



**Casa abierta al tiempo**

**MORFOLOGÍA Y VULNERABILIDAD  
COSTERA POR EROSIÓN  
EN EL LITORAL DE CAMPECHE, MÉXICO**

Tesis que presenta

**Bianca Stephanya Castro Soriano**

Para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)**





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
METROPOLITANA  
UNIDAD IZTAPALAPA

POSGRADO DE ENERGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE

---

---

**MORFOLOGÍA Y VULNERABILIDAD  
COSTERA POR EROSIÓN  
EN EL LITORAL DE CAMPECHE, MÉXICO**

---

---

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS  
(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)**

**PRESENTA:**

**Bianca Stephanya Castro Soriano**

Codirectores:

**Dr. Antonio Zoilo Márquez García**

**Dr. Héctor Santiago Vélez Muñoz**

México D.F., 10 de junio de 2015



# Agradecimientos

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio No. 003893; por lo que se agradece la beca recibida, para el desarrollo de esta tesis. Esta tesis fue desarrollada gracias al apoyo recibido del proyecto Divisional “*Evaluación de los Procesos de Erosión-Depósito en las playas del litoral Mexicano en Escenario de Cambio Climático y su efecto en la anidación de la tortuga marina*” apoyado por *Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa*, con vigencia del 2013 al 2016.

*La vida es muy sencilla:*

*Creas algo. La mayoría de las veces fracasa.*

*Pero a veces funciona. Entonces creas más de lo que funciona.*

*Si tiene mucho éxito, otros lo copian.*

*Y entonces haces algo distinto.*

*El truco consiste en siempre hacer algo nuevo.*

***Leonardo da Vinci***

# Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Margarita y Juan porque siempre me han apoyado en todo. Son pieza fundamental de este motor llamado *familia*, me enorgullecen y agradecer su dedicación, esfuerzo y sobre todo amor infinito, es necesario. Los quiero y he llegado a donde estoy gracias a ustedes.

A mis grandes amigos de esta vida, mis hermanos. Leticia, Joel, Ulises y Alan por el cariño, el amor y sobre todo la felicidad que me generan. Recuerden siempre: “*Los hermanos son tan unidos como los dedos de las manos y los pies*”. Los quiero más allá de esta vida.

Cuando pienso en el mayor regalo que han podido hacerme mis hermanos, no dudo en un instante en afirmar, que el ser tía ha sido para mí la mayor alegría, gracias a ustedes mis lindos sobrinos Viry, Vero, Axel, Ximena e Iker, que de una u otra forma me han hecho sonreír.

A Yadira Guerrero, por todo el animo y apoyo brindado.

Gracias al Dr. Antonio Z. Márquez García, por aceptarme como su estudiante, por la paciencia conmigo, por su confianza, por su amistad, no pude pedir más en un asesor.

Le agradezco al Dr. Héctor S. Vélez Muñoz, por la oportunidad de realizar esta tesis. Gracias por integrarme a su trabajo, por su apoyo y por compartirme sus conocimientos.

Al Dr. Arturo Carranza Edwards, a la Dra. Patricia Ramírez Romero y el Dr. Francisco J. Gutierréz Mendieta por sus observaciones, por la confianza, y por acceder a hacerme revisiones con el tiempo apretado.

Al Dr. Francisco J. Váldez Parada, por permitirme ser su aprendiz y por su amistad.

A Catherine Paez, por su amistad, su apoyo, su convivencia, por ser generadora nata de mis risas. Sobra decir lo tanto que te estimo. Gracias por hacer ameno este posgrado.

A Hugo Castillo, por tu apoyo y tus palabras de aliento cuando las he necesitado, por su amistad, por generar en mi tantas risas. Gracias por hacer ameno este posgrado.

A Mónica López, por todas sus palabras de aliento, los consejos, risas y por saber que existen mujeres increíbles logrando sus sueños cada día. Gracias, por demostrármelo.

A Pedro Marin, es un placer conversar, convivir y reír contigo, gracias por permitirme que me apoyará en ti, mis gracias infinitas te pertenecen.

A Melissa Escarcéga, porque no existen imposibles sino solo contratiempos, y que el dedo

siga en el renglón para avanzar a nuestros anhelos. Gracias por tu apoyo hoy y siempre.

A Zaira Tómas, por ser una mujer admirable y emprendedora. Doy gracias porque eres parte de mi vida, aprecio mucho tus palabras de apoyo.

A Adriana Cuevas, mujer fuerte y admirable. Por siempre recordarme que las cosas llegan a la vida justo cuando tienen que llegar. De verdad gracias por existir en mi vida.

A Arcelia Rodríguez, por haberme brindado unos minutos de su valioso tiempo cuando lo he necesitado, por brindarme tanto apoyo y palabras de aliento.

A Ricardo Barajas, por ser gran apoyo cuando más lo he necesitado. *Con la cabeza en alto.*  
Gracias

A Eva Rivera, por sus palabras y el que estés orgullosa de mi, es un gran logro, sabes que sin tu apoyo me hubiera demorado más terminar este ciclo, ¡Mil Gracias!

A parte de la Familia Castro y Soriano, siempre que he recurrido a ustedes me han apoyado y ayudado.

A mi otra familia por elección propia: Mónica Pérez, Martha Jiménez y Judith Bobadilla, por nuestra amistad longeva, porque son las únicas que me hacen reír tanto hasta llorar, y que a pesar de todo siempre nos buscamos para cada momento.

A los alumnos de Geología Marina y Seminario de Investigación del Departamento de Hidrobiología, por su apoyo técnico. Rosita Islas y Daniela Badillo en especial.

A Alfredo Nicolás, Arturo Contreras, Ricardo Dominguez, Vicente Torres y Guillermo Benitez, por ser grandes compañeros de posgrado y por los conocimientos brindados.

A todos quien me dieron palabras de apoyo a lo largo de este ciclo.

Para realizar esta tesis recibí una beca de CONACYT, Gracias a todos los mexicanos que pagan impuestos y que hacen posible este tipo de apoyos a estudiantes.

Gracias a la UAM y a todas las personas que hacen posible que funcione esta gran institución, está nuestra *Casa Abierta al Tiempo*.

¡Gracias, por todo!

Bianca S. C. S.

# Comité tutorial

*Co-director:*

**Doctor Antonio Zoilo Márquez García.** Departamento de Hidrobiología. Ciencias Básicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

*Co-director:*

**Doctor Héctor Santiago Vélez Muñoz.** Departamento de Hidrología. Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

El jurado designado por la  
**Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente**  
de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó

**BIANCA STEPHANYA CASTRO SORIANO**

El día **12** de **junio** del año **2015**

**Miembros del Jurado**

**Dr. Arturo Carranza Edwards**

*Presidente*

**Dra. Patricia Ramírez Romero**

*Secretario*

**Dr. Francisco José Gutiérrez Mendieta**

*Vocal*



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00004

Matrícula: 2131800525

MORFOLOGIA Y VULNERABILIDAD  
COSTERA POR EROSION EN EL  
LITORAL DE CAMPECHE, MEXICO

En México, D.F., se presentaron a las 12:00 horas del día 12 del mes de junio del año 2015 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS  
DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ MENDIETA  
DRA. PATRICIA RAMIREZ ROMERO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: BIANCA STEPHANYA CASTRO SORIANO



BIANCA STEPHANYA CASTRO SORIANO

ALUMNA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

LIC. JULIO CÉSAR DE LARA ISASSI  
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTE

DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS

VOCAL

DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ  
MENDIETA

SECRETARIA

DRA. PATRICIA RAMIREZ ROMERO

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Introducción</b>	<b>5</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>9</b>
<b>2. Hipótesis y objetivos</b>	<b>11</b>
2.1. Hipótesis . . . . .	11
2.2. Objetivo general . . . . .	11
2.3. Objetivos particulares . . . . .	11
<b>3. Metodología</b>	<b>13</b>
3.1. Trabajo de campo . . . . .	13
3.1.1. Levantamiento de perfiles de playa . . . . .	13
3.1.2. Muestreo de sedimentos de la zona litoral . . . . .	14
3.1.3. Encuesta: Opinión pública y zona litoral . . . . .	15
3.2. Trabajo de laboratorio . . . . .	15
3.2.1. Análisis granulométrico . . . . .	15
3.2.2. Composición mineral de los sedimentos . . . . .	18
3.3. Trabajo de gabinete . . . . .	18
3.3.1. Análisis histórico de la línea de costa . . . . .	18
3.3.2. Análisis morfológico de la zona litoral . . . . .	19
3.3.3. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) . . . . .	19

3.3.4.	Análisis granulométrico y composición mineralógica . . . . .	21
3.3.5.	Índice de vulnerabilidad costera -IVC- . . . . .	21
3.3.6.	Encuesta: Opinión pública y zona litoral . . . . .	24
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>29</b>
4.1.	Cambios históricos de la línea de costa . . . . .	29
4.2.	Cambios morfológicos estacionales de las playas . . . . .	34
4.2.1.	Playa Norte . . . . .	35
4.2.2.	Club de Playa . . . . .	36
4.2.3.	Bahamita . . . . .	37
4.2.4.	Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (CASES)	38
4.2.5.	San Nicolás . . . . .	39
4.2.6.	Puerto Real . . . . .	40
4.2.7.	Isla Aguada . . . . .	43
4.2.8.	KM 45 . . . . .	44
4.2.9.	Las Bombas . . . . .	45
4.2.10.	Villa Quietud . . . . .	46
4.2.11.	Sabancuy . . . . .	47
4.2.12.	Chenkan . . . . .	48
4.2.13.	Puente Dos Bocas . . . . .	49
4.2.14.	Punta Chen . . . . .	50
4.2.15.	Xochen . . . . .	51
4.3.	Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) . . . . .	52
4.3.1.	Secas 2013 . . . . .	54
4.3.2.	Lluvias 2013 . . . . .	55
4.3.3.	Nortes 2014 . . . . .	56
4.3.4.	Lluvias 2014 . . . . .	58
4.4.	Distribución espacio-temporal de los sedimentos litorales . . . . .	60
4.4.1.	Playa Norte . . . . .	61
4.4.2.	Club de Playa . . . . .	62
4.4.3.	Bahamita . . . . .	63

4.4.4. Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (CASES)	64
4.4.5. San Nicolasito . . . . .	65
4.4.6. Puerto Real . . . . .	66
4.4.7. Isla Aguada . . . . .	67
4.4.8. KM 45 . . . . .	68
4.4.9. Las Bombas . . . . .	69
4.4.10. Villa Quietud . . . . .	70
4.4.11. Sabancuy . . . . .	71
4.4.12. Chenkan . . . . .	72
4.4.13. Puente Dos Bocas . . . . .	73
4.4.14. Punta Chen . . . . .	74
4.4.15. Xochen . . . . .	75
4.5. Síntesis de las variaciones texturales en la infraplaya, mesoplaya y supraplaya . .	76
4.5.1. Infraplaya . . . . .	76
4.5.2. Mesoplaya . . . . .	77
4.5.3. Supraplaya . . . . .	78
4.6. Composición de los sedimentos litorales . . . . .	79
4.7. Índice de Vulnerabilidad Costera -IVC- . . . . .	81
4.8. Opinión pública de la zona litoral . . . . .	83
<b>Conclusiones</b>	<b>87</b>
<b>Recomendaciones o Perspectivas</b>	<b>91</b>
<b>Referencias</b>	<b>92</b>
<b>5. Apéndice A</b>	<b>97</b>
5.1. El Estado de Campeche y la situación socioeconómica . . . . .	97
<b>6. Apéndice B</b>	<b>101</b>
6.1. Opinión pública y la zona litoral . . . . .	101
<b>7. Apéndice C</b>	<b>103</b>
7.1. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) de las diferentes épocas . . . . .	103



# Índice de figuras

3.1. Localización de los sitios de los levantamiento de los perfiles de playa . . . . .	13
3.2. Subzonas de playa Modificado de Carranza-Edwards (2001) . . . . .	14
3.3. Triángulo de clasificación general de sedimentos marinos (Rothwell, 1989) . . . . .	18
3.4. Triángulo de clasificación para los sedimentos carbonatados con componentes silicoclásticos (Lewis, 1984) . . . . .	18
4.1. Localización de las principales obras de protección costera en el litoral del municipio del Carmen. Enrocamiento ( <i>beach rock</i> ) en Puerto Real y Punta Chen, Escolleras en la Boca de Sabancuy, Espigones cercanos a la playa de KM 45 y tetrapodos presentes en Puente Dos Bocas. . . . .	29
4.2. Procesos de erosión continua y erosión-acumulación detectada en el litoral de Campeche. De 2004 hasta el año 2013. . . . .	29
4.3. a) Sección Oeste de la Isla del Carmen, donde se observa la lengüeta para el año 2004 cercana a Playa Norte, (línea verde para la costa de 2004, línea amarilla para 2011, línea morada 2013). b) Sección Este de la Isla del Carmen, que comprende desde CASES hasta Puerto Real, donde no se encuentra variación marcada en la línea de costa. . . . .	30
4.4. a) Isla Aguada hasta Km 45, en donde se observa en la playa que se encuentra en el KM 45 una disminución en la línea de costa a partir del 2004 hasta 2013. b) Sección que va del sitio Las Bombas hasta Sabancuy en donde se observa que no existieron cambios significantivos a lo largo de la línea de costa. c) Sección del área de estudio de Chenkan hasta Xochen donde existe fluctuación de acreción-erosión.	41

4.5. a)Espigones cercanos a la playa del KM 45, se aprecia una protección de rocas hacia la carretera. b) Escollera cercana a la playa de Sabancuy. c) Fila de tetrápodos presentes en la playa Puente Dos Bocas. . . . .	41
4.6. a)Toma de perfiles de playa, en el litoral de Campeche, b)Porción del litoral con manglar en recuperación, c) Recolecta de muestras de sedimentos correspondiente al perfil muestreado y d)Toma del perfil topográfico donde se observa la rompiente de la ola corresponde a la zona de infraplaya. . . . .	41
4.7. Playa Norte y la porción de manglares que se esta perdiendo en la zona. . . . .	41
4.8. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Playa Norte. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	41
4.9. La flecha señala la bahía que fue formada por la erosión de la playa. . . . .	41
4.10. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Club de Playa. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	41
4.11. La flecha señala la Punta Brigitte Bardot localizada en las cercanías de la playa de Bahamita. Por otro lado se aprecian los pilares que conformaban una palapa, esta playa se encuentra en erosión continua. . . . .	41
4.12. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Bahamita. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	41
4.13. Las flechas los escalones formados, causados por el fuerte oleaje principalmente en nortes, afectando las construcciones urbanas cercanas. . . . .	41
4.14. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, CASES . b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	42
4.15. Las bases de las torres de las líneas de transmisión de energía eléctrica ya estas expuestas, pues la pérdida de material arenoso es evidente a lo largo de esta playa.	42
4.16. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, San Nicolasito. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	42
4.17. Playa Puerto Real con roca de playa en la zona de infraplaya, ésta protege la porción arenosa. . . . .	42
4.18. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Puerto Real. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	42

4.19. Isla Aguada una de las playas más extensas de la zona de estudio. El puente vehicular que conecta la carretera Ciudad del Carmen-Champotón actúa como barrera para la acumulación de sedimentos. . . . .	43
4.20. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Isla Aguada. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	43
4.21. Playa en el KM 45, de la carretera Ciudad del Carmen-Champotón, se observa al fondo los espigones cercanos a la playa y la protección de roca de la carretera que freno la erosión, por otro lado se aprecia los escarpes presentes en el sitio. . .	44
4.22. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, KM 45. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	44
4.23. Parte de la playa de las Bombas, se observa la acumulación y la cercanía a las torres de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad. . . . .	45
4.24. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Las Bombas. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	45
4.25. Playa Villa Quietud, es una de las playas que presenta poco impacto humano. Se aprecia el escarpe provocado por el oleaje. . . . .	46
4.26. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Villa Quietud. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	46
4.27. Playa de Sabancuy con presencia de escalones y material de infraestructuras arrastradas por el oleaje. . . . .	47
4.28. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Sabancuy. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	47
4.29. La playa de Chenkan es una de los principales sitios de anidación de la tortuga marina, ya que es idónea tanto en su textura de sedimentos como la amplitud de la playa. . . . .	48
4.30. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Chenkan. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	48
4.31. Descarga de agua proveniente de los manglares, se puede observar la fila de tetrápodos, lo cuales atrapan sedimentos en la parte alta de la playa. . . . .	49
4.32. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Puente Dos Bocas. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	49

4.33. Punta Chen con roca de playa en la subzona de mesoplaya, que protege la porción arenosa. . . . .	50
4.34. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Punta Chen. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	50
4.35. Playa en proceso de erosión-acumulación. . . . .	51
4.36. a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Xochen. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles. . . . .	51
4.37. Perfil de "Tormenta", perfil de erosión. Tomado de Rijn (1998). . . . .	53
4.38. Perfil "Normal", perfil de acumulación. Tomado de Rijn (1998). . . . .	53
4.39. a)Representación de los perfiles pertenecientes a la época de secas 2013. b)Modos principales para la época secas 2013, Modo 1 (negro) y Modo 2(rojo). . . . .	54
4.40. a) Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. b) Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. . . . .	57
4.41. a) Representación de los perfiles para la época de lluvias 2013. b) Modos principales para la época lluvias 2013 . . . . .	57
4.42. a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. . . . .	57
4.43. a)Representación de los perfiles pertenecientes a la época de nortes 2014. b)Modos principales para la época de nortes 2014. . . . .	57
4.44. a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014. . . . .	57

4.45. a)Representación de los perfiles pertenecientes a la época de lluvias 2014.	
b)Modos principales para la época lluvias 2014. . . . .	58
4.65. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la subzona de supraplaya. . . . .	78
4.67. Procedencia de los sedimentos de la zona litoral (verde-sedimentos biogénicos, arena-sedimentos de transición) Modificado de Márquez <i>y col.</i> (2008). . . . .	80
4.68. Índice de vulnerabilidad a lo largo del litoral de Campeche. . . . .	82
4.70. Percepción acerca de las campañas informativas ante el cambio climático*. (*) <i>En general, ¿En los últimos cinco años, se ha enterado de campañas informativas     sobre riesgos asociados al cambio climático?</i> . . . . .	83
4.73. Calificación del gobierno antes los desastres naturales*. (*) <i>¿Cómo calificaría la     gestión de las autoridades locales, estatales y federales frente al cambio climático?</i> . . . . .	84
4.46. a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. . . . .	85
4.47. Distintas zonas sedimentarias a lo largo del litoral de Campeche. a) Zona de <i>beach rock</i> , donde ésta actúa como 'trampa' de sedimentos. b) Playa con vestigios de lo que fue alguna vez un tetrápodo. c) Playa con escalón en la parte de la supraplaya, cercana a la vegetación local. d) Material vegetal a lo largo de la playa, el cual se observa en época de lluvias. . . . .	85
4.48. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Playa Norte. . . . .	85
4.49. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Club de Playa. . . . .	85
4.50. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Bahamita. . . . .	85
4.51. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de CASES. . . . .	85
4.52. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de San Nicolasito. . . . .	85
4.53. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Puerto Real. . . . .	85
4.54. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Isla Aguada. . . . .	85
4.55. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de KM 45 . . . . .	85
4.56. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Las Bombas. . . . .	85
4.57. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Villa Quietud . . . . .	85

4.58. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Sabancuy . . . . .	85
4.59. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Chenkan. . . . .	85
4.60. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Puente Dos Bocas. . . . .	85
4.61. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Punta Chen. . . . .	85
4.62. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Xochen. . . . .	85
4.63. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la subzona de infraplaya. . . . .	85
A.1. El arenal costero (a) y una zona inundable (c) han sido fragmentados por infraestructura costera(b y d) y civil (e-h), impidiendo el flujo natural de los sedimentos. . . . .	99
A.2. El litoral de Campeche alberga ecosistemas de manglares (b y c) , pastos marinos (d) y es refugio de aves migratorias (a). . . . .	99
B.1. Salida de la plataforma digital SurveyMonkey, con las 10 preguntas. . . . .	101
B.2. Salida de la plataforma digital SurveyMonkey, con las 10 preguntas. . . . .	102
C.1. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. . . . .	103
C.2. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. . . . .	104
C.3. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época nortes 2014. . . . .	105

C.4. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. . . . . 106



# Índice de tablas

3.1. Localización de los sitios de playa y perfiles de playa . . . . .	14
3.2. Escala de tamaño de Wentworth . . . . .	16
3.3. Desviación estándar gráfica inclusiva . . . . .	17
3.4. Grado de asimetría gráfica $SK_I$ . . . . .	17
3.5. Curtosis . . . . .	17
3.6. Variable componente ITOPO . . . . .	22
3.7. Ponderación del índice topográfico . . . . .	23
3.8. Clasificación de la variable de geomorfología(MOR) . . . . .	23
3.9. Clasificación de la variable “Rango mareal medio” (TID) . . . . .	23
3.10. Ponderación de la variable, tasa de erosión (TERO) . . . . .	23
3.11. Ponderación de la variable “Nivel relativo del mar” (LEV) . . . . .	24
3.12. Clasificación del oleaje significativo medio (HS) . . . . .	24
4.1. Tasa de erosión por sitio a lo largo de la costa de Campeche. Donde $E - A^1$ Erosión-Acumulación total (m); $D.A.^2$ Desplazamiento total (m), para 2004-2013. De color rojo los sitios más críticos en erosión. . . . .	31
4.2. Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES . . . . .	54
4.3. Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES . . . . .	55
4.4. Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES . . . . .	56
4.5. Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES . . . . .	58
4.7. Ponderaciones para el Índice de Vulnerabilidad Costera -IVC- . . . . .	81
4.9. Percepción sobre cuál es el principal problema de la zona costera*. (*) ¿Cuál <i>diría usted que es el principal problema de la zona costera?</i> . . . . .	83

- 4.11. Eventos meteorológicos con mayor percepción\*. (\*) *¿Qué eventos de riesgo, percibe usted que han tenido mayor frecuencia e intensidad sobre la población?* . 83
- 4.13. Alternativas productivas ante el cambio climático\*. (\*) *¿Cuáles cree usted que serían las alternativas productivas para hacer frente al cambio climático?* . . . . 84

# Resumen

Durante la temporada de secas, lluvias y nortes del 2013 y 2014 se realizaron levantamientos topográficos en 15 playas del litoral de Campeche, México, se elaboró un análisis morfológico con el fin de determinar los procesos de erosión-deposito presentes y un análisis de línea de costa de diferentes años 2004, 2011 y 2013 con imágenes de satélite para definir las áreas de erosión o acumulación y tasas de erosión. Se colectaron muestras de sedimentos para analizar las condiciones energéticas del ambiente y la procedencia de los sedimentos a través de análisis granulométricos y de composición mineral. Se realizó un análisis de funciones empíricas ortogonales para conocer los distintos modos de variación a lo largo del litoral. Con los datos geológicos/morfológicos y físicos/hidrodinámicos obtenidos se calculó el índice de vulnerabilidad costera. Además se realizó una encuesta a 200 personas de la opinión pública de la zona litoral, para conocer la percepción social de los fenómenos de erosión, cambio climático, riesgo y de medidas preventivas. Los resultados mostraron que en el litoral de Campeche dominan dos procesos geológicos: erosión continua y fluctuación erosión-deposito. Con el estudio de las funciones empíricas ortogonales se determinaron dos modos de variación: perfil de “Tormenta” y perfil “Normal”. Así mismo se identificaron dos tipos de sedimentos: de transición (material terrígeno y/o calcáreo) en los que dominan arenas finas y biogénicos constituido por arenas gruesas compuestas por restos calcáreos de organismos erosionados. Los sitios con vulnerabilidad muy alta se encuentran en la Isla del Carmen: Playa Norte, Bahamita, CASES y San Nicolasito; alta en los sitios que están asociados a las salidas de las Bocas: Las Bombas, Sabancuy y Puente Dos Bocas; media para los que presentan playas de larga extensión Isla Aguada, KM 45, Villa Quietud, Chenkan y Punta Chen; y finalmente baja para aquellos que presentan protección natural en la infraplaya como es el *beach rock* Puerto Real. El 80 % de los encuestados consideran que el litoral es de suma importancia, pero solo cerca del 13 % entiende la problemática de la

erosión costera, así mismo el 90% ignora la existencia del Atlas de Riesgo Municipal, para hacer frente a los riesgos hidrometeorológicos. La erosión está siendo generada principalmente por condiciones hidrometeorológicas de cada época, y secundariamente por las infraestructuras costeras de protección (escolleras, espigones, tetrápodos). Los sitios críticos de erosión son Playa Norte, Club de Playa, CASES, Km 45. Las medidas de mitigación son necesarias para cada uno de los sitios, pero deben de establecerse con el estudio y modelado adecuado para definir si las infraestructuras costeras de protección tendrían un beneficio hacia la porción del litoral.

# Abstract

During the dry season, rain and norths 2013 and 2014 topographic surveys were performed in 15 beaches on the coast of Campeche, Mexico, a morphological analysis was developed in order to determine the present deposit-erosion and an analysis coast of different years 2004, 2011 and 2013 satellite images to identify areas of erosion or accumulation and erosion rates. Sediment samples were collected to analyze the energy conditions of the environment and the origin of sediments by grain size and mineral composition analysis. An analysis of empirical orthogonal functions was performed to know the different modes of variation along the coast. With geological / morphological and physical / hydrodynamic data obtained coastal vulnerability index was calculated. In addition, a survey was conducted to 200 people from the public opinion in the coastal area, to meet the social perception of the phenomena of erosion, climate change, risk and preventive measures. The results showed that on the coast of Campeche two geological processes dominate: continuous erosion and erosion-deposit fluctuation. With the study of empirical orthogonal functions two modes of variation were determined: Profile of "Storm" and profile "Normal". Furthermore two types of sediment were identified: of Transition (terrigenous material and / or limestone) were dominate biogenic thinly sands and coarse sands composed of limestone eroded bodies. Sites with very high vulnerability are found in the Isla del Carmen: Playa Norte, Bahamita, CASES and San Nicolasito; high on sites that are associated with the outputs of the Lagoonal bottom, Sabancuy and Puente Dos Bocas: medium for those with long stretch beaches of Isla Aguada, KM 45, Villa Quietud, Chenkan and Punta Chen; and finally to those with low natural protection in infrashore such as rock beach Puerto Real. The 80 % of respondents believe that the coast is paramount, but only about 13 % knows about the problem of coastal erosion, furthermore 90 % ignores the existence of the Municipal Risk Atlas to face hydro meteorological risks. Erosion is being generated mainly by hydro meteorological

conditions of each era, and secondarily by coastal protection infrastructure (breakwaters, jetties, tetrapods). Critical erosion sites are North Beach, Beach Club, CASES, KM 45. Mitigation measures are necessary for each of the sites, but must be established with proper study and modeling to determine whether coastal protection infrastructure would have a benefit to the portion of the coast.

# Introducción

Los espacios litorales pertenecen a sistemas naturales frágiles y dinámicos sobre los que intervienen un gran número de factores de diferente escala, naturaleza y magnitud, y su preservación está directamente relacionada con la posibilidad de adaptación natural a cambios dinámicos provocados por agentes de carácter natural, y/o de carácter antrópico. En las últimas décadas la ocupación de la costa por parte del hombre ha sido masiva, rápida y acultural, produciéndose un proceso de litoralización y turistificación acelerado (Cerdá, 2002). Este proceso ha modificado el paisaje y sus usos naturales y tradicionales, ya sea de forma intencionada o no. En muchas ocasiones se ha afectado la dinámica natural del litoral a diferentes escalas y con modificaciones de diferente grado no circunscribiéndose únicamente al espacio intervenido. Estas actuaciones de desvirtualización han creado en algunos espacio y la degradación completa del litoral y la dependencia de éste a actuaciones de regeneración artificial de playas (Rodríguez-Perea *y col.*, 2000), siendo estas regeneraciones el factor clave del avance del sector turístico en algunos espacios (Obiol, 2003). Debido a estas acciones se han creado conceptos erróneos del espacio visitado, lo que afecta la percepción de los usuarios, e incluso de los gestores (Roig, 2002). Varios factores influyen en la conformación de los procesos de dinámica costera: factores geológicos como el tipo de litología costera, sedimentológicos como los tipos y clasificación de los materiales granulares de las playas, biológicos como la presencia de ecosistemas de manglares, pastos marinos, arrecifes, etc., oceánicos como la distribución de corrientes y naturaleza del oleaje, climáticos como la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos y efectos del cambio climático, y antrópicos como la construcción de diversos tipos de obras e intervención humana en la zona costera. Krumbein y Sloss (1963) mencionan que los procesos costeros que afectan el litoral ocurren en escalas de tiempo que varían desde instantes (horas) hasta intervalos geológicos (miles o millones de años). La comprensión de estos procesos

requiere del estudio de la dinámica que domina y controla la zona litoral y es necesario considerar todas las escalas y distinguir la combinación de los factores más relevantes que se presentan. Los procesos que gobiernan la dinámica litoral como la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía originados por el oleaje y las corrientes marinas causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo en las épocas de lluvias y nortes cuando los cambios son mas intensos, principalmente por la frecuencia e intensidad de los oleajes. Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento en que se construyen vías de comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc. en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) alterando el transporte litoral y la morfología de la playa (Torres *y col.*, 2010). En México, el estado de Campeche representa un área estratégica de gran importancia económica (zona petrolera) y ecológica ( manglares, zonas lagunares, especies de tortugas marinas en peligro de extinción desovan en sus costas) que sufre los efectos del incremento del nivel del mar y la presencia de marea de tormenta más severa. Algunos estudios, como el de Pérez (1992), Pérez y Linares (2000a) y Pérez y Linares (2000b); indican que el 58.41 % de la población del Estado está en situación vulnerable ante un incremento de 1.0 m en el nivel del mar (440 910 habitantes). La mayor concentración de la población afectada, se ubica en Ciudad del Carmen (154 197 habitantes) y Campeche (211 671 habitantes) INEGI (2010). El cambio climático incrementará la inundación y erosión costera en un futuro. Adicionalmente, también se espera un mayor número e intensidad de tormentas, por lo que se producirá un aumento en la probabilidad de incidencia de mareas de tormenta extremas sobre las costas ( 4-6 m). Estas mareas pueden hacer que las zonas afectadas se extiendan entre los 11 y los 16 km tierra adentro en las zonas bajas (1-2 m sobre el nivel del mar). En playas sujetas a procesos erosivos el número de nidos de tortuga es menor que en las playas estables (Bolongaro-Crevena *y col.*, 2010). El proceso de la erosión costera es el resultado de la combinación de factores naturales y antropogénicos que tienen lugar a diferentes escalas espaciales y temporales. Respecto a los factores naturales, se encuentran principalmente la incidencia de tormentas sobre las costas, las corrientes de resaca y de litoral, el aumento relativo del nivel medio del mar. Mientras que respecto al factor humano, la principal influencia está determinada por la destrucción de dunas (construcciones sobre ellas) y la alteración de

flujos naturales de sedimento a lo largo de las costas, por medio de la colocación de estructuras perpendiculares al transporte litoral (rompeolas, malecones, muelles, escolleras y espigones).

Este estudio se enfoca en el análisis de la morfología y vulnerabilidad de la zona litoral del estado de Campeche, desde Playa Norte hasta Xochén, durante el periodo comprendido desde la época secas 2013 hasta lluvias 2014, con el fin de conocer la tendencia de la línea de costa por los efectos a nivel global como es el cambio climático y la consecuente elevación del nivel del mar, hasta los efectos locales como la interrupción del transporte litoral causado por infraestructura costera y efectos antropogénicos.



# Capítulo 1

## Antecedentes

En el Golfo de México, existen numerosas investigaciones científicas sobre las características oceanográficas, biológicas, químicas, físicas y geológicas, sin embargo, en este caso solo tuvo un estudio sobre la Dinámica costera del estado de Campeche.

La zona litoral del Golfo de México en su parte Sur ha sido estudiada por varios autores desde diferentes puntos de vista y en diversas épocas, por ejemplo: la sedimentología de las playas de Campeche (Carranza-Edwards, 2001), el retroceso de la línea de costa en el río San Pedro y San Pablo (Pérez y Linares, 2000a) y cambios morfológicos de la línea de costa por efectos del huracán Roxana, así como también la evaluación del impacto del litoral para a la anidación de tortugas marinas. Villanueva-Fragoso *y col.* (2010) por su parte determinaron el grado de vulnerabilidad de las costas de México, incluidas entre ellas las del estado de Campeche.

Trabajos como Ojeda-Zújar *y col.* (2009) y Zújar *y col.* (2008), detallan una de las metodologías más utilizadas como aproximación al cálculo de la vulnerabilidad de las costas (entendida como sensibilidad ante un fenómeno y capacidad de adaptación) frente a la potencial subida del nivel del mar asociado al cambio climático, este es *Índice de Vulnerabilidad Costera*(IVC). Se trata de un “valor integrado”, calculado a partir de 6 variables (geomorfología, pendiente, tasas de erosión costera, altura del oleaje significante, cambios del nivel relativo del mar y rango mareal medio).

El incremento en la erosión costera está también catalogado como uno de los impactos del incremento en el nivel del mar en el litoral. Evidentemente, el conocimiento de la costa en zonas con elevaciones bajas es primordial para un correcto diseño de obras de protección, sean suaves (rellenos artificiales), duras (muros verticales de contención) o combinaciones de ambas (Hamm

*y col.*, 2002). La respuesta natural de los sistemas costeros con déficit de sedimento será la inundación, esto implica el retroceso de la línea de costa delimitado por la pendiente local de la zona costera. Las pendientes en zonas con baja o nula disponibilidad de sedimentos pueden ser tan suaves como 1 a 1000, lo que resulta en un retroceso de la playa a una velocidad tres órdenes de magnitud más rápida que la que se presenta en escenarios normales de la subida de nivel del mar (el fenómeno se amplifica).

Cabe mencionar que toda la costa de Campeche está expuesta a eventos extremos de oleaje y mareas de tormenta inducidos por la presencia de huracanes y nortes. Estos eventos causan cambios significantes en la línea de costa (de hasta decenas de metros), y la tendencia general de la costa dependerá de su capacidad de recuperación después de los eventos. Es decir, es normal observar en el mediano plazo, periodos de acreción y erosión en los sistemas costeros. En consecuencia, para diagnosticar de mejor manera las condiciones de la línea de costa del Estado de Campeche se requiere una extensión del trabajo realizado por Torres *y col.* (2010).

## Capítulo 2

# Hipótesis y objetivos

### 2.1. Hipótesis

Las playas de Campeche presentan un alto grado de erosión en algunos sitios, causados principalmente por fenómenos antropogénicos y secundariamente por fenómenos naturales (hidrometeorológicos).

### 2.2. Objetivo general

Determinar la dinámica costera de erosión-acreción, para definir el grado de deterioro ambiental y vulnerabilidad del ecosistema costero en el litoral de Campeche.

### 2.3. Objetivos particulares

1. Determinar los cambios morfológicos ocurridos en la zona litoral así como en la línea de costa causados por proceso de erosión-acreción y relacionados con procesos ambientales.
2. Analizar el tamaño y la composición espacio-temporal de los sedimentos litorales con el fin de identificar la importancia de los sedimentos terrígenos y calcáreos, como fuente generadora de sedimentos hacia el litoral.
3. Determinar la vulnerabilidad costera de Campeche ante el cambio climático (elevación del nivel del mar y cambios hidrometeorológicos).

4. Evaluar el conocimiento de la sociedad acerca de los problemas resultado del cambio climático y los efectos erosivos en la zona litoral, así como de las medidas de adaptación ante este fenómeno.
5. Plantear medidas preventivas y/o de adaptación ante de los impactos identificados en el área de estudio.

## Capítulo 3

# Metodología

El estudio de la dinámica costera requiere de una metodología compuesta y compleja de investigación que comprende el muestreo y análisis de los factores que influyen en la dinámica costera en un período de tiempo que permita identificar las variaciones costeras que generalmente dependen de las condiciones meteorológicas.

La presente investigación incluye técnicas topográficas, sedimentológicas y de análisis hidrometeorológico que permiten al conocimiento de la dinámica costera que ha suscitado cambios en la línea de costa y su sedimentología a lo largo del tiempo.

### 3.1. Trabajo de campo

Las actividades de campo consistieron en un monitoreo estacional para las épocas de secas y lluvias de 2013, nortes y lluvias de 2014, abarcando cuatro periodos estacionales que han permitido tener un conocimiento único sobre la dinámica costera del área de estudio al integrar los resultados del ciclo anual.

#### 3.1.1. Levantamiento de perfiles de playa

Para llevar a cabo el análisis morfológico de la zona litoral se realizó un levantamiento topográfico de 51 perfiles de playa en 15 sitios, en 4 épocas climáticas (Figura 3.1).

Los perfiles de playa abarcaron las subzonas de la zona litoral denominadas: infraplaya, mesoplaya y supraplaya para cada perfil (Figura 3.2). Definiendo las subzonas como:

**a) Supraplaya:** Zona superior de la playa al nivel de marea alta hacia el continente, delimitado

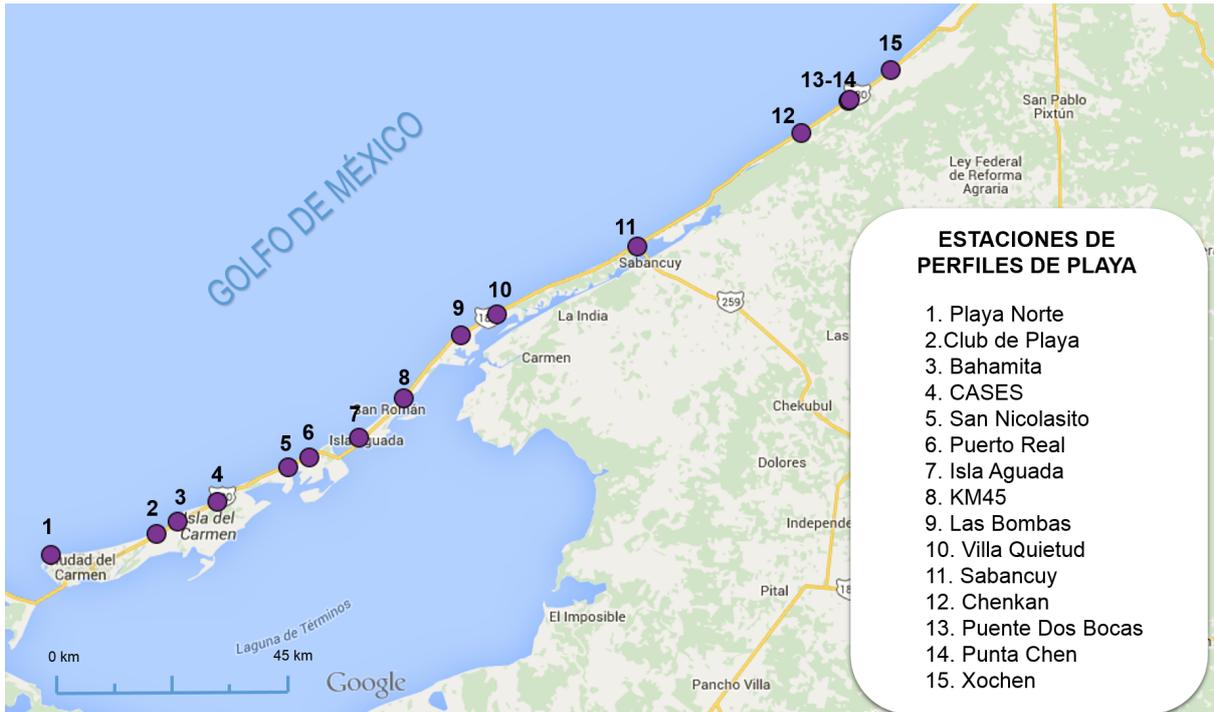


Figura 3.1. Localización de los sitios de los levantamiento de los perfiles de playa

por vegetación, dunas o construcciones.

b) **Mesoplaya:** Zona de la playa comprendida entre el nivel de marea baja y alta, en la zona del lavado del oleaje.

c) **Infraplaya:** Zona de la playa sumergida en la cual el oleaje “siente” fondo y el material no consolidado entra en movimiento hasta el nivel de marea baja.

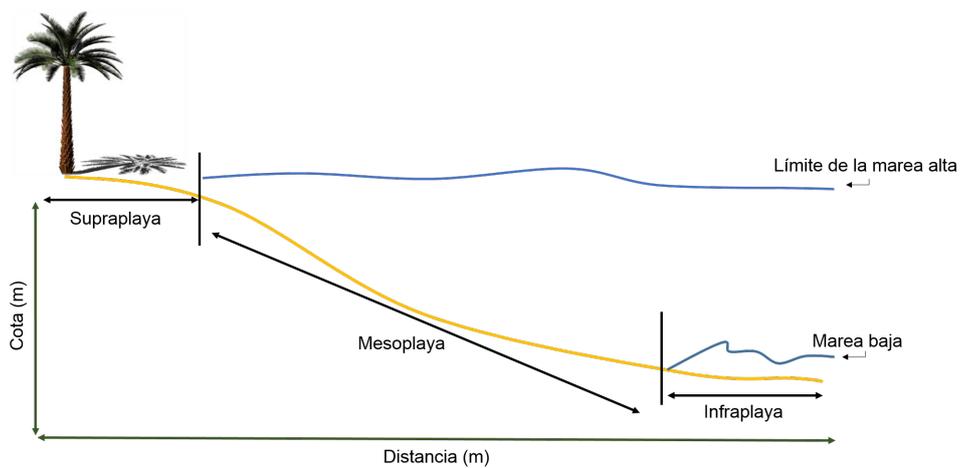


Figura 3.2. Subzonas de playa Modificado de Carranza-Edwards (2001)

**Tabla 3.1.** Localización de los sitios de playa y perfiles de playa

Sitio	Perfil	E-UTM	N-UTM
Playa Norte	1	622254.30	2064086.23
Club de Playa	2	634548.74	2066583.10
Bahamita	3	637101.66	2068046.39
CASES	4	641741.38	2070484.83
San Nicolasito	5	649893.43	2074553.96
Puerto Real	6	652315.32	2075659.04
Isla Aguada	7	658182.04	2078010.09
KM 45	8	663310.80	2082702.90
Las Bombas	9	669853.28	2090072.88
Villa Quietud	10	673997.00	2092617.09
Sabancuy	11	690319.62	2100682.91
Chenkan	12	709200.24	2114107.72
Puente Dos Bocas	13	714783.72	2117899.61
Punta Chen	14	714791.91	2117948.92
Xochen	15	719616.59	2121469.16

De los resultados de la evolución histórica e identificación en campo de sitios críticos principales por erosión se llevó a cabo la ubicación geográfica de los sitios de playa (Tabla 3.1). Se trazaron perfiles normales a la línea de costa. En época de secas 2013 se tomaron de 7 sitios de playa, 15 en lluvias, 14 en nortes 2014 y 15 en lluvias 2014.

### 3.1.2. Muestreo de sedimentos de la zona litoral

Asociado con los perfiles, se colectó sedimento de las subzonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya de la zona litoral. En secas 2013 se colectaron sedimentos en 7 sitios de playa, 15 sitios de playa en lluvias 2013 y 14 en nortes 2014, con un total de 36 perfiles y 108 muestras de sedimentos para las tres épocas climáticas de secas 2013 a nortes 2014.

### 3.1.3. Encuesta: Opinión pública y zona litoral

La investigación por encuestas consiste en establecer reglas que permitan acceder de forma científica a lo que las personas opinan. Con esta metodología se presentan cuestiones a un conjunto de individuos, que se presume son representativos de su grupo de referencia, para conocer sus actitudes con respecto al tema objeto de estudio. En este caso poniendo énfasis de la zona litoral, en esta sección se obtuvo la información sobre la opinión pública. En el Apéndice A, presenta las características socioeconómicas del estado de Campeche. Para

lograr esto se aplicó la encuesta “Opinión pública de la zona litoral”, 150 encuestas de opción múltiple en formato impreso se aplicó a lo largo de los sitios de muestreo y el resto de ellas la resolvió a través de la plataforma digital *SurveyMonkey*<sup>1</sup> en el siguiente link <https://es.surveymonkey.com/s/QLFR5T6>, dando como resultado 200 encuestas. Esto ayudo a revelar la información acerca de la valoración sobre la importancia de la zona litoral. La salida de las preguntas en la plataforma digital se detalla en el Apéndice B.

## 3.2. Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio consistió en el análisis granulométrico y de composición de los sedimentos colectados. Las muestras se analizaron en el laboratorio de Geología del Departamento de Hidrobiología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

### 3.2.1. Análisis granulométrico

El análisis de tamaños o textura de sedimentos se realizó de acuerdo con la escala de tamaños de Wentworth (1922), utilizando los criterios propuestos por Folk (1974), Carver (1971) y McManus (1988). Se tomó parte de las muestras en cápsulas de aluminio y se les eliminó la humedad durante 72 horas en un horno de secado a 50°.

El análisis granulométrico tiene por objeto determinar el tamaño de las partículas clásticas tal como se depositaron. Dicho análisis del material de las arenas de playa se procesó utilizando una serie de tamices estándar U.S., con un intervalo de  $1/4 \phi$  de acuerdo con el procedimiento sugerido por Folk (2002).

La muestra se pesó y se ordenaron los tamices por orden de malla utilizando una serie de  $-2 \phi$  hasta  $4 \phi$ . La serie se colocó en el Ro-tap, se vertió la muestra en el primer tamiz, y se dejó durante 15 minutos. Se pesó la muestra de cada tamiz con balanza analítica con precisión de 0.001 g, para obtener el peso acumulativo de cada fracción expresado en porcentaje. Posteriormente, las muestras se almacenaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas.

Los parámetros texturales calculados fueron: tamaño gráfico promedio ( $Mz \phi$ ), desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_I \phi$ ), grado de asimetría gráfica inclusiva ( $Sk_I$ ) y curtosis ( $K_G$ ). Se graficaron e interpretaron los resultados utilizando los límites de los parámetros estadísticos, y

---

<sup>1</sup><https://es.surveymonkey.com/>

se determinó la nomenclatura de los sedimentos de acuerdo con Folk (2002).

Para calcular el promedio del tamaño de grano se utilizó la fórmula:

$$Mz\phi = \frac{(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})}{3} \quad (3.1)$$

esta medida se aproxima mucho al promedio y está basada en tres puntos de la curva acumulativa. La clasificación de las arenas estudiadas se realizó de acuerdo con su tamaño y utilizando la escala de Wentworth (1922) Tabla 3.2 .

**Tabla 3.2.** Escala de tamaño de Wentworth

Escala Wentworth	Phi ( $\phi$ )
Arena muy gruesa	-1-0 $\phi$
Arena gruesa	0-1 $\phi$
Arena media	1-2 $\phi$
Arena fina	2-3 $\phi$
Arena muy fina	3-4 $\phi$

La desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_I\phi$ ) Folk (1974), depende en gran medida de la fuente de origen y el tiempo de transporte que ha sufrido el sedimento así como su extensión, la cual se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$\sigma_I(\phi) = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6.6} \quad (3.2)$$

Y cuyos parámetros de acuerdo con Folk (2002) son los que se describen en la Tabla 3.3 .

**Tabla 3.3.** Desviación estándar gráfica inclusiva

< 0.350 $\phi$	muy bien clasificado
0.35 a 0.50 $\phi$	bien clasificado
0.50 a 0.71 $\phi$	moderadamente bien clasificado
0.71 a 1.0 $\phi$	moderadamente clasificado
1.0 a 2.0 $\phi$	mal clasificado
2.0 a 4.0 $\phi$	muy mal clasificado
> 4.0 $\phi$	extremadamente mal clasificado

Con el grado de asimetría gráfica  $Sk_I$ , se observa como se comporta gráficamente una muestra dependiendo del tamaño de grano predominante; esta se calculó de acuerdo a la

siguiente fórmula:

$$Sk_I = \frac{(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (3.3)$$

De acuerdo con Folk (2002), las muestras pueden ser:

**Tabla 3.4.** Grado de asimetría gráfica  $SK_I$

1.00 a 0.30	muy asimétrico hacia los finos
0.30 a 1.10	asimétrico hacia los finos
0.10 a -0.10	Simétrico
-0.10 a -0.30	asimétrico hacia los gruesos
-0.30 a -1.00	muy asimétrico hacia los gruesos

La curtosis es una comparación entre la dispersión de la parte central y la dispersión de los extremos de la curva de frecuencia, y se calcula mediante la fórmula:

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (3.4)$$

De acuerdo con Folk (2002) el resultado, indica como se distribuye la muestra:

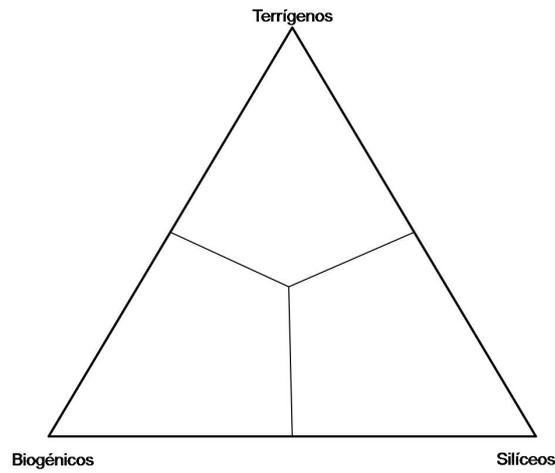
**Tabla 3.5.** Curtosis

< 0.67	muy platicúrtico
0.67 a 0.90	platicúrtico
0.90 a 1.11	mesocúrtico
1.11 a 1.50	leptocúrtico
1.50 a 3.00	muy leptocúrtico
> 3.00	extremadamente leptocúrtico

### 3.2.2. Composición mineral de los sedimentos

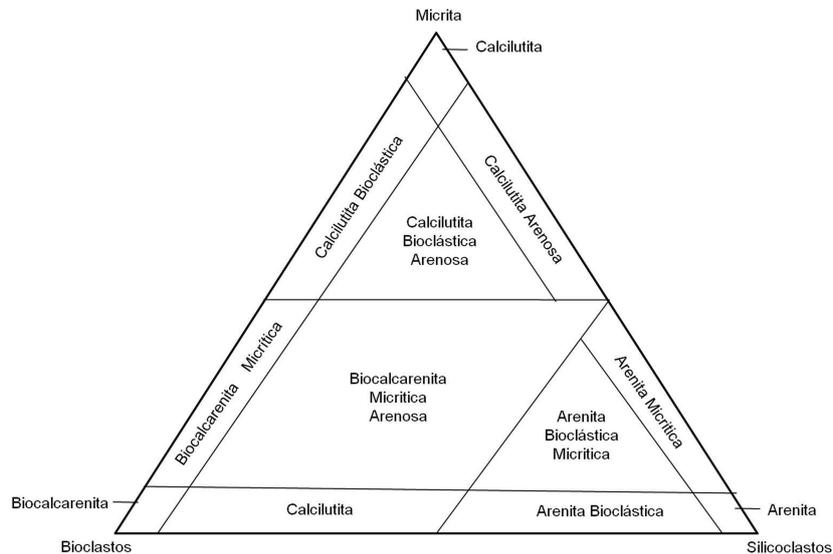
El análisis mineralógico de los sedimentos se realizó por el método de “*frotis*” de Rothwell (1989) con un microscopio estereoscópico para la fracción arenosa. El porcentaje de los minerales se hizo de acuerdo con la Carta de Comparación de Porcentaje para estimar Proporciones de Componentes Sedimentarios (Rothwell, 1989).

Los sedimentos fueron clasificados en calcáreos o terrígenos de acuerdo con el triángulo de clasificación de sedimentos marinos propuesto por el *Deep Sea Drilling Project (DSDP)/ Ocean Drilling Program Scientist* (Rothwell, 1989)(Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Triángulo de clasificación general de sedimentos marinos (Rothwell, 1989)

Para los sedimentos arenosos calcáreos se identificaron materiales de origen biogénico y se utilizó el triángulo de Lewis (1984), donde los porcentajes de clastos biogénicos, siliclastos y micrita (lodo calcáreo) sirven para definir una nomenclatura de los sedimentos calcáreos (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Triángulo de clasificación para los sedimentos carbonatados con componentes silicoclásticos (Lewis, 1984)

### **3.3. Trabajo de gabinete**

#### **3.3.1. Análisis histórico de la línea de costa**

La reconstrucción histórica de la línea de costa se realizó a partir de diversos documentos cartográficos. La tarea principal de esta fase fue construir un marco de referencia geográfico común para la información recopilada. El aspecto más importante de esta etapa del proyecto fue definir un marco geográfico de referencia común, a partir de cual se podrán relacionar principalmente datos topográficos en diversas épocas. Una vez introducidas al Sistema de información Geográfica *MAPSENGINE*<sup>2</sup>, las diferentes líneas de costa digitalizadas de las imágenes satélite de 2004, 2011 y 2013 son las que nos proyectan el avance o retroceso en la línea de costa para este periodo de tiempo. Esto ayudo a obtener la tasa de erosión presente en el litoral de Campeche.

#### **3.3.2. Análisis morfológico de la zona litoral**

A partir de los datos obtenidos de los perfiles, se construyeron gráficas de desniveles para determinar la evolución de los perfiles, así mismo se calculó el área bajo la curva (configuración del perfil) hasta el límite del nivel medio del mar para cada perfil. El área bajo la curva sirve para obtener los cambios temporales de playa y los gráficos de desniveles para observar el cambio espacial de las mismas.

Se consideran las playas en proceso de erosión como aquellas que sufren cambios en su amplitud, incremento de pendiente y disminución del área bajo la curva; en el gráfico de desniveles la línea de los primeros levantamientos se localizan por encima del último levantamiento y se contrastan diversas configuraciones: escalones o áreas convexas en la línea del perfil. Las playas con proceso de acreción o acumulación, se consideran aquellas en las que se observan cambios en los desniveles entre períodos y la línea del perfil del último levantamiento está sobre la del levantamiento anterior, además de tener igual o mayor longitud y una pendiente menor y el valor de las áreas aumenta. En contraste, las playas estables conservan valores similares de pendiente, longitud y área de playa. Para los periodos de agosto 2005 a septiembre 2010 fueron obtenidos de Márquez *y col.* (2008) y Torres *y col.* (2010); y para el periodo de septiembre 2009 a junio 2011 de Bolongaro-Crevena *y col.* (2010).

---

<sup>2</sup>Google Inc.

### 3.3.3. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)

El análisis empírico ortogonal es una metodología del análisis estadístico multivariado que consiste en reducir a un conjunto de funciones ortogonales, y por tanto no correlacionadas entre si, las observaciones espaciales o temporales de un número determinado de procesos correlacionados entre si. Uno de los propósitos principales de la aplicación de dicho análisis es, entonces, reducir el número de elementos que resultan significativos para determinar la interrelación estadística entre procesos. El conjunto de funciones ortogonales, referidas como Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs o EOFs, por sus siglas en inglés) son las eigenfunciones, funciones propias o funciones características, de una matriz. Por tanto, en el análisis estadístico, estas funciones son los eigenvectores de la matriz de varianza-covarianza de las observaciones. Así, dado que los *eigenvectores* de una matriz definen los ejes principales de proyección de sus elementos; esto, en términos de una rotación de ejes; la proyección de las series de tiempo espaciales o temporales en el conjunto de eigenvectores equivale a redistribuir la información en un conjunto de nuevas series o funciones. A estas funciones se les conoce como las Componentes Principales (CP) de la información. Por otra parte, el porcentaje de la varianza asociado con cada componente principal, o dicho de otra forma, el porcentaje de la varianza que es proyectado sobre cada eigenvector, y resulta ser proporcional a los *eigenvalores* de la matriz (Pérez y R. Medina, 2001).

Matemáticamente, la transformación lineal  $A \cdot \vec{x} = \lambda \cdot \vec{x}$  es válida si existe un vector  $\vec{x} \neq 0$  y un escalar  $\lambda$  que hagan que se cumpla la igualdad. En tal caso,  $\vec{x}$  y  $\lambda$  son referidos como un eigenvector y un eigenvalor de  $\mathbf{A}$ , respectivamente.

En la aplicación estadística, la matriz  $\mathbf{A}$  representa la matriz de varianza-covarianza de la información, tal que resulta siempre ser real y simétrica por lo que sus eigenvalores y eigenvectores tienen las propiedades siguientes:

- Todos sus eigenvalores son reales
- Los eigenvectores correspondientes a eigenvalores distintos son ortogonales
- Una matriz  $n \times n$ , tienen  $n$  eigenvalores y eigenvectores independientes

En términos del conjunto de Componentes Principales, las series espaciales o temporales

originales,  $\mathbf{S}$ , se puede expresar como:

$$S(x, y, t) = \sum_{m=1}^M PC_m(t) \cdot FEO_m(x, y) \quad (3.5)$$

Donde cada  $PC_m$  corresponde a la  $m$ -ésima Componente Principal (PC) y cada FEO  $m$  al  $m$ -ésimo eigenvector de la matriz de covarianza.

Por tanto, dado que la base de datos  $S(x, y, t)$ , es conocida y los eigenvectores de la matriz de covarianza pueden ser determinados, cada Componente Principal es evaluable a partir de:

$$PC_m(t) = \sum_t S(x, y, t) \cdot EOF_m, param = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

con lo que el conjunto de  $PC_m$  representan un nuevo conjunto de funciones (o variables), no correlacionadas entre si, las cuales resultan de la proyección de los datos sobre el conjunto de eigenvectores o ejes principales de la matriz de varianza-covarianza. Asimismo, dado que cada eigenvalor  $\lambda$  define la parte de la varianza del conjunto de datos que es proyectada a cada eigenvector, el porcentaje de la varianza asociado a cada Componente Principal es dado por:

$$\% Varianza_{n\text{-ésima componente}} = \frac{\lambda_m \cdot 100}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (3.7)$$

### 3.3.4. Análisis granulométrico y composición mineralógica

Se grafico el número de tamiz ( $\phi$ ) y las frecuencias acumulativas (% peso 20 acumulado) en papel de probabilidades (semilogarítmico de 90 ciclos), para el trazado de las curvas granulométricas de sedimentos y de esta forma obtener los parámetros estadísticos. Así mismo mediante las observaciones en el microscopio estereoscopio de las subfracciones de muestras de arena se obtuvo el porcentaje de minerales presente en cada una, mediante el porcentaje visual de los minerales y de los componentes calcáreos.

Se ordenaron mediante gráficas obtenidas de la paquetería Origin: la información obtenida en las curvas granulométricas, los parámetros estadísticos, resultados de los conteos de las láminas del "frotis" de cada subfracción de muestra de arena, así como ubicación y nombre de las localidades muestreadas.

### 3.3.5. Índice de vulnerabilidad costera -IVC-

Para la correcta comprensión de los resultados del mismo es esencial enfatizar que se trata de un índice relativo de la vulnerabilidad de la costa ante la potencial subida del nivel del mar. El concepto de vulnerabilidad se asocia a la sensibilidad de un ecosistema (grado en que puede verse afectado en función de su exposición) ante un fenómeno (subida del nivel del mar) o/y a su capacidad de adaptación. Generalmente se acepta distinguir entre vulnerabilidad del medio natural y vulnerabilidad socio-económica, pero enfatizando su interrelación e interdependencia.

Ojeda-Zújar *y col.* (2009), detalla una de las metodologías más utilizadas como aproximación al cálculo de la vulnerabilidad de las costas (entendida como sensibilidad ante un fenómeno y capacidad de adaptación) frente a la potencial subida del nivel del mar asociado al cambio climático, este es el *Índice de Vulnerabilidad Costera* (Coastal Vulnerability Index -CVI-). Se trata de un “índice o valor integrado”, que toma dos variables principales:

1. Variables geológicas/geomorfológicas consideradas en función de  $a$ = resistencia del sustrato geológico/geomorfológico a la erosión,  $b$ =tasa de erosión,  $c$ =susceptibilidad a los procesos de inundación marina (pendiente costera).
2. Variables físicas/hidrodinámicas. Las tres variables incluidas contribuyen significativamente a los procesos de erosión e inundación del sector costero analizado:  $d$ =oleaje medio significativo,  $e$ =tasa de cambio del nivel relativo del mar y  $f$ =rango mareal medio.

El relativamente simple sistema de ponderación (1 a 5) donde 1 es muy baja vulnerabilidad y 5 muy alta vulnerabilidad, calculado con las 6 variables, permite su integración en una ecuación que finalmente, proporciona el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), como se detalla en la ecuación 3.8:

$$IVC = \sqrt{\frac{(a + b + c + d + e + f)}{6}} \quad (3.8)$$

El cálculo, comprende las siguientes variables:

- $a$  indica el índice topográfico (ITOPO)
- $b$  es la clasificación geomorfológica (MOR)
- $c$  es el rango mareal medio (TID)

- $d$  indica la tasa de erosión (TERO)
- $e$  es la tasa de cambio del Nivel relativo del mar (LEV)
- $f$  corresponde al oleaje significativo medio (HS)

**Tabla 3.6.** Variable componente ITOPO

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
D(m)	[0-250]	(250-500]	(500-1000]	(1000-3000]	(3000-máx]
P %	(8 máx]	(4-8]	(2-4]	(1-2]	[0-1]
A(m)	(8 máx]	(6-8]	(4-6]	(2-4]	[0-2]

En la evaluación de las tres variables indicadas en la tabla 3.6, se aplicó la media aritmética de acuerdo a la ecuación  $ITOPO = D + P + A/3$ . La ponderación de los valores se obtuvieron a través de las referencias del *MapsEngine*. En la Tabla 3.7 se especifica la ponderación para el índice topográfico.

**Tabla 3.7.** Ponderación del índice topográfico

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
ITOPO	(0-1)	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)

Los valores de clasificación de la variable de Geomorfología (MOR) se definen en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8.** Clasificación de la variable de geomorfología(MOR)

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado MOR	Playa rocosa	Playa Continental	Playa con esteros	Isla de Barrera sin esteros	Isla de Barrera con esteros

Tabla 3.9 las ponderaciones para la variable Rango Mareal Medio (TID).

Tabla 3.10 ponderación de la tasa de erosión (TERO).

La ponderación de la variable Nivel Relativo del mar (LEV) se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 3.12 con la clasificación del oleaje significativo (HS).

**Tabla 3.9.** Clasificación de la variable “Rango mareal medio” (TID)

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
TID (m)	(6 máx.]	(4,6]	(2,4]	(1,2]	[0,1]

**Tabla 3.10.** Ponderación de la variable, tasa de erosión (TERO)

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
TERO (m/año)	(2 máx.]	(1,2]	(-1,1]	(-2,1]	[min.-2]

**Tabla 3.11.** Ponderación de la variable “Nivel relativo del mar” (LEV)

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
Tasa de cambio del nivel relativo del mar (mm/año)	(0,1.8]	(1.8,2.5]	(2.5,3.0]	(3.0,3.5]	(3.5, máx.]

**Tabla 3.12.** Clasificación del oleaje significativo medio (HS)

Variabes	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
Oleaje significativo medio HS(m)	(0,0.75]	(0.75-0.85]	(0.85-1.05]	(1.05-1.15]	(≥1.15]

### 3.3.6. Encuesta: Opinión pública y zona litoral

Una vez terminada las 200 encuestas de opción múltiple se exporto la información a una matriz para su análisis estadístico. Para obtener los valores cualitativos de cada una de las preguntas realizadas. En la sección de resultados se amplia la información recabada.

Las preguntas fueron las siguientes:

1. ¿Qué importancia le daría usted a la zona litoral en México?

- Muy importante
- Importante
- Ni uno, ni otro
- Nada importante

- No sabe, no contesta

2. ¿Cuál diría usted que es el principal problema en la zona litoral?

- La falta de limpieza del litoral
- La contaminación en general
- La contaminación del agua
- El transporte, las calles y carreteras
- La falta de políticas para el desarrollo de la zona
- Mala explotación de la pesca
- Poca infraestructura
- Saneamiento
- Seguridad
- La infraestructura civil (casas, hoteles, etc.)
- Erosión costera
- Abandono después de la temporada de vacacionistas
- Otros
- Ninguna, nada
- No sabe

3. ¿En los últimos cinco años, usted a utilizado la zona litoral? *SI* ¿Con que fin)

- Turismo
- Vivo en la zona litoral
- Trabajo
- Pesca
- Otros
- No

4. ¿Qué eventos de riesgo, percibe usted que han tenido mayor frecuencia e intensidad sobre la población?

- Huracanes
- Tormentas
- Inundaciones
- Cambio en el nivel del mar
- Erosión de playas
- Olas de calor
- Salinización de pozos
- Otros

5. ¿Qué entiende por cambio climático?

- Un cambio en la temperatura
- Deterioro en la capa de ozono
- Calentamiento global
- Cambios en el clima por la destrucción ambiental
- Mal tiempo, tormentas

6. En general, ¿En los últimos cinco años, se ha enterado de campañas informativas sobre riesgos asociados al cambio climático?

- Si
- No
- No sabe

7. Principalmente, ¿por cuál medio se ha enterado de campañas informativas sobre riesgos asociados al cambio climático?

- Internet
- Medios impresos
- Televisión
- Radio
- ONG's

- Gobierno

8. ¿Cuáles cree usted que serían las alternativas productivas para hacer frente ante el cambio climático?

- Empleo temporal
- Ganadería
- Construcción
- Acuicultura
- Silvicultura
- Turismo
- Otro

9. En general, ¿sabe usted si el municipio donde habita cuenta con Atlas de Riesgo Municipal, para hacer frente antes las emergencias climáticas?

- Si
- No
- No sabe
- No contesta

10. ¿Cómo calificaría la gestión de las autoridades locales, estatales y federales frente al cambio climático?

- Muy mala
- Mala
- Regular
- Buena
- Excelente
- No sabe, no contesta

## Capítulo 4

# Resultados y discusión

### 4.1. Cambios históricos de la línea de costa

Se presentan los resultados del análisis de la zona litoral mediante imágenes de satélite del 2004, 2011 y 2013. De los cuatro monitoreos entre el periodo de secas 2013 a lluvias 2014. Una vez introducidas al Sistema de información Geográfica *MAPSENGINE*<sup>1</sup>, las diferentes líneas de costa digitalizadas de las imágenes satélite de 2004, 2011 y 2013 se pudieron calcular los gradientes de erosión y acumulación que se presenta a lo largo de ésta y en la que se observan zonas con grados de erosión muy marcados y en algunas otras, procesos de acumulación-erosión en la línea de costa. En las figuras 4.3y 4.4)se aprecia el detalle de las variaciones de la línea de costa, así también se identificaron las obras civiles presentes a lo largo del litoral (Figura 4.1).

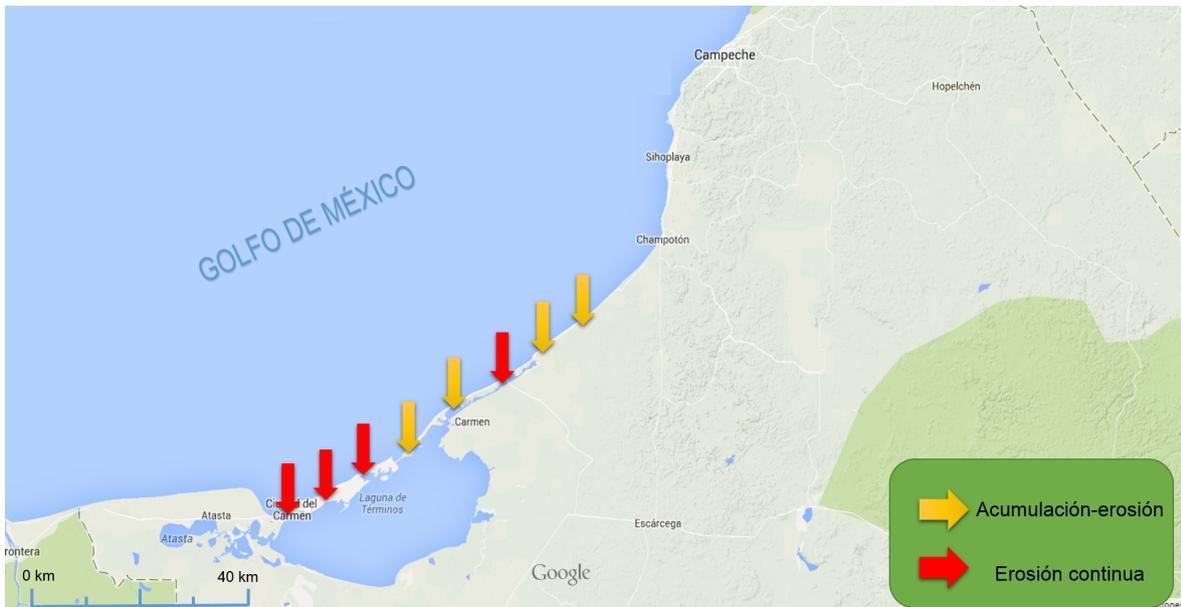
Para cuantificar la regresión y la acumulación en los litorales, se procedió a ubicar la línea de costa desde 2004 hasta 2013. A lo largo de esta etapa de evaluación y análisis histórico de la línea de costa a nivel local se identificaron dos fenómenos que están presentes: 1) Erosión continua y 2) La fluctuación de erosión-depósito (Figura 4.2).

---

<sup>1</sup>Google Inc.



**Figura 4.1.** Localización de las principales obras de protección costera en el litoral del municipio del Carmen. Enrocamiento (*beach rock*) en Puerto Real y Punta Chen, Escolleras en la Boca de Sabancuy, Espigones cercanos a la playa de KM 45 y tetrápodos presentes en Puente Dos Bocas.



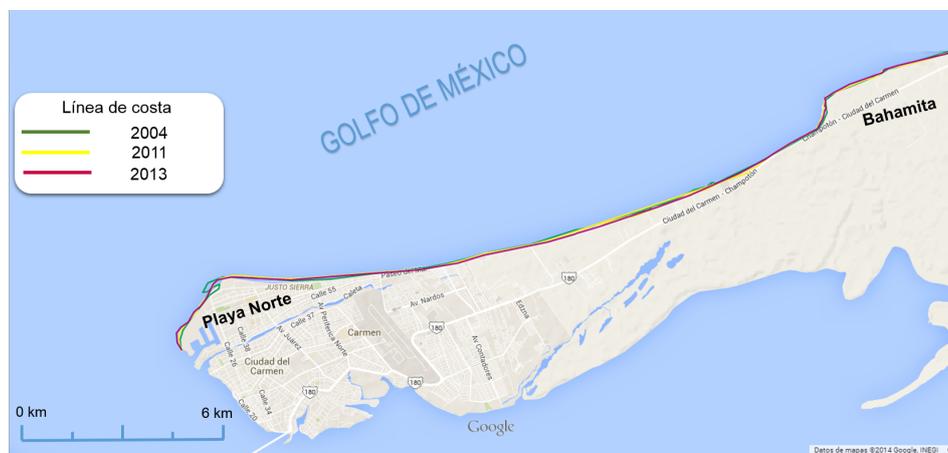
**Figura 4.2.** Procesos de erosión continua y erosión-acumulación detectada en el litoral de Campeche. De 2004 hasta el año 2013.

### Erosión continua

El proceso geológico más importante detectado en la zona de estudio es la de erosión continua a lo largo de la costa. Este proceso está asociado con el fenómeno de “transgresión” caracterizado por el retroceso de la línea de costa hacia el continente generalmente ligado con la elevación del nivel del mar y/o la subsidencia del terreno. El valor calculado de la transgresión (Tabla 4.1) se obtuvo a través de la medición de la línea de costa de 2004 hasta la línea de costa más

reciente (2013) y se comprobó que la erosión continua de las playas, se extiende a lo largo del área de estudio y en algunos casos muy drásticos como el caso de Playa Norte (Figura 4.3), donde existía una la lengüeta de sedimentos, la pérdida de material es de 183 metros, en el 2013.

De acuerdo con los datos obtenidos de acumulación–erosión sitios que se pudieron identificar como críticos son: Playa Norte(-35.22 m), Club de Playa (-17.41 m), Bahamita (-81.27 m), KM 45 (-12.81 m), y los sitios con acumulación son Isla Aguada (32.95 m), Villa Quietud (17.42 m), Sabancuy (35.90 m) y Chenkan (64.01 m).



(a)



(b)

**Figura 4.3.** a) Sección Oeste de la Isla del Carmen, donde se observa la lengüeta para el año 2004 cercana a Playa Norte, (línea verde para la costa de 2004, línea amarilla para 2011, línea morada 2013). b) Sección Este de la Isla del Carmen, que comprende desde CASES hasta Puerto Real, donde no se encuentra variación marcada en la línea de costa.

## Fluctuación Erosión-Depósito

El segundo proceso identificado en el área de estudio, es de la fluctuación entre la erosión y el depósito (Figura 4.3). Este proceso fue cuantificado mediante el análisis del avance de la línea de costa, y se comprobó que la línea de costa sufrió una constante erosión y recuperación a través del depósito de sedimentos. Gran parte de la zona de estudio presenta este fenómeno desde Isla Aguada hasta Xochen. En la Tabla 4.1 se observar que el sitio con mayor acumulación de 2004-2013 fue Chenkan con cerca de 64 m, seguido por Sabancuy con 35.90 m, Puerto Real con 35.12 m e Isla Aguada 32.95 m. Cabe señalar que los sitios de Puente Dos Bocas, Punta Chen y Xochen están en proceso de fluctuación de erosión-depósito (por eso sus valores negativos en la tabla) y presentan un valor de desplazamiento entre -0.9 a-2.07 m.

**Tabla 4.1.** Tasa de erosión por sitio a lo largo de la costa de Campeche. Donde  $E - A^1$  Erosión-Acumulación total (m);  $D.A.^2$  Desplazamiento total (m), para 2004-2013. De color rojo los sitios más críticos en erosión.

Sitio	Perfil	Periodo	Intervalo(años)	$E - A^1$ (m)	$D.A.^2$ (m)
Playa Norte	1	2004-2013	9	-35.22	-3.91
Club de Playa	2	2004-2013	9	-17.41	-1.93
Bahamita	3	2004-2013	9	-81.27	-9.03
CASES	4	2004-2013	9	17.68	1.9
San Nicolasito	5	2004-2013	9	21.26	2.36
Puerto Real	6	2004-2013	9	35.12	3.90
Isla Aguada	7	2004-2013	9	32.95	3.66
KM 45	8	2004-2013	9	-12.81	-1.42
Las Bombas	9	2004-2013	9	-10.6	-1.17
Villa Quietud	10	2004-2013	9	17.42	1.93
Sabancuy	11	2004-2013	9	35.90	3.98
Chenkan	12	2004-2013	9	64.01	7.11
Puente Dos Bocas	13	2004-2013	9	-18.7	-2.07
Punta Chen	14	2004-2013	9	-18.67	-2.07
Xochen	15	2004-2013	9	-8.1	-0.9



(a)



(b)



(c)

**Figura 4.4.** a) Isla Aguada hasta Km 45, en donde se observa en la playa que se encuentra en el KM 45 una disminución en la línea de costa a partir del 2004 hasta 2013. b) Sección que va del sitio Las Bombas hasta Sabancuy en donde se observa que no existieron cambios significativos a lo largo de la línea de costa. c) Sección del área de estudio de Chenkan hasta Xochén donde existe fluctuación de acreción-erosión.

## **Infraestructura en la zona costera**

La costa representa la frontera entre la tierra y el mar y se puede considerar que cumple dos funciones: detiene el oleaje y funciona como un almacén de sedimentos (playas, dunas, acantilados, lagunas, etc.). Hay que recordar que estas formaciones costeras no son estructuras permanentes, son elementos transitorios que se erosionan o acumulan sedimentos, en función de las condiciones ambientales imperantes en diversos momentos. Las costas y estuarios son ambientes sumamente dinámicos que de manera constante cambian en respuesta a las fuerzas naturales en una variedad de escalas de tiempo. Una manera objetiva de aproximarse al problema es considerar las áreas con sedimentos acumulados (por ejemplo: dunas de arenal, playas, marismas y manglares, acantilados) como almacenes de sedimentos, un almacén que no es permanente sino que representa acumulaciones que el mar requiere y que en algún momento será removido por olas y mareas y depositado en algún otro lugar. Un cambio en las condiciones puede darse de manera natural o ser provocado por las actividades antropogénicas.

Cuando leemos un texto acerca del manejo costero, se enfatiza en temas de protección costera (Bringas-Rabángo, 1999). Ello se refiere a todas aquellas obras o estructuras, ya sea de ingeniería dura (concreto, acero, etc.) o ingeniería blanda (arena, creación de hábitats, etc.) que van a servir para proteger la línea de costa, así como los asentamientos, propiedades o actividades que en ella se dan, de la dinámica propia de la costa, tanto en momentos de gran fuerza (huracanes, tormentas, etc.) como en el acontecer diario; y algunas otras actividades como los son, el desarrollo de infraestructura por el sector público y privado (camino, terraplenes, pasillos, marinas, canales dragados, aeropuertos costeros, plantas de tratamiento, y descargas de aguas residuales), turísticos y portuarios, el desarrollo acuícola y los problemas ocasionados por la apertura artificial de bocas, construcción de termoeléctricas, puestas de líneas de transmisión de energía eléctrica, asentamientos humanos, descargas de aguas urbanas e industriales, la construcción de carreteras, la actividad petrolera y efectos agrícolas (erosión del suelo), aporte de fertilizantes, pesticidas y otras sustancias que pueden ser adversas para los ecosistemas de manglares, pastos marinos y arrecifes de coral que están en conjunto del sistema litoral (Carranza-Edwards, 2009).

En términos generales, la infraestructura de protección costera representa el conjunto de obras y sistemas construidos e implementados por el hombre para la defensa o estabilización

costera contra el embate de las inclemencias del mar (o del cuerpo de agua en cuestión, sea este un río, lago, etc.). La protección costera puede estar diseñada para proteger asentamientos establecidos en o cerca de la costa, o para proteger la costa misma. Específicamente, el objeto de dichas defensas puede ser para:

- 1) Prevenir la erosión de la línea de costa, sea esta natural o artificialmente ganada al mar.
- 2) Prevenir inundaciones en zonas costeras causadas por sobreelevaciones del nivel del mar (de alta frecuencia con oleaje generado por viento, con períodos comúnmente de 5 a 15 segundos, de baja frecuencia como la sobreelevación por tormenta, con períodos de horas o días).
- 3) Proteger contra el oleaje a las entradas y recintos de puertos o marinas, generando zonas de calma.
- 4) Estabilizar canales de navegación en bocas estuarinas o lagunares.
- 5) Proteger obras de toma de agua (por ejemplo, de plantas de generación eléctrica o de plantas desalinizadoras) o de descarga (emisores submarinos) contra el azolve (E., 2002) .

En la porción litoral de Campeche muestreada, de 15 sitios solamente tres de ellos se encuentra cercanos a una infraestructura costera de protección. Mediante el análisis del avance de la línea de costa, se identificaron las infraestructuras costeras de protección, y se observó que en los sitios críticos de erosión como lo es la playa cercana al KM 45 (Figura 4.5 a)) de la carretera de Ciudad del Carmen-Champotón, en las cercanías se encuentran algunos espigones que acumulan sedimentos de un lado y la erosionan del otro y por tanto tienen que irse añadiendo otros nuevos permanentemente. Para Sabancuy (Figura 4.5 b)) se encuentra una escollera producto de la apertura de la boca del estuario de Sabancuy. En las escolleras en las bocas de las lagunas costeras, que necesitan una acción de dragado permanente, ya que se tiene una región de gran acumulación de sedimentos en la costa, estos sedimentos constantemente lo invaden. En Puente Dos Bocas (Figura 4.5 c)) se encuentra una hilera paralela de espigones a la carretera, la cual protege la playa, sin embargo se observa la ausencia de material arenoso. Todo ello disminuye el aporte de sedimentos a la costa. La opción de una línea costera más natural tiene beneficios a futuro, ya que si continúa habiendo libre flujo de sedimentos, más

hábitats naturales se pueden desarrollar en el futuro y por lo tanto la costa puede responder con mayor facilidad a cambios en el viento, el oleaje y el nivel del mar. Ello deriva rápidamente en beneficios económicos haciendo innecesarias las obras de protección costera y disminuyendo los costos económicos del desarrollo. A través de un manejo integral de la zona costera se pueden tener en cuenta estas necesidades así como las de los desarrollos turísticos, portuarios e industriales ya establecidos, es decir, se pueden armonizar el desarrollo económico costero y la protección y conservación de la dinámica costera y del funcionamiento de sus ecosistemas.



(a)



(b)



(c)

**Figura 4.5.** a) Espigones cercanos a la playa del KM 45, se aprecia una protección de rocas hacia la carretera. b) Escollera cercana a la playa de Sabancuy. c) Fila de tetrápodos presentes en la playa Puente Dos Bocas.

## 4.2. Cambios morfológicos estacionales de las playas

A continuación se describen los procesos de erosión-depósito presentes en las diferentes playas monitoreadas a partir de las características morfológicas de sus perfiles para las diferentes épocas de secas (junio), lluvias (septiembre), nortes (abril) y lluvias (octubre) realizados del 2013 al 2014 (Figura 4.6), considerando su forma, amplitud (distancia perpendicular a la línea de costa, desde la infraplaya hasta la supraplaya) y desnivel. Se elaboró un diagrama de áreas de las secciones de los perfiles de playa que permite estimar la variación de las áreas en movimiento dentro de cada perfil. Los datos de agosto 2005 a septiembre 2010 fueron obtenidos de Torres *y col.* (2010) y Márquez *y col.* (2008) y para el periodo de septiembre 2009 a junio 2011 de Bolongaro-Crevena *y col.* (2010).



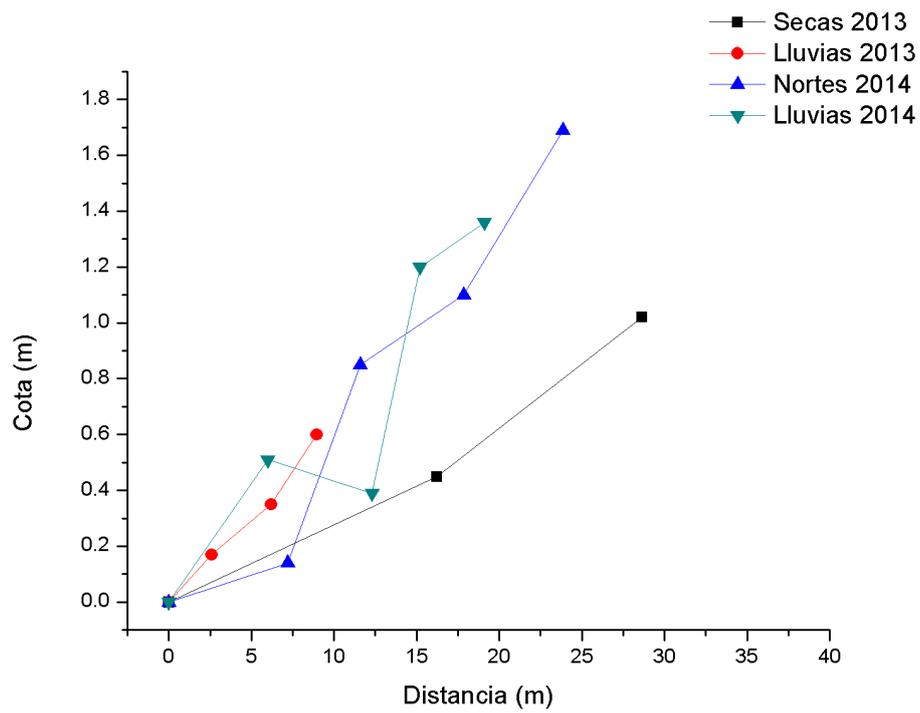
**Figura 4.6.** a) Toma de perfiles de playa, en el litoral de Campeche, b) Porción del litoral con manglar en recuperación, c) Recolección de muestras de sedimentos correspondiente al perfil muestreado y d) Toma del perfil topográfico donde se observa la rompiente de la ola corresponde a la zona de infraplaya.

#### 4.2.1. Playa Norte

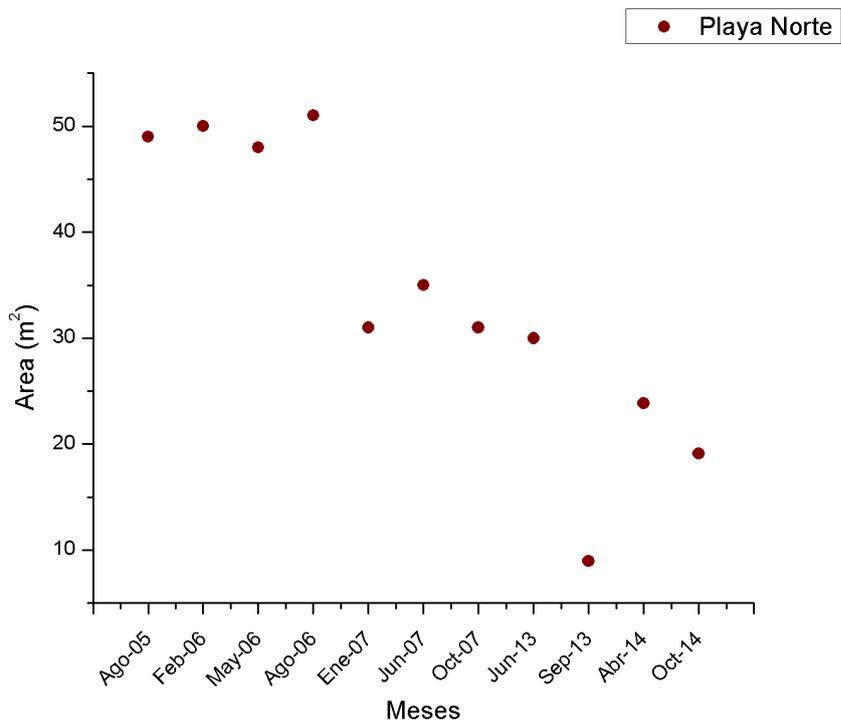


**Figura 4.7.** Playa Norte y la porción de manglares que se esta perdiendo en la zona.

Localizada en la parte Oeste de la Isla del Carmen (Figura 4.7), los perfiles realizados entre secas 2013 a lluvias 2014 muestran una playa con una longitud de menos de 30 m (Figura 4.8 a)). En lluvias 2013 la amplitud de la playa es de 10 m y su altura 0.6 m, para el perfil correspondiente a lluvias 2014 se observa un canal formado por los efectos de marea. En el gráfico de áreas (Figura 4.8 b)), se observa que de agosto 2005 a agosto 2006 no presenta incrementos se mantiene en 50 m. A partir de enero 2007 a 2014 se nota un decremento en la playa, pasando de 30 m a 20 m, para junio 2013 a octubre 2014 se tiene proceso de erosión cerca de 10 m. En esta playa cabe recalcar que hay un gran aporte de sedimentos arenosos del transporte litoral presente en la isla con dirección Este-Oeste de la isla del Carmen (Torres *y col.*, 2010). En secas 2013 y nortes 2014 existe acumulación ( $\sim 20$  m) y en lluvias 2013-2014 erosión ( $\sim 10$  m).



(a)



(b)

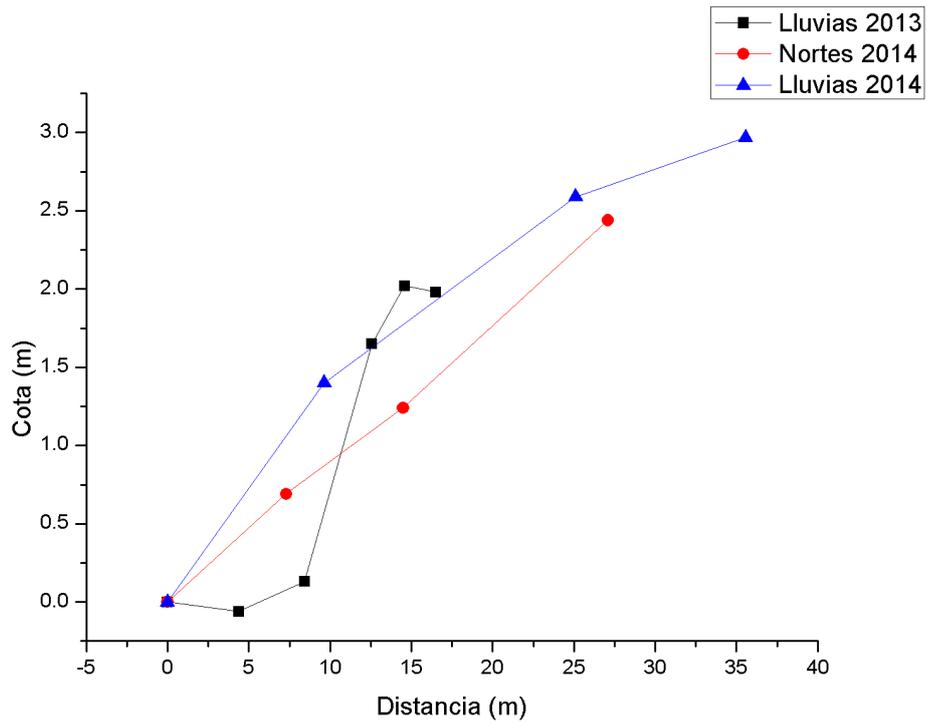
**Figura 4.8.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Playa Norte. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.2. Club de Playa

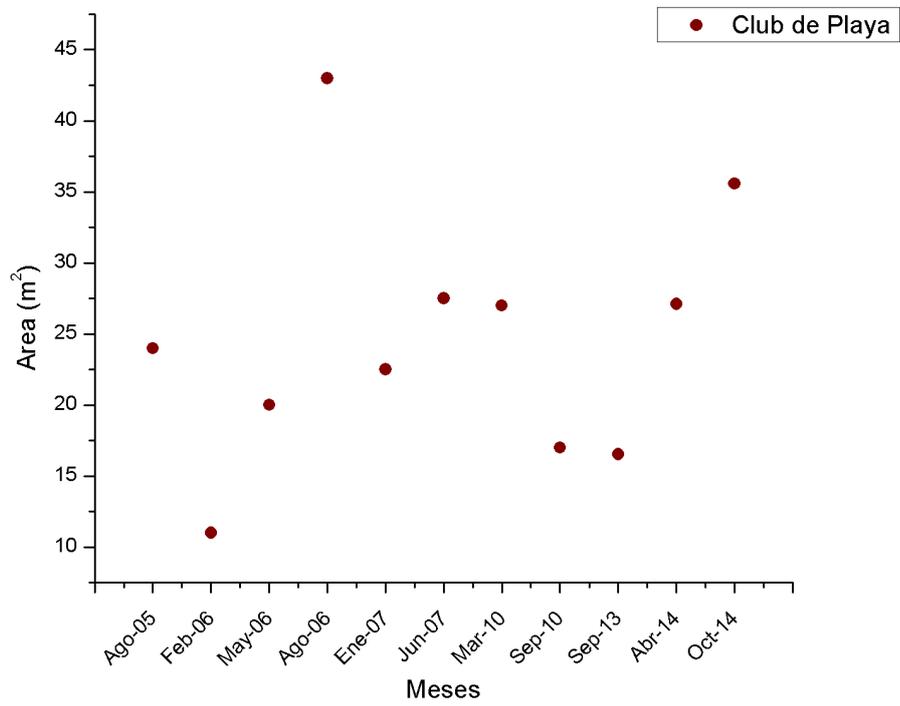


**Figura 4.9.** La flecha señala la bahía que fue formada por la erosión de la playa.

Se observó el aumento de amplitud en el periodo de lluvias 2014 con cerca de 35 m, y la amplitud se registró en la época de lluvias 2013 con 15 m, para lluvias 2013 en el predio de Club de Playa estaba la presencia de costales de arena, esto con el fin de frenar la pérdida de material arenoso y de cierta manera la erosión que presentó, su amplitud para lluvias 2013 fue de 15 m(Figura 4.10 a)). En el gráfico de áreas a partir del marzo 2010 a octubre 2014 nos muestra un incremento en la amplitud de playa de 15 a 35 m, debido a la época de nortes, antes de esto el comportamiento de la playa es oscilatorio (Figura 4.9), la mayor amplitud de playa registrada fue en agosto del 2006 con 45 m, debido a que se rellenó de manera artificial con material arenoso por la perdida continua de material arenoso, observado en la toma de perfil. (Figura 4.10 b)).



(a)



(b)

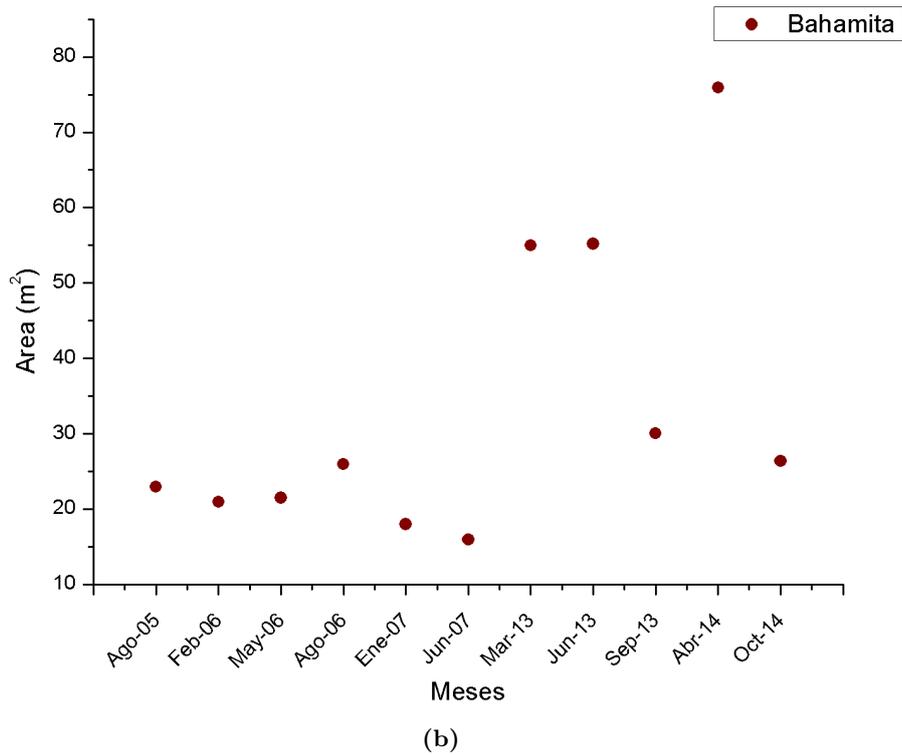
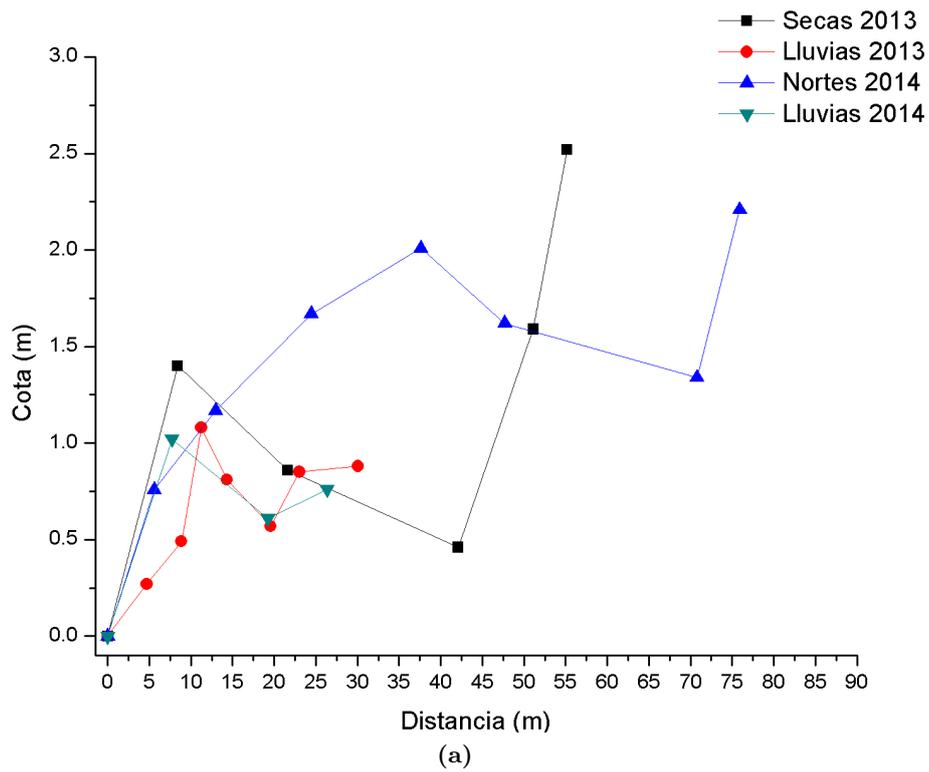
**Figura 4.10.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Club de Playa. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

### 4.2.3. Bahamita



**Figura 4.11.** La flecha señala la Punta Brigitte Bardot localizada en las cercanías de la playa de Bahamita. Por otro lado se aprecian los pilares que conformaban una palapa, esta playa se encuentra en erosión continua.

En este perfil se observó una pérdida de material de 0.5 m entre la zona de infraplaya y mesoplaya entre la época de secas a lluvias 2013. Para el 2014 en la época de nortes existió una mayor amplitud de la playa cercana a 75 m (Figura 4.12 a)). En el gráfico de áreas (Figura 4.12 b))se nota que de agosto del 2005 a junio 2007 estuvo estable, y a partir de marzo 2013 a octubre 2014 muestra variaciones entre ganancia y pérdida de amplitud de playa (de 15 m a 35 m), muestra un proceso estacional: presenta acumulación en temporada de secas y nortes y en lluvias presentan erosión. Esta playa se encuentra cercana a la punta Brigitte Bardot que funciona como una escollera, por el lado Este existe la acumulación de material arenoso y por el Oeste esta la ausencia del mismo (Figura 4.11).



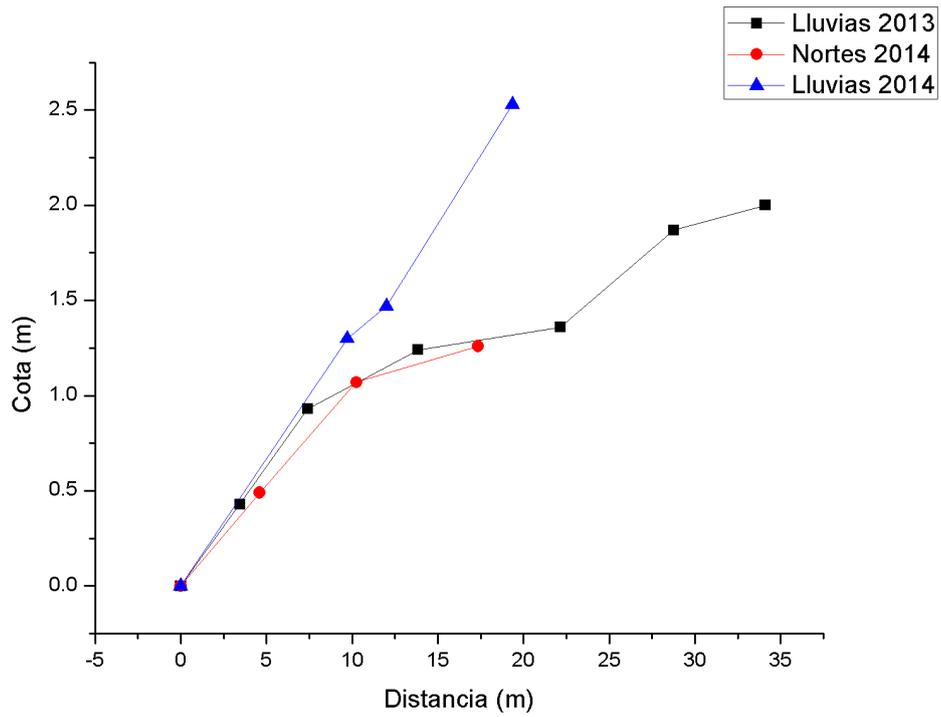
**Figura 4.12.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Bahamita. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.4. Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (CASES)

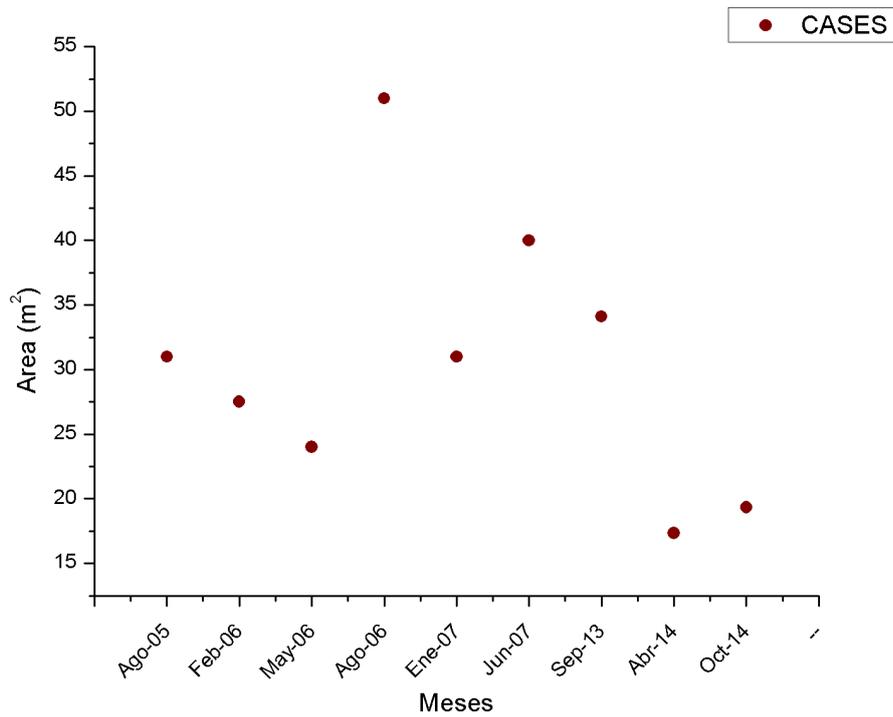


**Figura 4.13.** Las flechas los escalones formados, causados por el fuerte oleaje principalmente en nortes, afectando las construcciones urbanas cercanas.

Los perfiles muestran una amplitud promedio de playa de 35 metros para el periodo de lluvias 2013 y el más corto con 15 m fue en lluvias 2014 (Figura 4.13). En el gráfico de áreas (Figura 4.14 b) se observa que de agosto 2005 a mayo 2006 la pérdida de amplitud de playa fue mínima de 30 a 25 m, en agosto 2006 se registró la mayor amplitud (50 m); de enero 2007 a septiembre 2014 disminuye la amplitud, se registró la menor amplitud con 15 m en abril 2014, se puede observar que para esta playa sigue una tendencia de acumulación en lluvias y erosión en nortes.



(a)



(b)

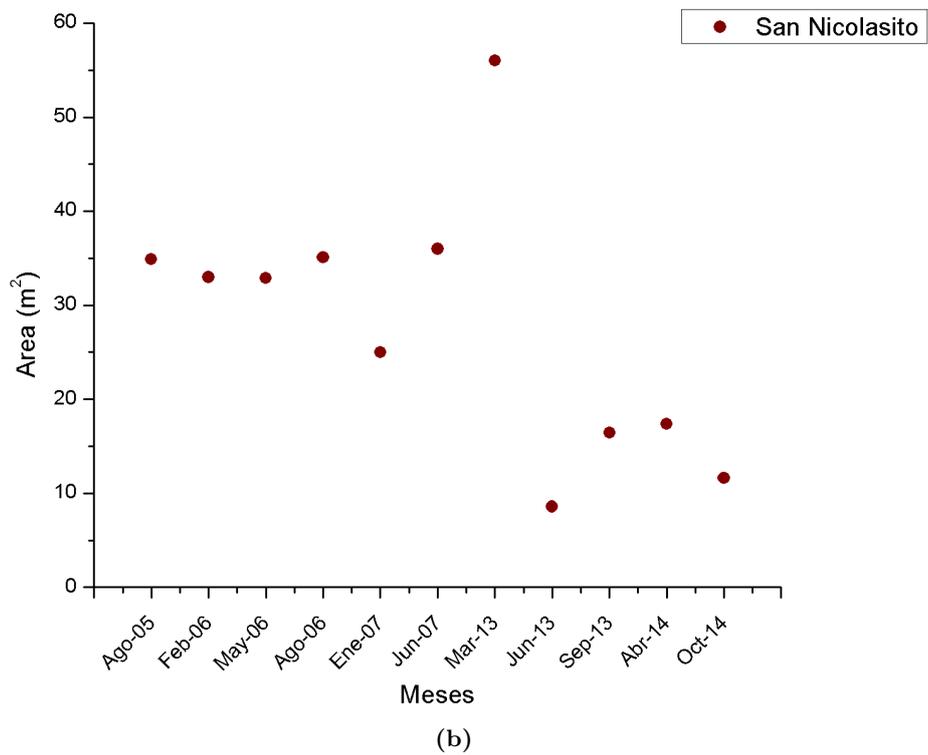
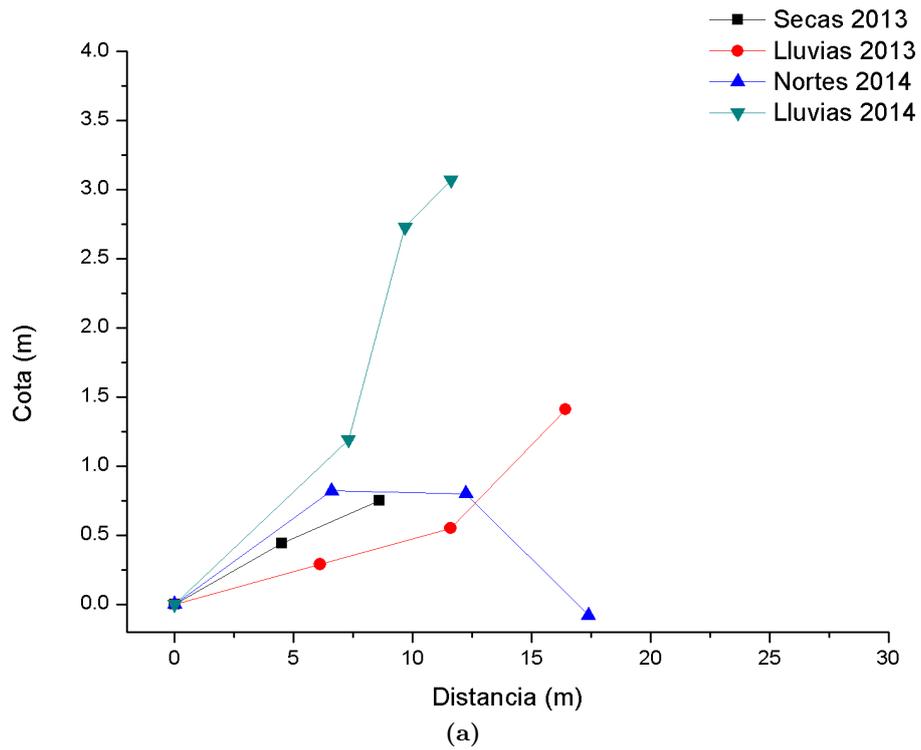
**Figura 4.14.** a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, CASES . b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.5. San Nicolasito



**Figura 4.15.** Las bases de las torres de las líneas de transmisión de energía eléctrica ya estas expuestas, pues la pérdida de material arenoso es evidente a lo largo de esta playa.

Esta playa se encuentra paralela a la línea de costa con las líneas de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad, donde están vulnerables por la pérdida de material arenoso (Figura 4.15). En los perfiles medidos de secas 2013 a lluvias 2014 muestra una pérdida de material arenoso. La menor amplitud fue en secas 2013, con 7 m. Para lluvias 2013 a nortes 2014 se mantuvo en 17 m, y en lluvias 2014 la amplitud se registró en 10 m, y la cota alcanzo cerca de 3 m. En el gráfico de áreas para el periodo de agosto 2005 a junio 2007, la playa se encontraba estable, pues su amplitud de playa mínima (35 m); por lo que para marzo 2013 la amplitud máxima registrada es de 55 m; en contraste de junio de 2013 a octubre de 2014 se nota un ligero ciclo, crece 15 m y decrece a 10 m. Este sitio puede considerar en proceso de erosión en las épocas de secas y nortes y en proceso de acumulación en lluvias (Figura 4.16).



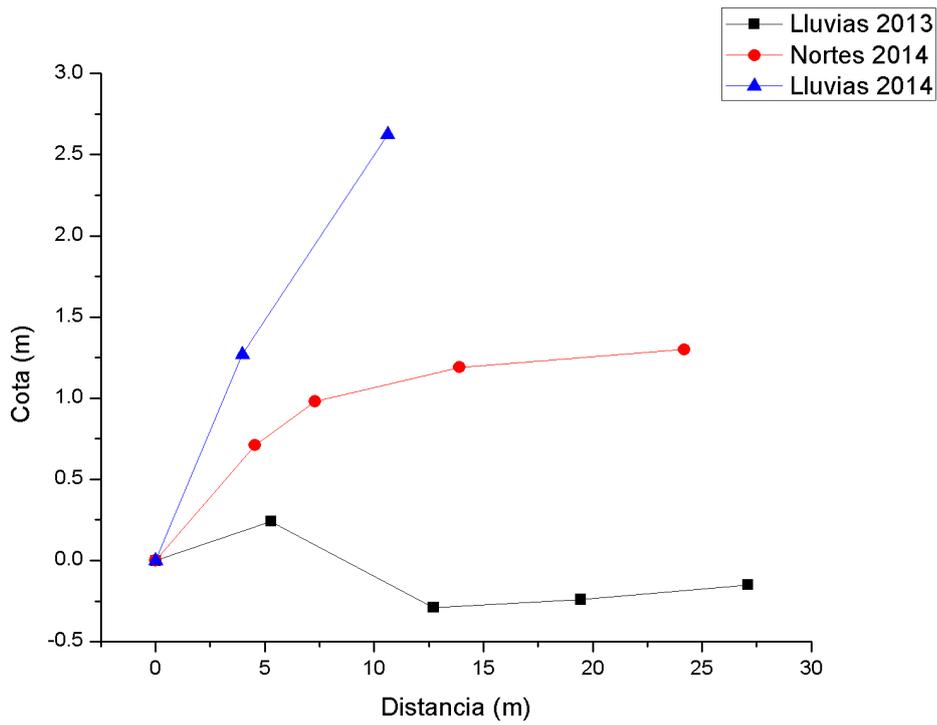
**Figura 4.16.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, San Nicolasito. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.6. Puerto Real

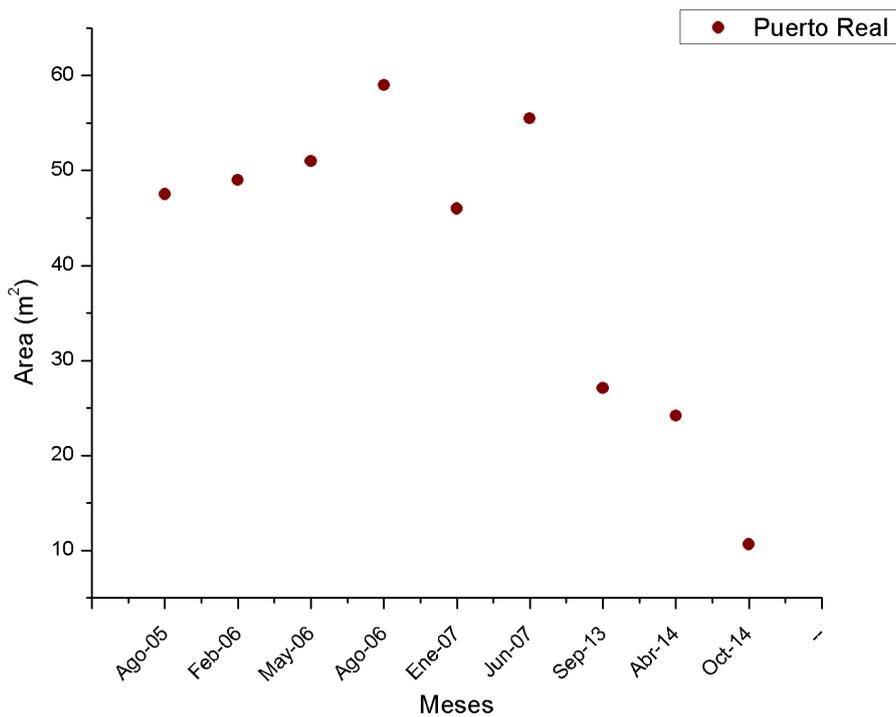


**Figura 4.17.** Playa Puerto Real con roca de playa en la zona de infraplaya, ésta protege la porción arenosa.

Esta localidad está asentada sobre una plataforma rocosa la cual protege su porción arenosa (Figura 4.17). Para el periodo de muestreo los perfiles indican una disminución de material arenoso en el periodo de lluvias 2014 con 35 m, por otra parte existe una ganancia para nortes y lluvias 2014 de 2 m en su cota. Morfológicamente son ligeramente similares los perfiles, solo la pendiente varió para cada época climática. En el gráfico de áreas (Figura 4.18 b) se observa que de agosto de 2005 a agosto 2006 la tendencia de la playa fue a una mayor amplitud de playa (60 m), de enero a junio de 2007 su amplitud oscilo entre 45 a 55 m; para septiembre 2013 a octubre 2014 la playa disminuyó hasta 10 m. La playa está en erosión, al encontrarse en la punta Este de la Isla del Carmen el transporte de sedimentos esta a merced de las corrientes internas de la Laguna de Términos.



(a)



(b)

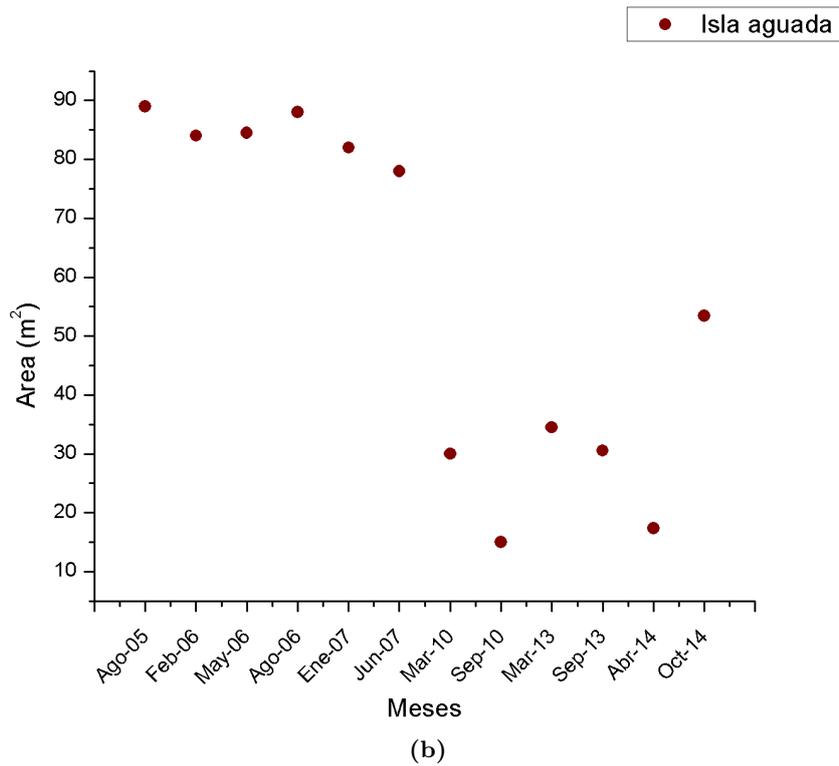
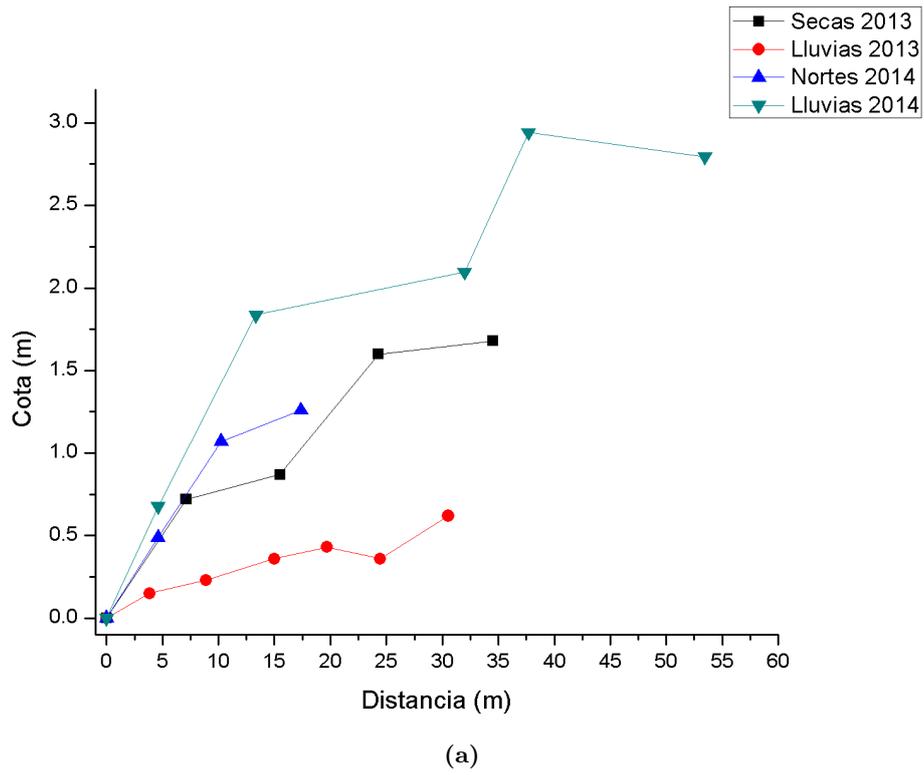
**Figura 4.18.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Puerto Real. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.7. Isla Aguada



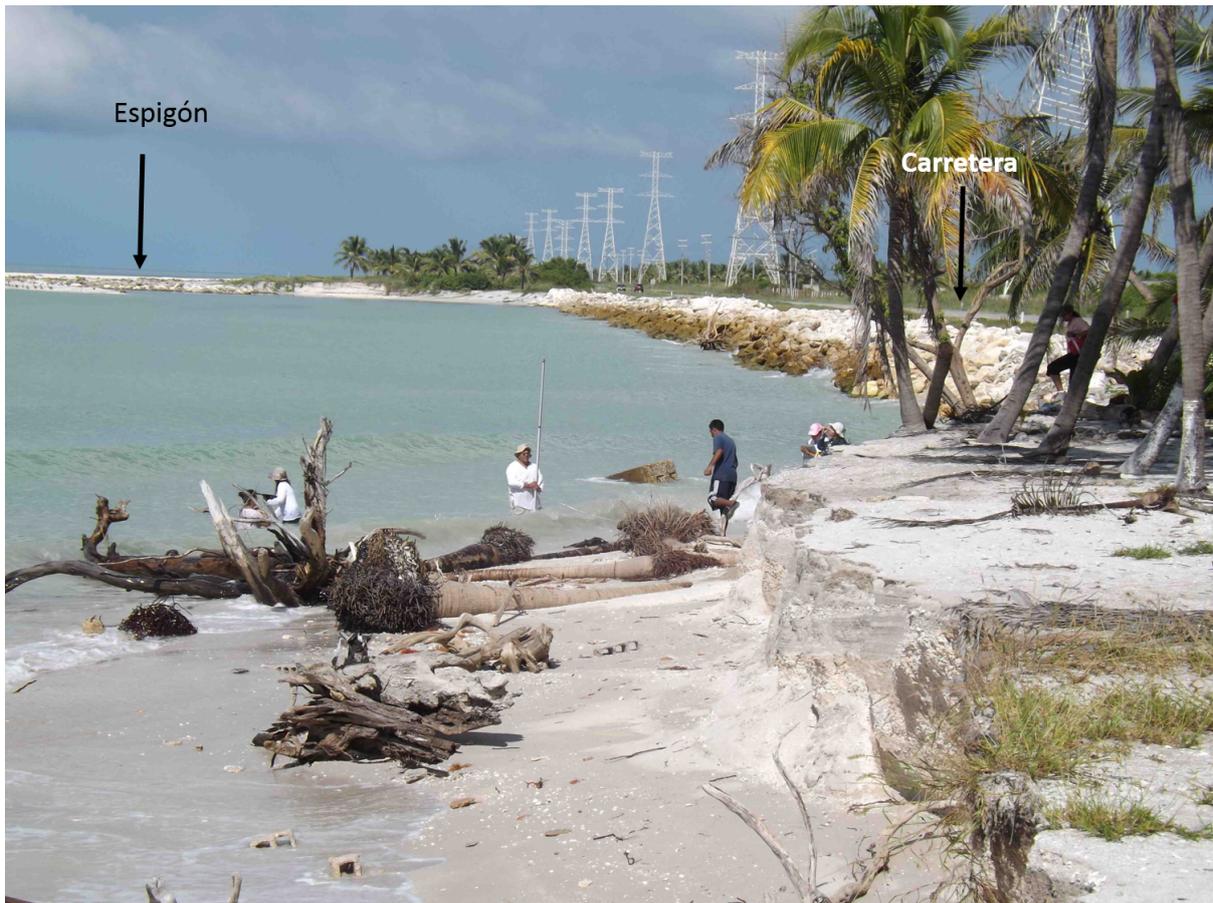
**Figura 4.19.** Isla Aguada una de las playas más extensas de la zona de estudio. El puente vehicular que conecta la carretera Ciudad del Carmen-Champotón actúa como barrera para la acumulación de sedimentos.

Esta playa recibe arena por transporte litoral desde Sabancuy lo que hace que sea la playa más extensa del área de estudio (Bolongaro-Crevena *y col.*, 2010)(Figura 4.19). Para esta playa la amplitud máxima fue de 53 m para el periodo de lluvias 2014; en este periodo no presentaron escalones y la cota máxima obtenida fue menor a 1 m, lo cual indica una mayor acumulación de material arenoso. Para secas 2013, nortes 2014 y lluvias 2014 el comportamiento de la playa es similar, en longitud de playa la mayor fue en lluvias con cerca de 50 m, y la menor fue obtenida en nortes 2014 con 15 m. El gráfico de áreas (Figura 4.20 b)) muestra que de agosto de 2005 a junio 2007 se mantiene estable, con una amplitud de playa que oscila de 80 a 90 m; a partir de marzo 2010 a abril 2014 la amplitud de playa se encuentra entre 10 y 30 m, y para octubre 2014 se encuentra en 53 m (Figura 4.20 a)). Para esta playa se observa que en lluvias y nortes hay erosión y que en secas se presenta la acumulación de material arenoso.



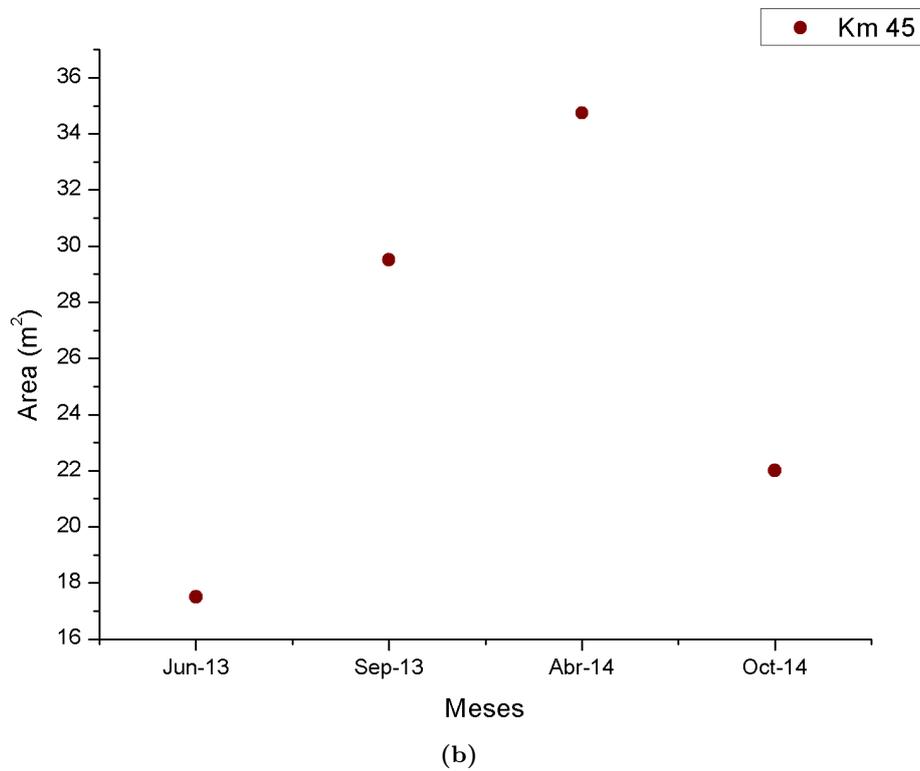
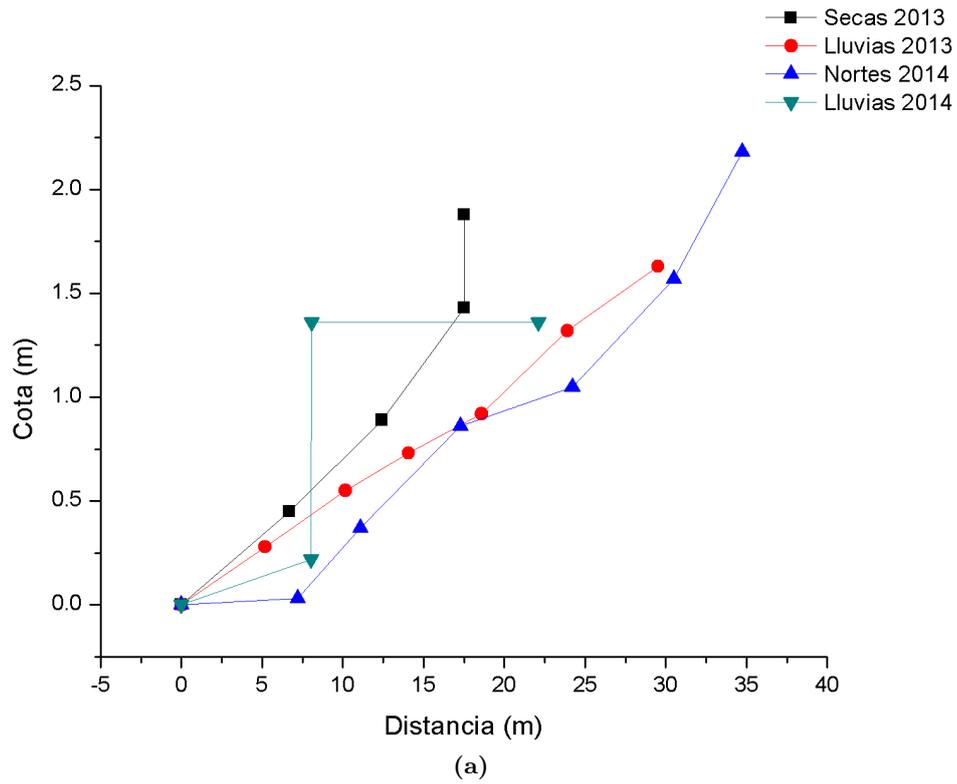
**Figura 4.20.** a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Isla Aguada. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.8. KM 45



**Figura 4.21.** Playa en el KM 45, de la carretera Ciudad del Carmen-Champotón, se observa al fondo los espigones cercanos a la playa y la protección de roca de la carretera que freno la erosión, por otro lado se aprecia los escarpes presentes en el sitio.

La morfología de la playa no presenta cambios significativos para el periodo de muestreo, en secas 2013 tenia una amplitud de 15 m con una cota de 1.5 m y para lluvias 2013 presentó una acumulación de 10 m, para nortes 2014 la amplitud de playa fue de 35 m y en lluvias 2014 de 8 m y no presento supraplaya, además presentó un escalón en su lugar, por lo que la perdida de material en su porción arenosa es de suma importancia ya que colinda con la carretera que va de Ciudad del Carmen –Champotón (Figura 4.20 a)). En el gráfico de área se observa un incremento de junio 2013 a abril 2014, se desploma la amplitud de playa en octubre 2014 a 8 m (Figura 4.22 b)). En esta playa se encuentran espigones. La presencia del espigón modifica la dirección de las corrientes y no permite el paso de arena hacia el otro lado de la estructura, con la consiguiente reducción de disponibilidad de arena en la playa al otro lado del espigón, causando en ocasiones problemas delicados de erosión(Figura 4.21).



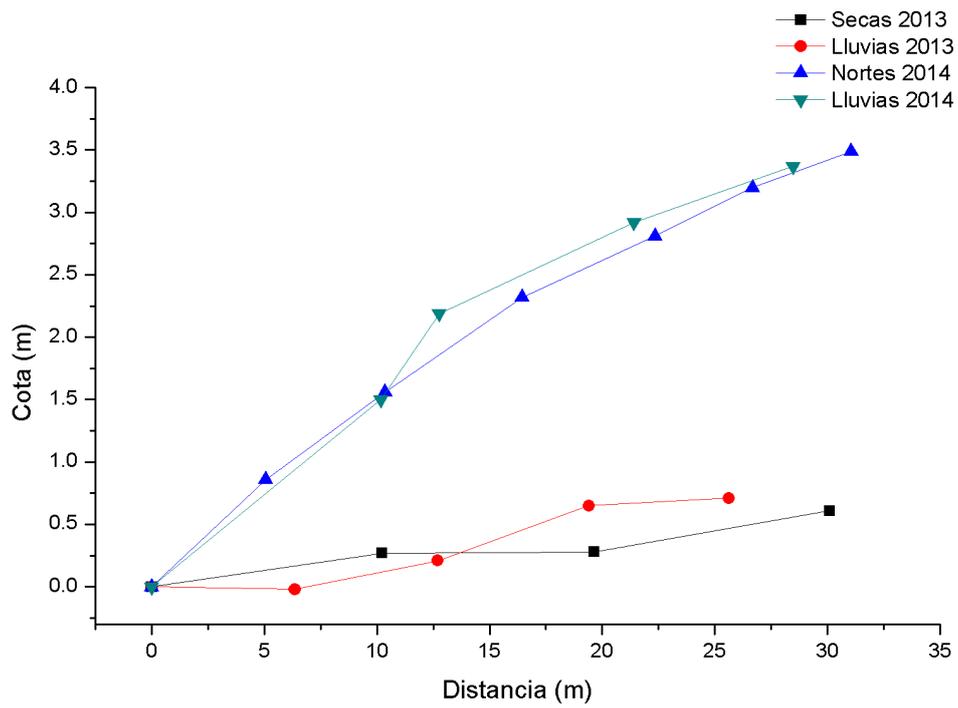
**Figura 4.22.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, KM 45. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.9. Las Bombas

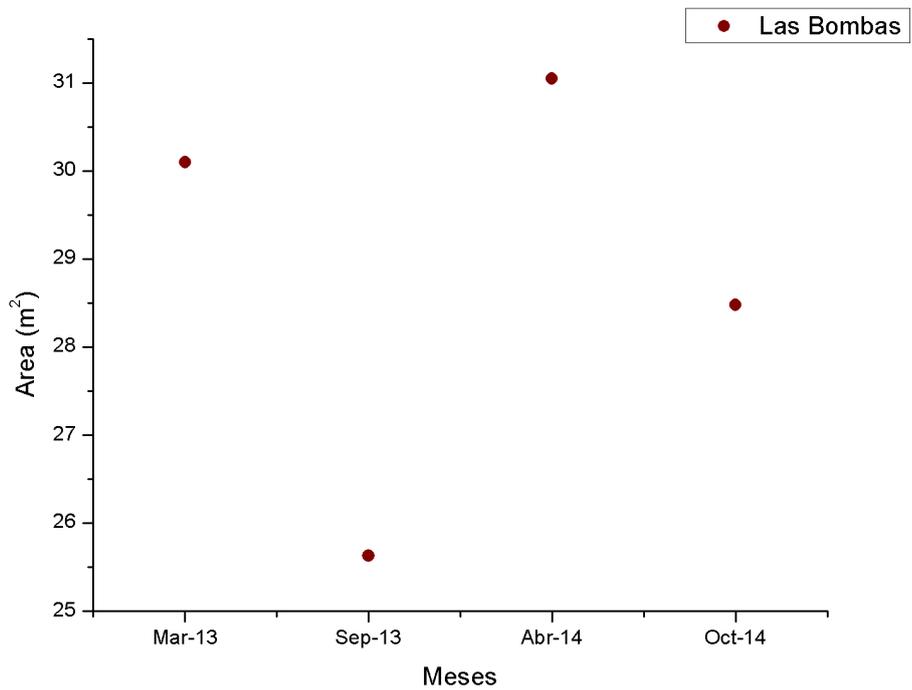


**Figura 4.23.** Parte de la playa de las Bombas, se observa la acumulación y la cercanía a las torres de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad.

Morfológicamente esta playa tiene un comportamiento cíclico. En el periodo del 2013 mantuvo una cota de 0.5 y una amplitud de 30 m; por lo que se puede observar este sitio tiene erosión en secas y lluvias 2013, y una acumulación considerable a partir de nortes y lluvias 2014, pues la presencia de escalones hace evidente la ganancia de material arenoso (Figura 4.24 a)). En el gráfico de áreas (Figura 4.24 b)) es notoria la forma cíclica que presenta la playa. Colinda esta porción de la playa con la carretera que va a Champotón-Ciudad del Carmen y en ella se encuentran las torres de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Figura 4.23) las cuales se encuentran vulnerables debido a que sus barreras de protección han sido expuestas por la pérdida de material arenoso.



(a)



(b)

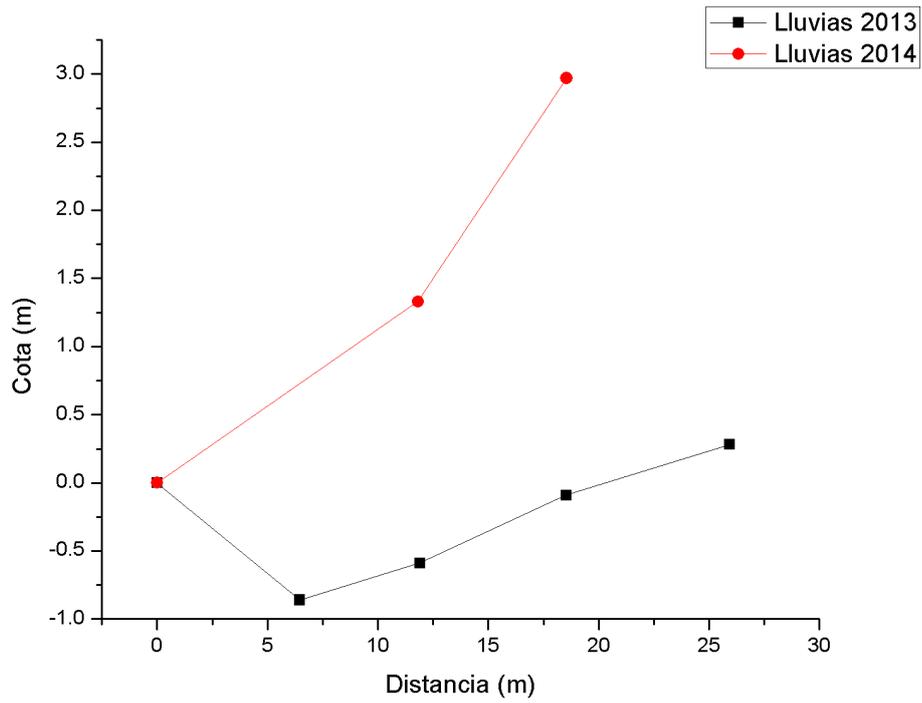
**Figura 4.24.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Las Bombas. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.10. Villa Quietud

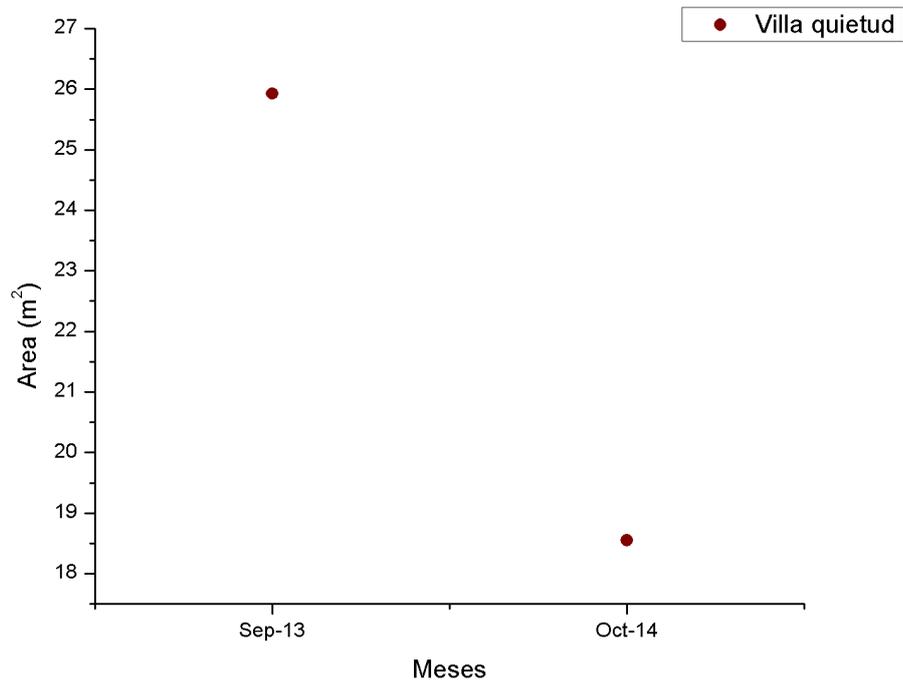


**Figura 4.25.** Playa Villa Quietud, es una de las playas que presenta poco impacto humano. Se aprecia el escarpe provocado por el oleaje.

En esta playa (Figura 4.25) se observa que en la época de lluvias 2013 se presenta un canal de marea y se tiene la mayor de amplitud de playa (25 m), en lluvias 2014 se tiene el inverso, esto es acumulación de material arenoso y una amplitud de 20 m (Figura 4.26 a)). Presenta una berma de tormenta estabilizada con vegetación rastrera, no se observa ningún obstáculo en el transporte litoral, el aprovisionamiento de material arenoso proviene vía transporte litoral desde Sabancuy y el transporte mar-tierra (Torres *y col.*, 2010) (Figura 4.26 b)).



(a)



(b)

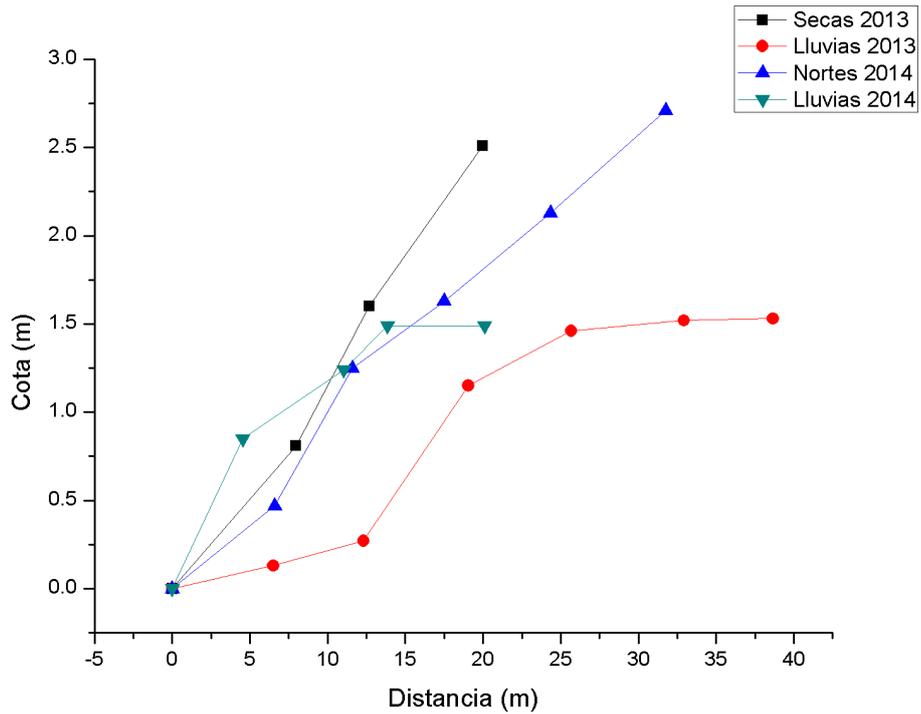
**Figura 4.26.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Villa Quietud. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.11. Sabancuy

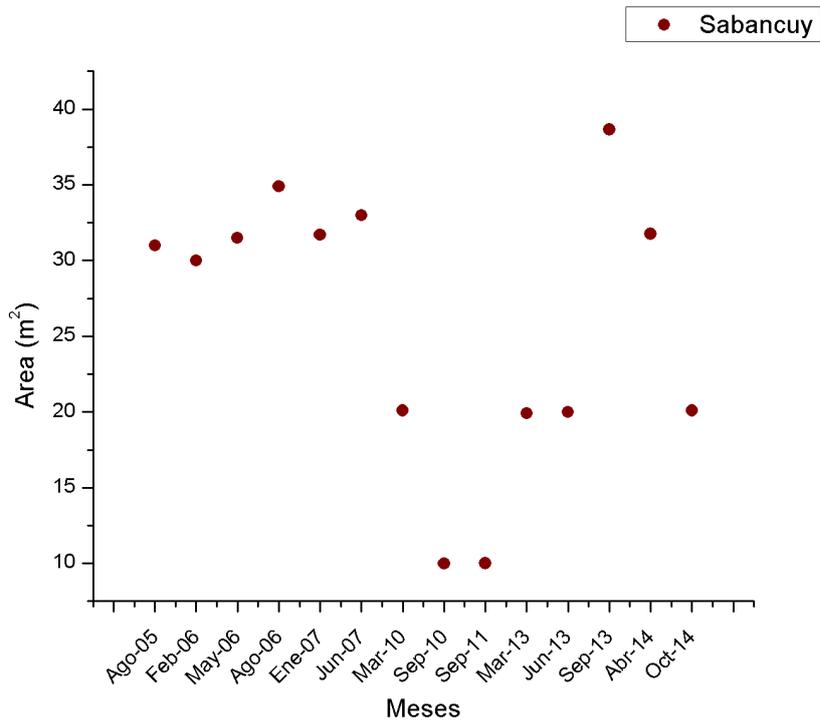


**Figura 4.27.** Playa de Sabancuy con presencia de escalones y material de infraestructuras arrastradas por el oleaje.

Esta playa presenta una amplitud cercana a 40 m para la época de lluvias 2013 esta playa colinda con la carretera que va de Ciudad del Carmen- Champotón (Figura 4.27), para las siguientes épocas hay cambios poco significativos. En secas 2013 y lluvias 2014 hay erosión (20 m) y para la temporada de lluvias 2013 (40 m) y nortes 2014 (32 m) existe acumulación. En la gráfica de áreas se observa que es una playa con relativa estabilidad de agosto 2005 a junio 2007 (oscilando entre 30 a 35 m de amplitud), para marzo 2010 a junio 2013 que presentó de 10 a 20 m, y para septiembre 2013 a octubre 2014 pasó de 38 m a 20 m (Figura 4.28 a)). Por lo que a esta playa se le puede considerar estable, con un comportamiento cíclico, acumulación de material arenoso en lluvias y nortes y para secas disminución. La playa se encuentra a un costado de la escollera Este de la boca del estero de Sabancuy, la cual actúa como barrera para el transporte natural de los sedimentos (Figura 4.28 b)), afectando la dinámica en la depositación de material arenoso en la playa.



(a)



(b)

**Figura 4.28.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Sabancuy. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

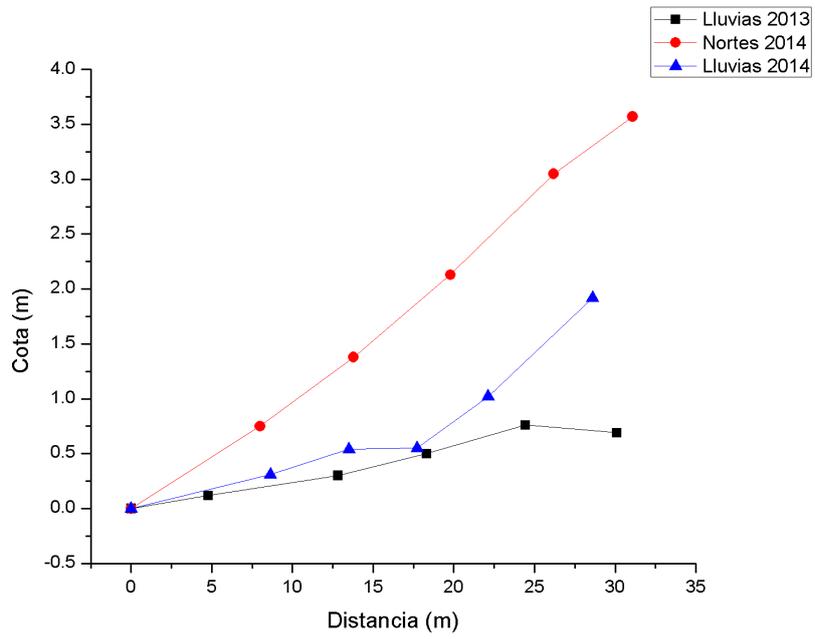
#### 4.2.12. Chenkan



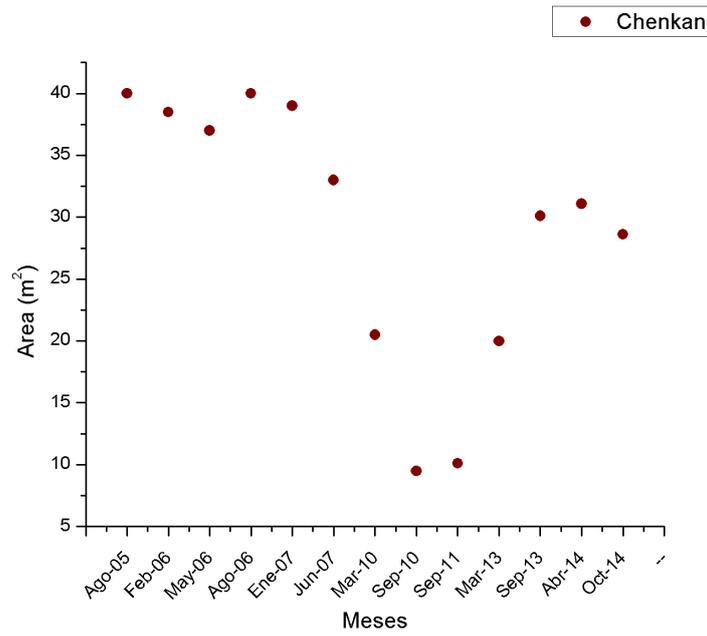
**Figura 4.29.** La playa de Chenkan es una de los principales sitios de anidación de la tortuga marina, ya que es idónea tanto en su textura de sedimentos como la amplitud de la playa.

Se observa una pérdida de material en la zona de infraplaya y mesoplaya en nortes y lluvias 2014, la amplitud promedio de playa fue de 31 m para la época de nortes 2014; esta playa colinda con el campamento tortuguero de Chenkan que se ubica en el kilómetro 11+00 de la carretera Ciudad del Carmen-Campeche, se encuentra dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (Figura 4.29). Para las siguientes épocas se observa que se posicionaron por debajo de 30 m. En el diagrama de áreas de su sección transversal, se mantuvo estable de agosto 2005 a junio 2007 con una amplitud de playa cercana a 50 m, de marzo 2010 a marzo 2013 disminuyó ligeramente su amplitud a 10 m, para septiembre 2013 aumentó su amplitud cercana a 40 m. Para este periodo se realizó el perfil hasta la carretera, disminuyendo su amplitud para abril y octubre de 2014 (12 m) (Figura 4.30 a)). En lluvias y nortes presenta acumulación, en periodo de secas erosión. Aparentemente la pérdida de material arenoso por el transporte litoral

sea la causa principal de erosión pues existe la presencia de tetrápodos localizados a 10 km al noroeste de esta playa, los cuales actúan como “trampa de sedimentos” hacia la parte superior donde se encuentran y la inferior están expuestos a las corrientes y esto genera una pérdida de material arenoso (Figura 4.30 b)).



(a)



(b)

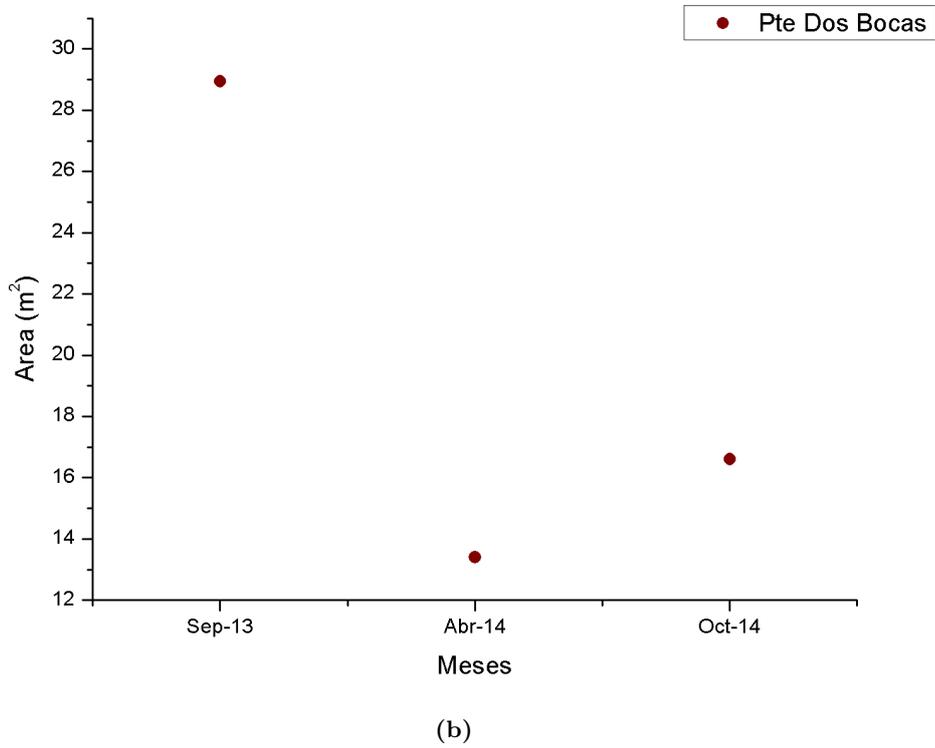
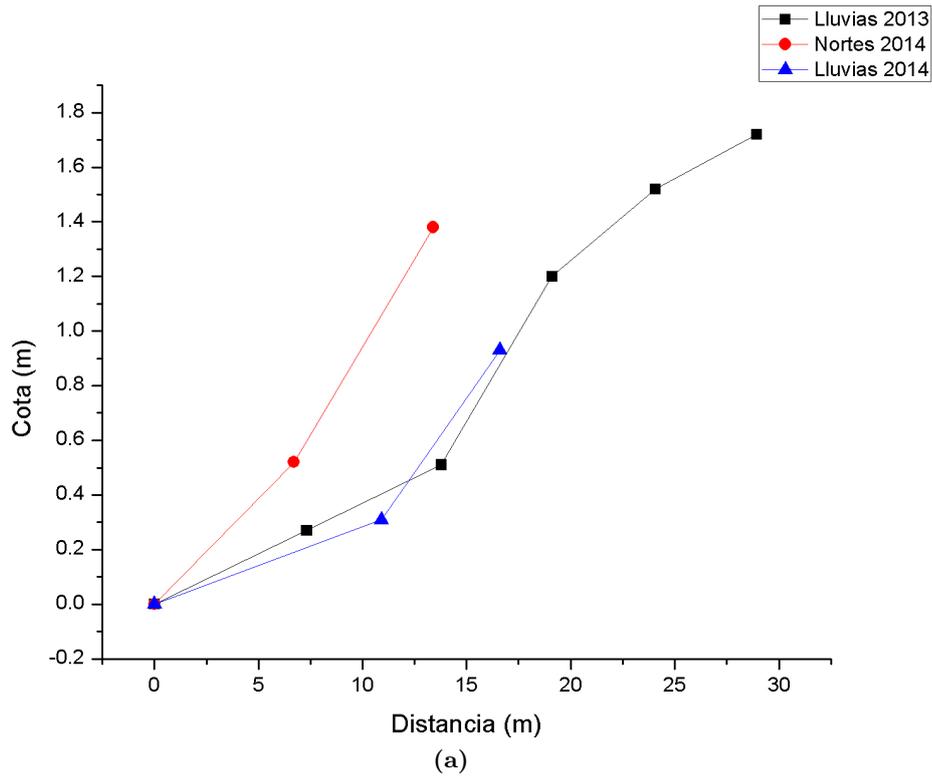
**Figura 4.30.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Chenkan. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.13. Puente Dos Bocas



**Figura 4.31.** Descarga de agua proveniente de los manglares, se puede observar la fila de tetrápodos, lo cuales atrapan sedimentos en la parte alta de la playa.

Para esta playa (Figura 4.31) se observó la mayor amplitud de playa (30 m) presente en lluvias 2013, para nortes 2014 hubo una disminución a 10 m y una cota de 1.4 m lo cual hace énfasis a una acumulación de material arenoso; para lluvias 2014 la amplitud fue de 17 m con una cota de 0.8 m (Figura 4.32 a)). El gráfico de áreas indica que en lluvias existe acumulación y en nortes erosión. Esta playa se encuentra localizada cercana a la descarga de aguas provenientes de la porción de manglares de Chenkan, presenta una línea paralela a la carretera de tetrápodos, lo cual frena el oleaje, la aplicación principal es la protección de los sedimentos, pero se observa la ausencia de ellos en la zona (Figura 4.32 b)).



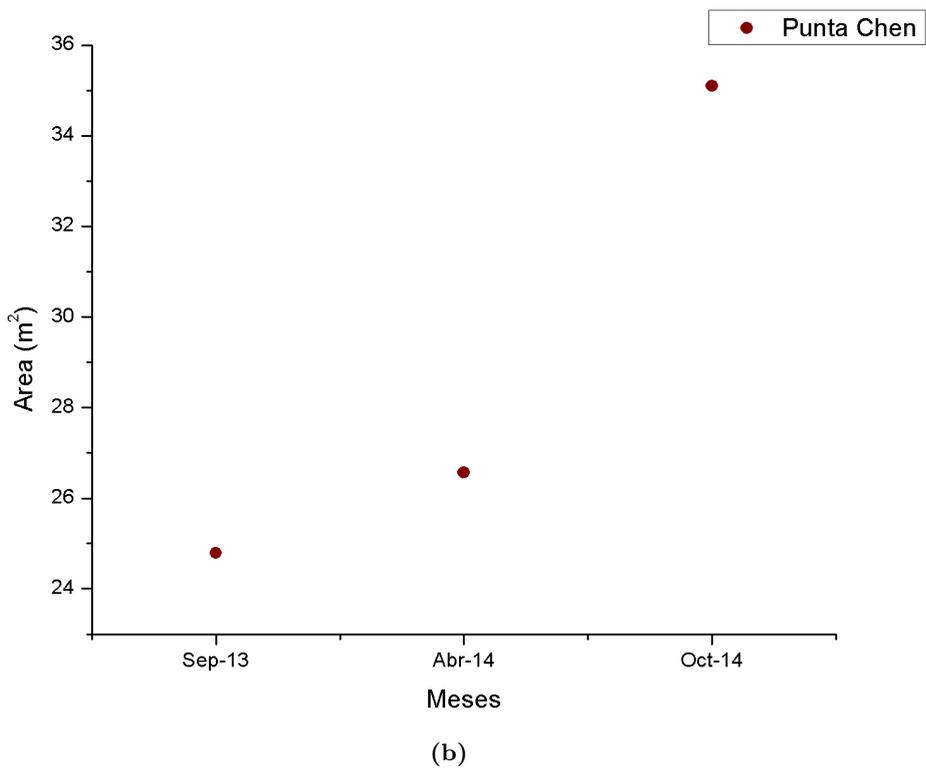
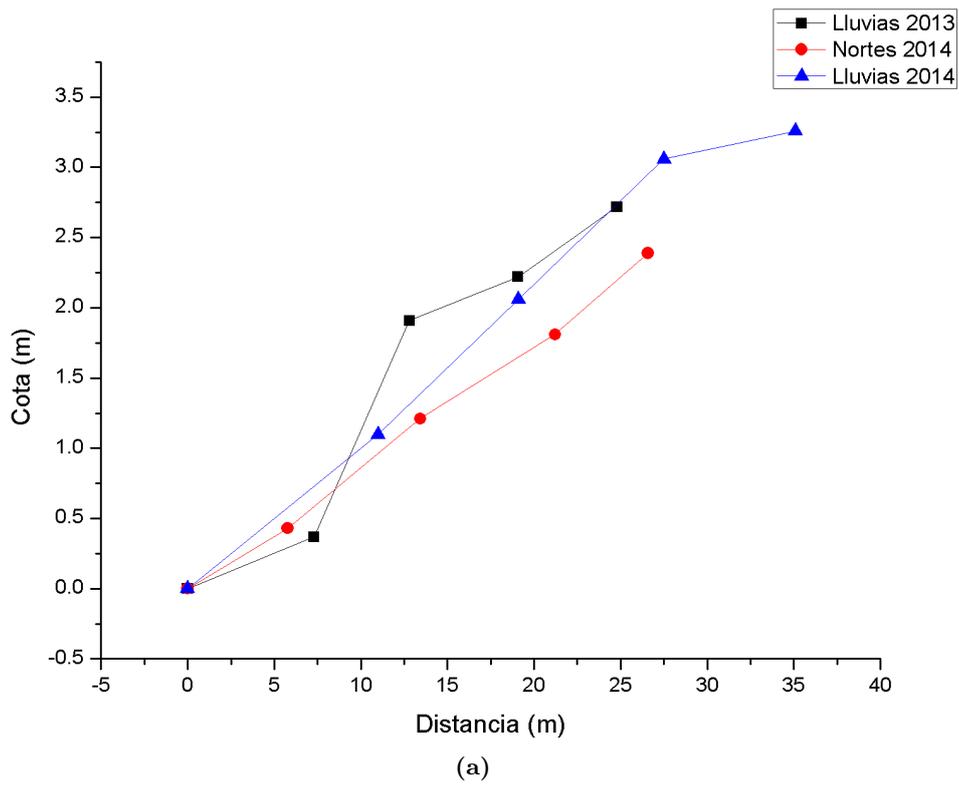
**Figura 4.32.** a)Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Puente Dos Bocas. b)Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.14. Punta Chen



**Figura 4.33.** Punta Chen con roca de playa en la subzona de mesoplaya, que protege la porción arenosa.

Esta playa se encuentra ubicada a 27 kilómetros al sureste de Champotón, morfológicamente no sufrió cambios significativos en las épocas de muestreo, en la subzona de mesoplaya presenta porciones de playa de roca (*rock beach*) (Figura 4.33) por lo que se pudiera considerar que es una playa en estabilidad. La mayor amplitud de playa fue de 35 m presente en lluvias 2014 (Figura 4.34 a)). En el gráfico de áreas se observa que de septiembre 2013 a abril 2014 existe un incremento que va de 25 a 27 m, de abril a octubre 2014 existe acumulación cercana a 35 m. En términos generales esta playa presenta acumulación. Tiene una barrera natural de protección de roca de playa (*rock beach*) en la transición de subzonas de infraplaya a mesoplaya (Figura 4.34 b)).



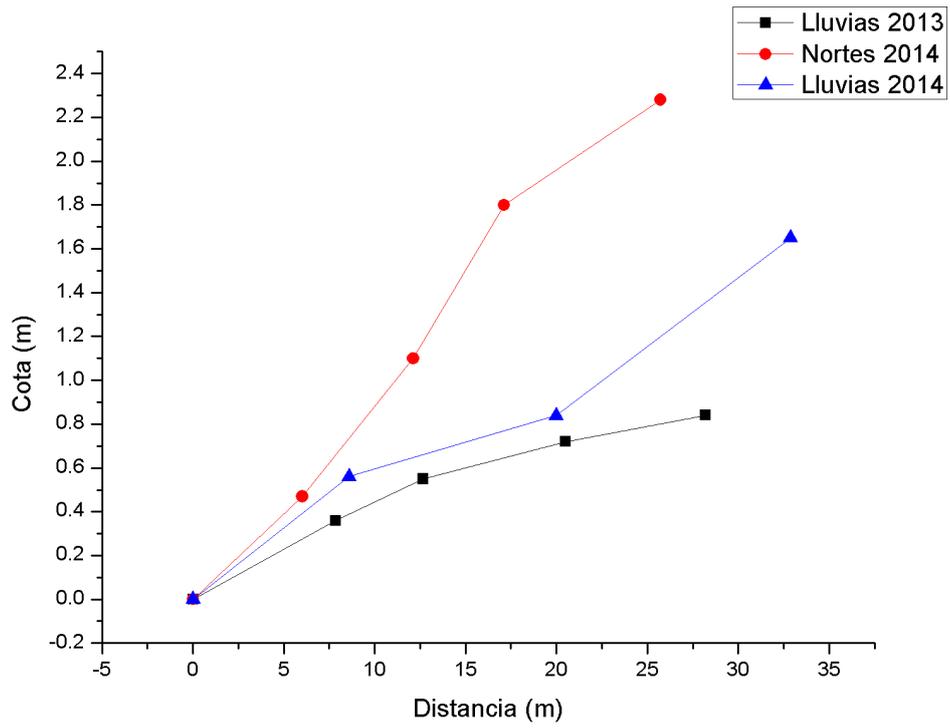
**Figura 4.34.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Punta Chen. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

#### 4.2.15. Xochen

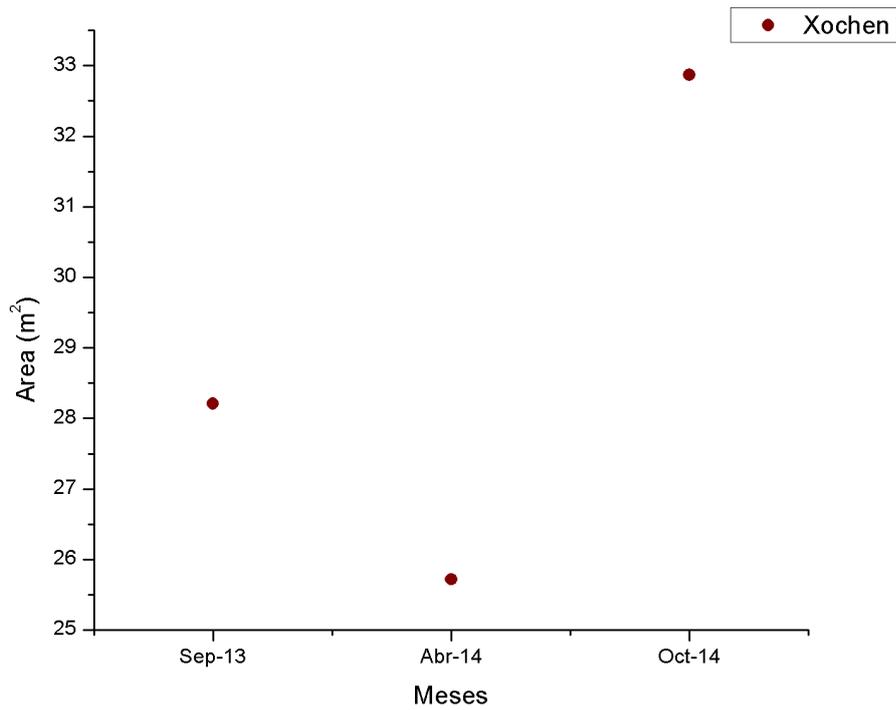


**Figura 4.35.** Playa en proceso de erosión-acumulación.

Esta playa se encuentra a 6 km del puente Chenkan II, y la mayor amplitud registrada fue en lluvias 2014 con 34 m (Figura 4.35), para lluvias 2013 se aprecia disminución en la amplitud de playa con una cota menor a 1 m (Figura 4.36 a) . En nortes 2014 la playa presento una mayor acumulación de porción arenosa cercana a una cota de 2 m, y la amplitud fue en 25 m. El gráfico de áreas indica que de septiembre a abril 2014 presento erosión (de 28 m a 26 m) y de abril a octubre acumulación (de 26 m a 33 m). Por lo tanto el comportamiento es acumulativo (Figura 4.36 b)).



(a)



(b)

**Figura 4.36.** a) Diagrama de los perfiles para la diferentes épocas, Xochén. b) Diagrama de áreas de las secciones transversales de los perfiles.

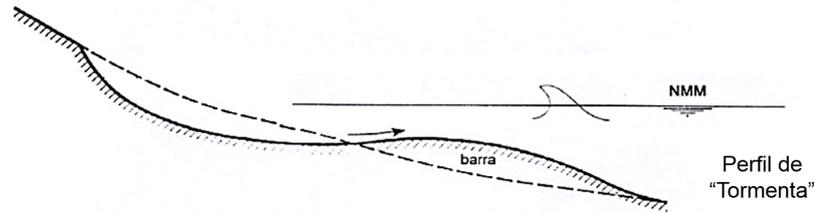
### 4.3. Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)

Las playas arenosas son ambientes dinámicos cuya forma está determinada por mareas, olas y vientos que depositan o remueven sedimentos produciendo cambios en la morfología. El estudio de las playas se hace mediante la cuantificación de algunas características morfológicas y estimación de parámetros relacionados con la altura, amplitud, pendiente o perfil, y volumen de la playa. Las playas no son elementos estáticos en la costa, sino son sistemas que cambian en su forma y perfil a lo largo del tiempo. Estos cambios de forma, conllevan un transporte de sedimentos que origina, a su vez, variaciones en la distribución granulométrica del material que conforma la playa en las distintas épocas de año. La forma de los perfiles es resultado de complejos procesos de transporte y acumulación y en ella subyace información de gran utilidad para el estudio de la dinámica de las costas. Si las playas son consideradas como un recurso natural de alto valor medioambiental, generadoras de riqueza y bienestar social, es necesario tomar en cuenta la variabilidad que presentan. Los forzamientos que generan los cambios costeros tienen diferentes escalas temporales y espaciales de actuación. Existen modificaciones de largo plazo (cientos de años) asociadas a la subsidencia de la zona costera o al aumento que experimenta el nivel del mar debido al cambio climático global. En escalas temporales del orden de décadas, la línea de costa puede experimentar modificaciones asociadas a variaciones en la capacidad del transporte litoral en respuesta a la implantación de obras de protección o abrigo creadas por el hombre, o bien, por deficiencias (por ejemplo construcción de presas) o excesos (lluvias en zonas deforestadas) de material sedimentario.

Para determinar las similitudes y diferencias (estrictamente la interrelación) entre las formas de variación de la playa, en los distintos sitios de las diferentes épocas y eventualmente, relacionar dicha variabilidad con los factores causados, fue necesario realizar un análisis integral que tome en cuenta cada tipo de variabilidad, así como su interrelación con el resto de ellas. Con dicho propósito se aplicó la metodología de las Funciones Empíricas Ortogonales. El análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales para este estudio, permitió identificar dos tipos de modos en los perfiles de playa para las distintas épocas climáticas en el litoral de Campeche, los cuales son:

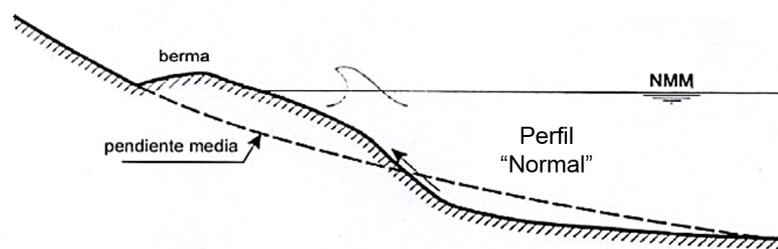
Modo 1: “*Perfil de tormenta*”. Este perfil se forma al incidir el oleaje de energía muy elevada (visto en época de nortes y lluvias), se produce una acumulación de material sedimentológico

en la zona de rompiente debido a la erosión de la subzona de supraplaya, produciendo playas extensas y la formación de barras, provocando al mismo tiempo un retroceso en la línea de costa hacia el mar, (Figura 4.37).



**Figura 4.37.** Perfil de "Tormenta", perfil de erosión. Tomado de Rijn (1998).

Modo 2: "Perfil normal". Este tipo de perfil se puede interpretar como la recuperación del perfil debido principalmente al oleaje (presentado en época de secas). Este oleaje actúa sobre los depósitos sumergidos y los lleva hacia la línea de costa haciéndola avanzar, y aumentando la pendiente del perfil. Por tanto resulta un perfil con una amplia berma (Figura 4.38).



**Figura 4.38.** Perfil "Normal", perfil de acumulación. Tomado de Rijn (1998).

Además de los modos anteriores se observaron otros modos los cuales complementan en mínima varianza a cada una de las épocas climáticas estudiadas (Apéndice C).

### 4.3.1. Secas 2013

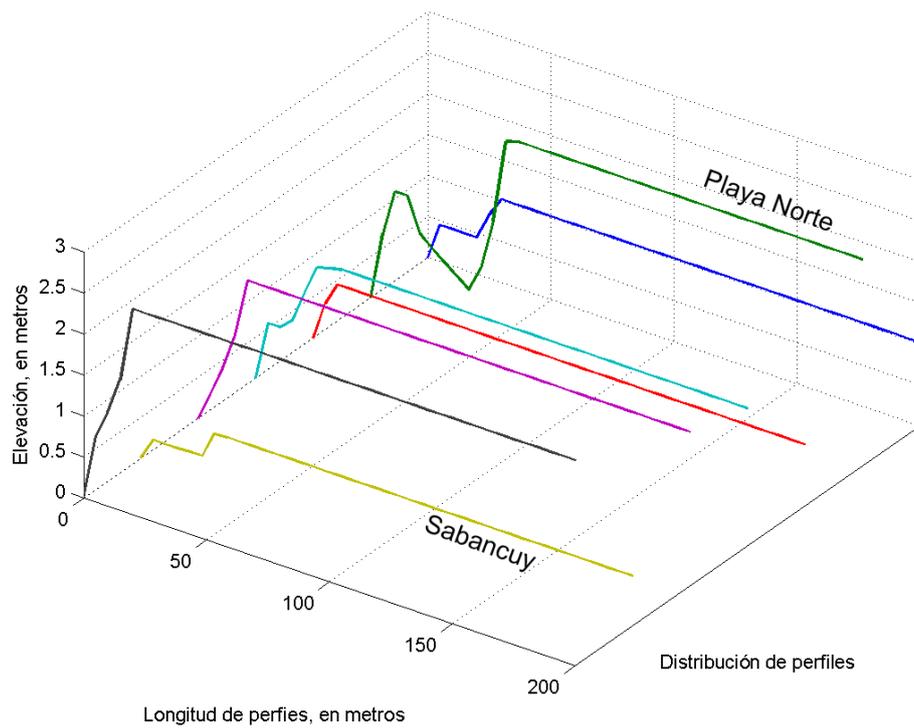
Para el periodo de secas 2013 se recabo información de 7 perfiles de playa (Figura 4.39 a)), el análisis de componentes principales, indica que existieron cuatro modos principales de variación de la playa, de los siete modos posibles, solo dos de ellos conjuntan el 99 % de la variabilidad total, con valores del 78 % y 21 % (Tabla 4.2)

Los modos principales se muestran en la figura 4.39 b). En color negro pertenece al modo principal 1, el cual esta representado en la gran mayoría de los los perfiles, con una ligera pendiente y una larga longitud de playa, seguido de modo principal 2 de color rojo, la suma de ambos explica la variación estacional de los perfiles.

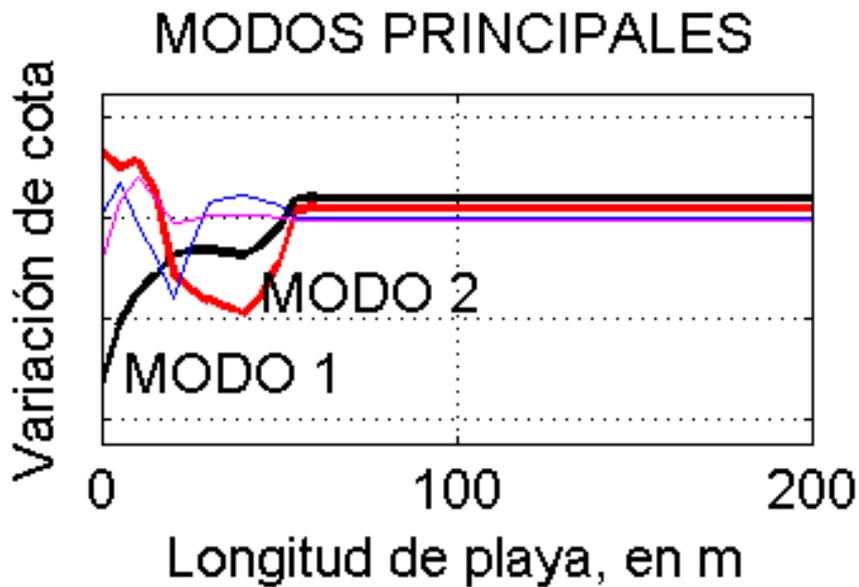
**Tabla 4.2.** Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES

Modo	Varianza total (%)
1	77.6225
2	20.6583
3	1.1943
4	0.3923
5	0.1040
6	0.0277
7	0.0009

Las formas de variabilidad obtenidas (Figura 4.40) indica que las pendientes de los perfiles muestreados sigue la tendencia del modo principal 1 (perfil de tormenta), las playas que presentan estas características son: Playa Norte, San Nicolasito, Isla Aguada, KM 45, Las Bombas y Sabancuy. Por otro lado la suma del modo principal 1 y 2 solo esta representado en el perfil de Bahamita.

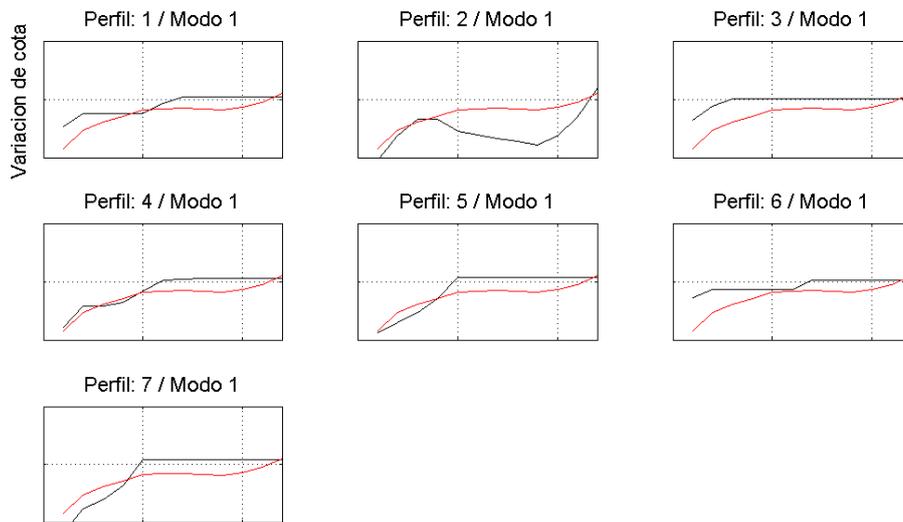


(a)

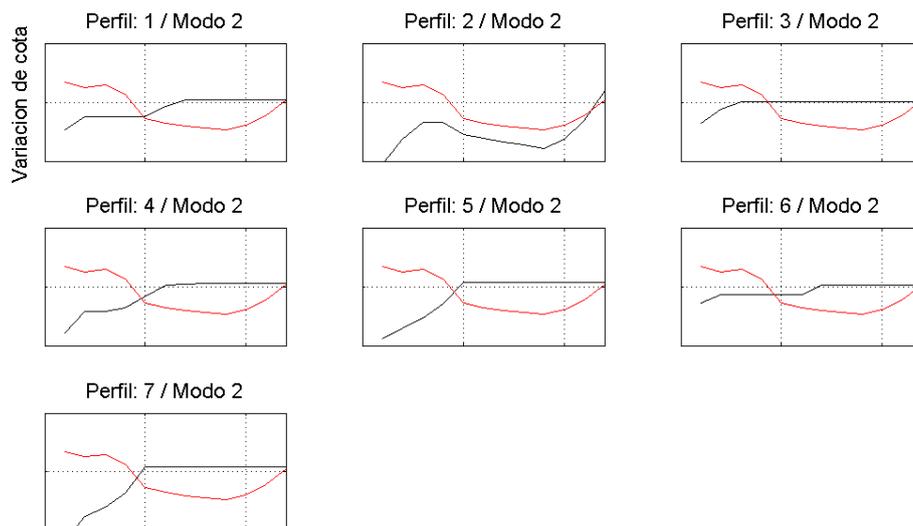


(b)

**Figura 4.39.** a) Representación de los perfiles pertenecientes a la época de secas 2013. b) Modos principales para la época secas 2013, Modo 1 (negro) y Modo 2 (rojo).



(a)



(b)

**Figura 4.40.** a) Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. b) Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013.

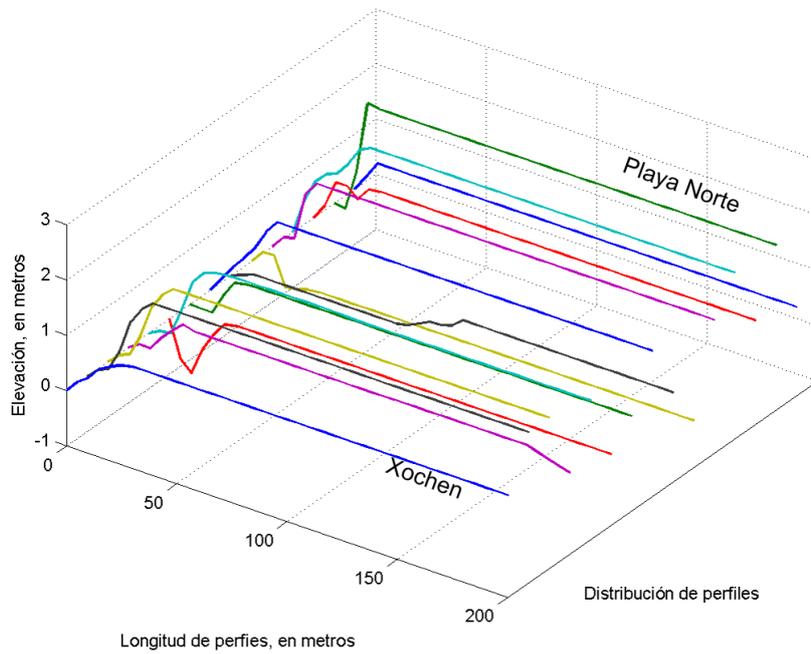
### 4.3.2. Lluvias 2013

Para la época de lluvias 2013 el análisis de datos del levantamiento de perfiles realizado incluyó a 15 perfiles (Figura 4.41 a)). El análisis indica que los modos resultantes (Modos 1 y 2) agrupan los porcentajes de varianza (Tabla 4.3) se describen 4 modos principales de variación que están representados de los 15 posibles, que conjuntan el 99% de la variabilidad total, con valores de 91%, 3%, 3% y 2%.

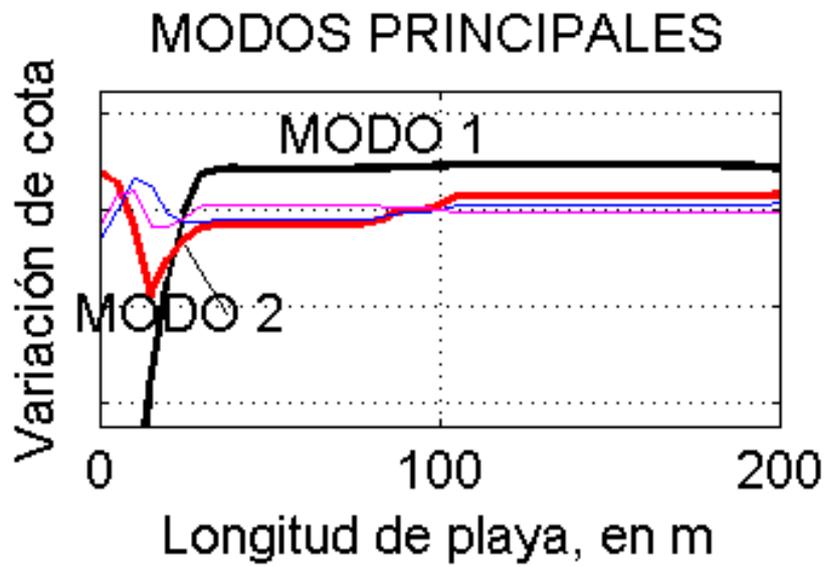
**Tabla 4.3.** Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES

Modo	Varianza total (%)
1	91.3074
2	3.3899
3	2.8528
4	1.9037
5	0.2904
6	0.1517
7	0.0848
8	0.0152
9	0.0039
10	0.0002
11	0.0000
12	0.0000
13	0.0000
14	0.0000
15	0.0000

En la figura 4.41 b), se presentan los principales modos. El modo principal 1 de color negro, representa una pendiente pronunciada y una longitud de playa extensa (perfil de tormenta), por otra parte de color rojo el modo principal 2 tiene un canal de marea en la subzona de infraplaya (perfil normal). La suma de ambos reproducen los rasgos espaciales particulares que presenta la cara de la playa a lo largo de la costa. Por tanto existe una forma de variación representada por el modo principal 1 que explica la mayor parte de la tendencia general y la combinación lineal de 2 de ellos reproduce los rasgos espaciales particulares que presenta la cara de playa a lo largo de la costa. Por lo que los perfiles de Playa Norte, Club de Playa, CASES, San Nicolasito, Isla Aguada, KM 45, Las Bombas, Sabancuy, Puente Dos Bocas y Xochen están representados por el modo principal 1, perfil de erosión. Bahamita, Puerto Real, Villa Quietud y Chenkan por la suma del modo principal 1 y 2(perfil de erosión y acumulación)(Figura 4.42).

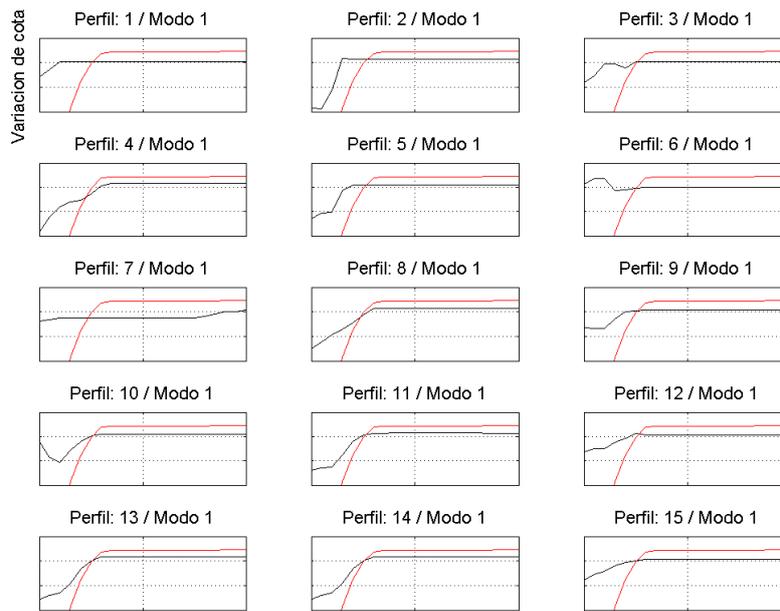


(a)

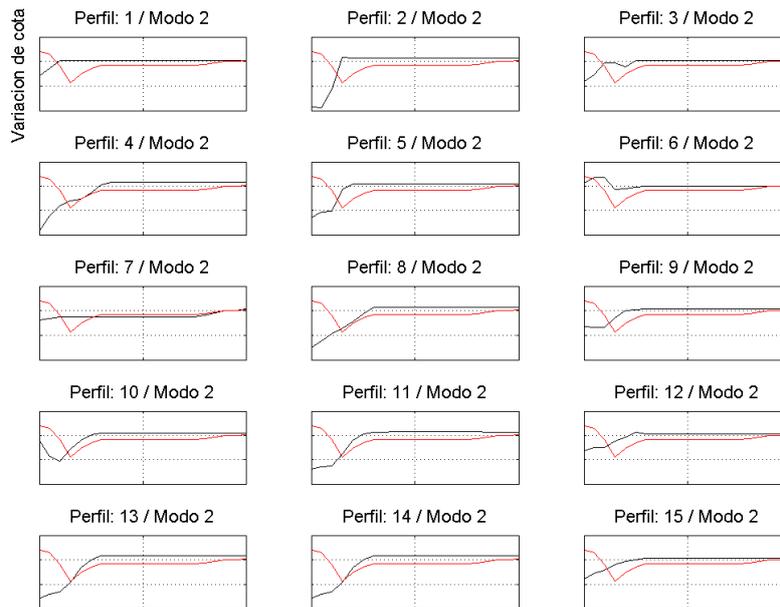


(b)

**Figura 4.41.** a) Representación de los perfiles para la época de lluvias 2013. b) Modos principales para la época lluvias 2013



(a)



(b)

**Figura 4.42.** a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013.

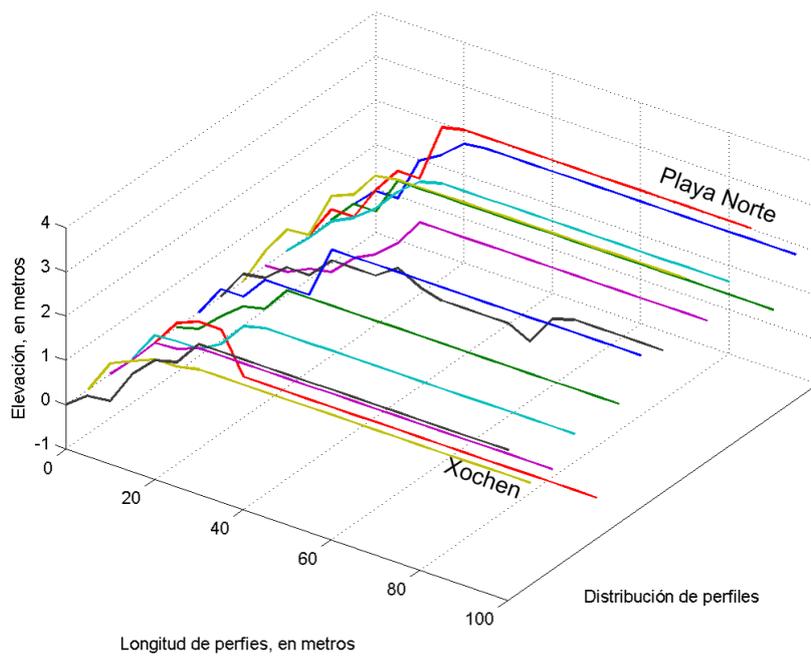
### 4.3.3. Nortes 2014

Para la época de nortes 2014 el análisis de datos del levantamiento de perfiles contiene información de 14 perfiles (Figura 4.43 a)). El análisis indica que los modos resultantes agrupan los porcentajes de varianza siguientes: 95 %, 2 %, 1 % y 0.8 % (Tabla 4.4) los cuales son los 4 modos principales que reproducen los rasgos espaciales particulares que presenta la cara de playa a lo largo de la costa.

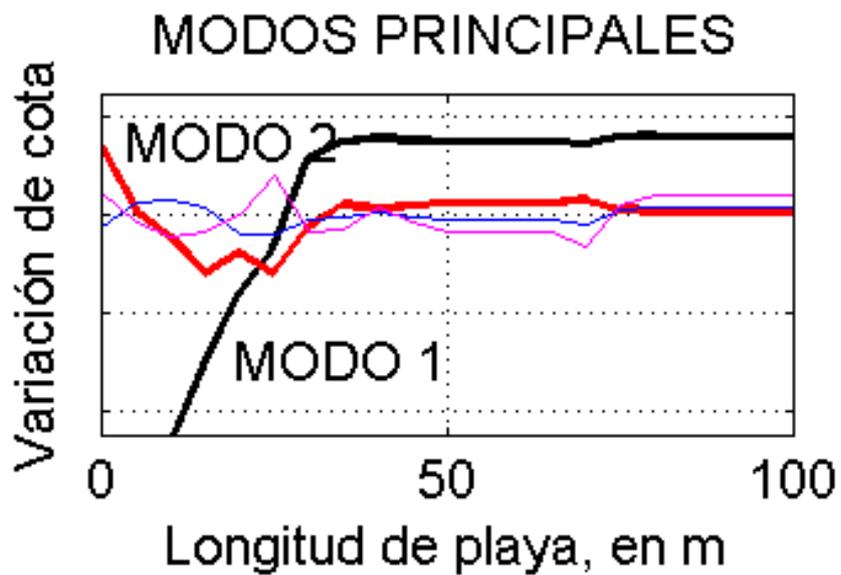
En la figura 4.43 b), se presentan los principales modos. El modo principal 1 de color negro, perfil de tormenta; de color rojo el modo principal 2, perfil normal. Existe una forma de variación representada por la componente principal 1 la cual explica la mayor parte de la tendencia general y la combinación lineal de 2 de ellos. Los perfiles de Playa Norte, Bahamita, CASES, Puerto Real, Las Bombas y Punta Chen y Xochen, se reproducen con el modo principal 1, perfil de tormenta o de erosión. Por otro lado los perfiles de Club de Playa, San Nicolasito, Sabacnuy, Chenkan, Isla Aguada, Km 45 y Puente Dos Bocas se representan con la suma del modo principal 1 y 2 (perfil de tormenta y normal) (Figura4.44).

**Tabla 4.4.** Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES

Modo	Varianza total (%)
1	94.9076
2	2.2677
3	1.0161
4	0.8226
5	0.5392
6	0.2088
7	0.1625
8	0.0756
9	0.0000
10	0.0000
11	0.0000
12	0.0000
13	0.0000
14	0.0000
15	0.0000

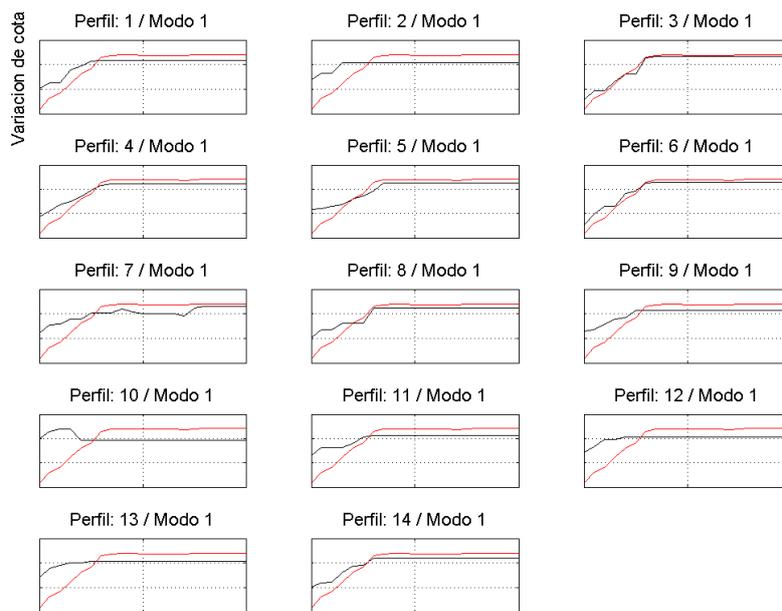


(a)

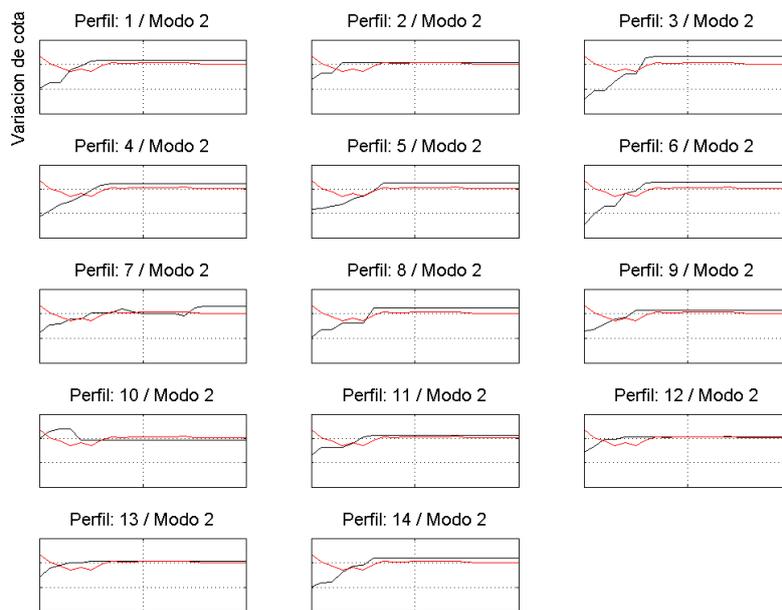


(b)

**Figura 4.43.** a) Representación de los perfiles pertenecientes a la época de nortes 2014. b) Modos principales para la época de nortes 2014.



(a)



(b)

**Figura 4.44.** a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014.

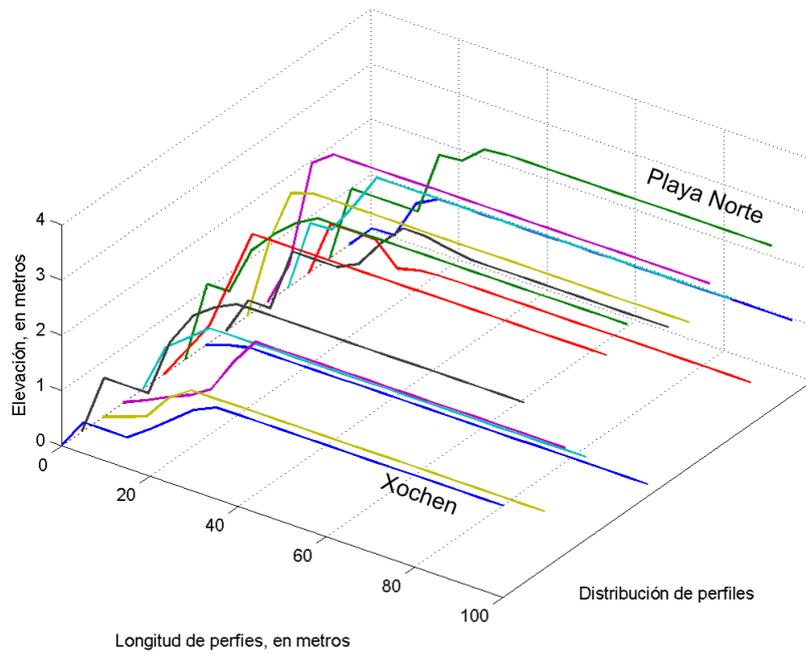
#### 4.3.4. Lluvias 2014

Para la época de lluvias 2014 se obtuvo información del levantamiento de 15 perfiles (Figura 4.45 a)). El análisis indica que los modos 1 y 2 agrupan el 95 %, y el 5 % por los dos últimos modos (Tabla 4.5) de la variabilidad total.

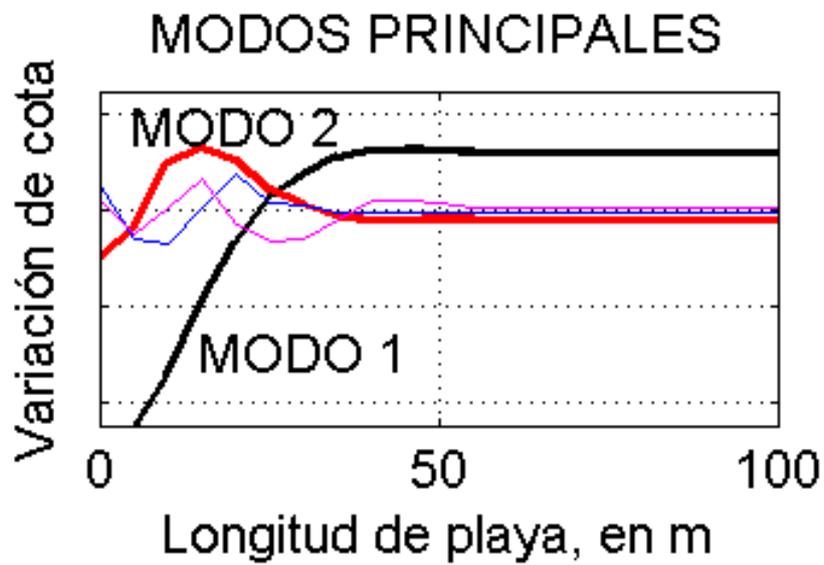
**Tabla 4.5.** Varianza total explicada por cada MODO, en PORCENTAJES

Modo	Varianza total (%)
1	90.6366
2	5.9682
3	1.6973
4	0.8419
5	0.6652
6	0.1271
7	0.0616
8	0.0021
9	0.0000
10	0.0000
11	0.0000
12	0.0000
13	0.0000
14	0.0000
15	0.0000

En la figura 4.45 b), se observa el modo principal 1 de color negro, que es el perfil de tormenta. Por otra parte de color rojo el modo principal 2 con un ligero escalón en la parte de la infraplaya, perfil normal. Entonces existe una forma de variación representada por el modo principal 1 que explica la mayor parte de la tendencia general y la combinación lineal de 2 de ellos reproduce los rasgos espaciales particulares que presenta la cara de playa a lo largo de la costa.

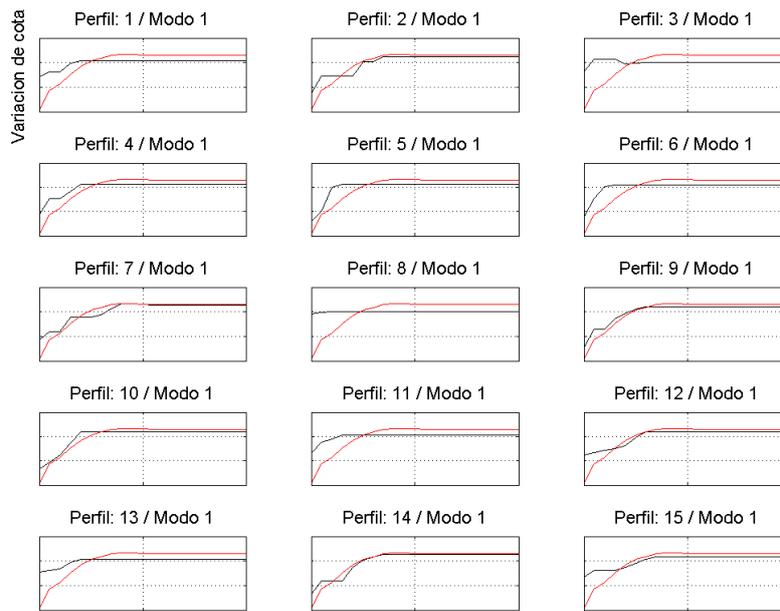


(a)

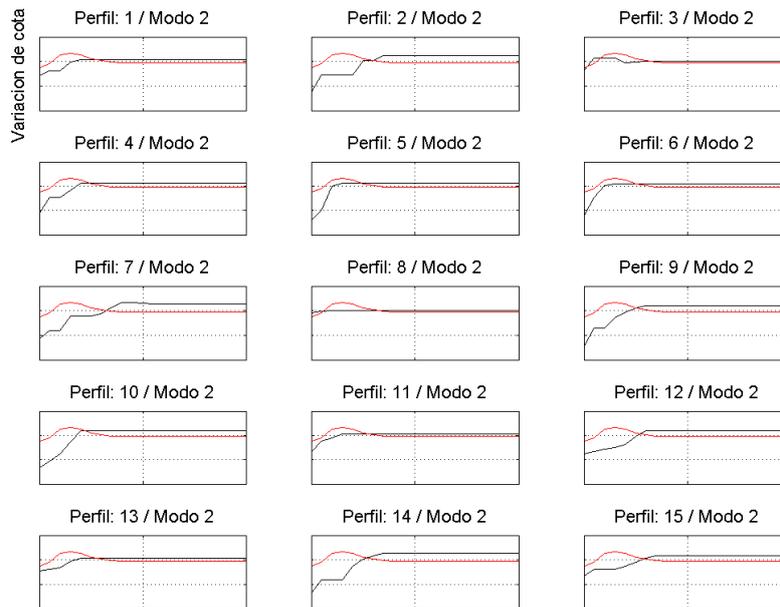


(b)

**Figura 4.45.** a) Representación de los perfiles pertenecientes a la época de lluvias 2014. b) Modos principales para la época lluvias 2014.



(a)



(b)

**Figura 4.46.** a)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 1 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. b)Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 2 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014.

Los perfiles de CASES, Las Bombas, Villa Quietud, Sabancuy, Chenkan y Punta Chen están reproducidos por el modo principal 1, perfil de tormenta o de erosión. Playa Norte, Club de Playa, Bahamita, San Nicolasito, Puerto Real, Isla Aguada, KM 45 y Puente Dos Bocas por la suma del modo principal 1 y 2 (perfil de tormenta y normal) (Figura 4.46).

La porción del litoral de Campeche que va de Playa Norte hasta Xochen, goza de una particularidad. Está dividida por la Isla del Carmen, en su porción del lado Este presenta un área cubierta de roca de playa (*beach rock*), de Isla Aguada hasta Xochen presenta algunas infraestructuras costeras de protección como los espigones cercanos a la playa situada en el KM 45 de la carretera que va de Ciudad del Carmen - Champotón, y las escolleras de Sabancuy, cercanas a la boca del estero de Sabancuy. Así que Playa Norte, CASES, Puerto Real, Isla Aguada, KM 45, Las Bombas, Villa Quietud, Sabancuy, Puente Dos Bocas se representaron con los dos primeros modos de variación de cada época, que es el perfil de tormenta y el perfil de normal. En Club de Playa para lluvias 2013 y 2014 se mantuvo en el comportamiento diferente del modo principal y en nortes 2014 presentó el patrón común de la época, indica que no existió una mayor variabilidad en esta playa. Para las playas de Bahamita y San Nicolasito en la época de nortes 2014 y lluvias 2014 se mantuvo el modo principal 1 (perfil de tormenta), para secas y lluvias 2013 presento un comportamiento diferente al modo principal de cada época. En playa de Punta Chen, en lluvias 2013 y nortes 2014 su comportamiento es similar, y hacia lluvias 2014 no hubo variabilidad se mantuvo sujeta al modo principal 1 (perfil de tormenta). Por otro lado el comportamiento de la playa de Xochen en ambas épocas de lluvias 2013 y 2014 fue diferente al modo principal y para nortes se apegó al modo principal de la época, lo que nos indica que esta playa esta en proceso de erosión-acumulación.

#### 4.4. Distribución espacio-temporal de los sedimentos litorales

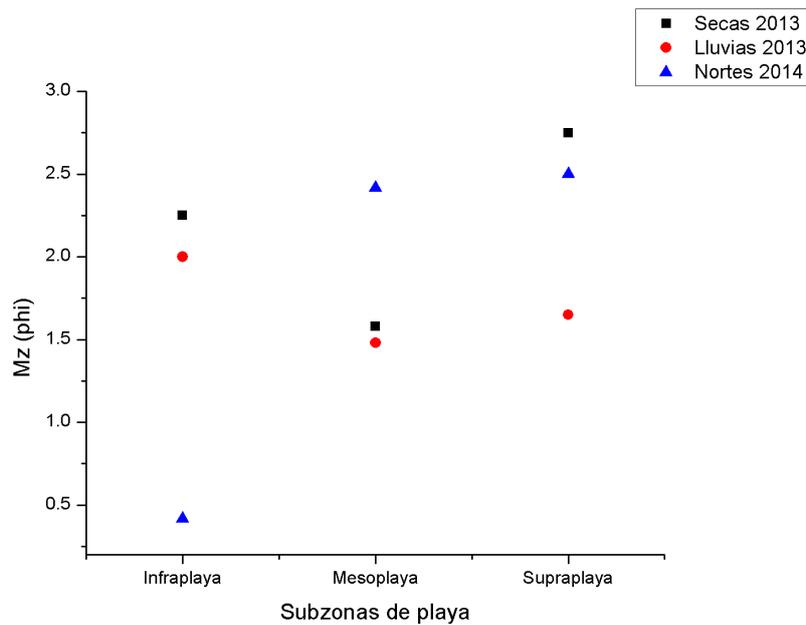
En esta sección se presentan las características texturales del tamaño gráfico promedio de los sedimentos de la zona litoral en relación con las diferentes épocas climáticas y subzonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Los muestreos de sedimentos corresponden con los perfiles topográficos de playa (Figura 4.47).



**Figura 4.47.** Distintas zonas sedimentarias a lo largo del litoral de Campeche. a) Zona de *beach rock*, donde ésta actúa como 'trampa' de sedimentos. b) Playa con vestigios de lo que fue alguna vez un tetrápodo. c) Playa con escalón en la parte de la supraplaya, cercana a la vegetación local. d) Material vegetal a lo largo de la playa, el cual se observa en época de lluvias.

#### 4.4.1. Playa Norte

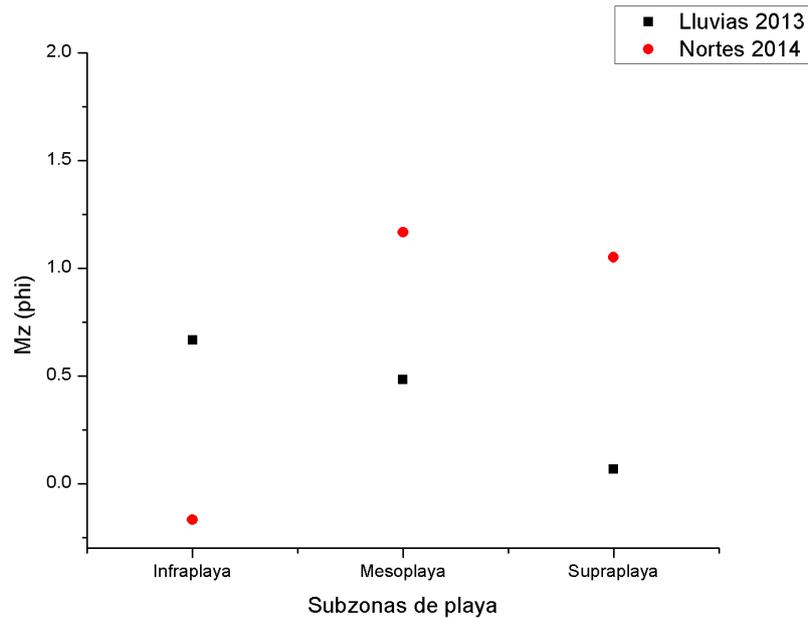
Los sedimentos de la playa están formados principalmente por arenas finas ( $2$  a  $3 \phi$ ) inicialmente procedentes de Boca del Carmen, el oleaje de la laguna de Términos está a merced de los efectos de refracción y difracción (Botello *y col.*, 2010), lo que origina que la circulación dominante sea de Puerto Real a hacia Boca del Carmen. Esta playa es una zona acumulativa por lo que indica una baja energía del oleaje presente en esta zona lo que propicia el depósito de materiales finos (Figura 4.48).



**Figura 4.48.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Playa Norte.

#### 4.4.2. Club de Playa

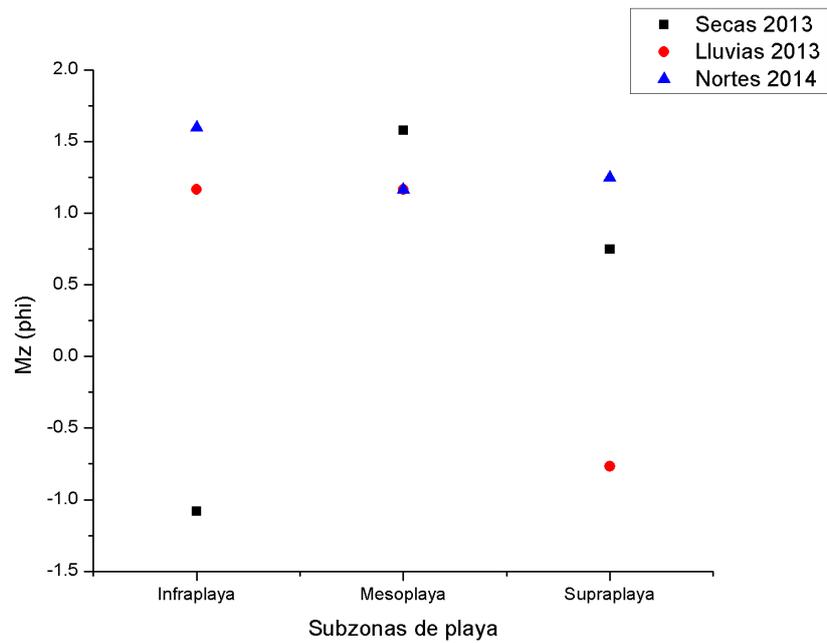
Los sedimentos en este sitio para las diferentes épocas están compuestos por arenas gruesas (0 a 1  $\phi$ ) compuestas de materiales biogénicos (Figura 4.49). En lluvias las arenas gruesas son las que predominan, y para nortes se tiene arenas medias. En infraplaya predominan las arenas gruesas, para mesoplaya y supraplaya oscilan de gruesas a medias. Lo que significa que esta playa presenta mayor energía de oleaje y favorece el transporte de sedimentos.



**Figura 4.49.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Club de Playa.

### 4.4.3. Bahamita

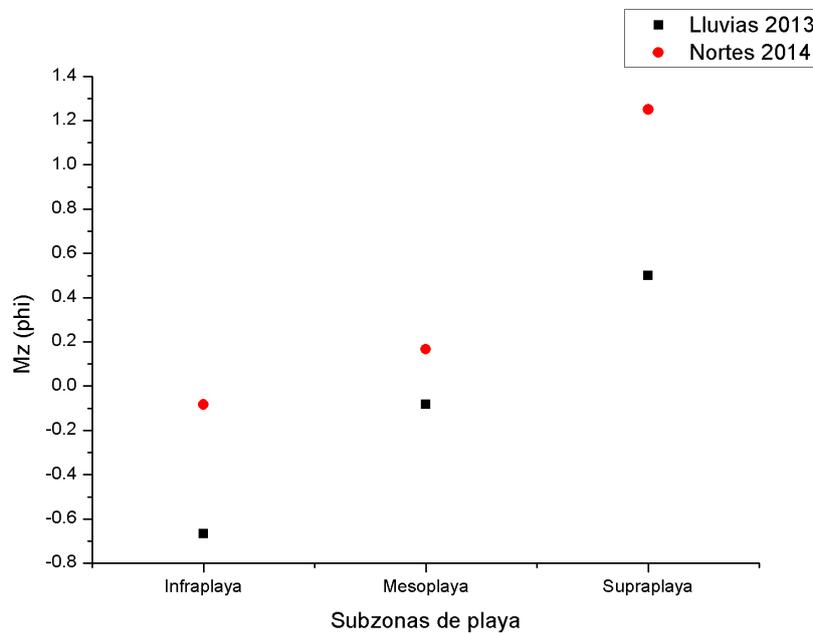
Esta playa presenta sedimentos muy variables desde arenas muy gruesas hasta arenas medias de materiales biogénicos, esta playa es un área de zona acumulativa y presenta fuerte oleaje en época de nortes (Figura 4.50). Entre épocas la predominancia es de arenas medias. Para la infraplaya y supraplaya existe una variación desde arenas muy gruesas hasta arenas medias, en mesoplaya están las medias, la diferencia de tamaños nos indica que esta sometida a una mayor energía del oleaje.



**Figura 4.50.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Bahamita.

#### 4.4.4. Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (CASES)

Esta playa presenta una variación de tamaños desde arenas muy gruesas hasta arenas medias, muestra que en esta playa está sujeta a diferentes intensidades de energía (Figura 4.51), al igual que las dos playas anteriores son sitios de alta energía dando como resultados playas erosivas cuyo transporte litoral remueve las arenas hacia la parte Oeste de la Isla. Las arenas están compuestas de trazas de biogénicos calcáreos principalmente de fragmentos de conchas. En lluvias la mayor predominancia son arenas muy gruesas y para nortes son arenas gruesas. Para la subzona de infraplaya y mesoplaya predominan las muy arenas gruesas, en supraplaya están presentes las arenas gruesas.



**Figura 4.51.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de CASES.

#### 4.4.5. San Nicolasito

Predominan las arenas gruesas a medias en las tres subzonas (Figura 4.52), lo que sugiere que es una playa con mayor dinamismo proveniente del oleaje y del transporte de la Isla del Carmen, en sus granos también dominan fragmentos de conchas. En secas dominan las arenas muy gruesas, y lluvias en nortes las arenas gruesas.

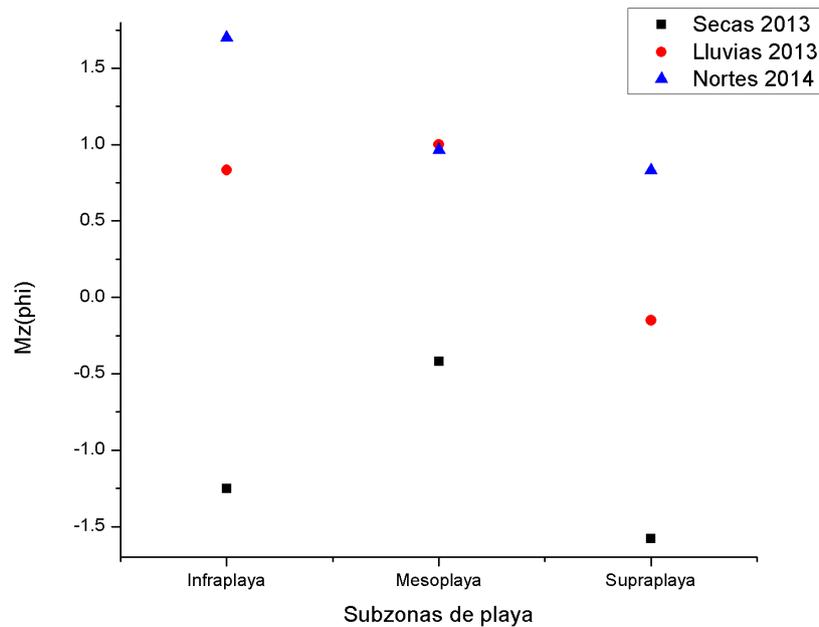
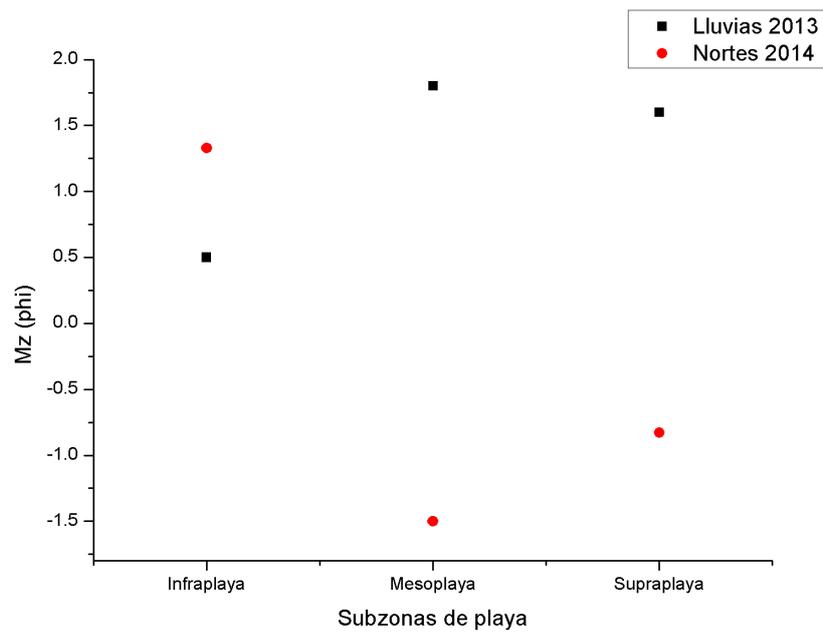


Figura 4.52. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de San Nicolasito.

#### 4.4.6. Puerto Real

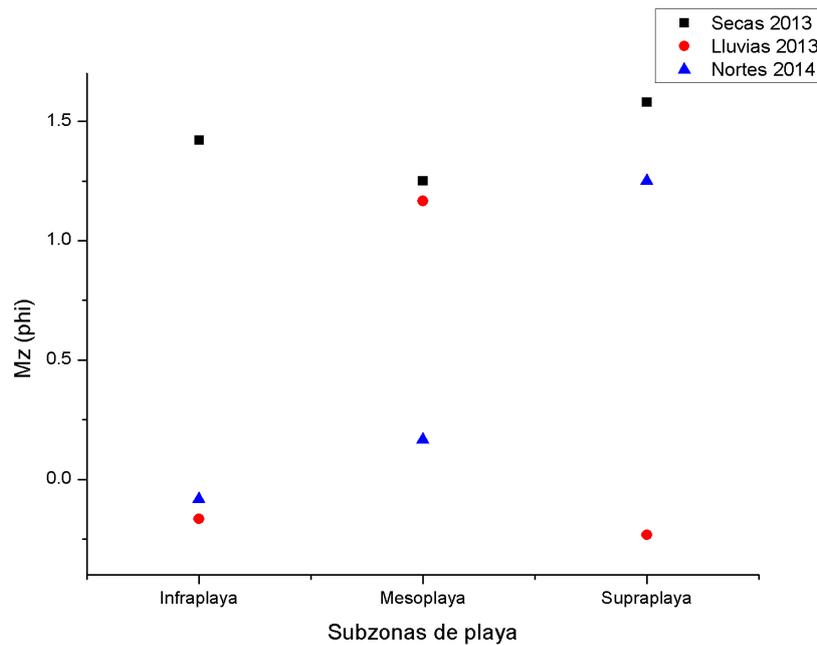
Esta playa localizada en el extremo Este de la Isla del Carmen presenta arena muy gruesa principalmente en las subzonas de mesoplaya y supraplaya, y solo en infraplaya se presentan arenas medias (Figura 4.53). Existe un aporte de origen biogénico mar-tierra, la erosión de la roca de playa (*beach rock*) presente en su zona de infraplaya actúa como barrera protectora del oleaje y corrientes presentes en el área. En lluvias existe un mayor aporte de arenas medias y en nortes dominan las arenas gruesas, siendo esto el resultado de aporte de los restos biogénicos.



**Figura 4.53.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Puerto Real.

#### 4.4.7. Isla Aguada

Los sedimentos que conforman esta playa comprenden desde arenas gruesas hasta arenas medias para todas las subzonas de la playa (Figura 4.54). Está compuesta principalmente por material biogénico acarreado del transporte litoral procedente del Noroeste y depositado al Este de la Boca de Punta Real. Entre épocas predominan las arenas gruesas, por ser una de las playas de mayor longitud, indica que solo parte de las subzonas esta expuesta a la energía encargada del transporte de sedimentos.



**Figura 4.54.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Isla Aguada.

#### 4.4.8. KM 45

Los sedimentos que conforman a esta playa están principalmente dominados por arenas gruesas y secundariamente por arenas medias. También presentan un aporte de origen biogénico (Figura 4.55). En la zona de infraplaya se observa el mayor dinamismo de tamaños de grano pues los hay desde gruesos hasta medios, para mesoplaya y supraplaya predominan los de tamaño grueso seguido por los medios.

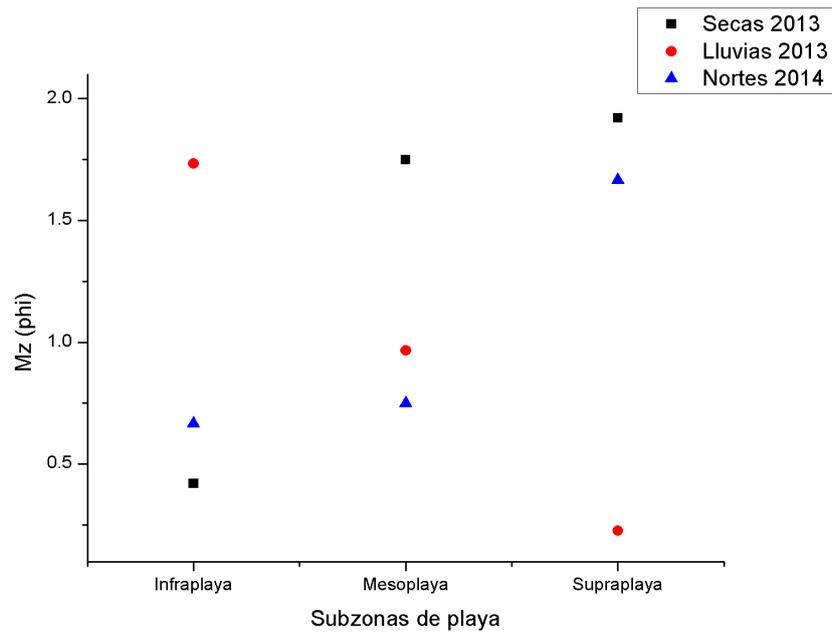
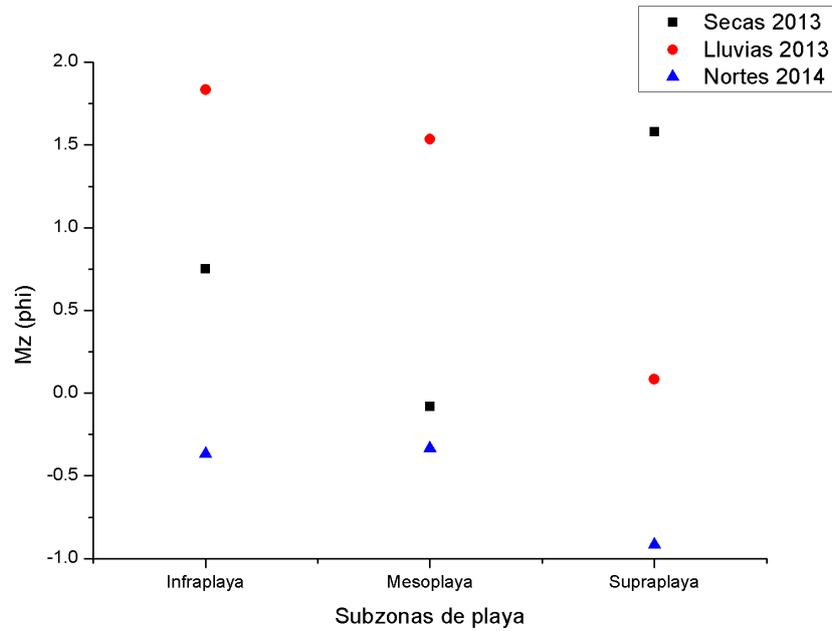


Figura 4.55. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de KM 45

#### 4.4.9. Las Bombas

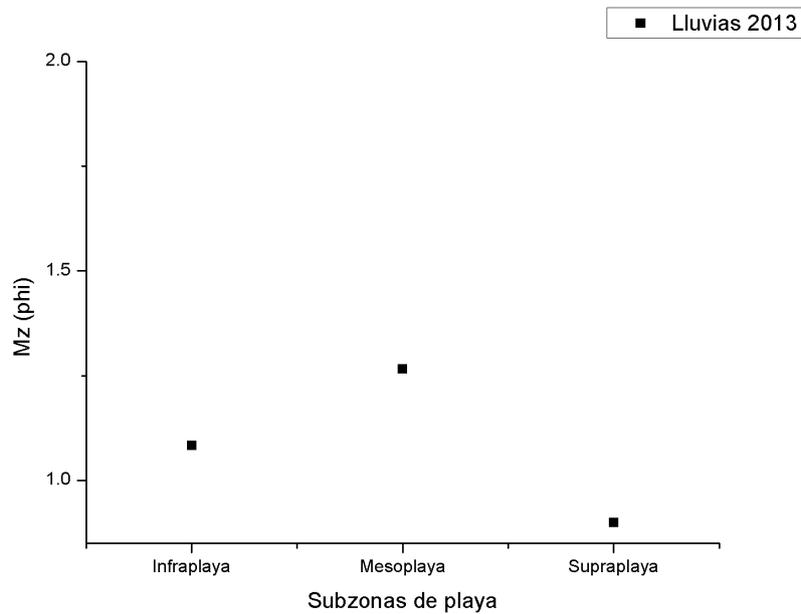
Esta playa presenta una gama diversa de tamaños de grano, ya que se tiene desde arenas muy gruesas hasta arenas finas para las tres subzonas (Figura 4.56), formadas principalmente con material biogénico desgastado por el flujo y reflujo del oleaje. Entre épocas existe mayor diversificación lo cual nos habla de un sitio de mayor dinamismo.



**Figura 4.56.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Las Bombas.

#### 4.4.10. Villa Quietud

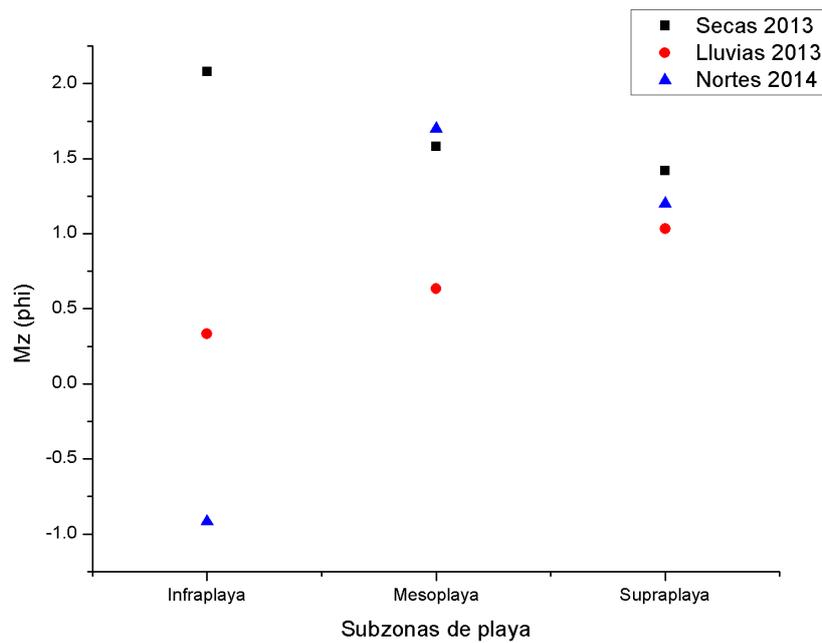
Los sedimentos presentes en esta playa oscilan en un tamaño de arenas medias y tienen aporte biogénico. En infraplaya y mesoplaya predominan las arenas medias, y para supraplaya están las arenas gruesas (Figura 4.57).



**Figura 4.57.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Villa Quietud

#### 4.4.11. Sabancuy

En la infraplaya se tiene desde arena muy gruesa hasta arena fina, ya que esta zona es la que está más expuesta a las corrientes del oleaje, por lo que para las demás subzonas son de arenas medias, con sus presenta un aporte de material biogénico (Figura 4.58). Entre épocas, la de mayor heterogeneidad, es la infraplaya que va desde tamaños de grano muy gruesos hasta finos, en la mesoplaya se tiene de gruesos a medios y finalmente la supraplaya mantuvo arenas gruesas.



**Figura 4.58.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Sabancuy

#### 4.4.12. Chenkan

En esta playa la mayor predominancia es de arenas medias, y solo presentó un caso de arena gruesa para la subzona de mesoplaya siendo su textura resultado del material calcáreo presente en el área donde, igual que en las playas anteriores, las arenas gruesas son fragmentos de conchas y las arenas medias son el resultado de la reducción del tamaño por el desgaste causado por el oleaje y el transporte litoral (Figura 4.59). Entre épocas hay poca variabilidad en tamaños.

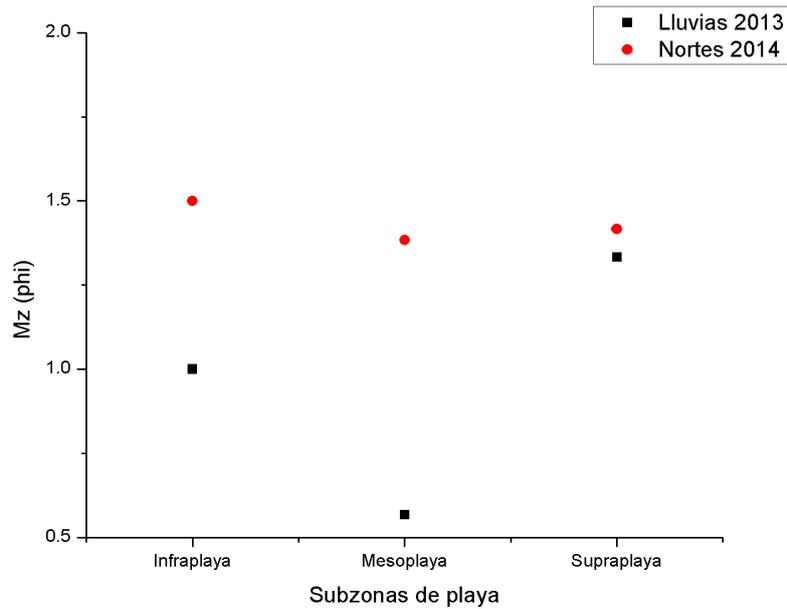
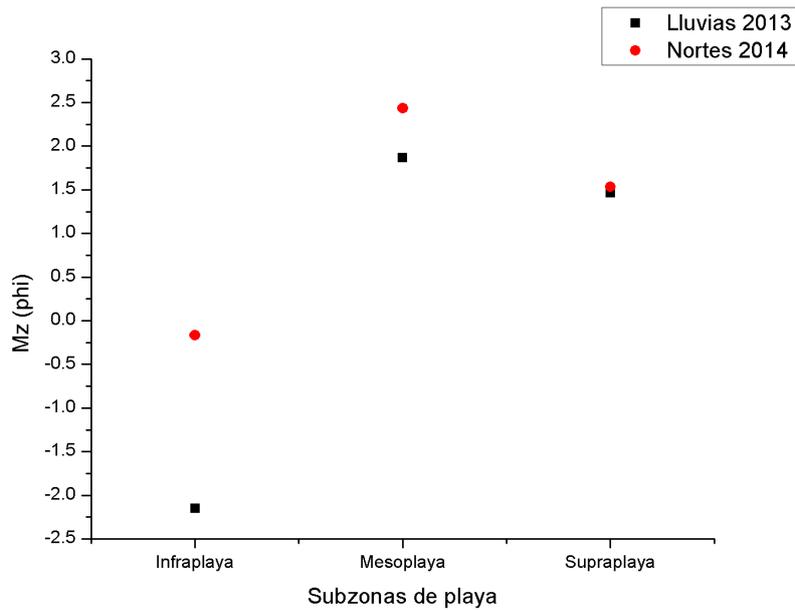


Figura 4.59. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Chenkan.

#### 4.4.13. Puente Dos Bocas

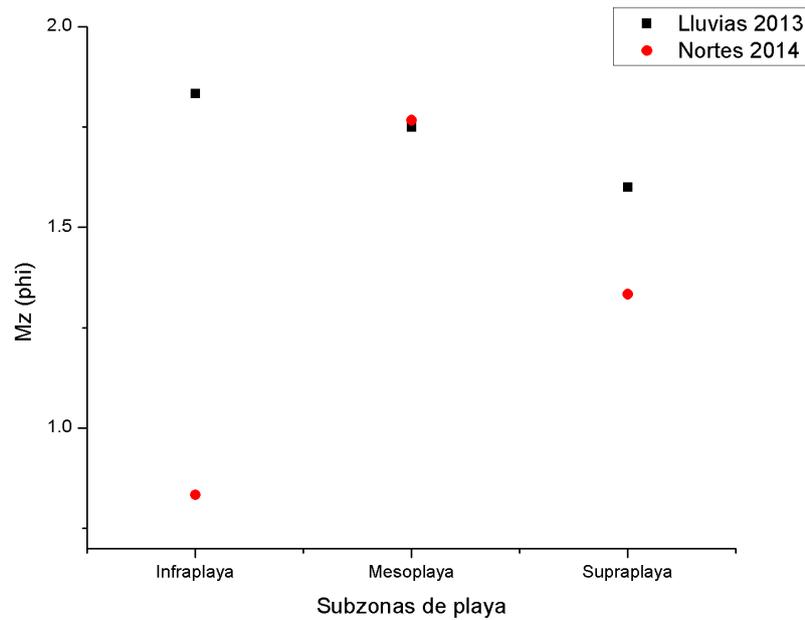
Los sedimentos varían de gravas hasta arenas finas para ambas épocas, por lo que nos indica que es un sitio con mayor presión de oleaje y transporte litoral, su composición es principalmente de origen biogénico. Entre zonas la infraplaya presenta mayor dinamismo al tener arenas gruesas, la mesoplaya y supraplaya presentan arenas medias (Figura 4.60) La línea de tetrápodos funcionan como trampa en la subzona de supraplaya.



**Figura 4.60.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Puente Dos Bocas.

#### 4.4.14. Punta Chen

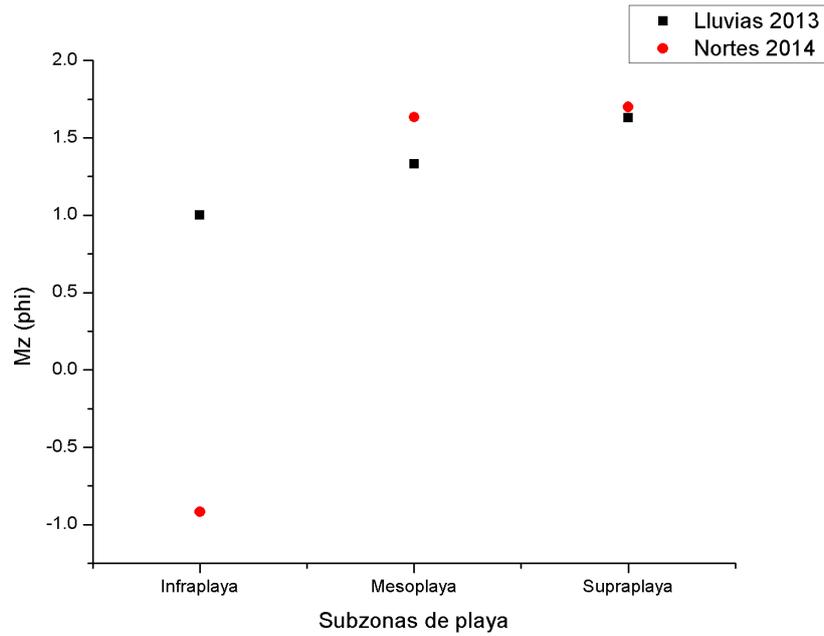
La predominancia prevalece en tamaños de grano medios entre las dos épocas, por lo que para las épocas existe poca variabilidad. Cabe mencionar que también predominan los fragmentos de conchas. En la infraplaya se tiene la cercanía a arenas gruesas pero las que se depositan son las arenas medias, en mesoplaya y supraplaya son medias (Figura 4.61), y presenta una porción de roca de playa (beach rock) la cual protege los sedimentos.



**Figura 4.61.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Punta Chen.

#### 4.4.15. Xochen

Sus sedimentos varían desde arenas muy gruesas hasta arenas medias, para todas las subzonas. Entre épocas se comportan de manera similar. Contienen trazas de origen biogénico (Figura 4.62), se nota una transición de tamaños de materiales gruesos hacia la subzona de infraplaya a arenas medias hacia la subzona de supraplaya lo que implica un transporte mar-tierra para ambas épocas.

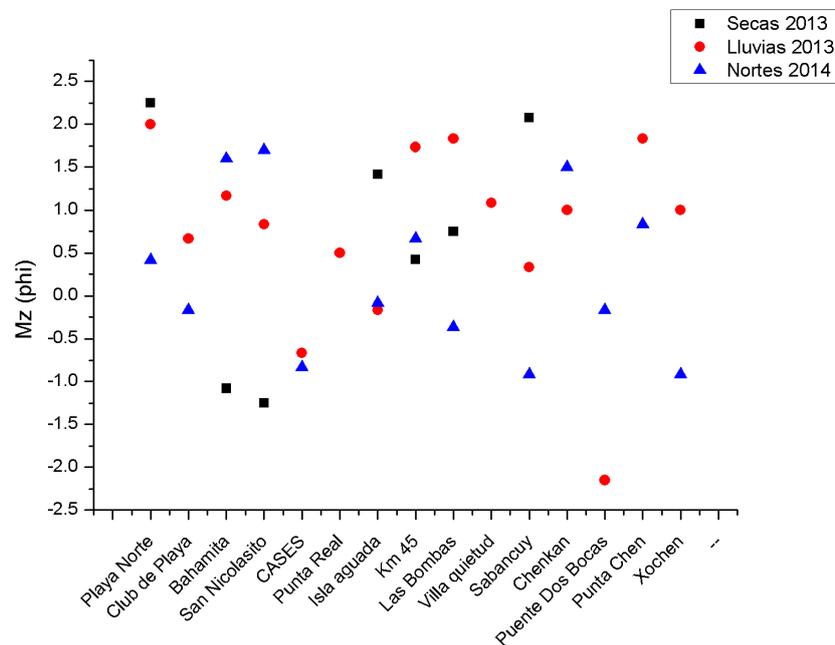


**Figura 4.62.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la zona litoral de Xochen.

## 4.5. Síntesis de las variaciones texturales en la infraplaya, mesoplaya y supraplaya

### 4.5.1. Infraplaya

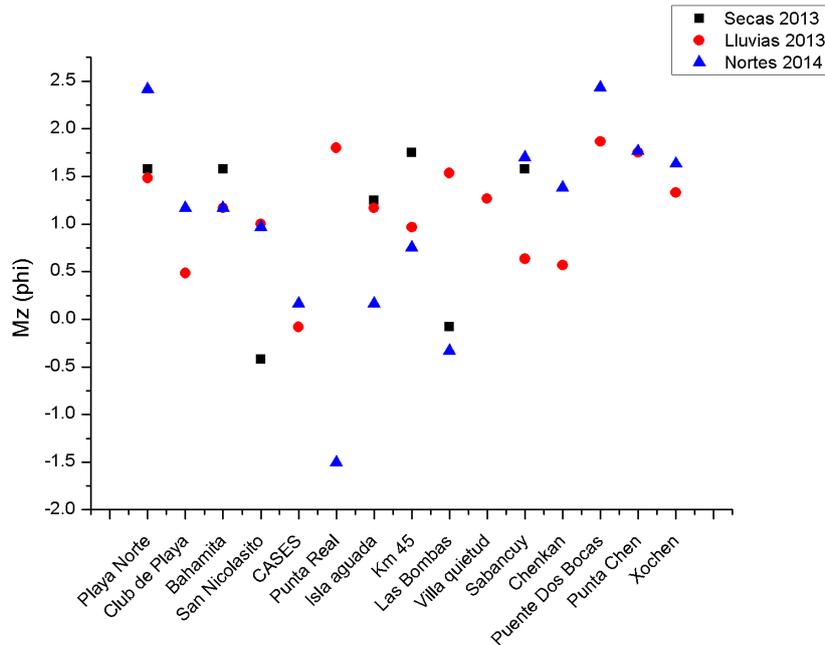
Considerando los estudios de tamaño gráfico promedio de los sedimentos de la zona litoral se observa que la zona de infraplaya, desde Playa Norte hasta Xochén está constituida por sedimentos que van de arena muy gruesa hasta arena fina, lo que indica que es la zona con mayor exposición al oleaje y al transporte litoral, lo cual permite el depósito o la pérdida de material arenoso (Figura 4.63).



**Figura 4.63.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la subzona de infraplaya.

### 4.5.2. Mesoplaya

En lo que se refiere a la mesoplaya se encontró que la mayor parte están representadas por arenas medias, en San Nicolasito, Punta Real y las Bombas predominan las gravas y arenas muy gruesas. Esto es reflejo no solo de la composición biogénica, sino también de la actividad energética del oleaje principalmente dominante en de época de nortes 2014(Figura 4.64).



**Figura 4.64.** Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la subzona de mesoplaya.

### 4.5.3. Supraplaya

En la supraplaya existen diferencias con respecto a las otras dos subzonas mencionadas. En Bahamita, San Nicolasito, Punta Real y Las Bombas hay presencia de arenas muy gruesas. En Playa Norte existen las arenas muy finas, y para los demás sitios predominan las arenas medias. De Sabacnuy a Xochén presenta menor variabilidad, los granos se encuentran en el tamaño medio. La supraplaya presenta los mayores cambios energéticos causados principalmente por las variaciones de oleaje de tormenta y nortes, correspondientes a las diferentes épocas climáticas muestreadas (Figura 4.65).

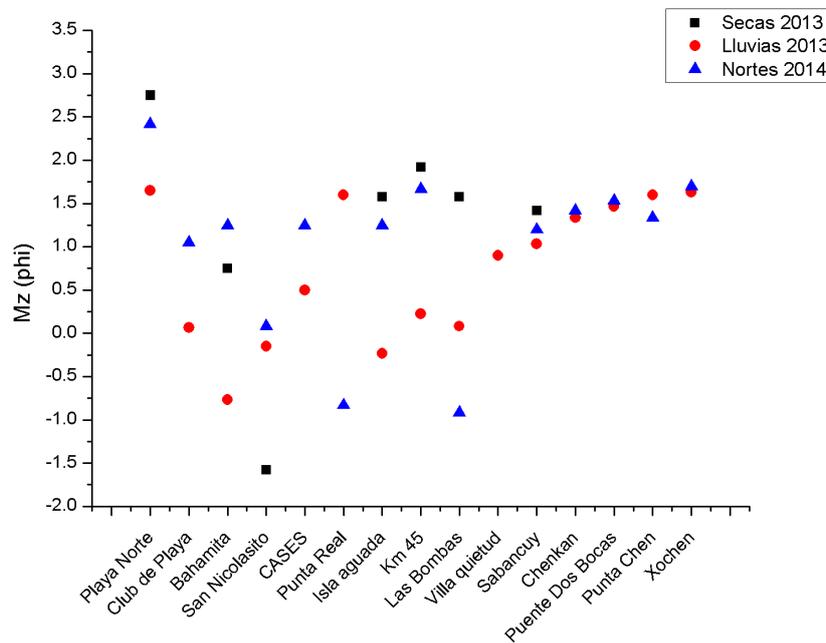
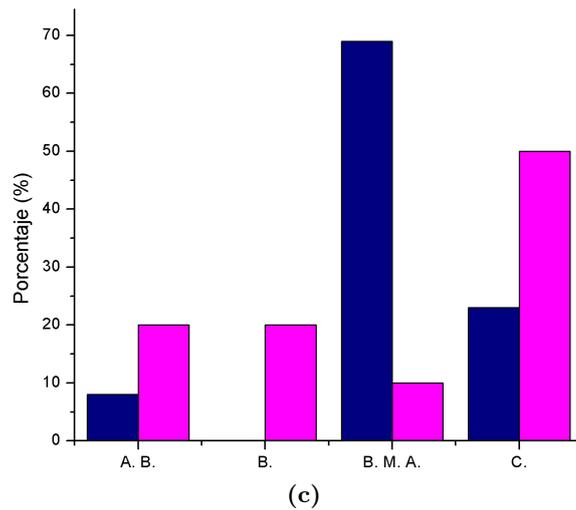
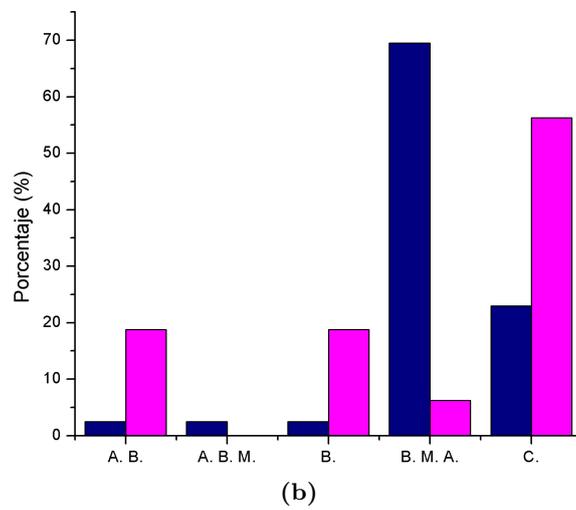
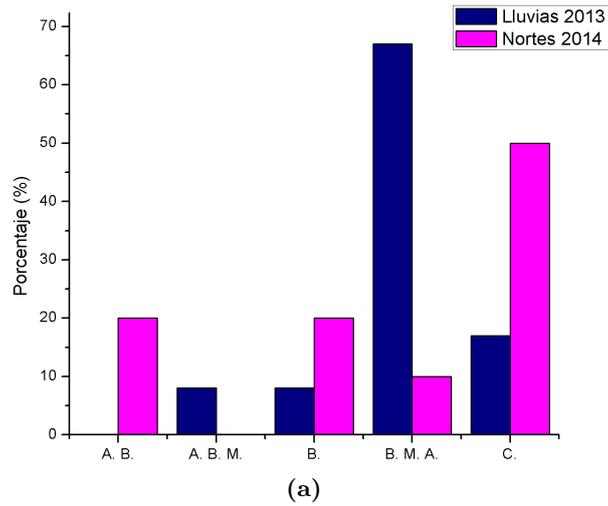


Figura 4.65. Tamaño gráfico promedio de sedimentos de la subzona de supraplaya.

## 4.6. Composición de los sedimentos litorales

Los resultados de la composición permiten definir los tipos de sedimentos presentes en la zona litoral y con ello definir su procedencia, obteniéndose los siguientes resultados para las diferentes subzonas. En infraplaya (Figura 4.66 a) predominan las biocalcarenitas micríticas arenosas (70 y 15 %) en todas las épocas, seguidos de calcilitita (20 y 50 %) en lluvias 2013 y nortes 2014, biocalcarenitas (8 y 20 %). Las biocalcarenitas predominan desde Playa Norte en Ciudad del Carmen hasta el municipio de Champotón, estas son derivadas de la erosión de rocas calcáreas y de organismos calcáreos como moluscos (gasterópodos, bivalvos) y algunos equinodermos (asteroideos), que abundan en la región.

Las subzonas de mesoplaya y supraplaya (Figura 4.66 b y c ) tienen una distribución muy parecida en composición a la zona de infraplaya, donde predominan las biocalcarenitas micríticas arenosas (71 y 9 %), seguido por la calcilitita con (29 y 55 %) para lluvias 2013 y nortes 2014. Y para supraplaya con 69 % de biocalcarenita micrítica arenosa y 50 % de calcilitita.



**Figura 4.66.** a) Composición de sedimentos para subzona de infraplaya, b) Composición de sedimentos para subzona de mesoplaya y c) Composición de sedimentos para subzona de supraplaya. \* A.B.= Arenita Bioclástica, A. B. M.= Arenita Bioclástica Micrítica, B. = Biocalcarenita, B. M. A.= Biocalcarenita Micrítica Arenosa, C.= Calcilita.

Al analizar los resultados de composición y textura de los sedimentos se observa la presencia de dos tipos de sedimentos la zona: 1) los sedimentos que son aportados por la Boca del Carmen, 2) los sedimentos calcáreos aportados por el Río Champotón y el transporte litoral de sedimentos erosionados a lo largo de la zona litoral desde la Península de Yucatán hacia la Isla del Carmen y la erosión de la zona litoral calcárea. Existe una zona de transición entre Playa Norte y Club de Playa donde se tiene presencia de material calcáreo y/o terrígeno. En términos generales existe un movimiento de sedimentos provenientes de la zona de la Península de Yucatán en condiciones de lluvias y secas, y este flujo es interrumpido por la Boca de Sabancuy y la Boca de Puerto Real donde el sedimento litoral es transportado al interior de la Laguna de Términos y el estero de Sabancuy (Figura 4.67). Las infraestructuras de protección costeras como los tetrápodos y espigones, se consideran de moderación, es decir que deben de cumplir con la finalidad de reducir la pérdida de los sedimentos de la playa en una área proyectada y moderar los peligros de erosión.



**Figura 4.67.** Procedencia de los sedimentos de la zona litoral (verde-sedimentos biogénicos, arena-sedimentos de transición) Modificado de Márquez *y col.* (2008).

El transporte de sedimentos se mueve en dirección Suroeste debido a la corriente litoral predominante durante el año, y ésta puede cambiar de acuerdo con las estaciones climáticas. Un caso es la época de Nortes en el Golfo de México que puede ocasionar abruptos cambios en la

dirección de los vientos y altas velocidades con respecto a los vientos prevalecientes, provocando un transporte de sedimento hacia el Este y hacia la zona de dunas o supraplaya (Davis y Hayes, 1984), pero también se pueden dar cambios en la dirección de la deriva de playa o acentuar la deriva cuando coincide con la corriente predominante, provocando erosión o acumulación de material.

## 4.7. Índice de Vulnerabilidad Costera -IVC-

En la tabla 4.6 se encuentran las ponderaciones para cada una de las seis variables, el resultado calculado posteriormente se dividió en cuatro clases utilizando como límites los percentiles 25 %, 50 % y 75 %. La utilización de percentiles es la forma de ordenar los resultados de la vulnerabilidad, es decir, de esta forma se logro identificar los tramos según su “vulnerabilidad relativa” sin que el valor en sí mismo del IVC se asocie a cambios específicos de tipo físico.

**Tabla 4.6.** Ponderaciones para el Índice de Vulnerabilidad Costera para la parte del litoral de Campeche.

Playa	ITO	MOR	TDI	TERO	LEV	HS
Playa Norte	3.66	4	5	3	5	1
Club de Playa	3.33	4	5	2	5	1
Bahamita	3.66	5	5	2	5	1
CASES	3.66	5	5	2	5	1
San Nicolasito	3.66	5	5	2	5	1
Puerto Real	3.66	1	5	1	5	1
Isla Aguada	3.66	2	5	2	5	1
KM 45	2.33	3	5	3	5	1
Las Bombas	3.66	3	5	2	5	1
Villa Quietud	3.66	3	5	1	5	1
Sabancuy	3.66	3	5	2	5	1
Chenkan	3.66	2	5	2	5	1
Puente Dos Bocas	3.66	2	5	3	5	1
Punta Chen	3.66	1	5	3	5	1
Xochen	3.66	2	5	2	5	1

Los resultados del IVC, en este caso, arrojan valores entre 1.66 y 1.90. La clasificación de la vulnerabilidad total calculada por este índice se muestran en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Ponderaciones para el Índice de Vulnerabilidad Costera -IVC-

ICV	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Variables	(1.66-1.72]	(1.72-1.78]	(1.78-1.84]	(1.84-1.90]

Es conveniente no confundir, el concepto de vulnerabilidad utilizado en este Índice; que es la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados, con el concepto de vulnerabilidad asociado generalmente a la evaluación de riesgos ya que éstos conllevan el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno (peligrosidad natural) multiplicado por su

“vulnerabilidad” (exposición  $x$  evaluación de daños). A diferencia de este enfoque, en este caso no se calcula la probabilidad de ocurrencia, y lo que es más importante, no se cartografían de forma detallada las áreas afectadas (condición necesaria para el cálculo de la exposición y daños), para crear las medidas pertinentes de acción. Con este índice se hizo, una primera aproximación, a la sensibilidad de cada sector costero ante una potencial subida del nivel del mar y su capacidad de adaptación, utilizando para ello un conjunto de variables físicas y geológico/geomorfológicas. Éste es el motivo por el que se utiliza un sistema de representación de los resultados que no identifica sobre la superficie costera emergida el nivel de vulnerabilidad sino que cada nivel de vulnerabilidad relativa se asocia a un tramo costero. Es necesario subrayar igualmente que en esta metodología no se evalúa la vulnerabilidad a fenómenos extremos (temporales, tsunamis, etc.).

**Tabla 4.8.** Índice de Vulnerabilidad Costera para la parte del litoral de Campeche.

Playa	CVI
Playa Norte	1.90
Club de Playa	1.84
Bahamita	1.90
CASES	1.90
San Nicolasito	1.90
Puerto Real	1.66
Isla Aguada	1.76
KM 45	1.79
Las Bombas	1.81
Villa Quietud	1.76
Sabancuy	1.81
Chenkan	1.76
Puente Dos Bocas	1.81
Punta Chen	1.76
Xochen	1.76

Así entonces, con el análisis de vulnerabilidad (Tabla 4.8) se determinó que el sitio, donde se presenta baja vulnerabilidad Puerto Real, esta playa cuenta con protección rocosa en la zona de infraplaya. Con vulnerabilidad media, debido a la planicie que presentan las playas a lo largo de las épocas climáticas son: Isla Aguada, Villa Quietud, Chenkan, Punta Chen y Xochen. Los sitios asociados a las Bocas lagunares son aquellos que presentan vulnerabilidad alta, como son Club de Playa, KM 45, Las Bombas, Sabancuy y Puente Dos Bocas. Y finalmente los sitios tuvieron

vulnerabilidad muy alta son aquellos que están asociados a la Isla del Carmen: Playa Norte, Bahamita, CASES y San Nicolasito, estos se encuentran expuestos a los diferentes fenómenos climáticos.

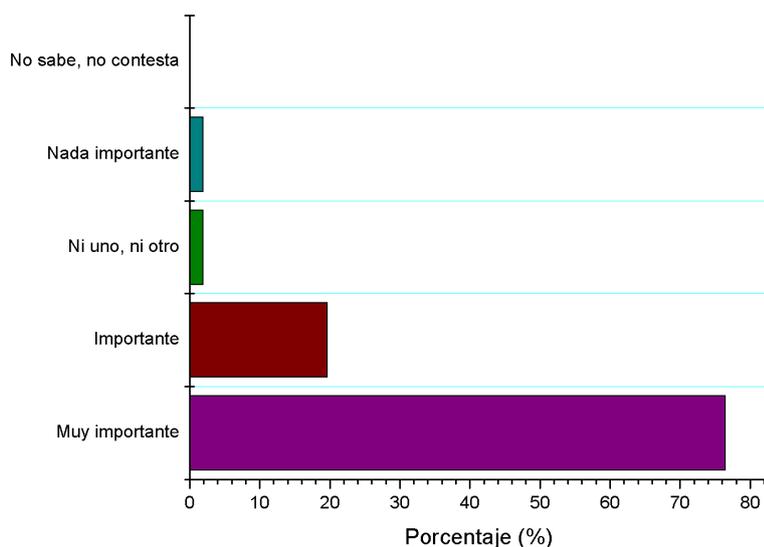
Los sitios con muy alta vulnerabilidad (Figura 4.68), que son los que se encuentran ubicados en la Isla del Carmen. Estos sitios constituyen un ejemplo potencial para evaluar la vulnerabilidad costera al ascenso del nivel del mar. El grado de erosión y acreción (desplazamiento de la línea de costa), contribuyen a una gran variabilidad del índice en una pequeña escala, pero son los más difíciles de medir debido a que está más sometida a las presiones ambientales: oleaje, mareas, entre otras; así como de factores antropogénicos.



Figura 4.68. Índice de vulnerabilidad a lo largo del litoral de Campeche.

## 4.8. Opinión pública de la zona litoral

Al analizar la información recabada en las encuestas se pone de manifiesto la enorme importancia que en general se le adjudica a la zona litoral. Ya que una amplia mayoría la considera como muy importante o importante, (el 90 % de los encuestados)(Figura 4.69).



**Figura 4.69.** Percepción acerca de la Importancia de la zona costera\*. (\*) *¿Qué importancia le diaria usted a la zona litoral para México?*

En cuanto a los problemas de la zona litoral, los resultados analizados (Tabla 4.9) muestran que la contaminación aparece como el problema más mencionado con un 15 %. Le sigue la preocupación por la falta de control y protección (10 %) seguido por la falta de políticas para el desarrollo de la zona (9 %). La Erosión costera (~ 4 %) es uno de los problemas que menos se percibe por la población. El resto de los problemas aparecen mencionados por un escaso porcentaje, como la seguridad.

La tabla 4.9 permite visualizar que el uso más frecuente de la zona litoral por parte de los encuestados se vincula con el turismo, que en total concentra cerca del 57 %. Así mismo, destaca que el uso más frecuente es para realizar alguna actividad laboral, abarcando cerca de un 15 %. Otros tipos de usos, vinculados a la pesca alcanzan un 4 % del total y solo cerca del 10 % vive en la zona costera. Por último, resulta fundamental destacar el porcentaje de personas que manifiestan no haber utilizado la costa en los últimos 5 años (10 %).

El 34 % de los encuestados manifestó que los eventos con mayor percepción son los huracanes,

**Tabla 4.9.** Percepción sobre cuál es el principal problema de la zona costera\*. (\*) *¿Cuál diría usted que es el principal problema de la zona costera?*

Principales problemas en la zona litoral	
La falta de limpieza de la costa	8.87 %
La contaminación en general	15.59 %
La contaminación del agua	6.24 %
El transporte, las calles y carreteras	5.28 %
Falta de control y protección	10.07 %
Mala explotación del turismo	7.43 %
Falta de políticas para el desarrollo de la zona	9.59 %
Mala explotación de la pesca	5.52 %
Poca infraestructura	5.28 %
Saneamiento	5.28 %
Seguridad	4.08 %
La infraestructura civil (casas, hoteles, etc.)	7.19 %
Erosión costera	3.84 %
Abandono después de la temporada de vacacionistas	4.08 %
Otros	1.44 %
Ninguna, nada	0.24 %
No sabe	0.00 %

**Tabla 4.10.** Usos de la zona litoral en el últimos 5 años\* (\*) *¿En los últimos cinco años, usted ha utilizado la zona costera? (SI) ¿Con qué fin?*

Usos de la zona litoral	
Turismo	57.78 %
Vivo en la zona costera	9.63 %
Trabajo	14.81 %
Pesca	4.44 %
Otros	2.96 %
No	10.37 %

seguido, de las inundaciones (20 %), tormentas (14 %), erosión de playas (cerca de 13 %) y los de menor con cerca de 4 % las olas de calor así como la salinización de pozos (1 %)(Tabla 4.11).

La Tabla 4.11 permite visualizar que la percepción de los encuestados del el cambio climático va encaminada a de la destrucción ambiental (40 %) seguida por el calentamiento global con 20 %, a su vez un cambio de temperatura perfila en un 19 %.

Cerca del 70 % de los encuestados revelo que si existe una difusión de las campañas informativas de el cambio climático (Figura 4.71).

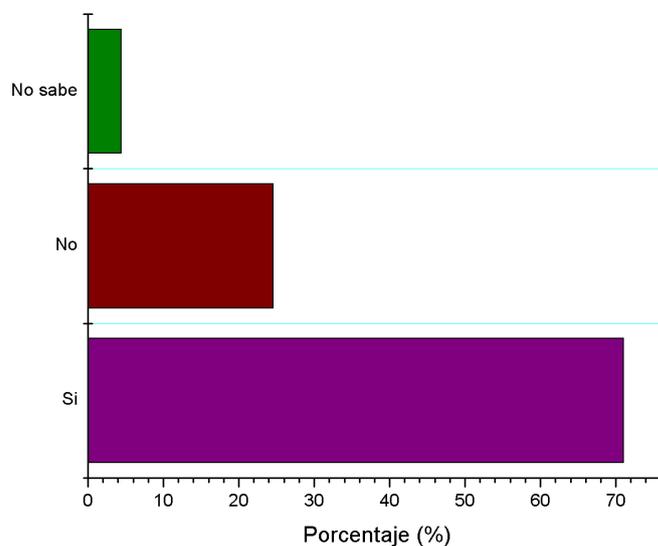
El medio principal de difusión es el Internet con el 36 %, seguido por la televisión (18 %) y

**Tabla 4.11.** Eventos meteorológicos con mayor percepción\*. (\*) *¿Qué eventos de riesgo, percibe usted que han tenido mayor frecuencia e intensidad sobre la población?*

Eventos meteorológicos	
Huracanes	34.48 %
Tormentas	14.66 %
Inundaciones	20.26 %
Cambio en el nivel del mar	9.48 %
Erosión de playas	12.93 %
Olas de calor	4.74 %
Salinización de pozos	1.72 %
Otros	1.72 %

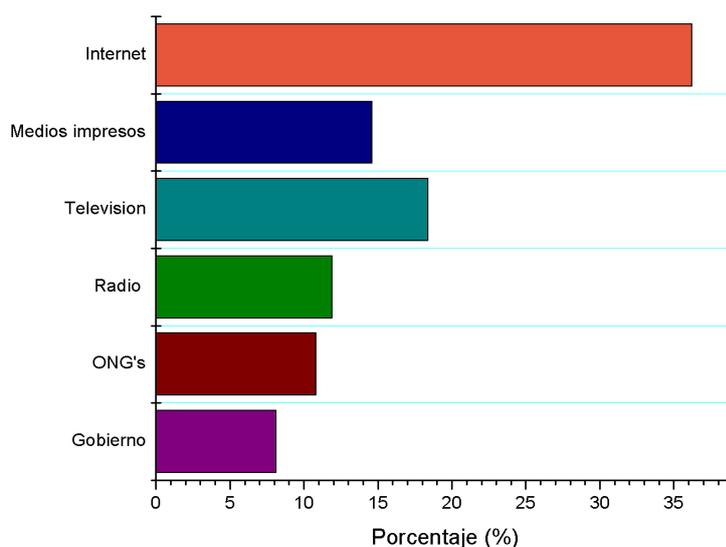
**Tabla 4.12.** Percepción ante el tema de cambio climático\*. (\*) *¿Qué entiende por el cambio climático?*

Cambio Climático	
Un cambio en la temperatura	19.21 %
Deterioro de la capa de ozono	13.91 %
Calentamiento global	20.53 %
Cambios en el clima por la destrucción ambiental	40.40 %
Mal tiempo, tormentas	5.96 %



**Figura 4.70.** Percepción acerca de las campañas informativas ante el cambio climático\*. (\*) *En general, ¿En los últimos cinco años, se ha enterado de campañas informativas sobre riesgos asociados al cambio climático?*

los medios impresos (14 %), la radio y las ONG ´s con cerca de 10 %, y en menor proporción por el gobierno con 8 % (Figura 4.70).



**Figura 4.71.** Principales medios de información sobre campañas ante el cambio climático\*. (\*) (respuesta a la anterior pregunta **SÍ**) *Principalmente, ¿Por qué medio se ha enterado de campañas informativas sobre riesgos asociados al cambio climático?*

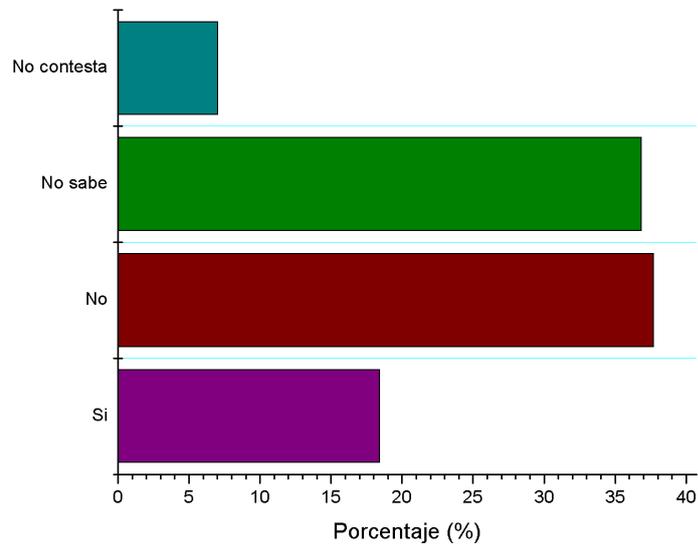
El análisis de la Tabla 4.13 indica que la principal alternativa productiva ante el cambio climático es la Acuicultura con 24 %, y la Silvicultura (14 %) es la segunda alternativa, Turismo y Empleo temporal ocupan un tercer lugar con alrededor de 15 a 16 %, y la construcción es una última opción.

**Tabla 4.13.** Alternativas productivas ante el cambio climático\*. (\*) *¿Cuáles cree usted que serían las alternativas productivas para hacer frente al cambio climático?*

Actividades productivas	
Empleo temporal	15.54 %
Ganadería	7.43 %
Construcción	8.11 %
Acuicultura	24.32 %
Silvicultura	14.86 %
Turismo	16.22 %
Otro	13.51 %

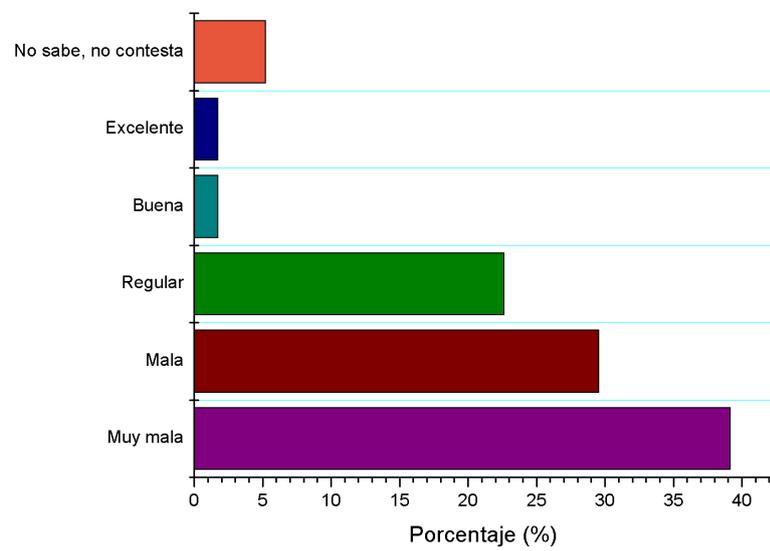
La protección civil o la prevención de desastres ha tomado una gran relevancia, debido primordialmente a la diversidad de fenómenos que pueden causar desastres a nivel nacional, así se reconoce la importancia de establecer estrategias y programas a largo alcance enfocados a reducir sus efectos, y no solo focalizar recursos para la atención de las emergencias y la

reconstrucción, dicho esto cerca del 37 % respondió con una negativa o no saben acerca de la existencia del Atlas de Riesgo Municipal presente en su estado de origen, lo cual infiere que tal vez exista o este en proceso de elaboración. Y solo cerca del 18 % conoce acerca de su existencia en su lugar de origen(Figura 4.72).



**Figura 4.72.** Instrumento municipal en respuesta ante los desastres naturales\*. (\*) *En general, ¿Sabe usted si el municipio donde habita cuenta con Atlas de Riesgo Municipal, para hacer frente ante las emergencias climáticas?*

La evaluación de los tres órdenes del Estado acerca de la respuesta oportuna ante los riesgos ambientales, revela que el 39 % lo califica como muy malo o malo, y bueno o muy bueno solo cerca del 2 % (Figura 4.74). Así pues indica que falta una debida estrategia de la prevención, y se puede establecer mediante los tres pasos fundamentales. Primero, conocer los peligros y amenazas para saber dónde, cuándo y cómo afecta. Segundo, identificar y establecer en el ámbito nacional, estatal, municipal y comunitario, las características y los niveles actuales de riesgo ante esos fenómenos. Por último, diseñar acciones y programas para mitigar y reducir oportunamente estos riesgos a través del reforzamiento y adecuación de la infraestructura, mejorando normas y procurando su aplicación, y finalmente, preparando e informando a la población para que sepa cómo actuar antes, durante y después de una contingencia.



**Figura 4.73.** Calificación del gobierno antes los desastres naturales\*. (\*) *¿Cómo calificaría la gestión de las autoridades locales, estatales y federales frente al cambio climático?*

# Conclusiones

## **Análisis histórico de la línea de costa**

Los procesos geomorfodinámicos a lo largo de la zona costera del estado de Campeche, determinados en este estudio para el intervalo de 2004 a 2013, muestran un dominio del proceso de erosión de la línea de costa sobre el proceso de acreción o depósito. Se identificaron dos procesos geológicos en la zona litoral: a) Proceso de erosión continua y b) Proceso de Fluctuación de erosión-depósito.

- a) Proceso de erosión continua. Los sitios son: Playa Norte, Club de Playa, CASES, KM 45. En la zona litoral de la playa cercana al KM 45 es una de las zonas críticas, donde la pérdida de material es evidente.
- b) Fluctuación erosión-depósito. Los sitios son: Isla Aguada, Villa Quietud, Sabancuy y Chenkan.

## **Variaciones morfológicas estacionales de la zona litoral**

Los resultados de análisis morfológico a través de los levantamientos de perfiles de playa permitieron identificar en los que el proceso de erosión es más crítico estos son: Playa Norte, Club de Playa, Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (CASES) y KM 45. Las playas en proceso de acumulación son Isla Aguada, Villa Quietud, Sabancuy y Chenkan. Considerando los procesos de erosión-acumulación se puede dividir en 5 partes:

- a) La primera es la punta Oeste de la Isla del Carmen, particularmente desde el Este de Playa Norte en donde existe acumulación-erosión.
- b) La segunda corresponde al Club de Playa hasta CASES, en la que los resultados evidencian erosión.

- c) La tercera zona corresponde de la parte Este de la Isla del Carmen y la zona de Isla Aguada, en la primera hay evidencia de erosión y en la segunda existe acumulación.
- d) La cuarta zona corresponde de la playa Km 45 a Villa Quietud que se encuentran cercanos a la carretera Ciudad del Carmen- Champotón y están en proceso de erosión.
- e) La quinta zona se localiza a partir del campamento tortuguero Sabancuy a Xochen las que se pueden considerar como estables o que sufren cambios normales a los diferentes periodos estacionales (Excepto la Boca de Sabancuy pues esta tiene aportes provenientes del estero de Sabancuy) en composición por arenas gruesas biogénicas y protegidas por la presencia de roca de la playa.

De las épocas analizadas, la época de lluvias 2013, fue la de mayor aporte de material arenoso a la zona litoral ya que la gran mayoría de los perfiles registrados presentan una cota de 1 a 2 m de altura, mientras que la época de nortes 2014 fue la de mayor variación de oleaje, pues en ésta época es habitual que la zona litoral este más sometida a los cambios debido a los frentes fríos presentes en el Golfo de México.

#### **Análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)**

Las FEOs (Funciones Empíricas Ortogonales), son conjuntos de autofunciones independientes, que han demostrado ser una herramienta matemática muy útil a la hora de analizar las series temporales de datos que se obtuvieron a lo largo del periodo de muestreo. Así mismo permiten diferenciar y distinguir, con una metodología sencilla, los diferentes fenómenos físicos como el oleaje y mareas de alteraciones del perfil de la playa. Se identificaron dos tipos de perfiles:

- a) *Perfil de "Tormenta"*, vistos mayormente para las épocas de lluvias y nortes. Donde una porción del material sedimentológico en tierra se transporta hacia el mar.
- b) *Perfil "Normal"*, mayormente en la época de secas. La porción de material sedimentológico que se encuentra en la mar es transportado hacia tierra.

#### **Distribución espacio-temporal de los sedimentos litorales**

Considerando el tamaño gráfico promedio de los sedimentos se pueden definir dos zonas sedimentarias:

- a) La zona de Isla del Carmen hasta el municipio de Champotón compuesta por arenas gruesas a medias.

- b) La zona de las bocas son las que presentan mayores fluctuaciones de tamaños arenas finas en Boca del Carmen y arenas muy gruesas en la boca de Puerto Real, pues dependen de la dinámica oceanográfica de las bocas.

La subzona de supraplaya es la que refleja los mayores cambios energéticos causados primordialmente por las variaciones del oleaje de tormenta y nortes en las diferentes épocas climáticas, siendo la época de nortes 2014 donde se dio la mayor variación de tamaños, desde arenas finas hasta arenas muy gruesas. Para la subzona de infraplaya se presentan condiciones energéticas altas con la presencia de arenas gruesas, y en la subzona de mesoplaya las arenas medias que son más predominantes en las épocas muestreadas.

### **Composición y procedencia de los sedimentos litorales**

Se identificaron dos tipos de sedimentos de la zona:

- a) sedimentos transicionales (material arenoso terrígeno y/o calcáreo).
- b) sedimentos calcáreos aportados por el Río Champotón y el transporte litoral de sedimentos erosionados a lo largo de la zona litoral calcárea de la península hasta la parte central de la Isla del Carmen, con el aporte marino de materiales biogénicos hacia las playas. En las bocas de Puerto Real y Sabancuy, se interrumpe el transporte litoral de los sedimentos hacia el interior de la laguna de Términos y el estero de Sabancuy, respectivamente.

### **Factores causantes de la erosión**

De los 15 sitios monitoreados, solo 3 de ellos presentan alguna infraestructura de protección costera, que han causado un mayor efecto en la erosión alrededor de estas. En la playa cercana al Km 45 (espigones), Sabancuy (escolleras) y Puente Dos Bocas (tetrápodos). Las escolleras conformadas por enrocamientos, o grandes tetrápodos de concreto son fundamentales para proteger. El lado negativo de estas construcciones es que representan obstáculos al transporte litoral de sedimentos. Las corrientes litorales pueden cambiar su dirección a lo largo de un año, no obstante, siempre hay la tendencia de contar con un transporte litoral preferente, de tal forma que una de las escolleras va a retener sedimentos, los cuales no pasarán al otro lado, donde se producirá erosión.

Por otro lado los sitios que presentan una barrera de protección natural como la roca de playa (*rock beach*) su porción arenosa se encuentra protegida, y la erosión es estable. Mientras

que en el resto de los sitios los procesos de erosión-depósito están sujetos a las condiciones hidrometeorológicas de secas, lluvias y nortes, reflejados en las variaciones de energía por el oleaje, mareas y corriente litoral.

### **Índice de Vulnerabilidad Costera**

El análisis del Índice de Vulnerabilidad Costera indicó cuatro clasificaciones a lo largo del litoral:

- a) *Baja*: Puerto Real, asociado a una protección natural de la infraplaya (*beach rock*).
- b) *Media*: Isla Aguada, Villa Quietud, Chenkan, Punta Chen y Xochen, playas de mayor extensión.
- c) *Alta*: Club de Playa, Km 45, Las Bombas y Puente Dos Bocas, cercanos a las Bocas lagunares.
- d) *Muy Alta*: Playa Norte, Bahamita, CASES y San Nicolasito, presentes en la Isla del Carmen.

### **Opinión pública y zona litoral**

A partir de las encuestas se sabe que la población está consciente sobre los cambios hidrometeorológicos como lo son los huracanes y tormentas que están sufriendo a nivel local y/o global. La percepción de la erosión costera de los once municipios que conforman el Estado de Campeche, solo tres cuentan con Atlas de Riesgo Municipal, que son: Ciudad del Carmen, San Francisco de Campeche y el municipio de Escárcega. Este estudio abarca Ciudad del Carmen y el Municipio de Champotón, y es un buen inicio para la conformación del Atlas de Riesgo Municipal para el municipio, que cuenta en su territorio con la parte de la porción litoral del Estado. Por tanto es de suma importancia que se tome en cuenta la participación de la población local para futuros proyectos, para así darle énfasis a la importancia del binomio Población-Estado, y de esta forma conseguir una mejor calidad de vida y protección al ambiente en conjunto.

# Recomendaciones y/o Perspectivas

Con base en los resultados obtenidos se hacen las recomendaciones siguientes:

- Para realizar alguna obra civil (infraestructura costera de protección: escolleras, tetrápodos, etc.) o la reparación en la zona litoral, es necesario realizar un modelado antes y después de la obra. Así el estudio aportará información sobre la fuente de material arenoso, el transporte litoral de sedimentos y las condiciones de erosión-acreción que presente la zona litoral.
- Monitorear estacionalmente los procesos de dinámica costera de los sitios críticos detectados en este estudio: Playa Norte, Club de Playa, CASES y KM 45, para prevenir y actuar a tiempo ante los riesgos y la vulnerabilidad de importancia social, económica y de infraestructura. Solo a partir del estudio de cada caso se podrán emitir recomendaciones de mitigación, prevención y/o protección o abandono de sitios.
- Crear un programa de prevención y capacidad de respuesta a los efectos ocasionados por la erosión costera para la población ribereña (inundaciones, pérdida de zona urbana), la industria petrolera (derrames en la zona litoral) y la conservación de ecosistemas ( pastos marinos, manglar y playas de anidación tortuguera).
- Retirar las obras civiles de protección costeras que no estén cumpliendo con la función de “proteger” la parte sedimentológica de las playas.
- Las acciones o medidas de mitigación deben realizarse con una coordinación interinstitucional y de los tres órdenes del Estado, bajo el esquema de un programa integral de protección de la zona costera, en el entendido que son acciones a largo plazo y muchas de ellas son costosas, considerando que son mucho menores los costos de prevención que de resolver los daños ocasionados en el aspecto social, económico y ambiental.



# Referencias

- Anzaldo, C., Prado, M. (2005). Índice de marginación a nivel localidad 2005. CONAPO. Consulta vía WEB.
- Bologaro-Crevena, A.R., García, A.Z.M., Rodríguez, V.T., Vicairo, A.G. (2010). *Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el Estado de Campeche*. volumen Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. UNAM. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Agraz-Hernández, C., Presa, J. (2010). *Mitigación, adaptación y costos*. volumen Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. UNAM. Semarnat-INE UNAM-ICMyL Universidad Autónoma de Campeche.
- Bringas-Rabángo, N.L. (1999). Políticas de desarrollo turístico en dos zonas costeras del pacífico mexicano. *Región y sociedad* **XI**, 1–52. ISSN 0188-7408.
- Carranza-Edwards, A. (2001). Grain size sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research* **17**, 38–52.
- Carranza-Edwards, A. (2009). Causas y consecuencias de la erosión de playas. *Instituto de Ciencias del Mar y Limnología* **4**. [Www.tuobra.unam.mx/publicadas/090608101838.pdf](http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/090608101838.pdf).
- Carver, R.E. (1971). *Procedures in Sedimentary Petrology*. Athens, Georgia.
- Cerdá, V. (2002). La gestión integrada de la costa. ¿la última oportunidad? *Revista de Obras Públicas Ingeniería y Territorio* **61**, 8–15.
- Davis, R.A., Hayes, M.O. (1984). What is a wave-dominated coast?, hydrodynamics and sedimentation in wave-dominated coastal environments. *Marine Geology* **60**, 313–329.

- E., U.S.A.C. (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM)*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 1110-2-1100.
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphills, Austin Texas.
- Folk, R.L. (2002). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphills Publishing Company, Austin Texas.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F. (2002). A summary of european experience with shore nourishment. *Coastal Engineering* **47**, 237–264. Doi:10.1016/S0378- 3839(02)00127-8.
- INEGI (2010). *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda*. Reporte técnico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.C. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*. Company, San Francisco.
- Lewis, D.W. (1984). *Practical Sedimentology*. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York.
- Márquez, A., Rodríguez, V.T., Recaséns, A.B.C., Hernández, J.C., Cordero, F.V., Díaz, F.E., Fernández, A.G., García, E.M., C, C.M.J., Aguilar, V.P., García, L.R., Carrillo, M.S., Carrillo, A.S., García, A.M., Vicario, A.G. (2008). *Estudio De La Dinámica Costera Del Litoral Norte Del Municipio Del Carmen, Campeche*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Municipio del Carmen Campeche. Informe PEMEX-PEP, Cuernavaca,Morelos.
- McManus, D.A. (1988). A study of maximum load for small diameter screens. *Journal Sedimentary Petrology* **35**, 792–796.
- Obiol, E.M. (2003). La regeneración de playas como factor clave del avance del turismo valenciano. *Cuadernos de Geografía* **73-74**, 121–146.
- Ojeda-Zújar, J., F., J.I.A., C., D.M., J., P.F. (2009). El uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa de Andalucía, España. *GeoFocus* , 83–100ISSN-e 1578-5157.
- Pérez, J.M., y R. Medina, L.T. (2001). Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo. *Física de la Tierra* , 139–1661988-2440.
- Pérez, M.A.O. (1992). Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro Campeche Tabasco. *Investigaciones Geográficas* , 7–23.

- Pérez, M.A.O., Linares, A.P.M. (2000a). Componentes naturales y de uso del suelo vulnerables a las variaciones del nivel del mar en la costa atlántica de México. *Investigaciones Geográficas* , 46–61.
- Pérez, M.A.O., Linares, A.P.M. (2000b). Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. *Investigaciones Geográficas* , 68–81.
- Rijn, L.C.V. (1998). The effect of sediment composition on cross-shore bed profiles. *Morphodynamics in Rivers, Estuaries and Nearshore Coastal Seas* .
- Rodríguez-Perea, A., Servera, J., Martín-Prieto, J.A. (2000). Alternatives a la dependència de les platges de les balears de la regeneració artificial. *METADONA 10*. Univ. I. Balears Col. Pedagogia Ambiental.
- Roig, F.X. (2002). El pla de neteja integral del litoral de menorca. aspectes geomòrfics, ambientals i socials. *Geografía Aplicada* , 51–64.
- Rothwell, R.G. (1989). *Minerals and Mineraloids in Marine Sediments*. Elsevier Applied Science, London.
- Torres, V.R., García, A.M., Crevenna, A.B., Hernández, J.C., Díaz, G.E., García, E.M. (2010). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE UNAM-ICMyL Universidad Autónoma de Campeche. capítulo Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el Estado de Campeche debidos a efectos en el cambio climático. p. 514.
- Villanueva-Fragoso, S., Vélez, G.P., García, C., Presa, J. (2010). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE UNAM-ICMyL Universidad Autónoma de Campeche. capítulo Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros. p. 514.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal Geology* **30**, 377–392.
- Zújar, J.O., Álvarez Francoso, J.I., Cajaraville, D.M., Jurado, P.F. (2008). El uso de las tigs para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (cvi) ante una potencial subida del nivel del

mar en la costa andaluza. *XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica* .

## Capítulo 5

# Apéndice A

### 5.1. El Estado de Campeche y la situación socioeconómica

La región sur del Estado de Campeche en el Golfo de México presenta una alta diversidad biológica y belleza escénica, condición que pretende ser aprovechada para el desarrollo de la industria turística. El gobierno del estado ha empezado a impulsar algunas iniciativas en este sentido, lo cual parece pertinente considerando no solo la riqueza ecológica sino también el alto y medio grado de marginación socioeconómica que presentan los poblados de esta región (Anzaldo y Prado, 2005). Hasta el momento las principales actividades en la región entre Isla Aguada y Sabancuy son la pesca, agricultura, comercio a escala local o regional y forestería, principalmente. El desarrollo turístico apenas está comenzando y no se ha desarrollado en su totalidad. Pocos estudios han tratado de caracterizar el ecoturismo sostenible y ejemplos positivos del mismo son todavía escasos.

Las actividades económicas más importantes del Estado son la pesca, las extractivas de hidrocarburos y cultivos de coco y arroz. El aporte a nivel nacional de la industria petrolera es de cerca del 71 % de la extracción del crudo y el 30 % de gas. La industria pesquera representa el 6 % del valor nacional y el 40 % en cuanto a la pesca demersal.

En la zona costera del Golfo de México y la parte oeste de la Península de Yucatán, en particular en el municipio del Carmen, donde se localizan los poblados de Isla Aguada y Sabancuy son escasas las investigaciones científicas con relación a cuestiones turísticas. Dichos estudios son necesarios, entre otras cosas para evaluar el nivel de aceptación de la población local ante un cambio en sus actividades tradicionales y para proponer la vocación futura del

lugar. Por otra parte, es necesario contar con información de los diferentes atributos del lugar, atractivos para los visitantes, así como la capacidad de carga que soporte un turismo sustentable. Por lo que se considera importante que estas evaluaciones se realicen antes de que empiece la planificación de desarrollo de esta actividad para evitar futuros conflictos en las comunidades y sus costumbres.

Es posible distinguir dos tipos de turismo en general: uno es el turismo de masas y el otro es el turismo alternativo, también conocido como ecoturismo. El ecoturismo, ayuda a diversificar la oferta y la orienta hacia destinos diferentes a los de playa, poniendo un gran valor el enorme abanico de atractivos naturales y culturales que existen en el mundo (Bringas-Rabángo, 1999). Las investigaciones relacionadas con el ecoturismo y el desarrollo sustentable extienden más el conocimiento sobre la problemática ambiental de determinados lugares así como sus implicaciones, examina nuevas perspectivas y ayuda tanto a tomar decisiones como a formular nuevas políticas que protejan los recursos naturales. Los beneficios de realizar investigaciones científicas sobre el ecoturismo y el desarrollo sustentable son los siguientes:

1. Se describen las condiciones originales de los ecosistemas, incluyendo las caracterizaciones bióticas y abióticas, dejando estas asentadas por escrito.
2. Se puede saber si las actividades resultan sustentables o no, mediante evaluaciones periódicas.
3. Se puede deducir los posibles impactos al medio ambiente que genere dichas actividades, como lo pueden ser: la contaminación de las aguas residuales que llegan a ser empleadas para regadíos, dispersión de residuos sólidos de origen antropogénico, petróleos, combustibles y ruido.

Por otra parte, el turismo es una actividad que por lo regular genera el crecimiento de las economías locales costeras. Sin embargo, la falta de planeación en muchos países, como México, ha dado por resultado que el manejo de los recursos naturales de la franja litoral no sea el correcto. El crecimiento urbano y la infraestructura turística generalmente se realizan modificando salvajemente el entorno natural, con la consecuente alteración de diversos ecosistemas que son clave para la protección de la zona costera y fuente de riqueza para las comunidades locales y de los propios países. Además, se pone en riesgo la integridad cultural

de las comunidades que reciben la influencia multicultural de los turistas.

El paisaje ha sufrido y sigue sufriendo un fuerte proceso de cambio debido al desarrollo de infraestructura tanto petrolera como de comunicaciones (carretera), lo que ha provocado la reducción, fragmentación, y destrucción de sus ecosistemas litorales (como lo son los manglares) y en erosión costera. De acuerdo con la el cambio en el paisaje del Estado ha estado influenciado por actividad antropogénica a lo largo del litoral (Figura A.1). La quema de terrenos para la preparación de áreas de cultivo, los incendios forestales y la apertura de nuevas tierras tanto para la agricultura como para la ganadería son las principales causas de pérdida de hábitat y por tanto, una de las principales amenazas a la biodiversidad de Campeche. Aunque se tienen identificados cuales son los procesos que tienen un impacto sobre la biodiversidad es necesario llevar a cabo estudios que evalúen de manera cuantitativa e integral estas amenazas con el fin de tener planes y acciones que permitan minimizarlas (Figura A.2). Así mismo es importante hacer un análisis del impacto en el escenario de cambio climático, ya que se estima una elevación del nivel del mar de  $\sim 1$  m y un incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos, como se ha observado en la última década en la costa de Campeche.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

**Figura A.1.** El arenal costero (a) y una zona inundable (c) han sido fragmentados por infraestructura costera(b y d) y civil (e-h), impidiendo el flujo natural de los sedimentos.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura A.2.** El litoral de Campeche alberga ecosistemas de manglares (b y c) , pastos marinos (d) y es refugio de aves migratorias (a).



# Capítulo 6

## Apéndice B

### 6.1. Opinión pública y la zona litoral

En esta sección se presentan las encuestas realizadas mediante la plataforma digital *SurveyMonkey*, en la que se visualizan las 10 preguntas propuestas realizadas a 200 personas. En donde se pregunta acerca de la importancia del litoral, los efectos sobre el cambio climático y la perspectiva acerca de la respuesta del gobierno sobre los fenómenos hidrometeorológicos en el país.

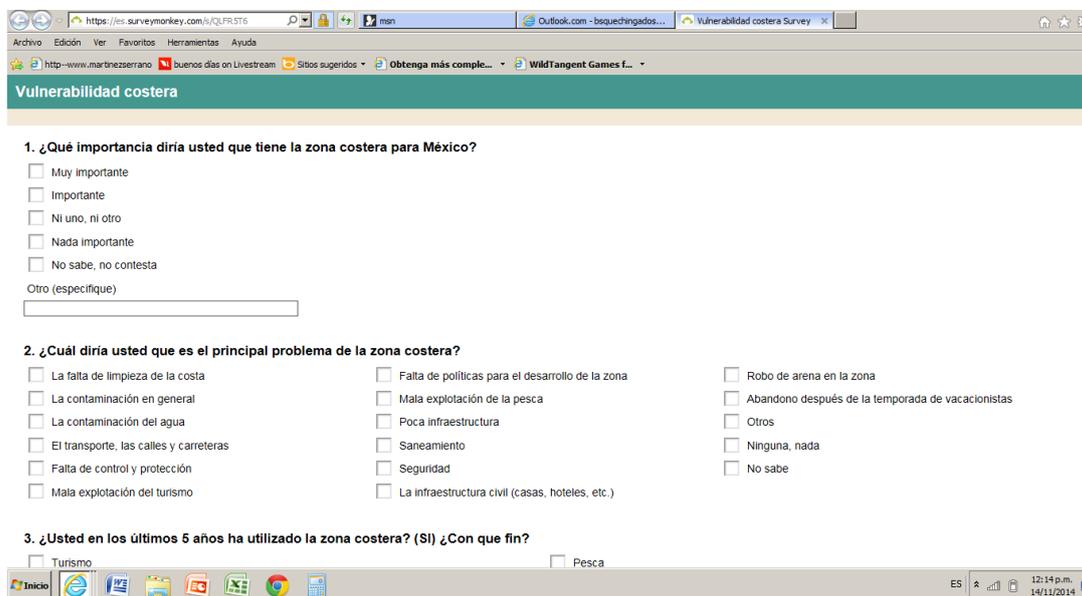


Figura B.1. Salida de la plataforma digital SurveyMonkey, con las 10 preguntas.

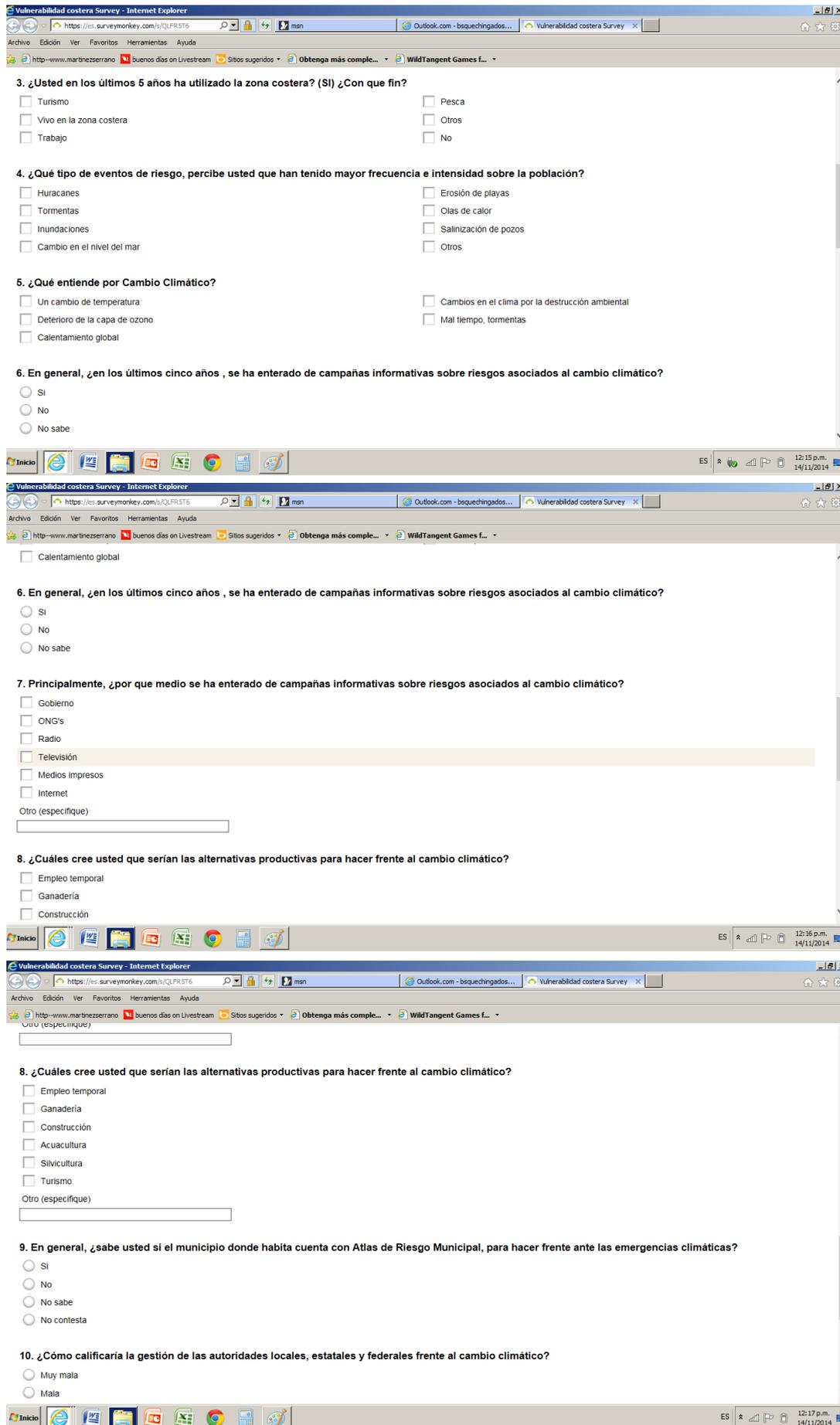


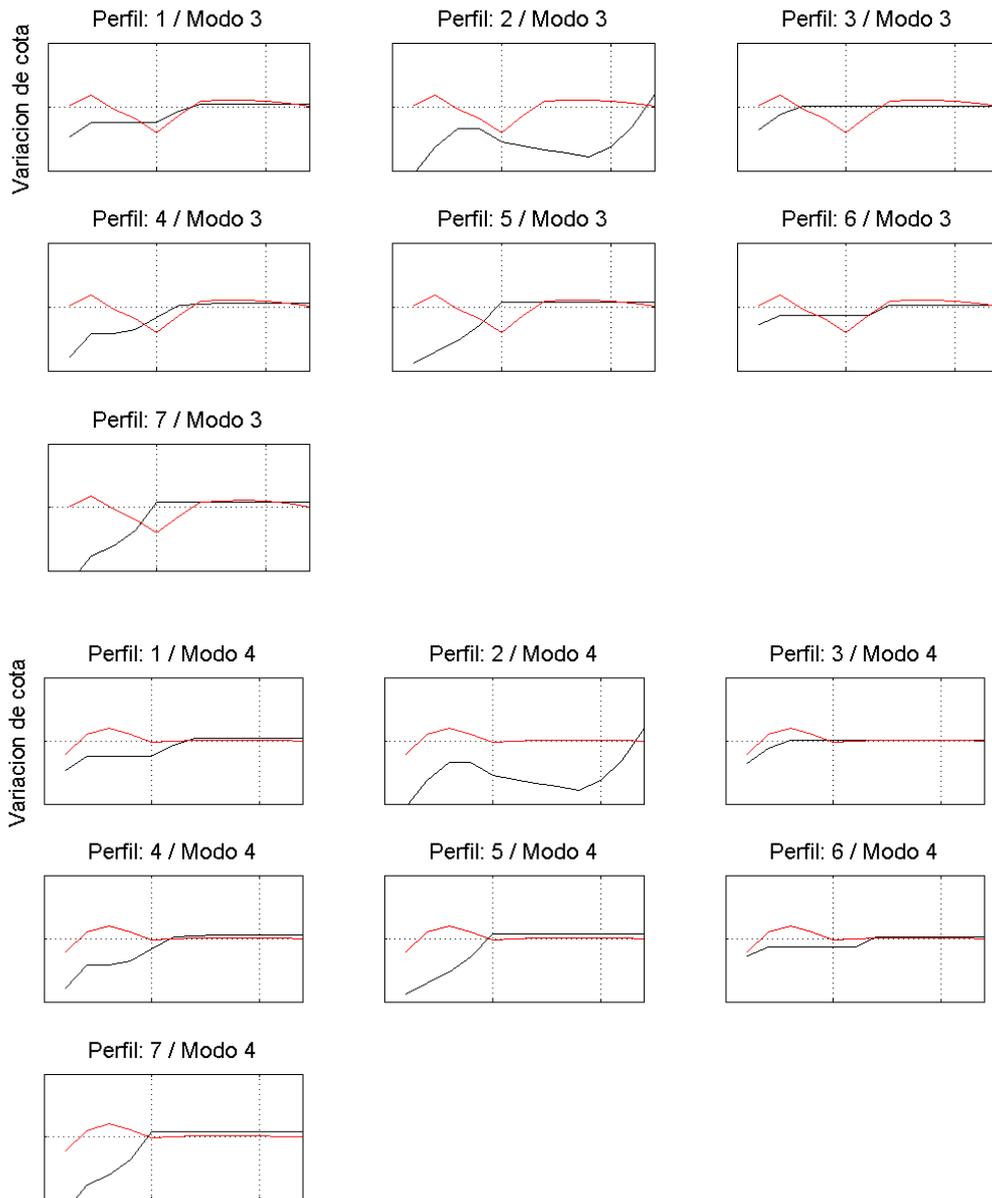
Figura B.2. Salida de la plataforma digital SurveyMonkey, con las 10 preguntas.

## Capítulo 7

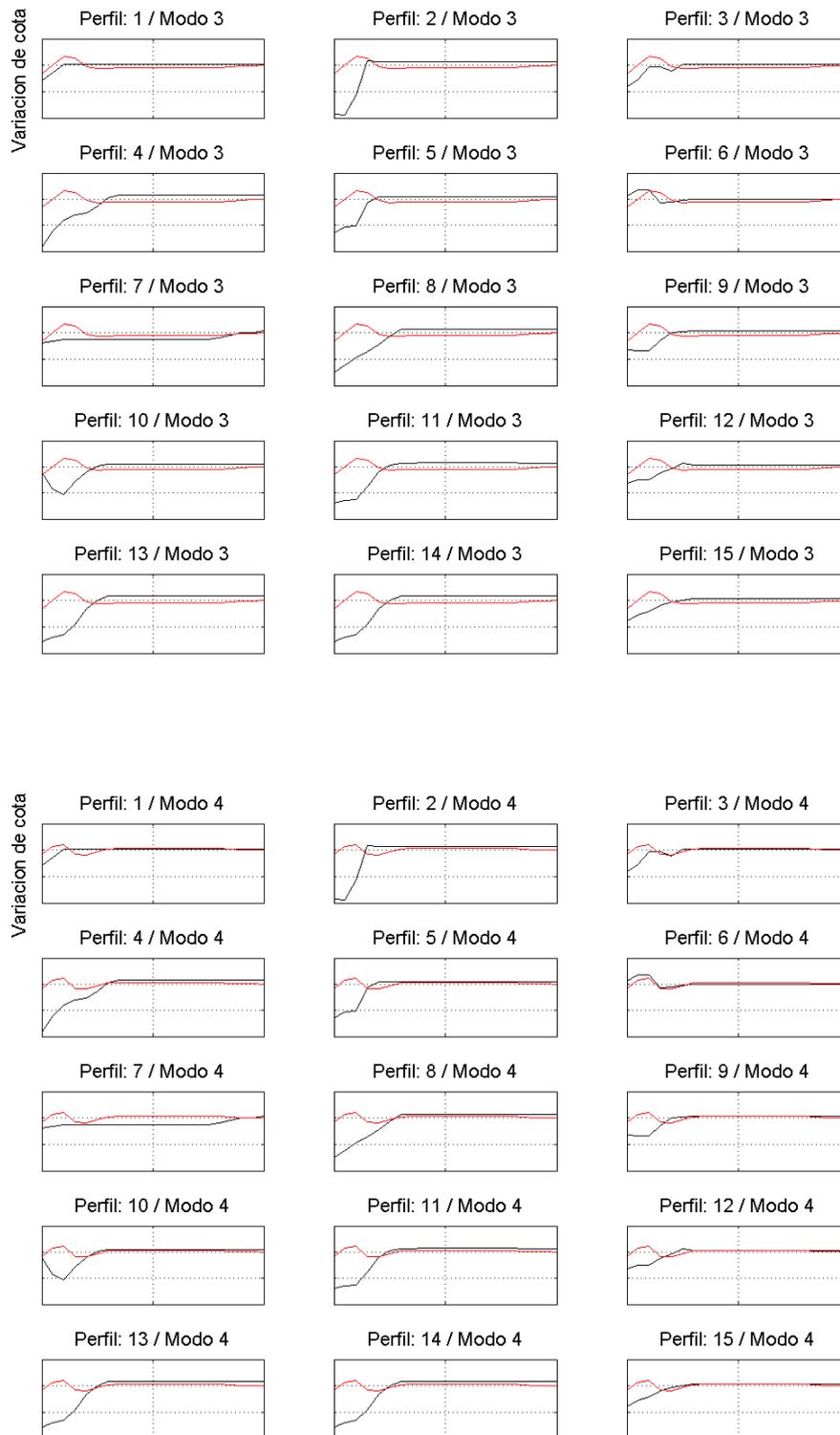
# Apéndice C

### 7.1. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) de las diferentes épocas

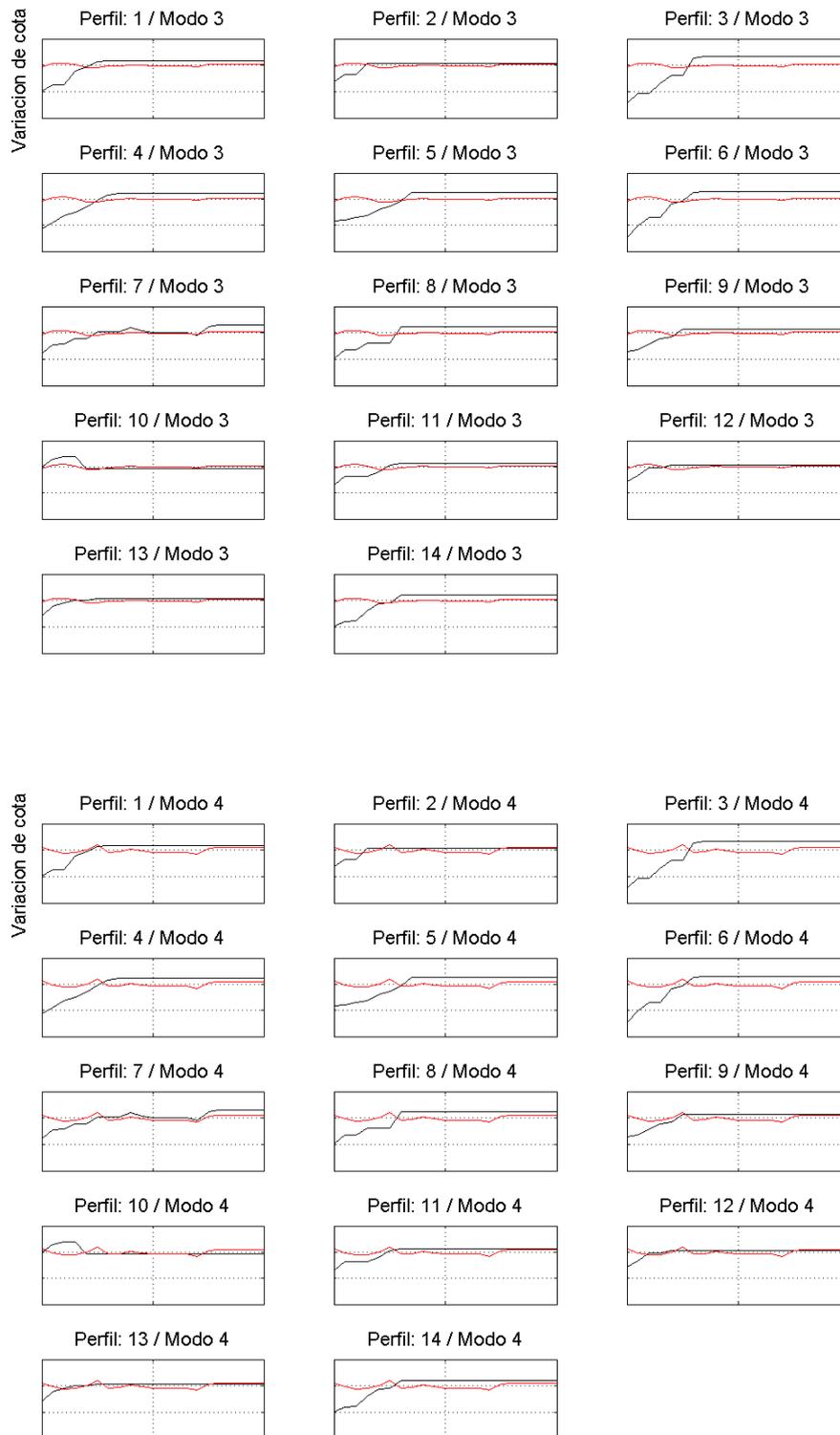
En esta sección se añaden los demás modos principales obtenidos a lo largo del análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales. La figura C.1 corresponde a los modos principales 3 y 4 de la época de secas 2013. Para lluvias 2013 los modos principales 3 y 4 se muestran en la figura C.2. La figura C.3 corresponde a los modos principales 3 y 4 de la época de nortes 2014 y para lluvias 2014 los modos principales 3 y 4 se muestran en la figura C.4.



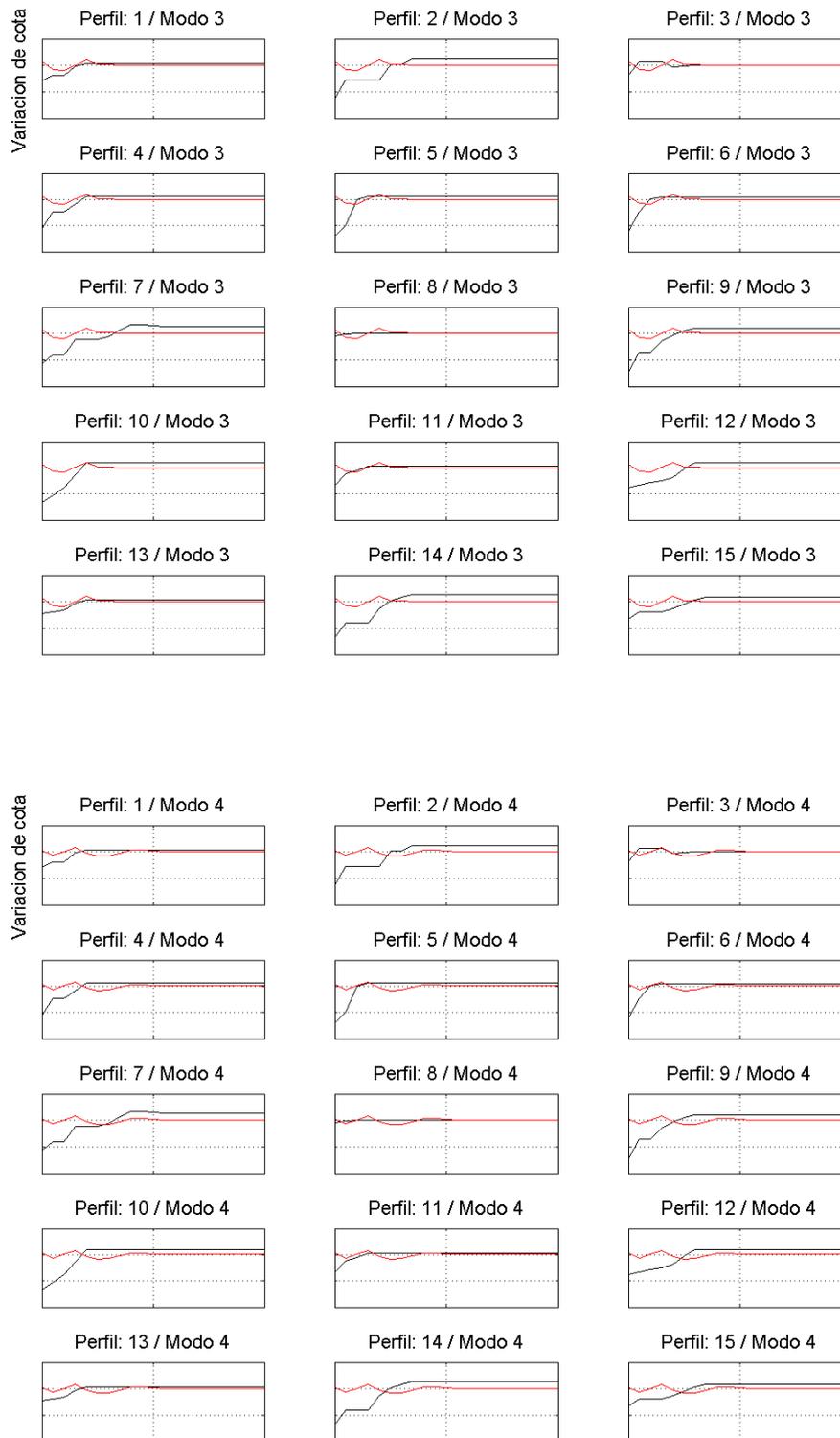
**Figura C.1.** Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 7 sitios monitoreados durante la época de secas del 2013.



**Figura C.2.** Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2013.



**Figura C.3.** Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época de nortes 2014. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 14 sitios monitoreados durante la época nortes 2014.



**Figura C.4.** Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 3 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014. Perfiles de la variabilidad de la playa explicada por el Modo 4 (en rojo) y la correspondiente a cada uno de los 15 sitios monitoreados durante la época de lluvias del 2014.