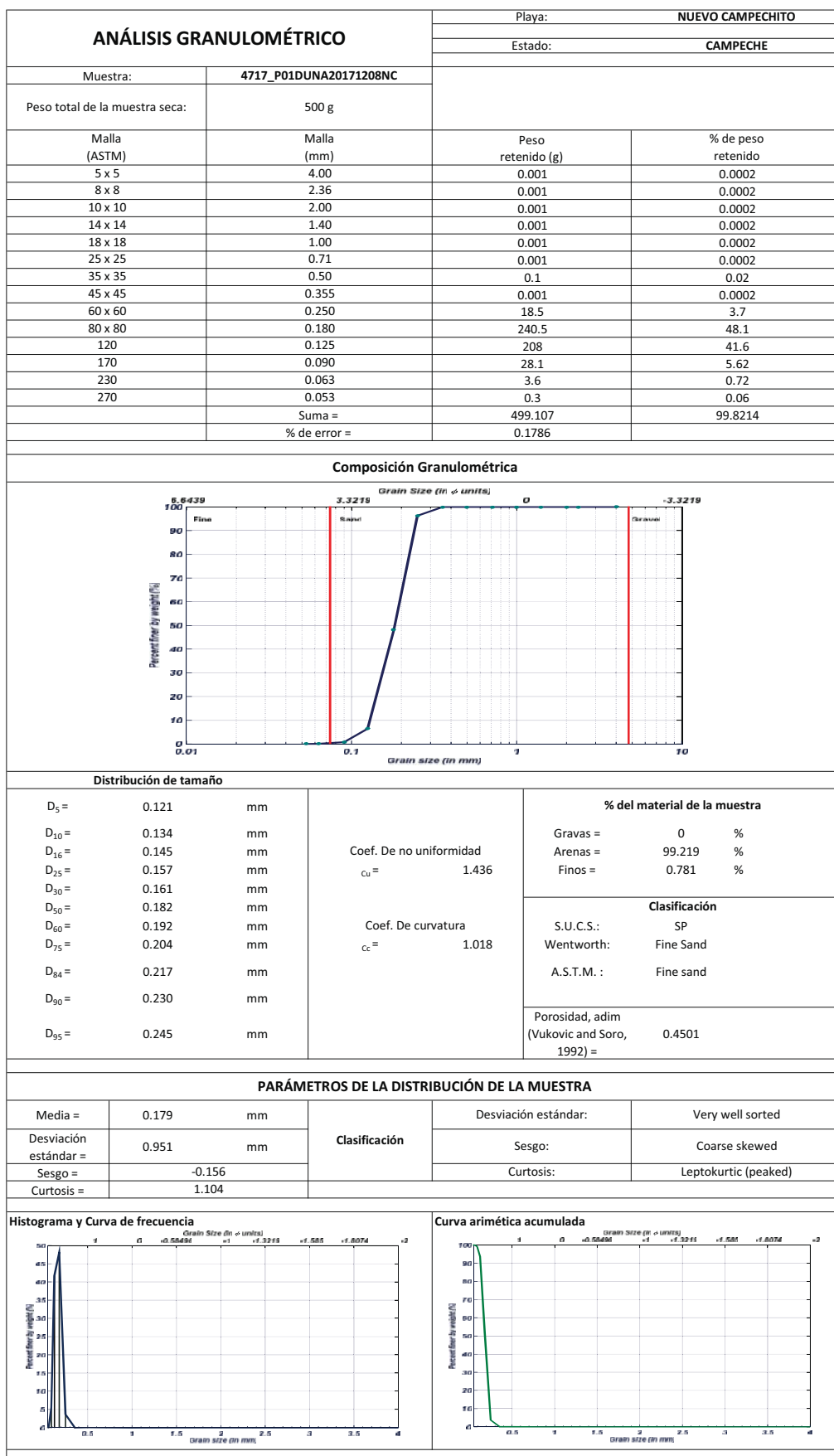


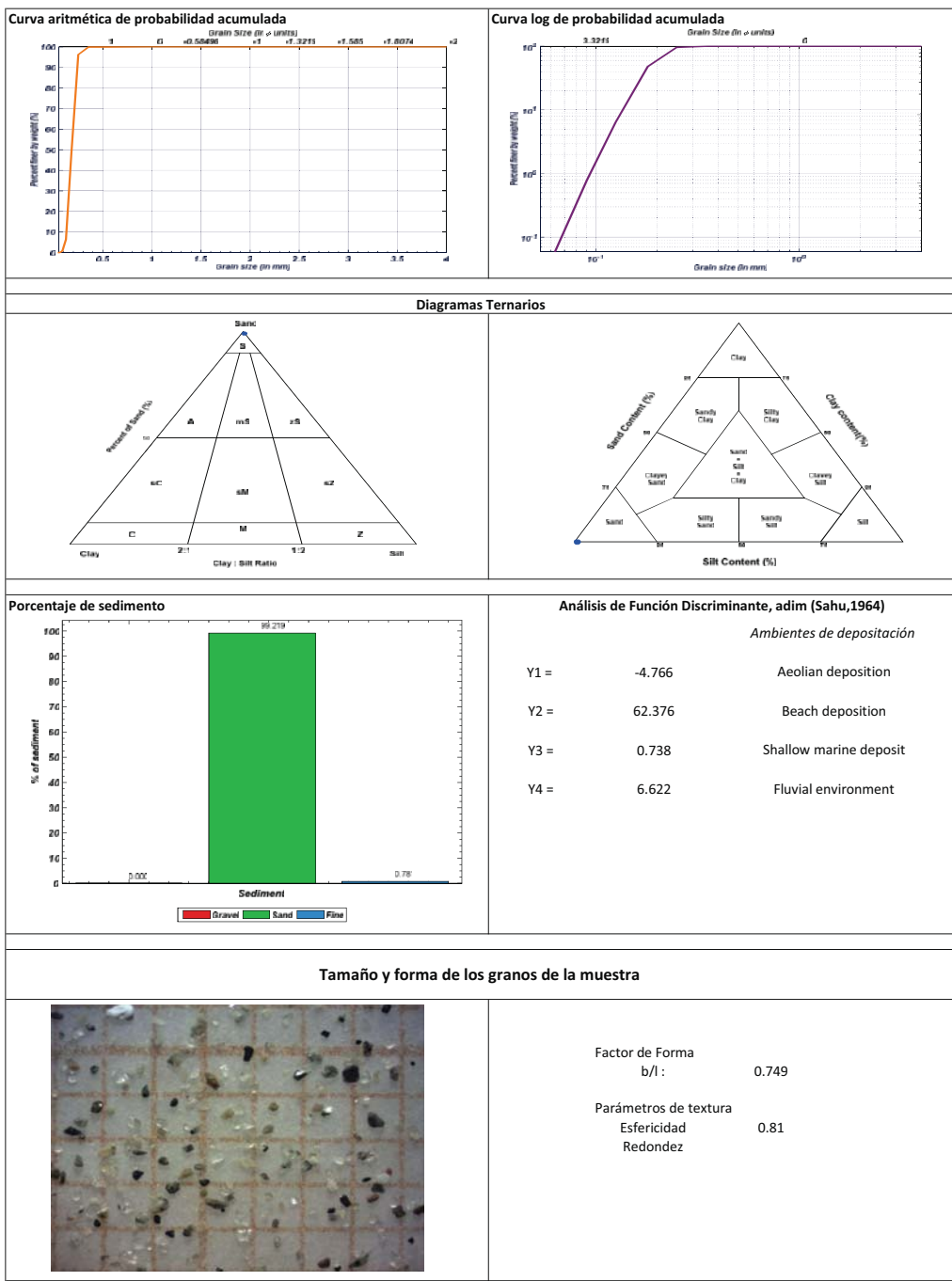


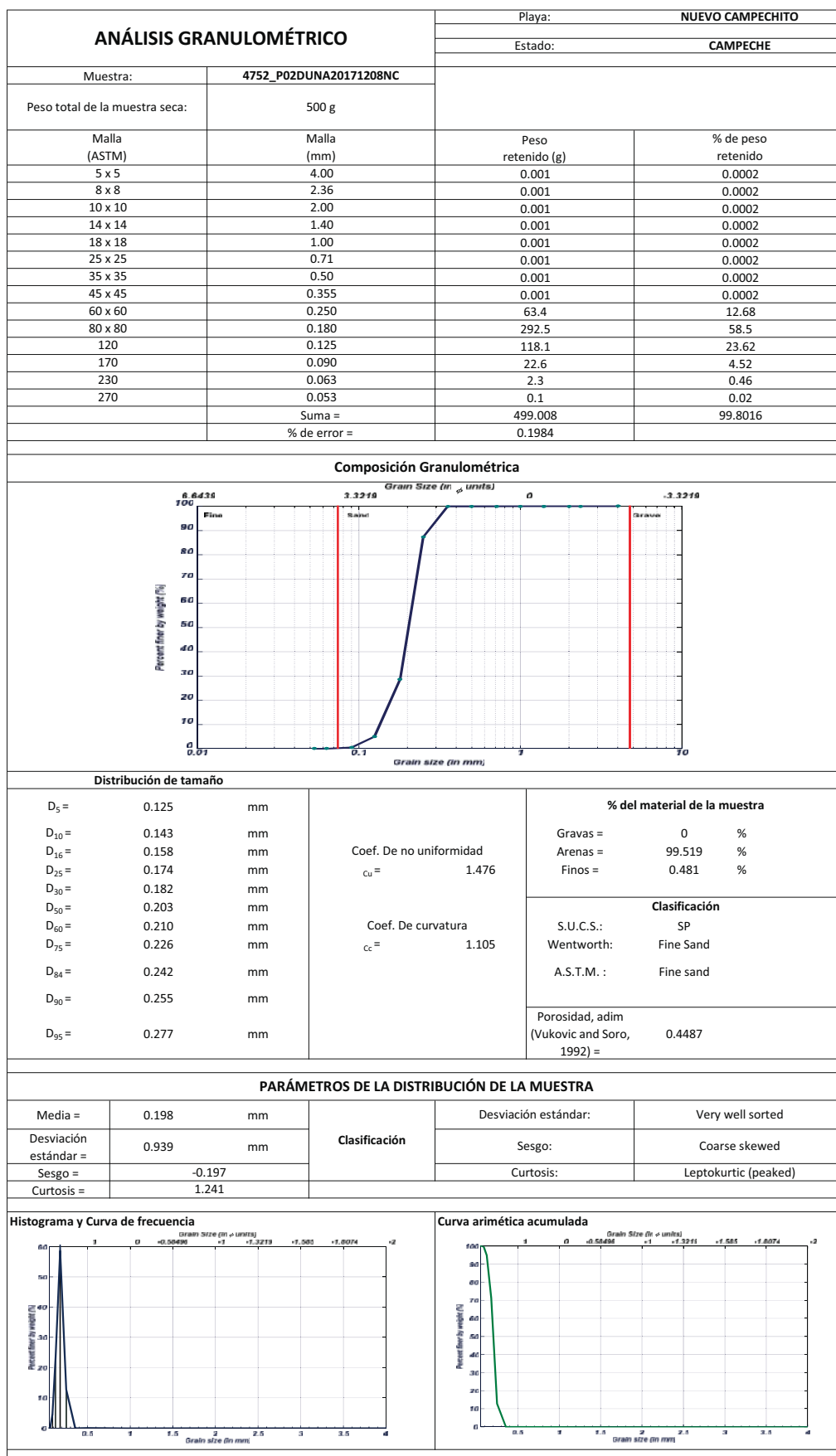


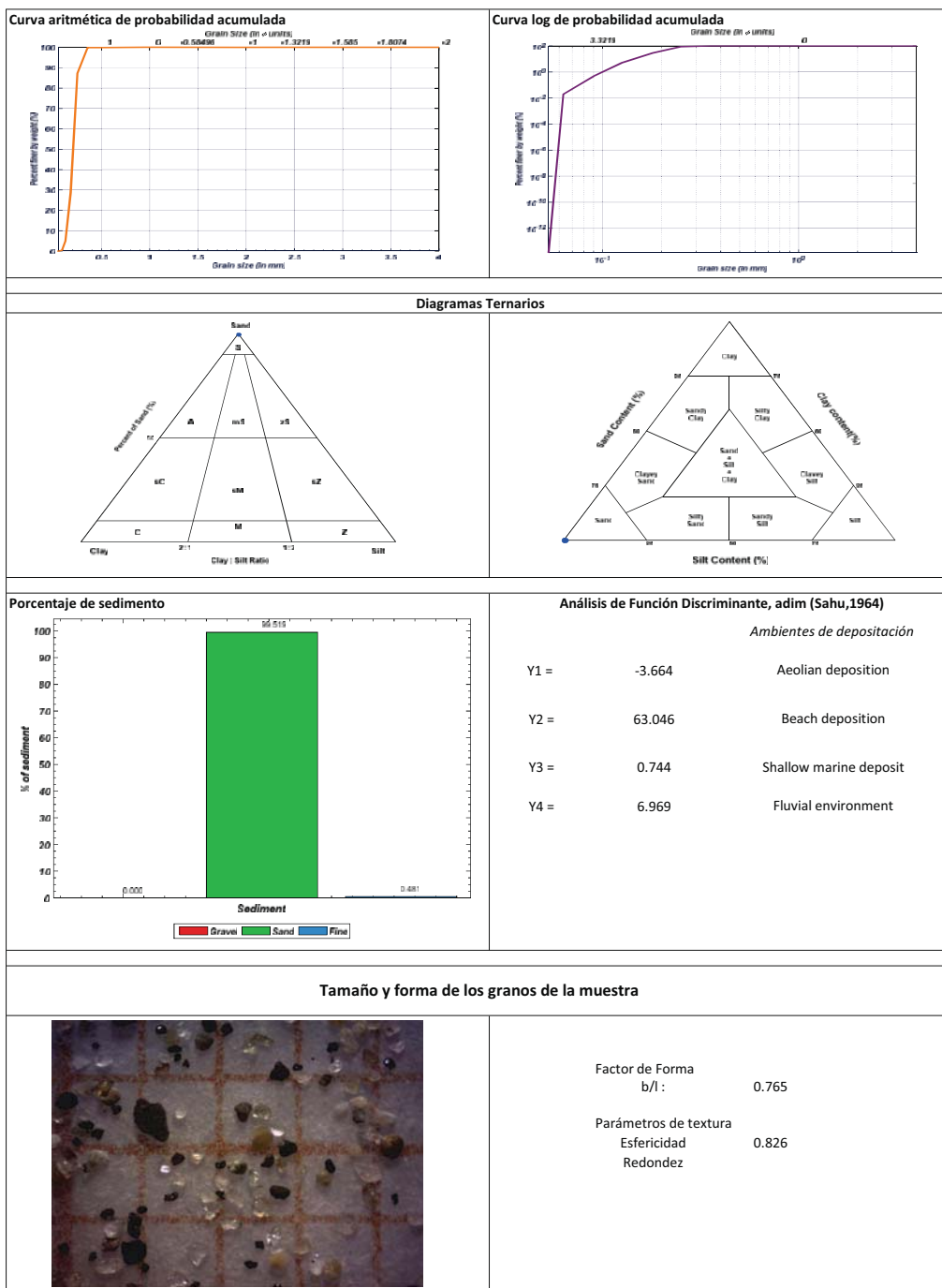


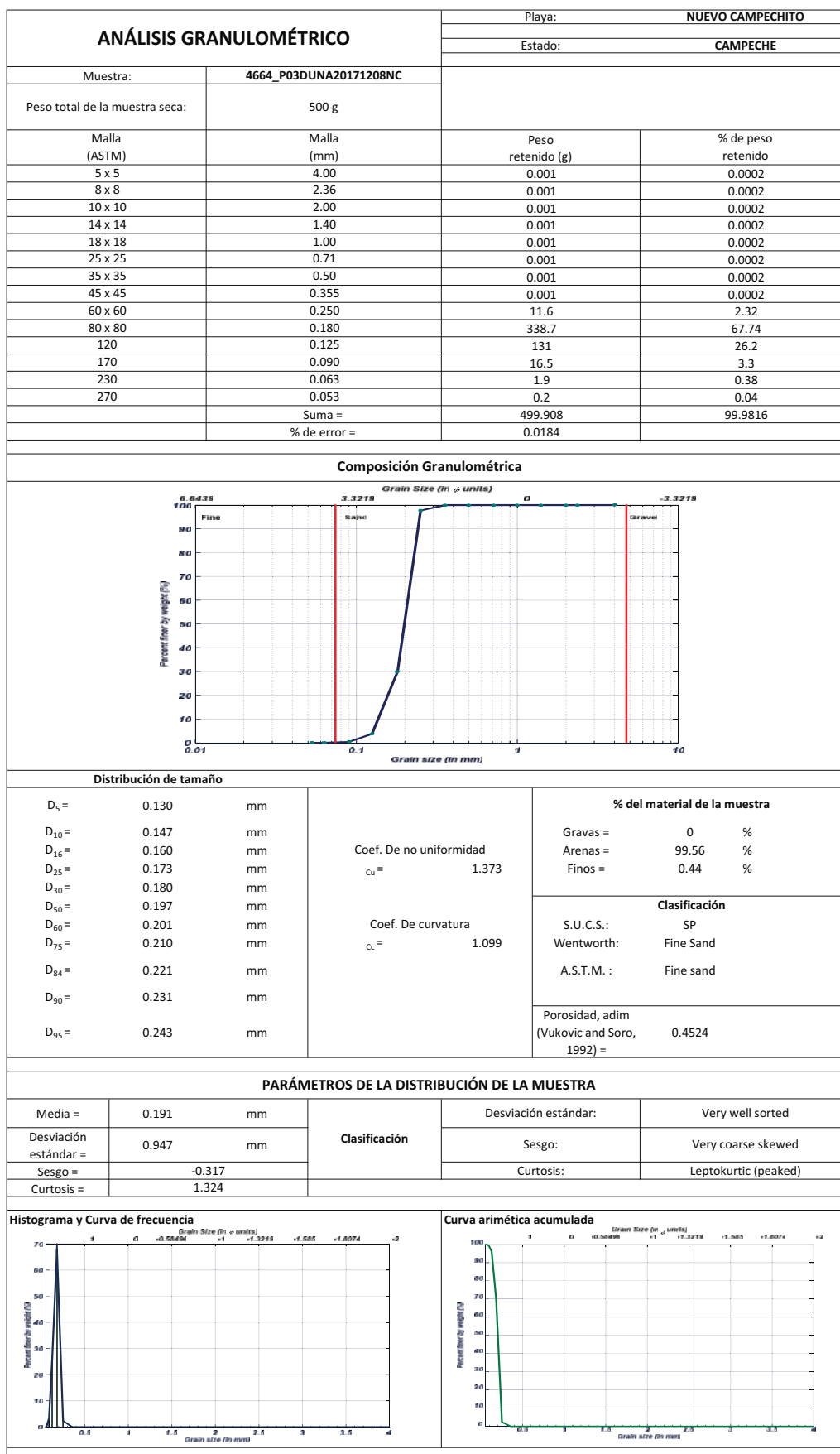




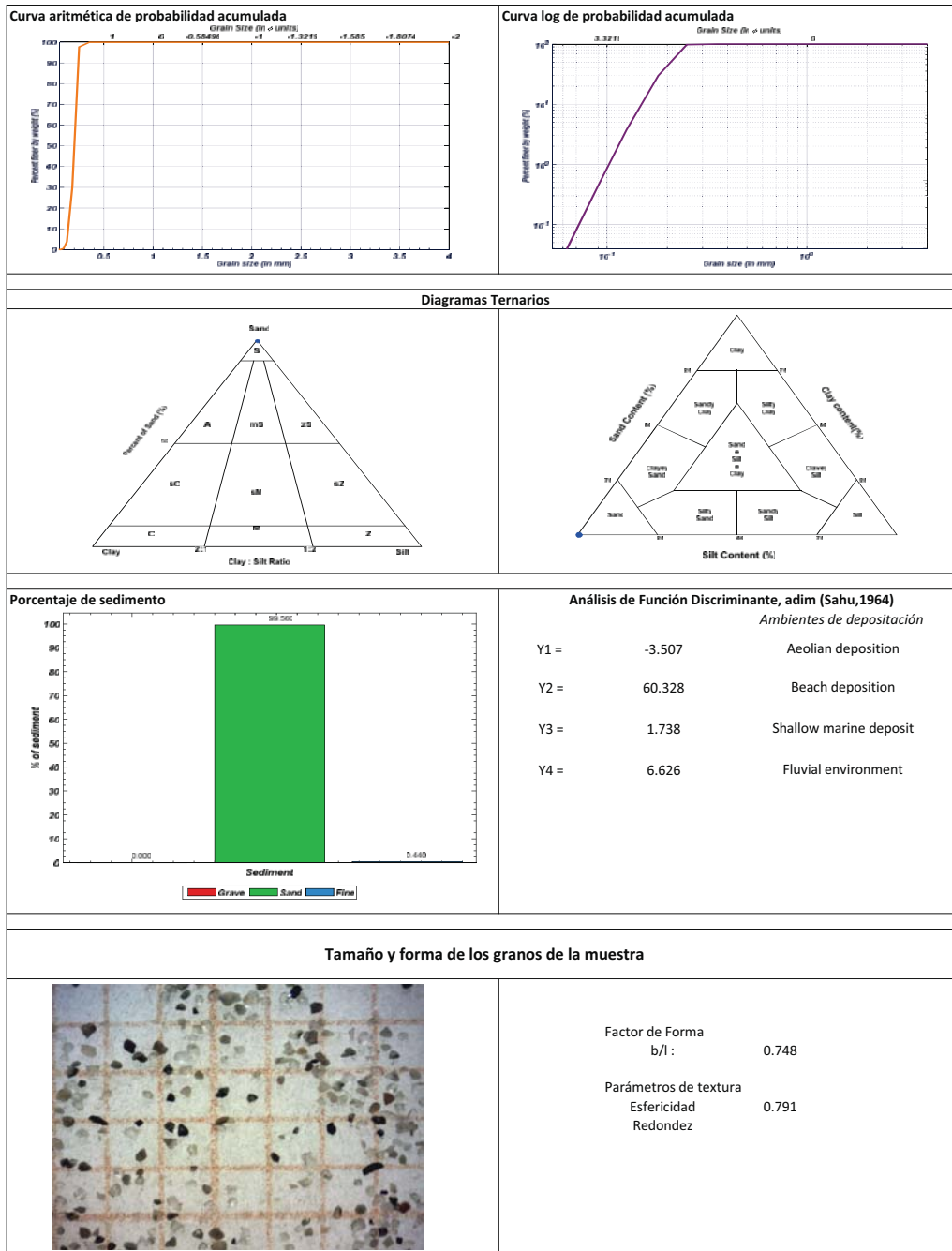


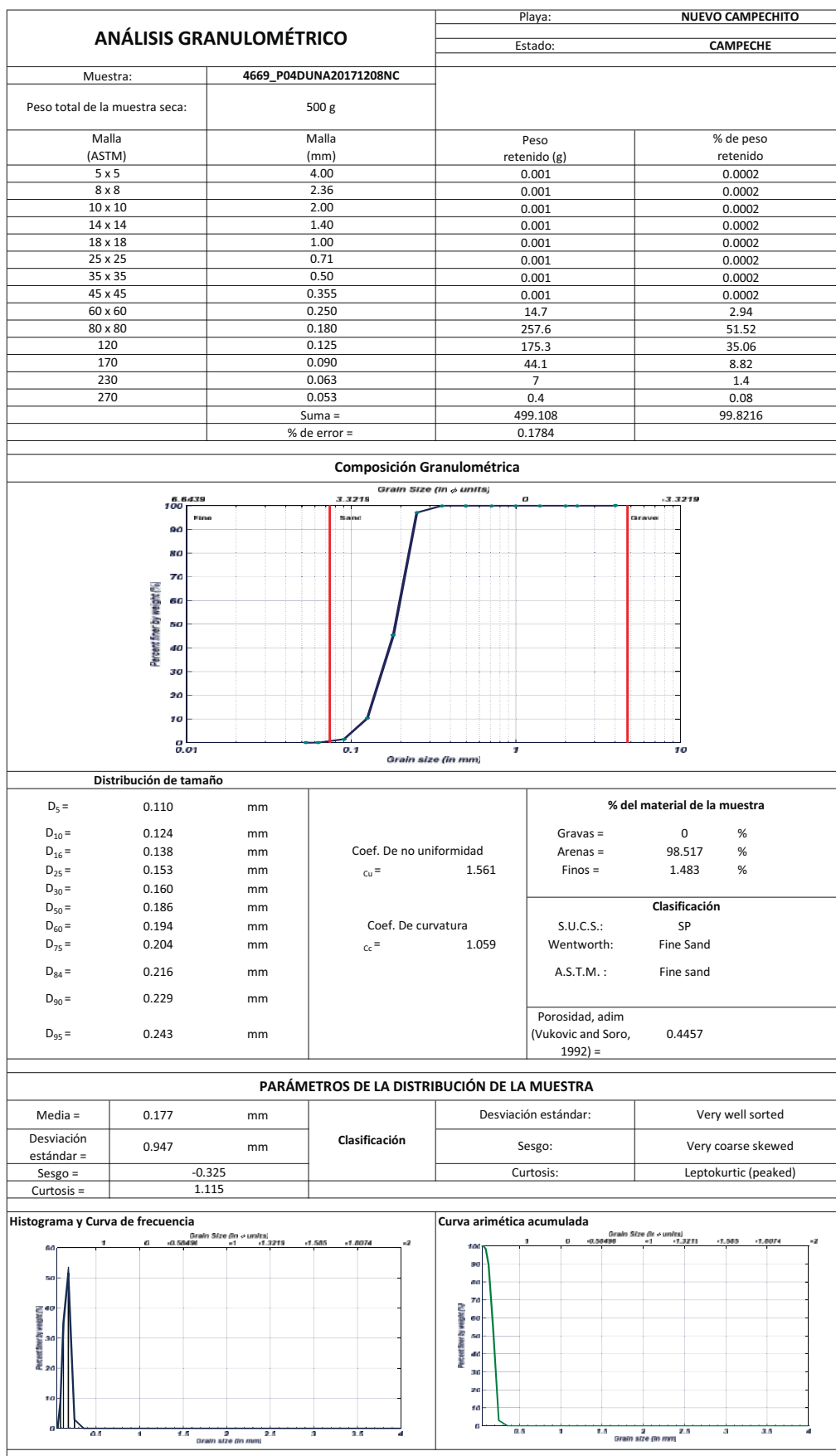




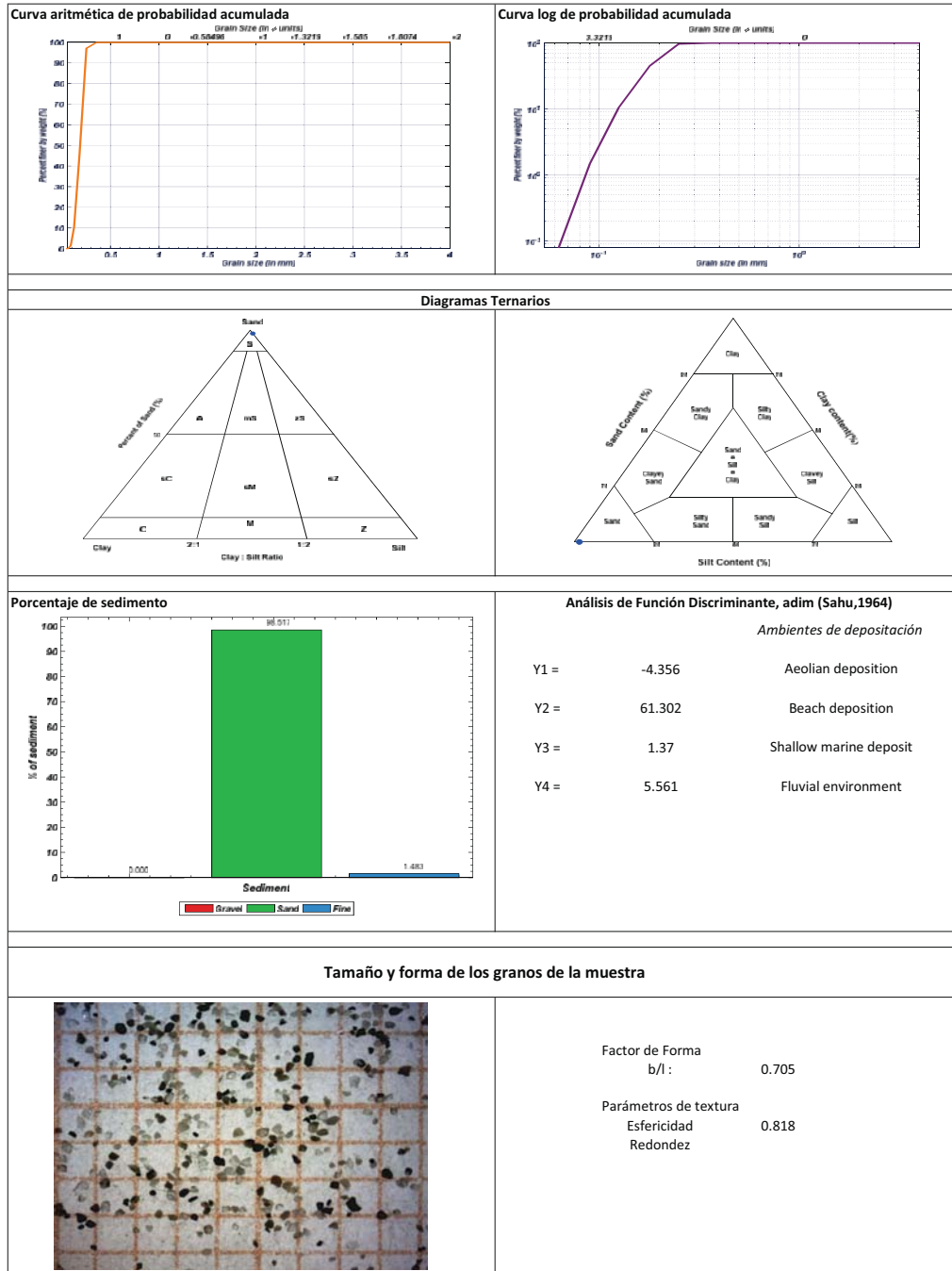


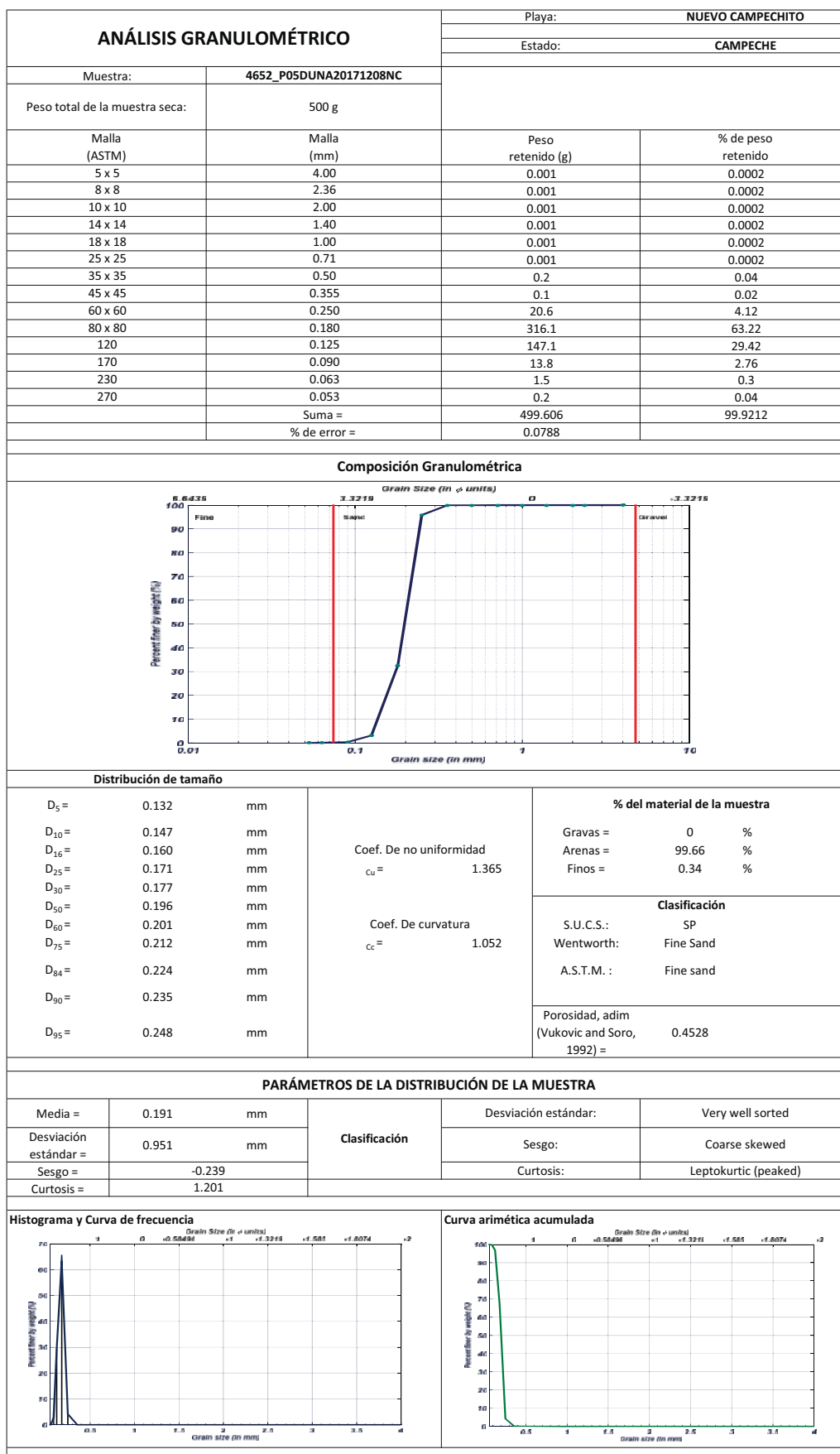
"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

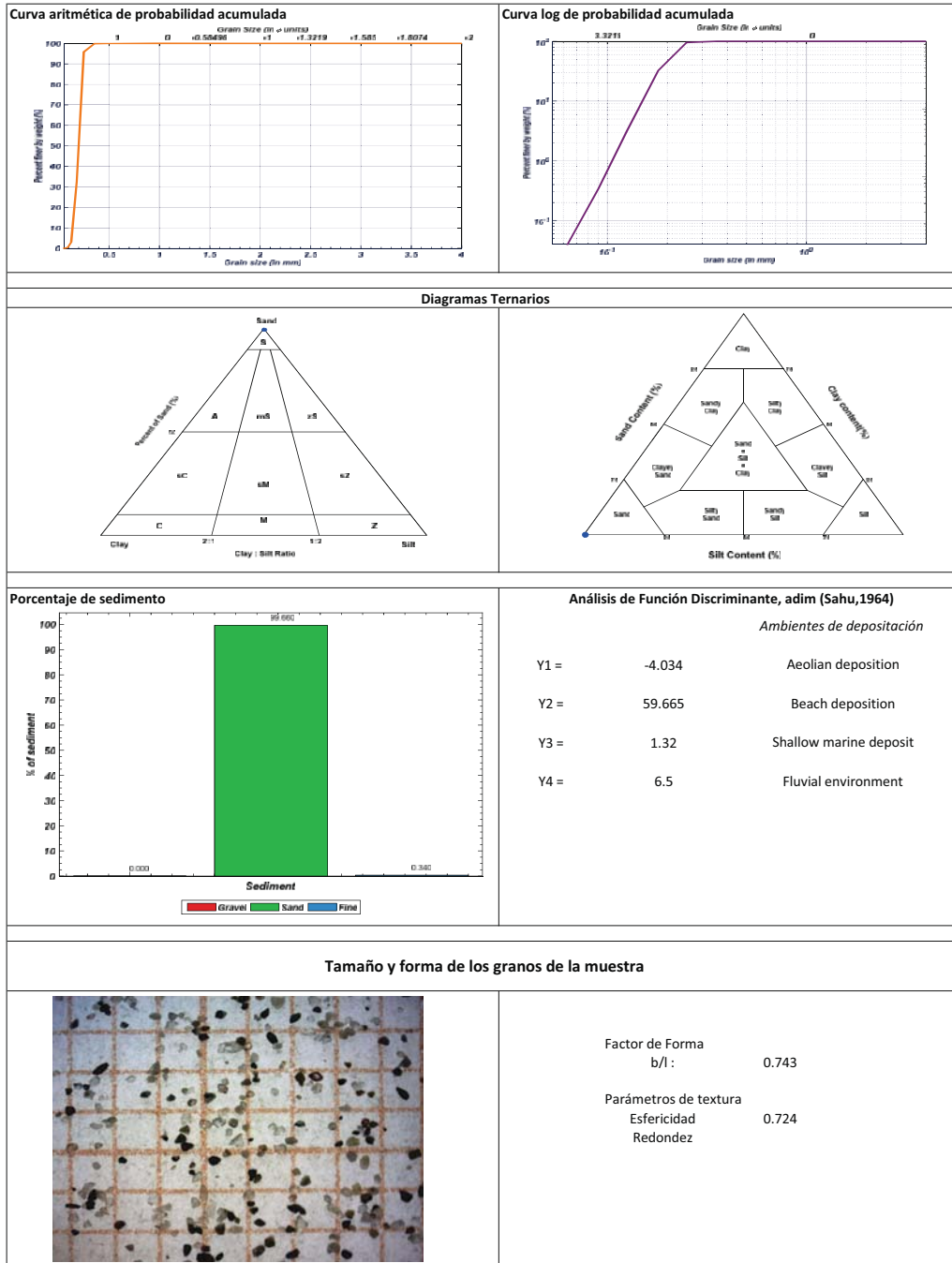


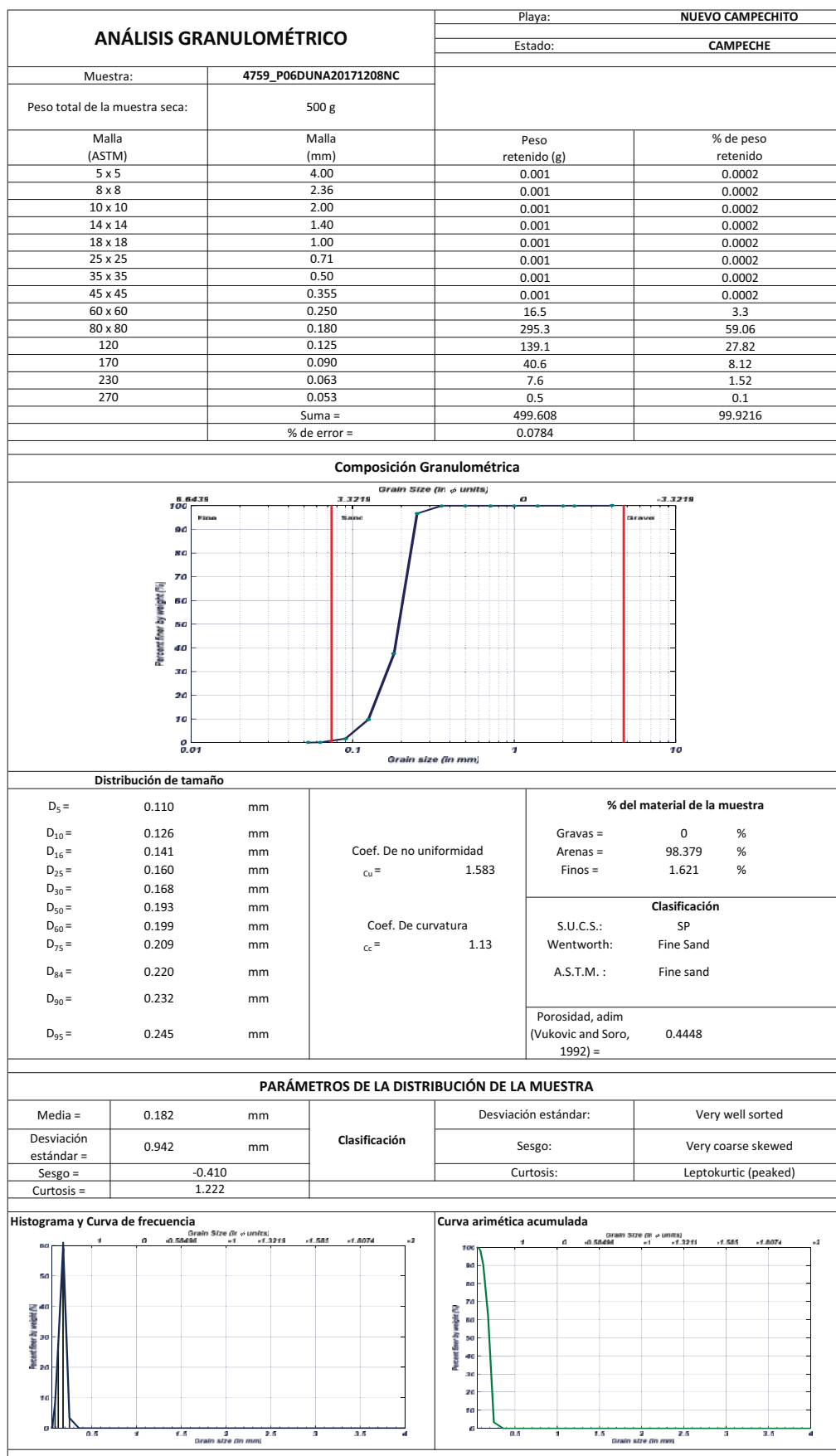


"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

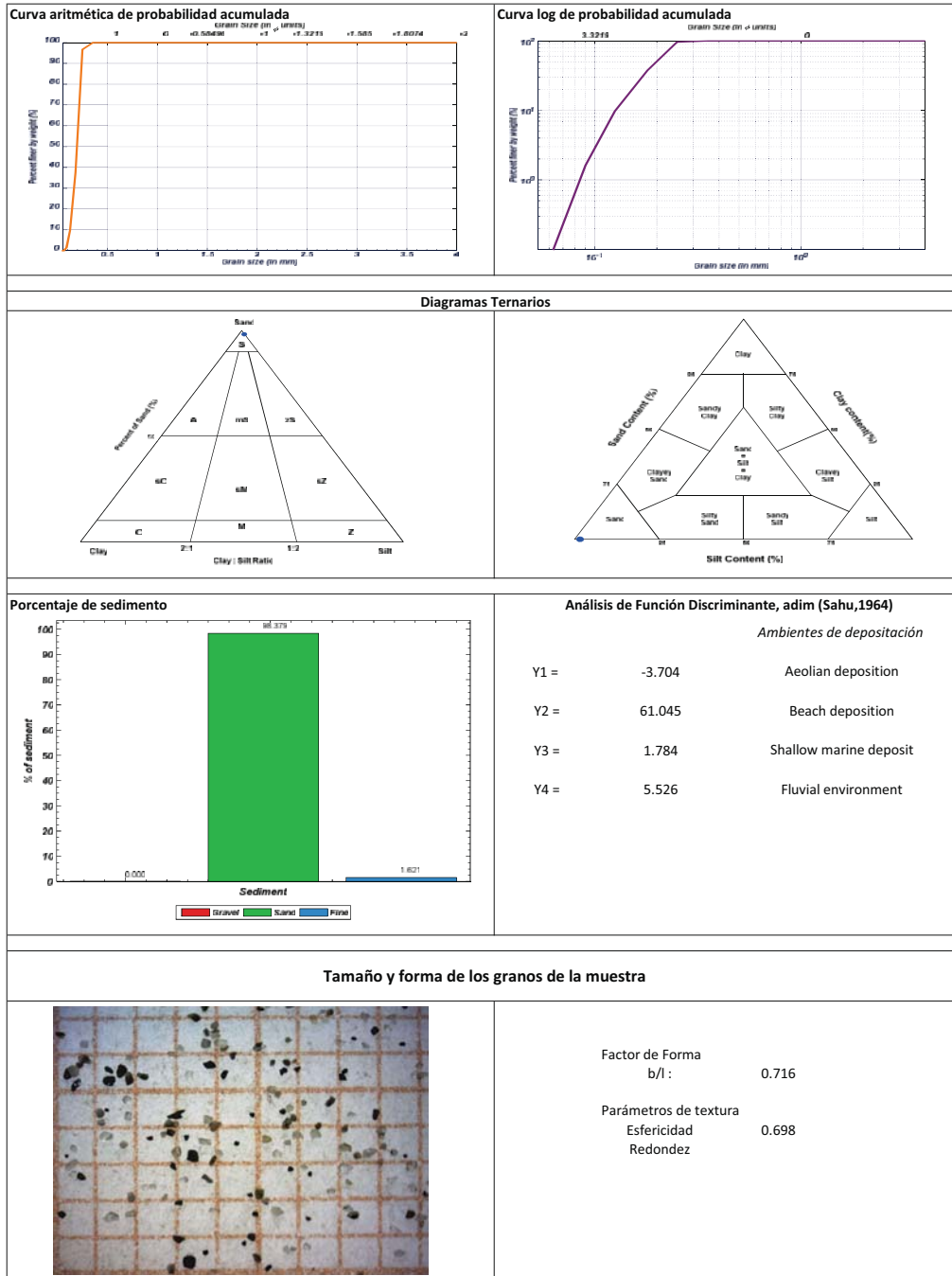






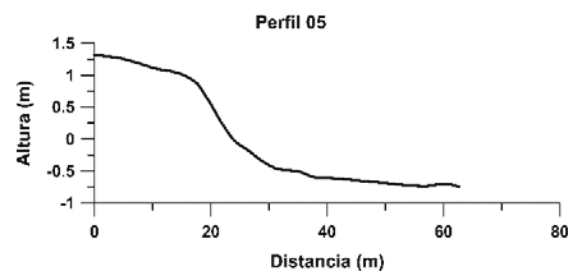
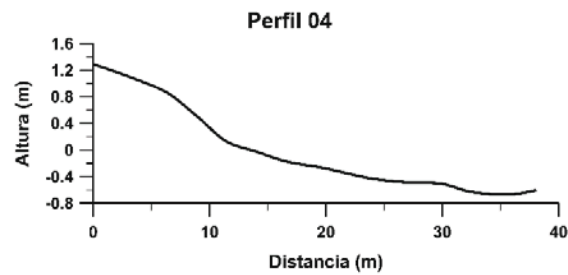
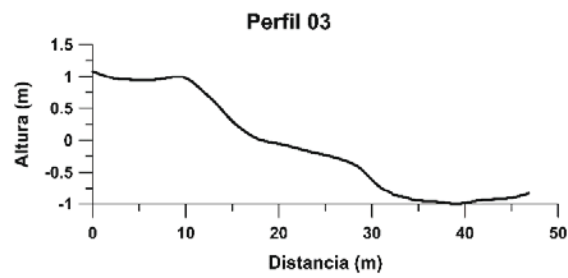
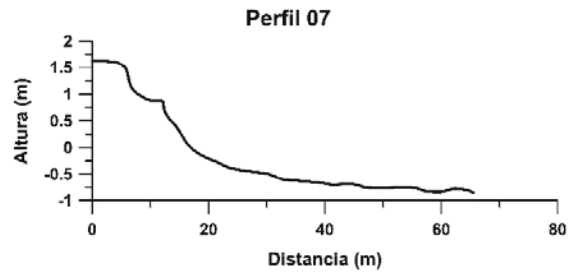
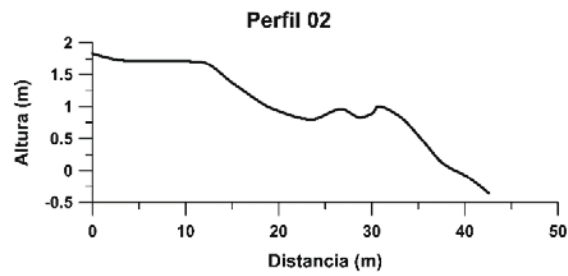
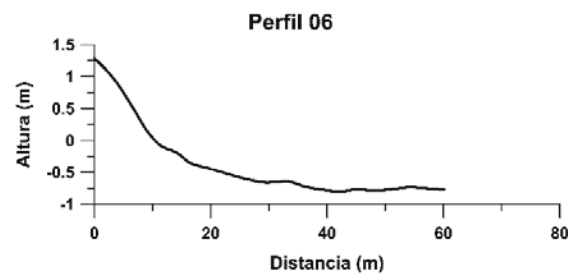
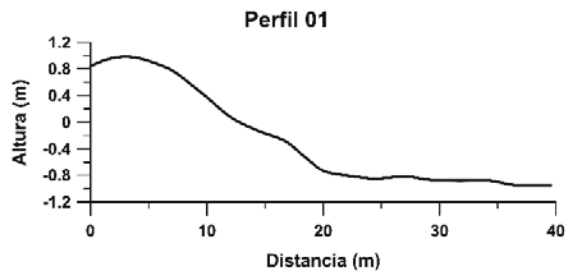


"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA"

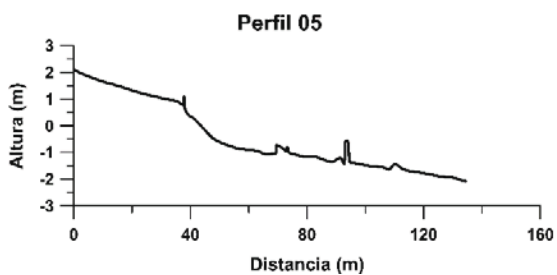
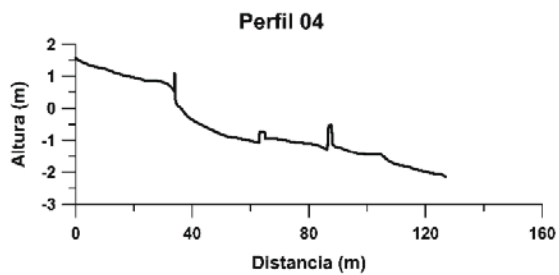
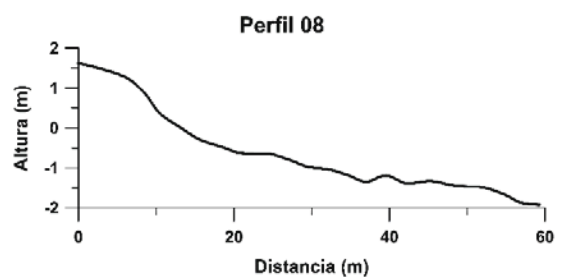
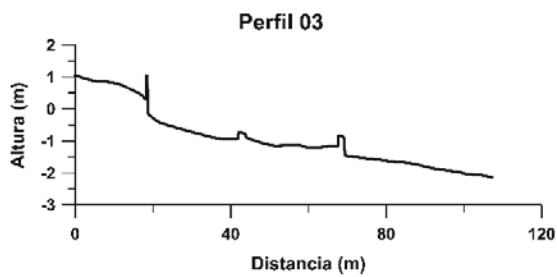
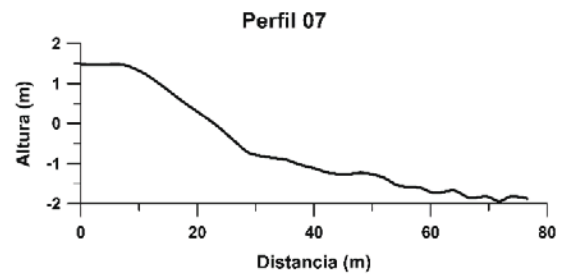
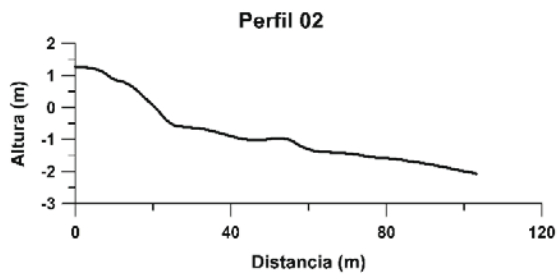
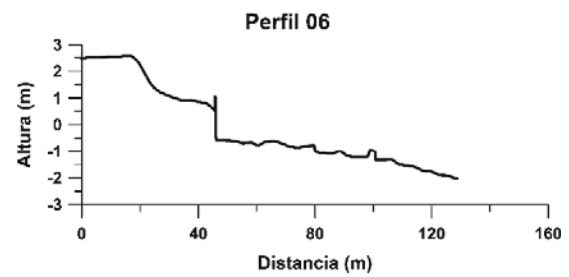
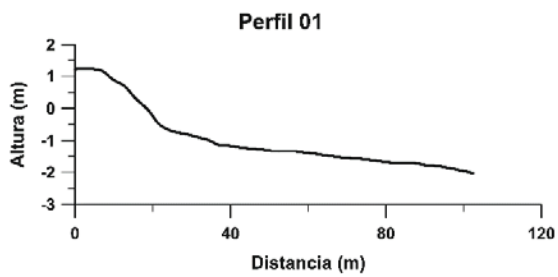


ANEXO III. PERFILES DE PLAYA

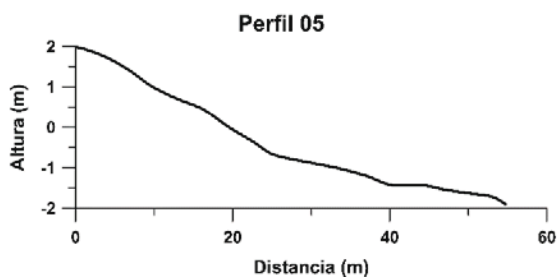
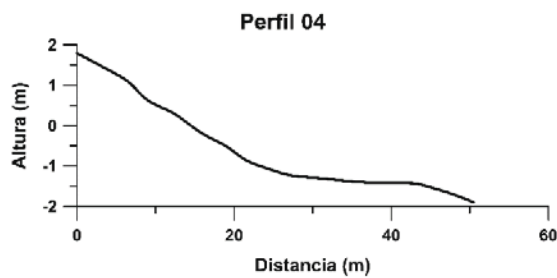
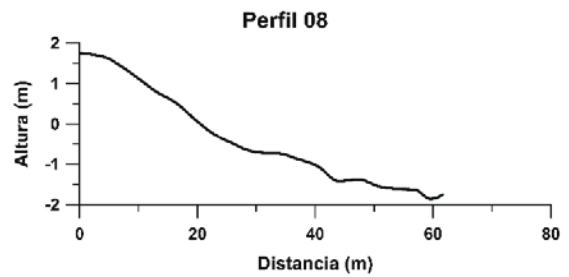
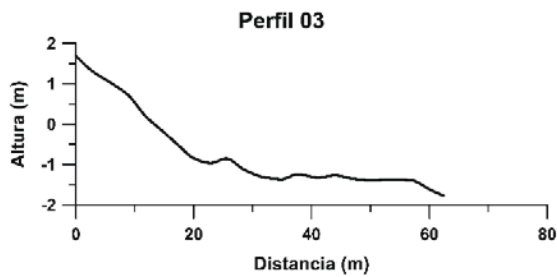
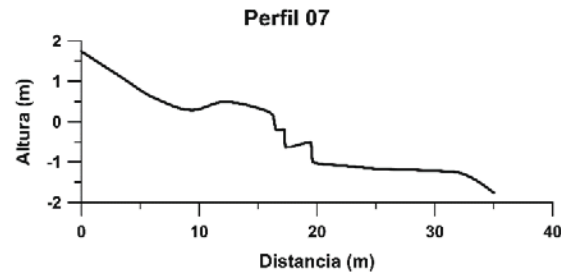
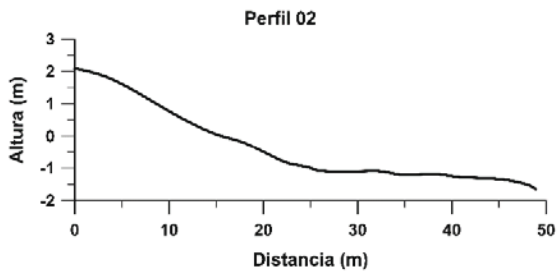
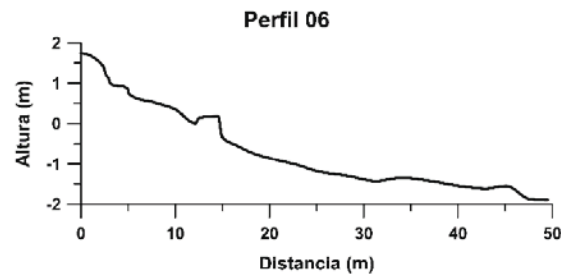
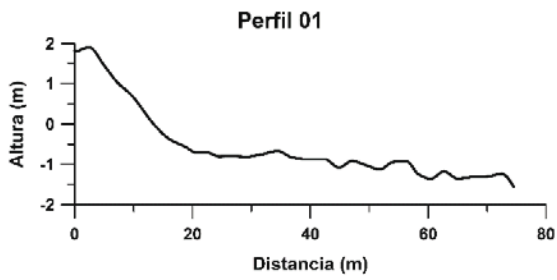
ISLA ARENA



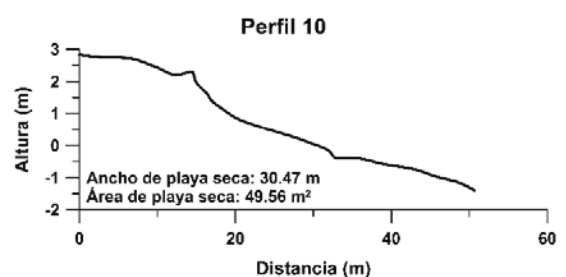
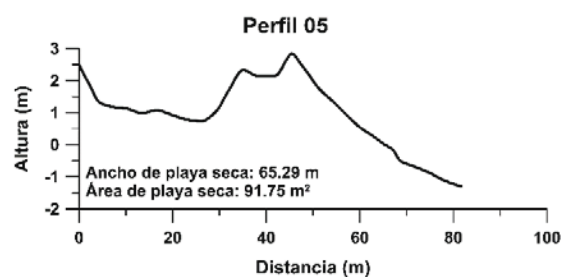
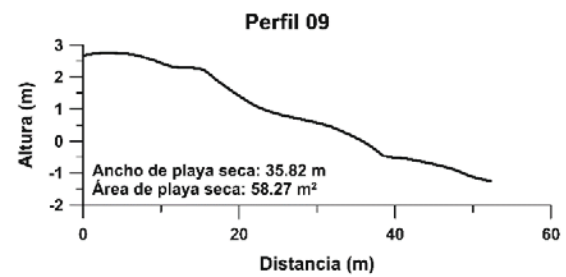
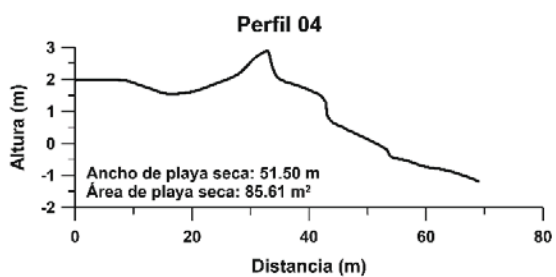
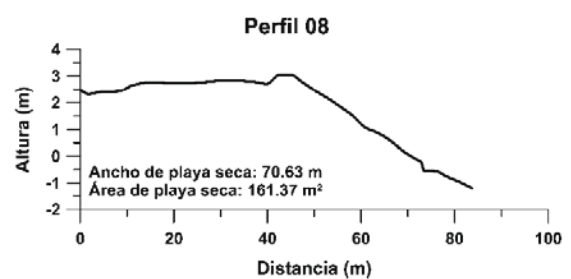
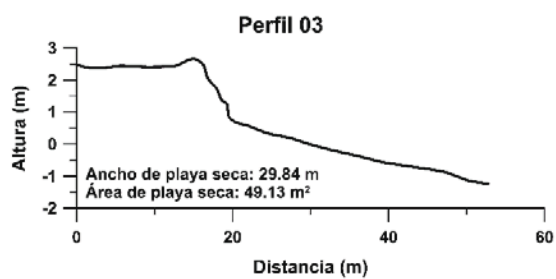
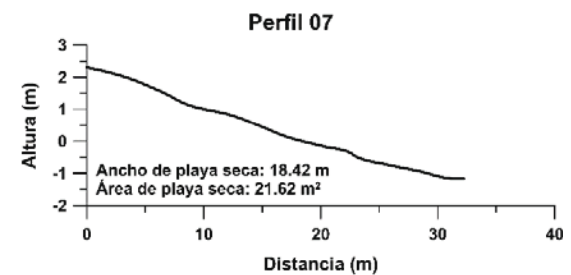
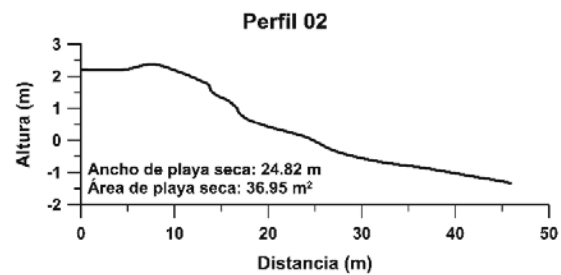
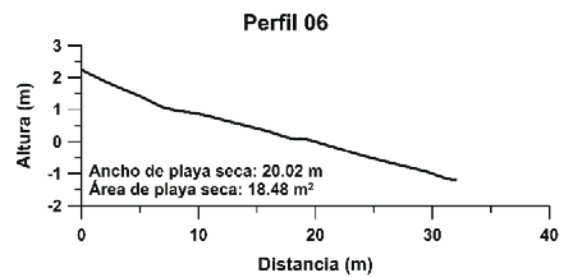
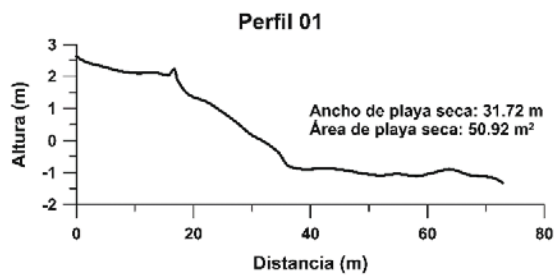
PLAYA BONITA



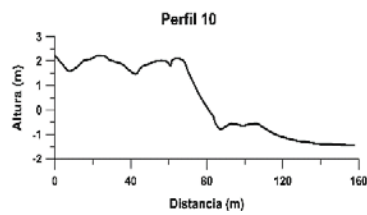
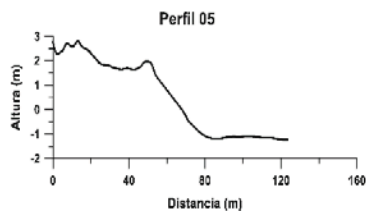
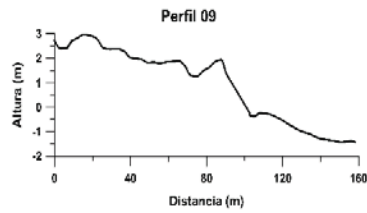
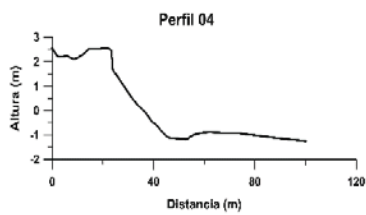
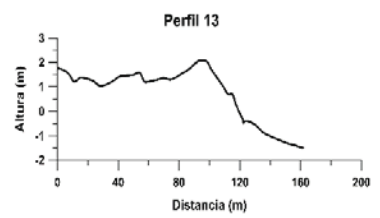
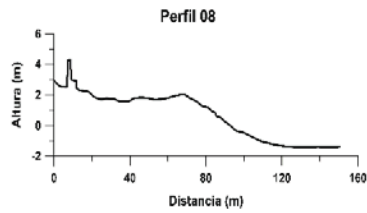
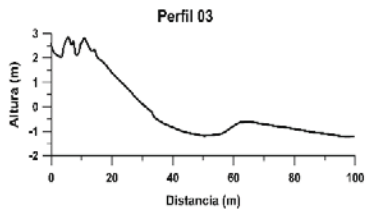
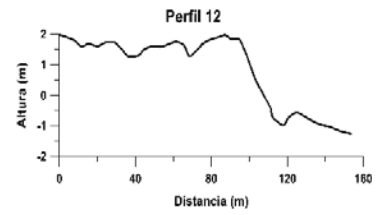
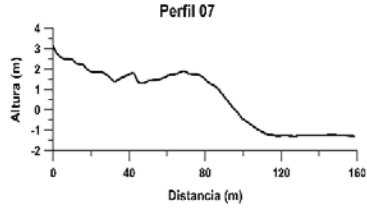
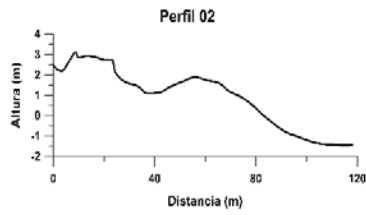
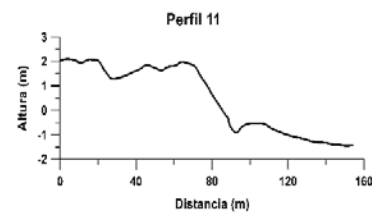
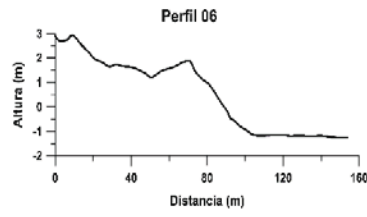
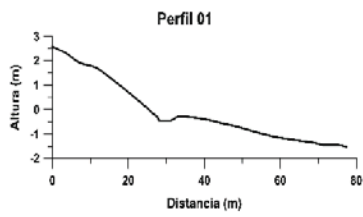
PAYUCÁN



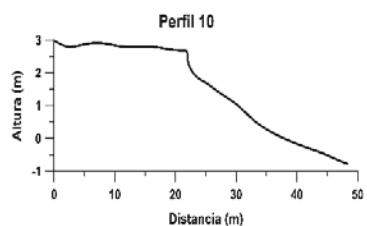
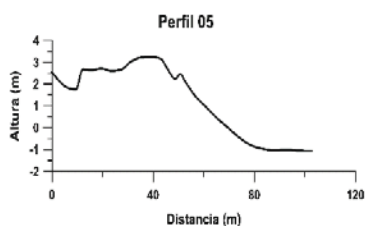
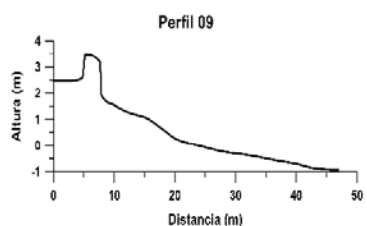
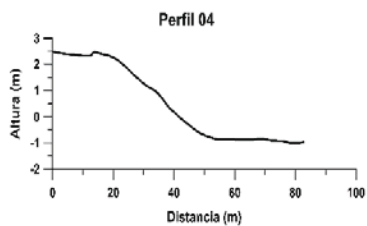
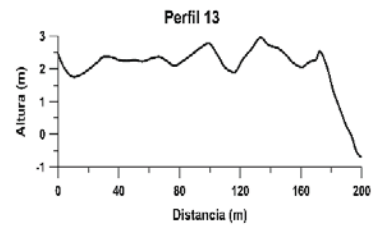
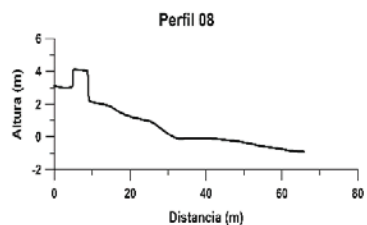
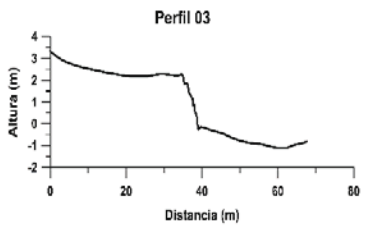
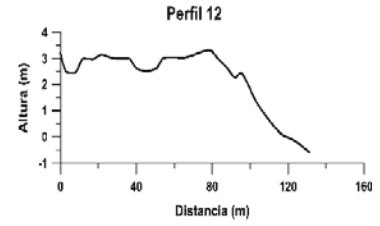
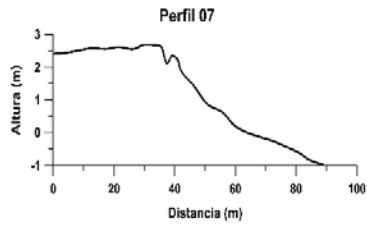
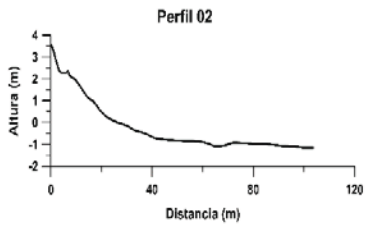
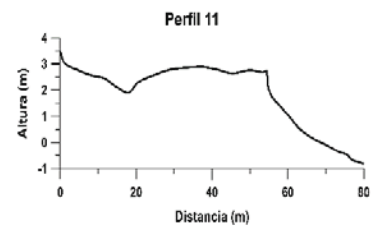
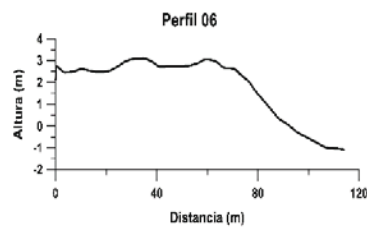
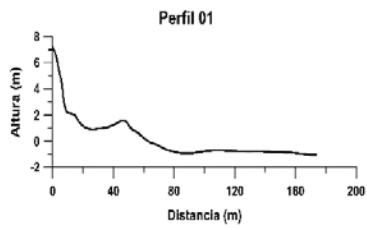
CHENKÁN



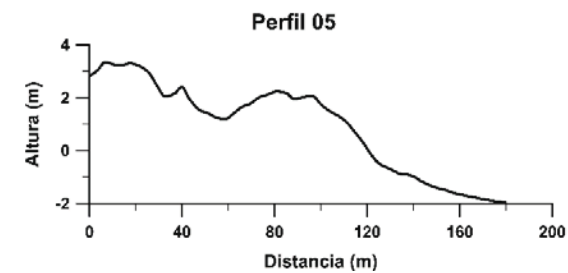
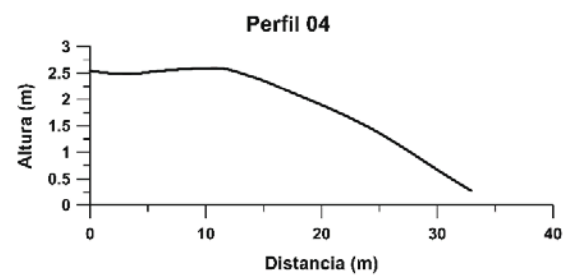
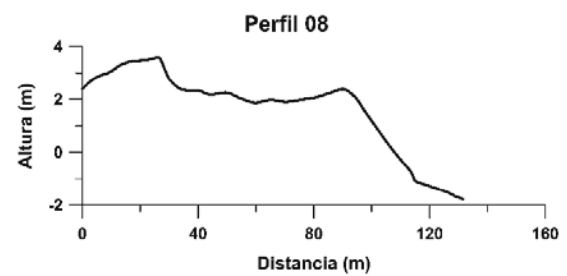
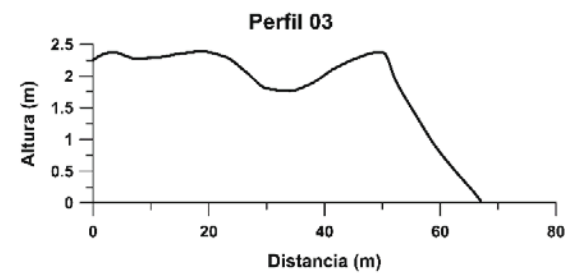
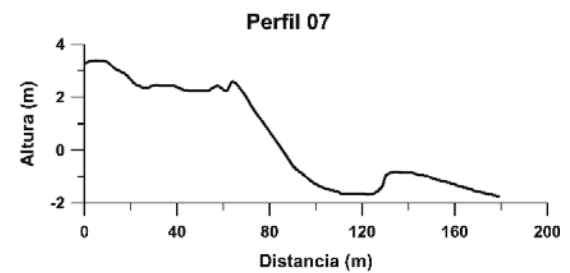
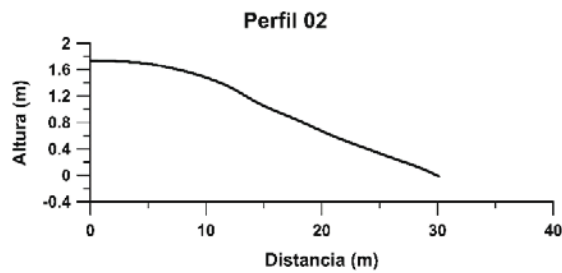
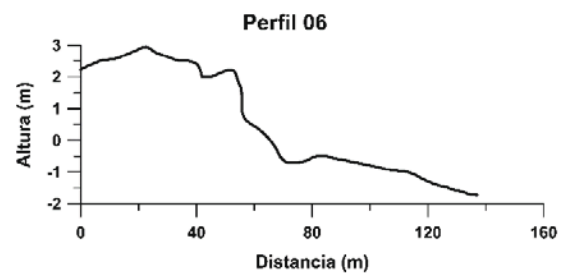
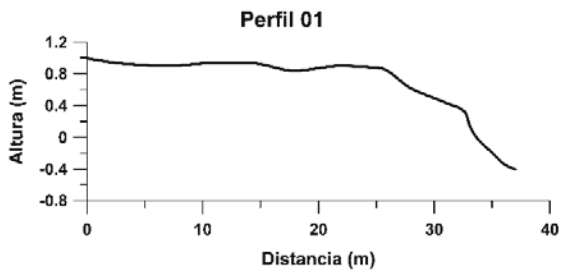
SABANCUY



“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

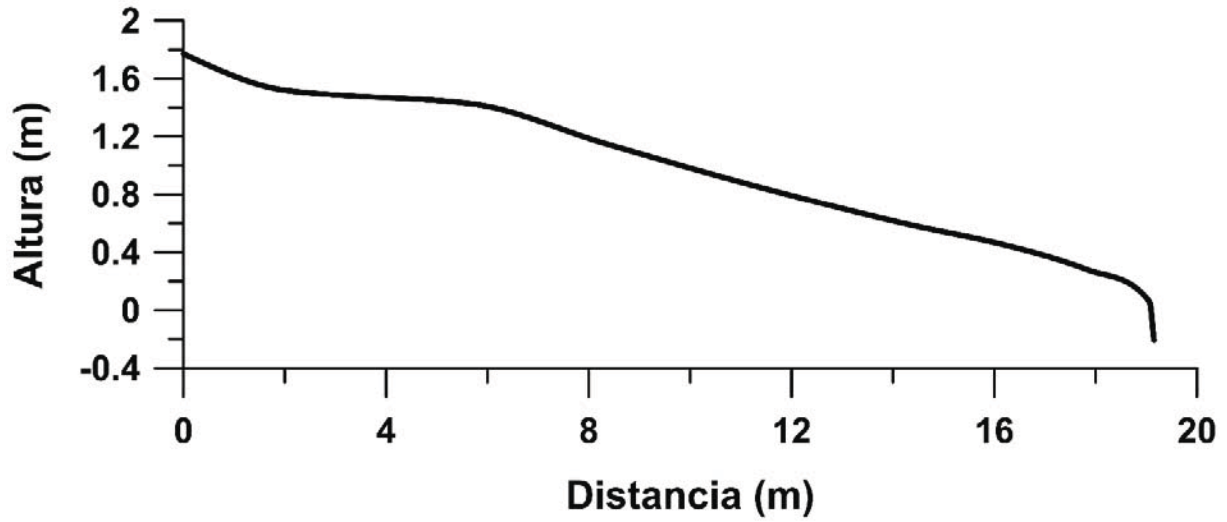


ISLA AGUADA

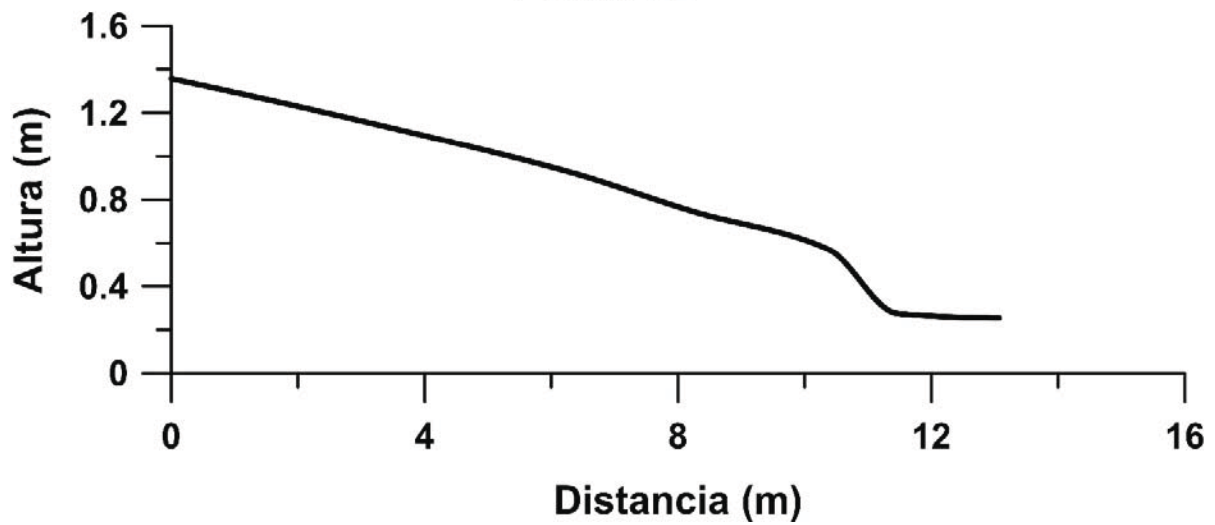


PUERTO REAL

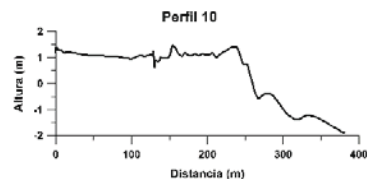
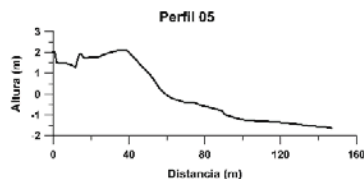
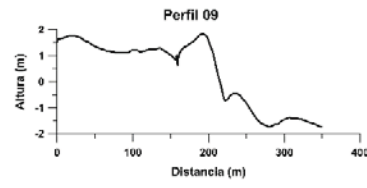
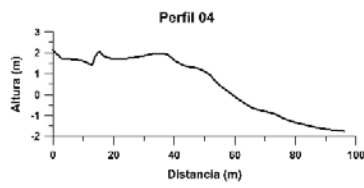
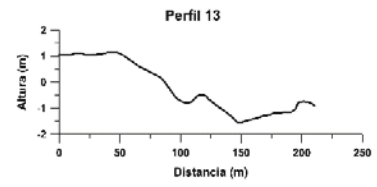
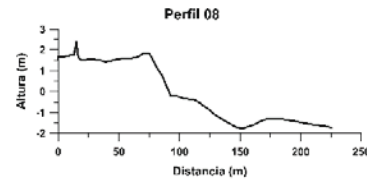
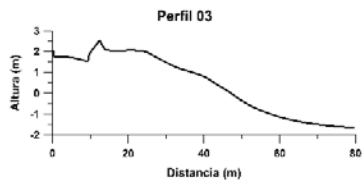
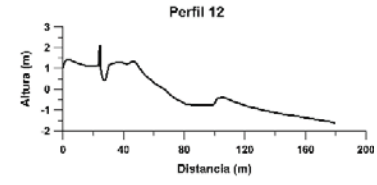
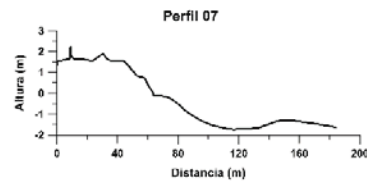
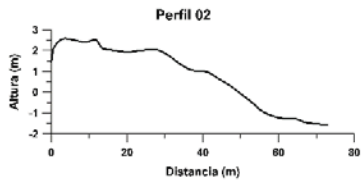
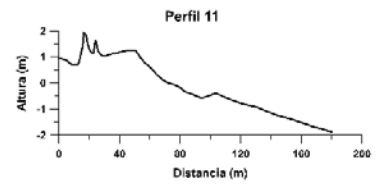
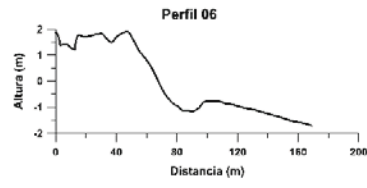
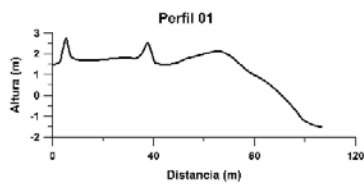
Perfil 01



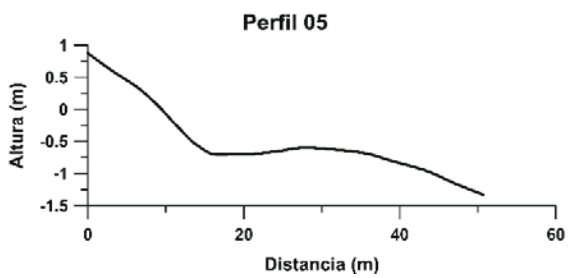
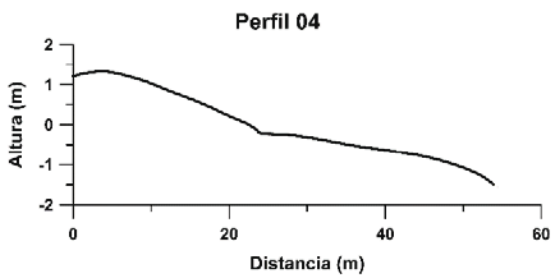
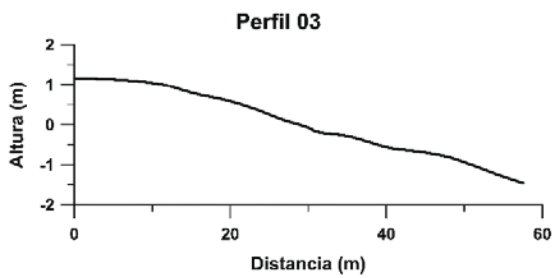
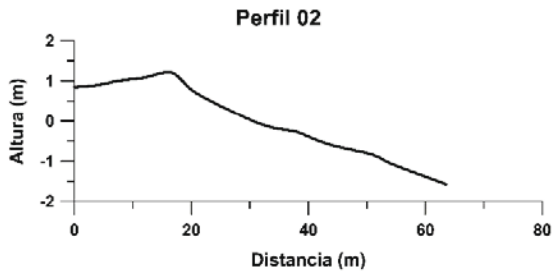
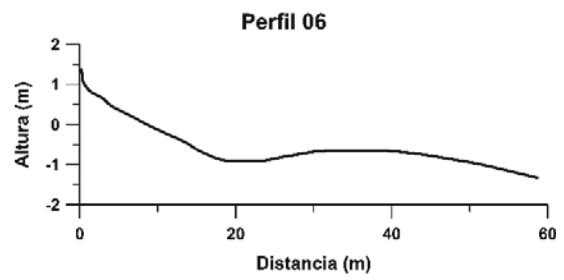
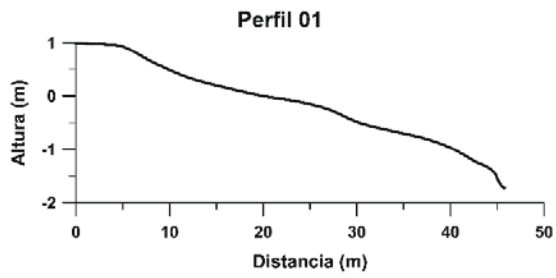
Perfil 02



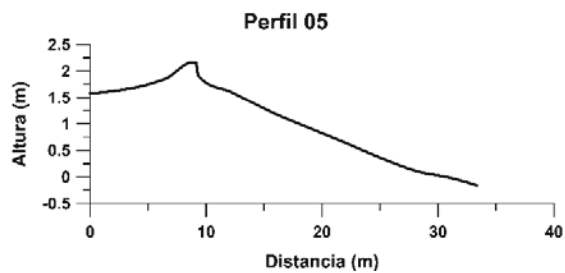
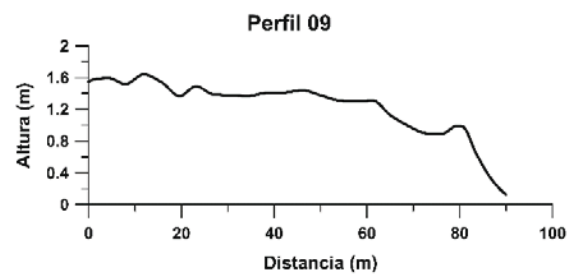
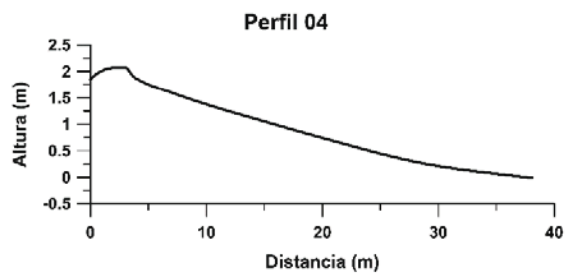
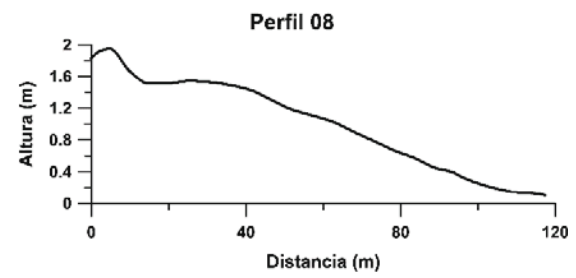
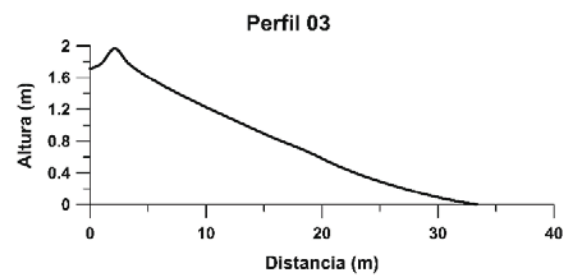
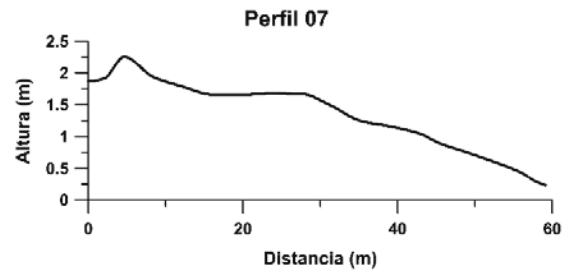
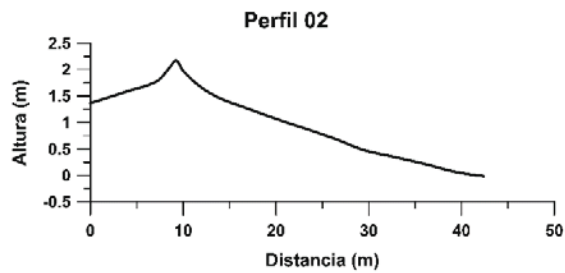
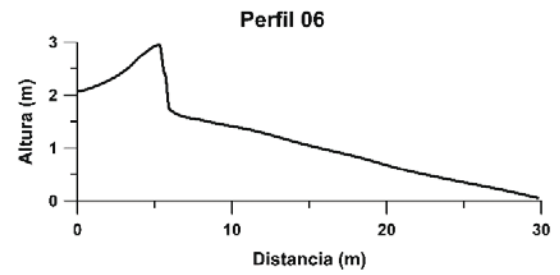
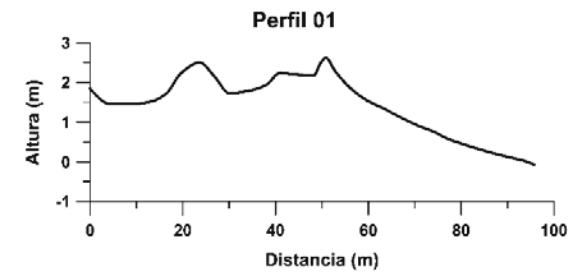
PLAYA NORTE



ZACATAL

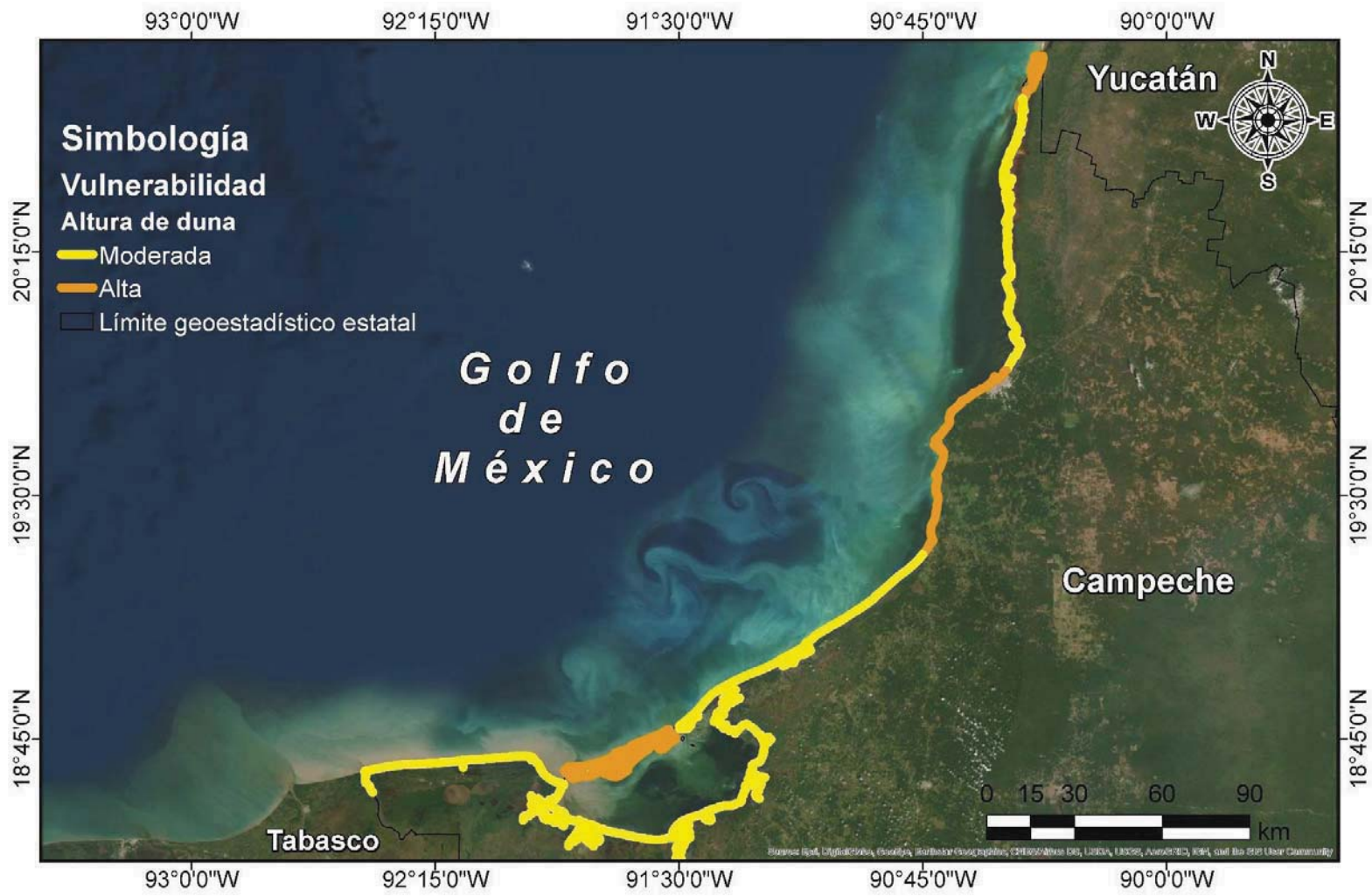


NUEVO CAMPECHITO

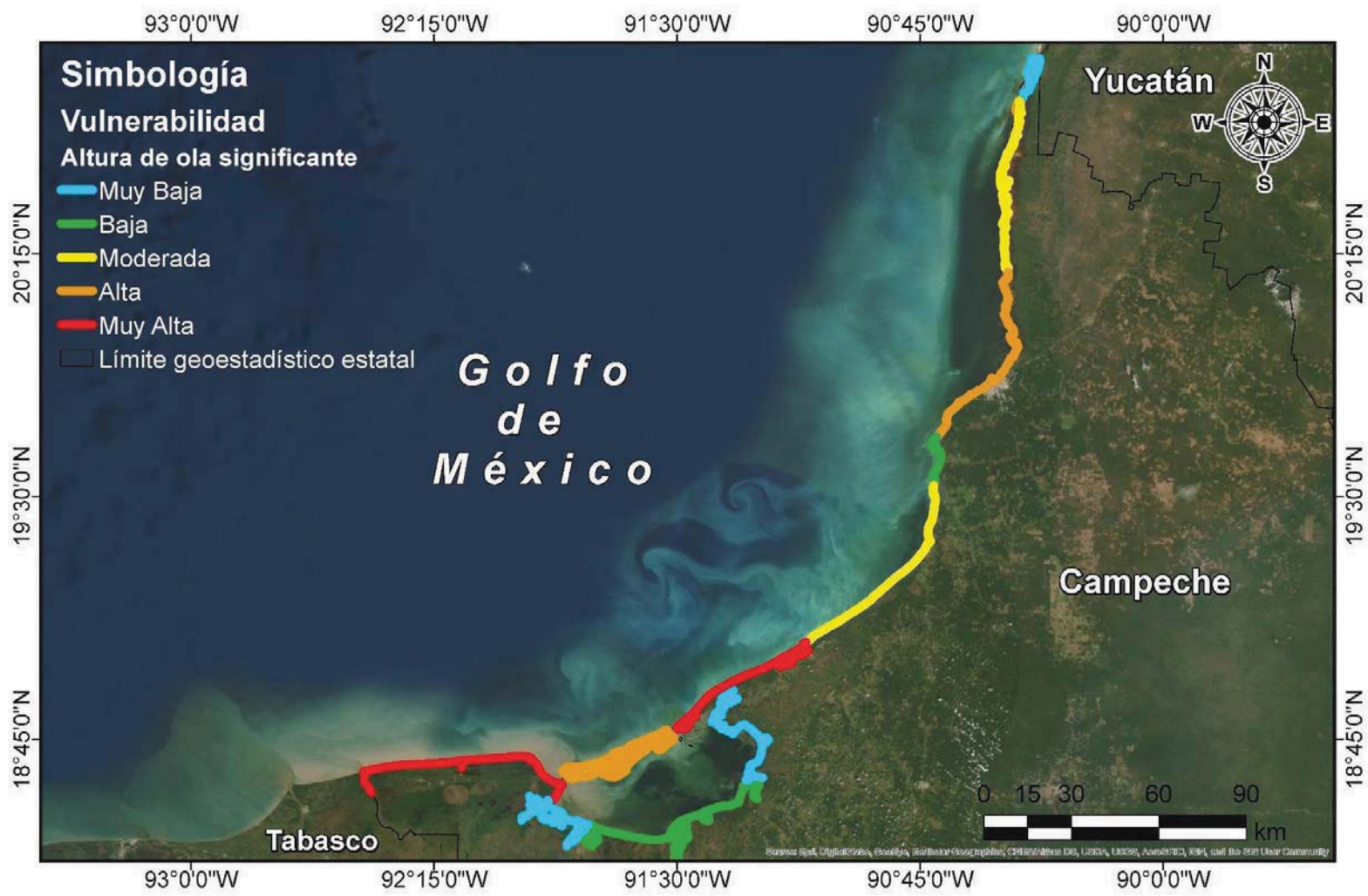


ANEXO IV. VULNERABILIDAD COSTERA

ALTURA DE DUNA



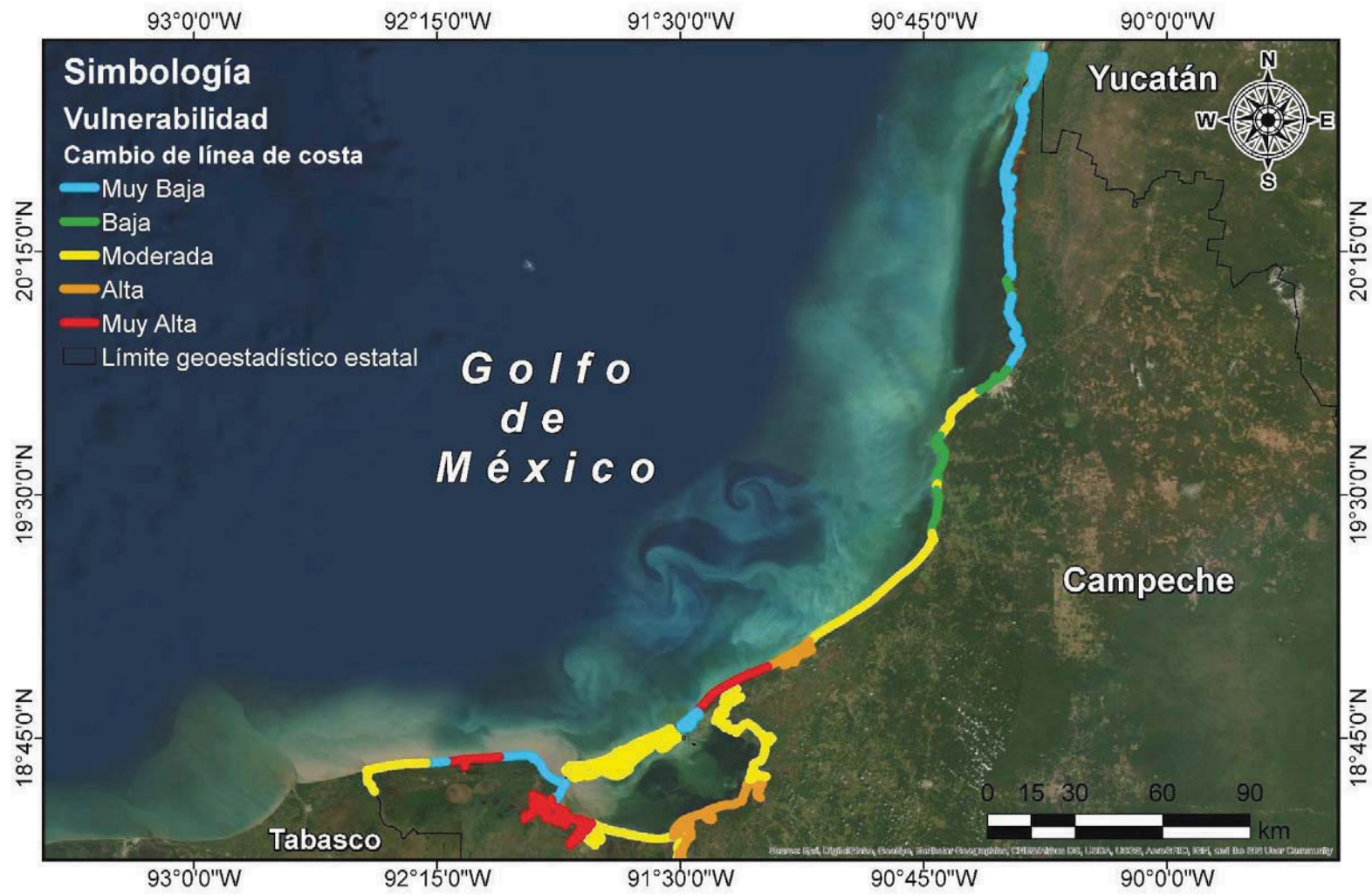
ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE



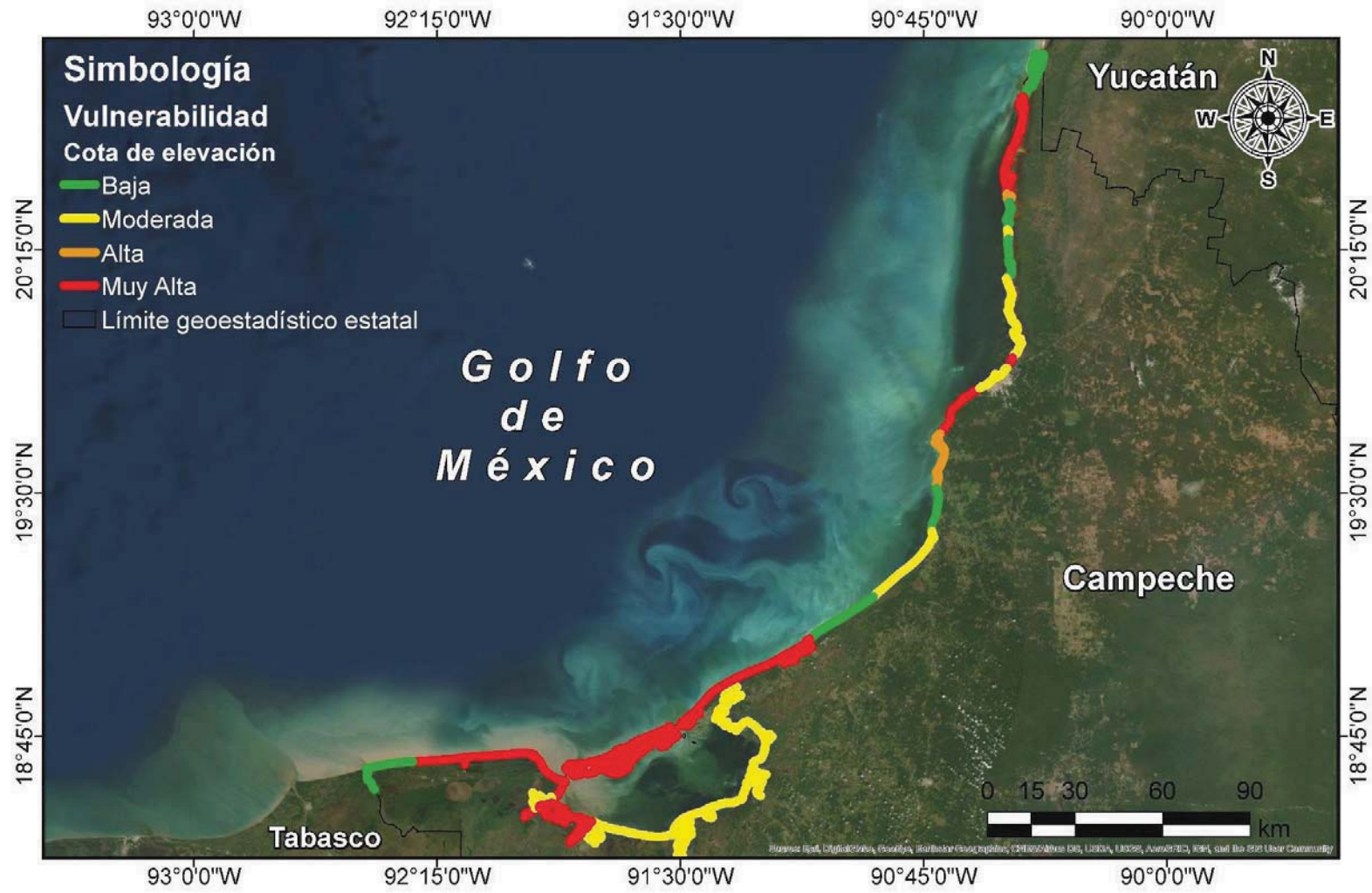
ARRECIFE DE CORAL



CAMBIO DE LÍNEA DE COSTA



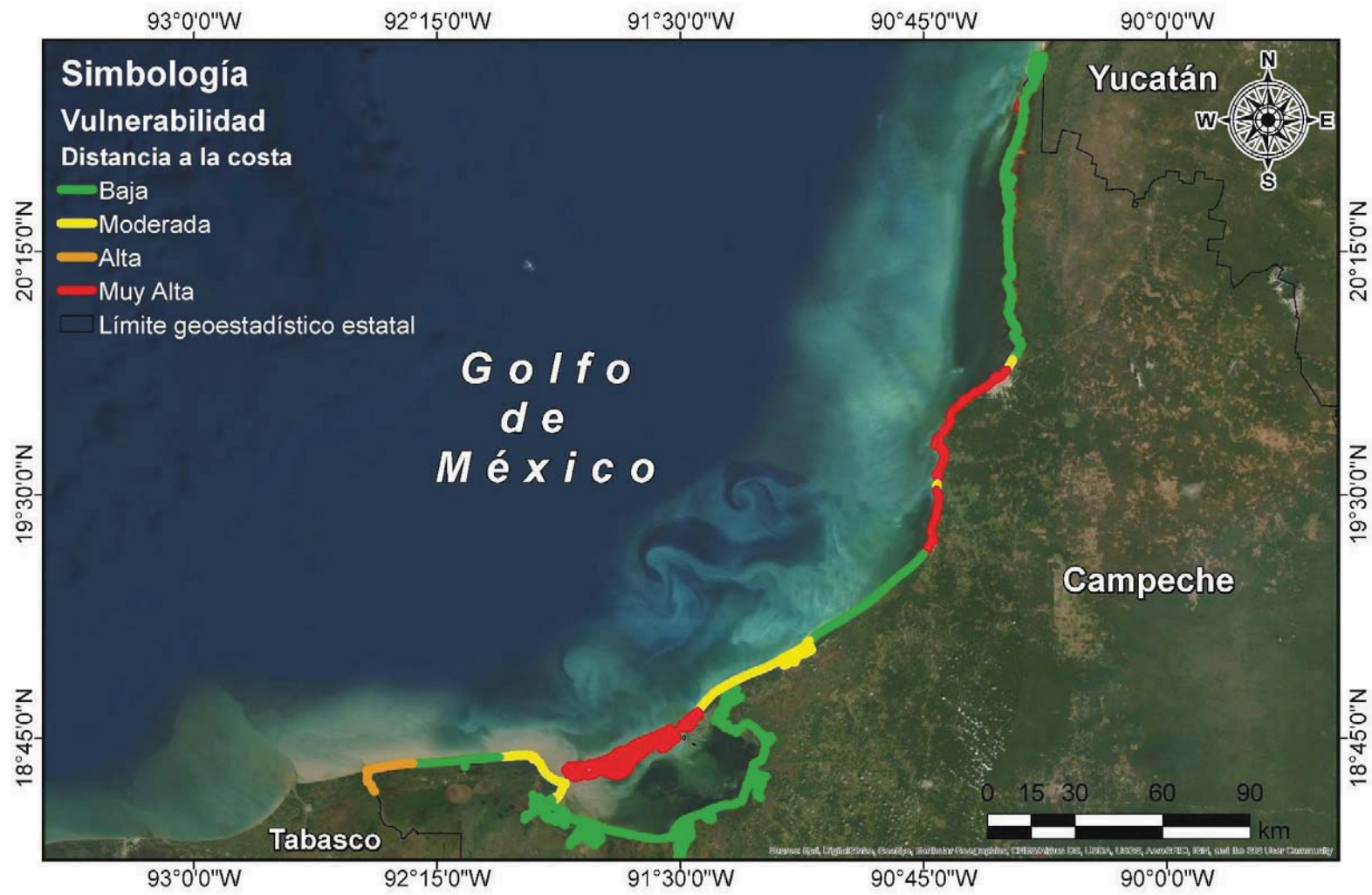
COTA DE ELEVACIÓN



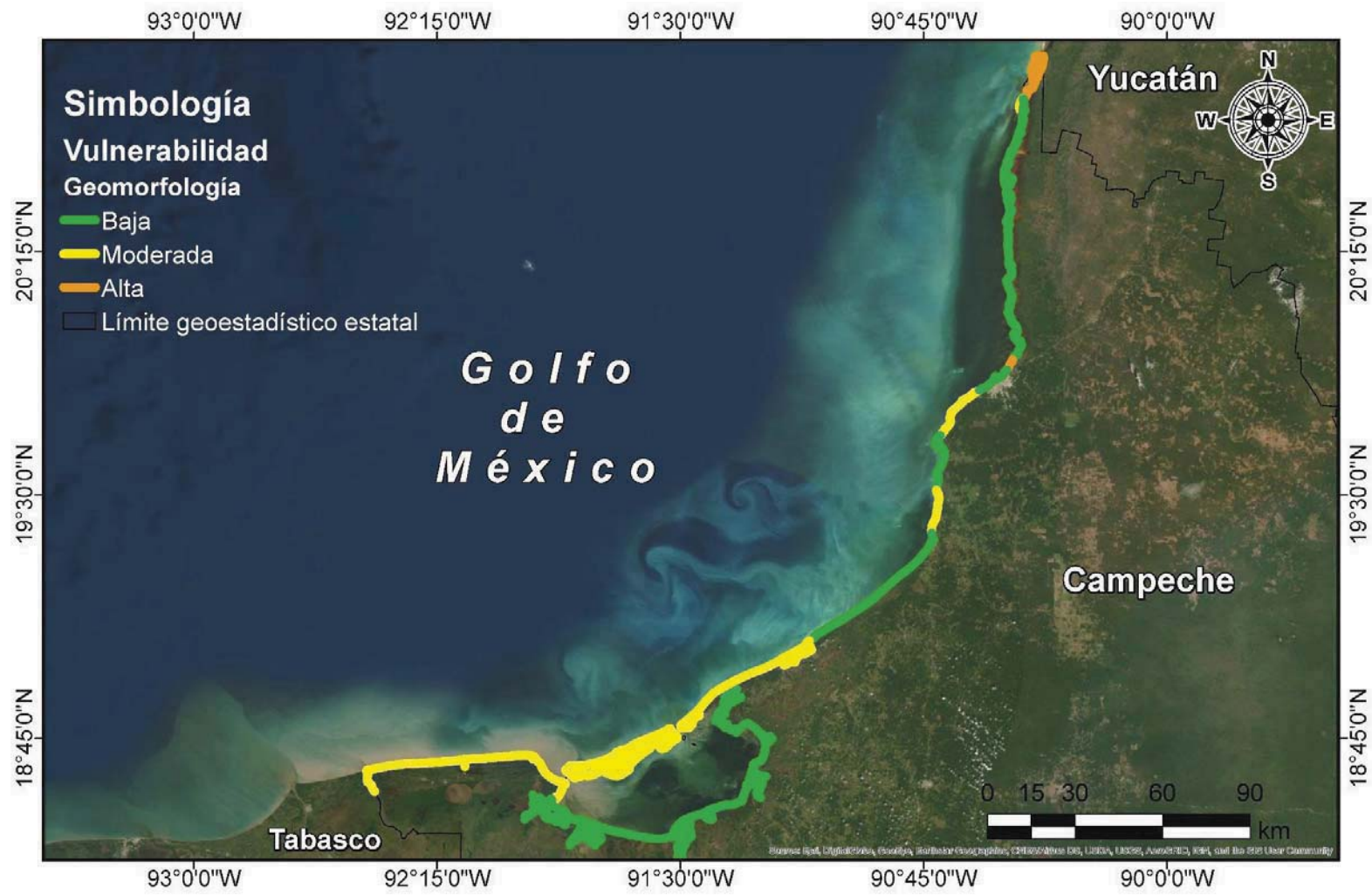
DENSIDAD DE POBLACIÓN



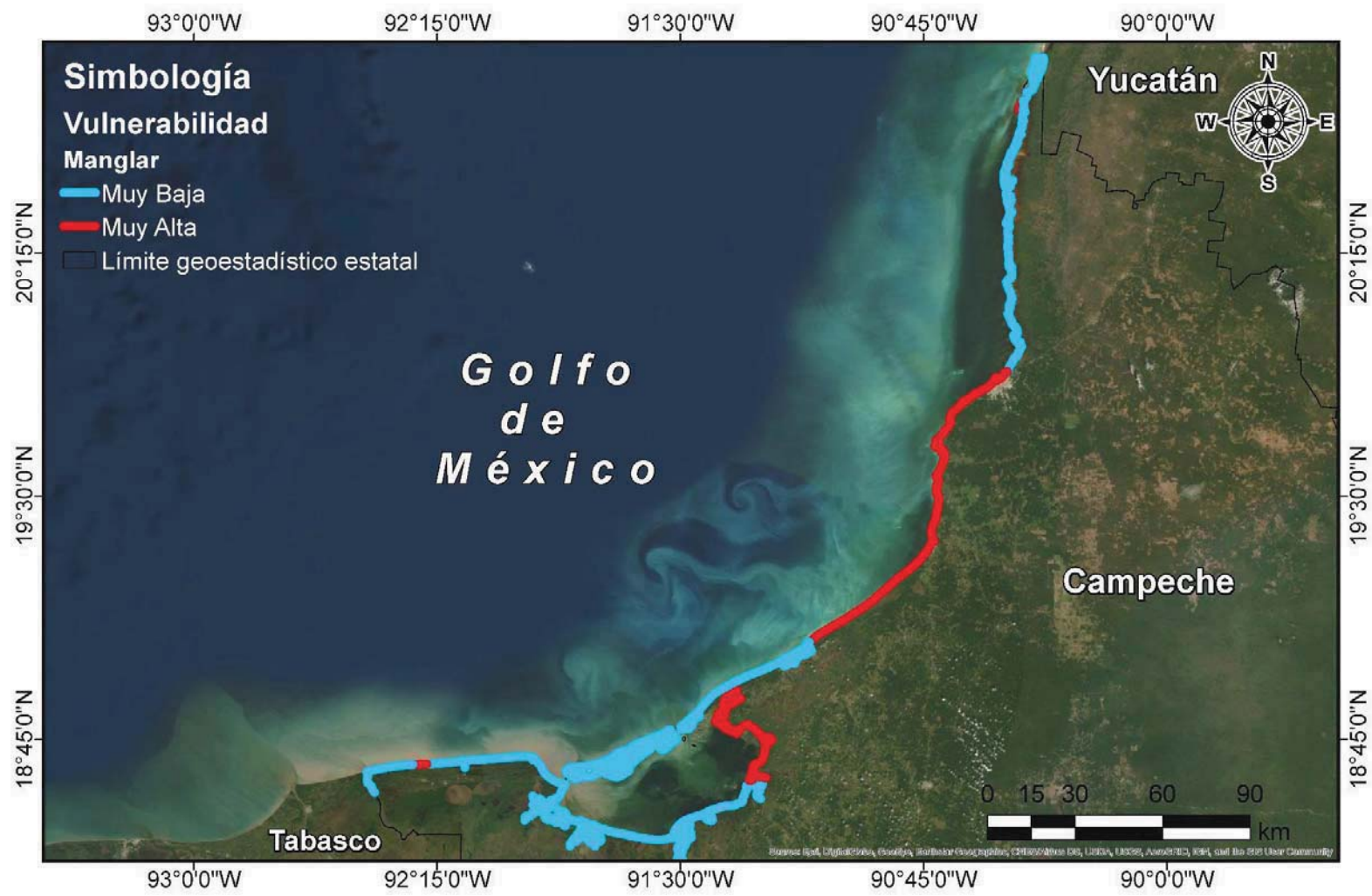
DISTANCIA A LA COSTA



GEOMORFOLOGÍA



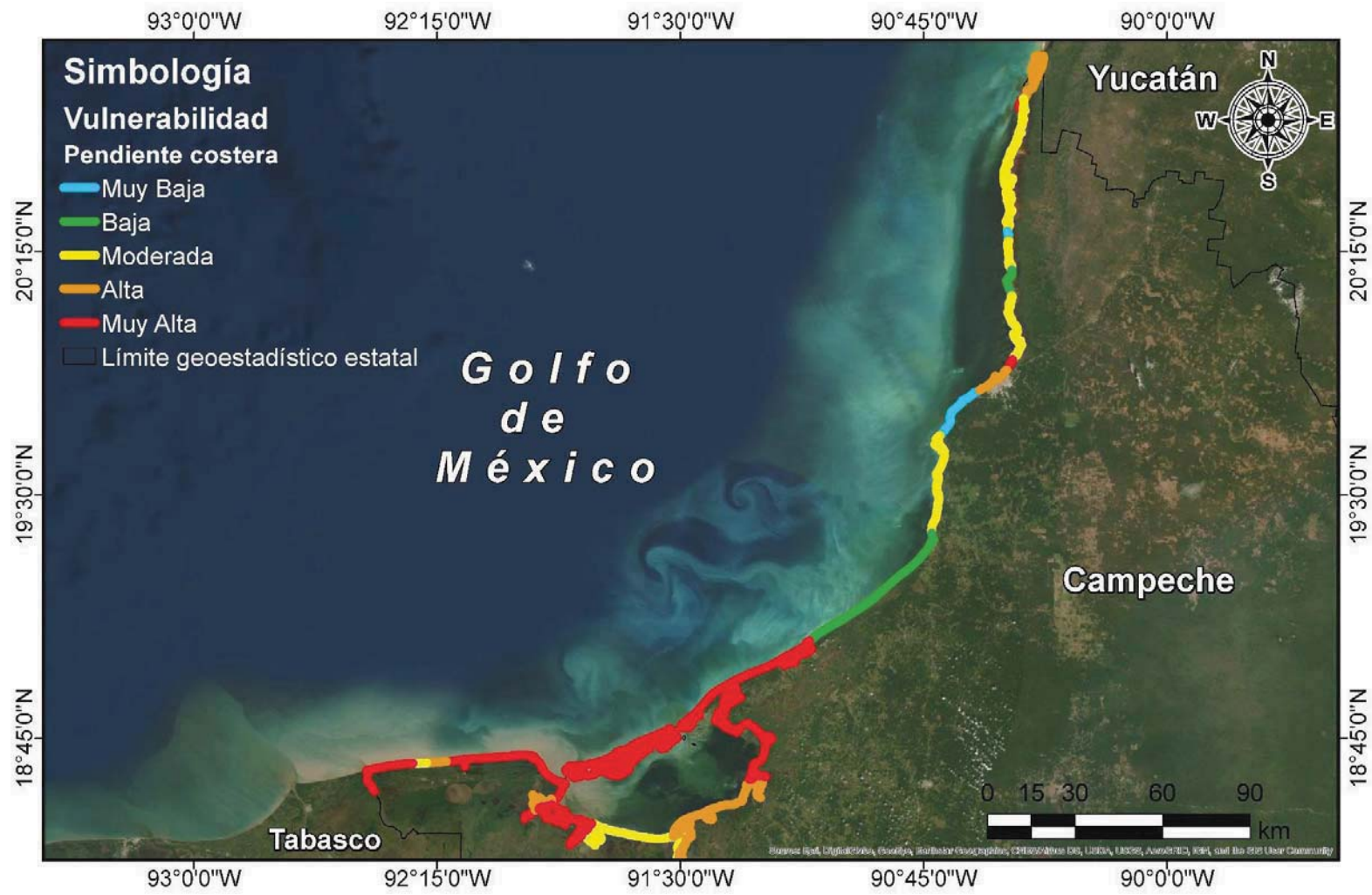
MANGLAR



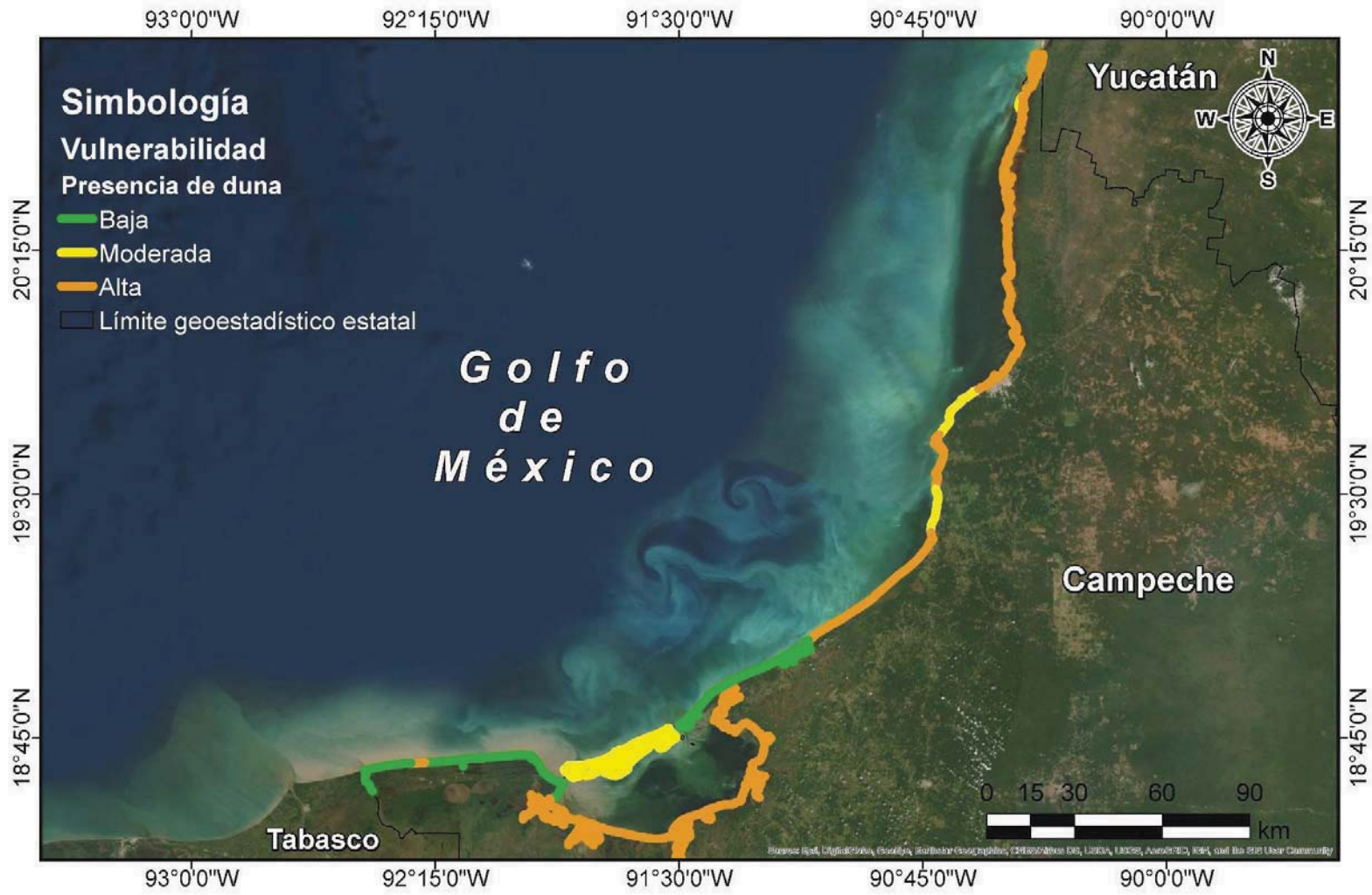
MATERIAL DE VIVIENDA



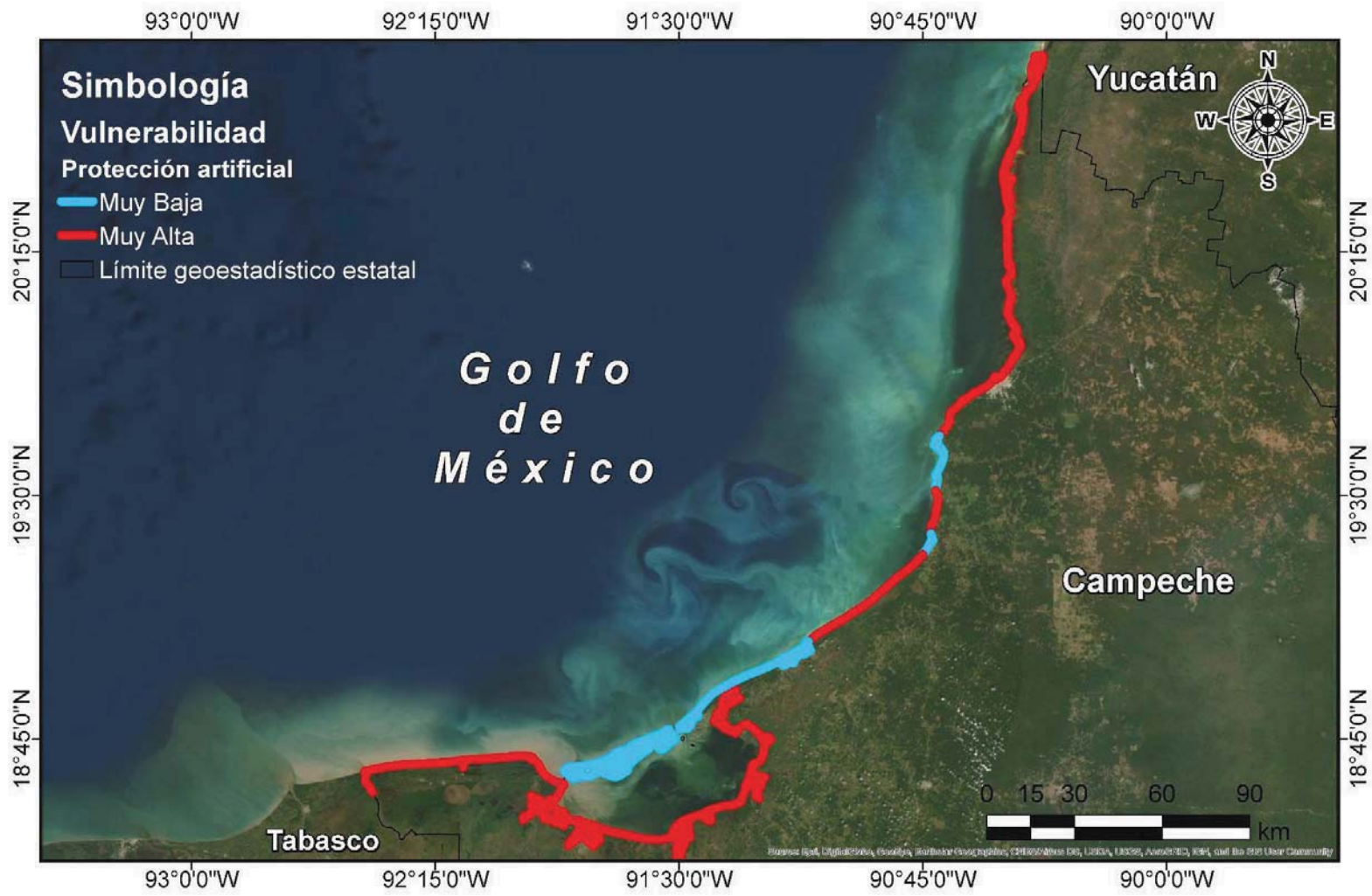
PENDIENTE COSTERA



PRESENCIA DE DUNA



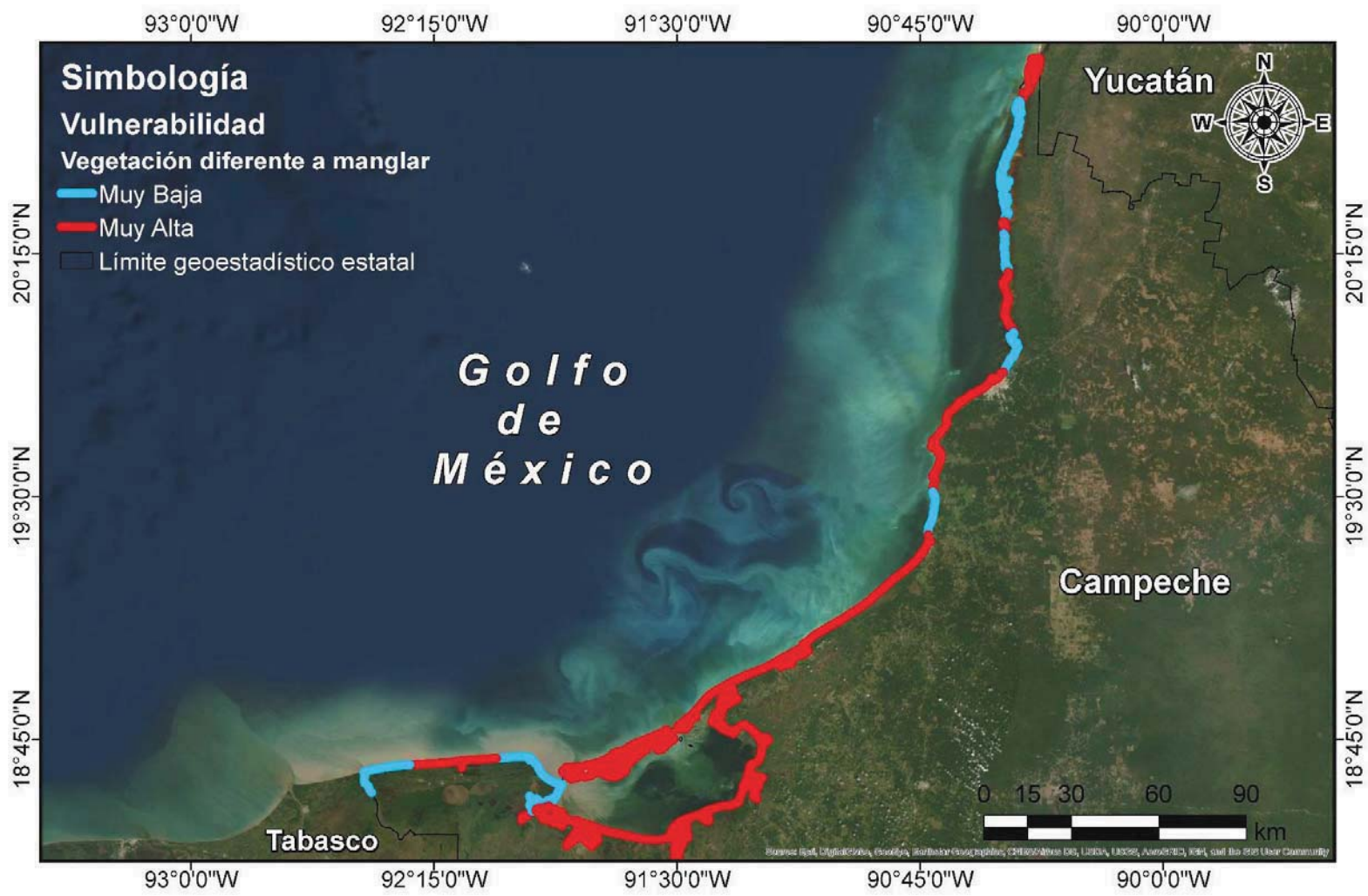
PROTECCIÓN ARTIFICIAL



TIPO DE INFRAESTRUCTURA



VEGETACIÓN DIFERENTE A MANGLAR



ANEXO V. PROGRAMA DDW3

MANUAL DE USUARIO

La información alojada en el servidor se encuentra disponible a partir del año 2005 y constantemente se encuentra en actualización.

Para correr el programa se requiere tener las coordenadas de un punto cuya información de oleaje se quiere conocer; las coordenadas deben ser grados decimales, ejemplo: 20.3334 -91.3333.

1) La carpeta DDW3 contiene los siguientes archivos (Figura 1):

- cyggcc_s-1.dll
- cyggfortran-3.dll
- cyggomp-1.dll
- cygwin1.dll
- DDW3.exe
- MCRInstaller.exe
- Portada.jpg
- wget.exe
- wgrib2.EXE
- world.dbf
- world.prj
- world.shp
- world.shp
- world.shx

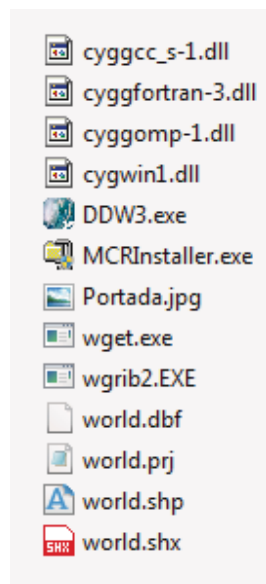


Figura 1. Archivos en la carpeta de DDW3.

- 2) Si no tiene instalada la versión 8.3 del compilador de Matlab. Ejecutar el archivo MCRInstaller.exe.
- 3) Para abrir la interfaz del programa, ejecutar DDW3.exe.
- 4) Al abrir el programa se muestra la pantalla siguiente (Figura 2):

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

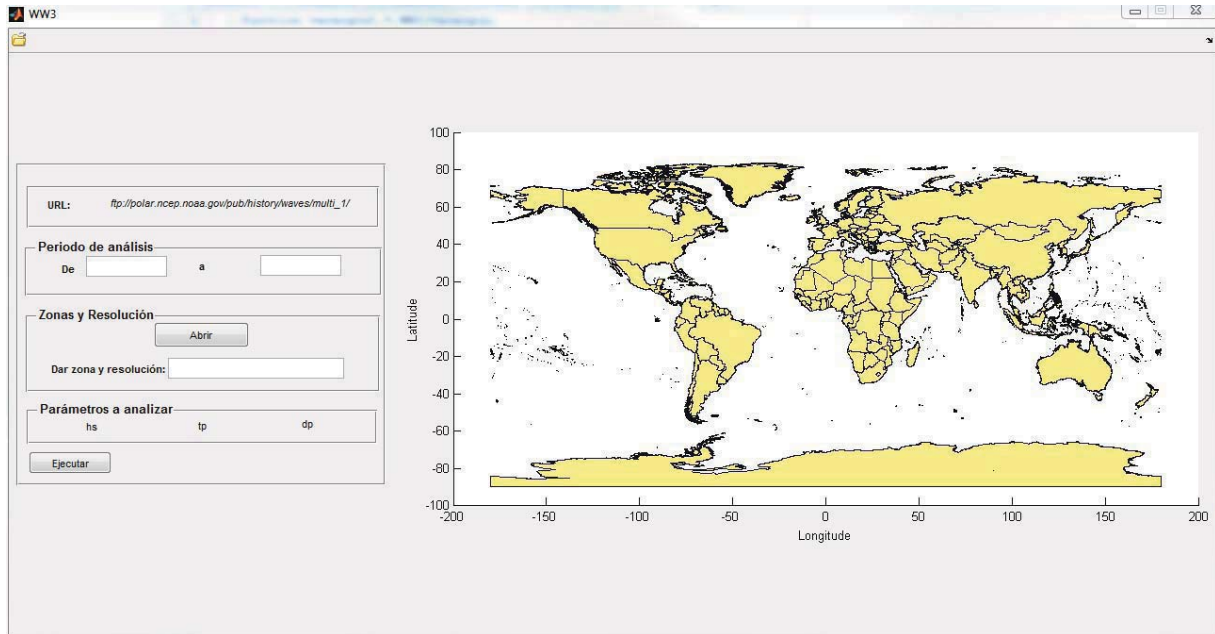


Figura 2. Ventana principal del programa.

El programa automáticamente abre el explorador de internet, con el siguiente link:

ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/ ; que corresponde al directorio donde se encuentra alojada la información de oleaje (Figura 3):

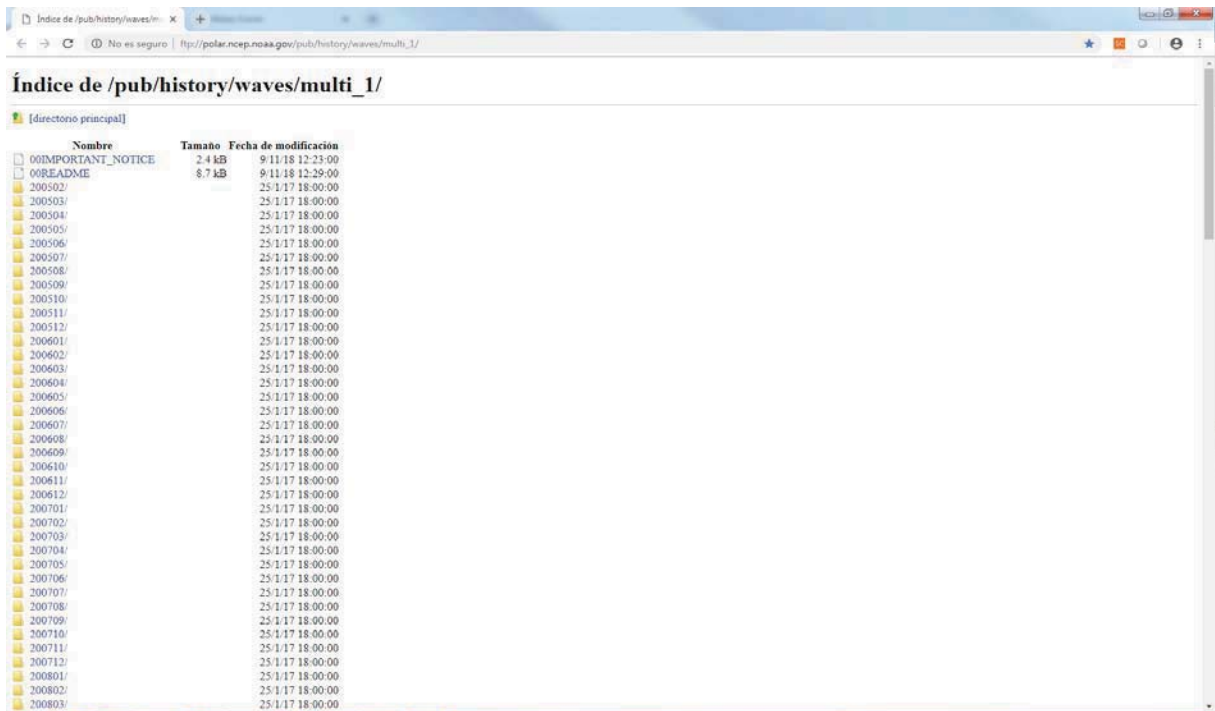


Figura 3. Página del servidor donde se aloja la información a descargar.

5) En el apartado de Periodo de análisis colocar los años de los que se quiere descargar la información (Figura 4):

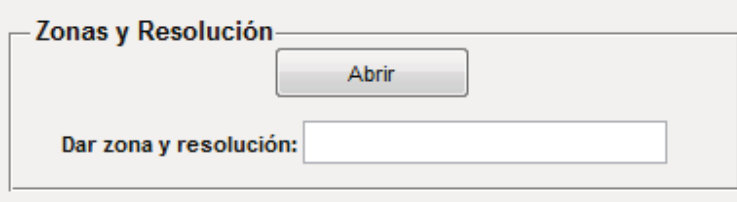


Periodo de análisis

De 2005 a 2018

Figura 4. Apartado de periodo de análisis.

6) En el apartado Zonas y Resolución, con el botón Abrir, se abre una nueva ventana (Figura 5):



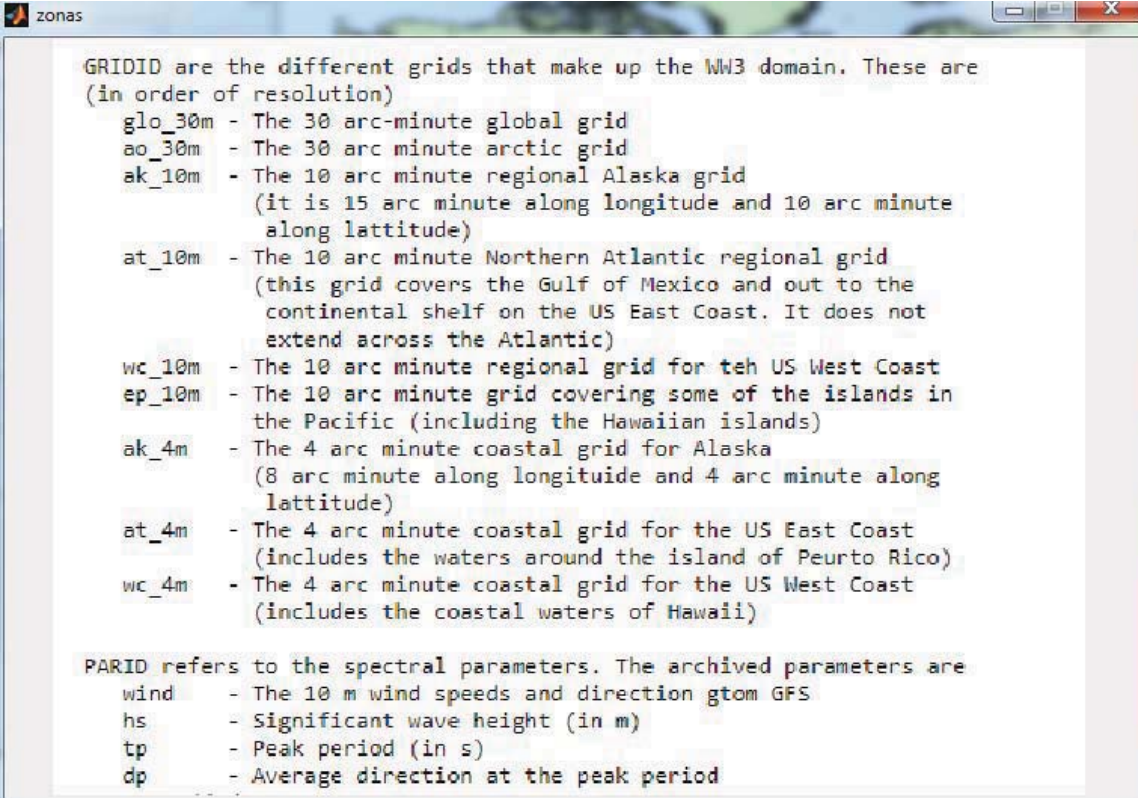
Zonas y Resolución

Abrir

Dar zona y resolución:

Figura 5. Apartado de zonas y resolución.

7) En esta ventana se presenta las zonas de las mallas de las que el WWIII tiene información (Figura 6).



```
GRIDID are the different grids that make up the WW3 domain. These are
(in order of resolution)
glo_30m - The 30 arc-minute global grid
ao_30m - The 30 arc minute arctic grid
ak_10m - The 10 arc minute regional Alaska grid
(it is 15 arc minute along longitude and 10 arc minute
along latitude)
at_10m - The 10 arc minute Northern Atlantic regional grid
(this grid covers the Gulf of Mexico and out to the
continental shelf on the US East Coast. It does not
extend across the Atlantic)
wc_10m - The 10 arc minute regional grid for teh US West Coast
ep_10m - The 10 arc minute grid covering some of the islands in
the Pacific (including the Hawaiian islands)
ak_4m - The 4 arc minute coastal grid for Alaska
(8 arc minute along longitude and 4 arc minute along
latitude)
at_4m - The 4 arc minute coastal grid for the US East Coast
(includes the waters around the island of Peurto Rico)
wc_4m - The 4 arc minute coastal grid for the US West Coast
(includes the coastal waters of Hawaii)

PARID refers to the spectral parameters. The archived parameters are
wind - The 10 m wind speeds and direction gtom GFS
hs - Significant wave height (in m)
tp - Peak period (in s)
dp - Average direction at the peak period
```

Figura 6. Ventana con zonas de las mallas y resolución con las que cuenta el modelo WWIII.

8) En el apartado Dar zona y resolución se debe colocar la malla de la que queremos bajar la información (Figura 7):

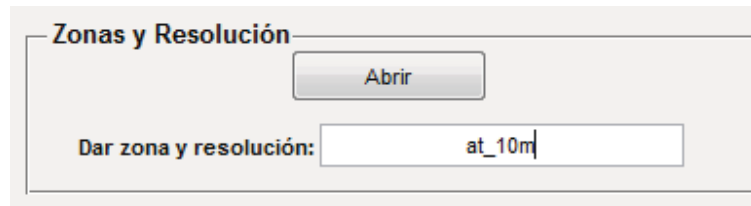


Figura 7. Ejemplo de colocación de la zona y resolución.

9) En el apartado Parámetros a analizar se presentan los 3 datos de los que se descargarán datos para la coordenada dada (Figura 8); donde hs es altura de ola, tp es periodo de ola y dp es dirección medio de ola:

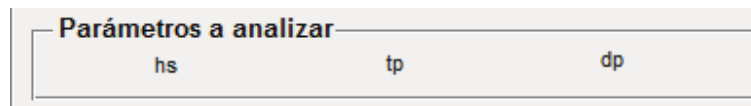


Figura 8. Parámetros que descarga el programa.

10) Con el botón ejecutar se inicia la ejecución del modelo (Figura 9):

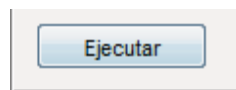


Figura 9. Botón de ejecutar.

11) En la dirección donde se encuentra el modelo se crea la carpeta Source y el archivo ficheros.bat (Figura 10). En caso de que estos archivos (debido a una corrida anterior) ya existieran en la dirección, se borrarán automáticamente para dar paso a los nuevos.

Source	11/20/2018 6:57 PM	Carpeta de archivos	
cyggcc_s-1.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	46 KB
cyggfortran-3.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	645 KB
cyggomp-1.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	27 KB
cygwin1.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	2,587 KB
ficheros.bat	11/20/2018 5:15 PM	Archivo por lotes ...	50 KB
NOTAS.txt	10/27/2018 3:23 PM	Documento de tex...	1 KB
wget.exe	10/17/2018 4:33 PM	Aplicación	4,285 KB
wgrib2.EXE	10/23/2014 6:55 PM	Aplicación	10,947 KB
world.dbf	12/10/2002 12:45 ...	Archivo DBF	38 KB
world.prj	5/29/2012 11:11 AM	Archivo PRJ	1 KB
world.shp	5/29/2012 11:11 AM	AutoCAD Shape S...	5,780 KB
world.shx	5/29/2012 11:11 AM	AutoCAD Compil...	3 KB
WW3.fig	10/29/2018 11:59 ...	MATLAB Figure	34 KB
WW3.m	10/29/2018 12:22 ...	MATLAB Code	25 KB
WWIII.PNG	3/6/2018 10:09 AM	Imagen PNG	32 KB
zonas.fig	3/22/2018 11:58 PM	MATLAB Figure	16 KB
zonas.m	3/22/2018 11:58 PM	MATLAB Code	3 KB

Figura 10. Creación de la carpeta Source y archivo ficheros.bat.

12) El archivo ficheros.bat contiene la direcciones que permitirán la descarga de archivos en formato *.grb2 (Figura 11).

```
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200502/grips/multi_1.at_10m.hs.200502.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200503/grips/multi_1.at_10m.hs.200503.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200504/grips/multi_1.at_10m.hs.200504.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200505/grips/multi_1.at_10m.hs.200505.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200506/grips/multi_1.at_10m.hs.200506.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200507/grips/multi_1.at_10m.hs.200507.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200508/grips/multi_1.at_10m.hs.200508.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200509/grips/multi_1.at_10m.hs.200509.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200510/grips/multi_1.at_10m.hs.200510.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200511/grips/multi_1.at_10m.hs.200511.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200512/grips/multi_1.at_10m.hs.200512.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200601/grips/multi_1.at_10m.hs.200601.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200602/grips/multi_1.at_10m.hs.200602.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200603/grips/multi_1.at_10m.hs.200603.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200604/grips/multi_1.at_10m.hs.200604.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200605/grips/multi_1.at_10m.hs.200605.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200606/grips/multi_1.at_10m.hs.200606.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200607/grips/multi_1.at_10m.hs.200607.grb2
wget ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/200608/grips/multi_1.at_10m.hs.200608.grb2
```

Figura 11. Información del archivo ficheros.bat.

Estos archivos *.grb2 se descargan en la carpeta Source (Figura 12).

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
multi_1.at_10m.dp.200502.grb2	11/20/2018 5:47 PM	Archivo GRB2	11,028 KB
multi_1.at_10m.dp.200503.grb2	11/20/2018 5:47 PM	Archivo GRB2	12,433 KB
multi_1.at_10m.dp.200504.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,706 KB
multi_1.at_10m.dp.200505.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,962 KB
multi_1.at_10m.dp.200506.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,103 KB
multi_1.at_10m.dp.200507.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,421 KB
multi_1.at_10m.dp.200508.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,363 KB
multi_1.at_10m.dp.200509.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,559 KB
multi_1.at_10m.dp.200510.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	12,255 KB
multi_1.at_10m.dp.200511.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,435 KB
multi_1.at_10m.dp.200512.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	12,141 KB
multi_1.at_10m.dp.200601.grb2	11/20/2018 5:48 PM	Archivo GRB2	11,807 KB
multi_1.at_10m.dp.200602.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	11,055 KB
multi_1.at_10m.dp.200603.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	12,293 KB
multi_1.at_10m.dp.200604.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	11,543 KB
multi_1.at_10m.dp.200605.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	11,872 KB
multi_1.at_10m.dp.200606.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	10,915 KB
multi_1.at_10m.dp.200607.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	11,009 KB
multi_1.at_10m.dp.200608.grb2	11/20/2018 5:49 PM	Archivo GRB2	11,512 KB

Figura 12. Archivos formato *.grb2 descargados.

13) Posteriormente el programa va a descomprimir uno de los archivos *.grb2 y extrae archivos en formato *.asc (Figura 13).

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
DIRPW.surface.2005020100_2005020106.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,372 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020109.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,334 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020112.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,322 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020115.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,314 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020118.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,310 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020121.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020200.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,309 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020203.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020206.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020209.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020212.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020215.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,308 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020218.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,307 KB

Figura 13. Archivos formato *.asc descargados.

- 14) Estos archivos contienen las coordenadas de los puntos de la malla del modelo WWIII, posteriormente se abre una ventana que pide las coordenadas en grados decimales.
- 15) En la pantalla principal del programa, en el apartado donde se encuentra el mapamundi, se proyecta la malla de la zona donde se descargará información y en un recuadro rojo el punto a descargar; en la esquina inferior izquierda se muestra la coordenada del punto que se descarga (Figura 14).

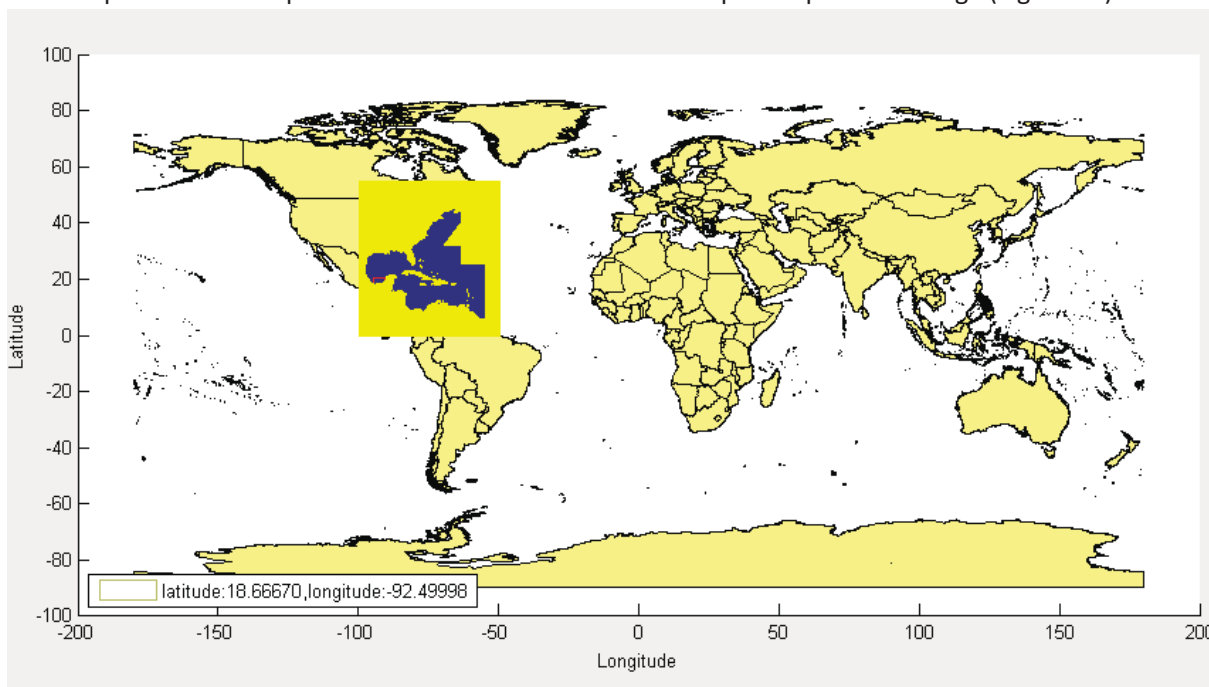


Figura 14. Imagen con malla proyectada, punto de descarga y coordenadas del punto a descargar.

- 16) El programa crea el archivo descarga.cmd, que va a permitir extraer la información del punto más cercano a la coordenada dada (Figura 15).

A screenshot of a file explorer window. The 'Source' bar is visible at the top. Below it are menu options: 'Incluir en biblioteca', 'Compartir con', 'Grabar', and 'Nueva carpeta'. The main area shows a list of files with columns for 'Nombre', 'Fecha de modifica...', 'Tipo', and 'Tamaño'. The file 'descarga.cmd' is highlighted with a red border.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
cyggfortran-3.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	645 KB
cyggomp-1.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	27 KB
cygwin1.dll	10/23/2014 11:02 ...	Archivo DLL	2,587 KB
descarga.cmd	11/20/2018 6:18 PM	Script de comand...	39 KB
DIRPW.surface.2005020100.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,822 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020103.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,525 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020106.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,372 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020109.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,334 KB
DIRPW.surface.2005020100_2005020112.asc	11/20/2018 6:06 PM	Archivo ASC	2,322 KB

Figura 15. Archivo descarga.cmd creado.

17) Se van creando archivos en formato *.csv para cada una de las variables analizadas (hs, tp, dp) por mes (Figura 16).

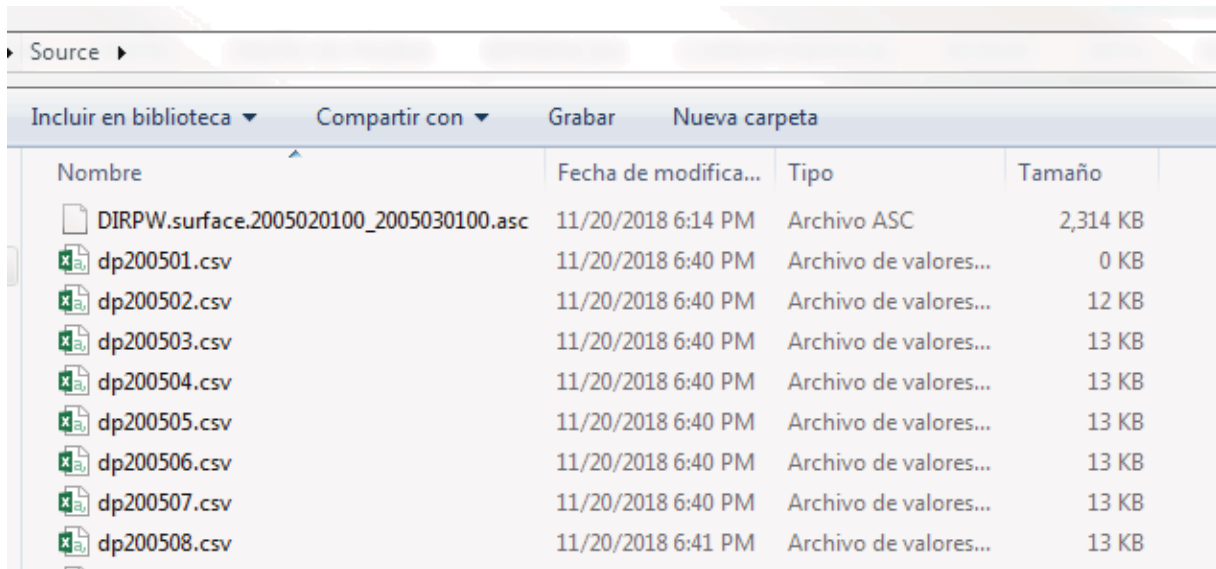


Figura 16. Archivos *.csv creados.

18) Se crea la carpeta Analysis (Figura 17), donde el programa crea una copia de los archivos *.csv (Figura 18).

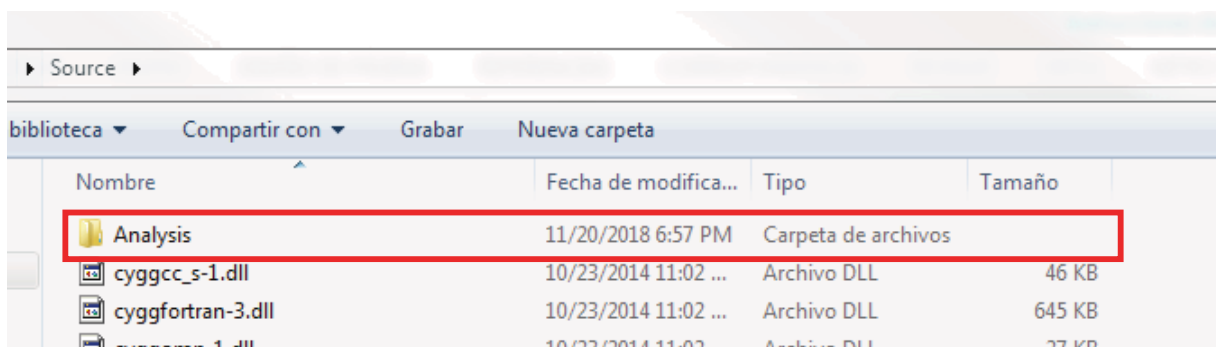


Figura 17. Carpeta Analysis creada.

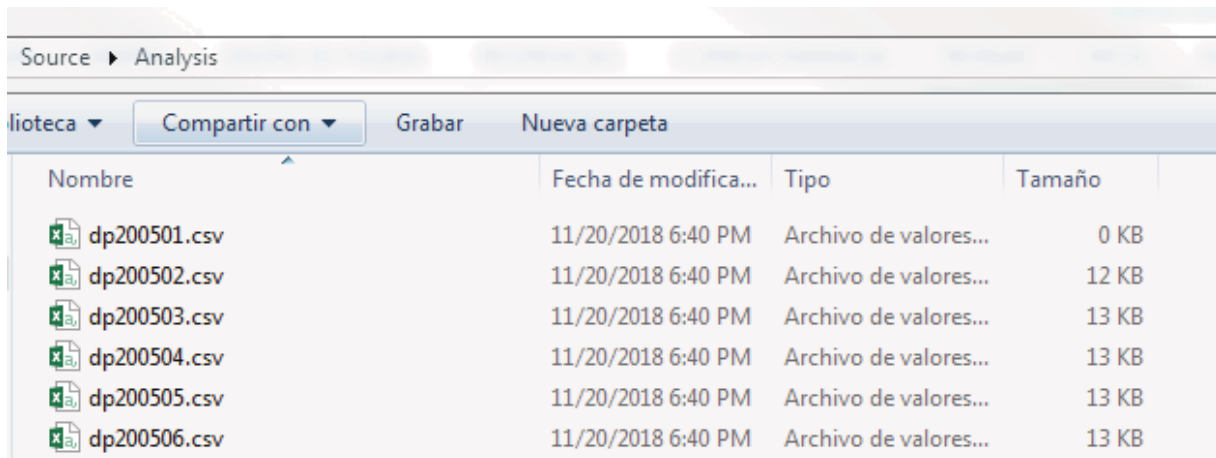


Figura 18. Archivos *.csv copiados a la carpeta Analysis.

19) En el directorio donde se encuentra el programa se crea la carpeta Results (Figura 19).

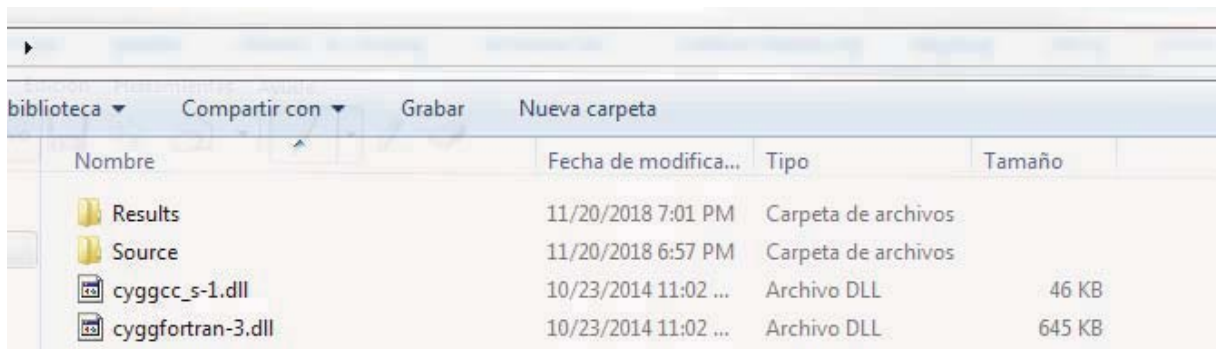


Figura 19. Creación de la carpeta Results.

20) En esta carpeta se crea un archivo en formato *.txt que tiene por título “Clima de ola_latitud_longitud.txt”. Donde en latitud y longitud se colocan los valores correspondientes del punto descargado (Figura 20).

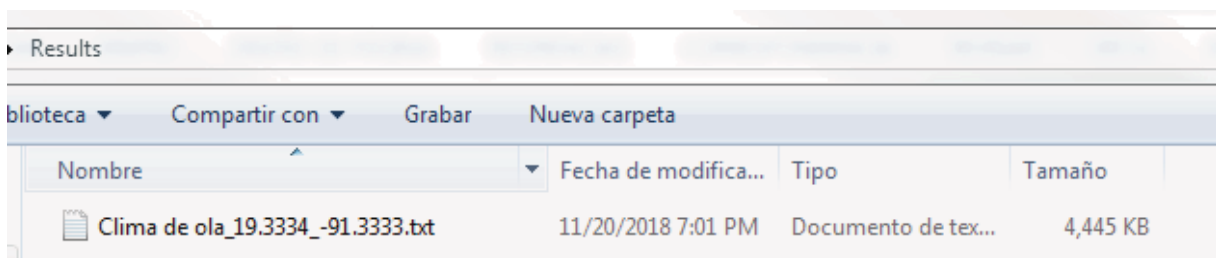


Figura 20. Creación del archivo de resultados con datos de la serie de oleaje para el periodo descargado.

21) El archivo resultante tiene 7 columnas: año, mes, día, hora, dirección, altura, periodo (Figura 21).

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD COSTERA: UN ENFOQUE A GRAN ESCALA”

Clima de ola_19.3334_-91.3333.txt: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	0.0000000e+00	9.9990000e+20	0.0000000e+00	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	3.0000000e+00	9.9990000e+20	4.0000000e-02	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	6.0000000e+00	9.9990000e+20	1.1000000e-01	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	9.0000000e+00	1.2891000e+02	6.1000000e-01	2.9400000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2000000e+01	1.2836000e+02	6.5000000e-01	3.2200000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	1.5000000e+01	1.1824000e+02	6.6000000e-01	3.2700000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	1.8000000e+01	1.1388000e+02	3.9000000e-01	3.1500000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	1.0000000e+00	2.1000000e+01	1.1016000e+02	1.6000000e-01	2.6900000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	0.0000000e+00	9.9990000e+20	7.0000000e-02	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	3.0000000e+00	9.9990000e+20	2.0000000e-01	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	6.0000000e+00	3.4099000e+02	3.1000000e-01	3.0600000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	9.0000000e+00	3.4434000e+02	1.8000000e-01	3.1400000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	1.2000000e+01	1.1590000e+01	1.0000000e-01	3.1000000e+00		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	1.5000000e+01	9.9990000e+20	2.9000000e-01	9.9990000e+20		
2.0050000e+03	2.0000000e+00	2.0000000e+00	1.8000000e+01	1.5571000e+02	3.7000000e-01	3.1000000e+00		

Figura 21. Información contenida en el archivo *.txt de resultados.

FUNCIONAMIENTO DDW3

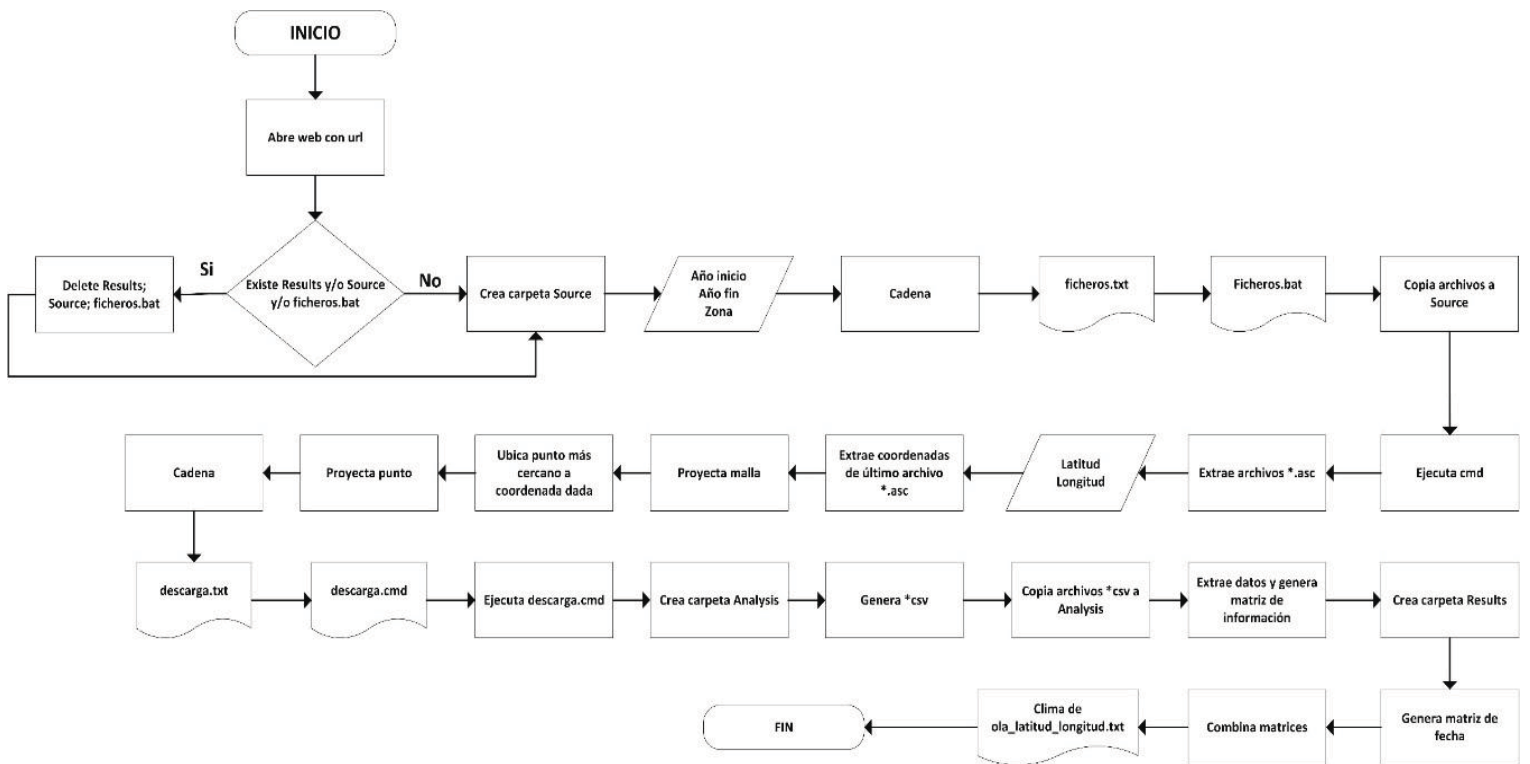


Figura 22. Diagrama de flujo de programa DDW3.

ANEXO VI. ENCUESTA AHP

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD COSTERA

1. Para evaluar la vulnerabilidad costera se necesita considerar variables físicas y socioeconómicas; que permitan generar información para la toma de decisiones con un enfoque de desarrollo sustentable y de reducción del riesgo. La siguiente lista presenta variables que se emplean en la evaluación de la vulnerabilidad. Ordénelas de mayor a menor importancia según considere; donde la PRIMERA es la variable más relevante en vulnerabilidad costera y la ÚLTIMA es la variable menos relevante.

Deberá arrastrar la variable al lugar que corresponda (*)

◆ Geomorfología

◆ Pendiente Costera

◆ Cambio de línea de costa

◆ Altura de ola significativa

◆ Material de vivienda

◆ Tipo de infraestructura

◆ Densidad de población

◆ Distancia de la población a la costa

◆ Cota de elevación

◆ Manglar

◆ Vegetación (diferente a manglar)

◆ Duna

◆ Arrecife de coral

◆ Altura de duna

◆ Protección artificial

2 ¿Cuál es su línea de investigación actual?

ANEXO VII. SIMULACIÓN NUMÉRICA (DELFT3D)

MODELO HIDRODINÁMICO

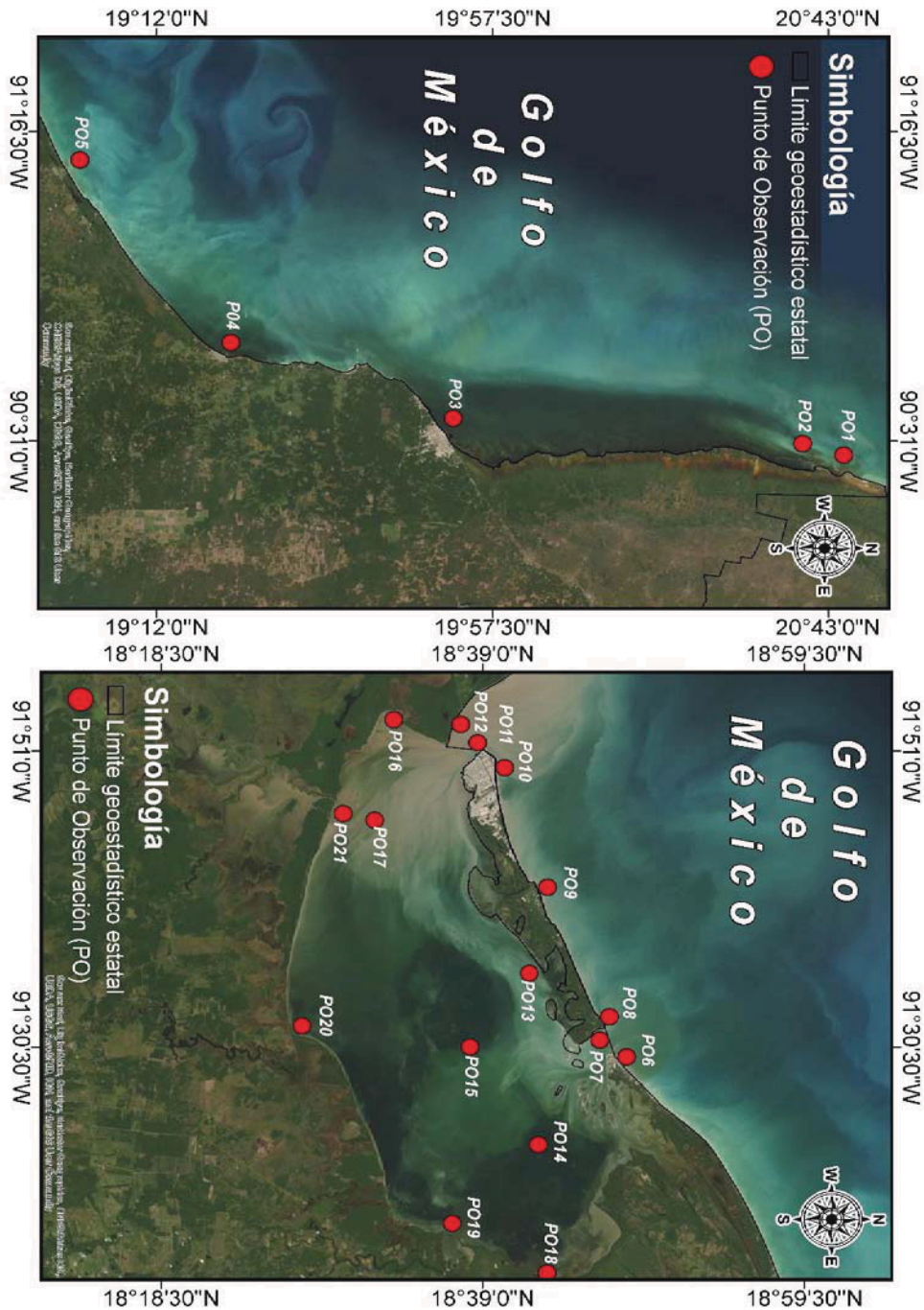
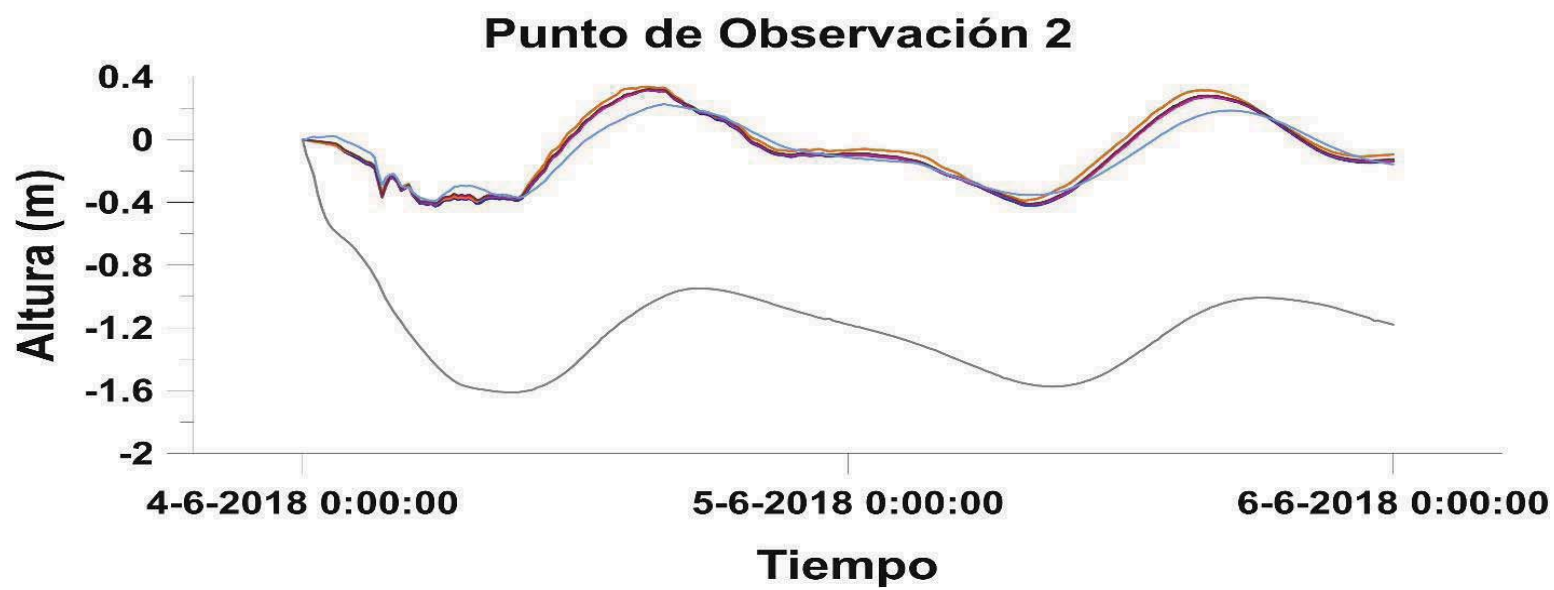
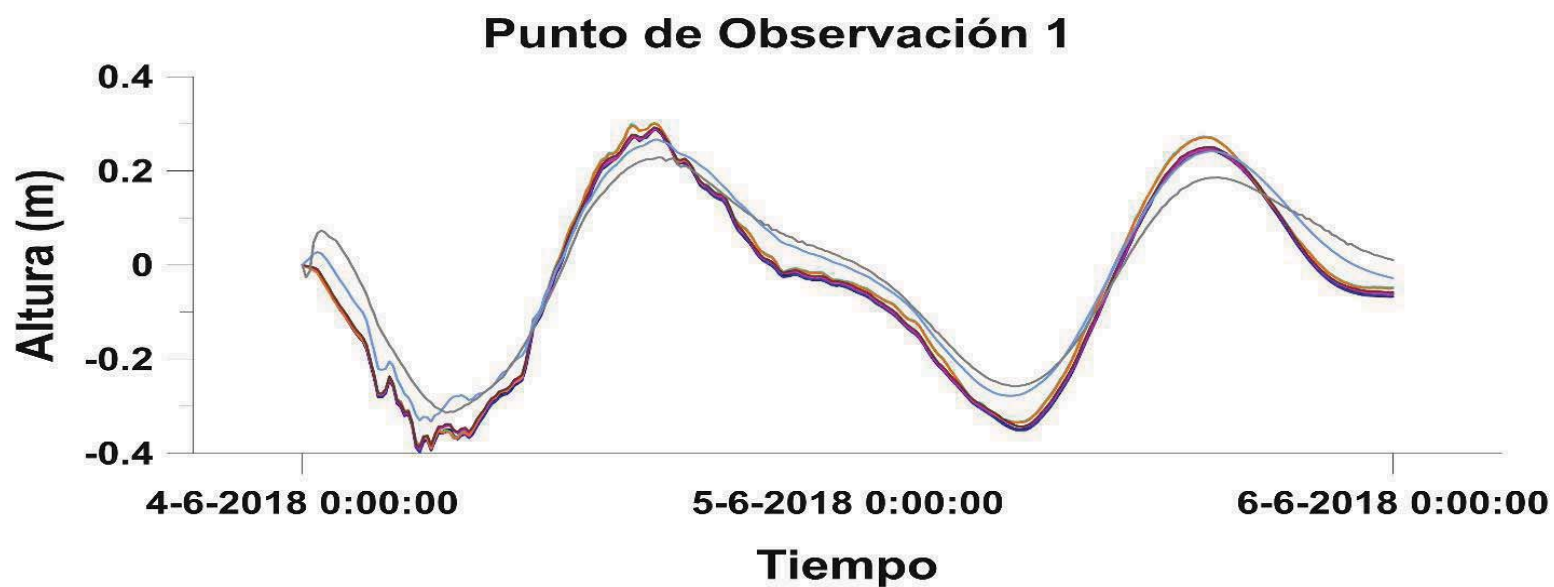
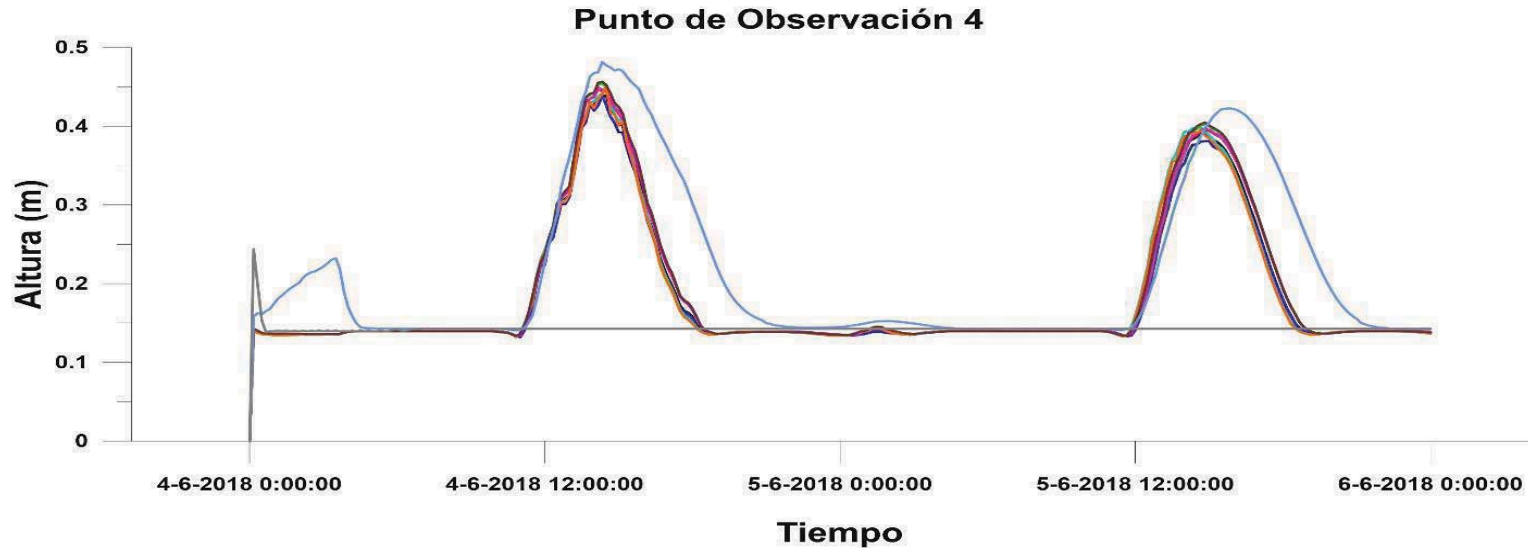
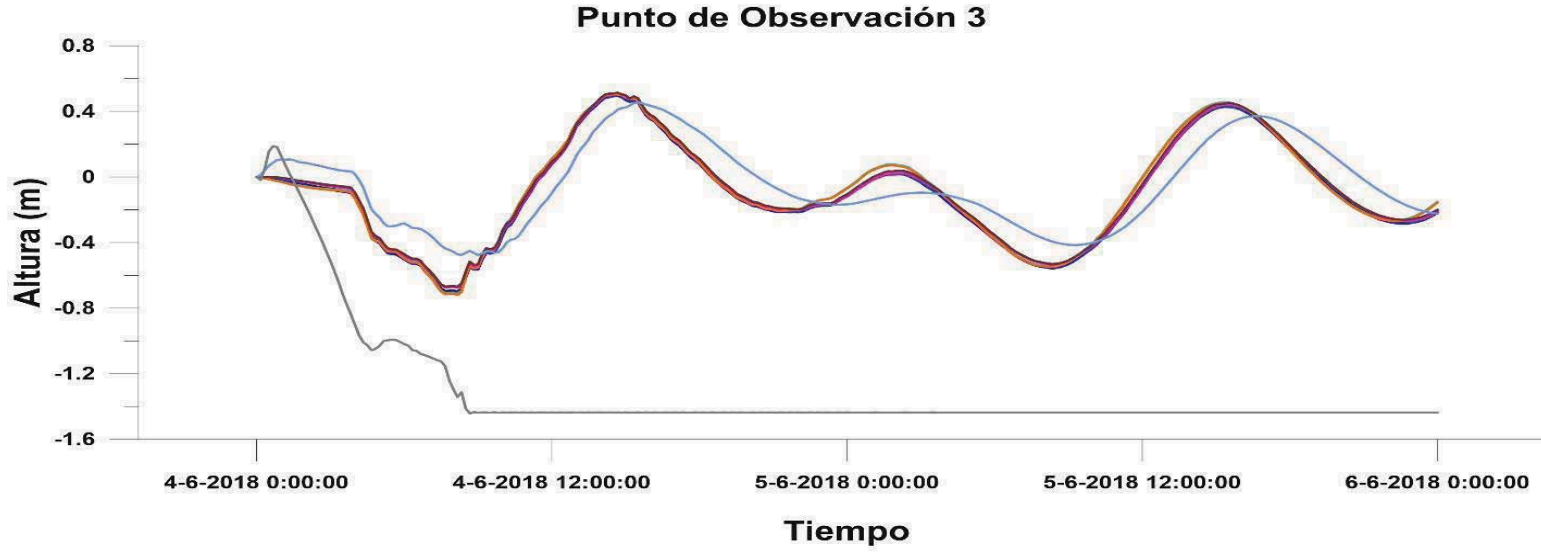
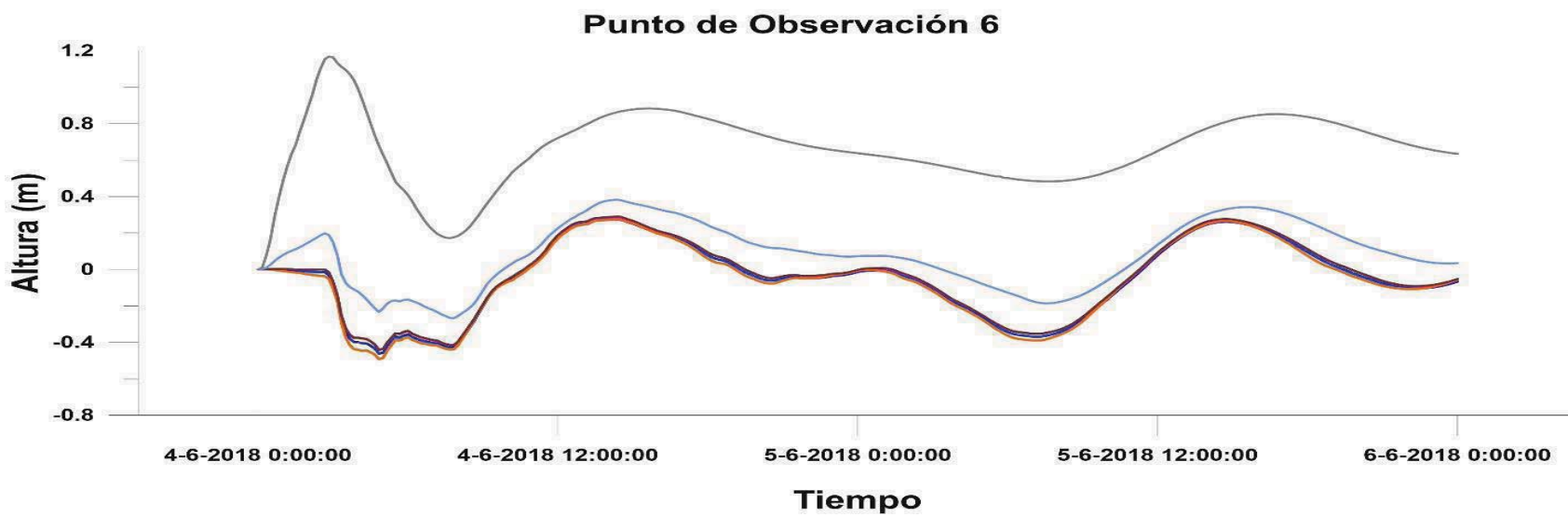
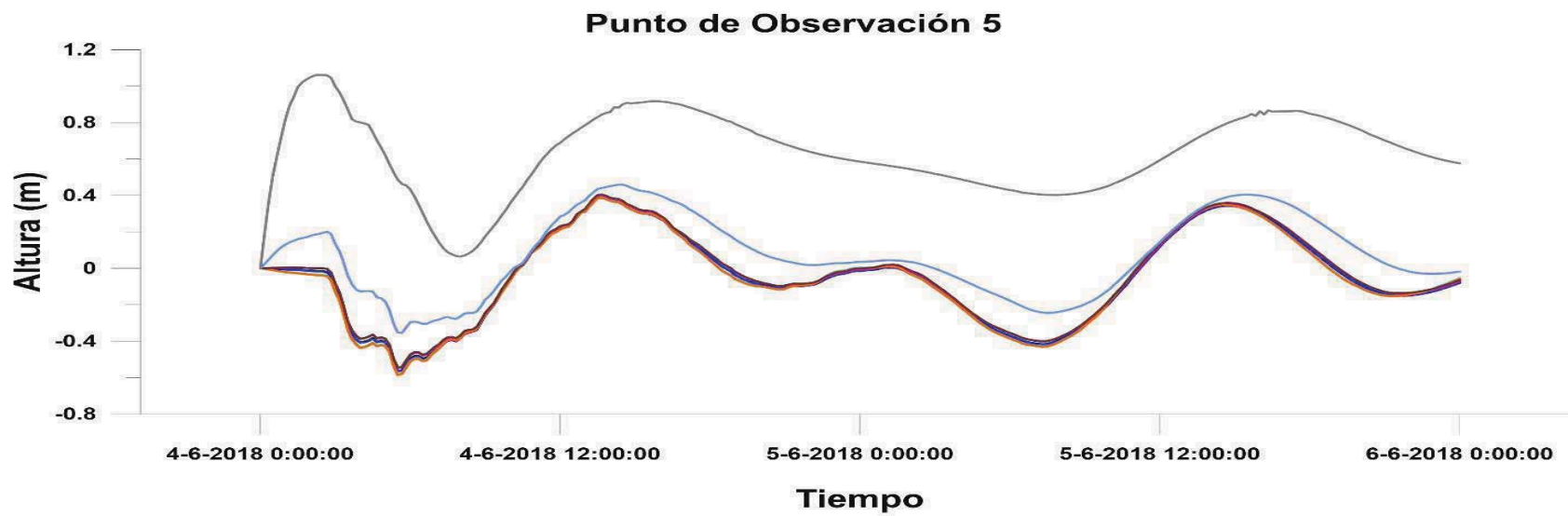


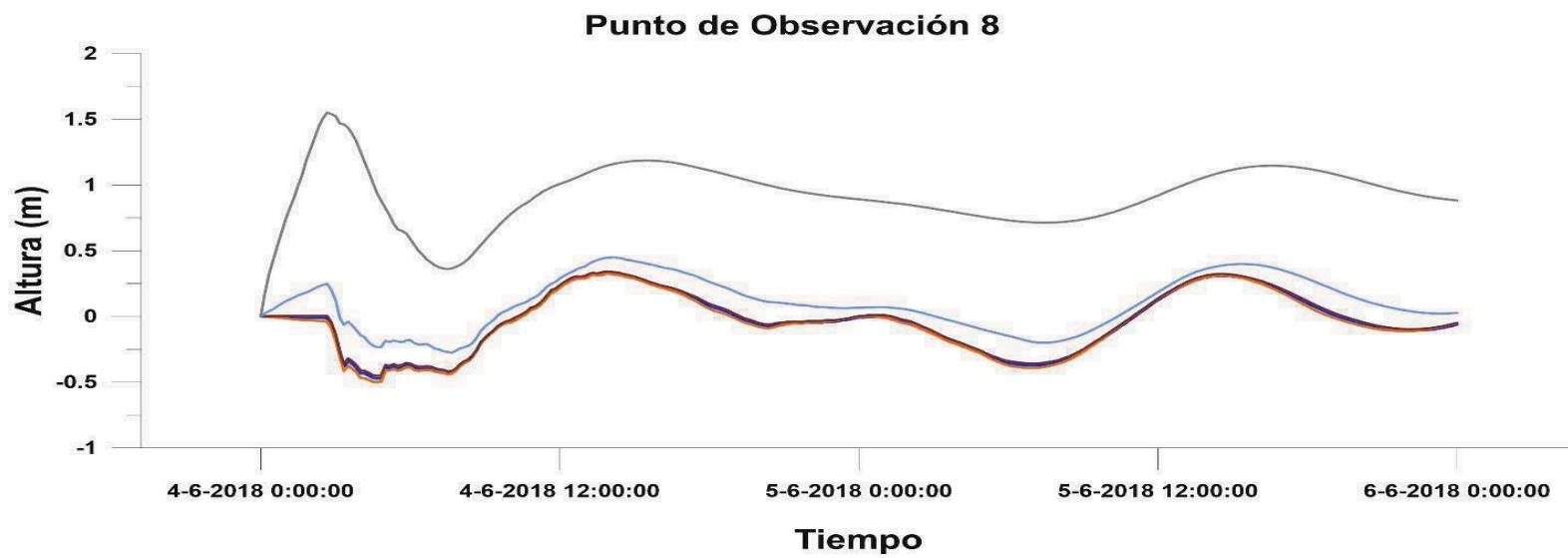
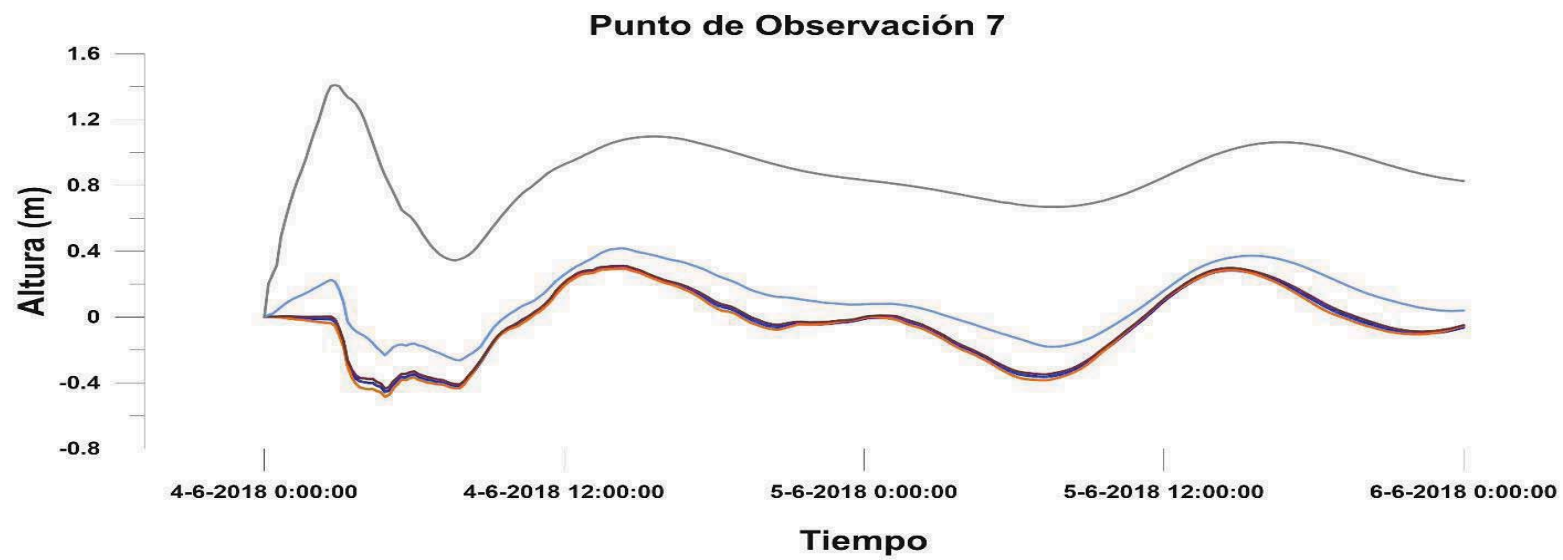
Figura 1. Puntos de observación del modelo hidrodinámico.

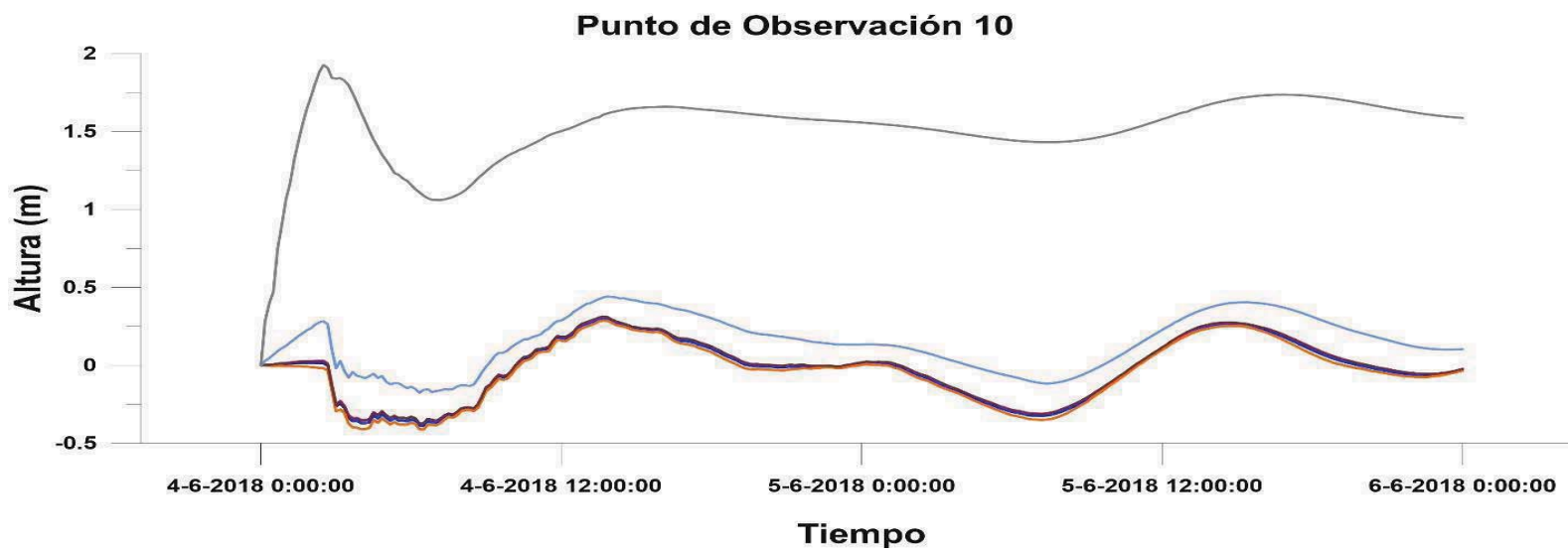
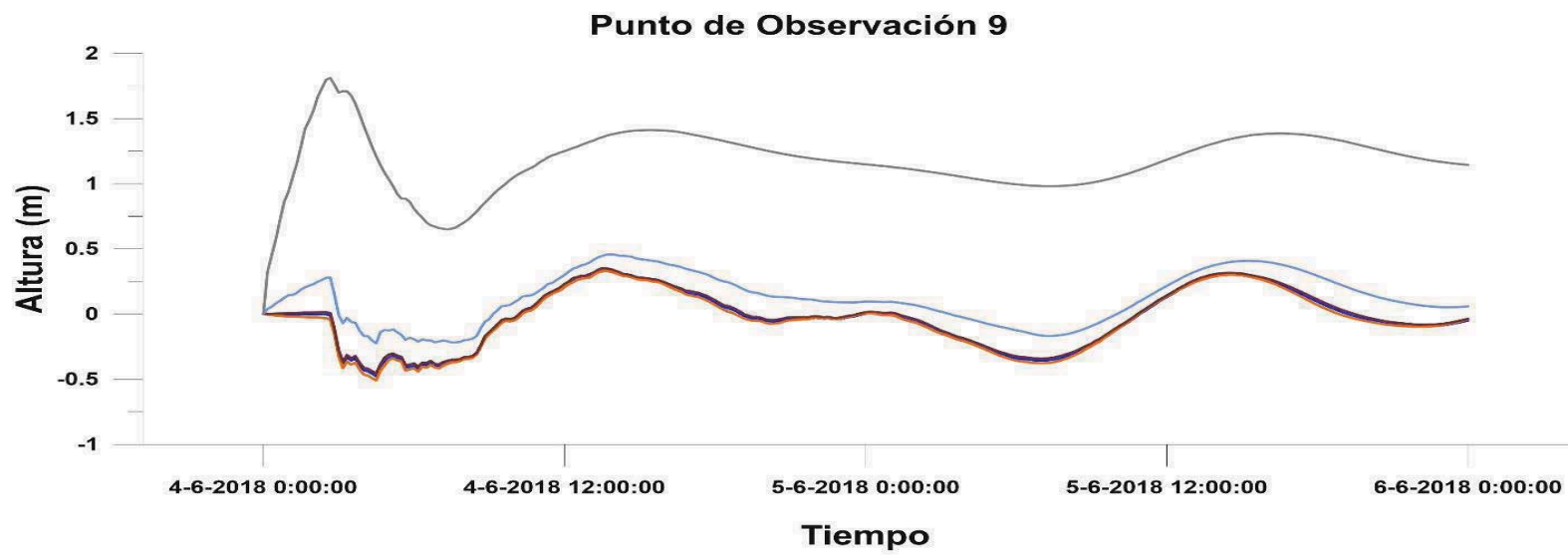
A continuación, para cada punto de observación se presentan los niveles de elevación para los diferentes escenarios simulados:

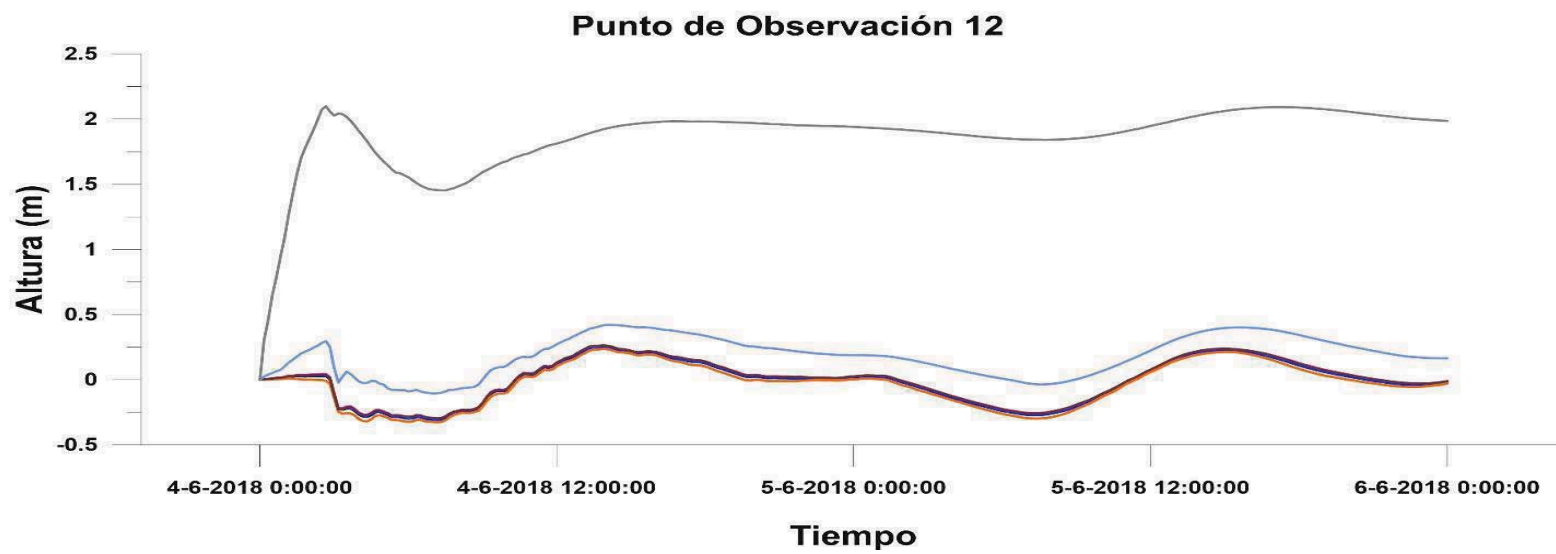
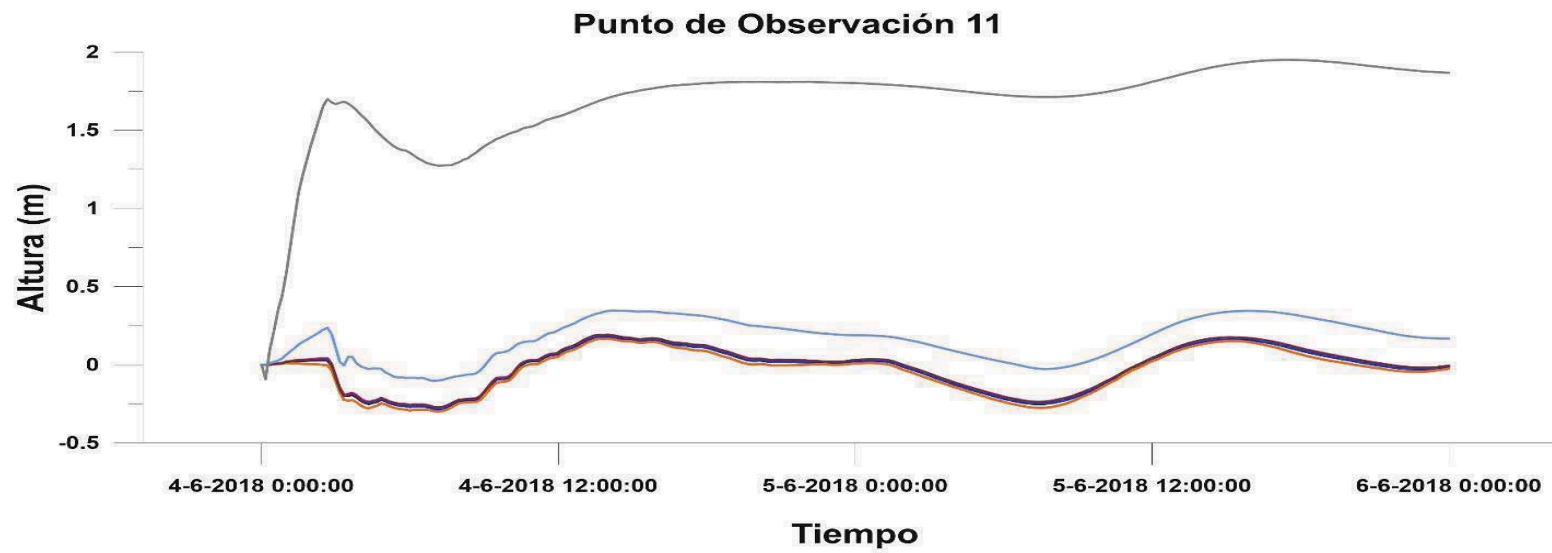


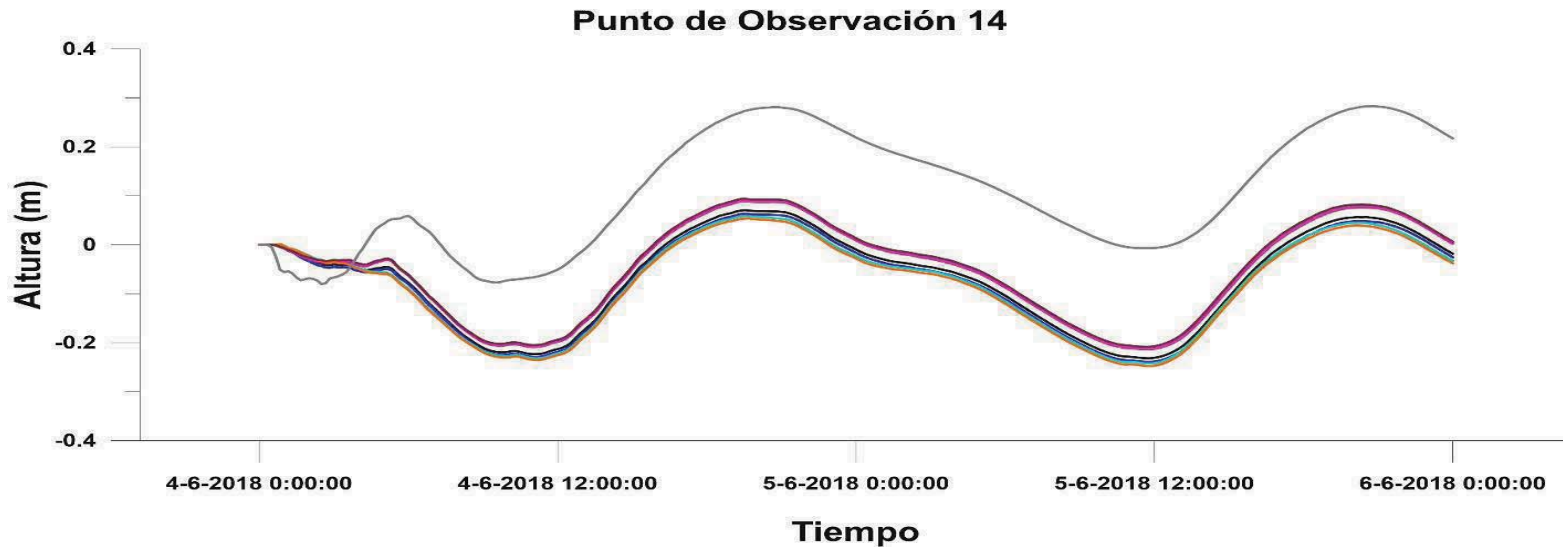
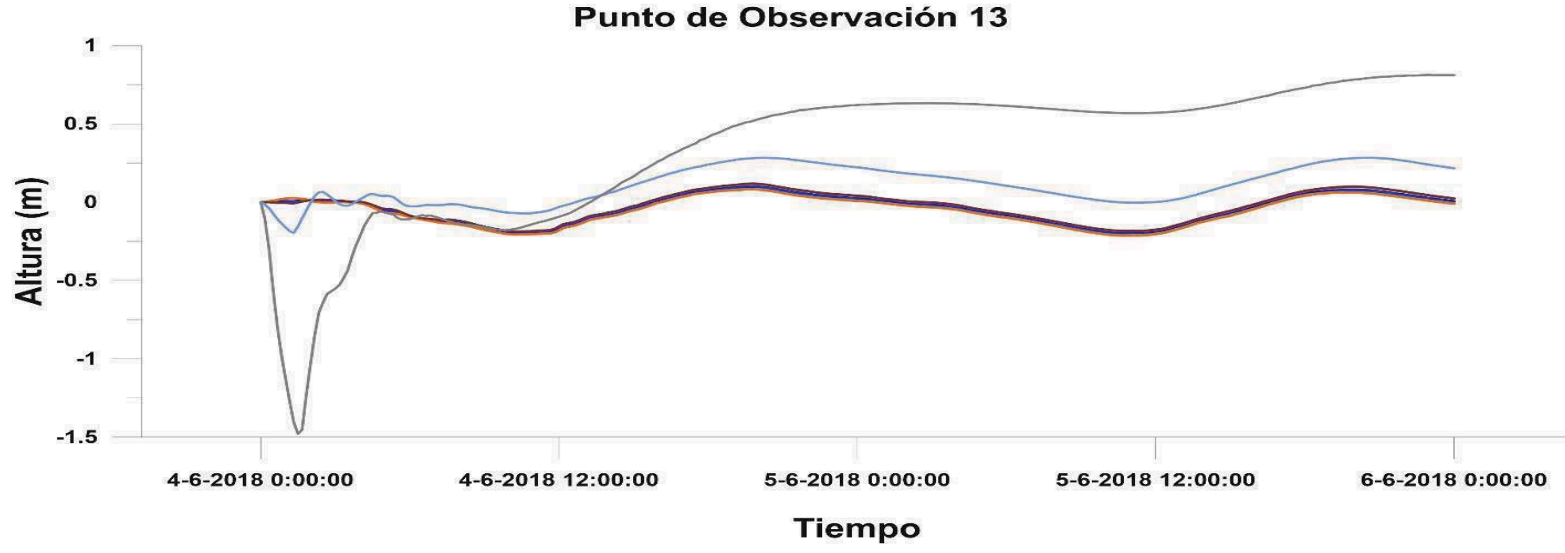


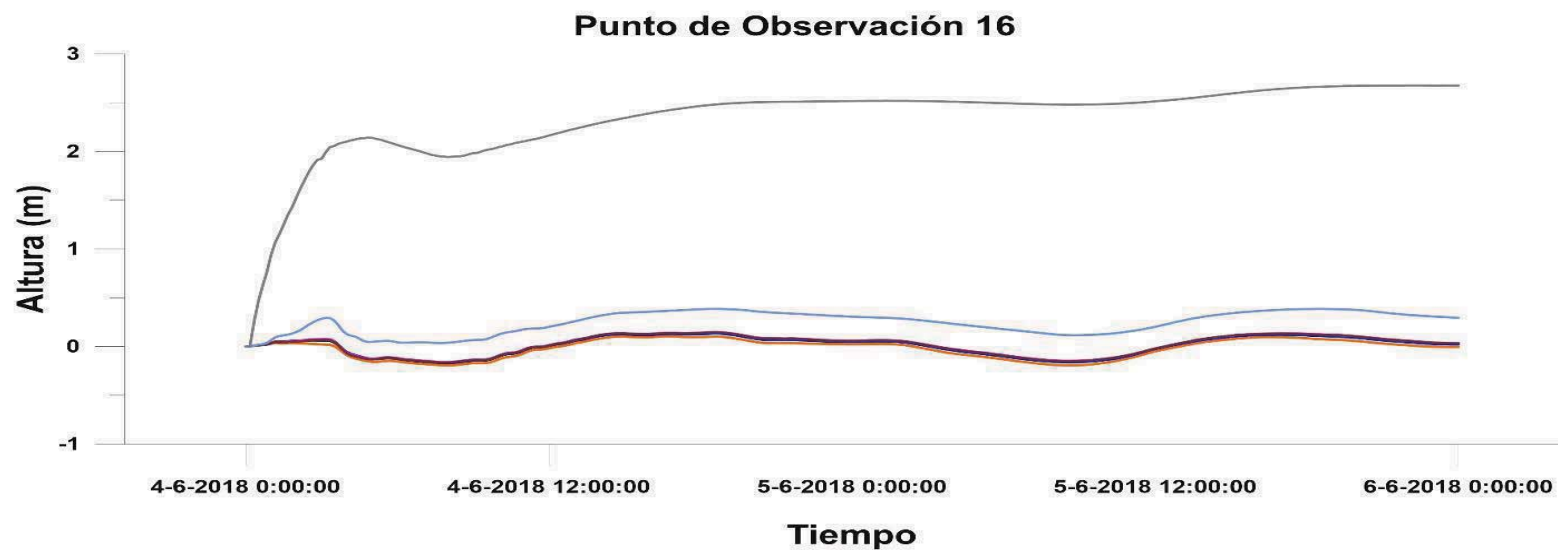
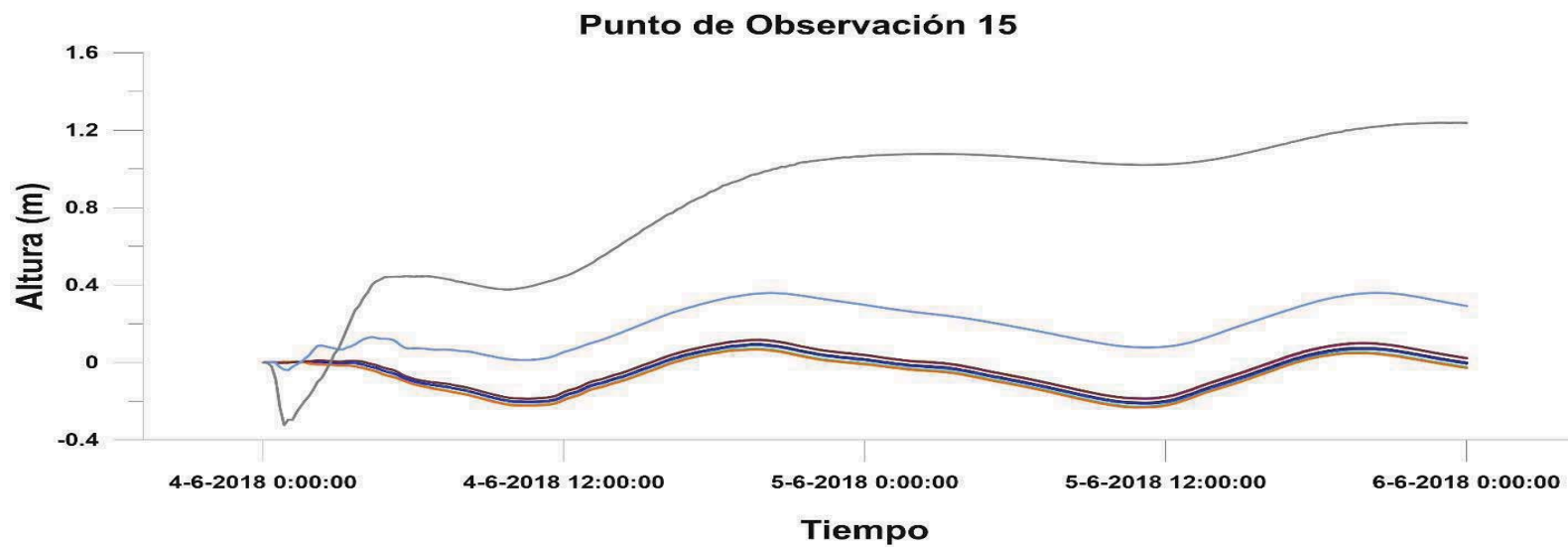


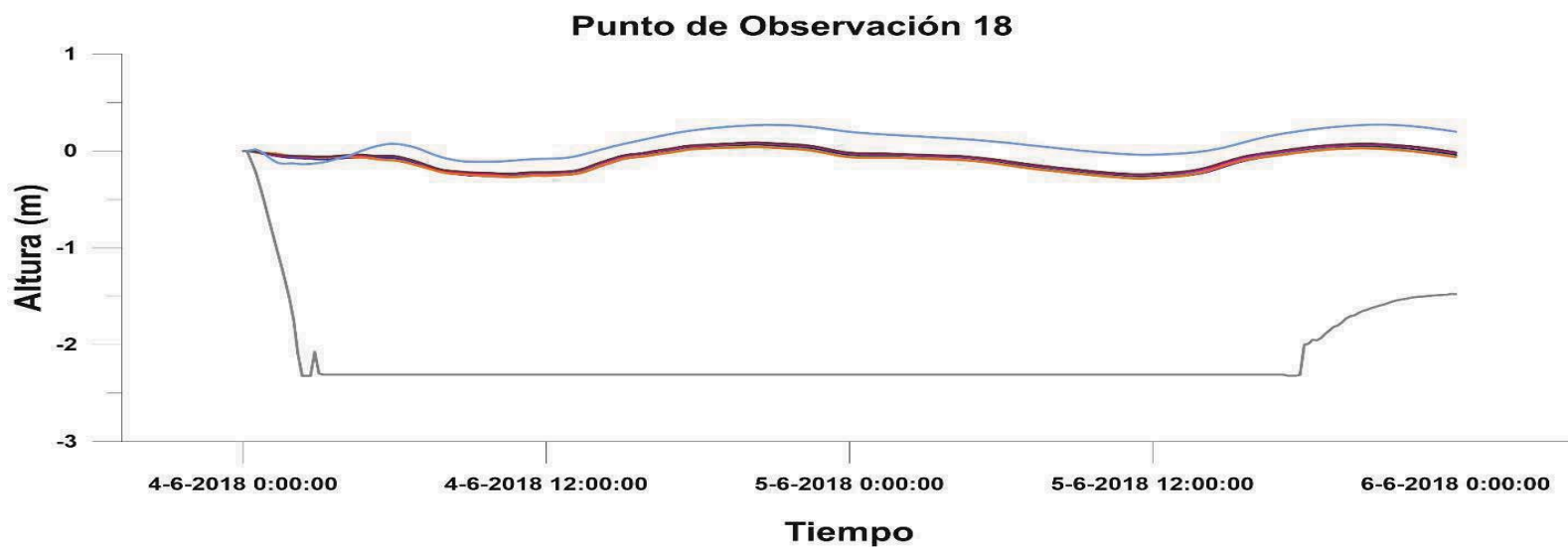
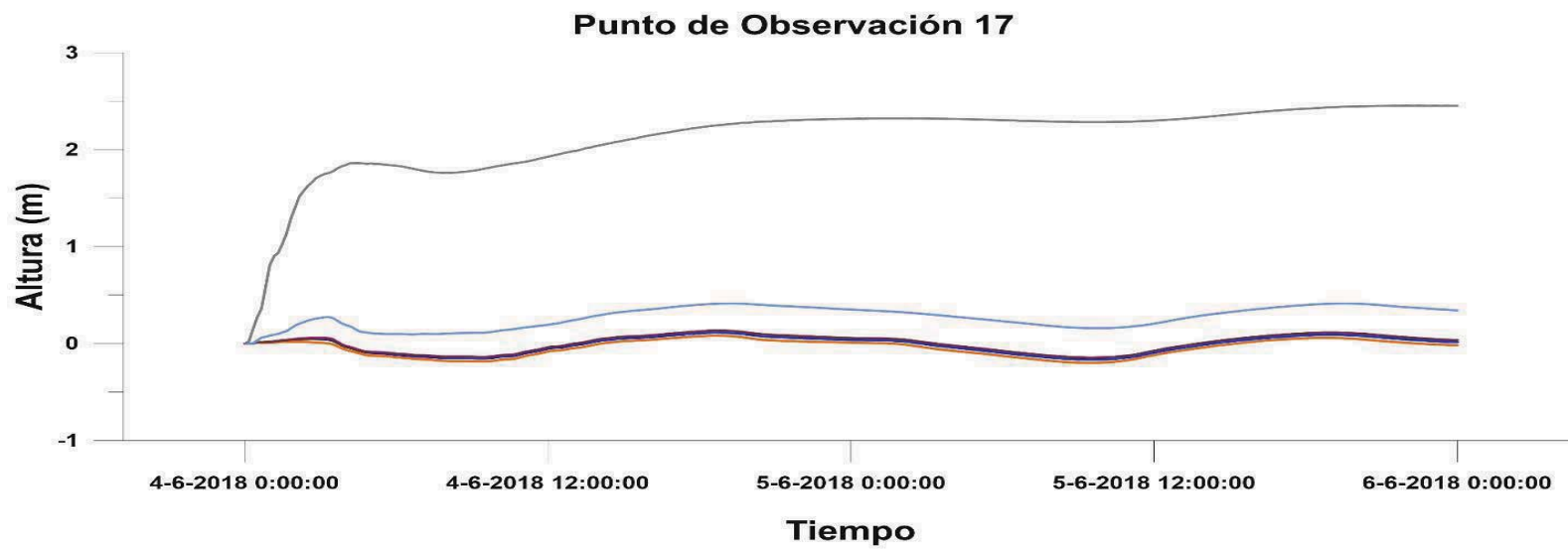


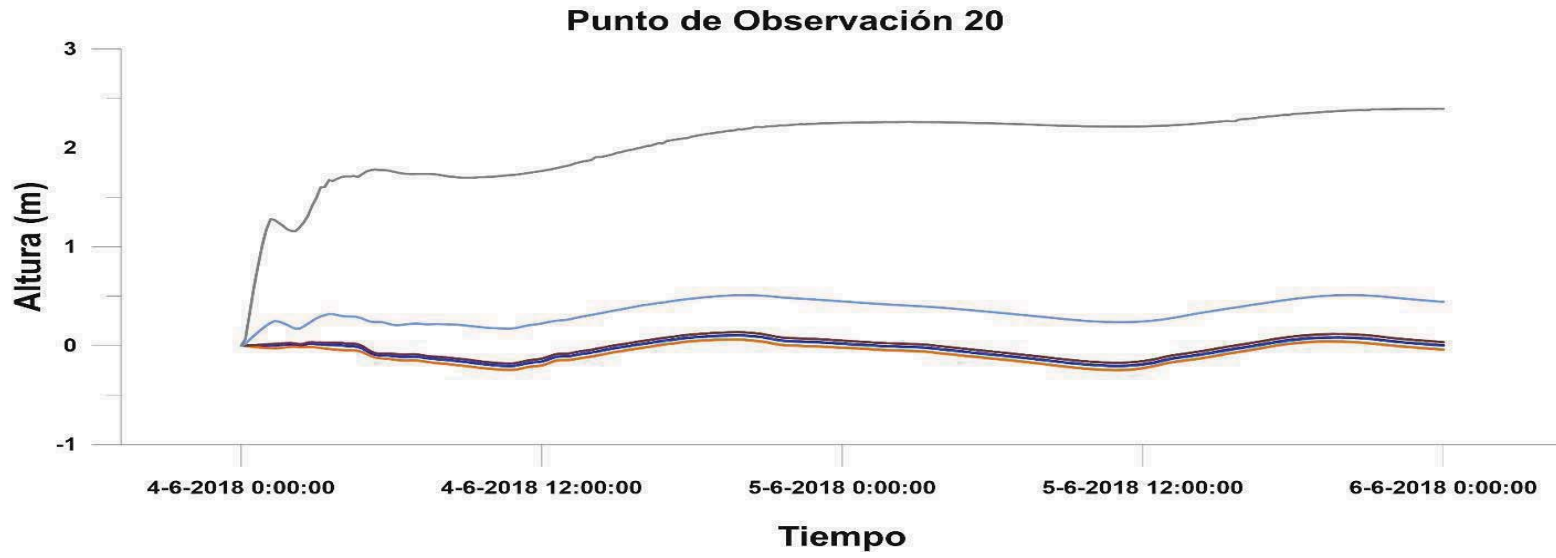
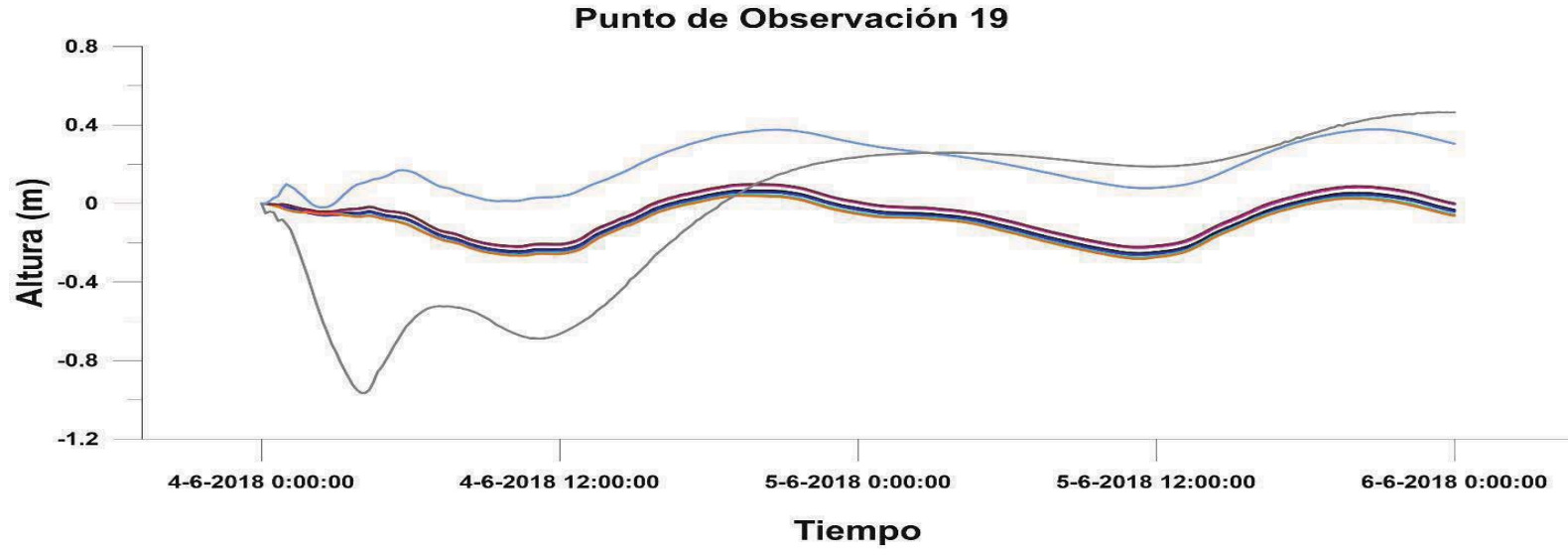


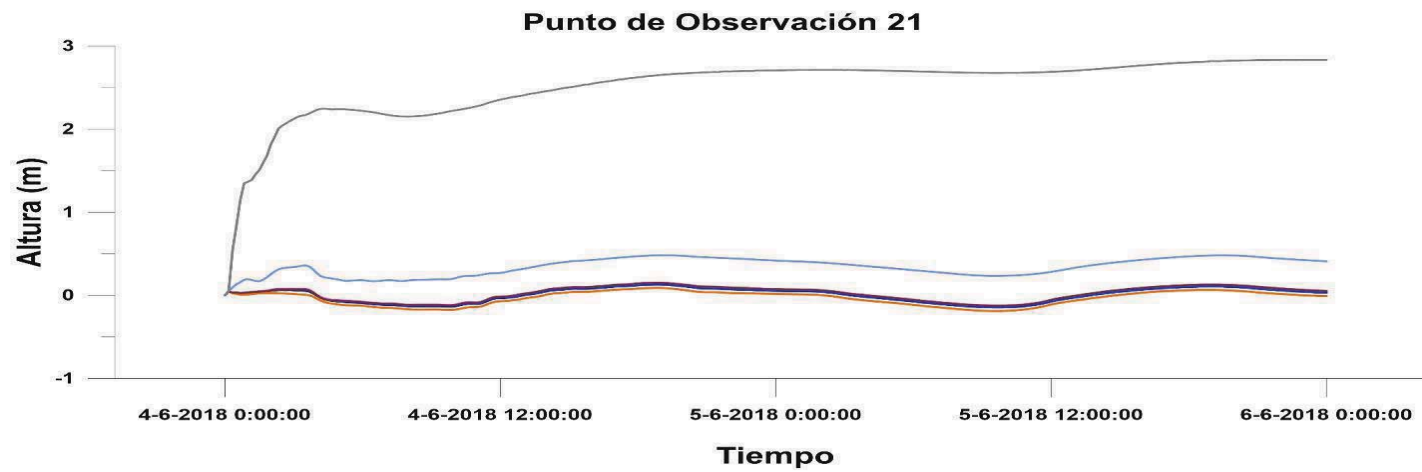












Water Level

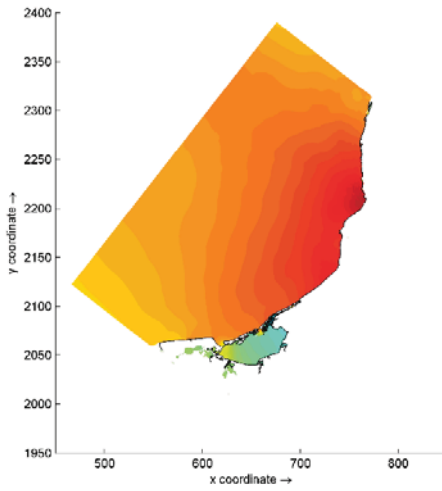


Figura 2. Water Level máximo para el escenario Anual.

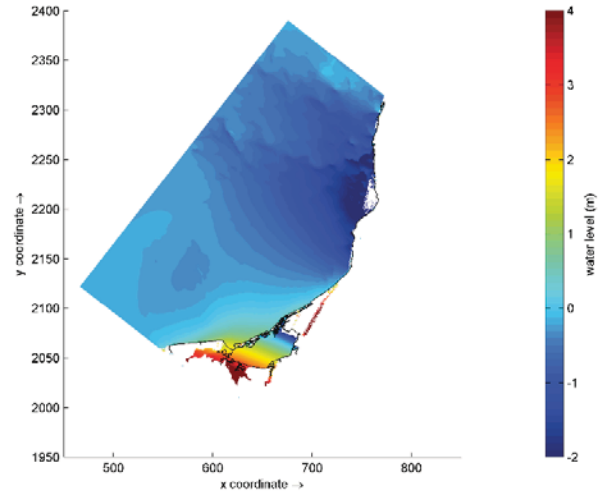


Figura 3. Water Level para el escenario Huracán.

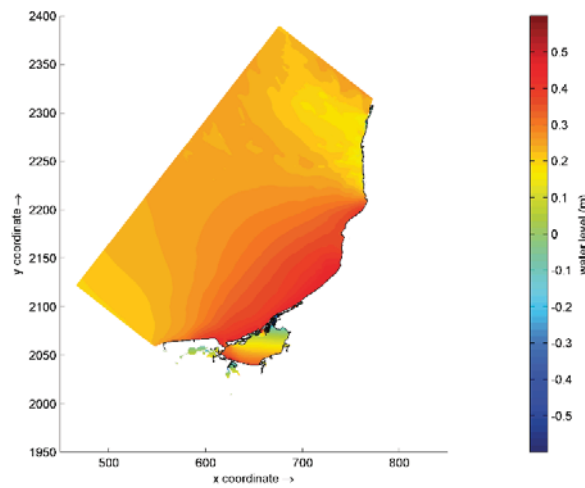


Figura 4. Water Level para el escenario Tormenta.

MODELO ACOPLADO

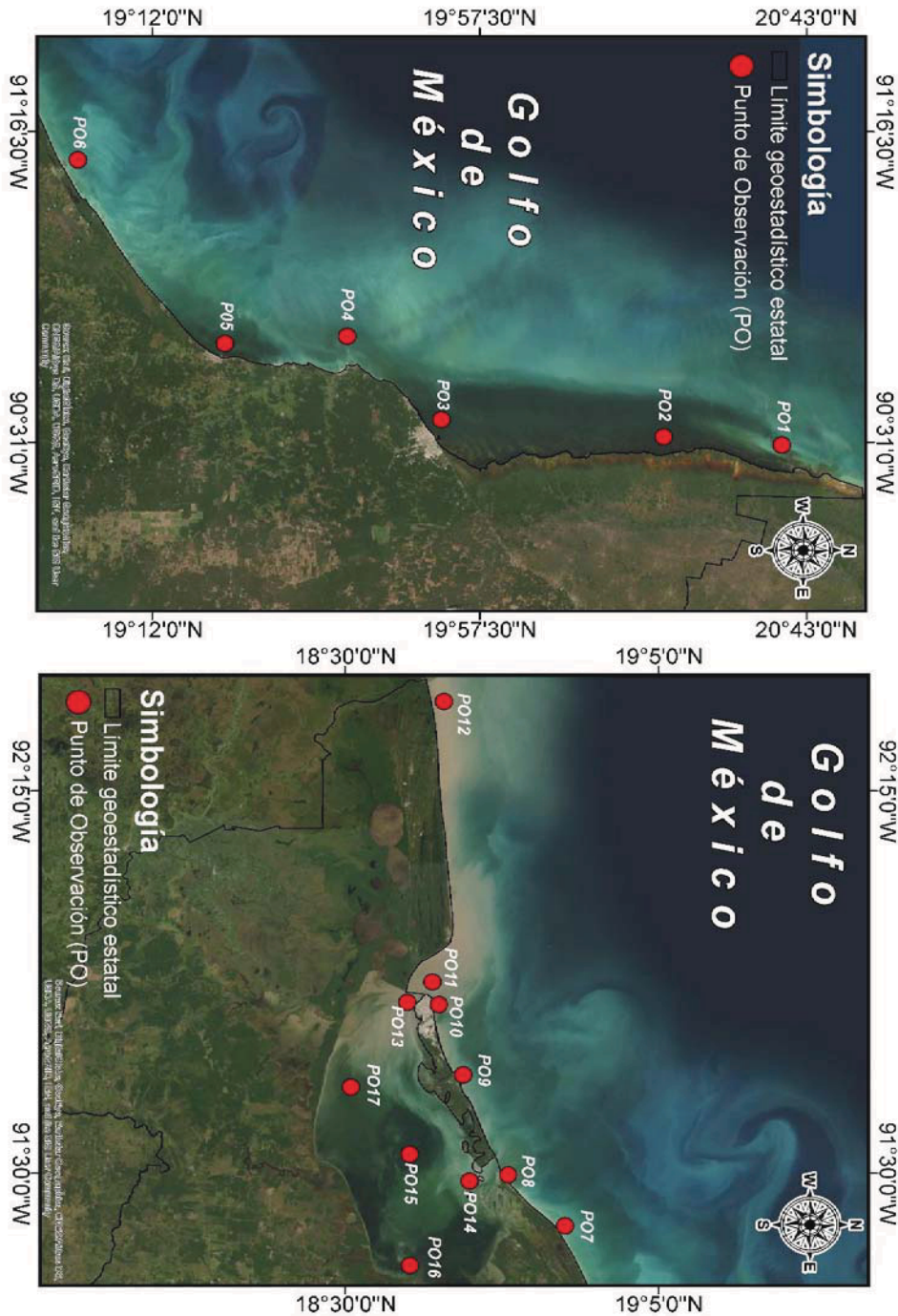
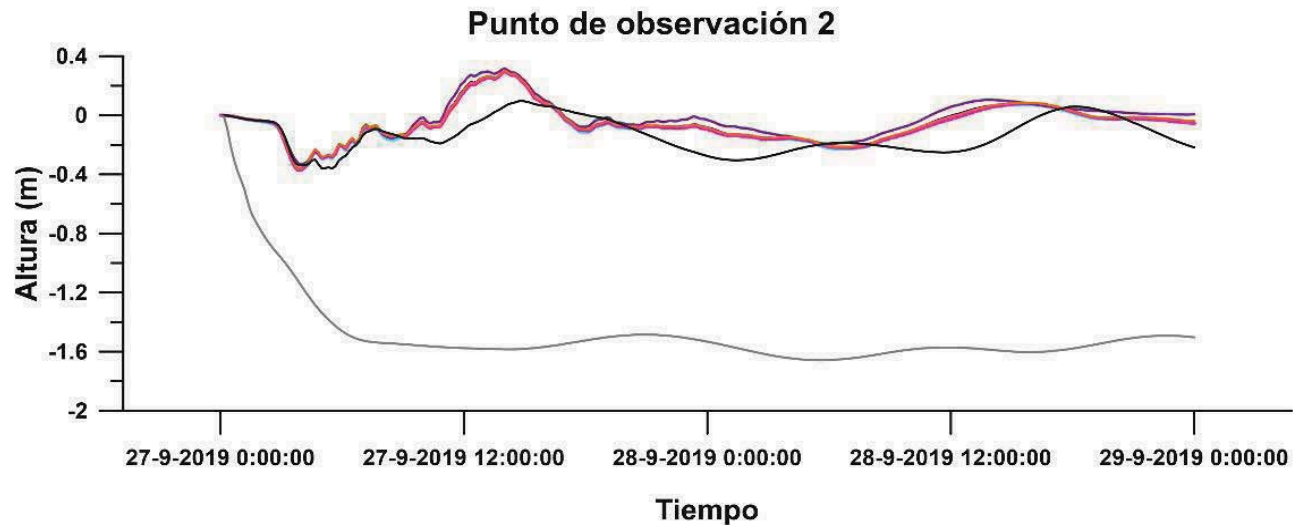
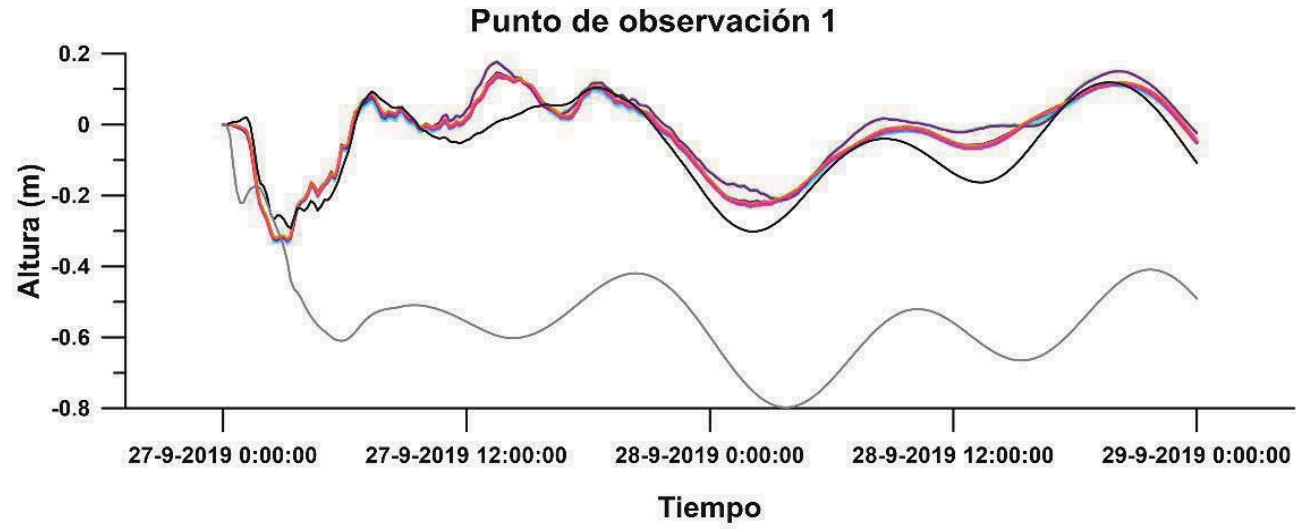
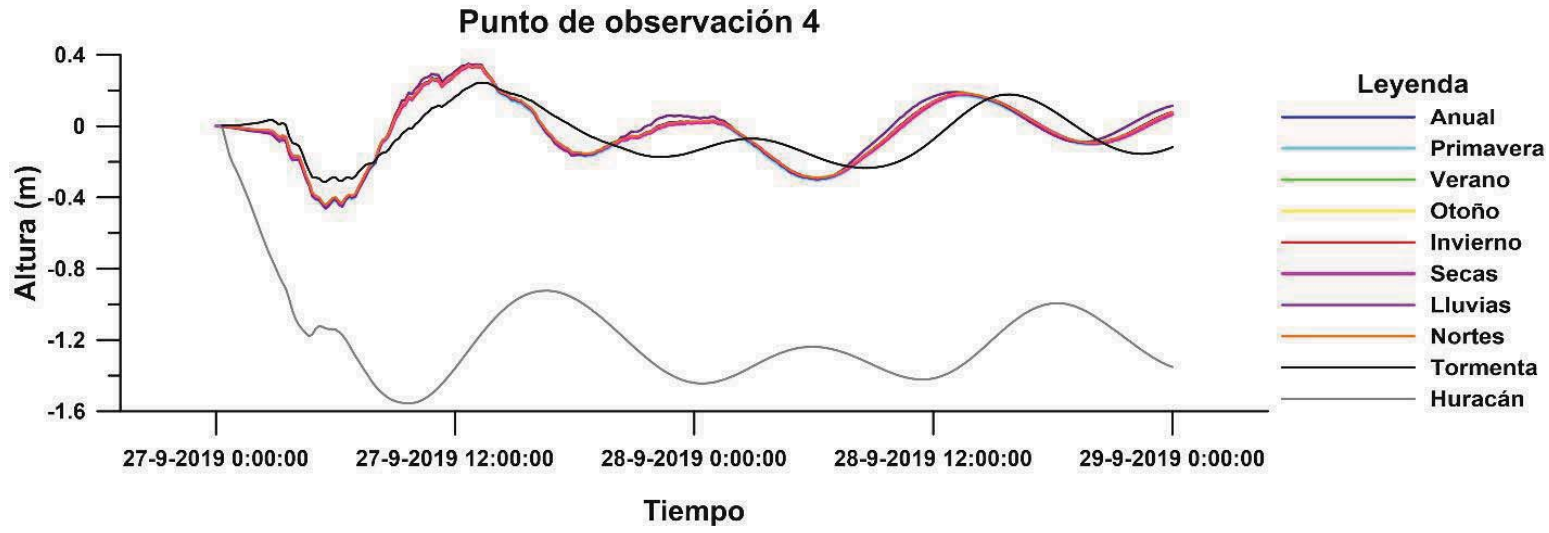
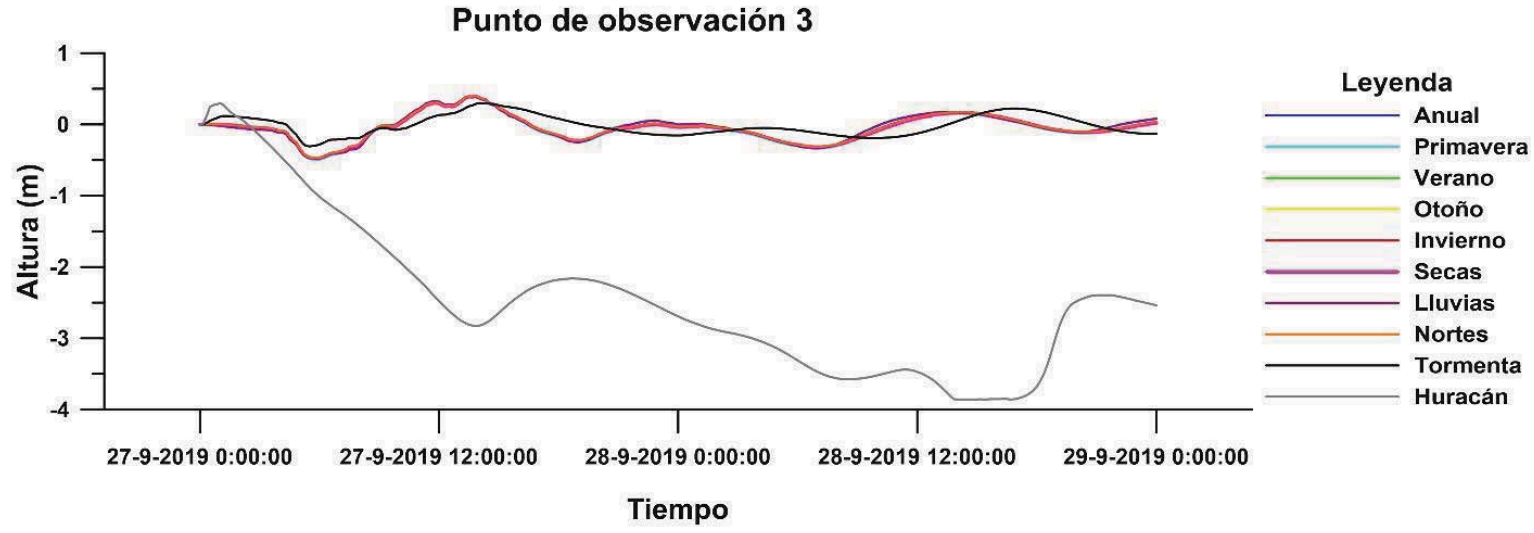
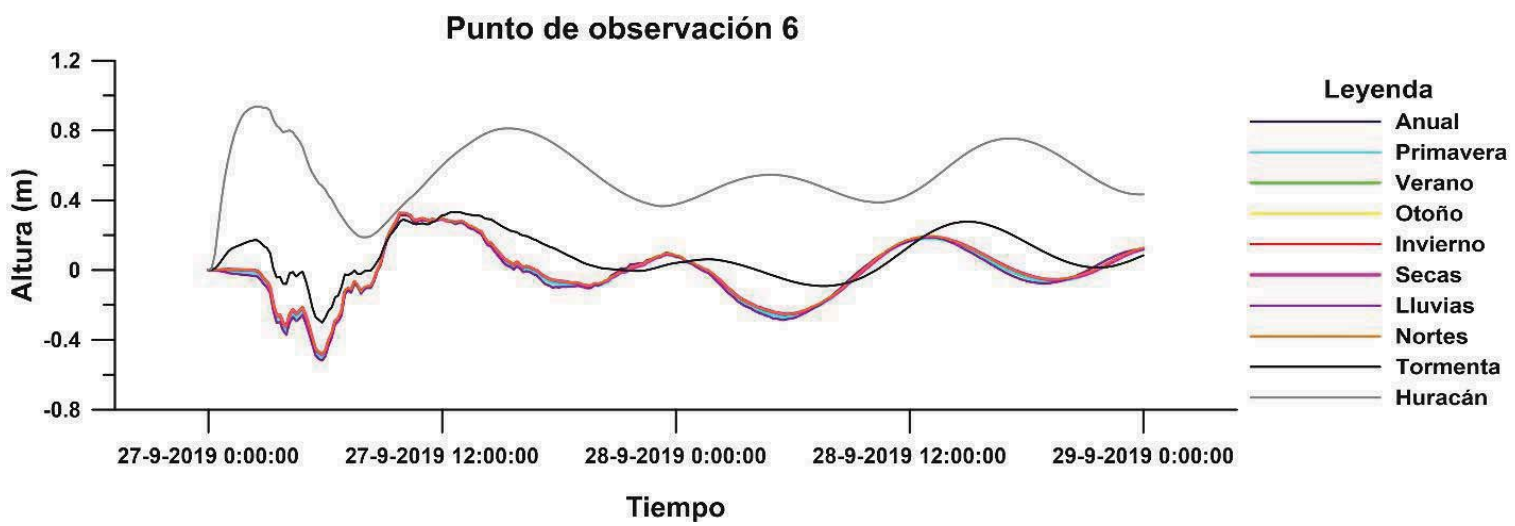
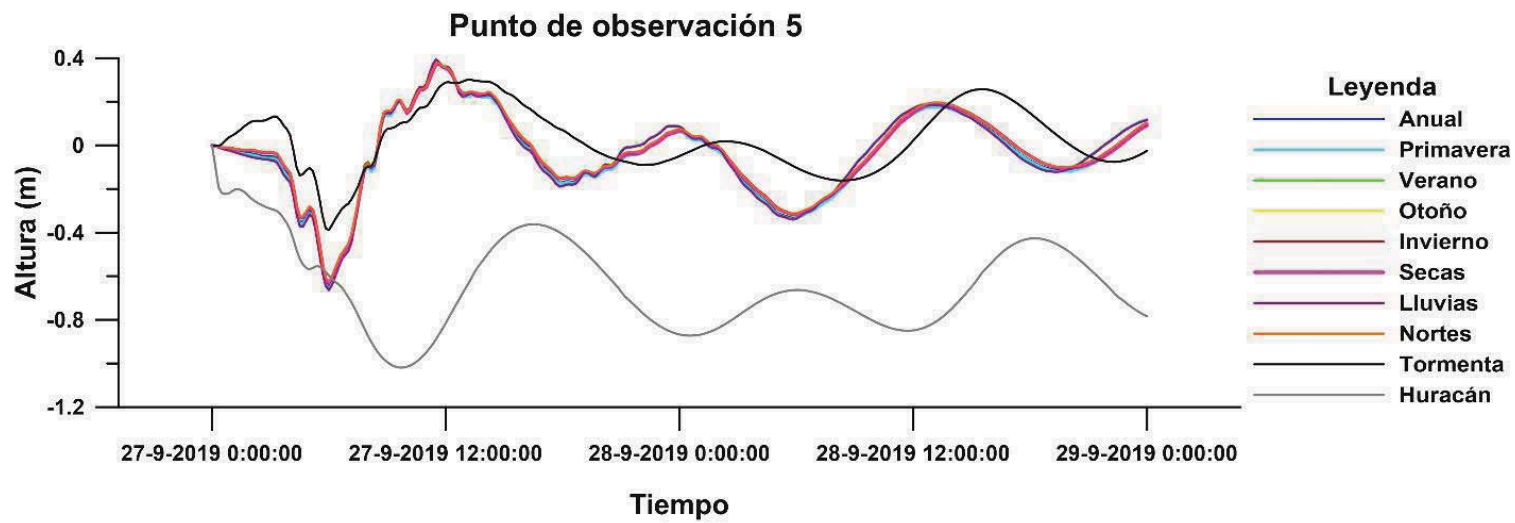


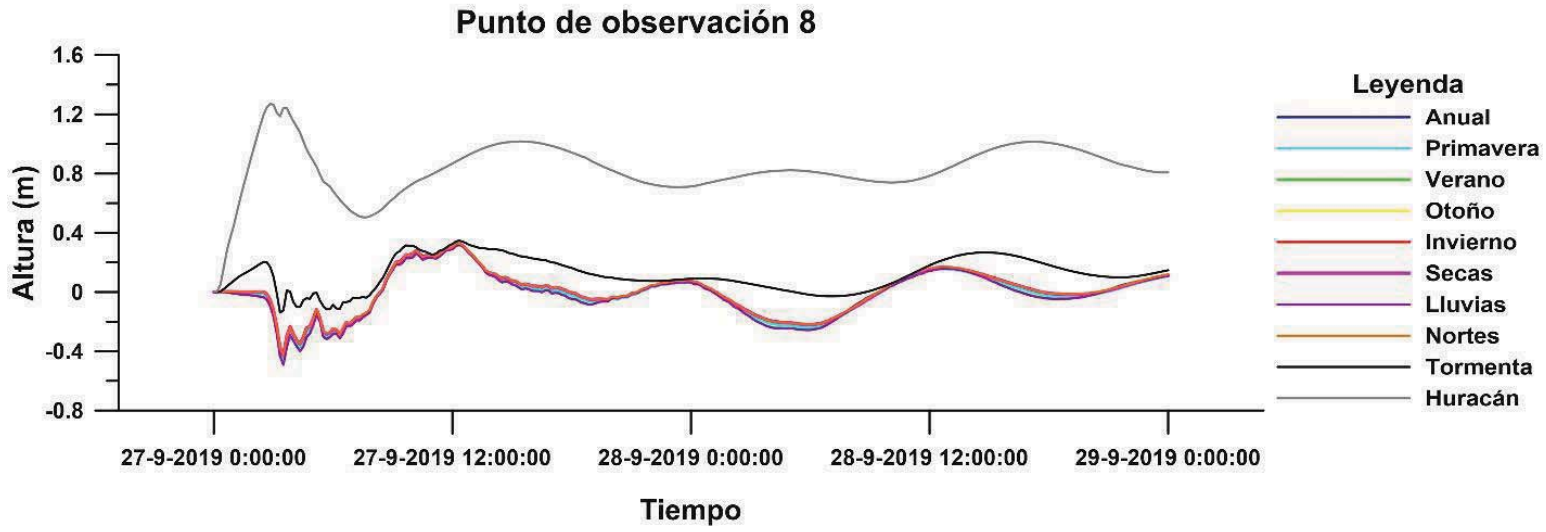
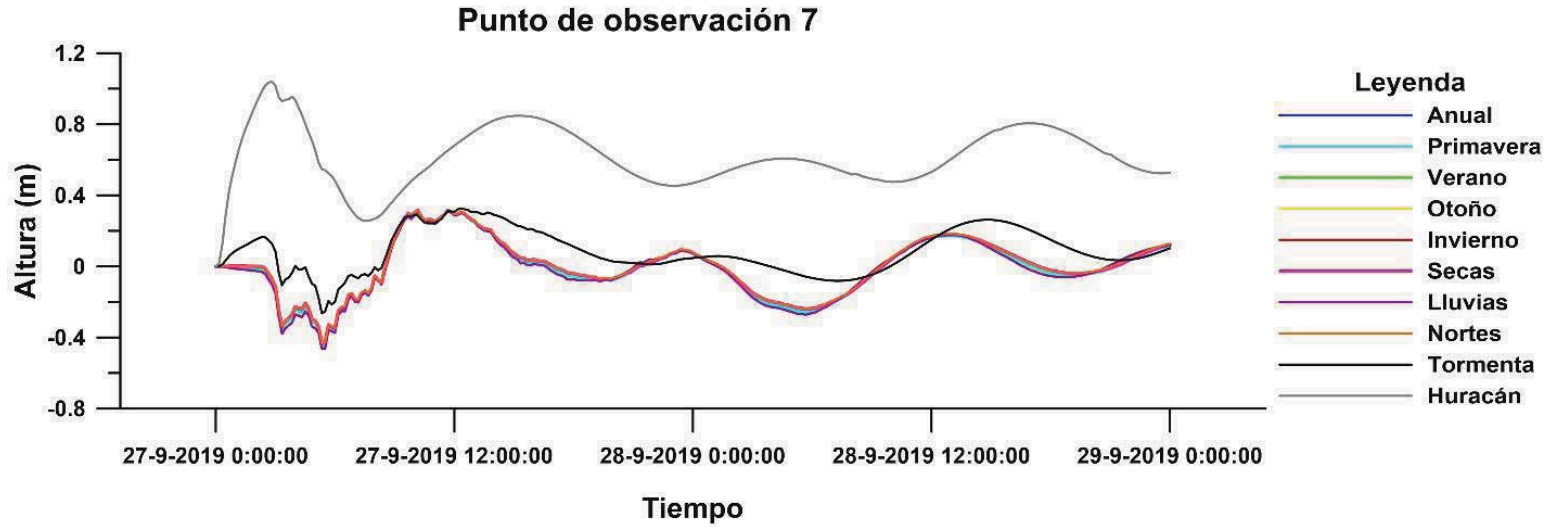
Figura 5. Puntos de observación del modelo acoplado.

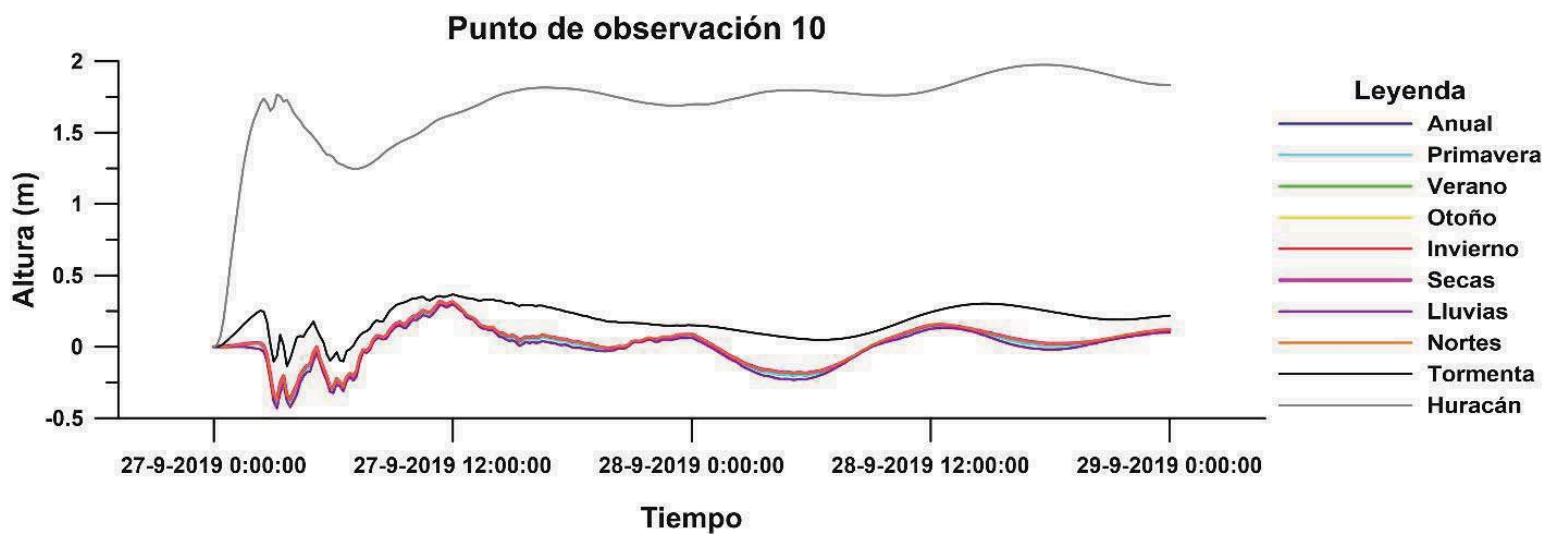
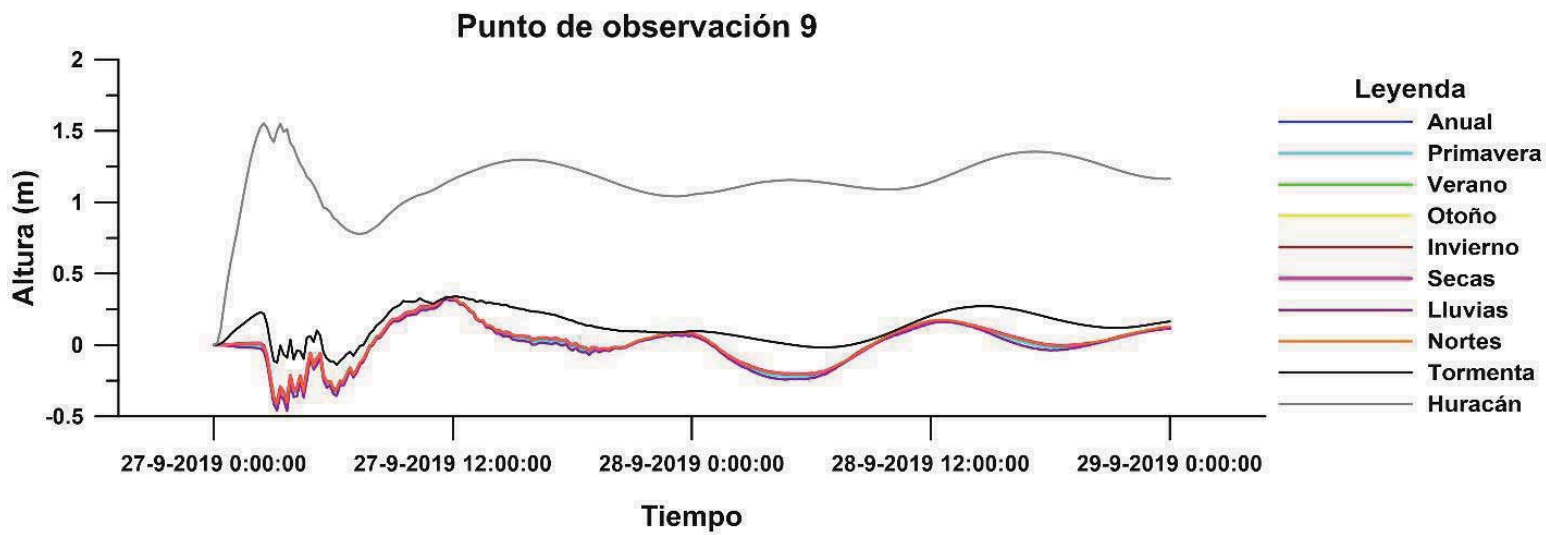
A continuación, para cada punto de observación se presentan los niveles de elevación para los diferentes escenarios simulados:

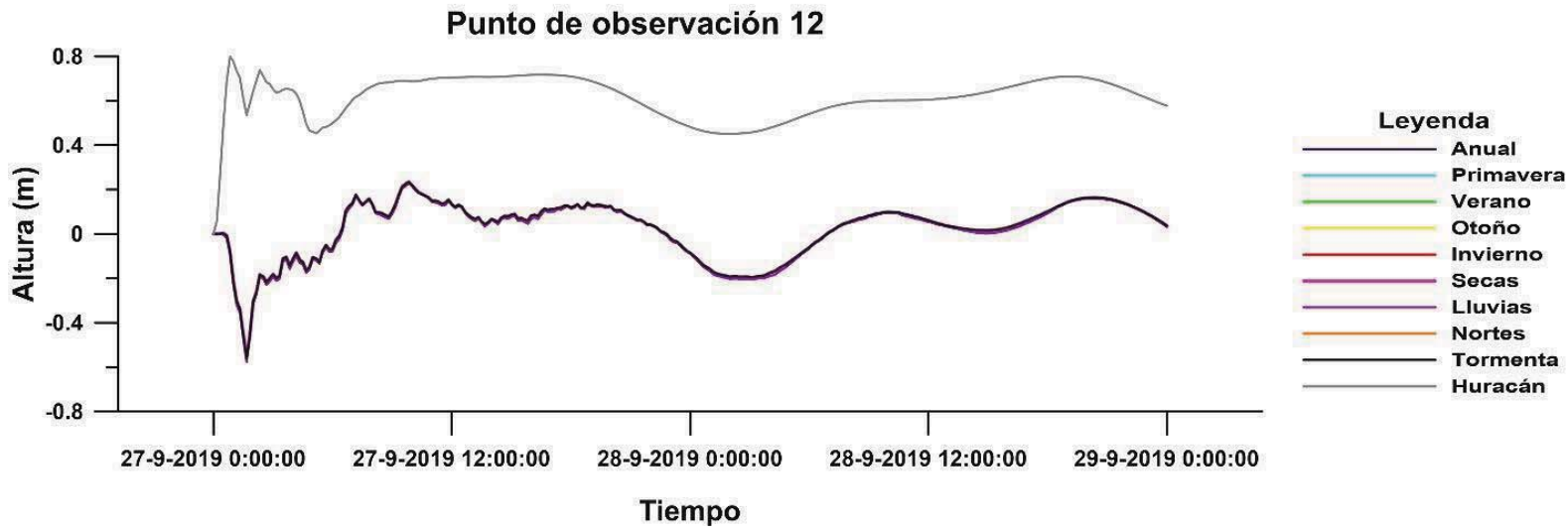
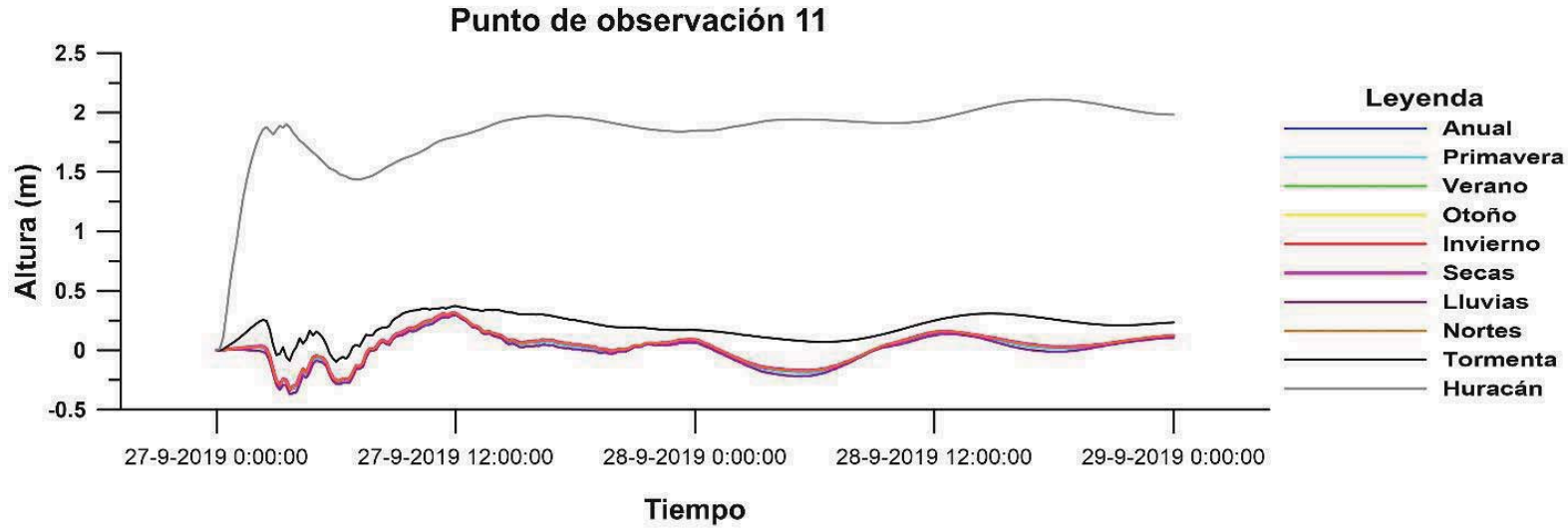


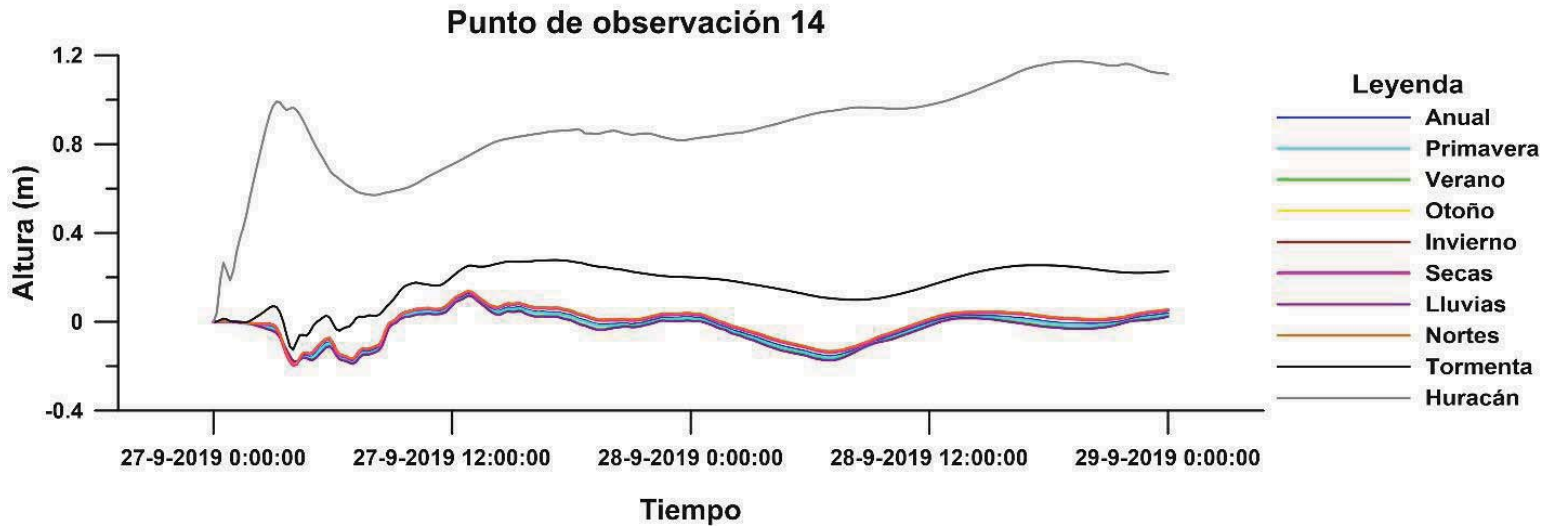
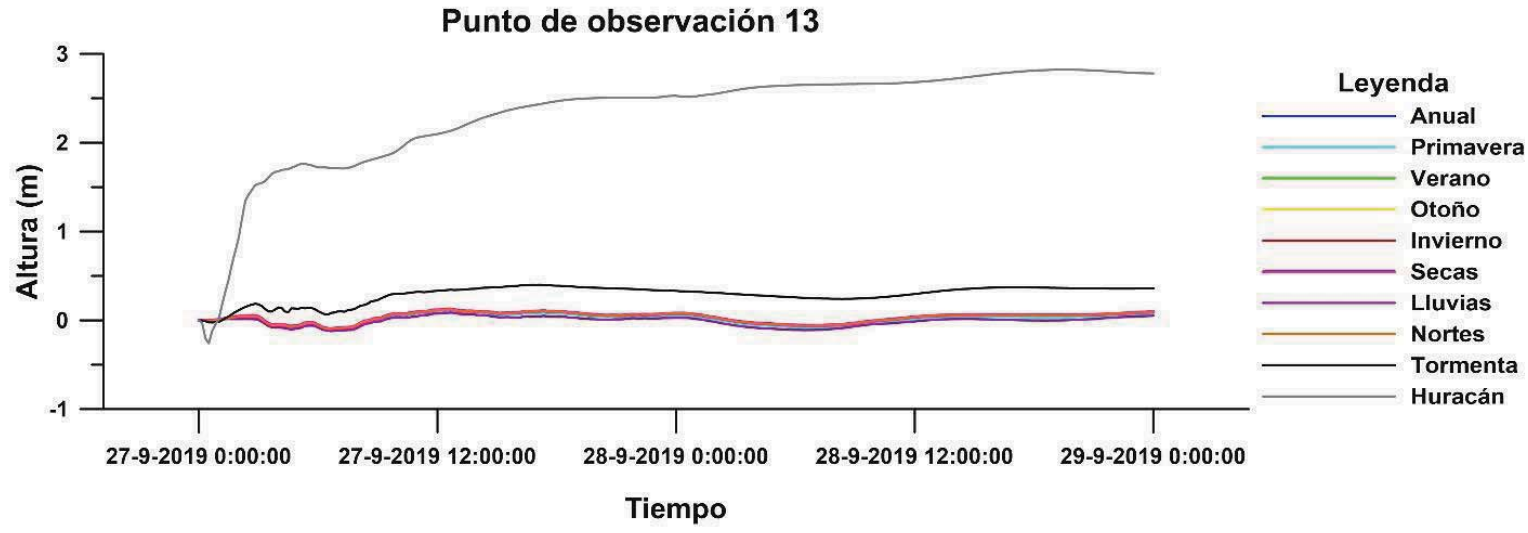


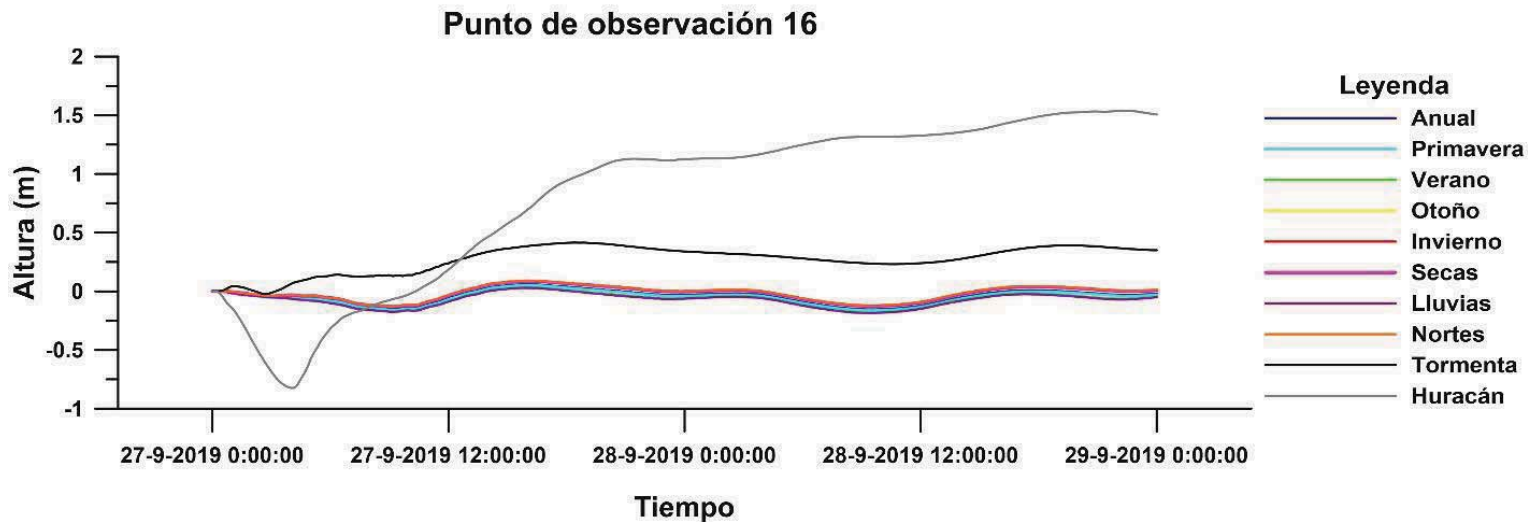
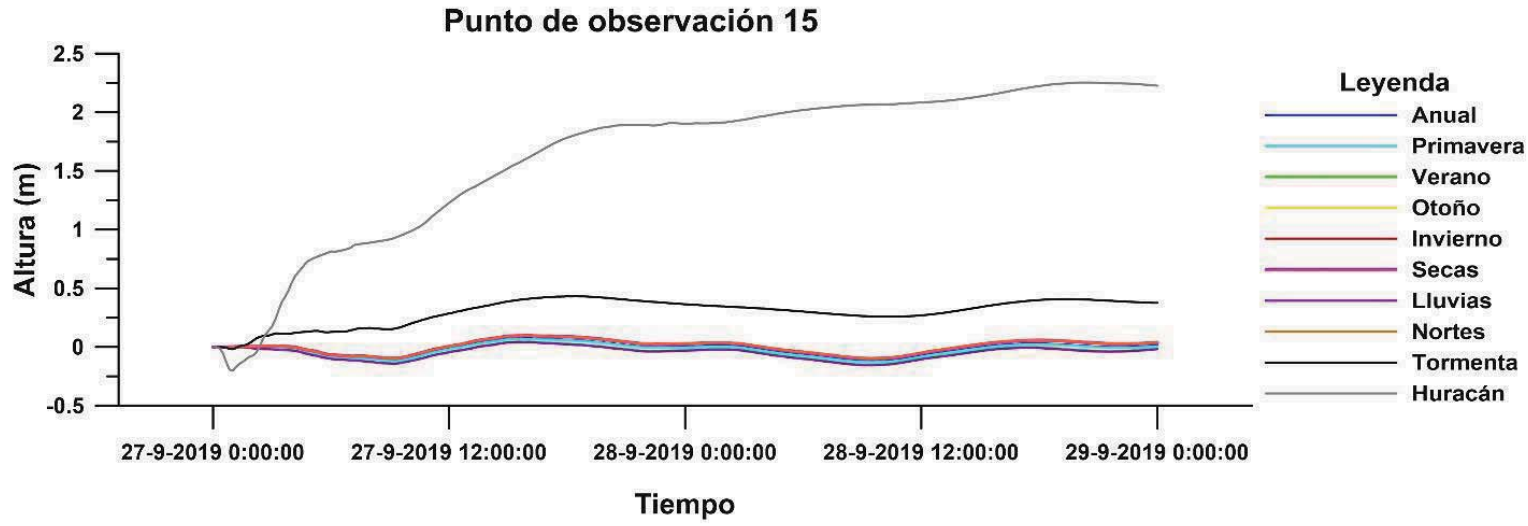


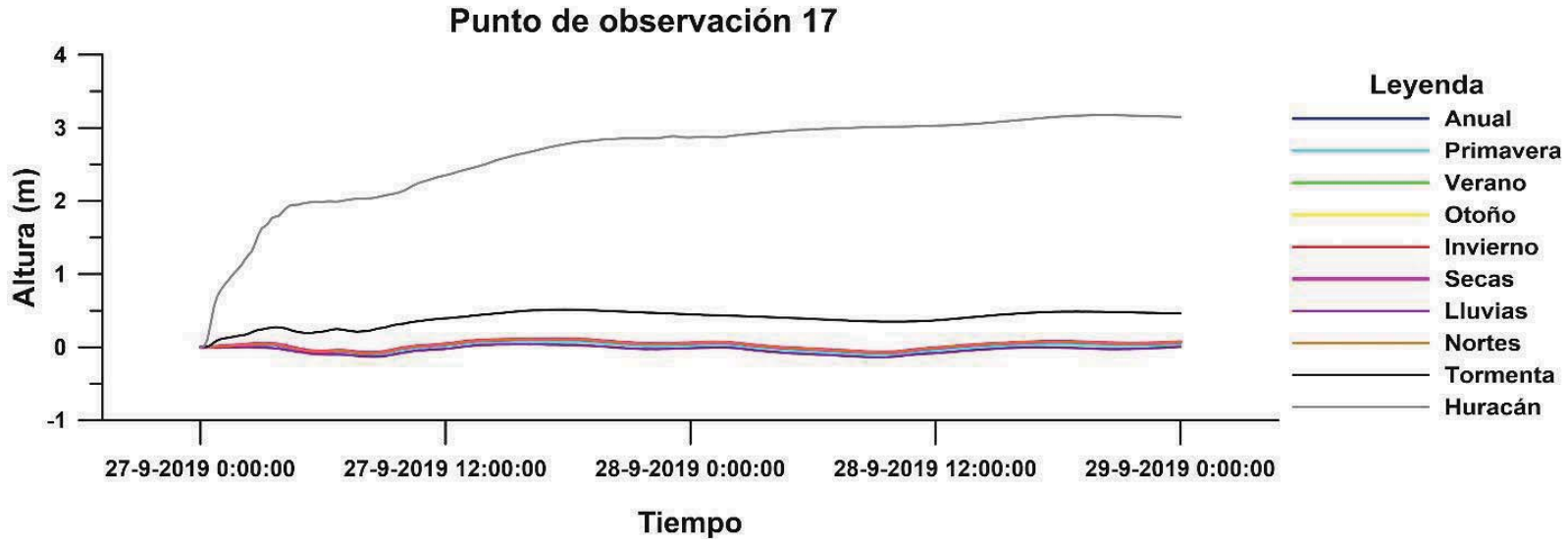












Dirección y magnitud de corriente

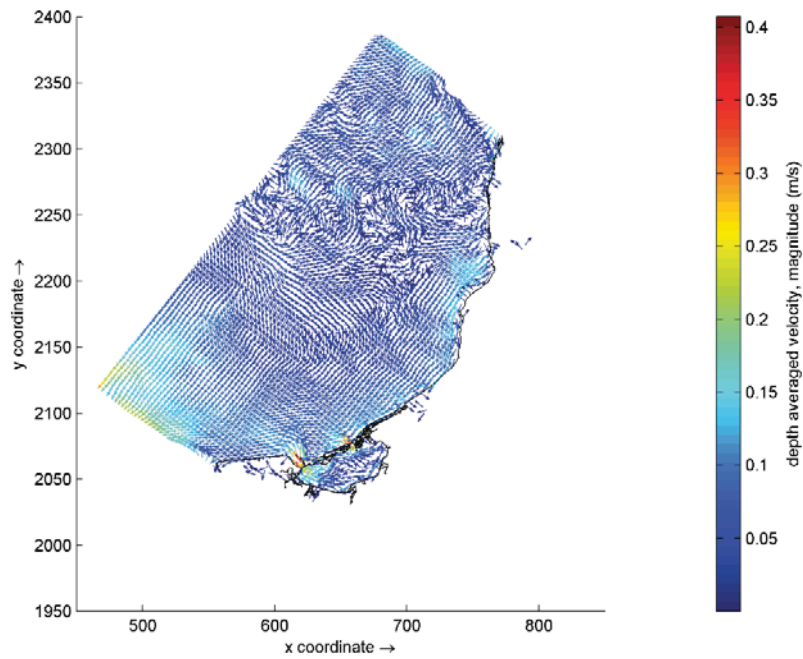


Figura 6. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Anual.

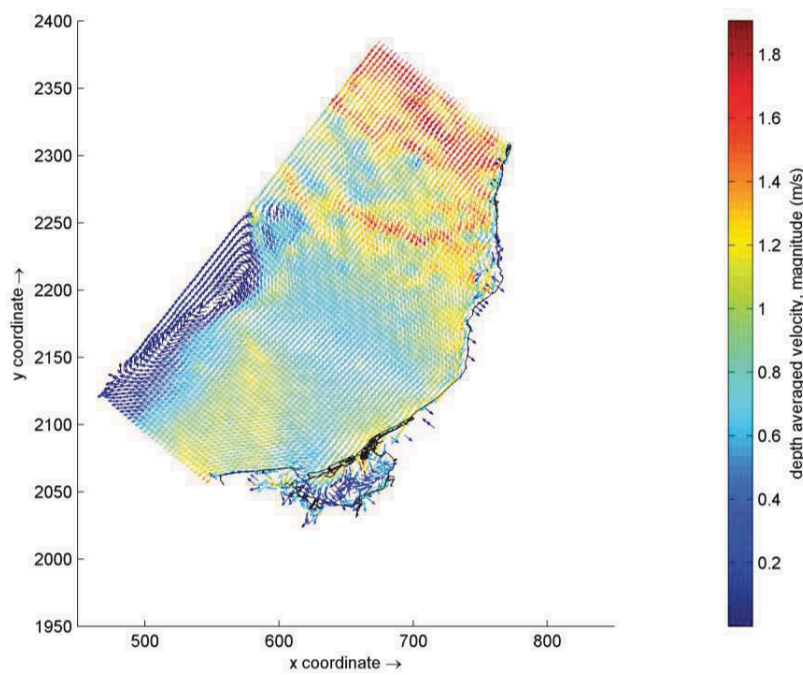


Figura 7. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Huracán.

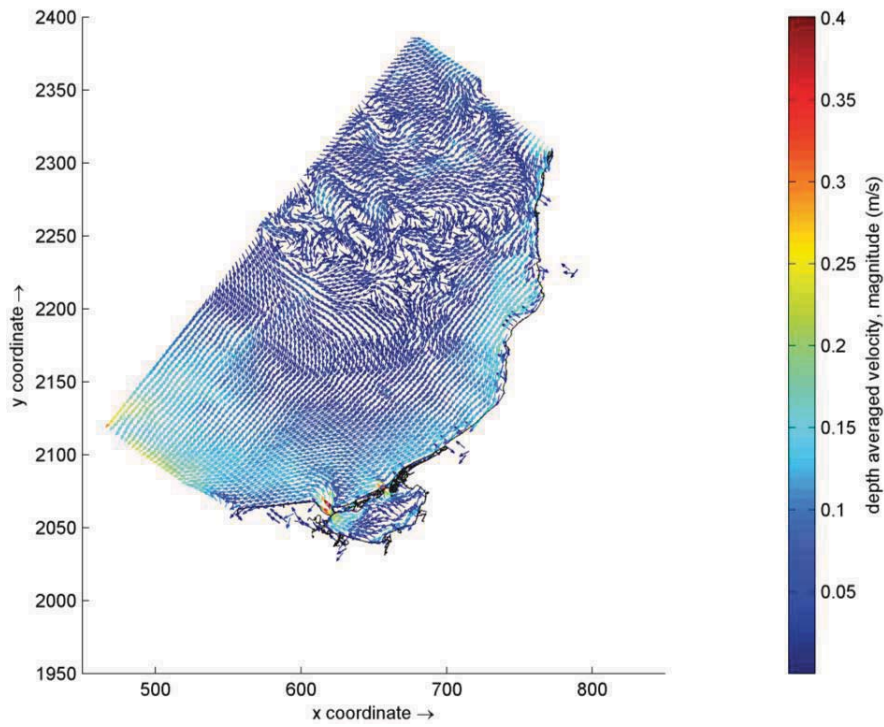


Figura 8. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Invierno.

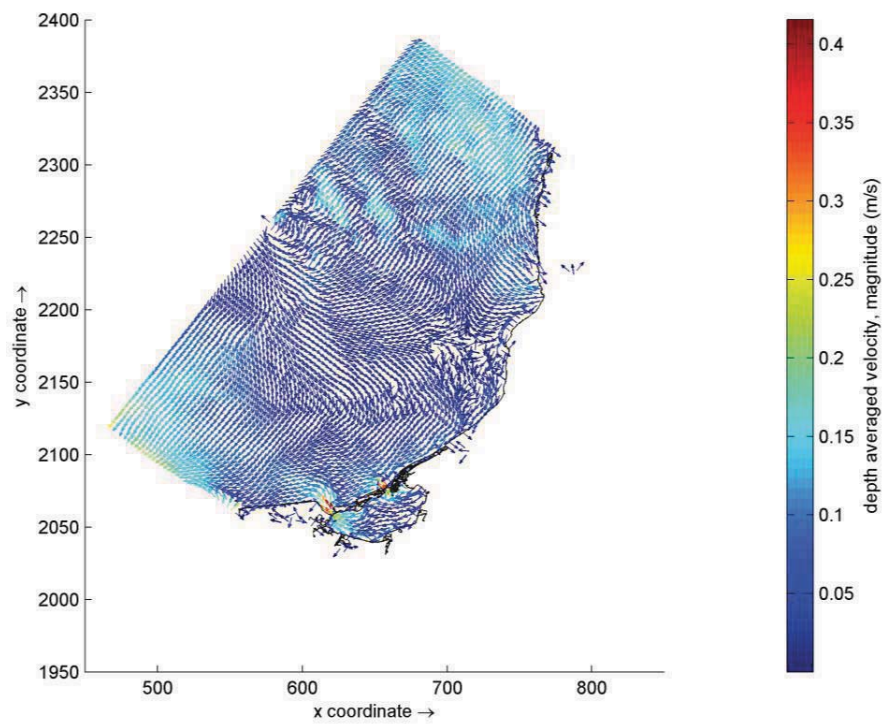


Figura 9. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Lluvias.

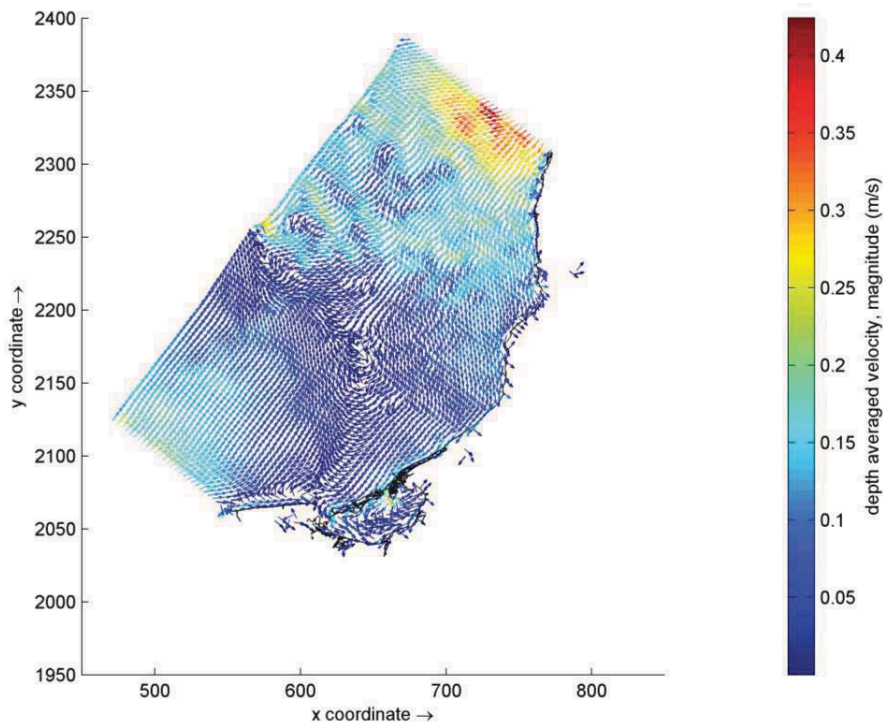


Figura 10. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Nortes.

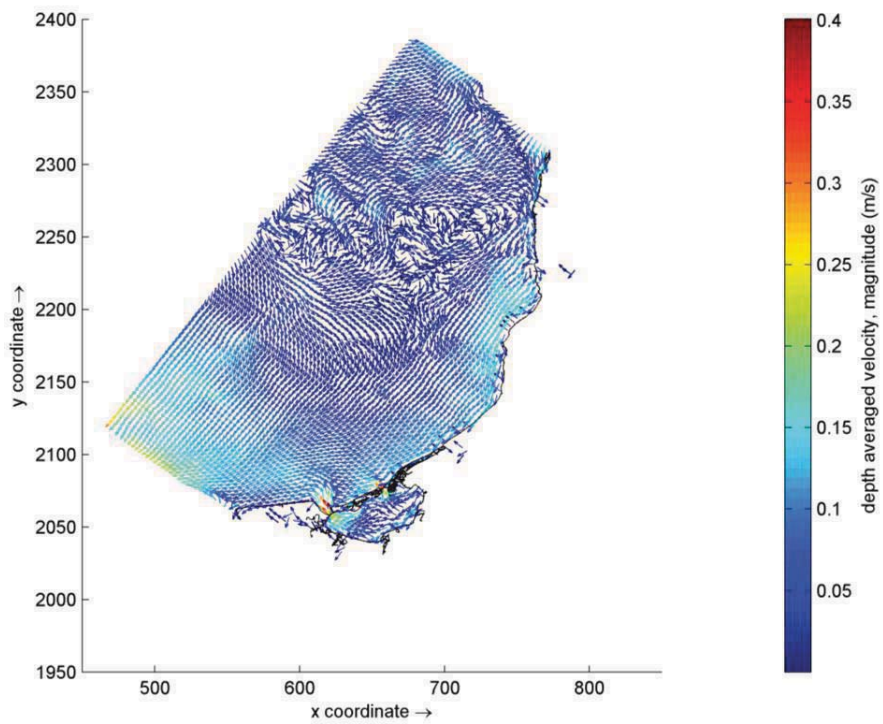


Figura 11. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Otoño.

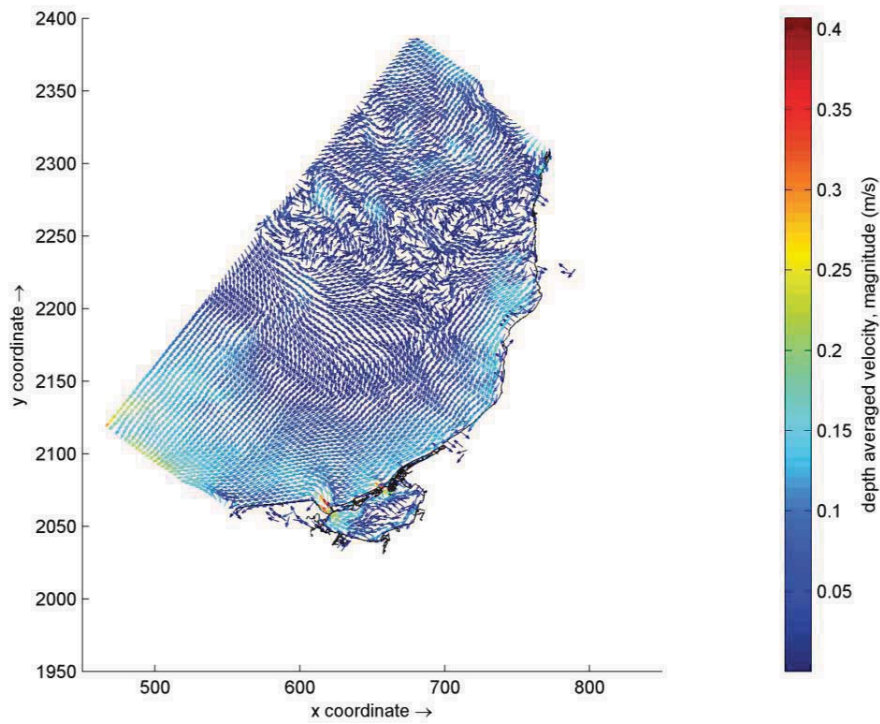


Figura 12. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Primavera.

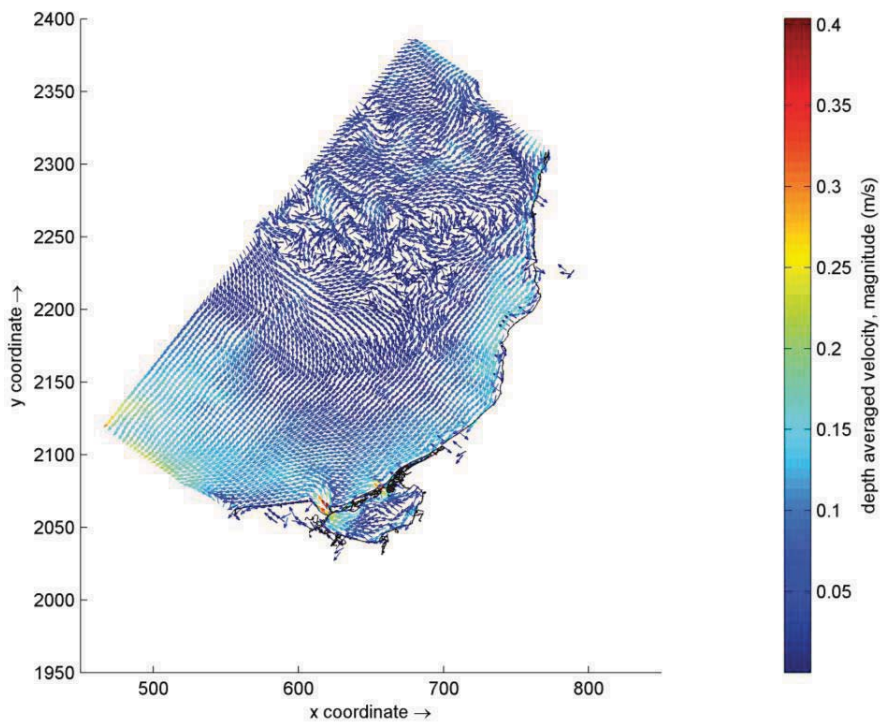


Figura 13. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Secas.

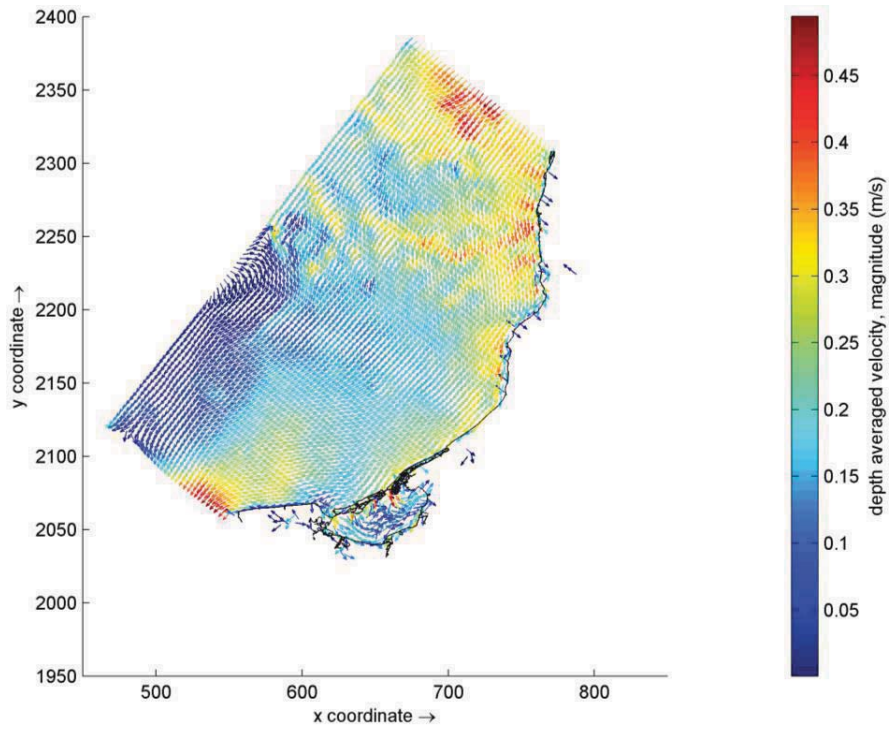


Figura 14. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Tormenta.

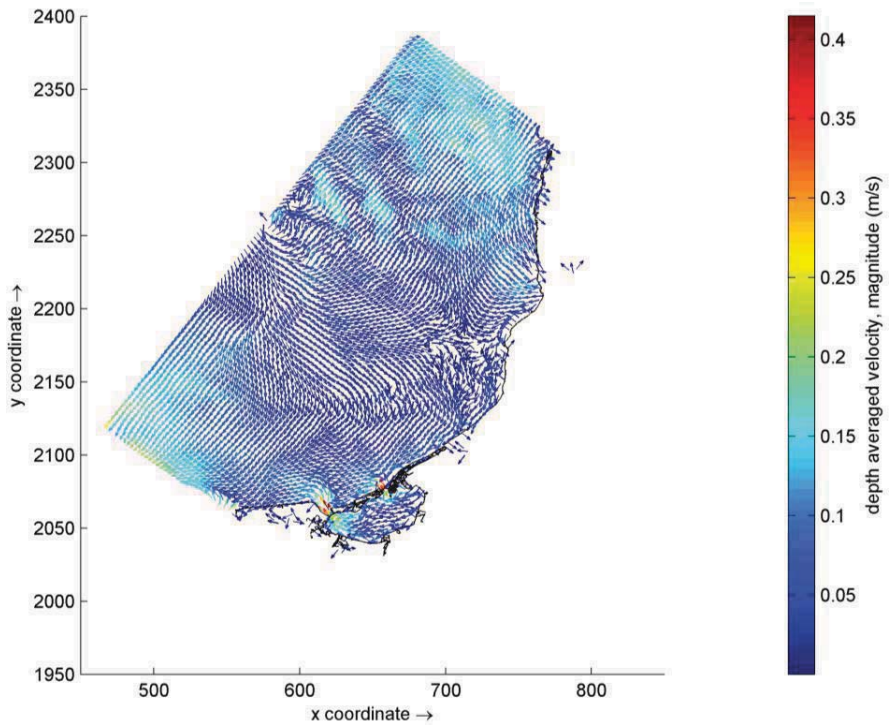


Figura 15. Dirección y magnitud de corriente en el escenario Verano.

ANEXO VIII. MEDIDAS DE ACTUACIÓN (ANÁLISIS DE OLEAJE)

ISLA ARENA

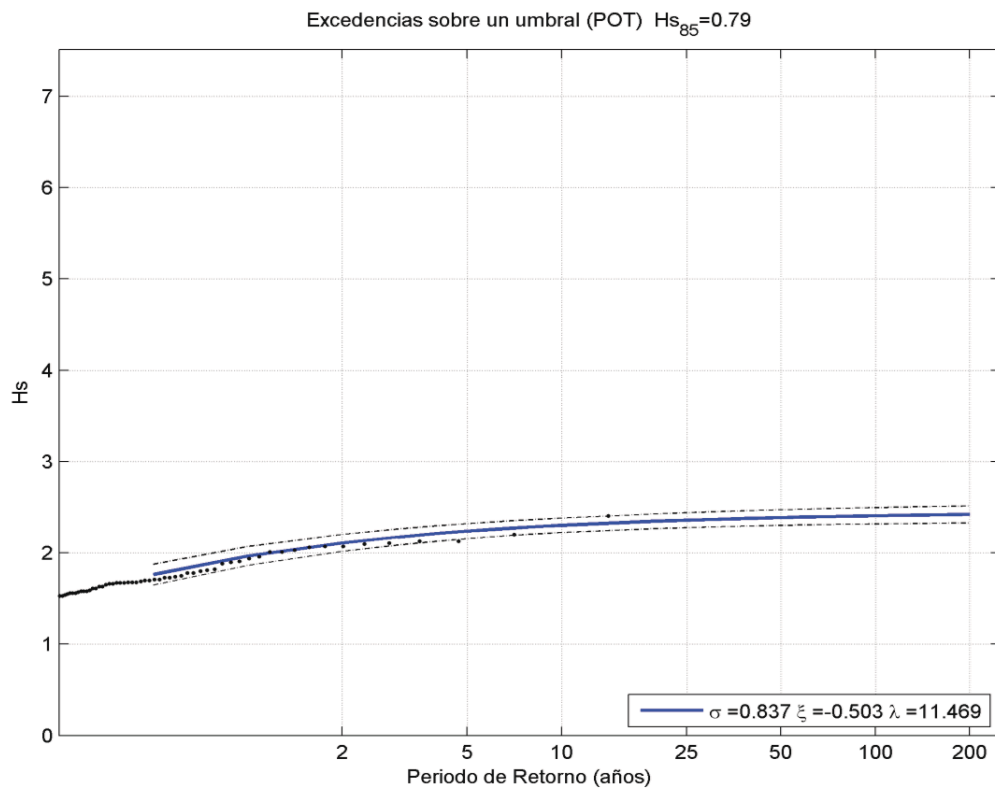


Figura 1. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

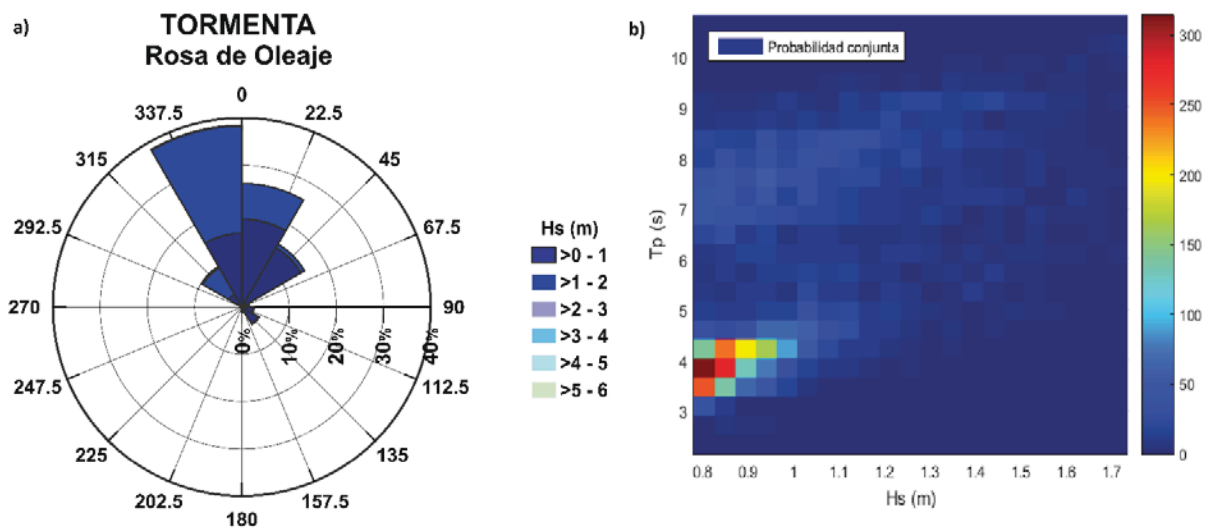


Figura 2. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.

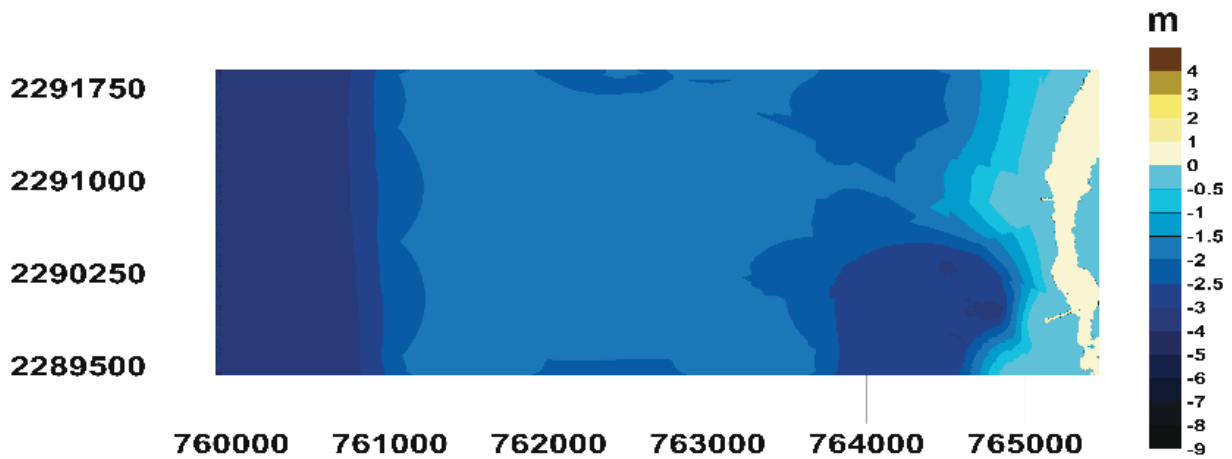


Figura 3. Modelo topobatimétrico de Isla Arena, la escala indica elevación.

SAN FRANCISCO DE CAMPECHE

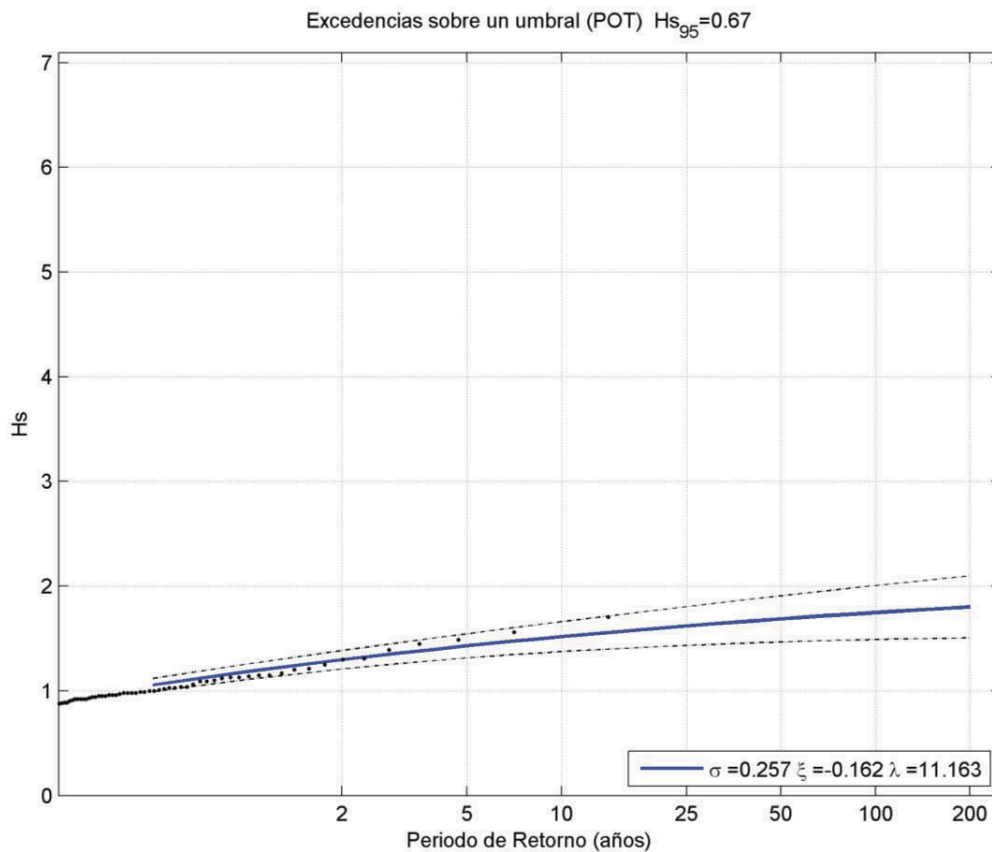


Figura 4. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

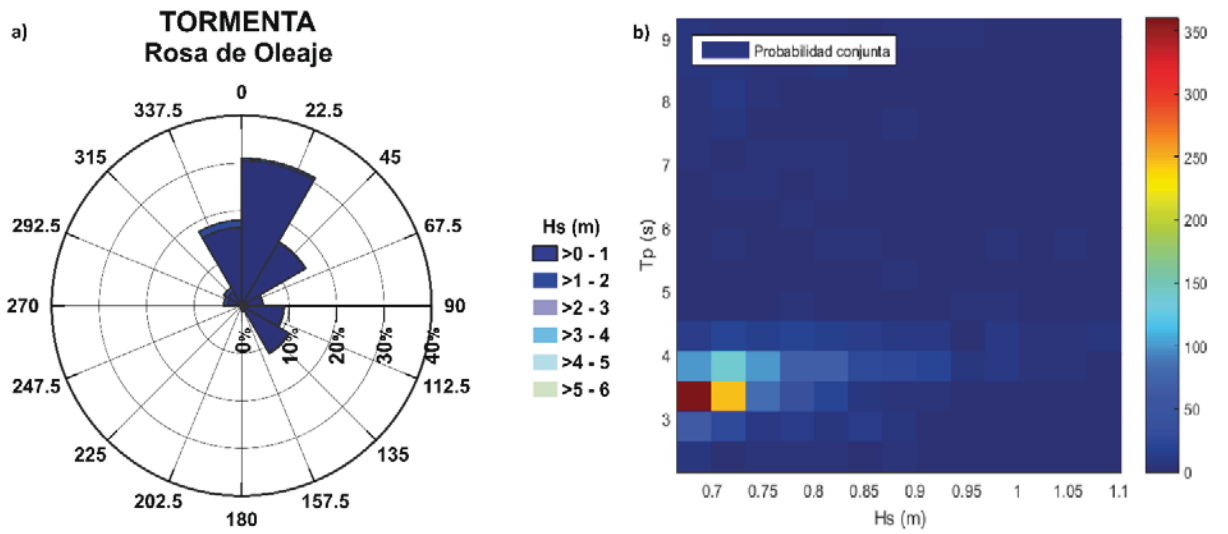


Figura 5. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$

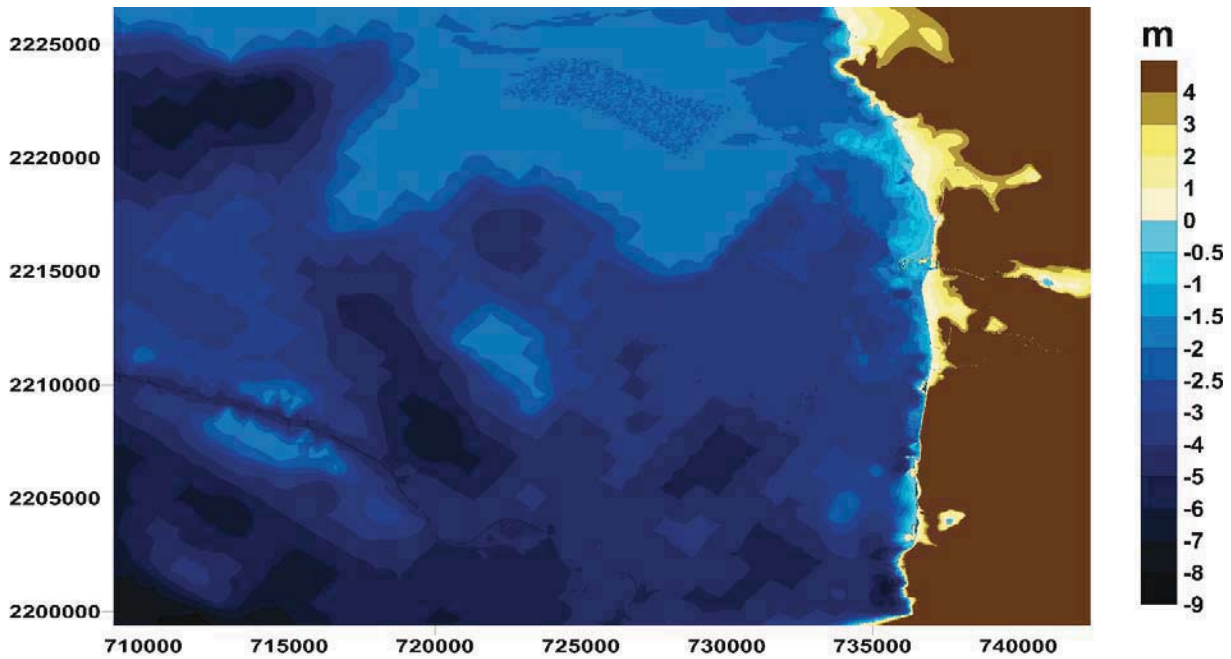


Figura 6. Modelo topobatimétrico de San Francisco de Campeche.

CIUDAD DEL SOL

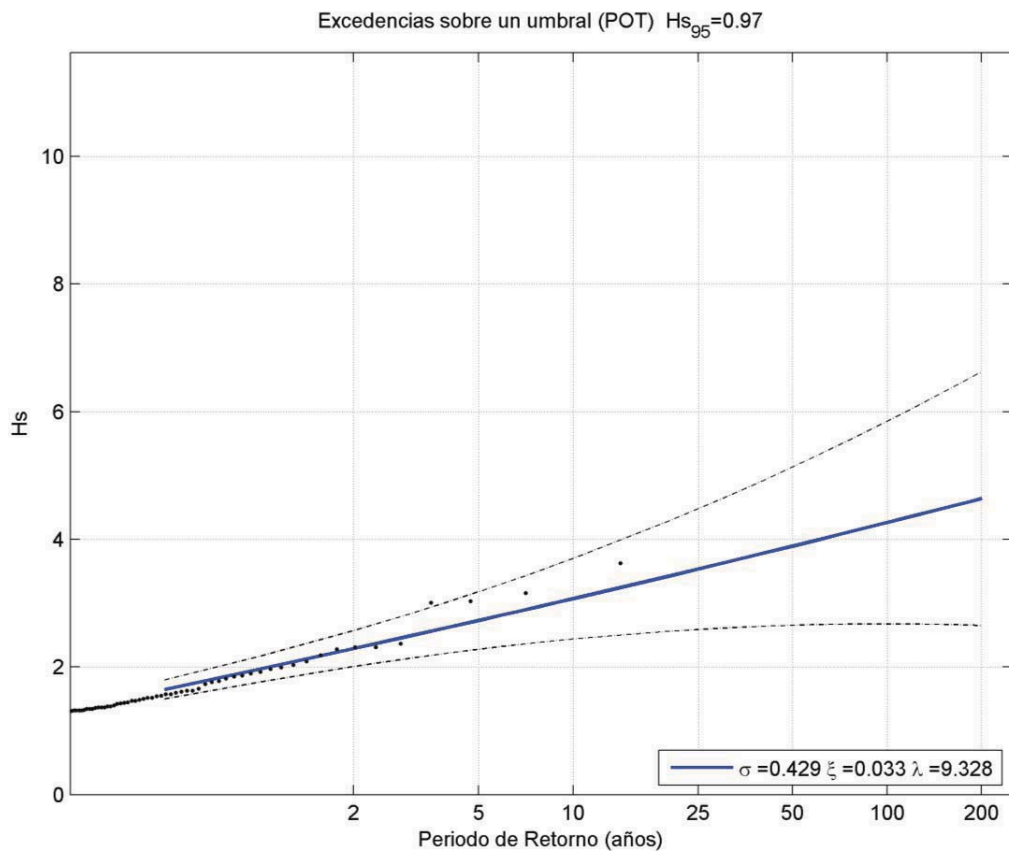


Figura 7. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

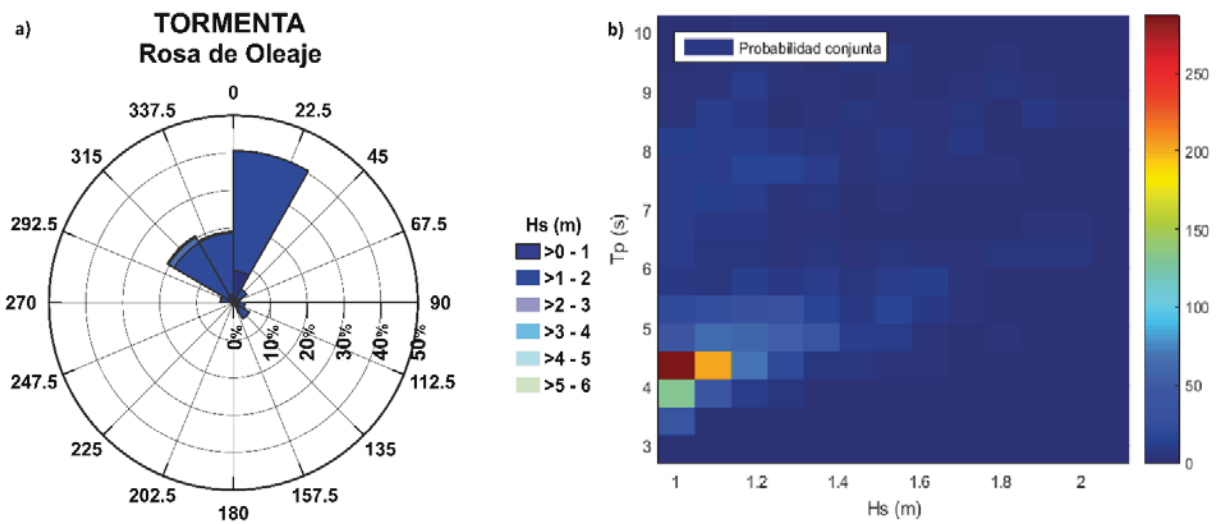


Figura 8. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T_p)$.

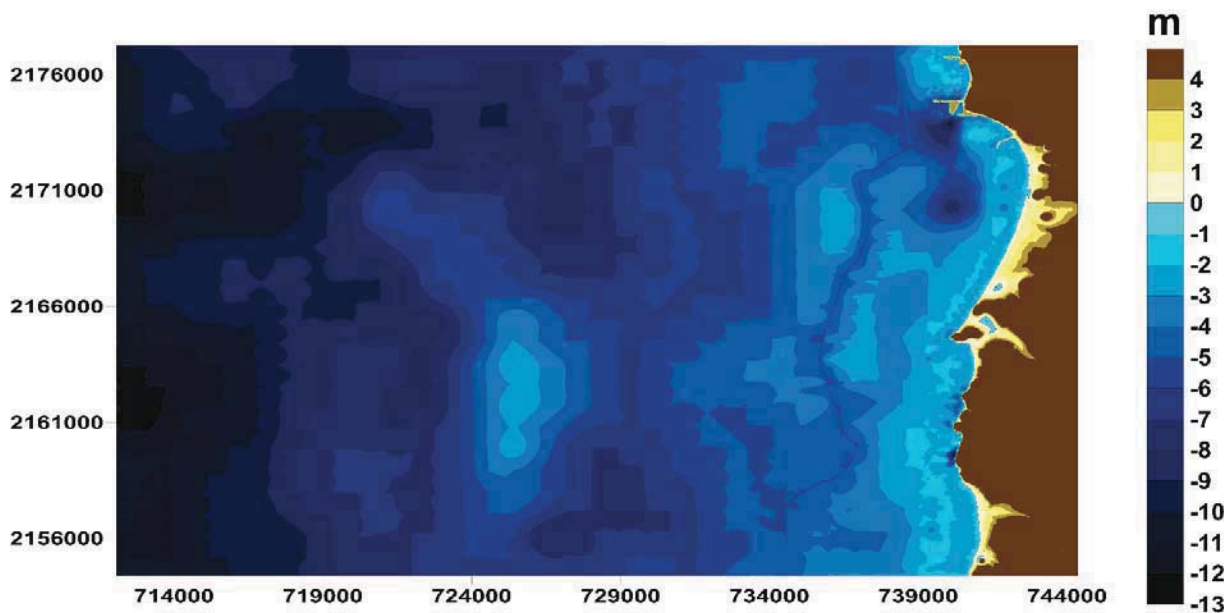


Figura 9. Modelo topobatimétrico de la zona de Ciudad del Sol, incluye el Puerto de Seybaplaya y el Puerto de Payucán.

SABANCUY

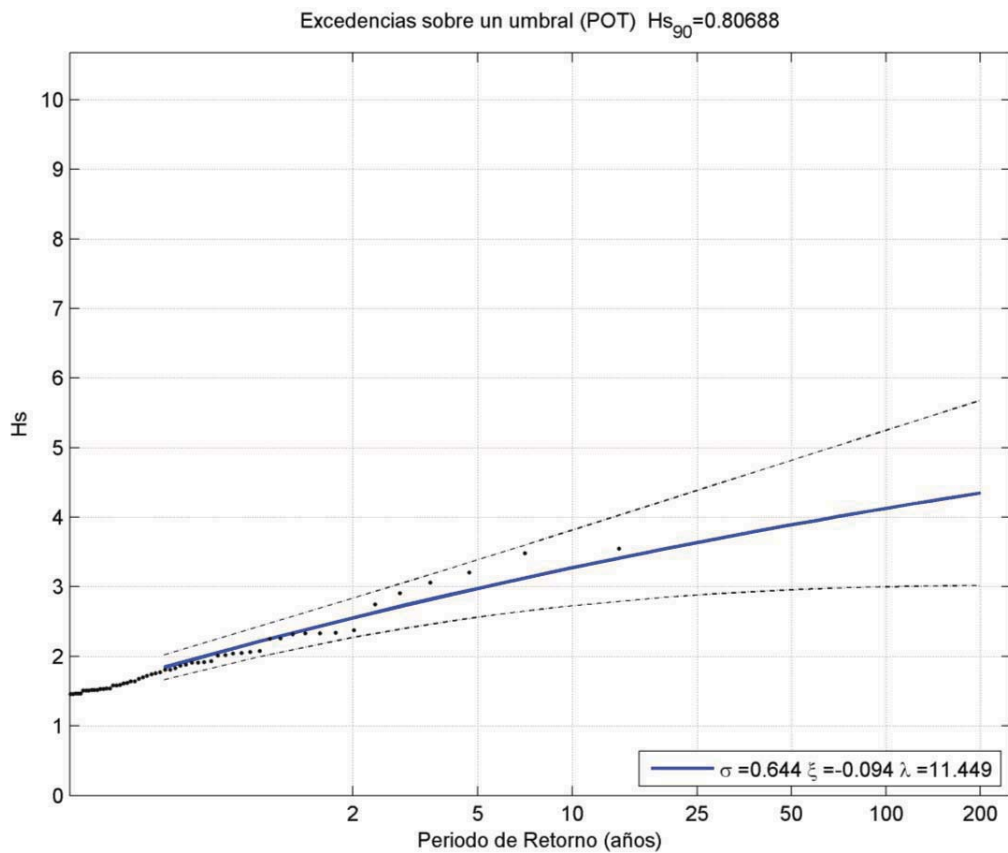


Figura 10. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

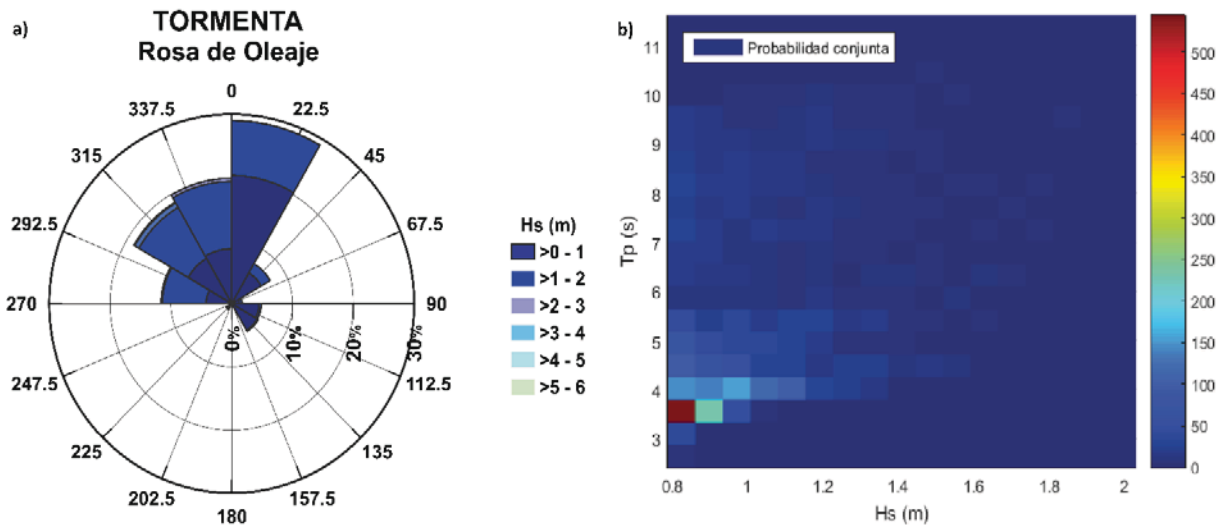


Figura 11. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.



Figura 12. Modelo topobatimétrico de Sabancuy.

ISLA AGUADA

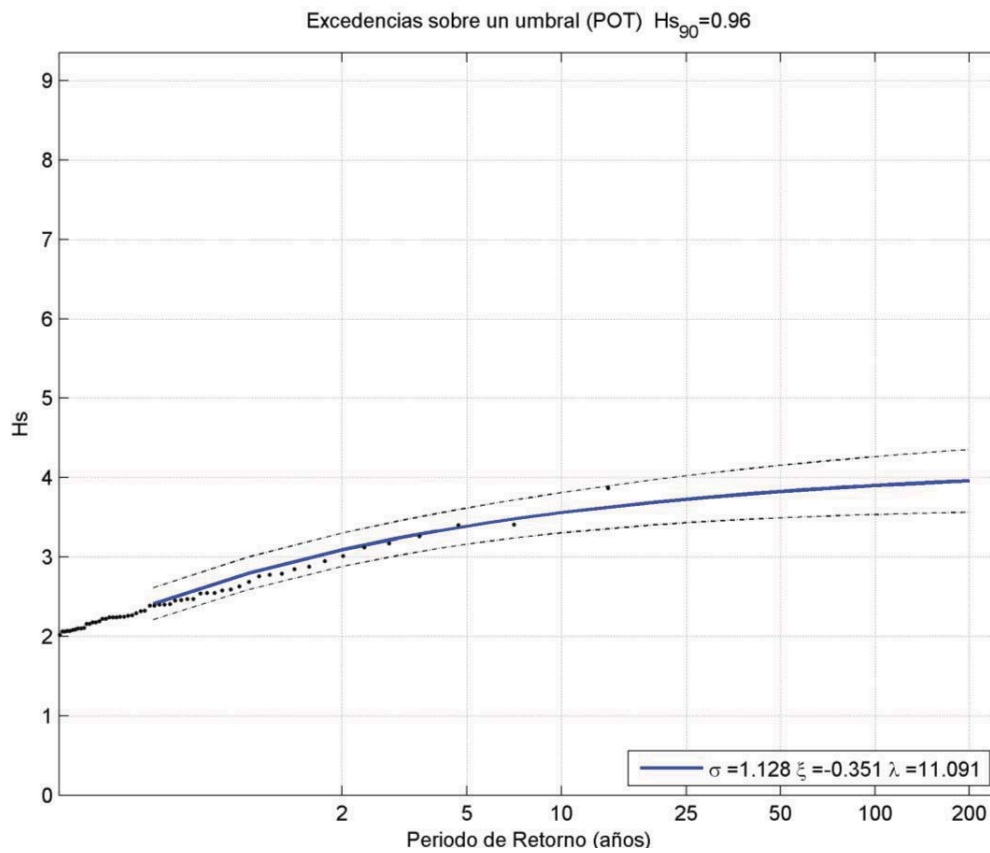


Figura 13. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

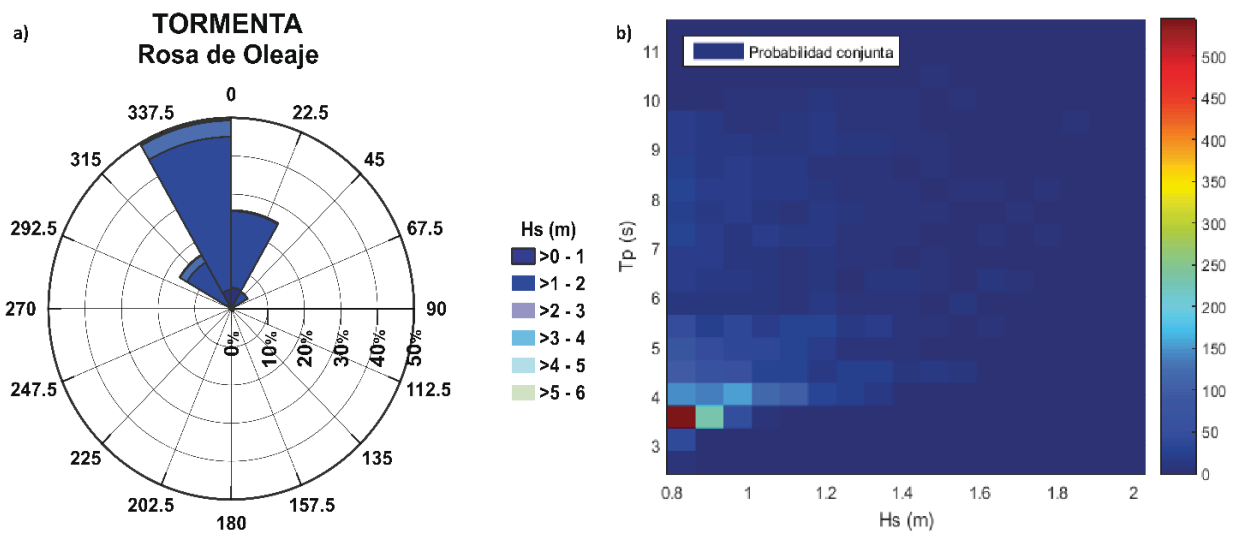


Figura 14. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.

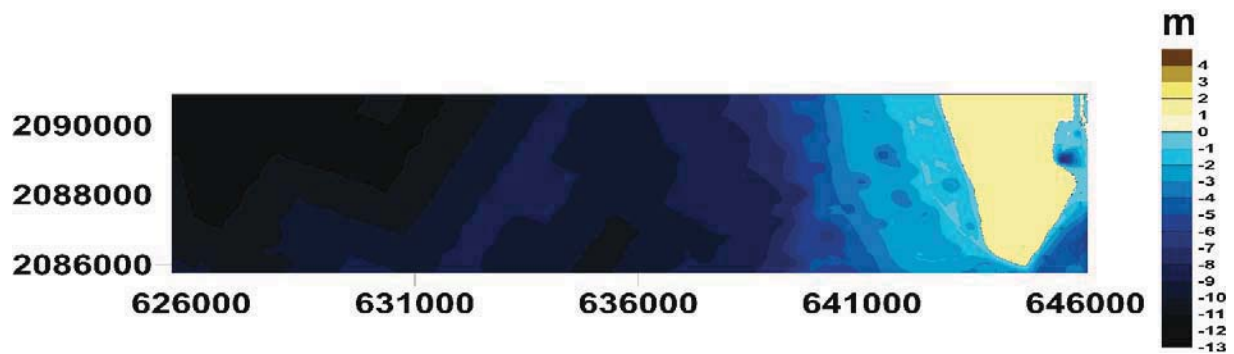


Figura 15. Modelo topobatómico de la zona de Isla Aguada.

CIUDAD DEL CARMEN

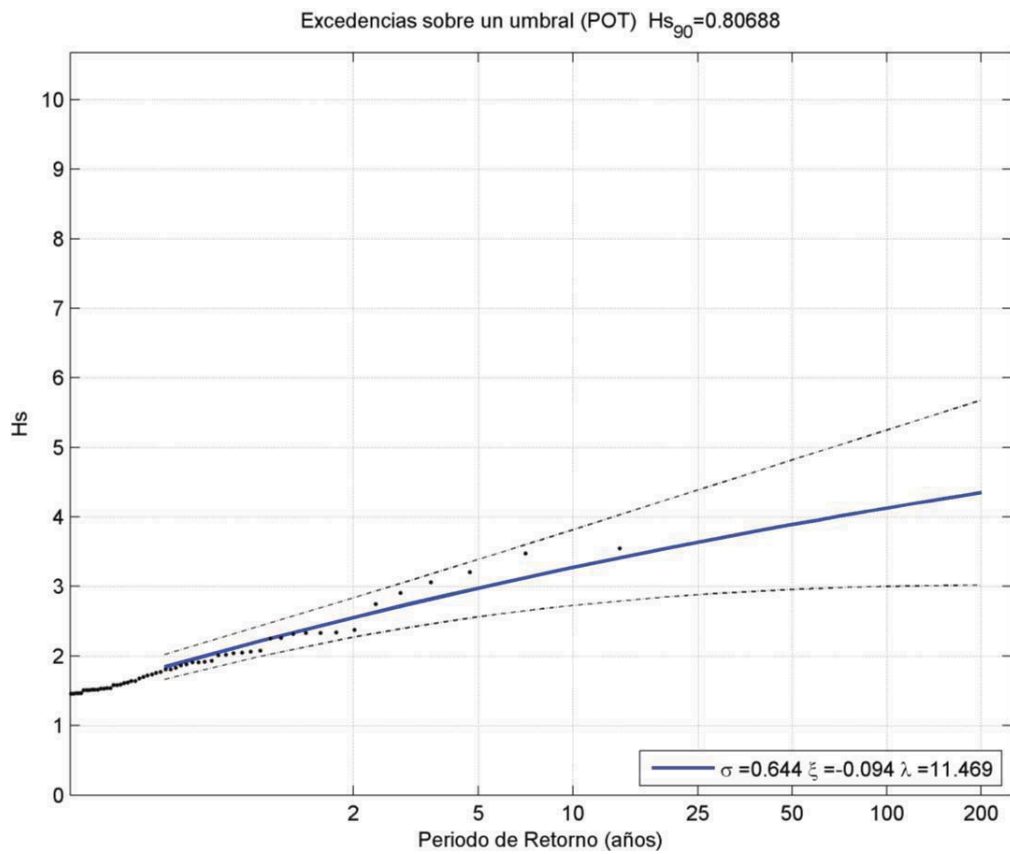


Figura 16. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

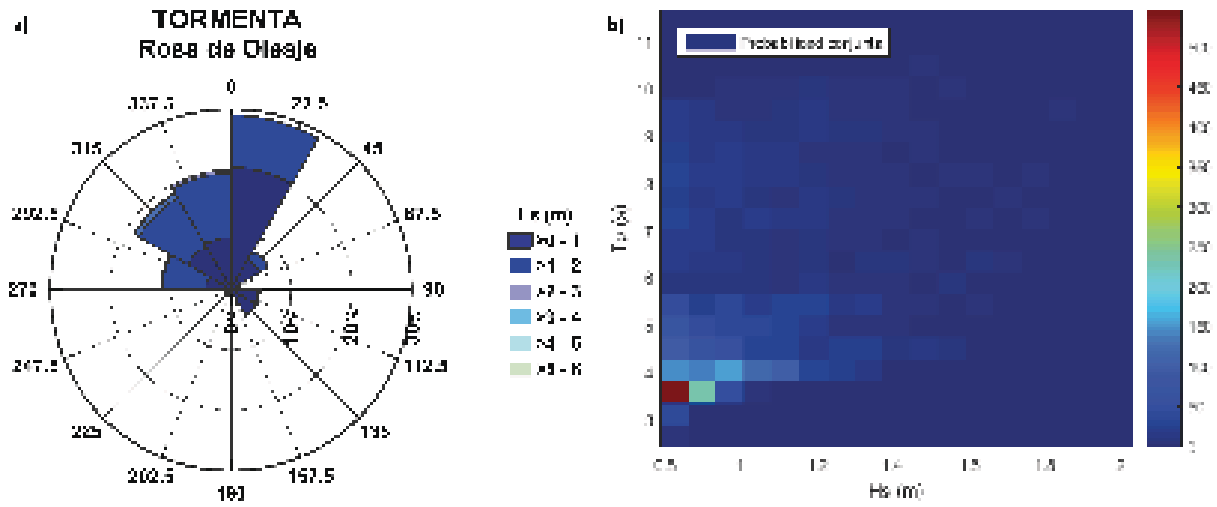


Figura 17. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.

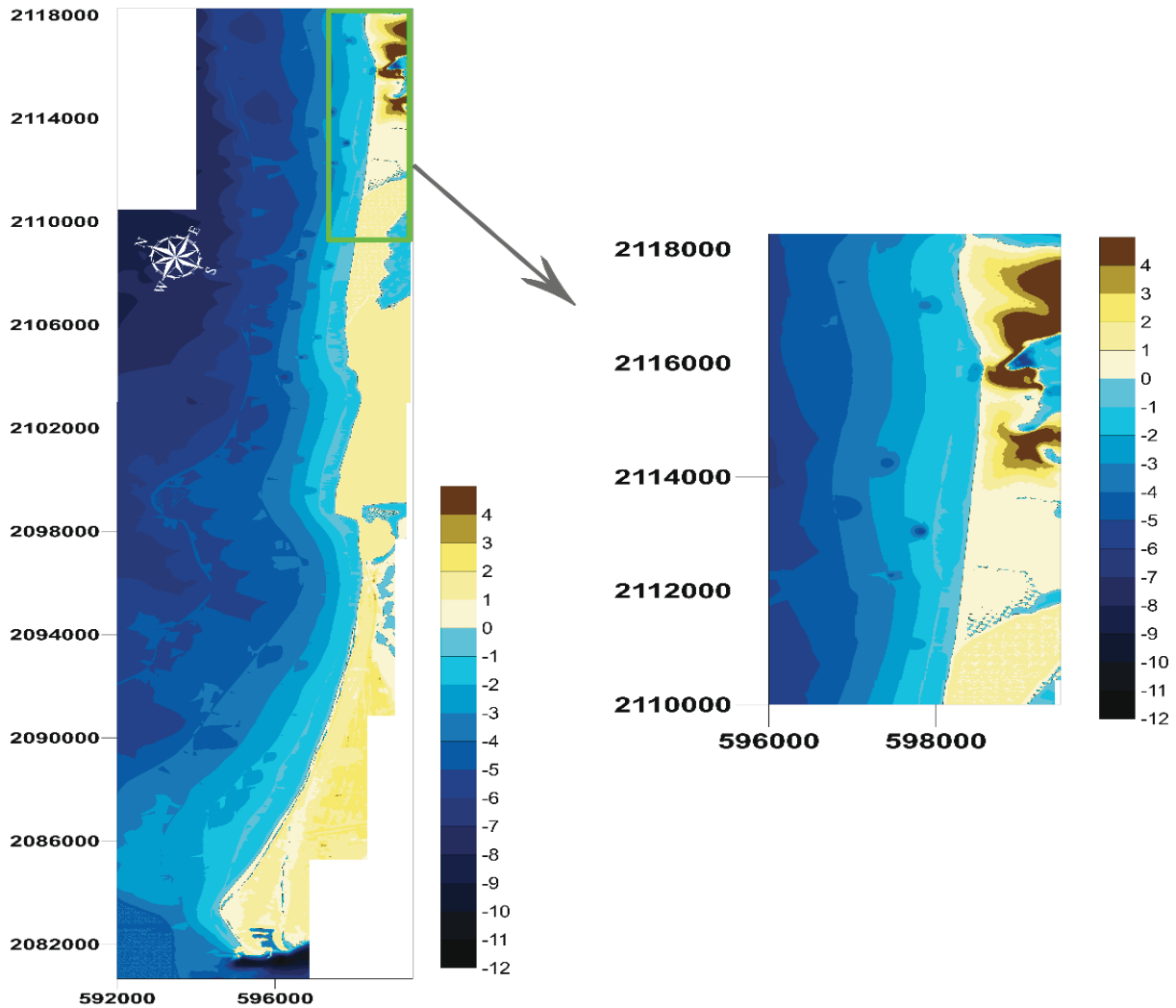


Figura 18. Modelo topobatimétrico de Isla del Carmen, en el recuadro la zona con mayor erosión.

PUERTO RICO

Excedencias sobre un umbral (POT) $H_{s_{90}}=0.88$

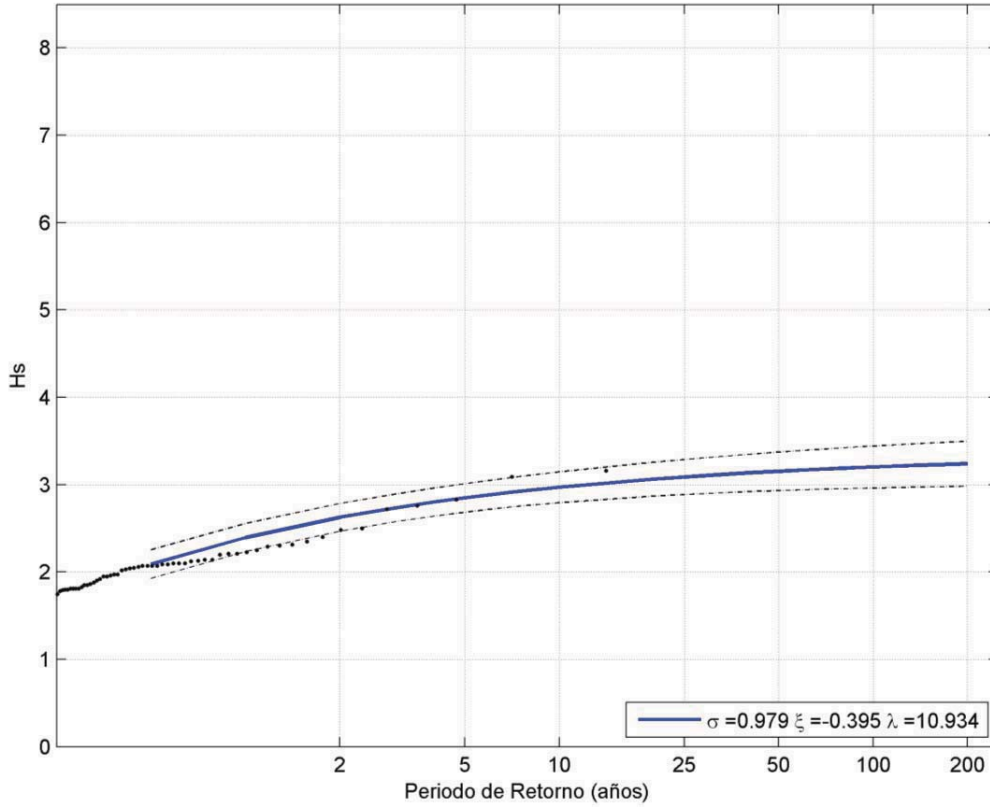


Figura 19. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

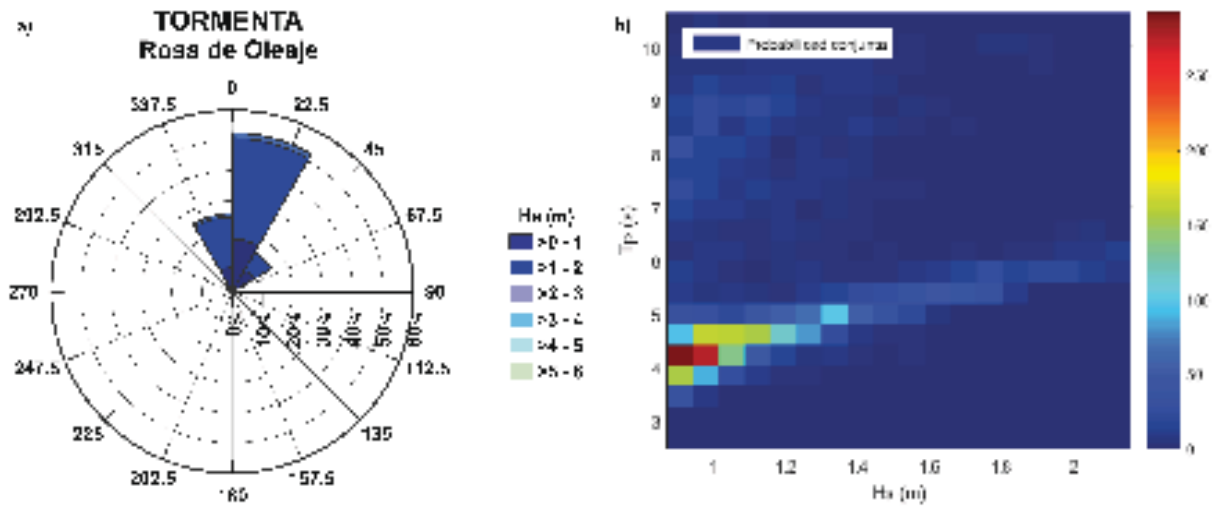


Figura 20. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.

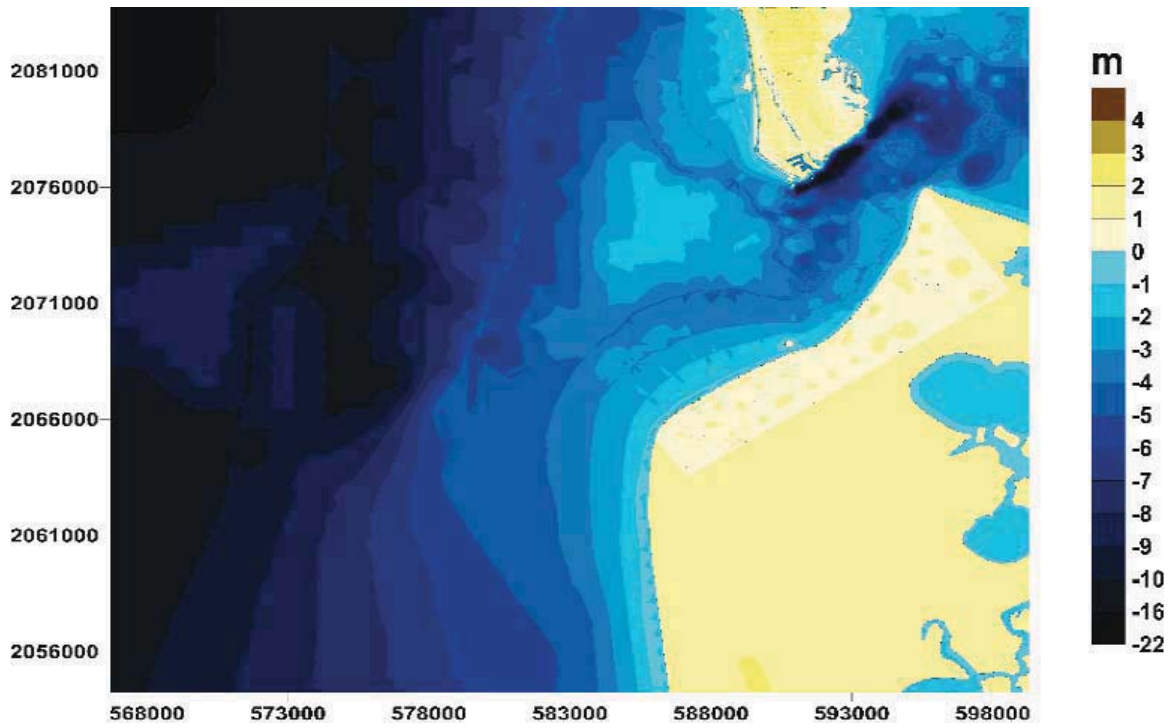


Figura 21. Modelo topobatimétrico de la zona denominada Puerto Rico, se incluye la zona de Playa Norte.

NUEVO CAMPECHITO

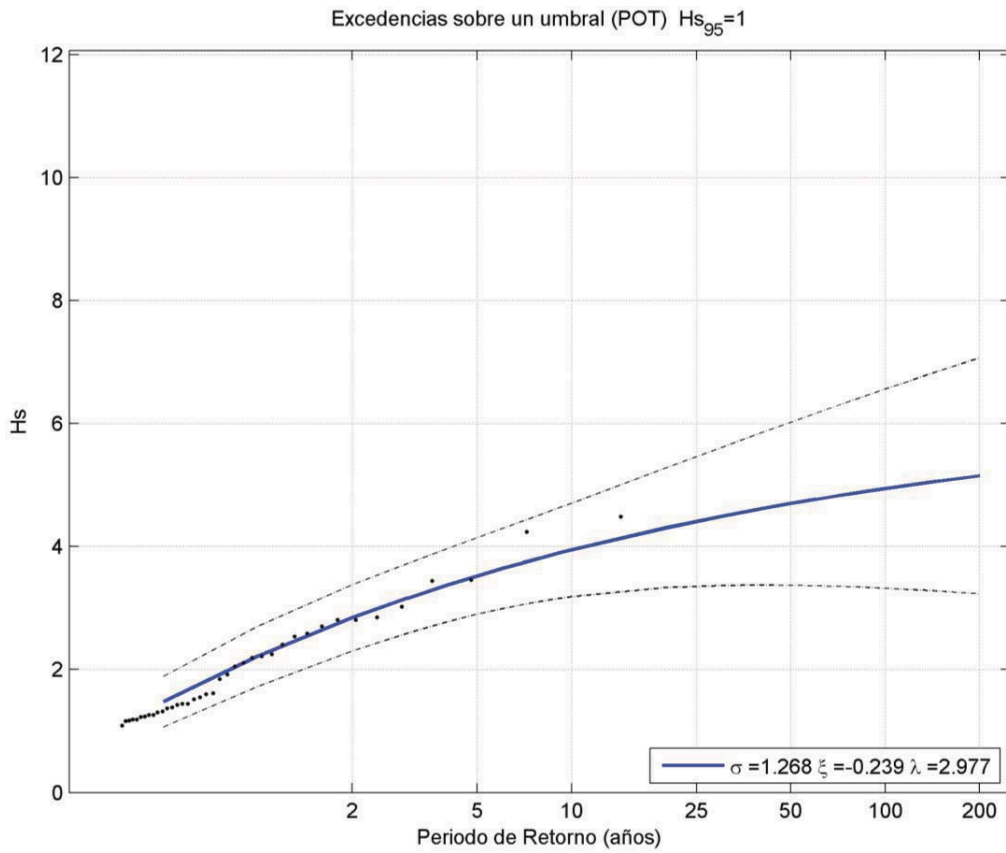


Figura 22. Resultado del método POT para la serie de oleaje febrero 2005 - marzo 2018.

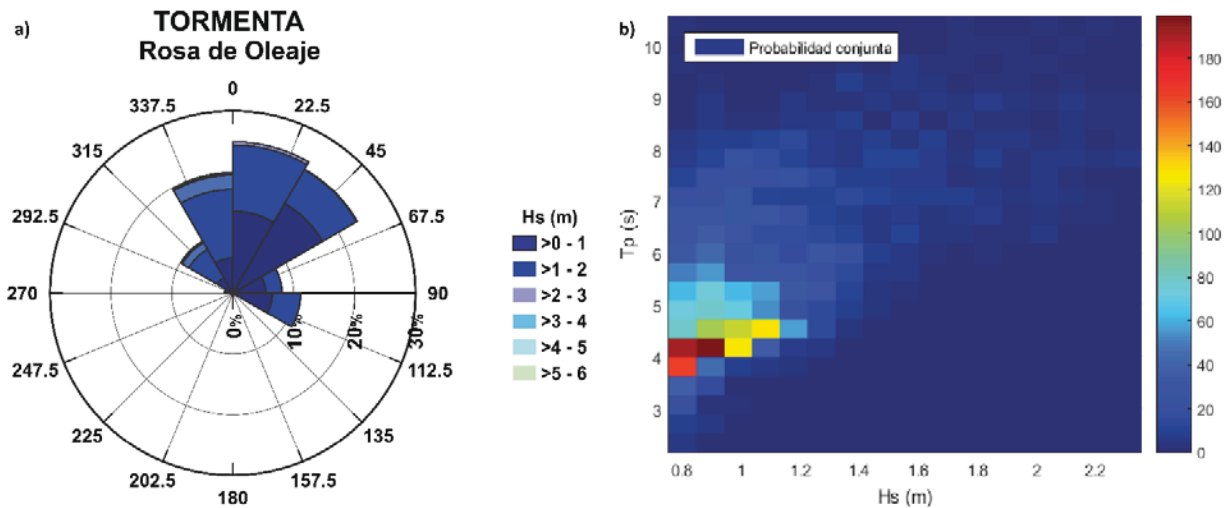


Figura 23. a) Rosa de oleaje; b) Probabilidad conjunta $p(H_s, T)$.

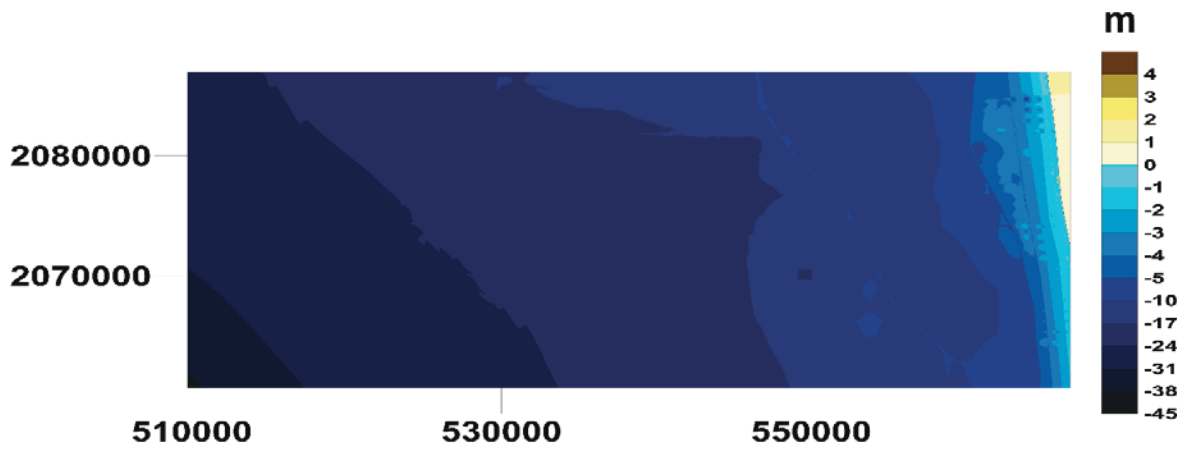


Figura 24. Modelo topobatimétrico de Nuevo Campechito.