



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

**EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA OPRESIÓN COSTERA A TRAVÉS
DEL ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES CLAVE ENTRE FACTORES
BIÓTICOS Y ABIÓTICOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

DEBORA LIBERTAD RAMÍREZ VARGAS

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. FUENTES MARILES OSCAR ARTURO

Secretario: DRA. REYES CHÁVEZ LILIA

1 er. Vocal: DR. MENDOZA BALDWIN EDGAR GERARDO

2 do. Vocal: DR. SILVA CASARÍN RODOLFO

3 er. Vocal: DR. MARIÑO TAPIA ISMAEL DE JESÚS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX

TUTOR DE TESIS:

DR. EDGAR G. MENDOZA BALDWIN



FIRMA

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Índice de Figuras | 7 |
| Índice de Tablas..... | 9 |
| Índice de Gráficas | 10 |
| Resumen | 11 |
| Abstract..... | 12 |
| 1. Introducción | 14 |
| 1.1. Estudios Previos..... | 15 |
| 1.2. Opresión Costera | 16 |
| 2. Justificación..... | 18 |
| 3. Objetivos | 20 |
| 3.1. General | 20 |
| 3.2. Particular | 20 |
| 4. Estado del arte | 22 |
| 4.1. Definición de Opresión Costera | 22 |
| 4.1.1. Importancia de evaluar e identificar la ocurrencia de Opresión Costera | 23 |
| 4.1.2. Tratamiento de Incertidumbre | 24 |
| 4.2. La Lógica Difusa como método para la cuantificación de la Opresión Costera | 25 |
| 4.2.1. Conjuntos Difusos..... | 26 |
| 4.2.2. Operaciones con Conjuntos Difusos | 28 |
| 4.2.3. Representación de Conjuntos Difusos | 29 |
| 4.2.4. Variables lingüísticas | 30 |
| 4.2.5. Reglas Difusas..... | 31 |
| 4.2.6. Inferencia Difusa..... | 32 |
| 4.2.7. Inferencia de Mandani..... | 32 |
| 4.2.8. Inferencia de Takagi, Sugeno y Kang | 33 |
| 5. Zona de Estudio | 34 |
| 5.1. Localidades de estudio | 35 |
| 5.1.1. Isla Arena | 36 |
| 5.1.2. Playa Bonita | 37 |
| 5.1.3. Chenkán..... | 38 |
| 5.1.4. Sabancuy | 39 |
| 5.1.5. Playa Norte..... | 40 |
| 5.1.6. Nuevo Campechito | 41 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6. | Método | 42 |
| 6.1. | Definición de variables que inducen Opresión Costera | 43 |
| 6.2. | Tratamiento de datos disponibles y generación de bases de datos de las variables inductoras Opresión Costera | 44 |
| 6.2.1. | Tratamiento para variables de tierra de origen natural | 45 |
| 6.2.2. | Tratamiento para variables de tierra de origen antrópico | 45 |
| 6.2.3. | Tratamiento para variables de mar de origen natural | 48 |
| 6.3. | Generación del Sistema Difuso para la cuantificación de Opresión Costera | 50 |
| 6.4. | Cuantificación de Opresión Costera | 51 |
| 6.5. | Software especializado en Lógica difusa para la cuantificación de Opresión Costera: Xfuzzy 52 | |
| 6.6. | Software para la Toma de Decisiones: NetLogo | 60 |
| 7. | Resultados | 62 |
| 7.1. | Variables que inducen Opresión Costera | 62 |
| 7.1.1. | Erosión | 63 |
| 7.1.2. | Cambio de uso de suelo | 66 |
| 7.1.3. | Infraestructura y servicios de recreación | 74 |
| 7.1.4. | Vivienda | 76 |
| 7.1.5. | Vientos | 76 |
| 7.1.6. | Mareas | 78 |
| 7.1.7. | Oleaje | 78 |
| 7.1.8. | Eventos extremos | 80 |
| 7.1.9. | Evolución de la línea de costa | 80 |
| 7.2. | Sistema Difuso | 84 |
| 8. | Interpretación y Discusión | 88 |
| 8.1. | Opresión Costera | 88 |
| 8.2. | Toma de Decisiones | 94 |
| 9. | Consideraciones Finales | 96 |
| 10. | Conclusiones | 99 |
| | Bibliografía | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. ESQUEMA DEL PROCESO DE OPRESIÓN COSTERA: A) LOS ECOSISTEMAS COSTEROS SON CAPACES DE DESPLAZARSE TIERRA ADENTRO SIN LA EXISTENCIA DE BARRERAS RÍGIDAS (ACTIVIDADES ANTRÓPICAS). B) LOS ECOSISTEMAS NO SON CAPACES DE DESPLAZARSE HACIA TIERRA CAUSANDO SU OPRESIÓN DEBIDO A LA RIGIDIZACIÓN DE LA ZONA COSTERA (FUENTE: MODIFICADO DE ALEXANDRA FRIES: INTEGRATION AND APPLICATION NETWORK, UNIVERSITY OF MARYLAND CENTER FOR ENVIRONMENTAL SCIENCE (IAN.UMCES.EDU/IMAGELIBRARY/)). | 23 |
| FIGURA 2. VISIÓN DE LÓGICA DIFUSA VS LÓGICA CLÁSICA. (MODIFICADO DE D' NEGRI Y DE VITO, 2006) | 27 |
| FIGURA 3. ALGUNAS DE LAS FUNCIONES CARACTERÍSTICAS MÁS HABITUALES: (A) TRIANGULAR, (B) TRAPEZOIDAL, (C) GAUSSIANA Y (D) SIGMOIDAL. (D' NEGRI Y DE VITO, 2006) | 28 |
| FIGURA 4. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE OPERACIONES ESTÁNDAR CON CONJUNTOS DIFUSOS. MODIFICADA DE GONZÁLEZ-MORCILLO, 2005. | 29 |
| FIGURA 5. USO DEL MODIFICADOR "MUY" EN LOS CONJUNTOS "BAJO" Y "ALTO". MODIFICADA DE GONZÁLEZ-MORCILLO, 2005. | 30 |
| FIGURA 6. ALGUNOS MODIFICADORES Y SU REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y MATEMÁTICA. MODIFICADO DE GONZÁLEZ-MORCILLO, 2012. | 31 |
| FIGURA 7. A) CONJUNTO RECORTADO Y B) CONJUNTO ESCALADO. (GONZÁLEZ-MORCILLO, 2012). | 32 |
| FIGURA 8. LOCALIZACIÓN DE ESTADO DE CAMPECHE Y LAS ZONAS DE ESTUDIO. | 34 |
| FIGURA 9. ISLA ARENA: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, B) VISTA DE HUMEDALES, C) LITORAL COSTERO Y VEGETACIÓN Y, D) PESCADORES LOCALES. | 36 |
| FIGURA 10. PLAYA BONITA: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO; B) ESTRUCTURA DE LÍMITE PARA LOS BAÑISTAS, C) LITORAL Y ZONA URBANA Y, D) PALAPAS. | 37 |
| FIGURA 11. CHENKÁN: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO; B) LITORAL CON VEGETACIÓN PREDOMINANTES, C) CAMPAMENTO TORTUGUERO Y, D) PERFILES DE PLAYA. | 38 |
| FIGURA 12. SABANCUY: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO; B) BOCA DEL ESTERO SABANCUY, C) ESCOLLERA EN LA BOSA DEL ESTERO Y, D) LITORAL COSTERO. | 39 |
| FIGURA 13. PLAYA NORTE: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO; B) MALECÓN, C) INFRAESTRUCTURA (LÍNEAS DE LUZ ELÉCTRICA) Y, D) ANCHO DE PLAYA. | 40 |
| FIGURA 14. NUEVO CAMPECITO: A) LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO; B) ESTADO ACTUAL DE LA LÍNEA DE COSTA, C) HUMEDALES BAJO CONDICIONES DE NORTE Y, D) RESIDUOS DE PROCESOS DE PETRÓLEO EN LA ZONA MARINA. | 41 |
| FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO. | 42 |
| FIGURA 16. DIAGRAMA DE UN SISTEMA COMPUESTO DE LÓGICA DIFUSA. | 51 |
| FIGURA 17. INTERFAZ DEL PROGRAMA XFUZZY, ESPECIAL PARA SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA. | 52 |
| FIGURA 18. FLUJO DE DISEÑO DEL XFUZZY. TOMADO DE IMSE-CNM 2018 | 53 |
| FIGURA 19. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DIFUSO PARA LA OBTENCIÓN DE OPRESIÓN COSTERA EN LAS COSTAS DEL ESTADO DE CAMPECHE. | 53 |
| FIGURA 20. ESQUEMA LÓGICO DEL SISTEMA DIFUSO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA: A) INTRODUCCIÓN DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS Y SUS RELACIONES LÓGICAS; B) VARIABLES DE ENTRADA; C) VARIABLES DE SALIDA, D) OPERADOR DEL SISTEMA (CRISP); E) ASIGNACIÓN DE LAS REGLAS DIFUSAS; E) MOTOR DE INFERENCIA. | 54 |
| FIGURA 21. INTRODUCCIÓN DE LA VARIABLE CAMBIO DE USO DE SUELO CON VALORES MÍNIMO Y MÁXIMO, EL NÚMERO TOTAL DE FUNCIONES DE MEMBRESÍA Y EL TIPO DE GRÁFICA QUE REPRESENTA A LA VARIABLE. | 54 |
| FIGURA 22. FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA LA VARIABLE DE ENTRADA "CAMBIO DE USO DE SUELO" Y EL TIPO DE GRÁFICO PARA SU ANÁLISIS. | 55 |
| FIGURA 23. PARÁMETROS DE REFERENCIA DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA. | 55 |
| FIGURA 24. A) CONECTORES LÓGICOS Y SELECCIÓN DEL TIPO DE DEFUZZIFICACIÓN. B) AGREGACIÓN DE LAS SALIDAS DE LAS REGLAS DEL SISTEMA. | 57 |
| FIGURA 25. HERRAMIENTA XFLOT, QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO ENTRADA/SALIDA DEL SISTEMA MEDIANTE UNA GRÁFICA TRIDIMENSIONAL. | 58 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 26. HERRAMIENTA DE MONITORIZACIÓN XFMT, MUESTRA LOS GRADOS DE ACTIVACIÓN DE LAS DISTINTAS REGLAS Y VARIABLES LINGÜÍSTICAS, ASÍ COMO LOS VALORES DE LAS DIFERENTES VARIABLES INTERNAS, PARA UN CONJUNTO DADO DE ENTRADAS. | 58 |
| FIGURA 27. HERRAMIENTA XFSIM DIRIGIDA A LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DENTRO DE SU ENTORNO DE OPERACIÓN..... | 59 |
| FIGURA 28. INTERFAZ DEL SOFTWARE NETLOGO. | 60 |
| FIGURA 29. EROSIÓN DE MÁS DE 30 METROS EN SABANCUY. | 64 |
| FIGURA 30. EROSIÓN EN PLAYA NORTE: EN ROJO ÁREA EXPUESTA A EROSIÓN, EN NEGRO Y AZUL CAMBIO DE VEGETACIÓN A ZONA DE RECREACIÓN E INFRAESTRUCTURA. | 65 |
| FIGURA 31. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN EN EL CORREDOR TRANSVERSAL ISLA ARENA PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 66 |
| FIGURA 32. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN PARA EL CORREDOR TRANSVERSAL PLAYA BONITA PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 67 |
| FIGURA 33. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN PARA EL CORREDOR TRANSVERSAL CHENKÁN PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 68 |
| FIGURA 34. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN PARA EL CORREDOR TRANSVERSAL SABANCUY PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 70 |
| FIGURA 35. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN PARA EL CORREDOR TRANSVERSAL PLAYA NORTE PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 71 |
| FIGURA 36. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE VEGETACIÓN PARA EL CORREDOR TRANSVERSAL NUEVO CAMPECHITO PARA LOS AÑOS 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 Y 2016. FUENTE: CONABIO, 2017. | 72 |
| FIGURA 37. A. ANTENAS ELÉCTRICAS PERTENECIENTES A LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), EXPUESTAS A LA FUERZA DE VIENTO Y MAREAS SOBRE LA CARRETERA FEDERAL 180 CHAMPOTÓN-CIUDAD DEL CARMEN. B. PUENTE VEHICULAR QUE CONECTA EL POBLADO DE ISLA ARENA CON LA CARRETERA FEDERAL 180 MÉRIDA-CAMPECHE. FOTOGRAFÍAS TOMADAS EN LA CAMPAÑA DE CAMPO REALIZADA ENTRE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2017. | 74 |
| FIGURA 38. ESCOLLERAS EN LA BOCA DEL ESTERO SABANCUY, DONDE SE OBSERVAN POSTES DE COMUNICACIÓN Y OBRAS DE RECREACIÓN. | 74 |
| FIGURA 39. VELOCIDAD MÁXIMA PARA COSTAS DEL ESTADO DE CAMPECHE. | 77 |
| FIGURA 40. MAREA PARA LAS COSTAS DEL ESTADO DE CAMPECHE. | 78 |
| FIGURA 41. OLEAJE PARA LA COSTA DEL ESTADO DE CAMPECHE (SABANCUY 1949-2009)..... | 79 |
| FIGURA 42. ROSA DE OLEAJE PARA LA ZONA DE SABANCUY (1949-2009)..... | 79 |
| FIGURA 43. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO PARA LA ZONA DE ESTUDIO ISLA ARENA EN XFUZZY..... | 86 |
| FIGURA 44. ESQUEMA DE SOLUCIÓN POR PARTE DEL PROGRAMA XFUZZY PARA CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA..... | 87 |
| FIGURA 45. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA ISLA ARENA, CAMPECHE. A). EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B). CAMBIO EN EL USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA. | 88 |
| FIGURA 46. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA PLAYA BONITA, CAMPECHE. A). EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B). CAMBIO EN EL USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA. | 89 |
| FIGURA 47. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA CHENKÁN, CAMPECHE. A). EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B). CAMBIO EN EL USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA. | 90 |
| FIGURA 48. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA SABANCUY, CAMPECHE. A) EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B) CAMBIO DE USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA..... | 91 |
| FIGURA 49. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA SABANCUY, CAMPECHE. A) EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B) CAMBIO DE USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA..... | 92 |
| FIGURA 50. VARIABLES Y CUANTIFICACIÓN DE OPRESIÓN COSTERA PARA NUEVO CAMPECHITO, CAMPECHE. A) EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA. B) CAMBIO DE USO DE SUELO. C) INFRAESTRUCTURA. D) ÍNDICE DE OPRESIÓN COSTERA..... | 93 |
| FIGURA 51. MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA ACCIONES EN LA OPRESIÓN COSTERA. | 94 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. VARIABLES QUE INDUCEN OPRESIÓN COSTERA. | 43 |
| TABLA 2. OBTENCIÓN DEL VALOR DE PERTENENCIA MEDIANTE LA FUNCIÓN SIGMOIDE DE LÓGICA DIFUSA. | 56 |
| TABLA 3. VARIABLES QUE INDUCEN OPRESIÓN COSTERA. | 62 |
| TABLA 4. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA ISLA ARENA EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016. | 69 |
| TABLA 5. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA PLAYA BONITA EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016. | 69 |
| TABLA 6. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA CHENKÁN EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016..... | 69 |
| TABLA 7. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA SABANCUY EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016. | 73 |
| TABLA 8. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA PLAYA NORTE EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016. | 73 |
| TABLA 9. CAMBIO DE VEGETACIÓN EN HECTÁREAS Y PORCENTAJE PARA NUEVO CAMPECHITO EN EL PERIODO DE 1997 AL 2016.73 | |
| TABLA 10. INVENTARIO DE ESTRUCTURAS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO DEL ESTADO DE CAMPECHE. | 75 |
| TABLA 11. VIVIENDAS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO..... | 76 |
| TABLA 12. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA PARA LAS ZONAS DE ESTUDIO (2005-2015). | 81 |
| TABLA 13. VARIABLES DE ENTRADA PARA EL SISTEMA DIFUSO. | 85 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|--|----|
| GRÁFICA 1. INCIDENCIA DE EVENTOS EXTREMOS PARA LA COSTA DEL ESTADO DE CAMPECHE. | 80 |
| GRÁFICA 2. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA ISLA ARENA, CAMPECHE. | 81 |
| GRÁFICA 3. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA PLAYA BONITA, CAMPECHE. | 82 |
| GRÁFICA 4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA CHENKÁN, CAMPECHE. | 82 |
| GRÁFICA 5. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA SABANCUY, CAMPECHE. | 83 |
| GRÁFICA 6. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA PLAYA NORTE, CAMPECHE. | 83 |
| GRÁFICA 7. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PERÍODO DEL 2005 AL 2015 PARA NUEVO CAMPECHITO, CAMPECHE. | 84 |

RESUMEN

Las zonas costeras son invaluable para la población mundial debido al desarrollo de actividades turísticas, comerciales e industriales que se desarrollan en ellas. Lo anterior las hace fuertemente demandadas y codiciadas, de ahí que las estrategias para una correcta planificación del uso de la costa es un tema de investigación recurrente. Sin embargo, las actividades humanas provocan directa o indirectamente muchas de las tensiones que afectan la sostenibilidad en dichas zonas, por ejemplo: pérdida de hábitat y alteración de las funciones ecológicas e hidrológicas, aumento de la contaminación, incremento de la cantidad de nutrientes en el medio marino costero o cerca de él, aceleración del aumento del nivel del mar e intercepción e interrupción del flujo de agua y sedimentos. Estas tensiones causan el deterioro de la zona costera, afectando no sólo el paisaje de la zona, sino directamente a la supervivencia de los ecosistemas, dando como resultado la pérdida de su flora y fauna. Entre los procesos que han deteriorado la zona costera se encuentran la erosión, el cambio climático y la variabilidad climática que ocasionan el incremento del nivel del mar (Doody, 2013).

La opresión costera se ha definido como un proceso donde el aumento del nivel del mar y otros factores provocan la pérdida de espacio en ambas direcciones, tierra y mar, y los ecosistemas ya no tienen las condiciones necesarias para mantener sus funciones esenciales (Martinez *et al.*, 2020).

Con el objetivo de aportar conocimiento y herramientas para mejorar el manejo de la zona costera y la toma de decisiones asociadas, se puede partir de la cuantificación de la opresión costera. Dado que la opresión costera en México solamente se ha medido de manera cualitativa (Martinez, *et al.*, 2014 y 2020), este estudio propone una metodología basada en un enfoque de lógica difusa para cuantificarla. Para ello, se seleccionaron seis sitios de interés en la costa del estado de Campeche, México: Isla Arena, Playa Bonita, Chenkán, Sabancuy, Playa Norte y Nuevo Campechito. Es importante señalar que cada una de estas localidades tiene actividades económicas, poblaciones e infraestructura costera contrastantes entre sí.

Los parámetros que se consideraron como los principales inductores de opresión costera son: evolución de la costa, intensidad y frecuencia de tormentas, cambio de uso de suelo y endurecimientos costero. Para cada sitio de estudio se presentan los mapas de distribución e intensidad de opresión costera.

Los resultados obtenidos sugieren que toda la costa de Campeche está experimentando un proceso de opresión costera que amenaza los ecosistemas costeros presentes en el área y pone en peligro la infraestructura y vida humana.

ABSTRACT

Coastal areas are increasingly important to the population. However, human activities directly or indirectly cause many of the stresses that affect sustainability in coastal areas, such as loss of habitat and ecological and hydrological functions, increased pollution, the presence of greater amounts of nutrients in the coastal marine environment, or near it, faster rise in sea level and interception and interruption of the flow of water and sediment. Causing the deterioration of the coastal zone, affecting not only the landscape of the area, but it has threatened its ecosystems and with it the loss of flora and fauna of these. Among the processes that have deteriorated the coastal zone is erosion, climate change and variability that causes sea level rise (Doody, 2013).

Coastal squeeze has been defined as a process in which rising sea levels and other factors cause loss of space in both directions – land and sea – and the ecosystems no longer have the necessary conditions to maintain their essential functions (Martinez *et al.*, 2020).

In order to improve the management of the coastal zone and the decision-making that involves an improvement in it, it is necessary to quantify the coastal squeeze. coastal squeeze is a physical process in which rising sea levels and other factors, such as increased storms and subsidence, push coastal habitats inland. Since coastal squeeze in Mexico has only been measured qualitatively and quantitatively (Martinez, *et al.*, 2014, This study proposes a methodology based on a fuzzy logic approach. For this, six sites of interest on the coast were selected from the state of Campeche, Mexico: Isla Arena, Playa Bonita, Chenkán, Sabancuy, Playa Norte and Nuevo Campechito It is important to note that each of these towns has contrasting economic activities, populations and coastal infrastructure.

The parameters that were considered as the main inducers of coastal squeeze are: evolution of the coast, intensity and frequency of storms, change of land use and coastal hardening. For each study site, the maps of distribution and intensity of coastal squeeze are presented.

The results suggest that the entire coast of Campeche is undergoing a process of coastal squeeze that threatens the highly diverse coastal ecosystems there and endangers infrastructure and human lives.

1. INTRODUCCIÓN

La zona costera se encuentra en un estado crítico en muchas partes del mundo (Martinez, *et al.*, 2020). Los impactos como la reducción y destrucción de los ecosistemas a nivel mundial son consecuencia de factores como la rápida expansión de poblaciones humanas y en consecuencia su consumo descontrolado, la fragmentación y cambios en sus procesos naturales, inducidos por modificaciones físicas, biológicas y químicas antrópicas (Defeo *et al.*, 2009; Martinez *et al.*, 2020).

En las últimas décadas, la población costera ha aumentado dramáticamente, una tendencia que probablemente continuará en el futuro (Neumann *et al.*, 2015). En México, el 15 % de la población habita la zona costera (INEGI, 2001) donde algunas localidades presentan las mayores tasas de crecimiento poblacional (2.8 % en promedio). Se prevé que entre 2010 y 2100, el país experimentará un crecimiento del 30 % en su población costera (Silva *et al.*, 2014).

En los años recientes, varios estudios han subrayado la amplia gama de servicios ambientales que proporciona la zona costera. Entre ellos se encuentran la protección contra la erosión y las inundaciones, la recreación y la prevención de la salinización. Por otra parte, la ingeniería ecológica, que combina el diseño humano con el natural para beneficio de ambos, se ha vuelto cada vez más popular para abordar la gran variedad de desafíos sociales y económicos que enfrentan las poblaciones costeras (Silva *et al.*, 2017; Thorslund *et al.*, 2017; van der Biest *et al.*, 2017). Paradójicamente, los ecosistemas costeros se encuentran entre los más propensos a ser alterados como consecuencia de la actividad humana, incluido el cambio climático y la opresión costera (Flórez *et al.*, 2010).

Factores antrópicos como la migración humana a las zonas costeras, el crecimiento de la población, la construcción de infraestructura, la extracción de minerales, la acuicultura y la agricultura son algunas de las principales presiones que enfrentan las zonas costeras (Lithgow *et al.*, 2013). En respuesta, el manejo adecuado de la zona costera es indispensable para evitar la rápida degradación de la misma y la pérdida asociada de los servicios del ecosistema.

Además, factores físicos naturales como la creciente frecuencia e intensidad de las tormentas atribuidas al cambio climático también están contribuyendo a la pérdida de resistencia y resiliencia de los ecosistemas costeros; Por lo que, ante estos desafíos, se requieren nuevos sistemas de infraestructura (Nguyen *et al.*, 2018; Yan, Zhang y Knutson; 2017).

Como se dijo, uno de los procesos que ocurre en la zona costera es la opresión costera. El proceso consiste en el deterioro o la pérdida completa de los hábitats costeros debido a la

combinación de factores naturales y antropogénicos, relacionados con procesos marinos y terrestres (Doody, 2004; Black y Veatch, 2006; Pontee, 2013).

1.1. Estudios Previos

La mayoría de los estudios disponibles se centran en identificar la ocurrencia de la opresión costera. Muestran que el aumento del nivel del mar empuja los hábitats costeros hacia la tierra mientras que, al mismo tiempo, en áreas donde la infraestructura costera ha creado un margen estático y artificial entre la tierra y el mar, los hábitats se oprimen en una zona de estrechamiento y, por lo tanto, los ecosistemas costeros comienzan a degradarse (Doody, 2004). En estos estudios se utilizan diferentes modelos para evaluar el riesgo y las consecuencias de la presencia de la opresión costera en varios análisis cualitativos y cuantitativos.

El trabajo de Schlepner (2008) estima extensiones y pendientes actuales de la zona intermareal en costas rocosas duras a partir de datos topográficos existentes, y concluye que habrá una reducción en el atractivo de las playas impactando al turismo, debido al aumento del nivel del mar. Por su parte, Mazaris et al. (2009) proponen un método para cuantificar la pérdida de hábitat y vincularlo con la producción de crías de tortugas marinas, proporcionando una herramienta de conservación que permita guiar de manera más certera las decisiones de planificación para la conservación de las poblaciones de estos organismos marinos. Jackson y McIlveny (2011) desarrollaron metodologías y modelos basados en un concepto espacial y concluyeron que los cambios en las características físicas de las costas pueden influir en la disponibilidad de hábitats, con posibles impactos en la abundancia, composición y diversidad de ensambles y en el comportamiento de los organismos intermareales.

Pontee (2013) explica como los cambios en el uso del término *opresión costera* han generado confusión al analizar la extensión del hábitat costero. También aclaró los procesos geomorfológicos responsables de la pérdida de hábitat. En respuesta a lo anterior, diversos autores desarrollaron nuevos modelos e índices para tener una mejor comprensión y utilidad del término *opresión costera*. Torio y Chmura (2013) desarrollaron un índice que puede usarse para evaluar el potencial de la opresión costera a lo largo de las fronteras de un humedal y para clasificar las amenazas que enfrentan múltiples humedales. El resultado compara la amenaza presente y futura de la opresión costera en las marismas en los Estados Unidos y el Parque Nacional Kouchibouguac en Nuevo Brunswick, Canadá. Martínez *et al.* (2014) hicieron una proyección de los posibles efectos del aumento del nivel del mar en Veracruz. Los resultados obtenidos en modelos de nicho ecológico indican que, bajo escenarios de incremento del nivel medio del mar (INMM), la distribución potencial de dos especies focales disminuiría. Estos resultados indican que es probable que exista opresión costera en el área de estudio, y que se necesitan medidas para limitar o mitigar este proceso.

1.2. Opresión Costera

La identificación y medición de fenómenos como la opresión costera son tareas complejas porque involucran varios factores de diferente naturaleza. Tales tareas se pueden resolver utilizando un enfoque de lógica difusa, ya que esta extensión de lógica multivaluada utiliza un razonamiento flexible basado en reglas que incluye variables lingüísticas y permite la incertidumbre; es similar al proceso de decisión del cerebro humano (García y Lazzari, 2000). Las características anteriores hacen que la lógica difusa sea adecuada para sistemas y modelos complejos que tienen múltiples entradas y salidas. Al mismo tiempo, la lógica difusa evalúa la posibilidad (magnitud) y el grado de pertenencia de cada factor considerado en un conjunto de funciones que describen la existencia de un fenómeno (por ejemplo, la opresión costera) (Ergin *et al.*, 2004; Ergin, Williams y Micallef, 2006). De esta manera, la lógica difusa es útil para obtener conclusiones sobre un espectro entre verdadero y falso, es decir, un continuo de valores entre 0 y 1, que difieren de la lógica clásica, también conocida como lógica binaria, donde sólo es posible una respuesta o valor (verdadero o falso, sí o no, 0 o 1).

Se han analizado múltiples procesos costeros con sistemas de lógica difusa, que cubren temas como el riesgo y la vulnerabilidad, la contaminación y el cambio en el paisaje, dando resultados que son fáciles de describir utilizando una expresión matemática, basada en un método lingüístico (Gemitzi *et al.*, 2006; Nobre *et al.*, 2007; Torio y Chmura, 2013).

Si se toma como ejemplo la variable “*ancho*” para describir una playa de arena: un investigador puede decir que una playa con más de 50 m desde la línea de flotación hasta la parte posterior de la costa tiene un ancho del 100%, por lo que 25 m serían 50% ancho, y 1 m sería equivalente a 1% ancho. En la lógica binaria, toda playa de menos de 50 m sería 0% de ancho y toda playa con una extensión mayor a 50 m sería 100% de ancho. En contraste, la lógica difusa mide el grado en que la playa imaginaria coincide con la categoría *ancho*, es decir, la declaración ancha de playa es válida sólo en cierto grado cuando se aplica a un estudio de caso particular.

En consecuencia, la lógica clásica no se puede utilizar para medir directamente el grado de opresión costera. Para resolver este problema, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar un índice con un enfoque de lógica difusa que facilite la cuantificación del grado de opresión costera en diferentes regiones costeras caracterizadas por distintas condiciones ecológicas, geomorfológicas y socioeconómicas.

2. JUSTIFICACIÓN

La mayor amenaza que enfrentan las zonas costeras y playas de arena es la opresión costera (Torio y Chmura, 2013). Las playas son atrapadas entre el incremento del nivel del mar, la erosión y el aumento de la infraestructura costera terrestre. En consecuencia, las playas estrechas resultantes no dejan lugar a la migración hacia tierra que debería ser un proceso natural después del incremento del nivel del mar. La opresión costera amplifica las consecuencias de la erosión costera debido a las mismas razones. Una de las principales consecuencias es la posibilidad de que las playas arenosas desaparezcan, amenazando la infraestructura estable en las zonas costeras.

La interacción de diversos procesos como el incremento en el nivel del mar, el cambio climático, la erosión, la acreción, la contaminación, la infraestructura humana en las costas, estructuras de defensa y el cambio de uso de suelo, inducen el proceso de opresión costera. A nivel mundial, los estudios que se han realizado sobre este proceso aún son insuficientes para comprender su comportamiento y detallar los factores que la propician. Por ello, existe la necesidad de desarrollar una metodología de evaluación de los elementos que inducen opresión costera y que, además, cuantifique la interconexión entre los factores bióticos y abióticos de esta zona con el fin de crear indicadores de salud, integridad y resiliencia de su hábitat.

Además, uno de los principales ecosistemas amenazados por la opresión costera son los humedales, ecosistemas de suma importancia, pues proporcionan gran variedad de bienes, servicios y funciones; entre ellos, la conservación de la biodiversidad y el aprovechamiento de los recursos útiles para la sociedad. Son buenos ambientes para la captura de bióxido de carbono, (que influye en el efecto invernadero), infiltran y recargan los mantos freáticos, protegen contra fenómenos naturales y estabilizan el microclima local.

Sin embargo, los humedales se encuentran en alto grado de vulnerabilidad por diversas causas de degradación o pérdida, ya sean naturales o por acciones directas e indirectas de la actividad humana, como la sequía, la salinización, erosión, extracción de aguas subterráneas, contaminación por escurrimientos agrícolas y urbanos, construcción de bordos, diques y presas, entre otros.

Por último, la aplicación de estas metodologías, tendrán la finalidad de proveer herramientas para la toma de decisiones informadas que permitan desarrollar, proteger y conservar dichos ecosistemas.

3. OBJETIVOS

3.1. General

Determinar y cuantificar los elementos que inducen opresión costera a fin de proponer herramientas metodológicas que permitan una gestión adecuada del proceso, mediante la conexión entre factores ingenieriles y ecológicos (bióticos y abióticos), representados en un índice de escala numérica.

3.2. Particular

- Determinar las variables que inducen opresión costera según su origen (natural o antropogénico).
- Definir una metodología de caracterización y zonificación biótica y abiótica de la zona costera vía sectores transversales que actúen como indicadores de su salud, integridad y resiliencia.
- Definir una jerarquía de las variables que inducen opresión costera en zonas del estado de Campeche.
- Construir una base de datos cuantitativos con los elementos y variables costeras detalladas en zonas del estado de Campeche.
- Realizar campañas de campo en el litoral costero para las zonas de estudio.
- Definir y elaborar el índice de opresión costera para las zonas de estudio, además de representarlos en mapas para que los resultados sean visuales.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Definición de Opresión Costera

La opresión costera (OC) es un proceso que describe la pérdida y disminución de la cantidad y calidad de la zona costera causado por una combinación de acciones naturales y antrópicas. Los ecosistemas costeros, sometidos a fuerzas y procesos naturales sin presencia de infraestructura rígida, son capaces de desplazarse tierra adentro con el objetivo de adaptarse y sobrevivir a tales procesos. Sin embargo, cuando las acciones antrópicas en la zona costera generan una barrera estática que impide el desplazamiento de los ecosistemas costeros hacia tierra, ocurre una opresión hasta el punto crítico de su extinción (Defra, 2003 y 2005; Doody 2004 y 2013; Black y Veatch, 2006; English, 2006 y Ponte 2013) (Figura 1).

Las variables naturales y antrópicas que inducen opresión costera se presentan tanto en el mar como en tierra. Dentro de los procesos que provienen del mar se encuentran el oleaje, las mareas, las tormentas y el aumento del nivel del mar (p.e. el aumento eustático de los niveles del mar como resultado del hundimiento costero). Entre las actividades terrestres que favorecen la evolución de la opresión costera se encuentran el creciente desarrollo de infraestructura urbana, comercial y turística.

En general, la rigidización de la zona costera con las actividades agrícolas y el creciente impacto de las actividades humanas influye de manera directa a los ecosistemas costeros. La infraestructura costera es una barrera estática que impide la migración hacia el interior de los sistemas costeros, reduciendo así la resiliencia a eventos extremos (e.g. huracanes) y disminuyendo la capacidad de los sistemas costeros para adaptarse a fenómenos naturales (e.g. la subsidencia).

Las barreras estáticas no siempre son antrópicas, éstas también pueden ocurrir debido a características naturales de los ecosistemas costeros, como son los acantilados o playas rocosas, que también impiden el desplazamiento de los ecosistemas hacia tierra adentro.

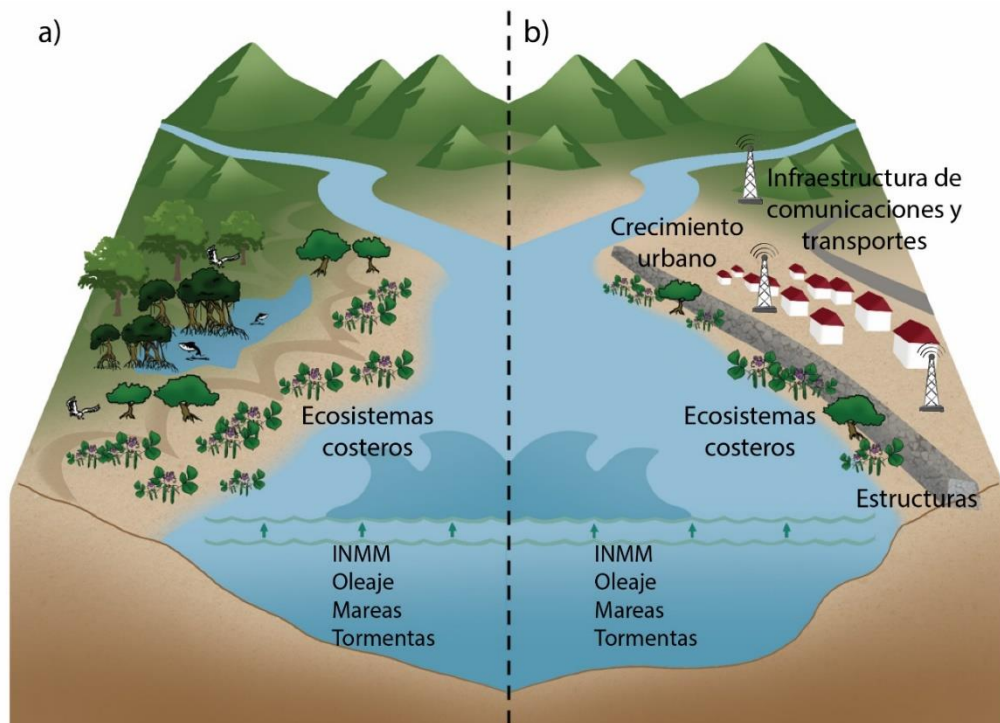


Figura 1. Esquema del proceso de Opresión Costera: a) Los ecosistemas costeros son capaces de desplazarse tierra adentro sin la existencia de barreras rígidas (actividades antrópicas). b) Los ecosistemas no son capaces de desplazarse hacia tierra causando su opresión debido a la rigidización de la zona costera (Fuente: modificado de Alexandra Fries: Integration and Application Network, University of Maryland Center for Environmental Science (ian.umces.edu/imagelibrary/)).

En conjunto, las acciones naturales y antrópicas oprimen los ecosistemas costeros ocasionando la competencia por terreno de todos los ecosistemas involucrados en la zona intermareal. Dicha competencia genera, principalmente, el proceso de minimización o disminución de especies; por lo que de seguir oprimiendo por ambas acciones puede llevar a la extinción de los ecosistemas. Entre los ecosistemas amenazados por el proceso de opresión costera que se encuentran dentro de la zona intermareal están los humedales, dunas, diversos tipos de vegetación, marismas, playas de arena, entre otros. Como resultado, los ecosistemas costeros y la sociedad que depende de ellos son los principales afectados y que se encuentran en riesgo (Silva R. *et al.*, 2018).

4.1.1. Importancia de evaluar e identificar la ocurrencia de Opresión Costera

La protección de las costas se basa en el análisis costo-beneficio de diversos factores, entre ellos la protección de la vida humana, las actividades económicas que se desarrollan en ella y el valor de los ecosistemas que en su mayoría se pierden. Es importante señalar que la pérdida de los humedales también puede estar influenciada por la cantidad de obras de protección, ya que una mayor protección conduce a una mayor pérdida de cobertura vegetal por opresión costera. Por lo anterior, la pérdida de humedales debido a la opresión costera se cuenta como un costo de protección (Tol, 2012).

El fenómeno de opresión costera es un causante del incremento de la vulnerabilidad ante efectos extremos de la naturaleza y, por ende, compromete la salud e integridad de la sociedad que se desarrolla sobre la línea de costa.

De acuerdo con lo anterior, se considera necesaria la aplicación y/o generación de técnicas metodológicas que no sólo cuantifiquen el proceso de opresión costera, sino que además sean capaces de establecer las conexiones entre sistemas bióticos y abióticos de las zonas costeras y así tener una integración y balance de ecosistemas marinos y terrestres que interactúan en la franja costera.

4.1.2. Tratamiento de Incertidumbre

Los métodos de razonamiento incierto se clasifican en dos grandes grupos: métodos cualitativos y métodos numéricos. Los primeros consisten en que cuando no hay información suficiente, se hacen suposiciones que posteriormente podrán ser corregidas al recibir nueva información. Por su naturaleza cualitativa no pueden considerar los distintos grados de certeza o incertidumbre de las hipótesis. Suelen presentar además problemas de incremento exponencial de la cantidad de combinaciones (D'Negri y De Vito, 2006).

En cuanto a los métodos numéricos, el primero que surgió fue el tratamiento probabilista. En el siglo XVIII, Bayes y Laplace propusieron la probabilidad como una medida de la creencia personal. Recién con la aparición de las computadoras cobró impulso el tratamiento de la incertidumbre y se desarrolla la inteligencia artificial (alrededor de 1956) cuyos orígenes se remontan al año 1943. En aquella época, las computadoras habían superado ampliamente la capacidad de cálculo de cualquier ser humano, pero estaba muy lejos del "comportamiento inteligente". Precisamente por eso, la inteligencia artificial se centraba en la resolución de problemas simbólicos; y por esta razón no se prestó atención al estudio de la probabilidad como rama o al menos como herramienta de la inteligencia artificial.

No obstante, el método probabilista clásico presenta dos inconvenientes principales:

1. La aplicación del teorema de Bayes "en bruto" requería un número exponencial de parámetros, por lo que se hacía necesario introducir hipótesis simplificadoras que eran básicamente dos: la exclusividad y la independencia condicional de las variables.
2. El segundo inconveniente grave del modelo era que las hipótesis eran poco verosímiles, sobre todo la independencia condicional. Por este motivo, la mayor parte de los investigadores estaban de acuerdo en que la probabilidad no era un método adecuado para la inteligencia artificial.

La Lógica Difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento (Zadeh, 1973). La propuesta de Zadeh choca con siglos de tradición cultural (la lógica binaria

de Aristóteles, ser o no ser), por lo que hubo resistencia por parte de los científicos, quienes se negaban a aceptar que se trataba de un intento por estudiar científicamente el campo de la vaguedad, permitiendo manipular conceptos del lenguaje cotidiano, lo cual era imposible anteriormente (González-Morcillo, 2005).

Según comenta Zadeh: “En occidente la acogida fue menos positiva. En Asia aceptan que el mundo no es blanco o negro, verdad o mentira. En Occidente todo es A o B”. Por este motivo es en Asia (Japón en especial) donde más aplicaciones tecnológicas se realizan a partir de la lógica difusa.

Debido a la cantidad de variables que intervienen en el proceso de opresión costera no es conveniente utilizar un método clásico Bayesiano ya que la identificación de ésta se concentra en grados lingüísticos difíciles de expresar, por lo que la lógica difusa es una excelente herramienta para lograr la cuantificación del proceso. La lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional que permite trabajar con información de alto grado de imprecisión, en esto se diferencia de la lógica clásica que trabaja con información definida y precisa. Es una lógica multivaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones entre sí/no, verdadero/falso, negro/blanco, caliente/frío, pequeño/grande, cerca/lejos, pocos/muchos, etc. (D’Negri y De Vito, 2006).

4.2. La Lógica Difusa como método para la cuantificación de la Opresión Costera

El concepto de lógica difusa fue concebido por Lofti A. Zadeh (1965), quién disconforme con los conjuntos clásicos (*crisp sets*) que sólo permiten dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a dicho conjunto, la presentó como una forma de procesar información permitiendo pertenencias parciales a unos conjuntos, que en contraposición a los clásicos denominó Conjuntos Difusos (*fuzzy sets*) (Kouro y Musalem, 2002).

Desde mediados de los años 1970’s, la lógica difusa se ha utilizado ampliamente debido a varios factores. Uno de ellos es que el uso de conocimiento experto permite la automatización de tareas. En muchas áreas de aplicación se reduce considerablemente la necesidad de operadores que buscan su conocimiento en la experiencia. De este modo, si existe un conocimiento del proceso, es posible modelarlo mediante lógica difusa (González-Morcillo, 2005).

Los sistemas basados en lógica difusa son fáciles de diseñar, modificar y mantener. Pese a la pérdida de precisión, la reducción de tiempo de desarrollo y mantenimiento es muy relevante para su uso industrial, ingenieril, médico, entre otros.

En la conocida teoría de conjuntos, un elemento pertenece o no a un conjunto. En un conjunto difuso su frontera no está precisamente definida y el grado de pertenencia

entrega un valor entre 0 y 1. El concepto *grado de pertenencia* reemplaza al blanco o negro, es subjetivo y dependiente del dominio. Zadeh dice: “La lógica difusa trata de copiar la forma en que los humanos toman decisiones. Lo curioso es que, aunque maneja información imprecisa, esta lógica es en cierto modo muy precisa”. El profesor Zadeh menciona que la gente no requiere información numérica precisa del medio que le rodea para desarrollar tareas de control altamente adaptables, por ejemplo, conducir un automóvil o caminar por una acera sin chocar con los postes y las otras personas.

Lo que se busca mediante el empleo de los conjuntos difusos es describir y formalizar la realidad, empleando modelos flexibles que interpreten las leyes que rigen el comportamiento humano y las relaciones entre los hombres. Para describir esa realidad incierta, tanto en el orden de lo social como en el de lo natural, es necesario valerse de predicados, que pueden ser nítidos o difusos.

4.2.1. Conjuntos Difusos

La teoría de conjuntos difusos es un intento de desarrollar una serie de conceptos para tratar de un modo sistemático el tipo de imprecisión que aparece cuando los límites de las clases de objetos no están claramente definidos. Un conjunto difuso puede definirse como una clase en la que hay una progresión gradual desde la pertenencia al conjunto hasta la no pertenencia; o visto de otra forma, en la que un objeto puede tener un grado de pertenencia definido entre la pertenencia total (valor uno) o no pertenencia (valor cero). Desde esta perspectiva, los conjuntos convencionales (o conjuntos *crisp*) pueden verse como un caso particular de conjuntos difusos: un conjunto difuso que sólo admite dos grados de pertenencia (uno y cero).

El primer ejemplo utilizado por el profesor Zadeh para ilustrar el concepto de conjunto difuso fue el conjunto “hombres altos”. Según la teoría de la lógica clásica el conjunto “hombres altos” pertenece a hombres con una estatura mayor a un valor establecido, por ejemplo, en 1.80 m. Todos los hombres con una altura inferior a este valor quedarán fuera del conjunto. Así tendríamos que un hombre que mide 1.81 m pertenecerá al conjunto hombres altos, y en cambio un hombre que mida 1.79 m no pertenecerá a ese conjunto. Sin embargo, no parece lógico decir que un hombre es alto y el otro no, cuando su altura difiere en dos centímetros. El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto “hombres altos” es un conjunto que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él. La lógica difusa asigna un grado de pertenencia a cada valor de altura para definir la transición de “alto” a “no alto”. Por ejemplo, un hombre que mida 1.81 m tendrá un grado de pertenencia al conjunto de “hombres altos” en 0.85 y uno que mida 1.50 m tendrá un grado de pertenencia del 0.1. Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso límite de la lógica difusa en el que se asigna un grado de pertenencia 1 a los hombres con una altura mayor o igual a 1.80 m y un grado de pertenencia 0 a los que tiene una altura menor (Figura 2).

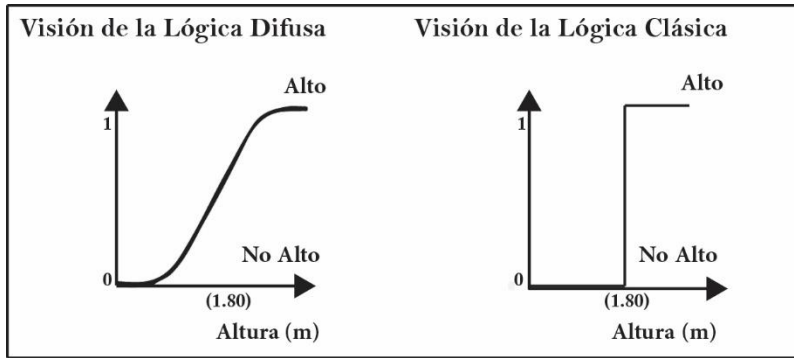


Figura 2. Visión de lógica difusa vs lógica clásica. (Modificado de D'Negri y De Vito, 2006)

Así pues, los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos solamente contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada X , la función característica $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de este valor de X al conjunto difuso A .

Formalmente, un conjunto clásico A , en un universo de discurso U , se puede definir de varias formas:

- Enumerando los elementos que pertenecen al conjunto,
- Especificando las propiedades que deben cumplir los elementos que pertenecen a ese conjunto o,
- En términos de la función de pertenencia $\mu_A(x)$:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Además, se puede decir que el conjunto de A es matemáticamente equivalente a su función de pertenencia o característica $\mu_A(x)$, ya que conocer $\mu_A(x)$ es lo mismo que conocer A .

Un conjunto difuso en el universo de discurso U se caracteriza por una función de pertenencia $\mu_A(x)$ que toma valores en el intervalo $[0, 1]$, y puede representarse como un conjunto:

$$A = \{ \{ (x, \mu_A(x)) \} \mid x \in U \}$$

La forma de la función característica utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y variará en función de la cultura, geografía, época o punto de vista del usuario. La única condición que debe cumplir una función característica es que tome valores entre 0 y 1, con continuidad. Las funciones características más comúnmente utilizadas por

su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gamma, pi y campana (Figura 3). Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano de los expertos, y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar la función.

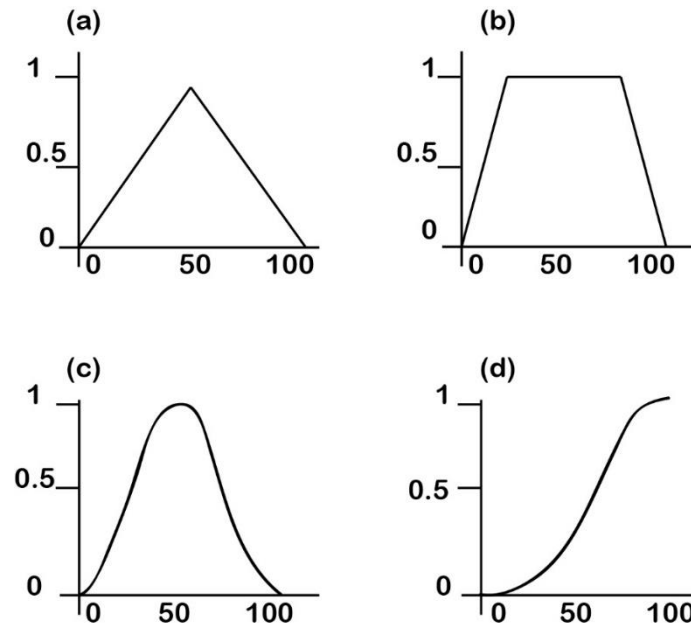


Figura 3. Algunas de las funciones características más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) sigmoideal. (D'Negri y De Vito, 2006)

El número de funciones características asociadas a una misma variable es elegido por el experto: a mayor número de funciones características tendrá mayor resolución, pero también mayor complejidad computacional. Además, estas funciones pueden estar solapadas o no, el hecho de estar solapadas pone de manifiesto un aspecto clave de la lógica difusa: una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez, es decir, “el vaso puede estar medio lleno y medio vacío a la vez”.

4.2.2. Operaciones con Conjuntos Difusos

Las tres operaciones básicas que se definen sobre conjuntos *crisp* (complemento, unión e intersección), pueden generalizarse de varias formas en conjuntos difusos. No obstante, existe una generalización particular que tiene especial importancia. Cuando se restringe el rango de pertenencia al conjunto $[0, 1]$, estas operaciones estándar sobre conjuntos difusos se comportan de igual modo que las operaciones sobre conjuntos *crisp* (Figura 4).



Figura 4. Descripción gráfica de operaciones estándar con conjuntos difusos. Modificada de González-Morcillo, 2005.

Las operaciones básicas entre conjuntos difusos son las siguientes:

- El conjunto complementario \bar{A} de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica viene definida por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

- La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cup B$ en U cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

- La intersección de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cap B$ en U con función característica:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Estas tres operaciones definidas para conjuntos difusos cumplen, al igual que en la teoría clásica de conjuntos: conmutativa, asociativa, distributiva, idempotencia, involución, transitiva; las leyes de Morgan.

Empleando estas operaciones, propiedades y modificadores se pueden obtener gran variedad de expresiones. Por ejemplo, siendo A el conjunto *alto* y B *bajo*, se pueden derivar el conjunto C como *no muy alto y no muy bajo* como $\mu_C(x) = [1 - \mu_A(x)^2] \cap [1 - \mu_B(x)^2]$.

4.2.3. Representación de Conjuntos Difusos

Los conjuntos *crisp* son útiles, pero presentan problemas en muchas situaciones. Examinando el Universo del discurso de la altura, tendríamos la representación gráfica de la Figura 5. Para definir un conjunto difuso hay que definir su función de pertenencia. Un método habitual es preguntar a un experto sobre el dominio del problema y representarlo mediante diferentes funciones (típicamente triangulares y trapezoidales). También se pueden utilizar funciones curvas o la función *singleton*.

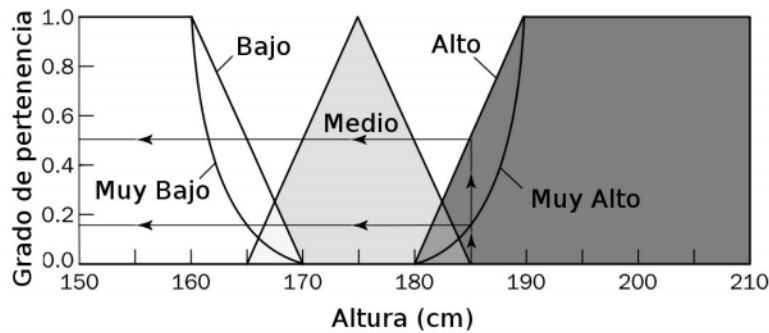


Figura 5. Uso del modificador "muy" en los conjuntos "bajo" y "alto". Modificada de González-Morcillo, 2005.

Para representar un conjunto difuso continuo en una computadora se necesita expresar esa función de pertenencia y mapear los elementos del conjunto con su grado de pertenencia. Aunque puede usarse a priori cualquier tipo de función, en la práctica se emplean funciones lineales con una descripción de su vector de ajuste, como:

$$\text{hombre} - \text{medio} = (0/165, 1/175, 0/185)$$

De acuerdo con la representación anterior se corresponde al conjunto difuso *Medio* de la Figura 5, donde la altura 165 se asocia al grado de pertenencia 0, la altura 175 al grado de pertenencia 1, y la altura 185 el grado de pertenencia 0.

4.2.4. Variables lingüísticas

Para representar el conocimiento en términos de razonamiento aproximado es necesario utilizar variables lingüísticas. Una variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural o artificial (Zadeh, 1975). De esta forma, una variable lingüística sirve para representar cualquier elemento que sea demasiado complejo, o del cual no se tenga una definición concreta; es decir, lo que no se puede describir en términos numéricos.

Así, una variable lingüística está caracterizada por una quintupla:

$$(X, T(X), U, G, M)$$

X es el nombre de la variable. $T(X)$ es el conjunto de términos de X ; es decir, la colección de sus valores lingüísticos. U es el universo del discurso. G es una gramática libre de contexto mediante la que se general los términos en $T(X)$. M es una regla semántica que asocia a cada valor lingüístico de X su significado $M(X)$.

Los símbolos terminales de las gramáticas incluyen:

Términos primarios: "bajo", "alto", ...

Modificadores: “muy”, “más”, “menos”, “cerca de”, ...

Conectores lógicos: normalmente NOT, AND y OR.

Generalmente se definen los conjuntos difusos de los términos primarios y, a partir de éstos, se calculan los conjuntos difusos de los términos compuestos (“muy alto”). Una etiqueta lingüística se forma como una sucesión de los símbolos terminales de la gramática.

Una variable lingüística puede emplear modificadores para cambiar la forma de los conjuntos difusos. Estos modificadores pueden asociarse a adverbios como “muy”, “ligeramente”, “un poco”, etc. Estos modificadores pueden aplicarse a oraciones completas, verbos, adjetivos, entre otros. En la práctica, se pueden distinguir tres tipos de modificadores: de concentración, de dilatación y de intensificación. En la Figura 6 se representan algunos de los más empleados.

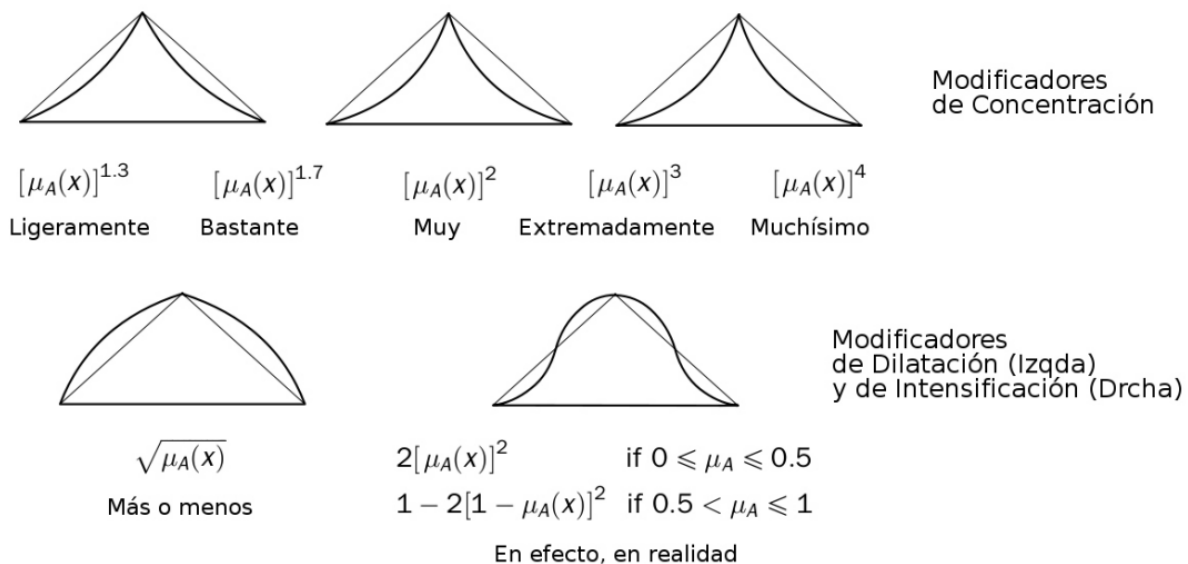


Figura 6. Algunos modificadores y su representación gráfica y matemática. Modificado de González-Morcillo, 2012.

4.2.5. Reglas Difusas

Una regla difusa (*regla de producción difusa if-then*) es expresada simbólicamente como:

$$IF < \text{proposición difusa} > THEN < \text{proposición difusa} >$$

Donde <proposición difusa> puede ser una proposición difusa atómica o compuesta. Podemos definir una proposición sencilla de este tipo mediante:

$$p: IF X \text{ es } A THEN Y \text{ es } B$$

El antecedente y consecuente de una regla puede tener múltiples partes. En los sistemas de reglas clásicos, si el antecedente es cierto, entonces el consecuente es también cierto.

En sistemas difusos donde el antecedente es difuso, todas las reglas se ejecutan parcialmente y el consecuente es cierto en cierto grado (si el antecedente es cierto con cierto grado de pertenencia, el consecuente es cierto también el cierto grado).

4.2.6. Inferencia Difusa

La inferencia difusa puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. Los tipos de inferencia más conocidos y aplicados son el modelo de Mamdani y el de Takagi, Sugeno y Kang (TSK) (Zadeh, 1975).

4.2.7. Inferencia de Mandani

Es posiblemente el método más ampliamente utilizado, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1976. El proceso se realiza en cuatro pasos:

1. **Fuzificación de las variables de entrada:** consiste en tomar los valores *crisp* de las entradas y determinar el grado de pertenencia de estas entradas a los conjuntos difusos asociados. El valor *crisp* naturalmente estará limitado en el universo del discurso de la variable. De este modo cada entrada se fuzifica sobre todas las funciones de pertenencia utilizadas en las reglas difusas.

2. **Evaluación de las reglas:** tomamos las entradas anteriores y se aplican a los antecedentes de las reglas difusas. Si una regla tiene múltiples antecedentes, se utiliza el operador AND u OR para obtener un único número que represente el resultado de la evaluación. Este número (el valor de verdad) se aplica al consecuente. Para evaluar la disyunción (operador OR) habitualmente se emplea la T-Conorma estándar (máximo). De igual forma, para el AND se usa habitualmente la T-Norma estándar del mínimo.

Finalmente, el resultado de la evaluación del antecedente se aplica al consecuente, aplicando un recorte o escalado según el valor de verdad del antecedente. El método más comúnmente utilizado es el recorte (*clipping*) que corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente. El escalado proporciona un valor más preciso, preservando la forma original del conjunto difuso. Se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente (Figura 7).

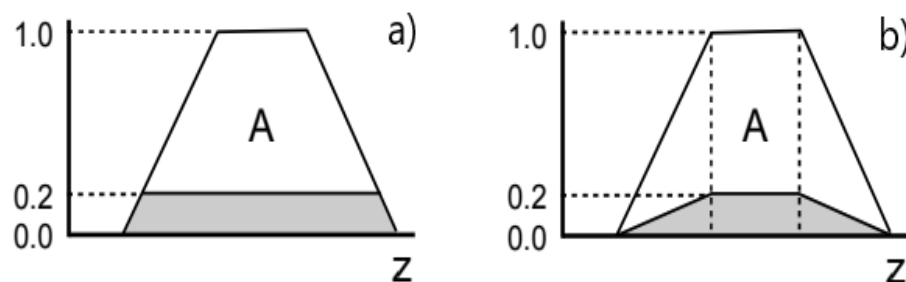


Figura 7. a) Conjunto recortado y b) conjunto escalado. (González-Morcillo, 2012).

3. **Agregación de las salidas de las reglas:** es el proceso de unificación de las salidas de todas las reglas; es decir, se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes previamente recortados o escalados, combinando para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.
4. **Defuzificación:** el resultado final habitualmente es necesario expresarlo mediante un valor *crisp*. En esta etapa se toma como entrada el conjunto difuso anteriormente obtenido para dar un valor de salida. Existen varios métodos de defuzificación, pero probablemente el más ampliamente usado es el centroide; que calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas con igual masa.

$$\text{Centroide} = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)}$$

4.2.8. Inferencia de Takagi, Sugeno y Kang

La forma general de la inferencia TKS es:

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } f(x, y)$$

Este tipo de método proporciona mayor eficiencia, pero no presentan un marco tan natural para la representación del conocimiento humano. Un tipo habitual de representación del consecuente es un *singleton* (punta discreta), que toma valor uno en un valor puntual del universo del discurso y cero en cualquier otro punto. Empleando este tipo de aproximación (ampliamente utilizada), la inferencia TSK y de Mamdani son muy parecidas, tomando las reglas el siguiente formato:

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } k$$

Siendo k un valor constante para el *singleton*. La salida *crisp* en este caso se obtiene mediante una sencilla agregación (media de pesos W_A) de estos songletones.

$$W_A = \frac{\sum(\mu(k_i) \times k_i)}{\sum \mu(k_i)}$$

En general el método de Mamdani se utiliza más ampliamente porque apareció antes y porque se presta más a la representación de conocimiento experto. Este método permite describir el conocimiento experto de una forma intuitiva, pero el principal inconveniente es su alto coste computacional, por lo que para aplicaciones de control y problemas de optimización se emplea más frecuentemente el método de inferencia TSK (González-Morcillo, 2005).

5. ZONA DE ESTUDIO

El estado de Campeche está ubicado en el Sureste de México (20.86° y 17.8° N, -89.1° y -92.45° W) en la Península de Yucatán (Figura 8). Limita con el Golfo de México y los estados de Yucatán, Quintana Roo, Tabasco y Belice, así como con la República de Guatemala. El estado ocupa el 2.9% del área total de México ($57,500 \text{ km}^2$) y tiene 900,000 habitantes (INEGI, 2011). Su clima cálido y más de 520 km de costa han hecho de este estado un destino turístico popular (Posada-Venegas *et al.*, 2013). Debido a las características geomorfológicas de la zona, los suelos tienen orígenes marinos y sedimentarios y están compuestos principalmente de carbonato de calcio. La plataforma continental es ancha, se extiende de 33 a 55 km hacia el mar, con profundidades de 70 a 220 m (Nava-Fuentes *et al.*, 2018). Los sedimentos de la playa tienen composiciones calcáreas y margosas con tamaños que van del limo a la grava (Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, 2010).



Figura 8. Localización de estado de Campeche y las zonas de estudio.

En la región costera del estado de Campeche, la zona litoral se reconoce como una de las áreas más dinámicas como respuesta a la fuerza de los procesos marinos que dan lugar a la morfología de las playas, así como en el tamaño y la composición de los sedimentos que la constituyen. La zona litoral experimenta procesos erosivos exponiendo sustratos rocosos, playas de pendientes fuertes y longitudes cortas, con escalones de tormenta, la mayoría de

las veces compuestas con materiales gruesos de arena y grava. Estos procesos erosivos que afectan al litoral ocurren en escalas de tiempo que varían desde instantes (horas) durante nortes y huracanes, hasta intervalos geológicos (miles o más años) como los asociados a cambios por variación en el nivel del mar. Estos procesos se clasifican en geológicos, hidrológicos, meteorológicos, oceanográficos, biológicos y antropogénicos. Todos ellos producen cambios en el nivel del mar, en la variación de aporte de sedimentos y en los cambios de energía causados por el oleaje y corrientes que modifican el ancho, profundidad, pendiente y forma de las playas. Estos procesos varían durante las diferentes épocas del año, siendo las de lluvias y nortes donde los cambios son más intensos, principalmente por la frecuencia e intensidad de las tormentas (PEMEX, 2008).

Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen hoteles, casas, restaurantes, etc., modificando las playas en su parte continental o supra playa, hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina o infra playa que modifican el transporte litoral y la morfología de la playa (Nava, *et al.*, 2018).

Los principales ecosistemas en Campeche son los manglares, en particular los manglares herbáceos. También está presente un área importante de Petenes, que son islas de vegetación arbórea, inmersas entre vegetación inundable. También hay bosque seco tropical bajo/medio, tierras de cultivo y zonas de pastizales. La población costera depende de estas áreas para su subsistencia y muchas actividades económicas importantes se basan en estos ecosistemas (Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, 2010). Los ecosistemas marinos están compuestos por parches de praderas de pastos marinos (Ayala-Pérez *et al.*, 2014) y por arrecifes coralinos que conforman el Banco de Campeche (Zarco-Perelló *et al.*, 2013).

Las actividades económicas más importantes en Campeche son la pesca, la agricultura y la apicultura, aunque la producción de petróleo y gas natural también es importante (Rivera-Arriaga y Villalobos-Zapata, 2001).

5.1. Localidades de estudio

Cada uno de los sitios de estudio seleccionados cuenta con sus propias actividades económicas, ecosistemas costeros, poblaciones e infraestructura. Estas áreas costeras se encuentran en la costa Norte, Central y Sur del estado, a saber, Isla Arena, Playa Bonita, Chenkán, Sabancuy, Playa Norte y Nuevo Campechito (Figura 8). Debido a sus distintas ubicaciones geográficas, las áreas están expuestas a diferentes procesos climáticos, incluidos vientos del norte, tormentas y huracanes.

Los sitios de estudio son representativos de diferentes tipos de procesos costeros y morfodinámicos y se describen a continuación:

5.1.1. Isla Arena

Isla Arena (20.70° N y -90.45° W) forma parte del municipio de Calkiní y se encuentra a 152 km de la ciudad de Campeche. Cuenta con un total de 753 habitantes. Su principal actividad económica es la pesca de crustáceos y moluscos. La playa está compuesta por sedimentos arenosos con parches de vegetación sumergida y la transparencia del agua varía en función de las condiciones de viento, oleaje y marea (SOPRAM, 2006). Se caracteriza por su diversidad de vegetación de duna, manglar, petenes, selva baja inundable, pastizal, selva baja caducifolia y vegetación subacuática (Figura 9).

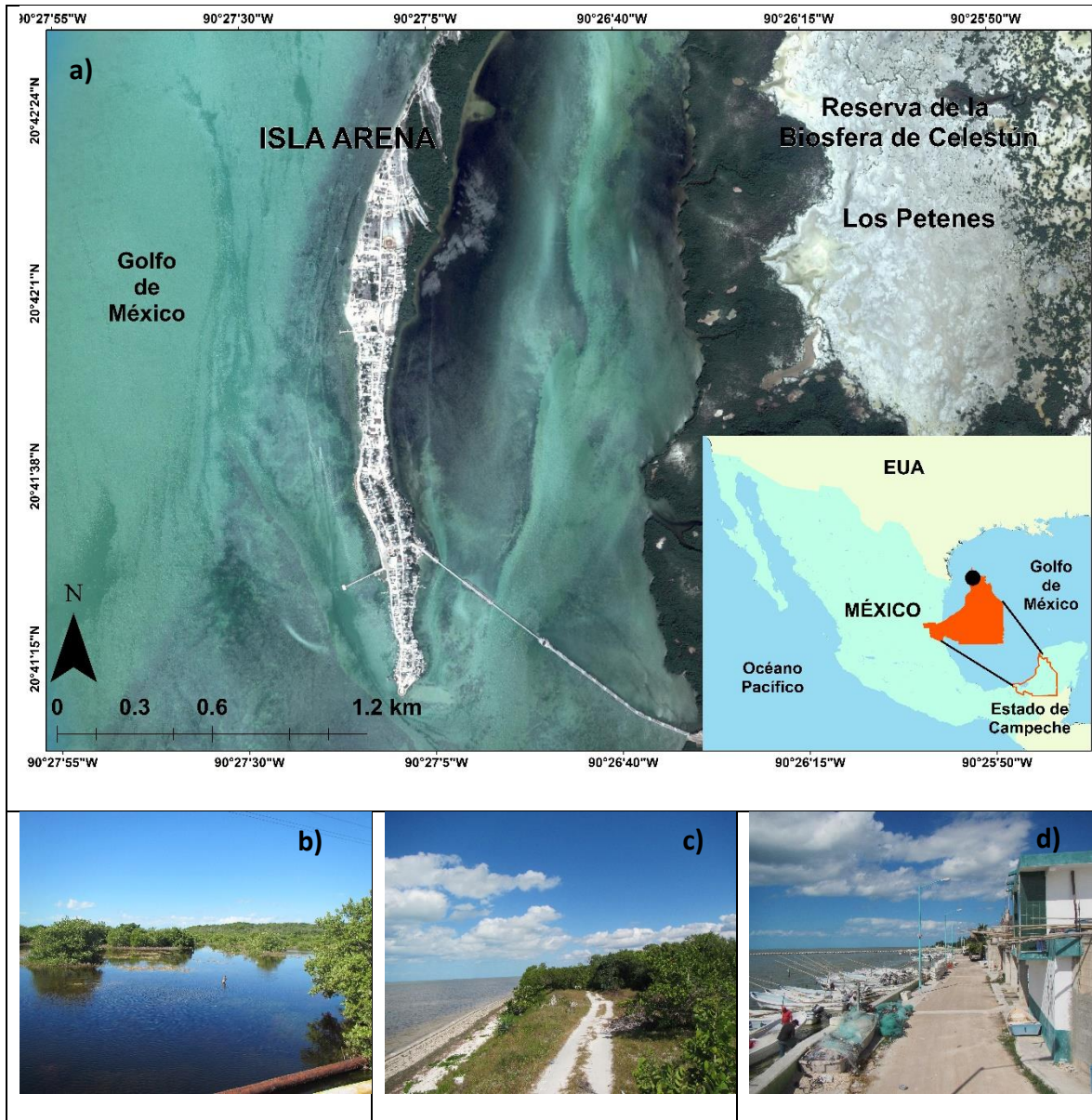


Figura 9. Isla Arena: a) Localización de la zona de estudio, b) Vista de humedales, c) litoral costero y vegetación y, d) Pescadores locales.

5.1.2. Playa Bonita

Playa Bonita (19.79° N y -90.62° W) se ubica en el municipio de Lerma, a 8 km de la ciudad de Campeche. Su población es de alrededor de 8 mil habitantes. Las principales actividades económicas aquí son el turismo, la pesca y el transporte de petróleo. La playa es predominantemente rocosa, con un fondo marino poco profundo y arenoso que contiene praderas de pastos marinos (Mateo-Cid *et al.*, 2013; Nava-Fuentes *et al.*, 2018). El principal tipo de vegetación es la selva tropical (Figura 10).

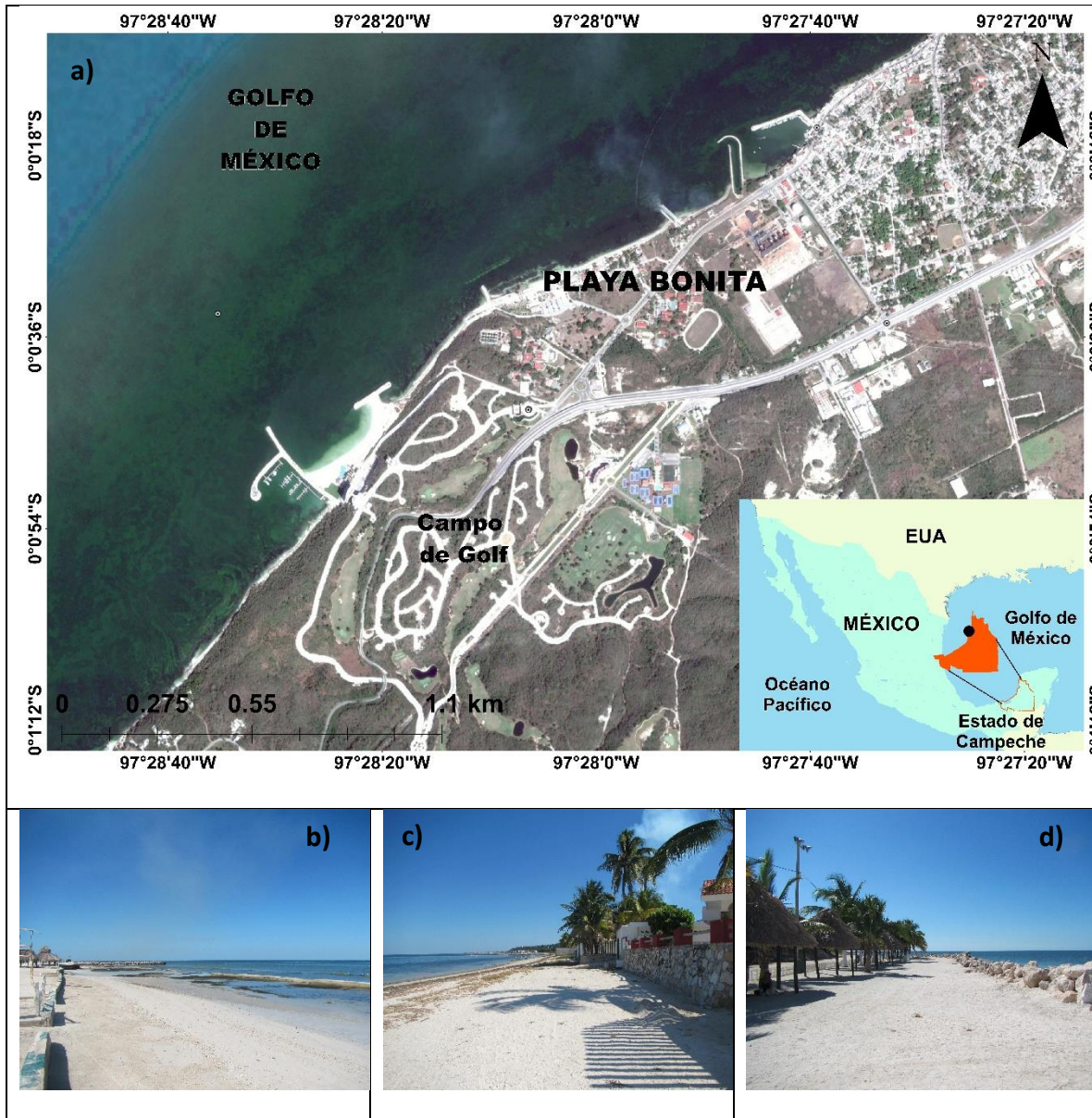


Figura 10. Playa Bonita: a) Localización de la zona de estudio; b) Estructura de límite para los bañistas, c) Litoral y zona urbana y, d) Palapas.

5.1.3. Chenkán

Chenkán (19.67° N y -90.92° W) está localizado en el municipio de Champotón, a 90 km de la ciudad de Campeche. Las playas son arenosas de baja-mediana energía (excepto en época de nortes que es alta), la playa tiene poca pendiente, aunque es accidentada y muy dinámica a través de todo el año (Guzmán-Hernández y Andrade, 1998). Esta localidad es un sitio RAMSAR debido a los grandes núcleos de diversidad biológica y por la presencia de zonas de anidación de tortugas. La cobertura del Sitio Ramsar se extiende al Noreste 12 km y al Suroeste 11 km. Por lo anterior, su población se reduce a 10 habitantes que se encargan del campamento tortuguero. Se caracteriza por grandes extensiones de manglares, sabana, tulares, popales, acahuales y selva tropical (Figura 11).

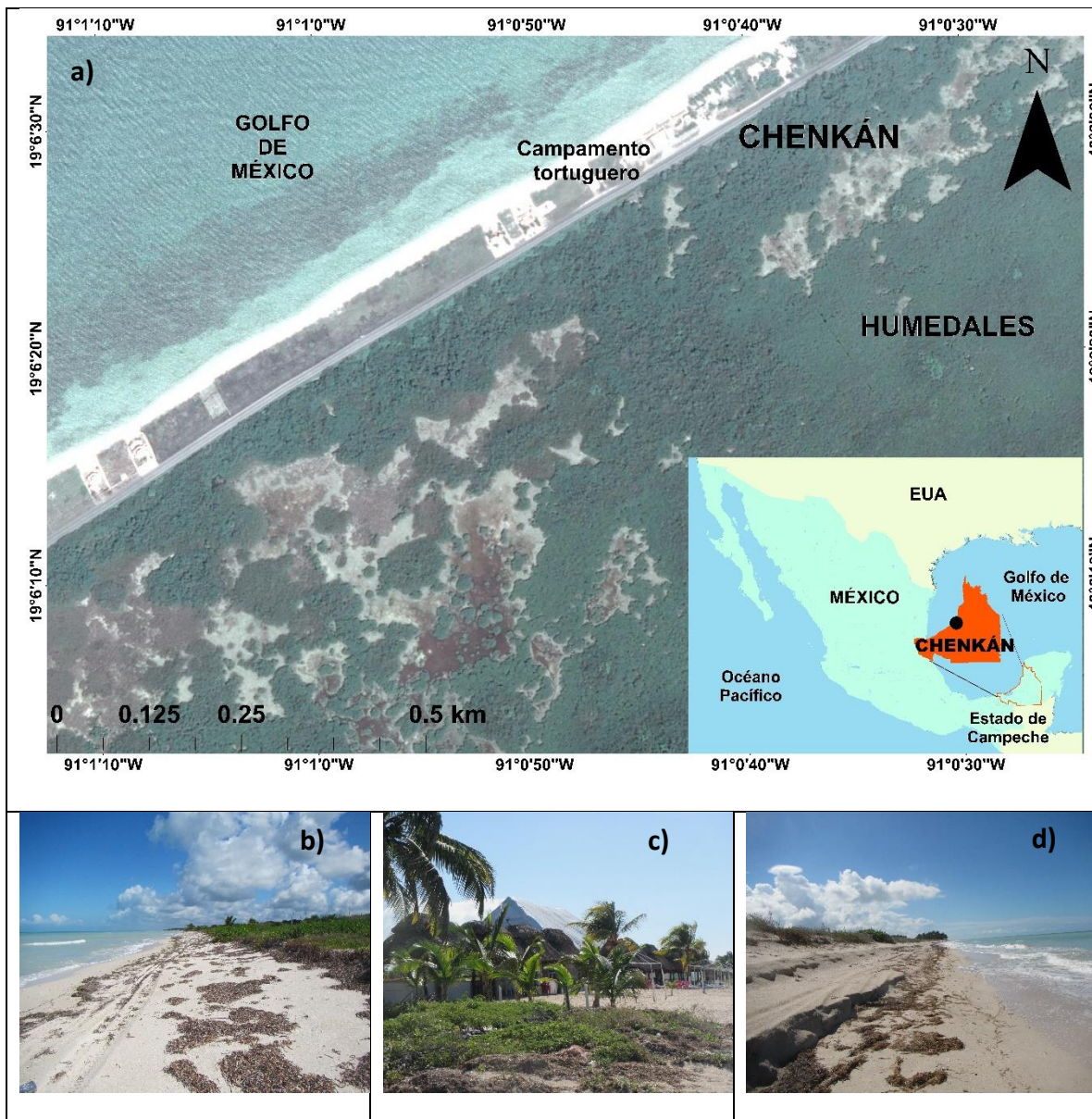


Figura 11. Chenkán: a) Localización de la zona de estudio; b) Litoral con vegetación predominantes, c) Campamento Tortuguero y, d) Perfiles de playa.

5.1.4. Sabancuy

Sabancuy (18.99° N y -91.18° W) se encuentra a 130 km al Sur de la ciudad de Campeche y tiene 7 mil habitantes que trabajan principalmente en la agricultura y la pesca. Se encuentra entre el Golfo de México y el estero de Sabancuy, que está ubicado en el extremo oriental de la Laguna de Términos. El estuario tiene una extensión de 470 km² y dos bocas: una conectada a las extensas llanuras aluviales de Laguna de Términos, y la segunda conectada a un canal artificial que fluye hacia una zona costera adyacente (Posada-Venegas *et al.*, 2013). El principal tipo de vegetación es el manglar, aunque también están presentes manglares herbáceos, algas marinas y bosques tropicales secos bajos y medios (Figura 12).

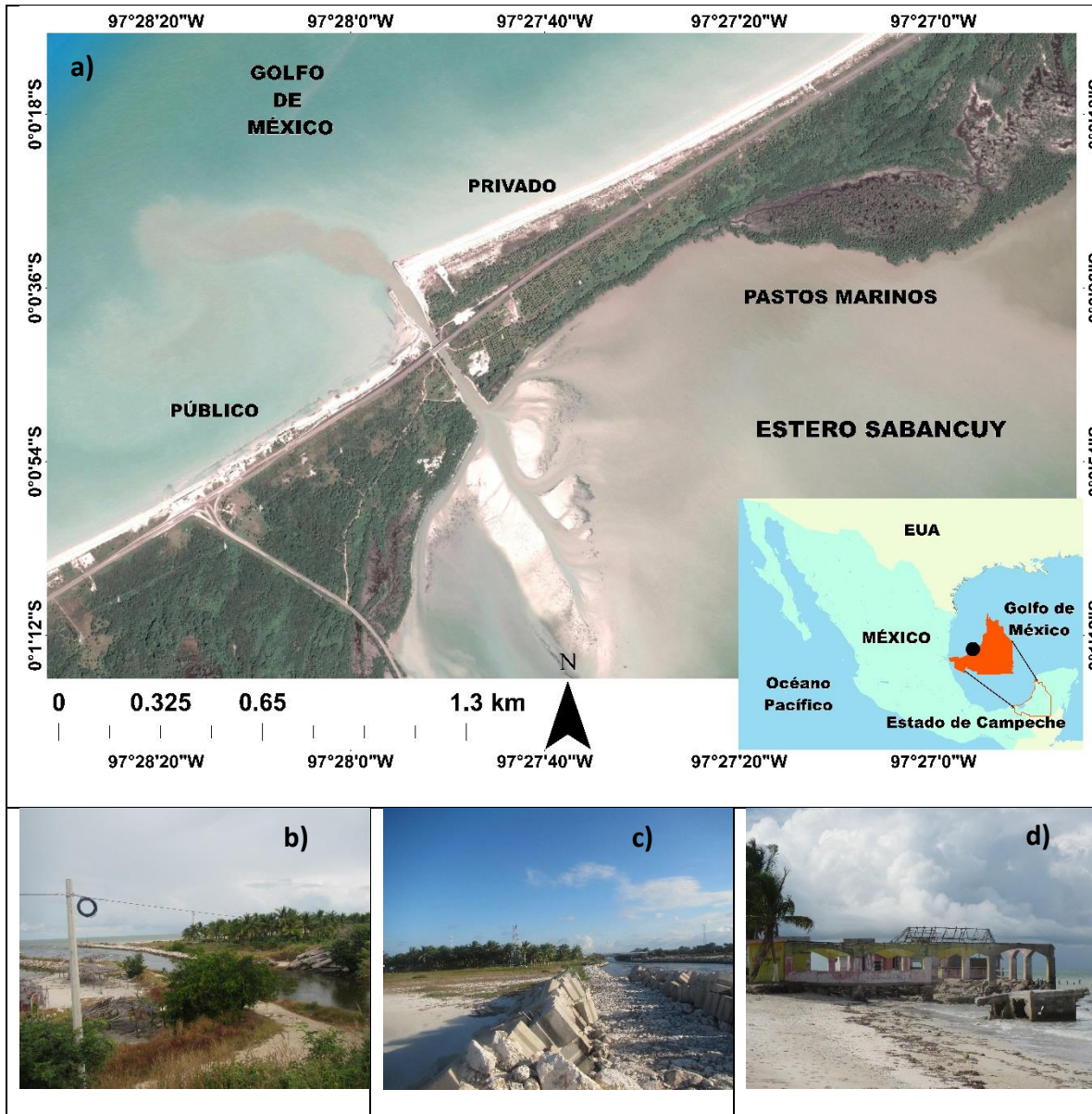


Figura 12. Sabancuy: a) Localización de la zona de estudio; b) Boca del estero Sabancuy, c) Escollera en la boca del estero y, d) Litoral costero.

5.1.5. Playa Norte

Playa Norte (18.66° N, -91.83° W) forma parte del municipio del Carmen en el estado de Campeche. Su población asciende los 610 habitantes. En Playa Norte se registran unos 82 establecimientos comerciales en operación y empresas dedicadas a la extracción de petróleo y sus derivados como principal actividad económica. Su litoral se considera de playas arenosas carbonatadas (Carranza-Edwards, 2015). La vegetación presente está constituida por manglar, tular, popal y selva (Figura 13).

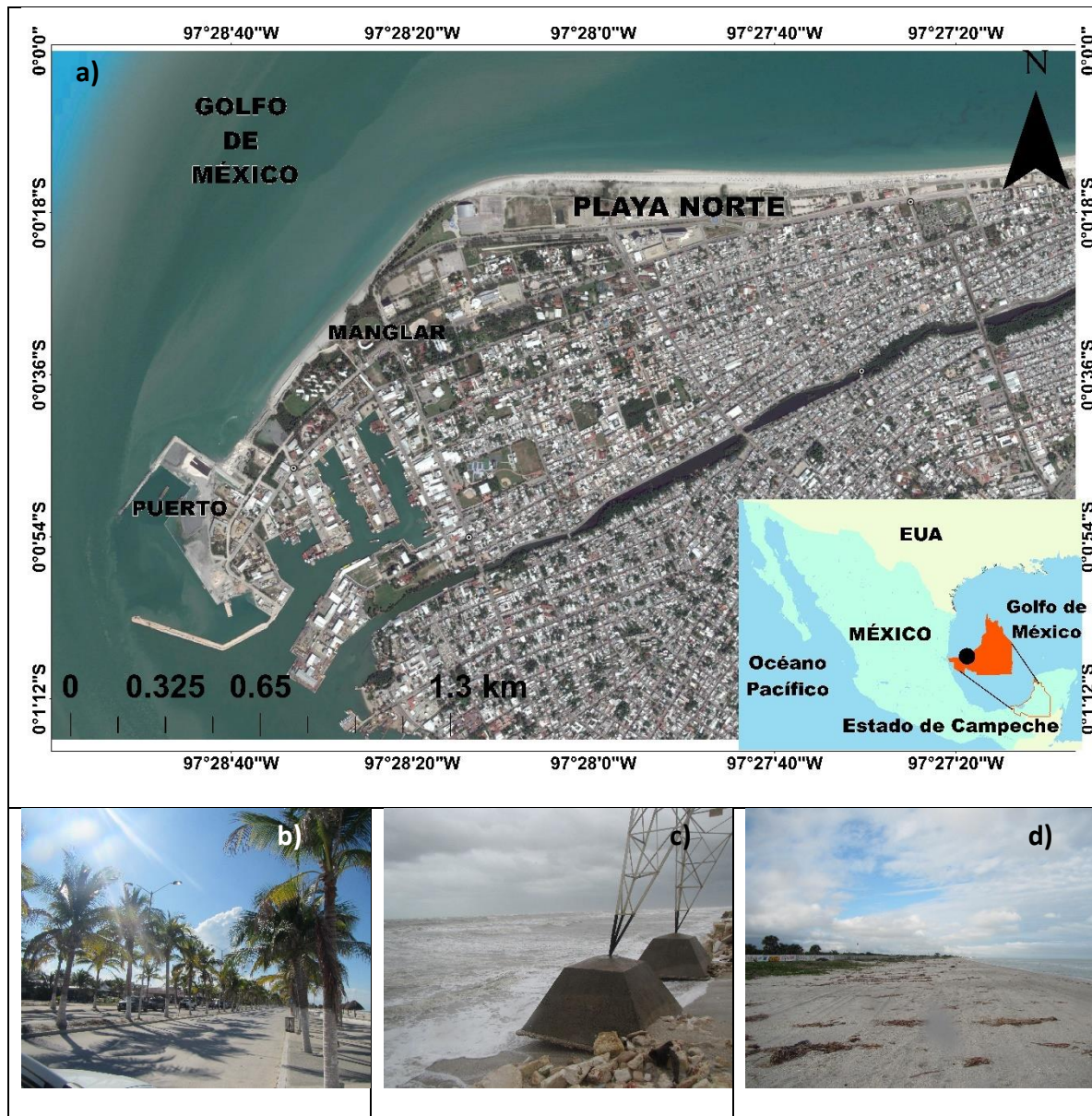


Figura 13. Playa Norte: a) Localización de la zona de estudio; b) Malecón, c) Infraestructura (líneas de luz eléctrica) y, d) Ancho de playa.

5.1.6. Nuevo Campechito

Nuevo Campechito (18.65° N y -92.45° W) se encuentra en la península de Atasta, a 250 km de la ciudad de Campeche, y limita al norte con el Golfo de México y al Sur con los ríos San Pedro y San Pablo. Nuevo Campechito tiene casi quinientos habitantes, la mayoría de los cuales trabajan en actividades pesqueras. Están presentes bosques secos tropicales bajos y medianos, pero los principales tipos de ecosistemas son manglares, marismas y humedales (Figura 14).

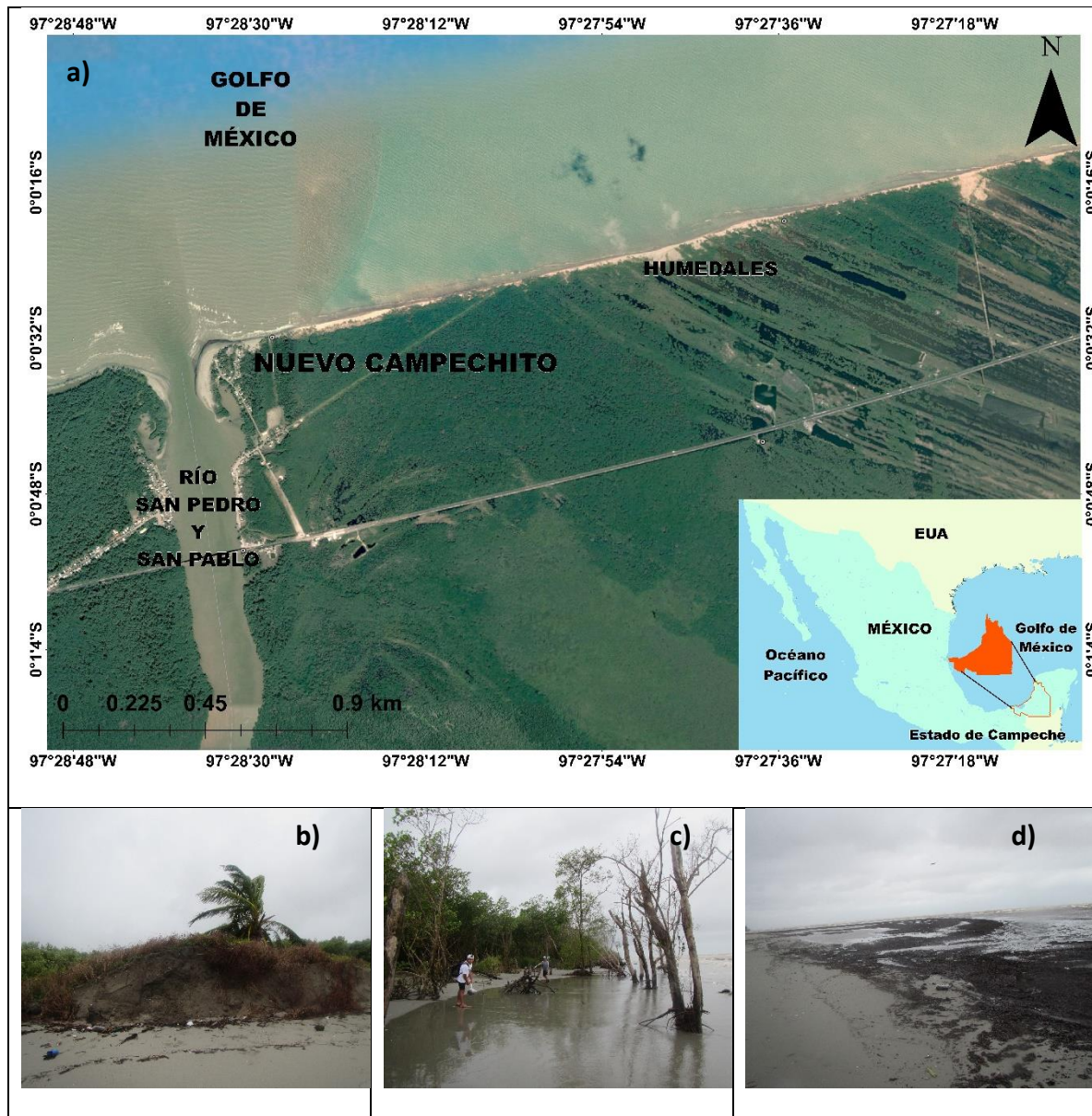


Figura 14. Nuevo Campechito: a) Localización de la zona de estudio; b) estado actual de la línea de costa, c) humedales bajo condiciones de norte y, d) residuos de procesos de petróleo en la zona marina.

6. MÉTODO

La metodología que se presenta es capaz de aplicarse a diferentes escalas para evaluar sitios donde se presenten fenómenos costeros como la opresión. La escala numérica resultante permite la valoración y evaluación de opresión costera en diferentes zonas geográficas.

No solamente es una herramienta en la toma de decisiones a nivel ecológico, sino que permite establecer los límites de desarrollo urbano e industrial dentro de la zona costera. Además, contribuye al ordenamiento territorial y natural de la zona. Así como también establece la importancia de los ecosistemas costeros, en este caso en el estado de Campeche, que ayuda a la toma de decisiones apropiadas para el uso y aprovechamiento de sus recursos con la mínima intervención posible.

La Figura 15 presenta un diagrama del procedimiento utilizado en este trabajo para la obtención de opresión costera aplicado a las costas del estado de Campeche.

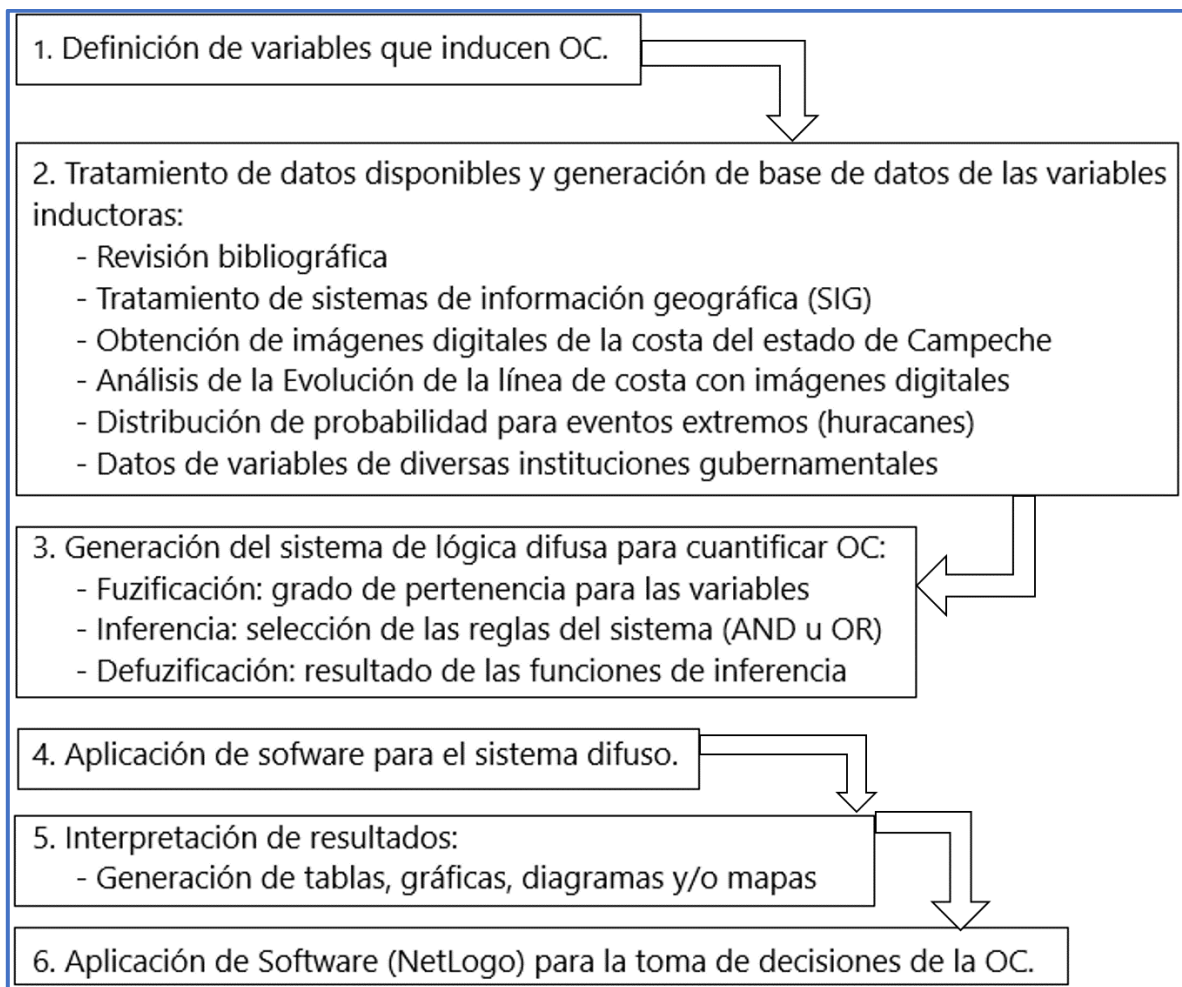


Figura 15. Diagrama de flujo para la elaboración del trabajo.

En los siguientes sub-capítulos se hará referencia a los métodos particulares y las herramientas que se utilizaron para este trabajo siguiendo el orden expuesto en el diagrama anterior.

6.1. Definición de variables que inducen Opresión Costera

El proceso de opresión costera está condicionado principalmente por el incremento del nivel medio del mar, sin embargo, la zona de estudio y en general la zona costera de México, no presenta graves perturbaciones por dicho incremento (Pérez y Linares, 2000; Vázquez, 2008). Debido a lo anterior, fue indispensable establecer nuevos elementos capaces de inducir opresión costera, sin dejar de lado a los registrados bibliográficamente. Además, su cuantificación debe ser aplicable para diferentes tipos de costa y desarrollar un modelo matemático que identifique la intensidad o peligro de opresión costera.

Es importante mencionar las variables que intervienen en el desarrollo de este proyecto con el fin de poder explicar la metodología utilizada para el tratamiento de cada una de ellas. La Tabla 1 enumera las variables que se identificaron mediante una investigación bibliográfica entre las que destacan: Defra, 2003 y 2005; Doody 2004 y 2013; Black y Veatch, 2006; English, 2006; Ponte 2013; Torio y Chmura 2013.

Tabla 1. Variables que inducen opresión costera.

| Criterio | Subcriterio | Variable | Datos | Fuente | Metodología | Unidades |
|---------------|-------------|-------------------------------|--|---|---|-------------------------|
| Tierra | Natural | Erosión | Imágenes Satélites | Google Earth | Torres <i>et al.</i> , 2010 | m ² |
| | Antrópica | Cambio de uso de suelo | Cartas de uso de suelo y vegetación | Datos vectoriales escala 1:250 000 serie V (Capa Unión) INEGI | Tratamiento de sistemas de información geográfica (SIG) | m ² |
| | | Desarrollo de infraestructura | Imágenes Satélites, Fotografías, Encuestas | Google Earth | Cuantificación mediante observaciones en las imágenes digitales | Número de edificaciones |
| | | Servicios | Carreteras, líneas de comunicación, torres de electricidad | Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA), SAGARPA, Licitaciones de la SCT, imágenes digitales | Generación de base de datos de MIAs disponibles en el sitio web de la SAGARPA, Generación de Sistemas de Información Geográfica | m |
| | | Vivienda | Total de viviendas | Censo de Población y Vivienda disponibles (INEGI) | INEGI. Metodología de Indicadores de la Serie Histórica Censal. 2016 | Número de viviendas |

| | | | | | | |
|-----|---------|--|--|--|---|----------------|
| | | Recreación | Sitios de recreación adaptados o construidos | MIA, imágenes digitales | Generación de base de datos de MIAs disponibles en el sitio web de la SAGARPA, Generación de Sistemas de Información Geográfica con los datos obtenidos | m |
| | | Erosión | Imágenes satelitales | Google Earth | Torres <i>et al.</i> , 2010 | m ² |
| Mar | Natural | Viento | Carta climática | Datos vectoriales escala 1:1 000 000, INEGI | Tratamiento de sistemas de información geográfica (SIG) mediante software adecuado | m/s |
| | | Mareas | Registro de mareas para la zona de estudio | Servicio Mareográfico Nacional. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. www.mareografico.unam.mx | Generación de las mareas astronómicas y de tormenta mediante el software Delf 3D | m |
| | | Atura, dirección y periodo del oleaje | Atlas de clima marítimo | Silva, R., Ruiz, G. Posada, G. Pérez, D. y Rivillas, G. Atlas de clima marítimo de la vertiente atlántica mexicana. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, 2008. | Extracción de datos del Atlas marítimo para la zona de estudio | m, grados, s |
| | | Periodo de retorno de eventos extremos | Base de datos | NOA, CONAGUA, CENECAM y CENAPRED | Extracción de datos | años |
| | | Incremento en el nivel medio del mar (Eústatico) | Diversas publicaciones | Registros históricos | Extracción de datos del incremento o decremento del nivel medio del mar | m |
| | | Evolución de la línea de costa | Imágenes satelitales | Google Earth | Comparación del desplazamiento de la línea de costa, medido la misma época del año | m ² |

La clasificación se realizó dividiendo la zona en tierra y mar y, posteriormente, se agregó una categoría de variables antrópicas y naturales. En las siguientes secciones se detalla cada una de las metodologías para cada una de las variables identificadas.

6.2. Tratamiento de datos disponibles y generación de bases de datos de las variables inductoras Opresión Costera

Las variables que intervienen en el proceso de opresión costera (OC) lo hacen con diferente intensidad, unidades de medida y escala de tiempo. Para la aplicación del sistema difuso

para cuantificar la OC en el estado de Campeche se utilizaron bases de datos de dependencias gubernamentales en lo que se refiere a ecosistemas costeros, infraestructura costera, censos de población y vivienda, así como Manifestaciones de Impacto Ambiental en la zona costera, y registros de eventos extremos que ocurrieron en la zona de estudio, entre otras.

A continuación, se enumeran las variables y se detalla la metodología utilizada para cada variable que induce opresión costera:

6.2.1. Tratamiento para variables de tierra de origen natural

➤ **Erosión:**

Se obtuvieron imágenes Satélites de Google Earth y se aplicó la metodología de Torres et al., 2010. El estudio comprende la reconstrucción histórica de la línea de costa del periodo 1974-2008, la determinación del desplazamiento de la línea de costa, el cálculo de la tasa de erosión para ese periodo y la modelación de escenarios de elevación del nivel mar.

La estimación de la tasa de erosión se realizó mediante el método de cálculo de áreas de referencia. Para cada imagen de un año determinado se marcó un polígono de referencia y se calculó el área continental (m^2) y la longitud de la línea de costa (m). Con fines de homogenización del análisis, todos los polígonos tuvieron un ancho aproximado de 10 km. Para conocer la tasa de erosión costera se calculó el desplazamiento de la línea de costa durante los periodos de observación de dos imágenes digitales de dos fechas diferentes (Año 1 y Año 2, i.e. 1974, 1986). Se utilizaron las siguientes ecuaciones (ANIDE, 2005):

$$\text{Desplazamiento de la línea de costa (m)} = \frac{\text{Área Cont}_2 - \text{Área Cont}_1}{\text{Longitud de costa}_2}$$

$$\text{Tasa de erosión costera (m/año)} = \frac{\text{Desplazamiento de la línea de costa}}{\text{Área Cont}_2 - \text{Área Cont}_1}$$

La utilización del método de áreas de referencia proporciona el valor promedio de desplazamiento de la línea de costa de toda la longitud comprendida dentro del polígono. Lo anterior permite cuantificar regionalmente el fenómeno de erosión/acreción eliminando valores puntuales. La secuencia de operaciones entre áreas da un resultado negativo para la erosión, mismo que se empleará para denotar la presencia de este fenómeno; el caso contrario, la acreción, tendrá signo positivo.

6.2.2. Tratamiento para variables de tierra de origen antrópico

➤ **Cambio de uso de suelo:**

Se utilizaron mapas de cambio de cobertura terrestre de las series I, II, III, IV y V (1997, 2001, 2005, 2009 y 2013, respectivamente) del INEGI a una escala de 1: 250,000 para evaluar

cambios en la extensión de manglares, humedales, tierras de cultivo y áreas urbanas. Las categorías de cobertura se reclasificaron para garantizar la comparabilidad entre los tipos de uso del suelo en las diferentes series. Las tasas de conversión se determinaron utilizando la siguiente ecuación (FAO, 1996):

$$x = 1 - S_1 - S_2 S_1^{1/n} - 1$$

Donde, x es la tasa de cambio, S_1 el área de la cubierta x en la fecha t_1 , S_2 el área de la cubierta x en los datos t_2 y n la diferencia en años entre las dos fechas (~4 años).

Autor: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Para el Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Fecha de publicación: 14-12-2017.

Nombre del producto: Uso de suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie VI (continuo nacional).

Formato de representación geográfica: Shapefile. Formato vectorial compuesto por 4 archivos (shp, shx, dbf, prj).

Acceso en línea:

http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml? httpcache=yes & xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl& indent=no

➤ **Desarrollo de infraestructura, servicios y recreación:**

La rigidización de la costa se determinó digitalizando toda la infraestructura construida paralela a la costa o ubicada en la costa (por ejemplo, estaciones de electricidad, antenas para comunicación, casas, puentes, carreteras), así como áreas recreativas (por ejemplo, palapas, piscinas, restaurantes, áreas para eventos sociales y culturales). Las imágenes de satélite de 2004, 2005, 2006, 2011, 2012, 2014 y 2015 se obtuvieron de Google Earth PRO para cada sitio de estudio. Finalmente, se calculó el área de cada elemento digitalizado y se comparó el área total ocupada por la infraestructura costera para las fechas estudiadas.

La base de datos de la SEMARNAT ofrece la consulta de documentos de las diversas Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) de las estructuras u obras que se realicen en la zona costera. Se consultaron MIA's relacionadas al estado de Campeche en la sección de Zona Federal (mares y costas), en la que la plataforma digital ofrece las opciones de concesión, construcción de obras, permiso transitorio y ambulante y terrenos ganados al mar. Todas las anteriores se consultaron y recopilamos en una base de datos que contiene

el nombre del proyecto, el lugar de la intervención, año, tipo de obra, dimensiones, fotografías y observaciones de la obra.

En la sección de la página web denominada *transitorio y ambulante*, se realizó un conteo de los servicios que se ofrecen en la zona costera centrados en venta y/o renta de equipo de recreación y sanitario. Con las imágenes satelitales del Google Earth se identificaron las líneas de energía eléctrica y telefonía sobre la zona costera, fueron cuantificados en cada zona de estudio para establecer la conexión entre tierra y zona marina.

Además, el programa Google Earth también se empleó para la cuantificación de las zonas de recreación por medio del trazo de polígonos en las zonas de interés complementando y validando la información con las concesiones para casas de descanso tipo playa y palapas en la zona costera que fueron extraídas de la base de datos de la SEMARNAT.

La base de datos se presenta en una tabla que en la sección de resultados y recopila cada una de las estructuras, desarrollo de infraestructura, tamaño de las zonas de recreación y servicios de energía eléctrica y comunicaciones que se concentra en la zona costera sujeta al análisis de opresión costera.

Autor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Acceso en línea:

<http://tramites.semarnat.gob.mx/index.php/consulta-tu-tramite>

➤ **Viviendas:**

La Red Nacional de Metadatos (RNM) es la herramienta implementada por el INEGI, como plataforma de difusión y consulta de los metadatos de los proyectos de información estadística básica; constituye un sistema de catalogación que permite a los usuarios realizar búsquedas y consultas generales sobre las operaciones estadísticas o específicas a nivel de variable de los proyectos estadísticos que han sido documentados de manera exhaustiva en la Iniciativa de Documentación de Datos (DDI).

Debido a que la información se encuentra almacenada por Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), se realizó un tratamiento de Sistema de Información Geográfica (SIG) en el programa ArcMap que consistió en la superposición de imágenes digitales obtenidas por Google Earth y la capa de cantidad de viviendas del INEGI. Una vez definidos los polígonos delimitados por las zonas de estudio, se extrajo la cantidad de viviendas que se encuentran en la zona costera. Los resultados se presentan en tablas del total de unidades de viviendas en cada zona de estudio con la cantidad de habitantes en cada una de ellas.

Autor: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Fecha de publicación: Versión 2 (07 de junio de 2011) Esta versión reemplaza la versión 1 (06 de junio de 2011), debido a la reedición de algunos conceptos.

Nombre del producto: Red Nacional de Metadatos. México - Censo de Población y Vivienda 2010. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO ESTADÍSTICO MEX-INEGI.40.201.01-CPV-2010

Metadatos: Iniciativa de Documentación de Datos (DDI por sus siglas en inglés)

Acceso en línea:

<http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/71/>

6.2.3. Tratamiento para variables de mar de origen natural

Debido al tipo de condiciones meteorológicas que se presentan en la zona costera del estado de Campeche, las variables viento, mareas y oleaje se desarrollaron bajo el criterio de épocas de secas (marzo-junio), lluvias (julio-octubre) y nortes (noviembre-febrero).

➤ **Viento:**

Los vientos provenientes del Noroeste son predominantes de octubre a febrero en el estado de Campeche. Los vientos de esta temporada, conocidos coloquialmente como *nortes*, se originan por el movimiento de masas de aire frío y seco provenientes de la porción continental de los Estados Unidos de América y Canadá, mismos que interactúan con las masas de aire marítimo tropical del Golfo de México. En los meses restantes, los vientos predominantes son del Nornoreste y Sureste (SEMAR, 2013).

Para la caracterización del viento por temporada climática se emplearon los datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), con los que se realizó el análisis estadístico de la dirección y magnitud de los vientos para las diferentes estaciones del año.

Se obtuvieron los registros en rosas de vientos y la probabilidad de excedencia. Es importante mencionar que los datos deben ser una serie continua para poder aplicar la función de membresía de cada variable.

Autor: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Climate Forecast System Reanalysis v2 (CFSRv2).

Acceso en línea: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00877>

➤ **Mareas:**

Se realizó la predicción de mareas para las zonas de estudio con el programa MAR V1.0. Los datos fueron extraídos de los datos históricos de las estaciones mareográficas. Se realizaron las gráficas y tablas correspondientes.

Autor: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Secretaria de Marina y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California (CICESE).

Acceso en línea: <http://predmar.cicese.mx/programa/>

➤ **Oleaje:**

Los datos de oleaje se obtuvieron del modelo de reanálisis WAVEWATCH III (WWIII, 2016), que es un modelo base física de generación y propagación de olas oceánicas de tercera generación, distribuido por la Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) de la National Center for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos.

Acceso en línea: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>

También se utilizaron los datos del Atlas de viento y oleaje del litoral mexicano (Silva, *et al.*, 2008). Los resultados se expresan en graficas de altura de ola y las rosas de oleaje para las zonas de estudio.

➤ **Eventos extremos:**

La ocurrencia, frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (huracanes, tormentas tropicales, vientos del norte, etc.) se determinaron con base en revisión bibliográfica que incluye fuentes grises como periódicos, informes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Centro Estatal de Emergencias de Campeche (CENECAM) publicados entre 1956 y 2015.

Los resultados son presentados en las tablas y graficas generadas con la información bibliográfica obtenida.

➤ **Incremento en el Nivel Medio del Mar:**

Los datos del incremento del nivel medio del mar (INMM) se obtuvieron de una investigación bibliográfica de diversos autores (Carbajal, 2010; Zavala, *et al.*, 2011; Ramos-Reyes, *et al.*, 2016; Caetano, 2010), que señalan un mínimo incremento en el nivel del mar para la zona de estudio.

➤ **Evolución de la línea de costa:**

Para este trabajo de investigación, la metodología para caracterizar la evolución de la línea de costa es la siguiente: la línea costera se digitalizó en ArcMap versión 10.2 (ESRI) usando las mediciones de Image © 2018 DigitalGlobe (Data SIO, NOAA, US, Navy, NGA, GEBCO, Image © 2018 TerraMetrics) de las zonas de estudio en los años 2005, 2006, 2010, 2014 y 2015. Después de la delimitación de la costa con imágenes tipo LIDAR, se realizó un análisis de cambio utilizando el Sistema Digital de Análisis de la Costa (DSAS), una extensión del software ArcGIS (ESRI) desarrollado por el Servicio Geológico de EE. UU. DSAS permite al usuario calcular las estadísticas de tasa de cambio de la costa a partir de una serie temporal de múltiples posiciones de la costa (Thieler *et al.*, 2017). Además, se generaron y tomaron muestras de las arenas en la zona de duna, lavado, sumergida antes y después de duna en los transectos perpendiculares a una línea base a un intervalo de 50 m de separación a lo largo de la costa. Los transectos a lo largo de la línea base establecida se utilizaron para calcular las estadísticas de la tasa de cambio, incluida la tasa de cambio anual media (metros por año).

6.3. Generación del Sistema Difuso para la cuantificación de Opresión Costera

Como ya se ha mencionado, la lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, así como para procesos fuertemente no lineales, y cuando se manejan definiciones y conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

El aspecto de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Se puede afirmar que, si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características principales de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no lineales y su base en el lenguaje natural.

Como ya se explicó en el capítulo anterior, el desarrollo de cualquier sistema difuso consta de cuatro partes fundamentales: la fuzificación de las variables de entrada, la evaluación de las reglas, la agregación de las salidas de las reglas y finalmente la defuzificación. Los pasos anteriores se refieren al método de inferencia para el desarrollo del sistema difuso que puede ser del tipo inferencia Mamdani o del tipo inferencia Takagi, Sugeno y Kang (TSK).

Para este proyecto se utilizó el método de Mamdani, porque se presta más a la representación de conocimiento experto. Además, permite describir el conocimiento

experto de una forma intuitiva. Este método consiste en tres bloques principales: el bloque difusor, el mecanismo de inferencia y el bloque desdifusor (Figura 16).

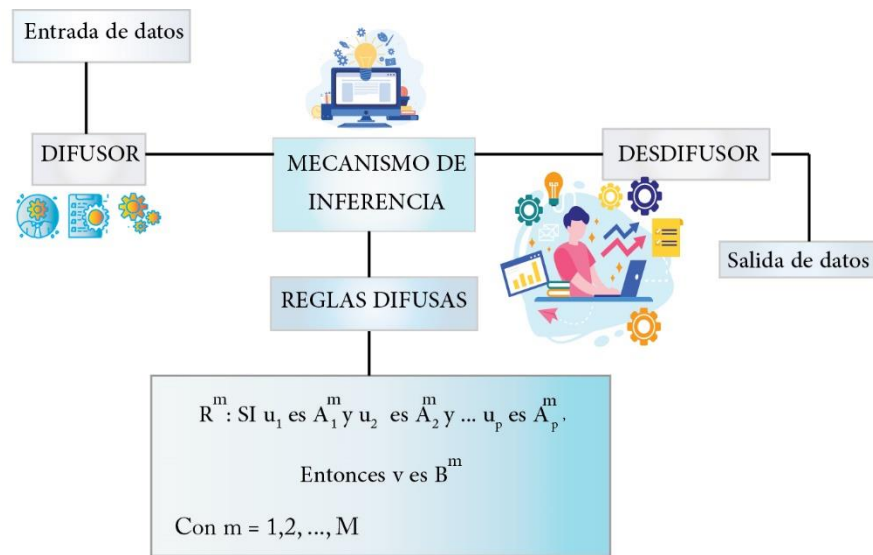


Figura 16. Diagrama de un sistema compuesto de lógica difusa.

- Bloque difusor: de acuerdo con el tratamiento que se realizó para cada una de las variables que inducen opresión costera, se asignó un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado, mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.
- Bloque de inferencia: método de inferencia por reglas de Mandani. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.
- Desdifusor: bloque en el cual a partir del conjunto difuso obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de desdifusión, se obtiene un valor concreto de la variable de salida, es decir, el resultado.

6.4. Cuantificación de Opresión Costera

La cuantificación de opresión costera en las áreas de estudio se determinó utilizando lógica difusa. Específicamente, mediante una función de pertenencia sigmoideal (FPS). La FPS se ha utilizado para describir la evolución de muchos procesos naturales (Włodzisław *et al.*, 2000; Kannan *et al.*, 2012; Satyendra *et al.*, 2012) y las curvas de aprendizaje de procesos naturales que muestran un tiempo progresión desde un nivel bajo en el comienzo hasta su clímax en un tiempo determinado. El cambio ocurre en una región caracterizada por una fuente de aceleración. En consecuencia, la FPS se consideró una función de membresía capaz de explicar la evolución de un fenómeno como la opresión costera.

De acuerdo con lo explicado en subtemas anteriores, la ecuación que se utilizó para este trabajo es la ecuación sigmoide por adaptarse al comportamiento de las variables que inducen opresión costera.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}}$$

Donde:

$\mu(x)$: variable de opresión costera

f_1 : propagación (desviación estándar de las variables)

f_2 : media aritmética

6.5. Software especializado en Lógica difusa para la cuantificación de Opresión Costera: Xfuzzy

Debido a la cantidad de variables y, por ende, la cantidad de datos es necesario el uso de software especializado en el desarrollo de funciones difusas para el tratamiento adecuado y resultado óptimo de la opresión costera en la zona de estudio. Para ello se ha seleccionado el software denominado Xfuzzy desarrollado por el Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM 2018) (Figura 17).

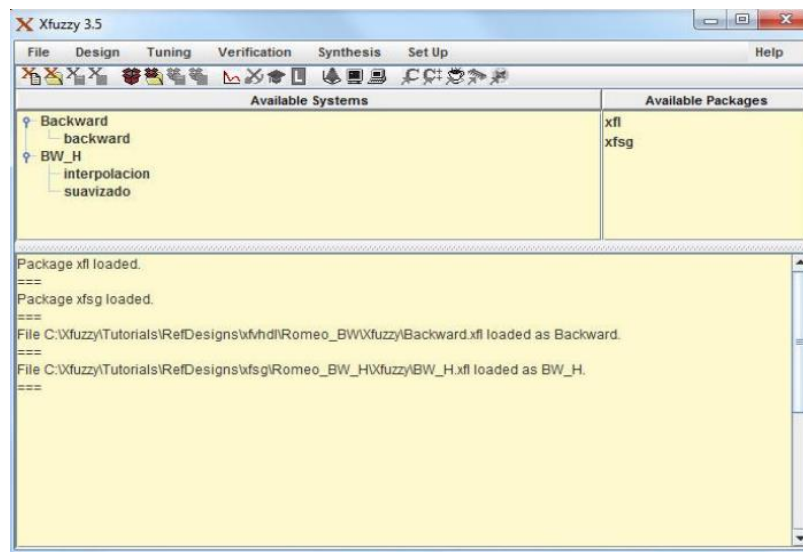


Figura 17. Interfaz del programa Xfuzzy, especial para sistemas de lógica difusa.

Xfuzzy 3 es un entorno de desarrollo para sistemas de inferencia basado en lógica difusa. Está formado por varias herramientas que cubren las diferentes etapas del proceso de diseño, desde su descripción inicial hasta la implementación final. Sus principales características son la capacidad para desarrollar sistemas complejos y la flexibilidad para

permitir al usuario extender el conjunto de funciones disponibles. El entorno ha sido completamente programado en Java, de forma que puede ser ejecutado sobre cualquier plataforma que tenga instalado el JRE (Java Runtime Environment). La Figura 18 muestra el flujo de diseño de Xfuzzy 3.

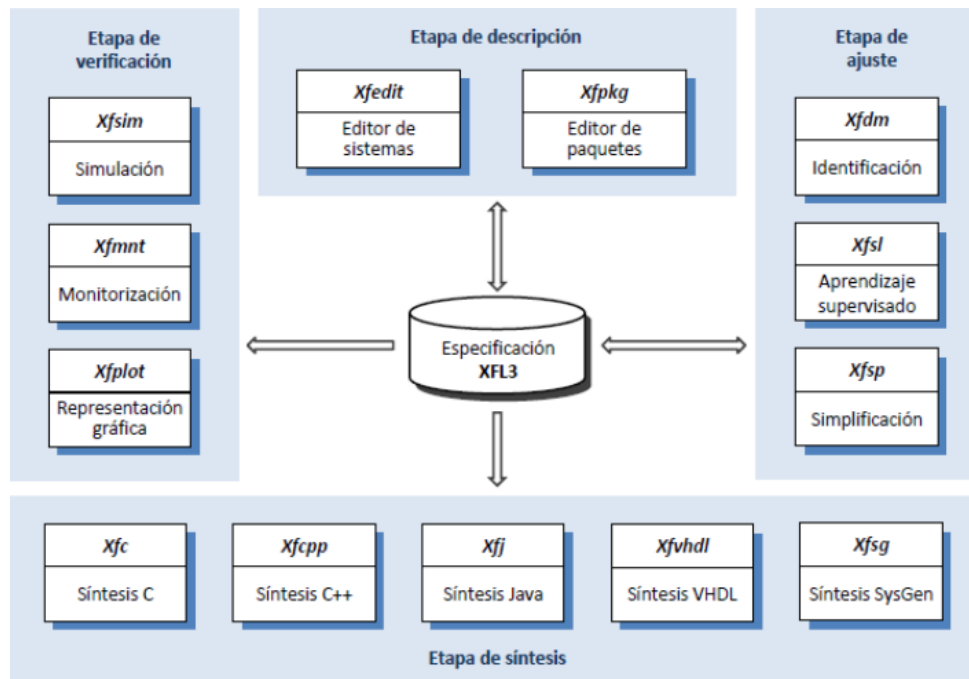


Figura 18. Flujo de diseño del Xfuzzy. Tomado de IMSE-CNM 2018

El primer paso en el desarrollo de un sistema difuso consiste en seleccionar una descripción preliminar del sistema (Figura 19). Esta descripción será posteriormente refinada como resultado de las etapas de ajuste y verificación.



Figura 19. Descripción del sistema difuso para la obtención de Opresión Costera en las costas del estado de Campeche.

Los pasos para obtener los resultados de opresión costera en Xfuzzy 3 se desarrollan mediante dos herramientas que facilitan la descripción de sistemas difusos: xfdedit y xfpkg. La primera está dedicada a la definición lógica del sistema, es decir, la definición de sus variables lingüísticas y las relaciones lógicas entre ellas (Figura 20).

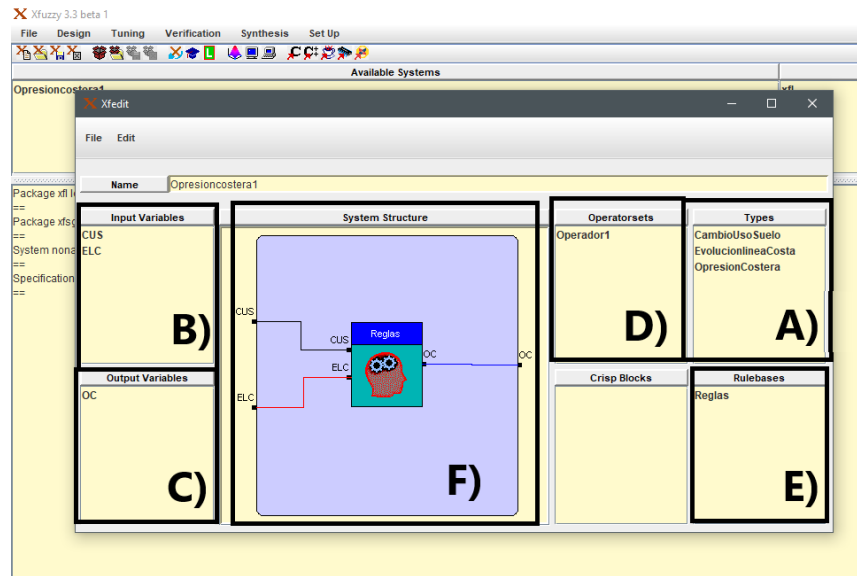


Figura 20. Esquema lógico del sistema difuso para la cuantificación de Opresión Costera: A) Introducción de variables lingüísticas y sus relaciones lógicas; B) Variables de entrada; C) Variables de salida, D) Operador del sistema (crisp); E) Asignación de las reglas difusas; F) Motor de inferencia.

Para la introducción de las variables se establecen las relaciones de lógica entre cada una de ellas y se procede a la asignación del tipo de función que se desea para la variable. El número funciones de membresía o grado de pertenencia se establece con el rango de valores máximo y mínimo de cada variable. Lo anterior se resume en las Figura 21, Figura 22 y Figura 23, utilizando como ejemplo la introducción de la variable “cambio de uso de suelo”, con un rango de cambio mínimo de 0 y máximo de 100, con cinco funciones de pertenencia: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, con un tipo de gráfica trapezoidal.

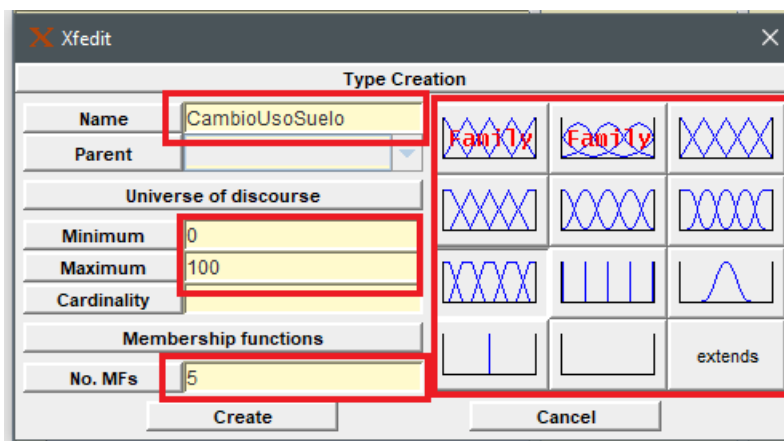


Figura 21. Introducción de la variable cambio de uso de suelo con valores mínimo y máximo, el número total de funciones de membresía y el tipo de gráfica que representa a la variable.

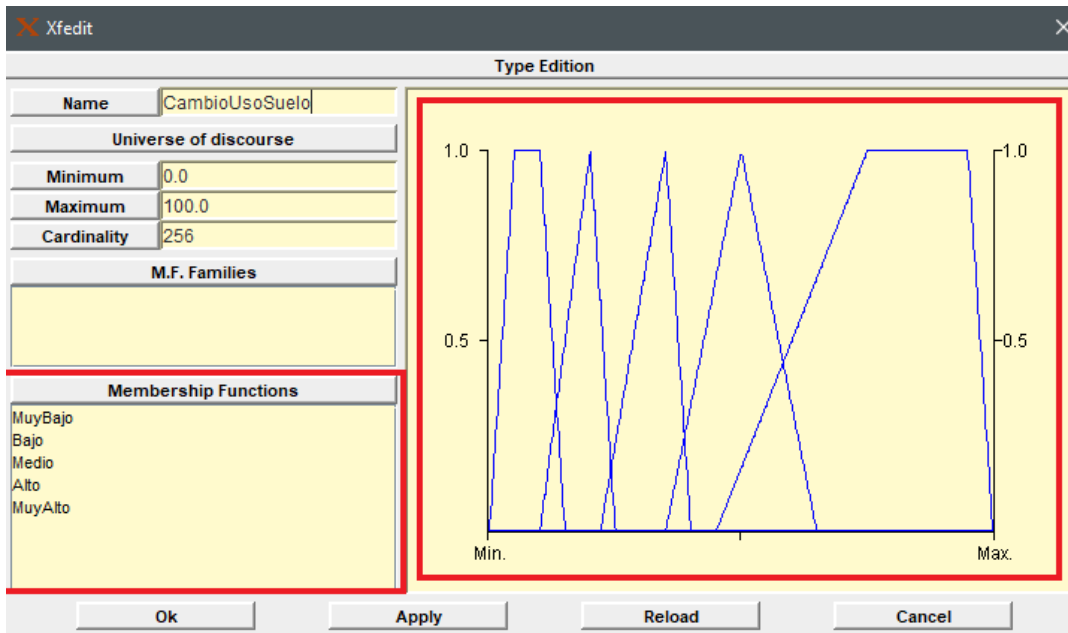


Figura 22. Funciones de membresía para la variable de entrada “cambio de uso de suelo” y el tipo de gráfico para su análisis.

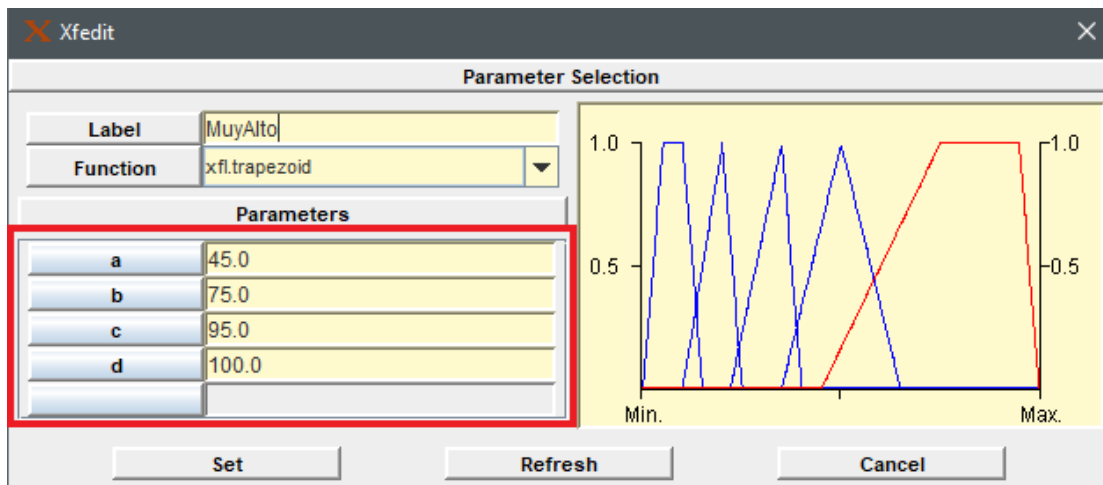


Figura 23. parámetros de referencia de las funciones de membresía.

Para los parámetros de las funciones de membresía expresados en la Figura 23, el proceso se explica en la Tabla 2, donde X representa el total de valores de la variable de estudio y finalmente 0.72 es el grado de pertenencia de la variable. A partir de este grado, las funciones de membresía son seleccionados para su procesamiento dentro del método de inferencia seleccionado. Este proceso fue repetitivo para cada una de las variables inductoras de opresión costera.

Tabla 2. Obtención del valor de pertenencia mediante la función sigmoide de lógica difusa.

| X | \bar{X} | $X - \bar{X}$ | $(X - \bar{X})^2$ | $\sum (X - \bar{X})^2$ | $\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{X - 1}$ | $\sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{X - 1}}$ | $\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^{f_1}}$ |
|---------|------------|---------------|-------------------|------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 0.00354 | 0.12310143 | -0.11955567 | 0.01429356 | 2.5186 | 0.07196161 | 0.26825662 | 0.72 |
| 0.00354 | | -0.11955471 | 0.01429333 | | | | |
| 0.00354 | | -0.11955471 | 0.01429333 | | | | |
| 0.00354 | | -0.11955474 | 0.01429334 | | | | |
| 0.00354 | | -0.11955464 | 0.01429331 | | | | |
| 0.00358 | | -0.11952092 | 0.01428525 | | | | |
| 0.08870 | | -0.03439657 | 0.00118312 | | | | |
| 0.65804 | | 0.53494359 | 0.28616464 | | | | |
| 0.78337 | | 0.66027761 | 0.43596652 | | | | |
| 0.78654 | | 0.66344001 | 0.44015265 | | | | |
| 0.7867 | | 0.66365707 | 0.4404407 | | | | |
| 0.86614 | | 0.74304379 | 0.55211407 | | | | |
| 0.0304 | | -0.09267133 | 0.00858798 | | | | |
| 0.05073 | | -0.07236694 | 0.00523697 | | | | |
| 0.05494 | | -0.06816096 | 0.00464592 | | | | |
| 0.05494 | | -0.06816102 | 0.00464592 | | | | |
| 0.05462 | | -0.06847514 | 0.00468884 | | | | |
| 0.08449 | | -0.03860509 | 0.00149035 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.01704 | | -0.10605978 | 0.01124868 | | | | |
| 0.01704 | | -0.10605871 | 0.01124845 | | | | |
| 0.01910 | | -0.10399562 | 0.01081509 | | | | |
| 0.01910 | | -0.10399561 | 0.01081509 | | | | |
| 0.01910 | | -0.10399629 | 0.01081523 | | | | |
| 0.01919 | | -0.10390644 | 0.01079655 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |
| 0.0001 | | -0.12310143 | 0.01515396 | | | | |

Por otra parte, la herramienta xfpkg facilita la descripción de las funciones matemáticas asignadas a los operadores difusos, los modificadores lingüísticos, las funciones de pertenencia y los métodos de defuzzificación. En la Figura 24A se observa la selección del operador difuso *and* (mínimo) y el operador *or* (máximo); el método de defuzzificación seleccionado es el de *centroide*. La Figura 24B muestra la matriz de las reglas difusas mediante el método de defuzzificación centroide con la finalidad de asignar una variable de salida para este caso el de opresión costera de manera lingüística después de la interacción de las dos variables sometidas. Este último proceso se realizó para cada una de las variables inductoras del sistema difuso desarrollado.

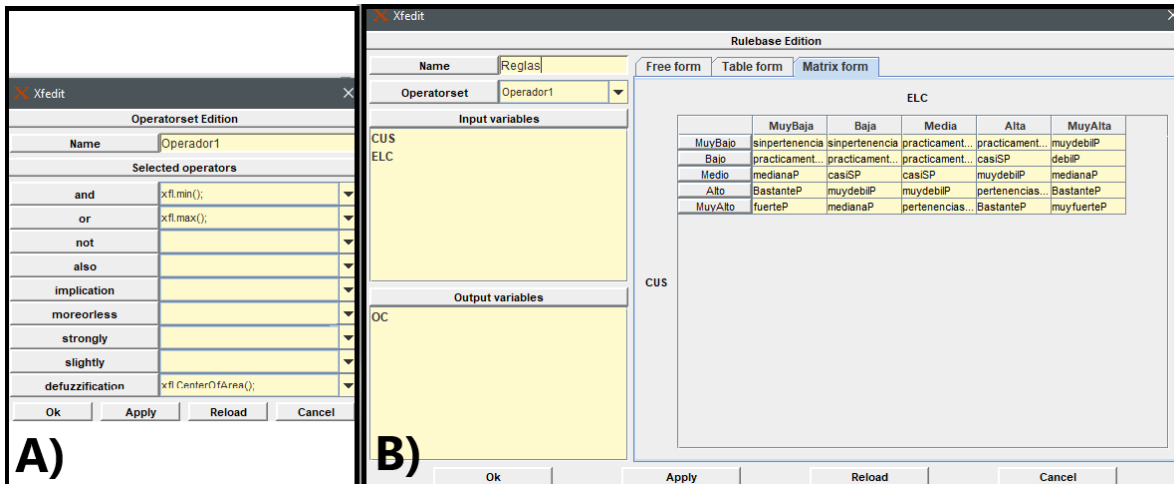


Figura 24. A) Conectores lógicos y selección del tipo de defuzzificación. B) Agregación de las salidas de las reglas del sistema.

La etapa de verificación en el proceso de diseño de sistemas difusos facilita el estudio del comportamiento del sistema difuso bajo desarrollo. El objetivo de dicho estudio es detectar las posibles desviaciones frente al comportamiento esperado e identificar las causas de estas desviaciones.

El entorno Xfuzzy cubre la etapa de verificación con tres herramientas. La primera de ellas es xplot, que muestra el comportamiento entrada/salida del sistema mediante una gráfica bidimensional o tridimensional (Figura 25). La herramienta de monitorización, xfmt, muestra los grados de activación de las distintas reglas y variables lingüísticas, así como los valores de las diferentes variables internas, para un conjunto dado de entradas (Figura 26). Por último, la herramienta xfsim está dirigida hacia la simulación del sistema dentro de su entorno de operación (real o modelado), permitiendo ilustrar la evolución del sistema mediante representaciones gráficas de las variables seleccionadas por el usuario (Figura 27).

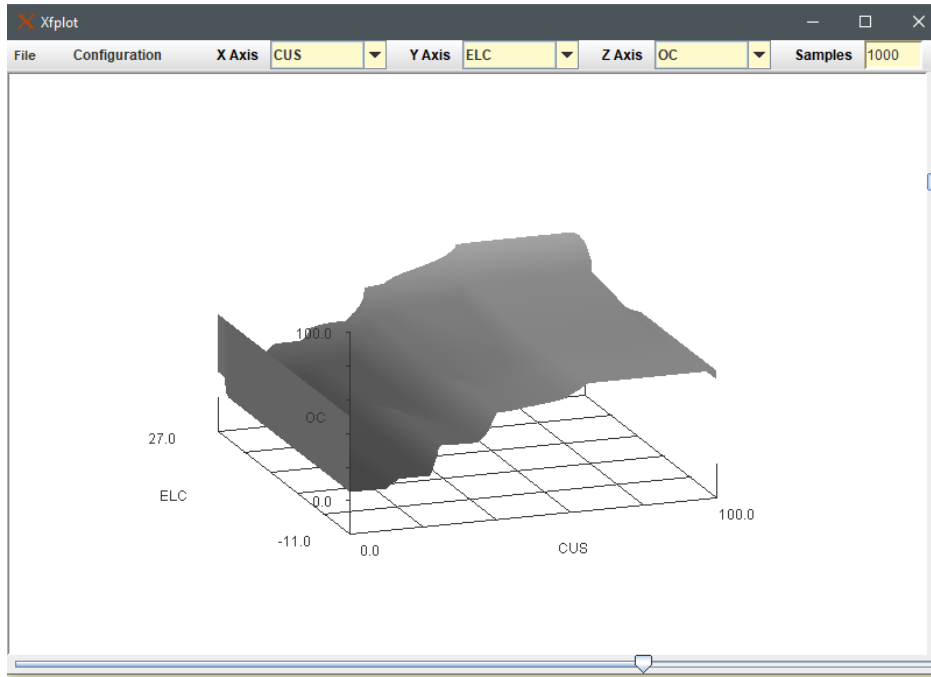


Figura 25. Herramienta xplot, que muestra el comportamiento entrada/salida del sistema mediante una gráfica tridimensional.

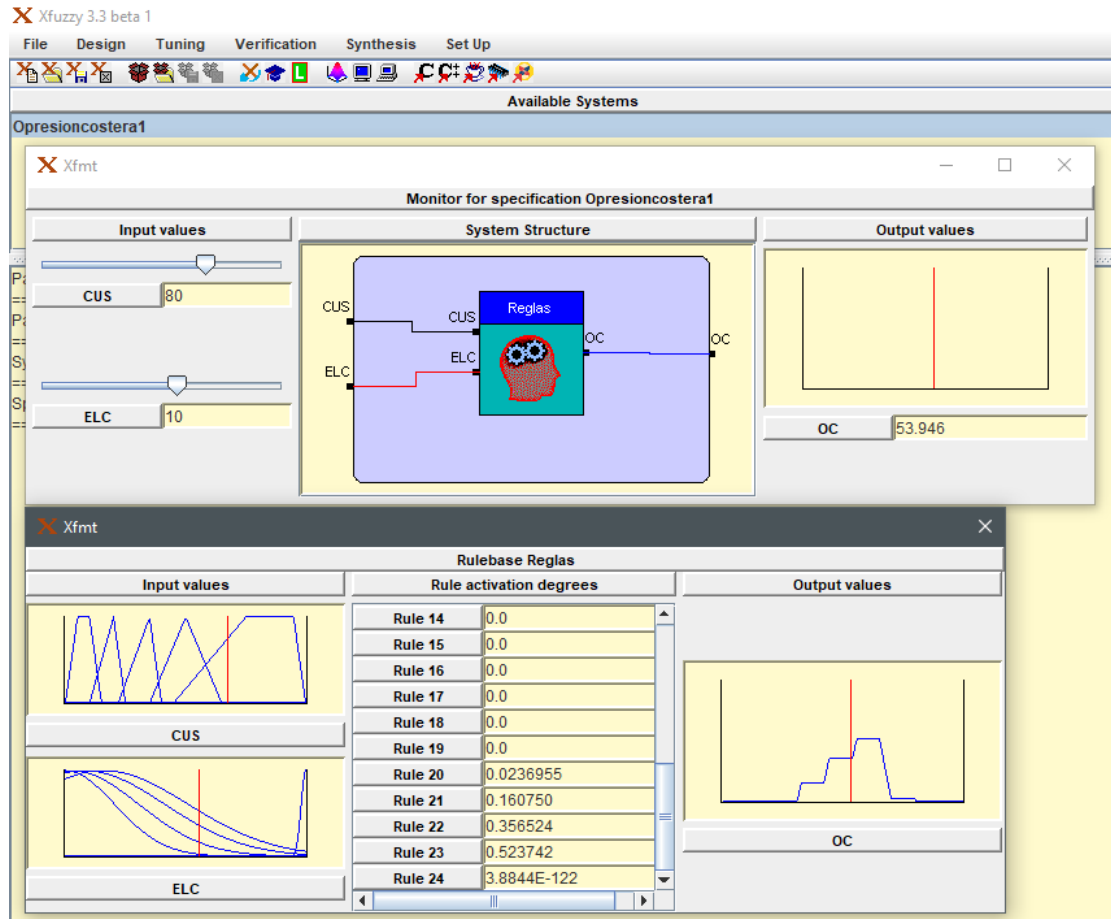


Figura 26. Herramienta de monitorización xfmt, muestra los grados de activación de las distintas reglas y variables lingüísticas, así como los valores de las diferentes variables internas, para un conjunto dado de entradas.

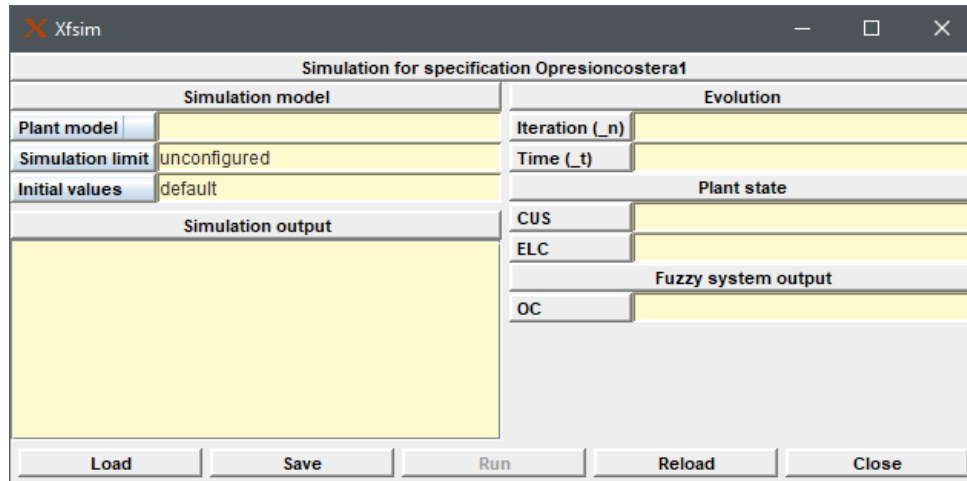


Figura 27. Herramienta xfsim dirigida a la simulación del sistema dentro de su entorno de operación.

Los procesos de identificación y ajuste constituyen habitualmente las tareas más complejas en el diseño de sistemas difusos. El comportamiento de un sistema depende de la estructura lógica de sus bases de reglas y de las funciones de pertenencia de sus variables lingüísticas.

El proceso de identificación tiene por objetivo determinar la estructura del sistema, mientras que el proceso de ajuste suele dirigirse normalmente a modificar los diferentes parámetros de las funciones de pertenencia que aparecen en la definición del sistema. Ya que el número de casos que deben ser considerados para extraer las reglas y el número de parámetros que deben ser modificados simultáneamente suele ser elevado, un proceso de identificación o ajuste manual resultaría claramente incómodo por lo que se requiere el uso de técnicas automáticas.

El entorno Xfuzzy 3 incluye cuatro herramientas para esta etapa de diseño. xfdm y xftsp son herramientas de adquisición de conocimiento. La primera permite obtener la estructura de sistemas de inferencia utilizados como aproximadores o clasificadores difusos, mientras que la segunda está especialmente enfocada a la predicción de series temporales. xfsi es una herramienta de ajuste de parámetros basada en el uso de algoritmos de aprendizaje supervisado. En las técnicas de aprendizaje supervisado el comportamiento deseado del sistema es descrito mediante un conjunto de patrones de entrenamiento (y de prueba). El aprendizaje supervisado intenta minimizar una función de error que evalúa la diferencia entre el comportamiento actual del sistema y el comportamiento deseado definido mediante el conjunto de patrones de entrada/salida. Por último, xfsp es una herramienta de simplificación que permite reducir el número de funciones de pertenencia y compactar las bases de reglas de un sistema difuso para facilitar su implementación software o hardware e incrementar su interpretabilidad lingüística.

La metodología a detalle para la obtención de los resultados se puede consultar en línea en: http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.5/Xfuzzy3.5_sp.pdf

6.6. Software para la Toma de Decisiones: NetLogo

Las decisiones que intervienen en el manejo de la zona costera se ven modificadas por los riesgos presentes en dichas zonas, por lo que las decisiones hechas para su óptimo funcionamiento se toman a escala internacional, nacional, regional y local dependiendo del caso. La mayoría de estos procesos de toma de decisión están ligados a la evaluación del desarrollo y la ordenación (actual o futura) de la costa. En general, los principios y los reglamentos se interpretan y promulgan desde el nivel internacional hasta el local. La evaluación de la gobernanza cada vez se aplica más al sector de la ordenación territorial. En el caso de los riesgos costeros, los responsables de la gobernanza deberían recibir las recomendaciones adecuadas y tomar en consideración los riesgos identificados. Cuando la legislación resulte importante al momento de tomar en cuenta un riesgo costero, el ícono que se mostrará junto al texto en la presente guía indica el riesgo que se debería considerar cuando se implementen programas legislativos o puede dar información relacionada con el riesgo al responsable de tomar decisiones (Quintero, 2016).

De acuerdo con lo anterior, y una vez que se muestran los resultados para la zona de estudio con respecto a la opresión costera, se adicionó el proceso de toma de decisiones. Este último con la finalidad de crear herramientas para ordenamientos actuales y futuros. Además de que resulta una herramienta indispensable para establecer el balance de factores bióticos y abióticos de las zonas costeras. Para esto se utilizó el software NetLogo (Sancho-Caparrini, 2019) (Figura 28).

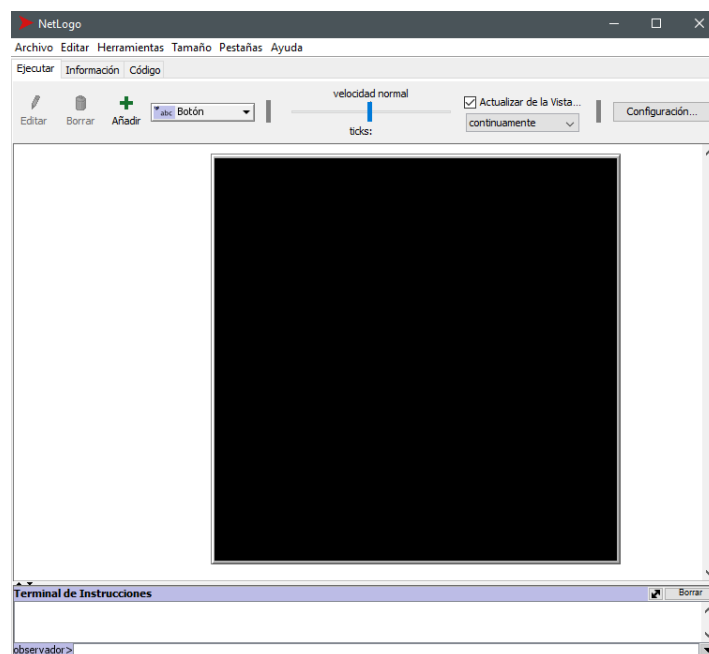


Figura 28. Interfaz del software NetLogo.

Los insumos necesarios para obtener resultados en Net Logo fueron las variables inductoras de opresión costera. De acuerdo con el grado de pertenencia de cada una de las variables se realizaron consideraciones de combinación e interacción en tiempo y múltiples variables para determinar escenarios posibles en las zonas costeras. El modelo simula los escenarios y a partir de ellos, la toma de decisiones corresponde a las acciones recomendadas por expertos y a casos de estudio que hayan sido exitosos y que sean aplicables a la zona de estudio.

NetLogo es un entorno programable para simular fenómenos naturales y sociales (Wilensky, 1999). Es especialmente adecuado para modelar sistemas complejos que se desarrollan con el tiempo. Los modeladores pueden dar instrucciones a cientos o miles de agentes que operan independientemente. Esto permite explorar la conexión entre el comportamiento a nivel micro de los individuos y los patrones de nivel macro que surgen (emergen) de su interacción.

NetLogo es adecuado para modelar centenares o miles de individuos (personas, bacterias, insectos, organizaciones, nodos de un grafo, etc.) que interactúan entre sí y con el entorno, también permite explorar la conexión entre las interacciones locales a nivel de individuo y los patrones macroscópicos que emergen de dichas interacciones.

Es también un ambiente de programación sencillo de usar para crear y probar nuevos modelos ya que permite abrir y experimentar simulaciones, así como crear modelos en poco tiempo para comprobar hipótesis sobre sistemas descentralizados. Viene con una gran biblioteca de simulaciones en ciencias naturales y sociales, que pueden ser usadas y modificadas a consideración del usuario. Los modelos se construyen usando un lenguaje muy simple, que incluso es adecuado como primer lenguaje de programación, y que tiene inspiración en el paradigma funcional/declarativo. Posee una interfaz gráfica intuitiva y fácil de usar.

A pesar de todas las ventajas, debe tenerse presente que el objetivo de NetLogo es proporcionar una herramienta de prototipado y desarrollo rápido de modelos de simulación, no de aplicaciones finales.

Para mayor detalle consultar:

<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/resources/Que%20es%20NetLogo.pdf>

7. RESULTADOS

Una vez aplicados los tratamientos adecuados a las variables que inducen opresión costera y, en consecuencia, la aplicación de lógica difusa para su cuantificación se procedió a transformar de manera gráfica los resultados obtenidos.

En este apartado se presentan tablas, gráficas, diagramas y mapas que ayudan a comprender la evolución, comportamiento y presencia del fenómeno de opresión costera en la zona de estudio. Es importante destacar que la metodología empleada en este trabajo es aplicable a diferentes zonas y las variables pueden elegirse a conveniencia del experto ya que dependen de la escala temporal y espacial de la zona de estudio.

De igual manera se presentan los resultados obtenidos con el programa NetLogo para la toma de decisiones.

7.1. Variables que inducen Opresión Costera

En la Tabla 3 se presentan las variables que se identificaron como las inductoras al proceso de opresión costera, mismas que se sometieron a mediciones (difusas) para su cuantificación y para el conocimiento del grado de perturbación a los ecosistemas costeros mediante un índice de opresión costera. Posteriormente, se describe de manera resumida cada una de ellas y el uso que se le dio en este estudio.

Es importante mencionar que la información recabada fue verificada en campo en fechas establecidas del 5 de noviembre al 20 de diciembre del año 2017. Con lo anterior se caracterizaron los transectos prioritarios para clasificar el estado de opresión costera como *mínimo* o que aún no se presenta el fenómeno, medio o en proceso de desarrollo y *máximo*, es decir que el ecosistema se encuentra completamente extinto.

Tabla 3. Variables que inducen opresión costera.

| Criterio | Subcriterio | Variable | Datos | Fuente | Metodología | Unidades |
|----------|-------------|-------------------------------|--|---|---|-------------------------|
| Tierra | Natural | Erosión | Imágenes Satélites | Google Earth | Torres <i>et al.</i> , 2010 | m ² |
| | Antrópica | Cambio de uso de suelo | Cartas de uso de suelo y vegetación | Datos vectoriales escala 1:250 000 serie V (Capa Unión) INEGI | Tratamiento de sistemas de información geográfica (SIG) | m ² |
| | | Desarrollo de infraestructura | Imágenes Satélites, Fotografías, Encuestas | Google Earth | Cuantificación mediante observaciones en las imágenes digitales | Número de edificaciones |
| | | Servicios | Carreteras, líneas de comunicación, torres de electricidad | Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA), SAGARPA, Licitaciones de la SCT, imágenes digitales | Generación de base de datos de MIAs disponibles en el sitio web de la SAGARPA, Generación de Sistemas de Información Geográfica | m |

| | | | | | | |
|------------|---------|--|--|--|---|---------------------|
| | | Vivienda | Total de viviendas | Censo de Población y Vivienda disponibles (INEGI) | INEGI. Metodología de Indicadores de la Serie Histórica Censal. 2016 | Número de viviendas |
| | | Recreación | Sitios de recreación adaptados o construidos | MIA, imágenes digitales | Generación de base de datos de MIAs disponibles en el sitio web de la SAGARPA, Generación de Sistemas de Información Geográfica con los datos obtenidos | m |
| | | Erosión | Imágenes satelitales | Google Earth | Torres <i>et al.</i> , 2010 | m ² |
| Mar | Natural | Viento | Carta climática | Datos vectoriales escala 1:1 000 000, INEGI | Tratamiento de sistemas de información geográfica (SIG) mediante software adecuado | m/s |
| | | Mareas | Registro de mareas para la zona de estudio | Servicio Mareográfico Nacional. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. www.mareografico.unam.mx | Generación de las mareas astronómicas y de tormenta mediante el software Delf 3D | m |
| | | Atura, dirección y periodo del oleaje | Atlas de clima marítimo | Silva, R., Ruiz, G. Posada, G. Pérez, D. y Rivillas, G. Atlas de clima marítimo de la vertiente atlántica mexicana. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, 2008. | Extracción de datos del Atlas marítimo para la zona de estudio | m, grados, s |
| | | Periodo de retorno de eventos extremos | Base de datos | NOA, CONAGUA, CENECAM y CENAPRED | Extracción de datos | años |
| | | Incremento en el nivel medio del mar (Eústatico) | Diversas publicaciones | Registros históricos | Extracción de datos del incremento o decremento del nivel medio del mar | m |
| | | Evolución de la línea de costa | Imágenes satelitales | Google Earth | Comparación del desplazamiento de la línea de costa, medido la misma época del año | m ² |

7.1.1. Erosión

El estado de Campeche se caracteriza por la existencia de tres estaciones climáticas a lo largo del año. De marzo a julio se considera como época de secas, de agosto a octubre es la época de lluvias y de noviembre a febrero es la época de nortes. En las temporadas de lluvias y la de nortes se presentan los mayores de erosión en las playas campechanas, mientras que en temporada de secas la zona costera se recupera e la pérdida de sedimentos

ocurrido en estaciones anteriores. Este proceso se considera la dinámica natural y ocurre cada año. Sin embargo, la construcción inadecuada de estructuras de protección costera y el crecimiento de actividades antrópicas provoca una erosión crónica.

De los sitios analizados solamente dos presentan zonas de erosión: Sabancuy y Playa Norte. Debido a esto, en el cálculo de opresión costera sólo fueron consideradas estas zonas afectadas por erosión.

Sabancuy

Sabancuy cuenta con más de 80 m de acreción y 30 m de erosión debido a una estructura que divide a la zona de estudio con la entrada y salida de los pescadores locales. Este sitio también es la entrada principal al estero de Sabancuy, uno de los principales brazos de la Laguna de Términos (Figura 29).

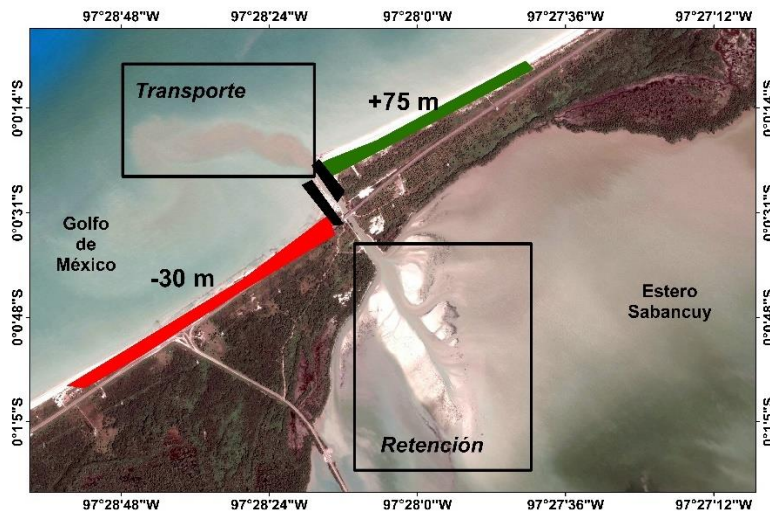


Figura 29. Erosión de más de 30 metros en Sabancuy.

Playa Norte

En la Figura 30 se aprecia la evolución de la línea de costa derivada principalmente del desarrollo de mobiliario petrolero, como consecuencia de la producción y explotación del mismo sector. También se observa un desarrollo turístico de playa creado desde el año 2010 a partir de rellenos de arena de más de un millón de metros cúbicos (SEMARNAT, 2017). Por otra parte, la evolución de la línea de costa en la parte izquierda de Playa Norte se debe a la construcción y modernización de la Administración Portuaria Integral de Ciudad del Carmen, Campeche, teniendo un retroceso que va desde los 100 m a los 150 m hacia tierra. Es importante señalar que la evolución de la línea de costa en este lugar es crítica ya que a lo largo de los años se han desplazado especies endémicas y se ha construido infraestructura rígida en lugares de vegetación local.



Figura 30. Erosión en Playa Norte: en rojo área expuesta a erosión, en negro y azul cambio de vegetación a zona de recreación e infraestructura.

7.1.2. Cambio de uso de suelo

Isla Arena

Este sitio es un corredor transversal con diferentes tipos de humedales (manglar, tular y los petenes) y cada uno de ellos con un comportamiento diferente. El manglar para el año 1997 tenía una extensión de 5684.667 ha y para el año 2009, 4055.254 ha, representando una pérdida del 20% de la extensión inicial. El tular no tenía una extensión territorial para el año 1997, sin embargo, en los 8 años siguientes la extensión fue de un poco más de 80 ha y para los cuatro años siguientes logró triplicar su extensión con más de 240 ha totales. Dicha extensión se mantuvo hasta el año 2016. Otro tipo de vegetación que presentó cambios importantes es el que se denomina petén. En el año de 1997 este tipo de vegetación no estaba representado en la zona, sin embargo, en 1999 con la creación de la Reserva de la Biosfera Los Petenes la vegetación se recuperó y en el año 2001 alcanzó una extensión de 1198 ha, misma que se ha conservado hasta el año 2016 (Figura 31, Tabla 4).

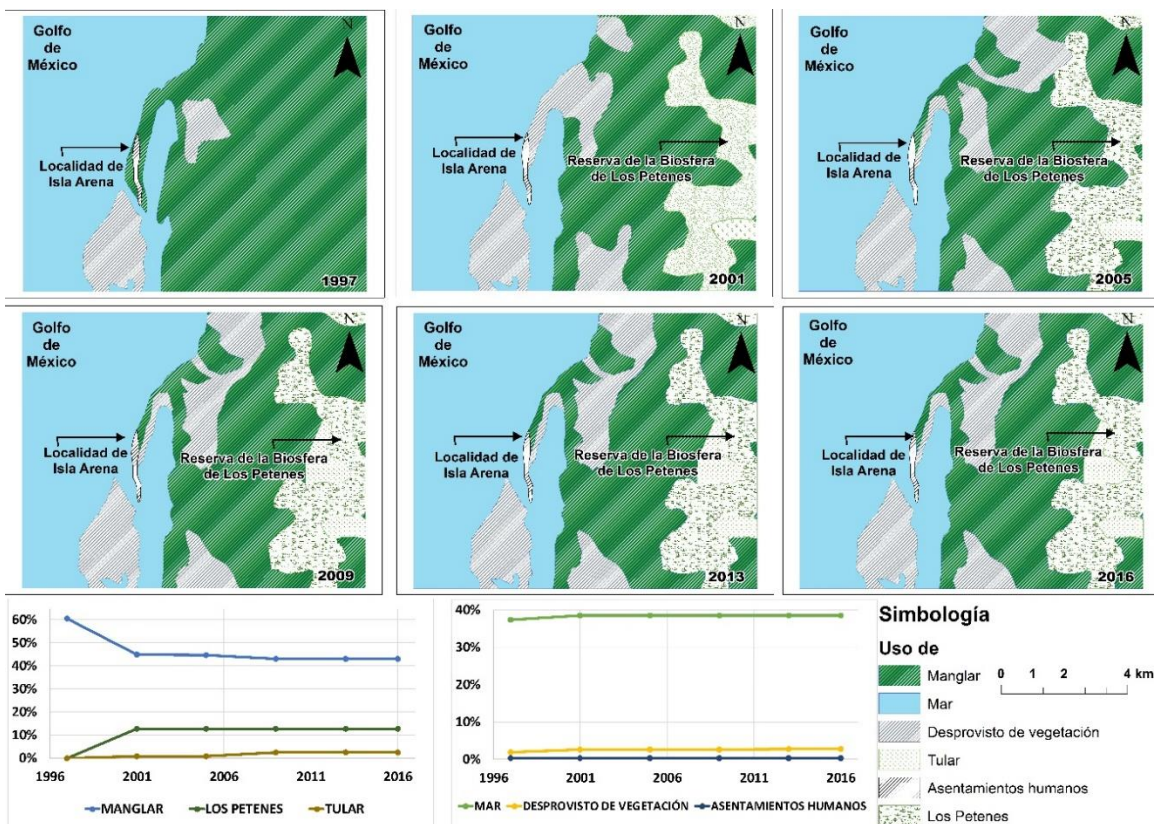


Figura 31. Descripción de los cambios de vegetación en el corredor transversal Isla Arena para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

Playa Bonita

Los resultados muestran un crecimiento de más de 190 ha de 1997 (289.39 ha) al 2001 (482.48 ha) lo que representa un crecimiento del 16%. Sin embargo, para el año 2016, la extensión de los asentamientos humanos llegó a más de 800 ha, lo que significa un

crecimiento de más del 270% inicial. El cambio de uso de suelo para utilizarlo como campos de cosecha (tipo de suelo Agricultura en este estudio) también tuvo un crecimiento de más del 200% inicial, reflejado con la extensión inicial de 253 ha (1997) a 515 ha (2016). El tipo de suelo de Selva, que cubría una extensión de más de 6120 ha en 1997 pasó a 5300 ha, lo que significó una pérdida del 12% (Figura 32).

Los crecimientos anteriores coinciden con el creciente desarrollo turístico en Playa Bonita principalmente reflejado en el turismo local, ya que en el año 2018 se reportaron visitas de más de 70,000 personas en el periodo vacacional de semana santa. Por lo que es considerada una zona de constante transformación de infraestructura y crecimiento turístico (INEGI, 2018).

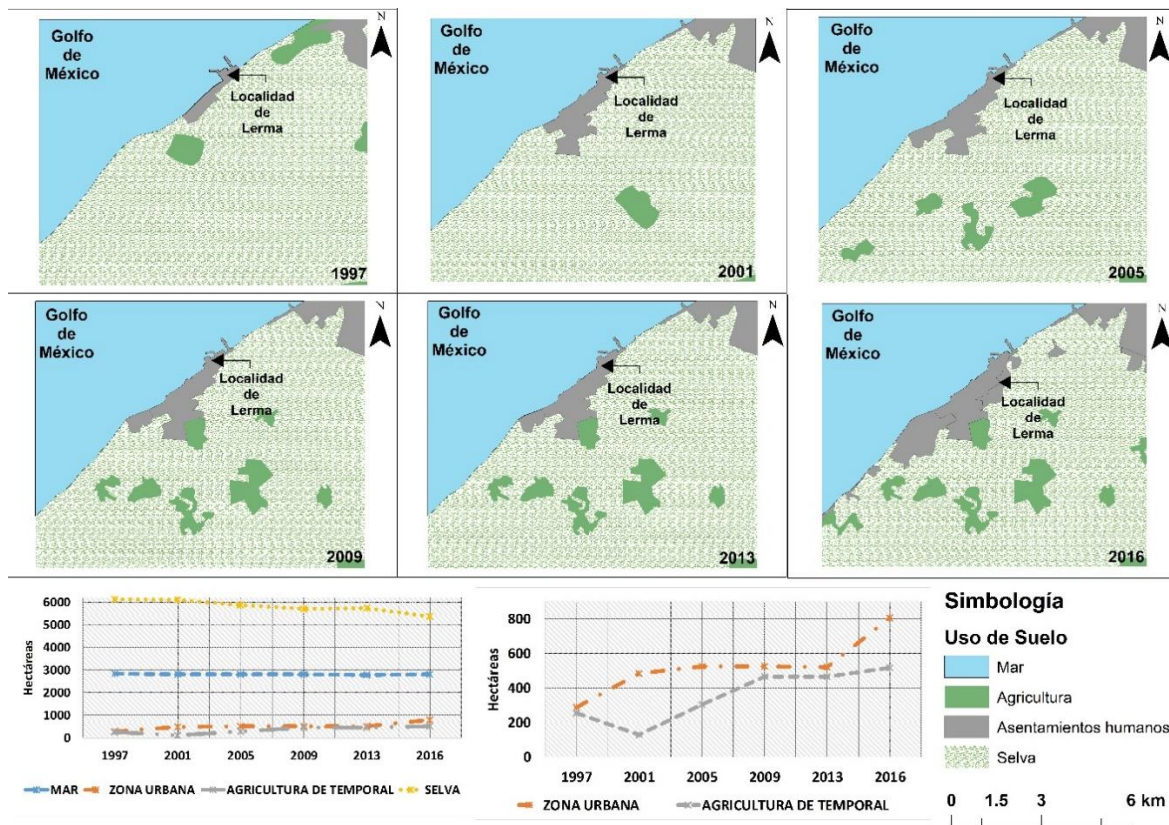


Figura 32. Descripción de los cambios de vegetación para el corredor transversal Playa Bonita para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

La Tabla 4. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Isla Arena en el periodo de 1997 al 2016.

| | Ma r | Man glar | Sin vege tación | Los Pete nes | Asen ta. hum anos | Tul ar | To tal (h a) | mar | man glar | Sin vege tación | Los Pete nes | Asen ta. hum anos | Tul ar |
|----------|------------|-------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|-----------|-----------------------|---------|-------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|-----------|
| 19 97 | 351 0.1 | 5684 .6 | 175.7 | 0 | 33.3 | 0 | 94 03 | 37 % | 60% | 2% | 0% | 0.35 % | 0% |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|-------|------------|------|-----------|----------|---------|-----|----|-----|-----------|----|
| 2001 | 362 2.6 | 4214 .1 | 251.1 | 119 8.2 | 33.3 | 84 | 94 03 | 39 % | 45% | 3% | 13% | 0.35 % | 1% |
| 2005 | 362 3.2 | 4211 .4 | 253.3 | 119 8 | 33.3 | 84 | 94 03 | 39 % | 45% | 3% | 13% | 0.35 % | 1% |
| 2009 | 362 3.2 | 4055 .2 | 253.5 | 119 8 | 33.3 | 24 0.2 | 94 03 | 39 % | 43% | 3% | 13% | 0.35 % | 3% |
| 2013 | 362 2.3 | 4055 .3 | 255.4 | 119 6.8 | 33.3 | 24 0 | 94 03 | 39 % | 43% | 3% | 13% | 0.35 % | 3% |
| 2016 | 362 2.6 | 4052 .9 | 257.1 | 119 6.3 | 33.6 | 24 0.3 | 94 03 | 39 % | 43% | 3% | 13% | 0.36 % | 3% |

Tabla 5 refleja el cambio de suelo para este corredor transversal, el cual es uno de los corredores más importantes del estado debido a la cercanía que tiene con la capital de Campeche. Si se toma en cuenta que es un sitio de atractivo turístico, algunas acciones como la remoción de infraestructura costera destinada a entretenimiento, tendría un impacto importante en la sociedad por lo que se necesitan acciones que reflejen la conectividad entre los servicios de ocio y la estabilidad de la zona costera.

Chenkán

Los tipos de vegetación considerados para la zona de Chenkán fueron manglar, selva, tular y pastizal. Los resultados muestran un área constante de manglar con una extensión de más de 490 hectáreas. De 1997 con 470 ha al 2013 con 490 se registró un crecimiento aproximado del 5%. (Figura 33).

Para el tipo de vegetación de selva se observa una reducción del 30% de su área total (1997 con 310 ha al 2013 con 220 ha).

Finalmente, la zona de pastizales dedicados a la ganadería creció de no tener un registro en 1997 hasta alcanzar 70 ha para el año 2013 (Tabla 6).

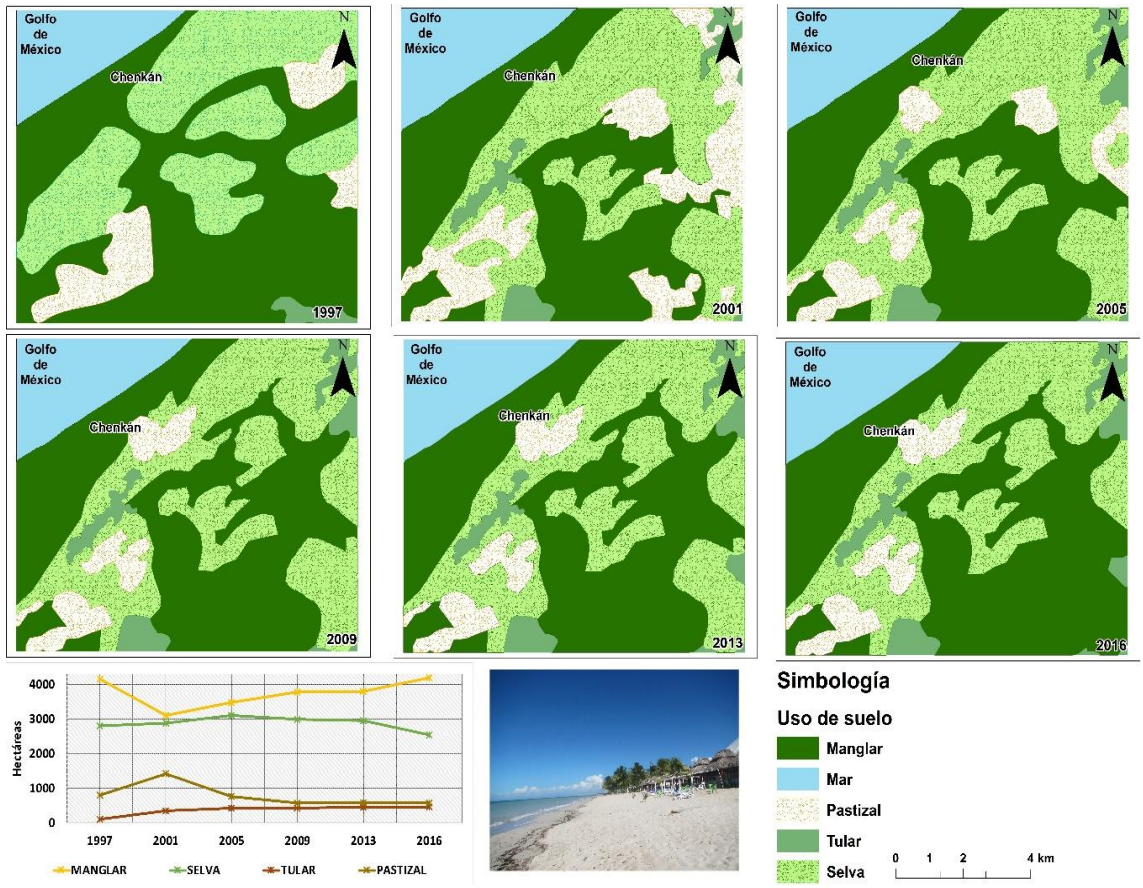


Figura 33. Descripción de los cambios de vegetación para el corredor transversal Chenkán para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

Tabla 4. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Isla Arena en el periodo de 1997 al 2016.

| | Mar | Manglar | Sin vegetación | Los Petenes | Asenta. humanos | Tular | Total (ha) | mar | manglar | Sin vegetación | Los Petenes | Asenta. humanos | Tular |
|-------------|--------|---------|-------------------|----------------|--------------------|-------|---------------|-----|---------|-------------------|----------------|--------------------|-------|
| 1997 | 3510.1 | 5684.6 | 175.7 | 0 | 33.3 | 0 | 9403 | 37% | 60% | 2% | 0% | 0.35% | 0% |
| 2001 | 3622.6 | 4214.1 | 251.1 | 1198.2 | 33.3 | 84 | 9403 | 39% | 45% | 3% | 13% | 0.35% | 1% |
| 2005 | 3623.2 | 4211.4 | 253.3 | 1198 | 33.3 | 84 | 9403 | 39% | 45% | 3% | 13% | 0.35% | 1% |
| 2009 | 3623.2 | 4055.2 | 253.5 | 1198 | 33.3 | 240.2 | 9403 | 39% | 43% | 3% | 13% | 0.35% | 3% |
| 2013 | 3622.3 | 4055.3 | 255.4 | 1196.8 | 33.3 | 240 | 9403 | 39% | 43% | 3% | 13% | 0.35% | 3% |
| 2016 | 3622.6 | 4052.9 | 257.1 | 1196.3 | 33.6 | 240.3 | 9403 | 39% | 43% | 3% | 13% | 0.36% | 3% |

Tabla 5. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Playa Bonita en el periodo de 1997 al 2016.

| | Mar | Zona urbana | Agricultura de temporal | Selva | Total (Ha) | Mar % | Zona urbana % | Agricultura de temporal % | Selva % |
|-------------|--------|----------------|----------------------------|--------|---------------|-------|------------------|------------------------------|---------|
| 1997 | 2840.9 | 289.3 | 253.4 | 6126.1 | 9509 | 30% | 3% | 3% | 64% |
| 2001 | 2801.5 | 482.4 | 127.7 | 6098.1 | 9509 | 29% | 5% | 1% | 64% |
| 2005 | 2801.5 | 522.4 | 302.1 | 5883.8 | 9509 | 29% | 5% | 3% | 62% |
| 2009 | 2801.5 | 522.4 | 464.5 | 5721.4 | 9509 | 29% | 5% | 5% | 60% |
| 2013 | 2794.6 | 519.4 | 465.4 | 5730.3 | 9509 | 29% | 5% | 5% | 60% |
| 2016 | 2815.2 | 803.5 | 515.5 | 5375.1 | 9509 | 30% | 8% | 5% | 57% |

Tabla 6. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Chenkán en el periodo de 1997 al 2016.

| | Mar | Manglar | Selva | Tular | Pastizal | Total (Ha) | Mar | Manglar | Selva | Tular | Pastizal |
|-------------|---------|----------|----------|---------|----------|------------|-----|---------|-------|-------|----------|
| 1997 | 822.906 | 4143.492 | 2805.403 | 107.580 | 788.625 | 8668.006 | 9% | 48% | 32% | 1% | 9% |
| 2001 | 923.473 | 3095.091 | 2880.883 | 351.194 | 1417.365 | 8668.006 | 11% | 36% | 33% | 4% | 16% |
| 2005 | 923.498 | 3468.957 | 3103.826 | 416.6 | 755.124 | 8668.005 | 11% | 40% | 36% | 5% | 9% |
| 2009 | 923.498 | 3778.388 | 2983.779 | 416.75 | 565.59 | 8668.005 | 11% | 44% | 34% | 5% | 7% |
| 2013 | 919.218 | 3786.451 | 2944.242 | 451.578 | 566.516 | 8668.005 | 11% | 44% | 34% | 5% | 7% |
| 2016 | 923.881 | 4188.926 | 2532.469 | 454.097 | 569.491 | 8668.864 | 11% | 48% | 29% | 5% | 7% |

Sabancuy

Para la zona de Sabancuy se encontraron dos tipos de vegetación: manglar y selva; y dos tipos de uso de suelo: agricultura y asentamientos humanos. El tipo de vegetación denominado selva, al igual que el uso de suelo llamado agricultura perdieron 130 ha cada uno. La pérdida de hectáreas responde al crecimiento de asentamientos humanos, ya que en 1997 había 140 ha y para el año 2013 había más de 170 ha.

Los polígonos de manglar presentan un crecimiento total de 32 ha en el periodo comprendido de 1997 a 2013 (de 56 ha a 88 ha) (Figura 34, Tabla 7).

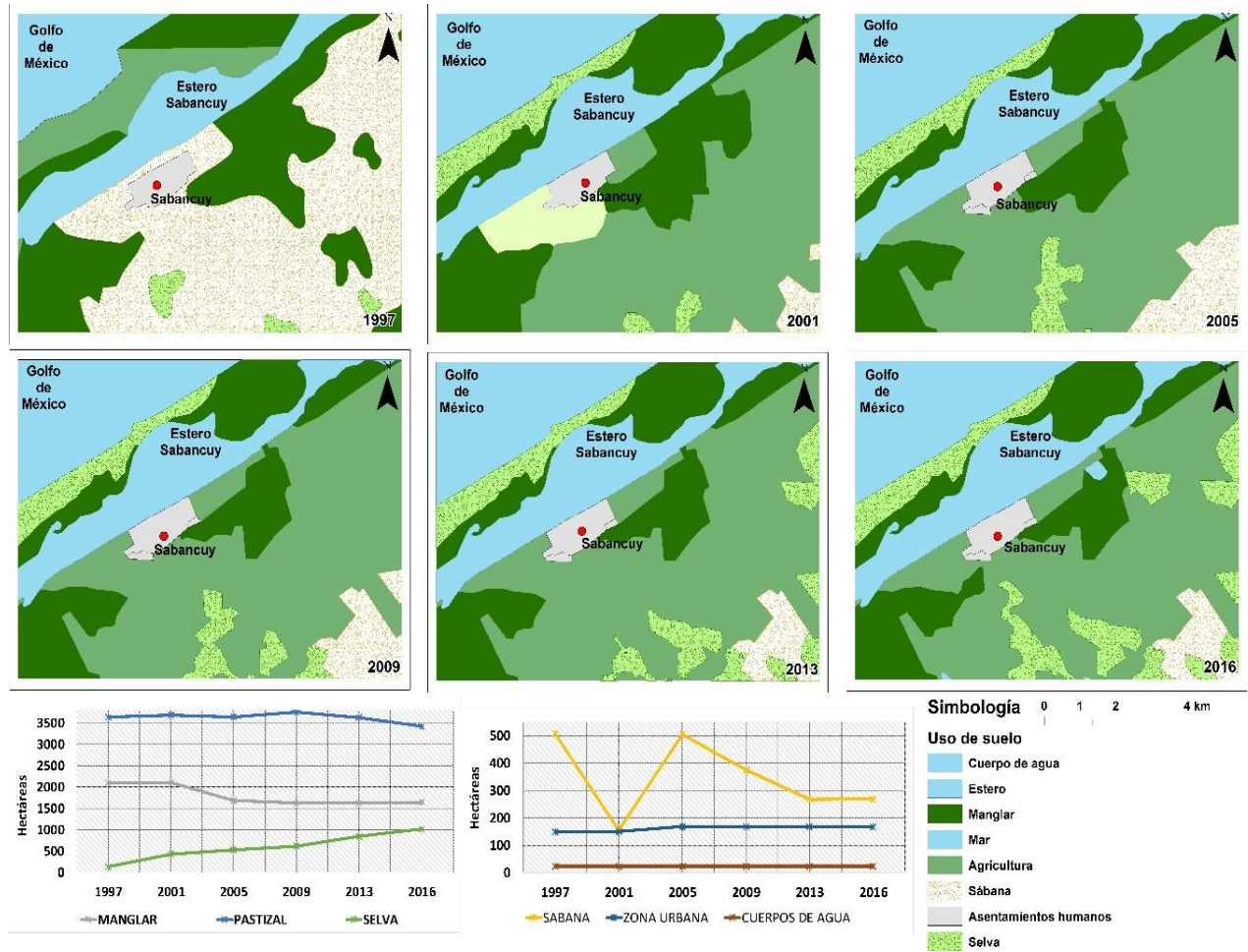


Figura 34. Descripción de los cambios de vegetación para el corredor transversal Sabancuy para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

Playa Norte

Para la zona de Playa Norte se identificaron los usos de suelo del tipo selva, agricultura, asentamientos humanos, sin vegetación y manglares (Figura 35).

Los resultados indican un crecimiento para las zonas de asentamientos humanos (1997 con 140 ha al 2013 con 170 ha) y manglares (1997 con 56 ha hasta el 2013 con 88 ha) entre las

25 y 32 hectáreas. Este crecimiento se ve reflejado en la pérdida de hectáreas para la selva (1997 con 150 ha al 2013 con 121 ha) y para la agricultura (1997 con 107 ha al 2013 con 79 ha) en el periodo de 1997 al 2013 con aproximadamente 29 y 28 ha respectivamente (

Tabla 8). Lo anterior se ve reflejado en el crecimiento poblacional y por consiguiente la urbanización de la zona donde la agricultura y la selva han sido modificados por dicha acción.

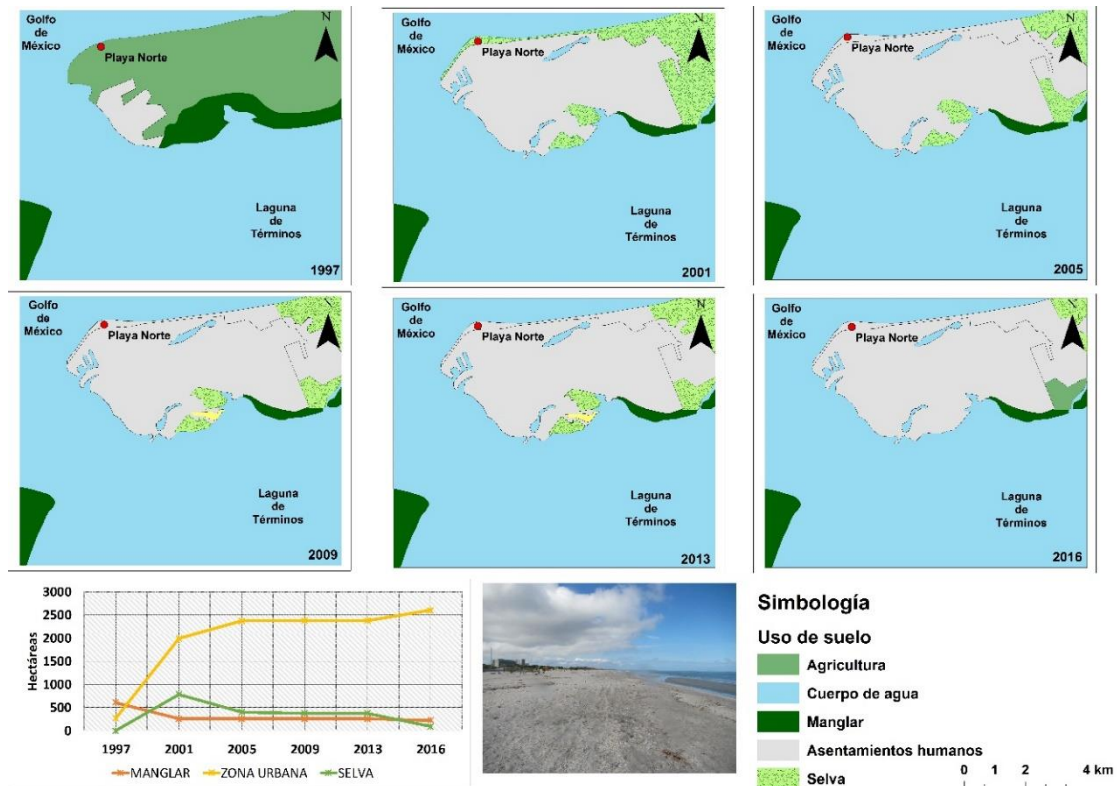


Figura 35. Descripción de los cambios de vegetación para el corredor transversal Playa Norte para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

Nuevo Campechito

Es una de las zonas de estudio que menos obstáculos presenta para la migración de los ecosistemas costeros. El corredor transversal delimitado por 2 km de ancho y 4 km de largo incluye localidades pequeñas y muy poca infraestructura de servicios, como postes de luz eléctrica o antenas de comunicación (Figura 36).

Se localizaron cuatro tipos de vegetación: manglar, tular, sin vegetación y pastizal cultivado permanente, de los cuales el manglar y el tular en conjunto han presentado pérdidas por un poco más de 50 hectáreas. Lo anterior podría estar relacionado con el crecimiento del tipo de pastizal cultivado que presentó un crecimiento de más del 300% en el periodo de 1997 al 2013 (de 900 a 3200 ha) (

Tabla 9).

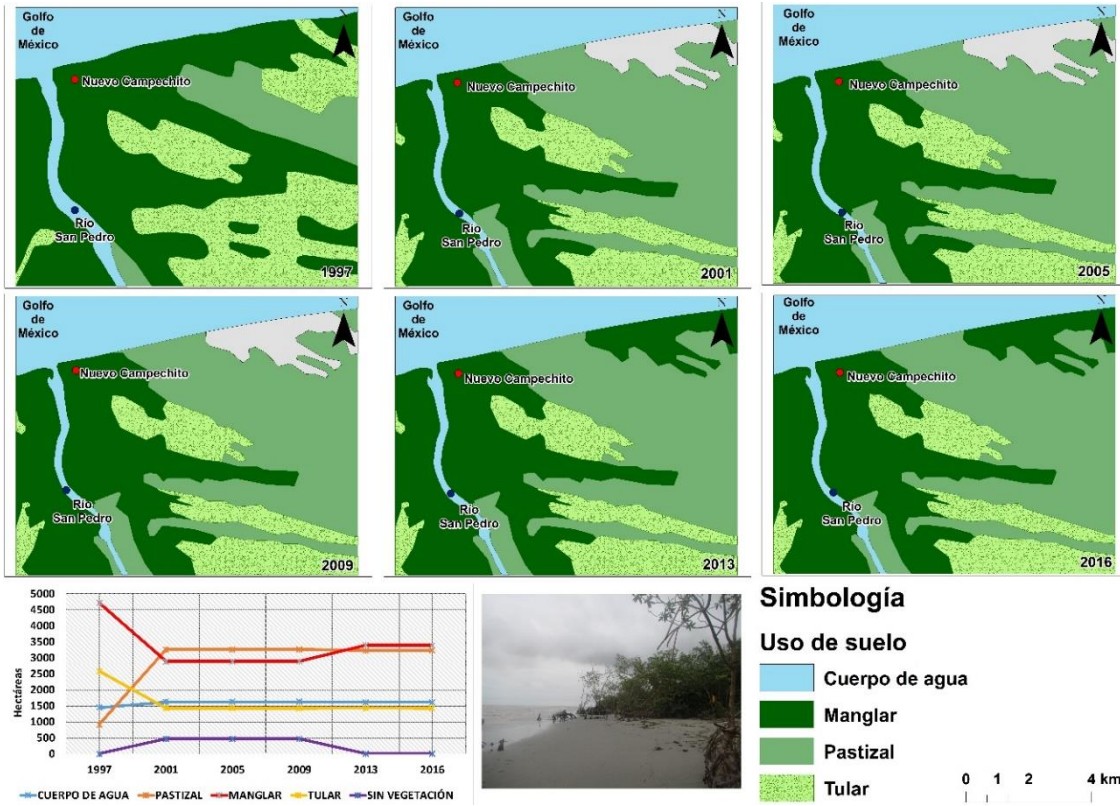


Figura 36. Descripción de los cambios de vegetación para el corredor transversal Nuevo Campechito para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2016. Fuente: CONABIO, 2017.

Tabla 7. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Sabancuy en el periodo de 1997 al 2016.

| | Manglar | Sabana | Pastizal | Selva | Zona urbana | Total (Ha) | Manglar | Sabana | Pastizal | Selva | Zona urbana |
|-------------|----------|---------|----------|----------|-------------|------------|---------|--------|----------|-------|-------------|
| 1997 | 2101.956 | 508.008 | 3631.549 | 132.101 | 149.363 | 8764 | 24% | 6% | 41% | 2% | 2% |
| 2001 | 2105.734 | 155.453 | 3684.577 | 427.144 | 149.363 | 8764 | 24% | 2% | 42% | 5% | 2% |
| 2005 | 1682.002 | 503.955 | 3638.621 | 530.223 | 167.444 | 8764 | 19% | 6% | 42% | 6% | 2% |
| 2009 | 1620.35 | 374.170 | 3747.975 | 612.305 | 167.444 | 8764 | 18% | 4% | 43% | 7% | 2% |
| 2013 | 1622.366 | 267.881 | 3628.927 | 843.306 | 167.438 | 8764 | 19% | 3% | 41% | 10% | 2% |
| 2016 | 1646.454 | 269.195 | 3420.086 | 1016.406 | 168.239 | 8764 | 19% | 3% | 39% | 12% | 2% |

Tabla 8. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Playa Norte en el periodo de 1997 al 2016.

| | Manglar | Agricultura | Zona Urbana | Selva | Sin vegetación | Total (Ha) | Manglar | Agricultura | Zona Urbana | Selva | Sin vegetación |
|-------------|---------|-------------|-------------|---------|----------------|------------|---------|-------------|-------------|-------|----------------|
| 1997 | 607.177 | 2172.686 | 270.590 | 0.000 | 0.000 | 3050.453 | 20% | 71% | 9% | 0% | 0% |
| 2001 | 252.947 | 0 | 1989.430 | 780.866 | 0 | 3023.243 | 8% | 0% | 66% | 26% | 0% |
| 2005 | 252.936 | 0 | 2368.364 | 401.967 | 0 | 3023.267 | 8% | 0% | 78% | 13% | 0% |
| 2009 | 252.936 | 0 | 2377.924 | 376.049 | 16.357 | 3023.266 | 8% | 0% | 79% | 12% | 1% |
| 2013 | 254.334 | 0 | 2377.452 | 373.689 | 16.357 | 3021.832 | 8% | 0% | 79% | 12% | 1% |
| 2016 | 225.155 | 84.407 | 2600.077 | 92.256 | 0.000 | 3001.895 | 8% | 3% | 87% | 3% | 0% |

Tabla 9. Cambio de vegetación en hectáreas y porcentaje para Nuevo Campechito en el periodo de 1997 al 2016.

| | Cuerpo de agua | Pastizal | Manglar | Tular | Sin vegetación | Cuerpo de agua | Pastizal | Manglar | Tular | Sin vegetación |
|-------------|----------------|----------|---------|---------|----------------|----------------|----------|---------|-------|----------------|
| 1997 | 1448.89 | 918.36 | 4722.85 | 2583.67 | - | 100% | 100% | 100% | 100% | 0% |
| 2001 | 1621.11 | 3262.71 | 2887.59 | 1429.96 | 472.41 | 112% | 355% | 61% | 55% | 100% |
| 2005 | 1621.11 | 3262.74 | 2887.53 | 1430.0 | 472.4 | 112% | 355% | 61% | 55% | 100% |
| 2009 | 1621.11 | 3262.74 | 2887.53 | 1430.0 | 472.4 | 112% | 355% | 61% | 55% | 100% |
| 2013 | 1611.94 | 3227.40 | 3398.33 | 1436.1 | 0 | 111% | 351% | 72% | 56% | 0% |
| 2016 | 1616.75 | 3237.14 | 3390.48 | 1428.76 | 0 | 112% | 352% | 72% | 55% | 0% |

7.1.3. Infraestructura y servicios de recreación

Tres de los seis lugares de estudio presentan obras de protección costera y, de ellos, Sabancuy y Playa Norte son los sitios con mayor área ocupada por dichas estructuras. Sabancuy cuenta con dos escolleras de 250 m en la boca del estero y diez estructuras de protección sumergidas para el control de la erosión en las zonas costeras que hacen un total de más de 700 m lineales de obras de protección. Por otra parte, Playa Norte cuenta con más de 80 comercios sobre la línea costera.

Dentro de la variable de servicios se tomarán en cuenta las obras de protección costera, puentes y estructuras de embarcación menor o, en su caso, puertos de cada una de las zonas de estudio (Figura 37 y Figura 38). Esta actividad de gabinete está siendo validada con la campaña de campo realizada en el mes de noviembre y parte de diciembre del año 2017.

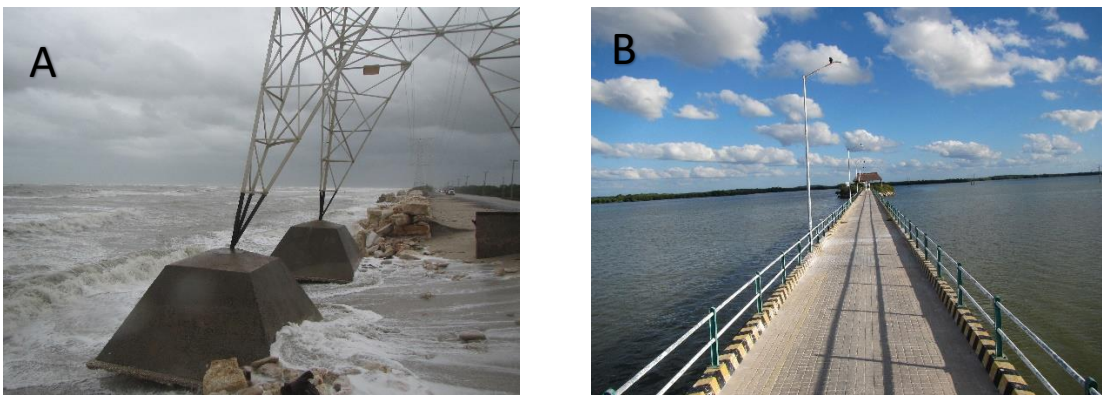


Figura 37. A. Antenas eléctricas pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), expuestas a la fuerza de viento y mareas sobre la carretera federal 180 Champotón-Ciudad del Carmen. B. Puente vehicular que conecta el poblado de Isla Arena con la carretera federal 180 Mérida-Campeche. Fotografías tomadas en la campaña de campo realizada entre noviembre y diciembre de 2017.



Figura 38. Escolleras en la boca del estero Sabancuy, donde se observan postes de comunicación y obras de recreación.

En la Tabla 10 se muestra el total de estructuras presentes en cada una de las zonas de estudio. En caso de que se presenten zonas de recreación sobre la zona costera o la playa, el área que ocupan fue validada con los datos obtenidos de la campaña de campo.

Tabla 10. Inventario de estructuras en las zonas de estudio del estado de Campeche.

| Zona de estudio | Casas | Estructuras | habitantes | Áreas de recreación (Ha) |
|-----------------|-------|--|------------|--------------------------|
| Isla Arena | 231 | 1 estanque de crustáceos 24 estructuras menores de embarcación 2 escolleras 10 palapas Total: 37 | 754 | 1 |
| Playa Bonita | 2156 | 15 palapas 1 escollera 3 rompeolas sumergidos 2 restaurantes 1 antena de comunicación Total: 22 | 8281 | 6.31 |
| Chenkán | 6 | 6 viviendas 1 restaurante 1 campamento Tortuguero 1 protección en carretera Total: 8 | 10 | 10.45 |
| Sabancuy | 2191 | 2 escolleras 10 rompeolas sumergidos 1 puente y la carretera federal Total: 13 | 7286 | 32.14 |
| Playa Norte | 225 | 1 campo de beisbol 1 puerto de embarcación 1 malecón 1 local para motos acuáticas 1 explanada social | 610 | 27.83 |

| | | | | |
|-------------------------|-----|--|-----|-------|
| | | 40 palapas 82 estructuras comerciales Total: 127 | | |
| Nuevo Campechito | 139 | Ninguna | 457 | 12.65 |

7.1.4. Vivienda

El número total de viviendas para cada sitio se obtuvo a partir de los datos existentes en el INEGI, mediante el Censo Nacional de Población y Vivienda disponible en <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/> realizado en el año 2010. La Tabla 11 contiene el número total de viviendas y habitantes por sitio. Cabe mencionar que en este trabajo se consideraron imágenes digitales y fotografías tomadas en campo con la intención de determinar las viviendas que tienen impacto directo en la zona costera o playa, esto con la intención de contar con una mejor cuantificación de la variable en términos de la opresión costera.

Tabla 11. Viviendas en las zonas de estudio

| Lugar | Viviendas | Habitantes |
|-------------------------|-----------|------------|
| Isla Arena | 231 | 754 |
| Playa Bonita | 2156 | 8281 |
| Chenkán | 6 | 10 |
| Sabancuy | 2191 | 7286 |
| Playa Norte | 225 | 610 |
| Nuevo Campechito | 139 | 457 |

7.1.5. Vientos

Los datos de viento que se emplearon para cada sitio se obtuvieron de acuerdo con la información disponible, ya sea mediante bases de datos, artículos de investigación y/o recursos electrónicos.

Chenkán: Para caracterizar el viento de este sitio se emplearon datos del Atlas de Clima Marítimo de la vertiente Atlántica Mexicana (Silva, 2008) que comprende el periodo de 1949 a 2007; esta información ya contiene el análisis estadístico de la serie de datos.

Así mismo se emplearon los datos descargados de la Estación Meteorológica Automática (EMA) ubicada en Isla Aguada, Campeche, con registro para el periodo 2011-2014.

De igual forma se tiene la información del *hindcast* de 30 años que corresponden al periodo de 1979 a 2008 (Appendini *et al.*, 2013). La serie de datos contiene información de la velocidad de viento (WS) y dirección de viento (WD) cada 3 horas desde el 1º de enero a las 0:00 h hasta el 31 de diciembre a las 21:00 h, todos los datos son del año 2008.

Nuevo Campechito, Playa Norte y Sabancuy: la dirección de viento predominante en cada una de las épocas del año es: 270 grados en época de secas y 247.5 grados en las épocas de lluvias y nortes, y las velocidades máximas para dichas épocas considerando una probabilidad de excedencia del 0.01 son de 4, 6 y 6 m/s respectivamente (Nava *et al.*, 2018).

En la región existen dos sistemas de vientos dominantes: de octubre a febrero los vientos son del Noroeste y su velocidad promedio es ligeramente mayor a 15.5 nudos. La velocidad promedio de estos vientos varía entre 8 y 12 nudos. La brisa marina refleja la influencia regional de vientos (Nava *et al.*, 2018).

La Figura 39 muestra la velocidad del viento para las tres estaciones características del estado de Campeche: secas, lluvias y nortes.

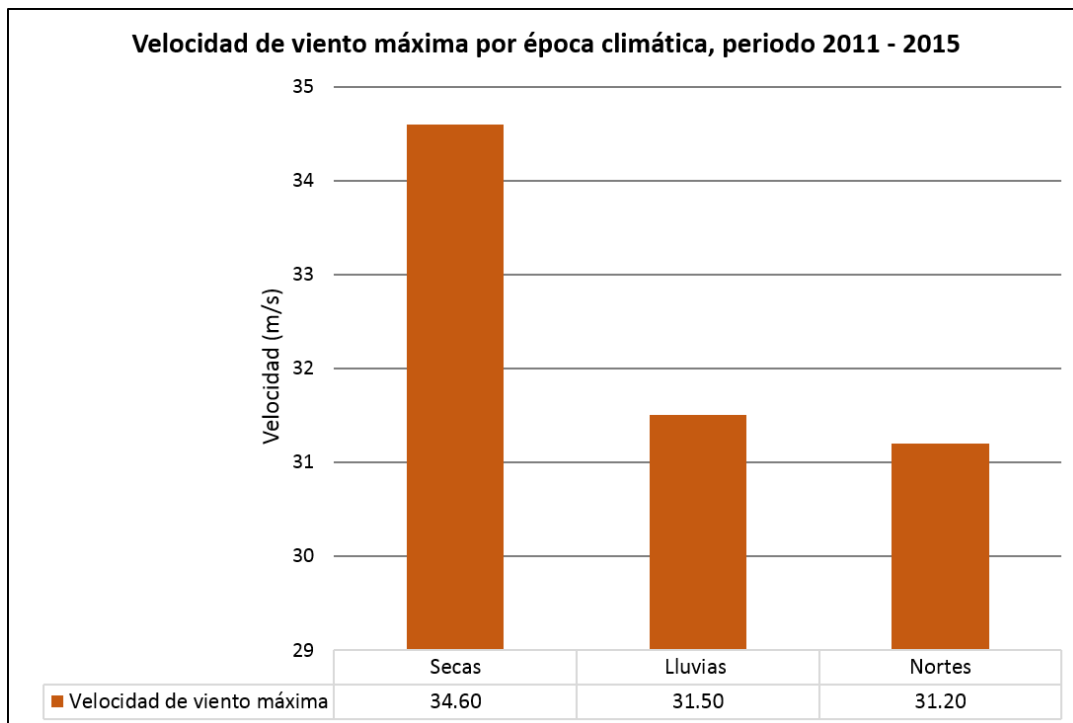


Figura 39. Velocidad máxima para costas del estado de Campeche.

7.1.6. Mareas

Los datos de marea se obtuvieron del Servicio mareográfico y de la SEMAR para cada uno de los sitios de estudio.

Nuevo Campechito, Playa Norte y Sabancuy: la amplitud de la marea en la frontera Este oscila entre los 0.43 m como máximo y los -0.70 m como mínimo. La amplitud de la marea en la frontera Oeste varía entre los 0.31 m como máximo y -0.45 m como mínimo.

En el Puerto Ciudad del Carmen, Campeche en el muelle de la Tercera Región Naval se encuentra un mareógrafo de la SEMAR que registra observaciones cada 6 min. La marea es clasificada como mixta semidiurna y presenta un comportamiento del tipo diurno durante gran parte del año, es decir, una pleamar y una bajamar en un ciclo de 24 horas. Se observa que la amplitud de la marea astronómica en las costas durante un ciclo anual se incrementa a partir del mes de septiembre a marzo comenzando a disminuir la amplitud en abril (Figura 40).

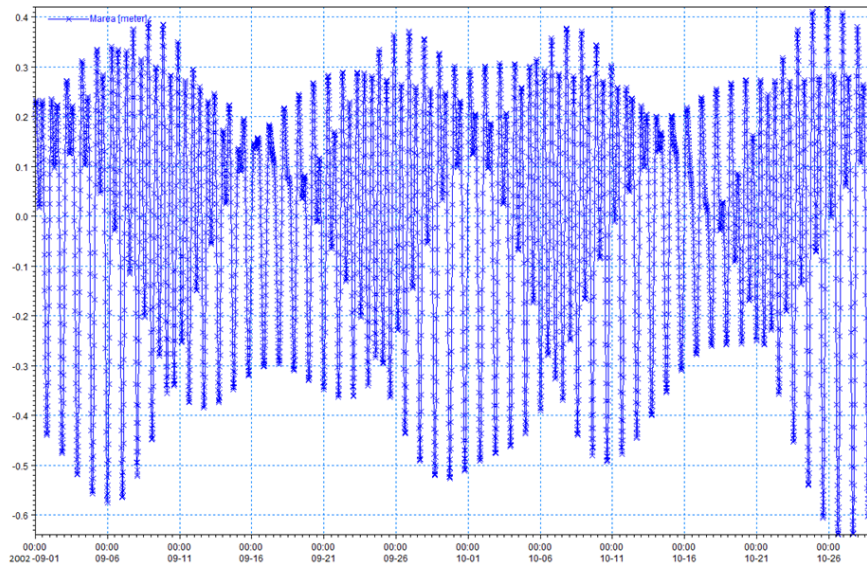


Figura 40. Marea para las costas del estado de Campeche.

7.1.7. Oleaje

Los años de registro utilizados fueron de 1950 al 2009 extraídos del Atlas marítimo y para los años 2005 al 2019 del WWIII. Los resultados muestran alturas de olas máximas entre los 1.1 y los 3.7 metros de altura, este último dato corresponde a eventos de viento del norte que se presentan en los meses de noviembre a febrero de cada año (Figura 41 y Figura 42).

Se utilizaron los valores de altura de ola significativa para la zona cercana a la de 0.04 a 0.1 metros. La altura máxima de ola para las zonas de estudio está en el intervalo de 0.1 a 1.75 metros. Con periodos de 7.83 a 7.96 segundos. La dirección del oleaje en la zona cercana a

la costa toma valores dentro del intervalo 300° a 325° ; conforme se aleja de la costa va tomando valores entre 0° a 25° y 25° a 50° . Una característica importante es que el oleaje tiene una dirección de incidencia perpendicular a la línea de costa, siendo este Noroeste.

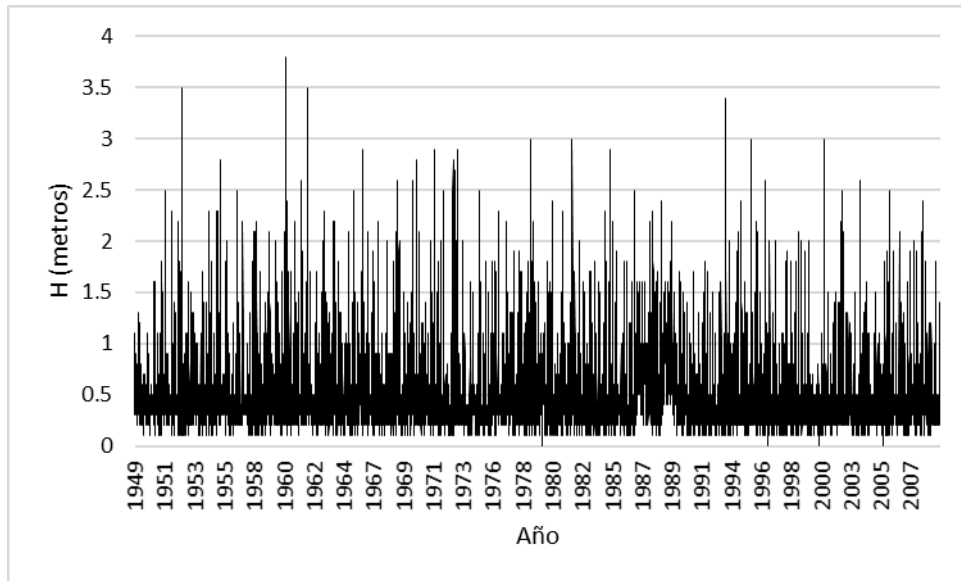


Figura 41. Oleaje para la costa del estado de Campeche (Sabancuy 1949-2009).

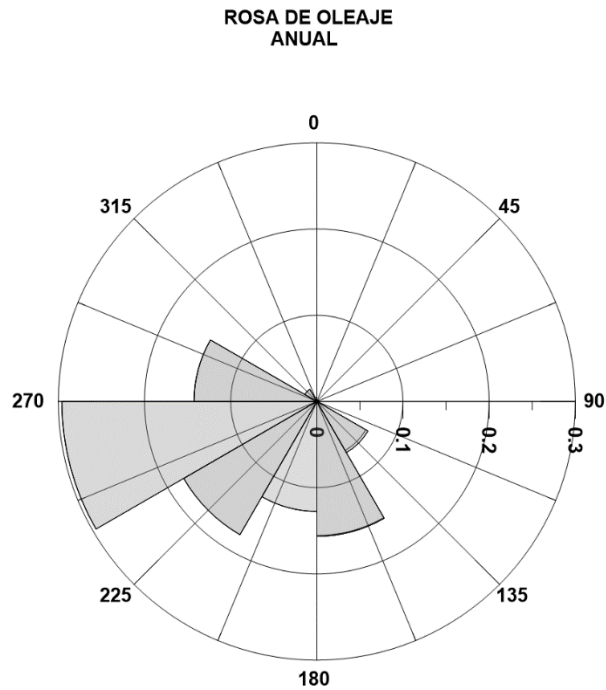
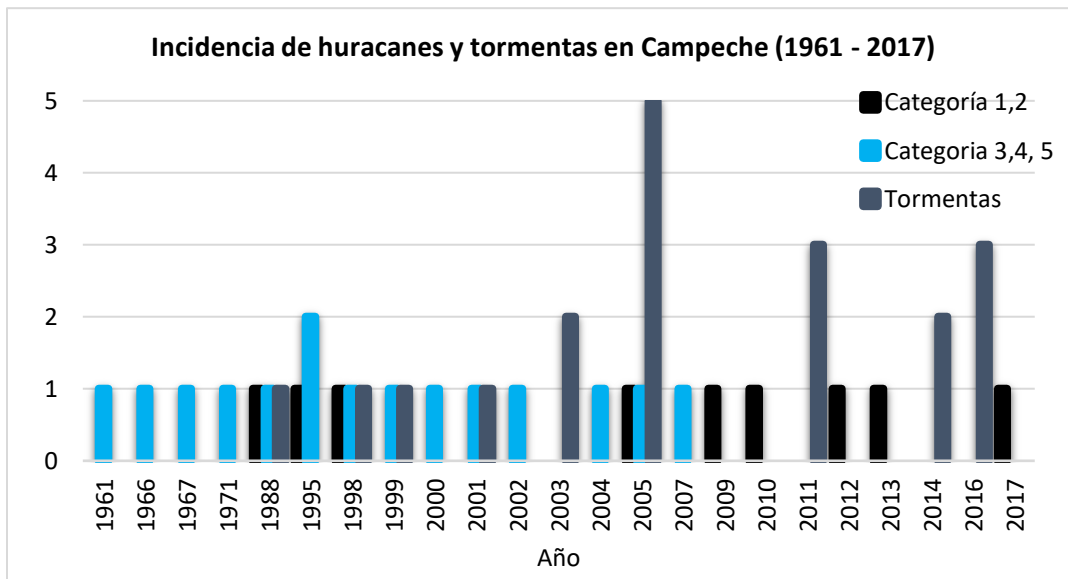


Figura 42. Rosa de oleaje para la zona de Sabancuy (1949-2009).

7.1.8. Eventos extremos

Por su ubicación geográfica, el estado de Campeche se encuentra expuesto a los fenómenos hidrometeorológicos que tienen una trayectoria que pasa por la Península de Yucatán. Primero afectan al estado de Quintana Roo o al estado de Yucatán, para luego seguir su paso hacia el estado de Campeche, por ello, no llegan con la intensidad inicial con que afectan a los dos primeros estados mencionados, debido a que los efectos de la orografía de la región y su interacción con la tierra debilitan considerablemente a estos sistemas (CITA). Sin embargo, los efectos de precipitación asociados a estos fenómenos suelen ser de grandes acumulados, provocando inundaciones que afectan principalmente las actividades económicas, servicios básicos y de comunicación de las poblaciones en cuestión.

En los últimos 55 años el estado de Campeche ha sido afectado por diversos huracanes (Gráfica 1). Sin embargo, los que han causado mayor impacto son: Inés en 1966, Edith en 1971, Gilberto en 1988, Opal y Roxana en 1995, Isidoro en el 2002 y Stan en el 2005. El patrón de incidencia de huracanes es de 7 años a partir de 1966, pero después del huracán Stan en 2005 esta tendencia quedó interrumpida.



Gráfica 1. Incidencia de eventos extremos para la costa del estado de Campeche.

7.1.9. Evolución de la línea de costa

Para conocer la evolución de la línea de costa, se realizaron análisis comprendidos entre el periodo de 2005 a 2015. Los resultados sugieren que la mayor parte del área de estudio tiene playas estables con tasas que oscilan entre 20 y 40 m/año. Sin embargo, algunas playas mostraron evidencia de interrupción de la dinámica hidrosedimentaria (Tabla 12).

De manera general, algunos de los desplazamientos hacia tierra (denotados como *evolución*) se deben a los efectos de la temporada estacional conocida como “nortes” que va de noviembre a febrero, por lo que el desplazamiento de la línea de costa es cíclico y

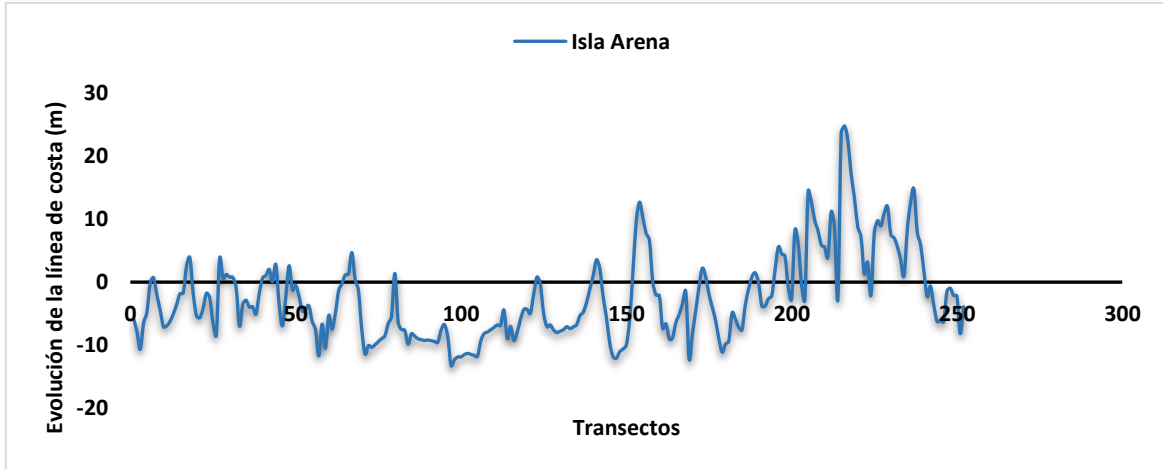
responde a las diferentes temporadas meteorológicas que ocurren en el estado de Campeche.

Tabla 12. Evolución de la línea de costa para las zonas de estudio (2005-2015).

| Zona de estudio | Evolución – (m) | Evolución + (m) | Tasa de evolución (m/año) |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Isla Arena | -13.20 | 24.80 | -2.45 |
| Playa Bonita | -4.36 | 91.60 | 12.51 |
| Chenkán | -15.59 | 13.41 | -1.90 |
| Sabancuy | -30.65 | 75.03 | 10.725 |
| Playa Norte | -105.82 | 83.78 | 26.12 |
| Nuevo Campechito | -34.02 | 34.20 | -10.10 |

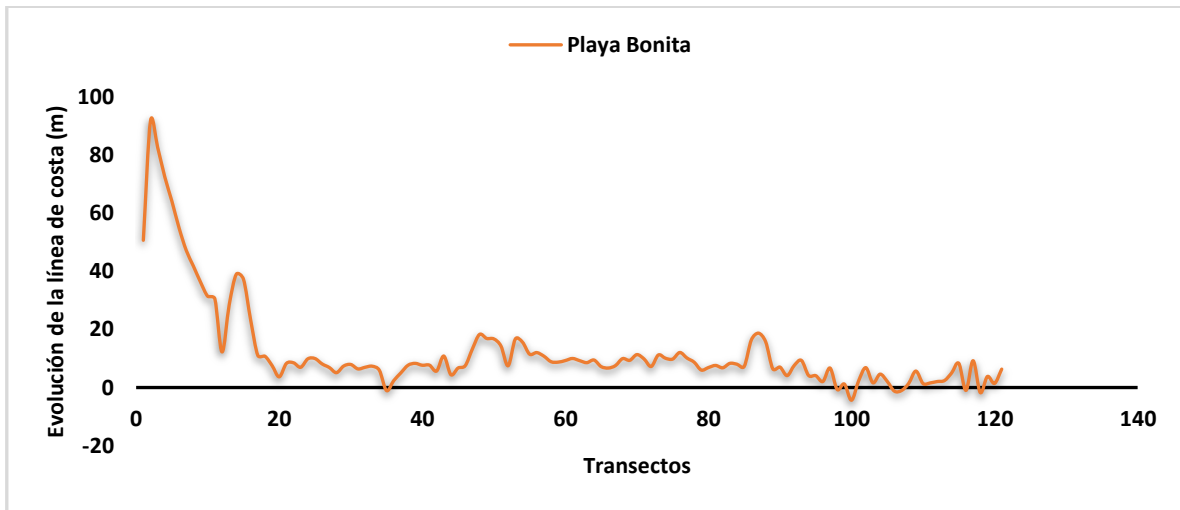
A continuación, se presentan las gráficas de cada una de las localidades con los valores máximos y mínimos alcanzados en la línea de costa.

- Isla Arena presenta un desplazamiento promedio en el que se justifica por las condiciones meteorológicas a las que son sometidas sus costas dando un mínimo o retroceso de costa de 13 m y un incremento o acreción de 24 m (Gráfica 2)



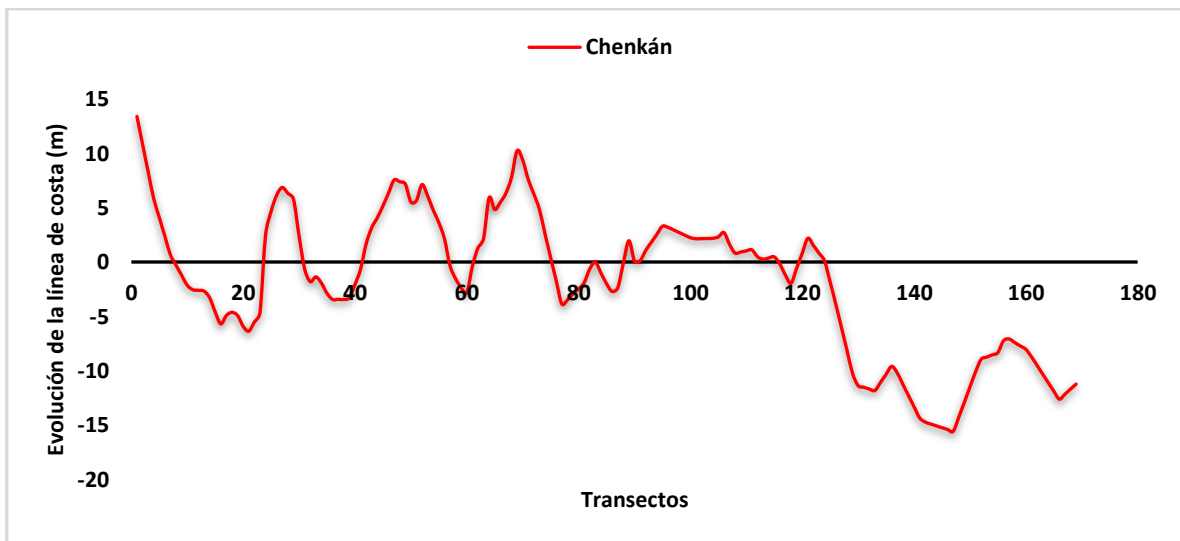
Gráfica 2. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Isla Arena, Campeche.

- Playa Bonita presenta baja variabilidad debido a las estructuras de protección en sitio (± 4 m) (Gráfica 3)



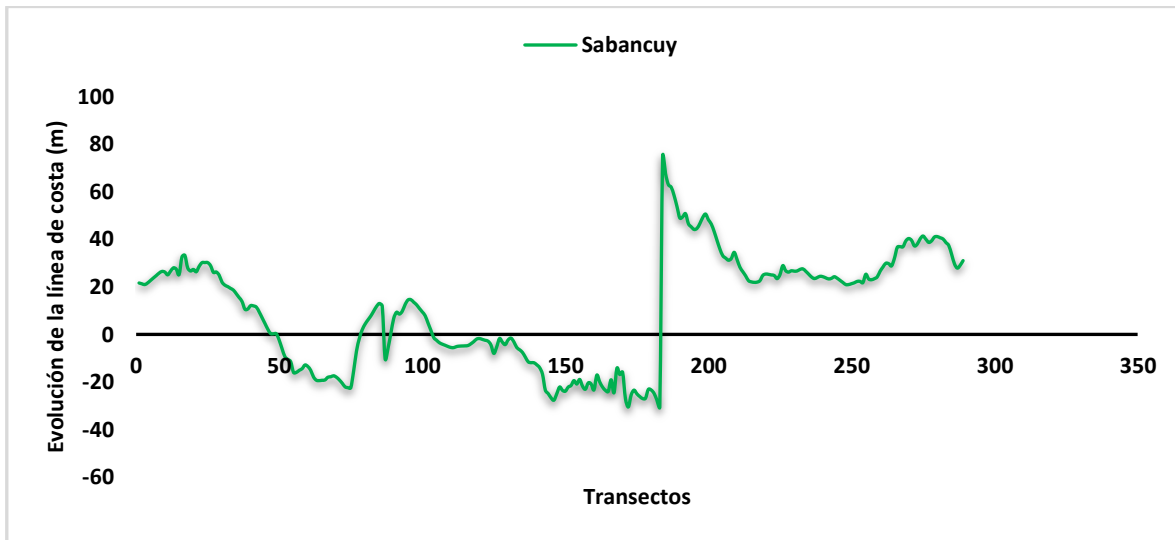
Gráfica 3. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Playa Bonita, Campeche.

- Chenkán indica un avance de 13 m hacia mar y un retroceso de 15 m hacia tierra (Gráfica 4).



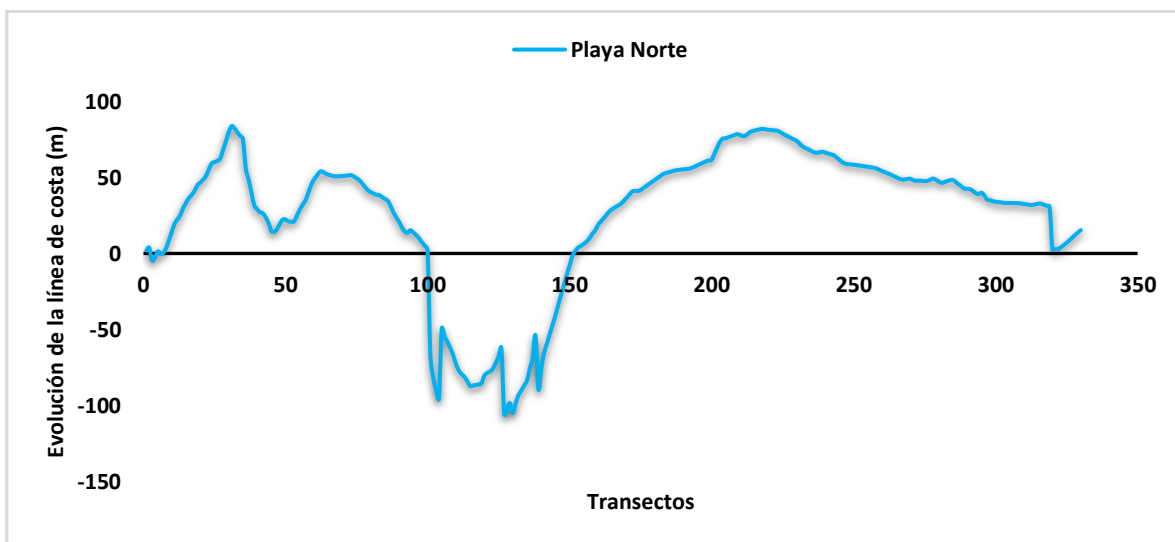
Gráfica 4. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Chenkán, Campeche.

- Sabancuy presenta desplazamientos máximos hacia mar de 75 m, mientras que para tierra existen desplazamientos negativos de 30 m. Se puede observar este cambio en los transectos número 184 y 183 (Gráfica 5).



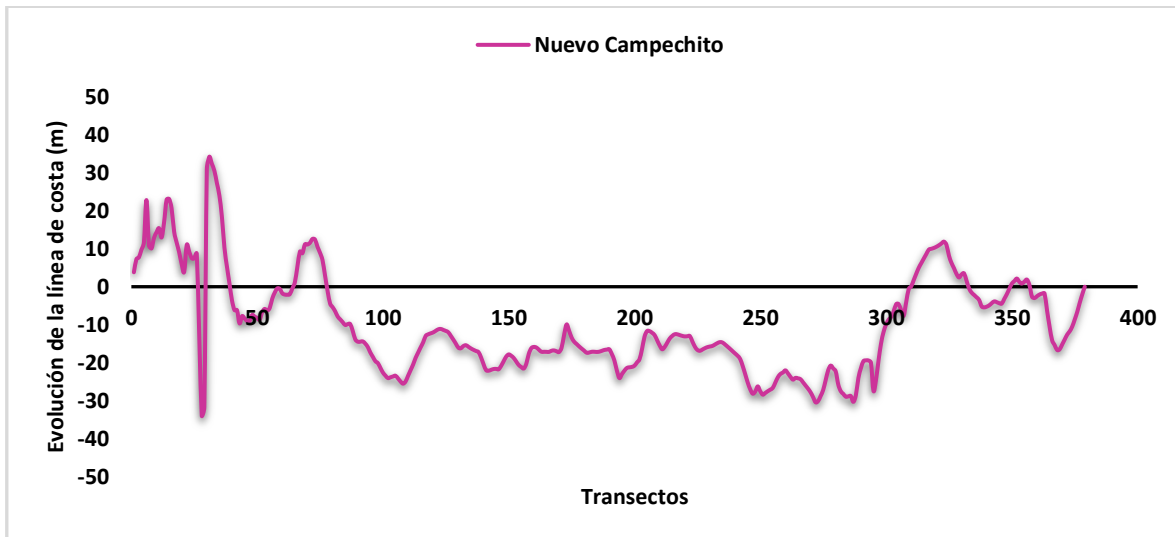
Gráfica 5. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Sabancuy, Campeche.

- Playa Norte presenta un retroceso de línea de costa de más de 100 m mientras que tiene un avance hacia mar de 80 m lo cual se puede observar en la Gráfica 6 en el transecto 32.



Gráfica 6. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Playa Norte, Campeche.

- Nuevo Campechito presenta evolución de línea de costa estable con desplazamientos de ± 30 m a lo largo de su línea de costa (Gráfica 7)



Gráfica 7. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Nuevo Campechito, Campeche.

7.2. Sistema Difuso

A continuación, se presentan las variables de entrada para utilizar el modelo XFuzzy, en el cual se describe el grado de pertenencia de cada una de las variables que inducen opresión costera. Además, se establecen los valores lingüísticos de salida que se asociarán a los resultados obtenidos de cada modelación de las zonas de estudio, en donde, existiendo 11 variables (Sin pertenencia, Prácticamente sin pertenencia, Casi sin pertenencia, Muy débil pertenencia, Débil pertenencia, Mediana pertenencia, Pertenencia sensible, Bastante pertenencia, Fuerte pertenencia, Muy fuerte pertenencia y Pertenencia absoluta) se reducen a un total de 5 resultados en un índice numérico para representar el fenómeno de opresión costera que va de un intervalo entre $[0,1]$ (Tabla 13). Es importante mencionar que cada variable cambia con respecto a la zona de estudio, de ahí la importancia de utilizar un modelo difuso, puesto que permite la integración de diferentes variables asignándoles un valor de pertenencia para la inducción de algún fenómeno complejo particular.

Tabla 13. Variables de entrada para el sistema difuso.

| Variable | Unidad | Inferencia | Ecuación | Varianza | Grado de pertenencia | Resultados | Variable lingüística | Color |
|------------------------|--------|------------|--|----------|----------------------|------------|-------------------------------|---------------------|
| Viento (m/s) | m/s | TSK | $\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}}$ <p>$\mu(x)$: variable de opresión costera</p> <p>f_1: propagación (desviación estándar de las variables)</p> <p>f_2: media aritmética</p> | 2.7 | 0.525 | 0.0 | Sin pertenencia | Sin presencia de OC |
| Mareas | m | TSK | | 0.13 | 0.596 | 0.1 | Prácticamente sin pertenencia | |
| Oleaje (s) | m | TSK | | 0.63 | 0.560 | 0.2 | Casi sin pertenencia | Débil OC |
| Eventos extremos | Unidad | TSK | | 2.22 | 0.530 | 0.3 | Muy débil pertenencia | |
| INMM | m | TSK | | 0.29 | 0.578 | 0.4 | Débil pertenencia | Mediana OC |
| Estructuras costeras | Unidad | TSK | | 18.15 | 0.923 | 0.5 | Mediana pertenencia | |
| Erosión-Acreción | m | TSK | | 0.1 | 0.602 | 0.6 | Pertenencia sensible | Fuerte OC |
| Cambio de uso de suelo | ha | TSK | | 19.02 | 0.720 | 0.7 | Bastante pertenencia | |
| Servicios | Unidad | TSK | | 18.15 | 0.794 | 0.8 | Fuerte pertenencia | Absoluta OC |
| Viviendas | Unidad | TSK | | 10.48 | 0.846 | 0.9 | Muy fuerte pertenencia | |
| Recreación | ha | TSK | | 12.26 | 0.894 | 1.0 | Pertenencia absoluta | |

Los parámetros de entrada cambiaron según el análisis de la zona de estudio. En los siguientes apartados se describen los resultados y la representación de éstos. En la Figura 43 solamente se representan los pasos que realiza el programa Xfuzzy para la cuantificación de opresión costera en el sitio de Isla Arena, ya que es el mismo procedimiento para los demás sitios de estudio. La Figura 44 representa el diagrama de la defuzzificación del esquema para la solución del problema que resuelve, a manera de que se integren todas las variables que inducen opresión costera.

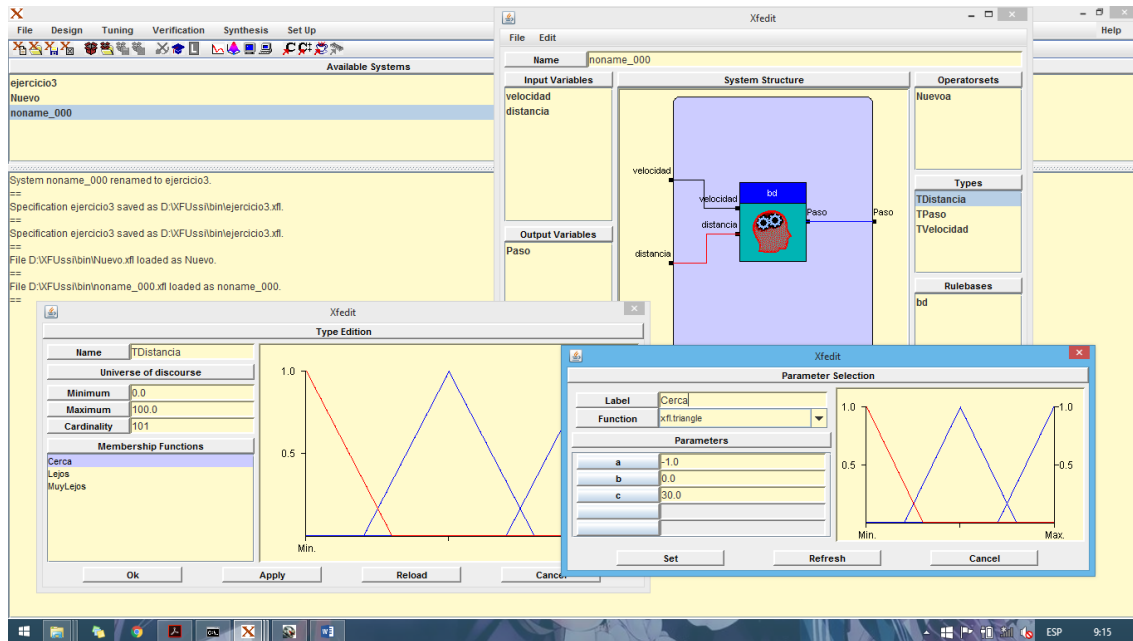


Figura 43. Esquema de funcionamiento para la zona de estudio Isla Arena en Xfuzzy.

Esquema del problema

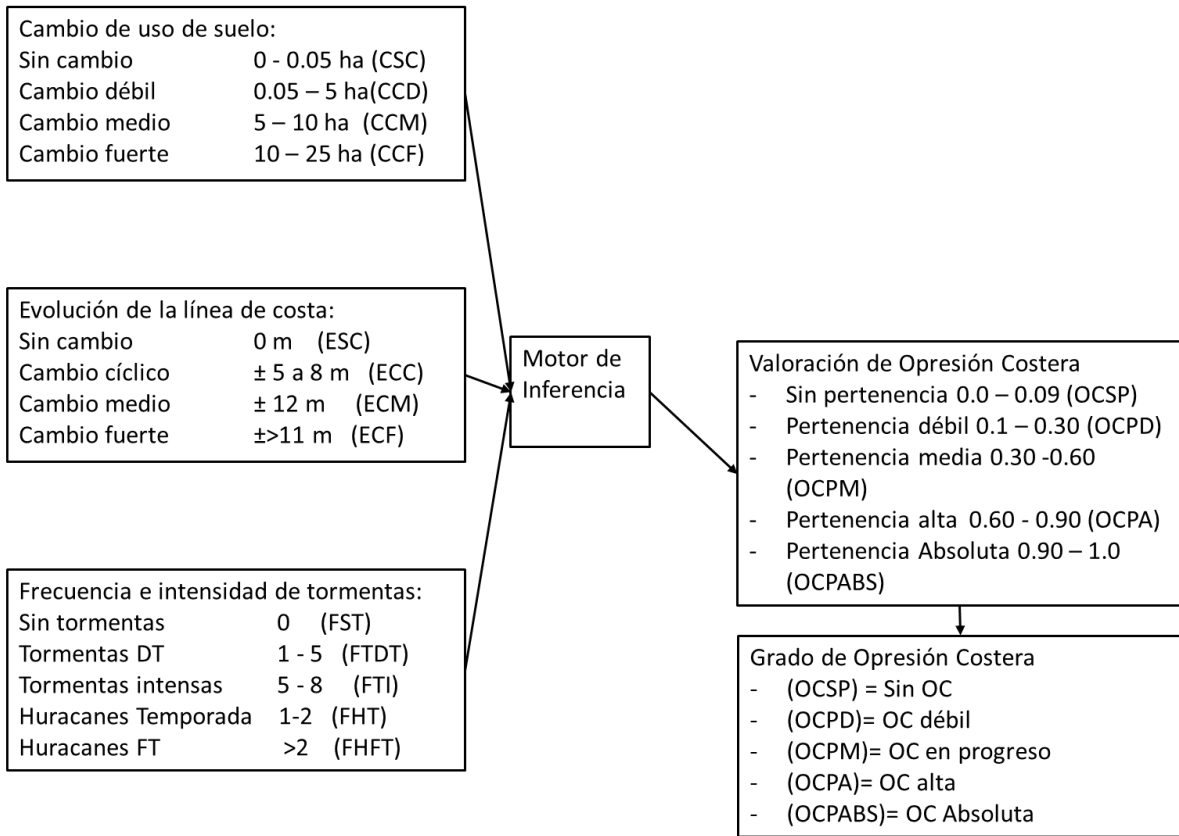


Figura 44. Esquema de solución por parte del programa XFuzzy para cuantificación de opresión costera.

8. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

8.1. Opresión Costera

Isla Arena

Para este sitio se obtuvo una opresión (OC) mínima (0.08) con un rango de 0.00 a 0.20 (Sin Presencia de OC). Esto se debe a la existencia de un sistema de humedales que brinda protección natural denominado Los Petenes (Figura 35B), mismo que presenta un índice de 0.23 (Débil Pertenencia 0.20-0.40) (Figura 35D). Es importante mencionar que los nulos incrementos de infraestructura costera, así como de crecimiento urbano han favorecido esta tendencia (Figura 35 C); y esto se debe principalmente a la creación de la Reserva de la Biosfera que ha servido como zona de amortiguamiento. Los eventos extremos representan una variable que afecta de manera importante a todos los sitios de estudio, por lo que en este caso en particular el papel de la Reserva de la Biosfera de Los Petenes también es de suma importancia ya que resguarda directamente a la zona de dichos eventos (Figura 35A).

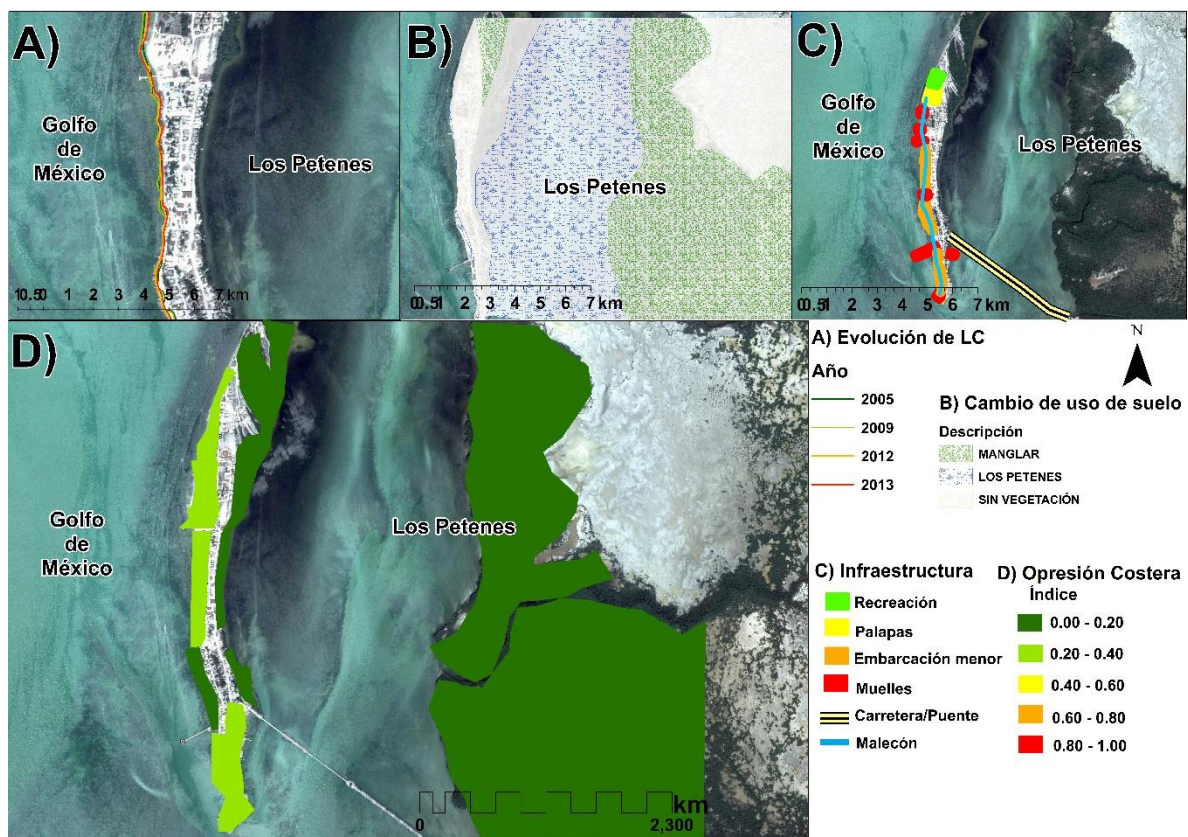


Figura 45. Variables y cuantificación de opresión costera para Isla Arena, Campeche. A). Evolución de la línea de costa. B). Cambio en el uso de suelo. C) Infraestructura. D) Índice de opresión costera.

Playa Bonita

Playa Bonita tuvo un grado Medio (0.54), o Mediana Pertenencia; de opresión costera (Figura 36A). En este caso, la playa aumentó 80 m entre 2006 y 2016 debido a los rellenos artificiales (Figura 36B), pero otras variables generaron la opresión costera. Los principales desencadenantes fueron la rigidización de la costa (Figura 36C) y un asentamiento establecido a lo largo de una franja de 500 m de ancho, ocasionando la interrupción de la conectividad costera (Figura 36D). Las actividades relacionadas con desarrollos de infraestructura inducidos por el turismo, incluida la construcción de campos de golf y carreteras, así como estructuras de protección costera (es decir, estructura de escombros y rompeolas) también influyen de manera directa en la opresión costera.

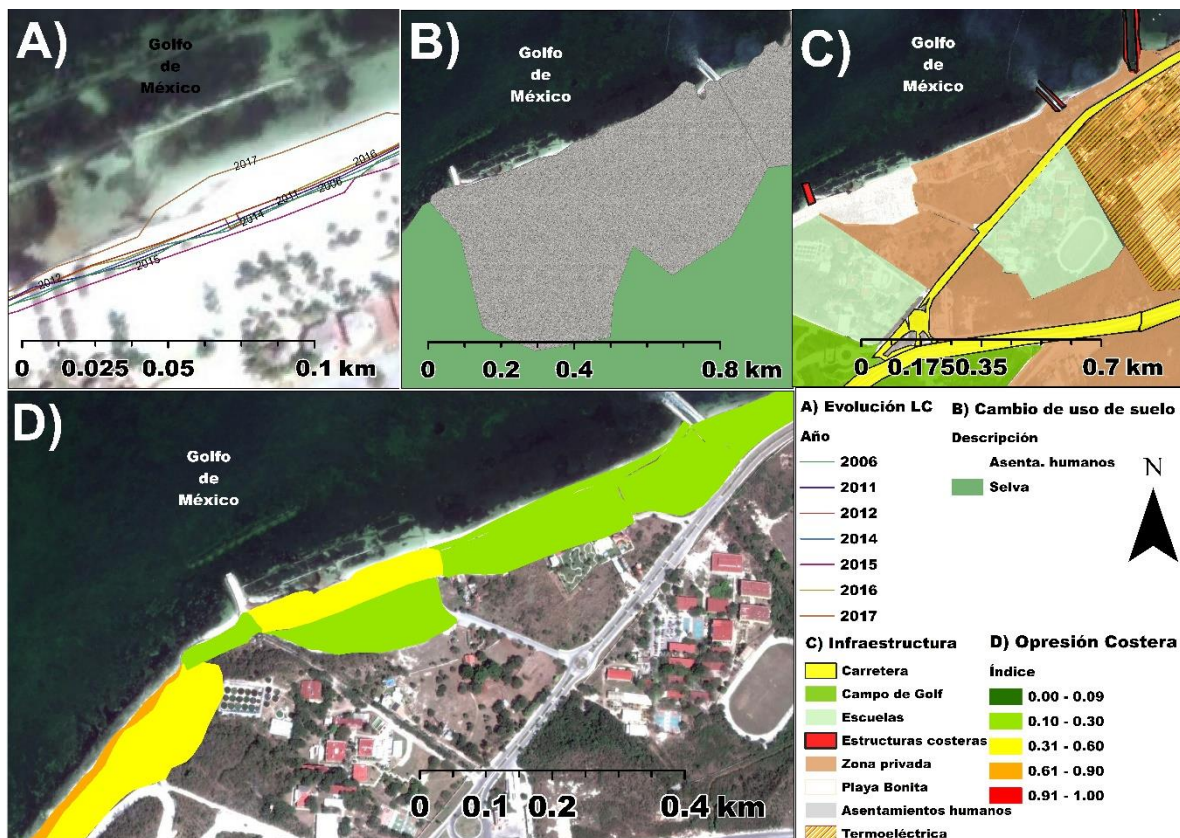


Figura 46. Variables y cuantificación de opresión costera para Playa Bonita, Campeche. A). Evolución de la línea de costa. B). Cambio en el uso de suelo. C) Infraestructura. D) Índice de opresión costera.

Como sitio de recreación más cercana a la ciudad de Campeche, Playa Bonita presenta cambios antrópicos en su línea de costa debido a la constante rehabilitación que le dan al balneario en época de secas y lluvias (marzo-abril y mayo-julio). Por otra parte, las descargas directas de los desechos de los habitantes de la localidad de Lerma han causado un

deterioro en la zona Este de la playa ya que, además de estos, la descarga de los químicos de la termoeléctrica afecta a los pescadores pues afirman que la reproducción de especies marinas con importancia económica, como la sierra y el pulpo, han disminuido a causa de los efectos de estos desechos, lo que también representa una pérdida económica para los lugareños. De manera general, se tiene una Presencia Baja de opresión costera debida principalmente al desarrollo de un campo de golf en el lado Oeste de la playa. En caso de seguir con el anterior proyecto, las consecuencias de erosión sobre Playa Bonita no sólo serán ecológicas sino sociales y turísticas derivando en pérdidas económicas.

Chenkán

En este sitio los resultados indican Mínima opresión costera con un valor de 0.05 (Figura 37D). En la Figura 37B se observa claramente que el uso de suelo se ha conservado sin cambios significativos en el periodo de 1997 a 2016. Otra característica importante en este lugar es la estabilidad de la línea de costa, misma que ha permanecido constante (Figura 37A) a pesar de la influencia de los vientos del norte en los meses de octubre a febrero.

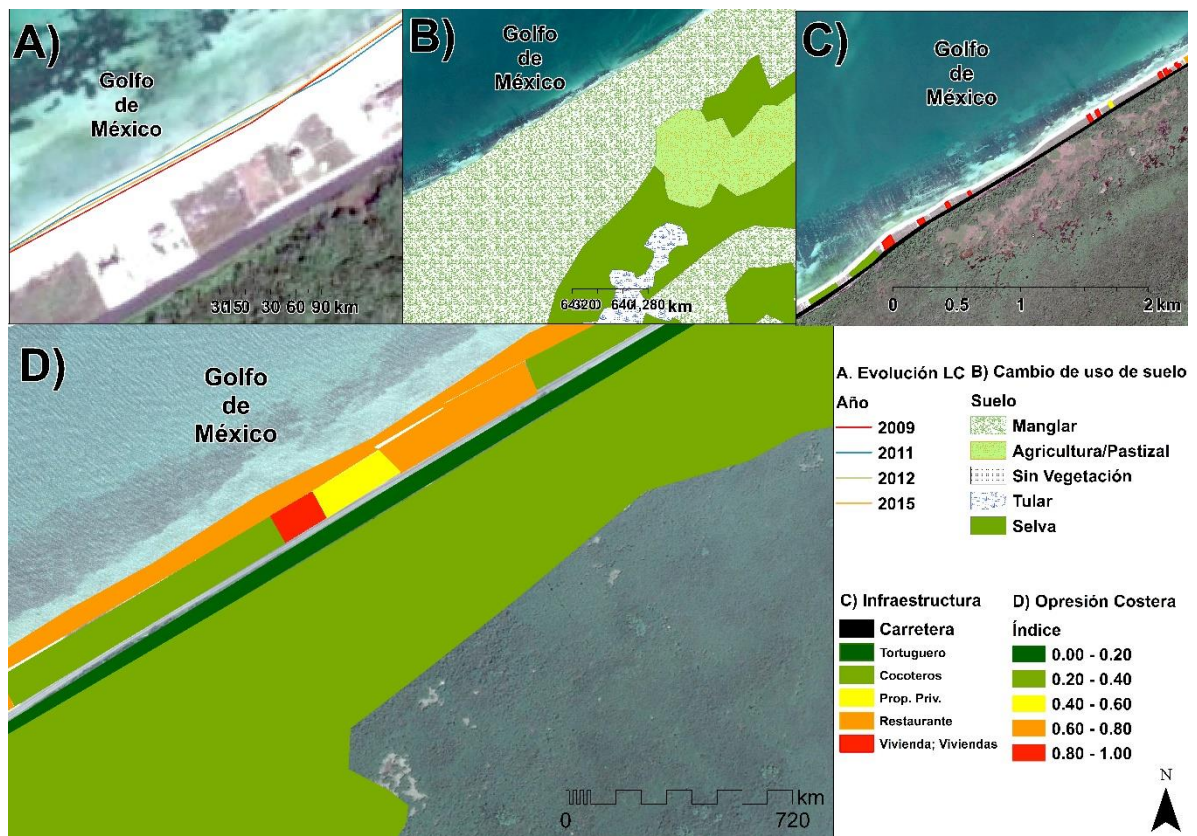


Figura 47. Variables y cuantificación de opresión costera para Chenkán, Campeche. A). Evolución de la línea de costa. B). Cambio en el uso de suelo. C) Infraestructura. D) Índice de opresión costera.

Sin embargo, pese a que la línea de costa y el uso de suelo no han tenido cambios significativos, es necesario destacar que, debido a la propia naturaleza del litoral costero y la interacción de los vientos, existe una pequeña zona (1.5 ha) que presenta una opresión costera entre Media y Máxima. Los resultados indican que este máximo nivel de opresión costera se debe a la presencia de un restaurante que se encuentra ubicado junto a una zona de anidación de tortugas. Si bien el campamento tortuguero cuenta con la certificación pertinente para mantener su función, los desechos provenientes del restaurante son vertidos directamente al mar. Debido a la importancia ecológica que ha adquirido esta zona, la población y el número de viviendas han tenido un aumento considerable por las concesiones que el gobierno del estado está otorgando con la intención de impulsar el turismo en la zona (Figura 37C), sin embargo, los residuos domésticos también están en aumento.

Sabancuy

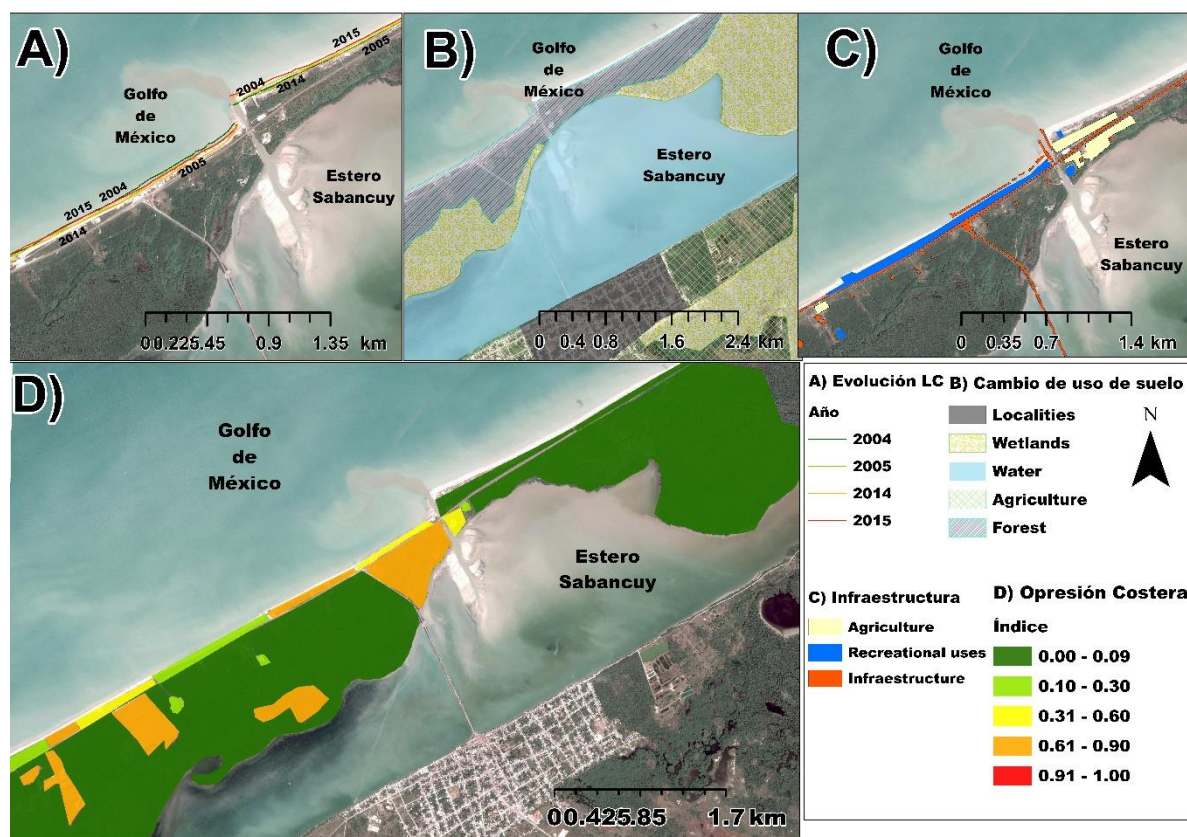


Figura 48. Variables y cuantificación de opresión costera para Sabancuy, Campeche. A) Evolución de la línea de costa. B) Cambio de uso de suelo. C) Infraestructura. D) Índice de opresión costera.

Sabancuy tuvo el mayor grado (Fuerte Pertenencia) de opresión costera (0.81) (Figura 38A). El fenómeno fue desencadenado principalmente por el desplazamiento de la costa (Figura 38B) ocasionado por estructuras de protección costera, es decir, montículos de escombros y los espigones. Éstas indujeron un desequilibrio en la dinámica sedimentaria (Figura 38C),

modificando drásticamente la acumulación en el lado Este de la playa y causando retroceso en el lado Oeste (75 m y 35 m, respectivamente). El grado de opresión costera también se vio afectado por el cambio en el uso de suelo, ya que la vegetación nativa y las tierras de cultivo fueron sustituidas por asentamientos humanos y desarrollo de infraestructura con fines recreativos (Figura 38D). Una consecuencia directa derivada del aumento de la población es la construcción de instalaciones de la red eléctrica y de líneas telefónicas, al igual que el aumento de carreteras y puentes (Figura 38C).

Playa Norte

Esta localidad presenta un índice Medio de opresión costera de 0.52 (Figura 39D) como respuesta al incremento de la zona comercial e infraestructura urbana en la zona (Figura 39C). Los valores más altos del desplazamiento de la línea de costa oscilan entre los 190 metros de erosión y los 80 metros de acreción (Figura 39 A).

En este caso, al igual que en Sabancuy, el aumento de infraestructura urbana ha sustituido las áreas de manglar y tular ocasionando que la pérdida de estos tipos de vegetación constituya más de 50 hectáreas en conjunto (Figura 39B).

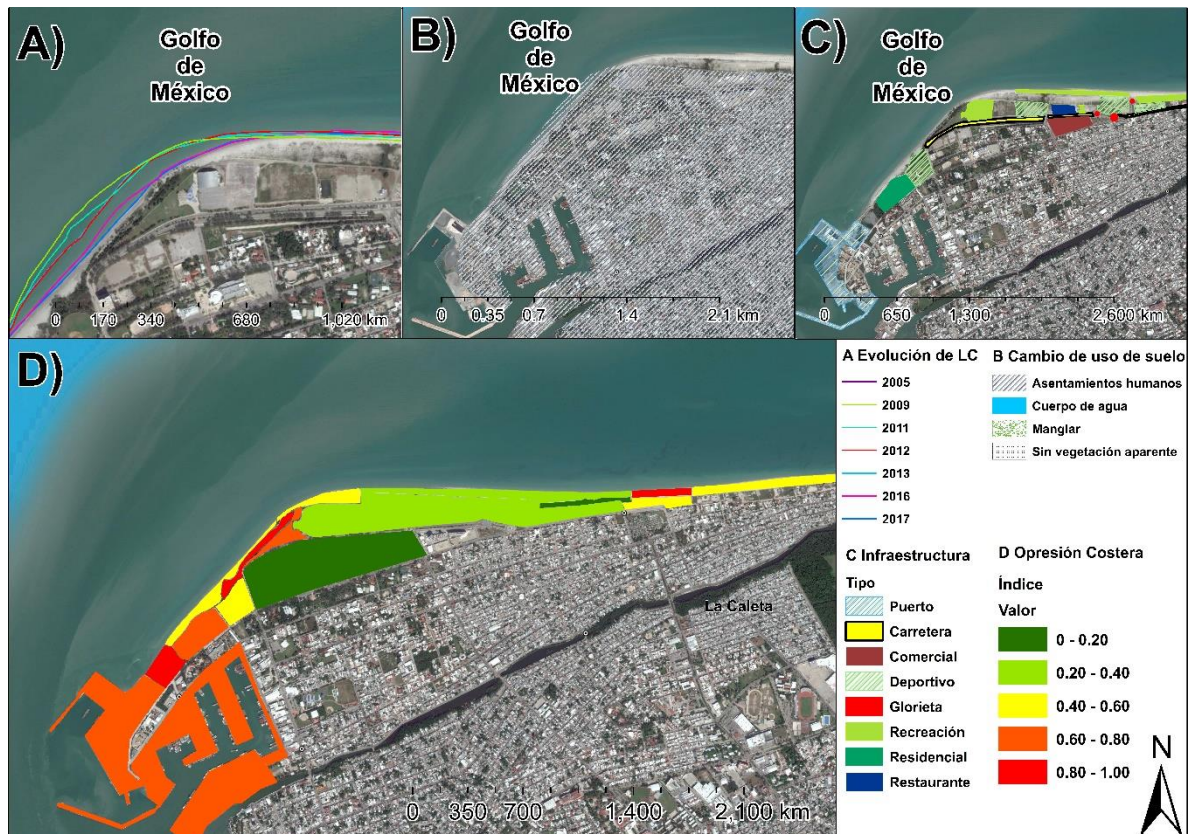


Figura 49. Variables y cuantificación de opresión costera para Sabancuy, Campeche. A) Evolución de la línea de costa. B) Cambio de uso de suelo. C) Infraestructura. D) Índice de opresión costera.

Nuevo Campechito

De todas las localidades analizadas en este estudio, Nuevo Campechito es el sitio con el índice de opresión más bajo. Tiene un valor de un valor de 0.19 (Figura 40A), es decir, Mínimo (Sin Presencia) de opresión costera. Originalmente, Nuevo Campechito era un poblado pesquero que tuvo que ser reubicado debido a los impactos asociados a la presencia de tormentas muy intensas (Figura 40B). La principal consecuencia de la reubicación del poblado es la ausencia de infraestructura urbana derivada del aumento poblacional, así como la poca influencia humana en la costa, misma que explica el bajo índice de opresión costera en esta área (Figura 40D).

Un suceso antropogénico que ocurrió en la zona fue la construcción del puente que conecta los estados de Campeche y Tabasco, ya que interrumpió abruptamente la conectividad de los ecosistemas costeros (Figura 40C). Sin embargo, esto también ayuda a que la opresión costera siga manteniéndose en niveles bajos.

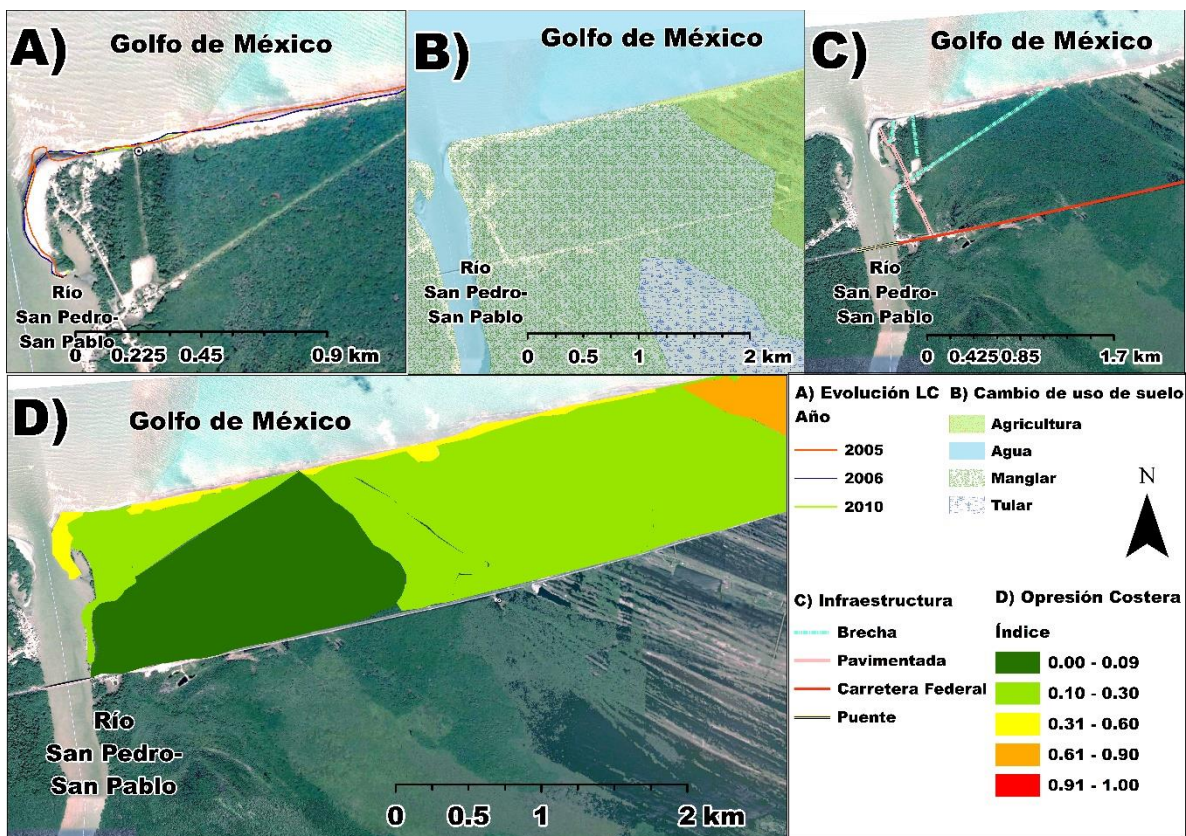


Figura 50. Variables y cuantificación de opresión costera para Nuevo Campechito, Campeche. A) Evolución de la línea de costa. B) Cambio de uso de suelo. C) Infraestructura. D) índice de opresión costera.

8.2. Toma de Decisiones

Como se mencionó anteriormente, el programa NetLogo es una útil herramienta para simular fenómenos naturales por lo que, en este estudio en particular, se utilizará para establecer conexiones entre el fenómeno de opresión costera y la toma de decisiones.

Para este análisis, los parámetros de entrada en el programa NetLogo son las variables que inducen opresión costera (cambio de uso de suelo, erosión, etc.) y se denominan “tortugas”. Por otra parte, los resultados obtenidos con lógica difusa se consideran los “agentes”. Una vez que se tiene la información necesaria para correr el programa, el experto decide qué acciones tomará con cada interacción resultante entre tortugas y agentes (Figura 51).

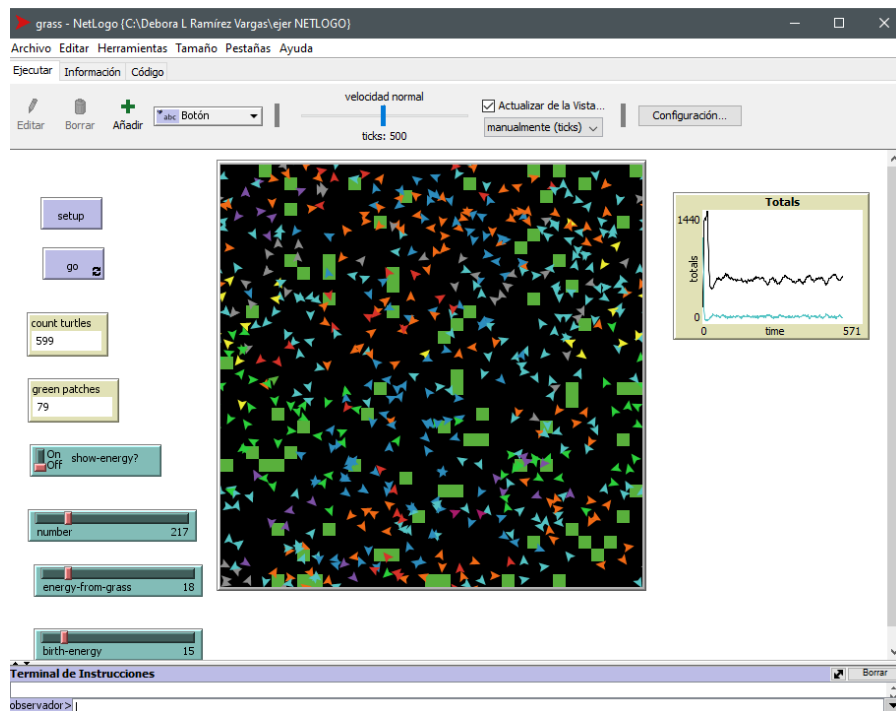


Figura 51. Modelo de toma de decisiones para acciones en la opresión costera.

El código generado para este análisis es el siguiente:

```
turtles-own [energy]
to setup
  clear-all
  setup-patches
  setup-turtles
  reset-ticks
end

to go
  if ticks >= 500 [stop]
  move-turtles
  eat-grass
  reproduce
  check-death
  regrow-grass
  tick
end

to move-turtles
  ask turtles [
    right random 360
    forward 1
    set energy energy - 1
  ]
end

to setup-patches
  ask patches [ set pcolor green ]
end

to setup-turtles
  create-turtles number [ setxy random-pxcor
  random-ycor ]
end

to eat-grass
  ask turtles [
    if pcolor = green [
      set pcolor black
      set energy (energy + energy-from-grass)
    ]
  ]
  ifelse show-energy?
  [ set label energy ]
  [ set label "" ]
end

to reproduce
  ask turtles [
    if energy > birth-energy [
      set energy energy - birth-energy
      hatch 1 [ set energy birth-energy ]
    ]
  ]
end

to check-death
  ask turtles [
    if energy <= 0 [die]
  ]
end

to regrow-grass
  ask patches [
    if random 100 < 3 [set pcolor green ]
  ]
end
```


De lo anterior, podemos argumentar lo siguiente:

Actualmente, una de las mayores amenazas que enfrentan las zonas costeras es la opresión costera. Las áreas con playas arenosas son muy vulnerables a este proceso (Defeo *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2017), debido a que las playas están atrapadas entre el aumento del nivel del mar, la erosión y el aumento de los desarrollos costeros.

La infraestructura en la costa modifica la morfología y el funcionamiento costero y, por lo tanto, limita la resistencia y la capacidad de recuperación de los ecosistemas para responder a fenómenos propios del sistema que incluyen tormentas, mareas, mareas de tormenta y corrientes (Lithgow *et al.*, 2013; Martínez, *et al.*, 2014). Dicha recuperación depende de numerosos factores morfológicos, ecológicos y socioeconómicos (Reggiani *et al.*, 2015) y, como consecuencia, es un desafío que requiere un enfoque transdisciplinario y comunicación entre las diferentes partes interesadas en una sociedad (Lithgow *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2017).

Las diversas alternativas que proporciona el manejo costero integrado, como la infraestructura verde, proveen de una herramienta muy viable para evitar el uso de infraestructura rígida que provoca la opresión costera. El uso de infraestructura verde ha aumentado en los últimos años, siendo una alternativa efectiva, estética, asequible y ecológica. Por ejemplo, en el trabajo de Silva *et al.* (2016) se introdujo un arrecife artificial con el objetivo de proporcionar protección a la costa de Puerto Morelos, México, mismo que sirvió como base para la compensación de servicios ecosistémicos. Este estudio demostró que los cambios en el uso de suelo son el primer paso hacia el endurecimiento costero y promueven la erosión y la pérdida de la resistencia del ecosistema. La infraestructura verde también aumenta la resiliencia, reduce el riesgo y brinda recuperación en la provisión de servicios clave del ecosistema, logrando así múltiples objetivos ambientales, sociales y económicos (Silva *et al.*, 2016).

Un ejemplo que se asemeja al estudio de Silva *et al.* (2016) es el caso de Playa Bonita. La opresión costera en Playa Bonita comenzó con la degradación de la vegetación natural, ya que la vegetación nativa se convirtió en tierra de cultivo; y poco tiempo después, se desarrollaron asentamientos humanos. El municipio de Lerma-Marañón se expandió sobre las dunas y los humedales, lo que provocó la pérdida de los servicios de protección y aumentó la vulnerabilidad del área a eventos extremos, como los huracanes. Además, la pérdida de vegetación indujo la erosión ocasionando el aumento de estructuras de protección y provocando mayor interrupción hidrosedimentaria.

9. CONSIDERACIONES FINALES

En este estudio se evaluaron las variables que desencadenan la opresión costera y se diseñó un método para cuantificar el fenómeno en un área determinada. La evolución de la costa, la intensidad y la frecuencia de las tormentas, el cambio en el uso de la tierra y el endurecimiento de la costa, se consideraron variables que influyen y contribuyen directamente a la opresión costera. El enfoque de lógica difusa empleado en este trabajo es la principal contribución para entender el fenómeno de opresión costera en el estado de Campeche, siendo las costas de Isla Arena, Playa Bonita, Chekán Sabancuy, Playa Norte y Nuevo Campechito, las localidades prioritarias para entender dicho proceso físico.

Variables que ocasionan opresión costera y consecuencias

La mayoría de los estudios sobre la opresión costera han modelado variables con efectos a largo plazo, como inundaciones y erosión, en relación con el aumento del nivel del mar (Schleupner, 2008; Doody, 2013; Pontee, 2013). A su vez, las variables con efecto a corto plazo, como los cambios en el uso del suelo y la dinámica hidrosedimentaria, se han considerado variables menos relevantes. En este estudio, la creciente frecuencia e intensidad de las tormentas se consideró el principal desencadenante de la opresión costera. Los cambios en el uso de suelo también representan un factor significativo, ya que reducen la conectividad del ecosistema y la resistencia a los estresores naturales y antropogénicos. Por ejemplo, el número de casas en Playa Bonita aumentó 6 veces en un período de cinco años. Como consecuencia, se instalaron estructuras como antenas de energía y telefónicas, provocando la fragmentación del ecosistema y facilitando el desarrollo de nuevos asentamientos. Además, la visión a corto plazo del desarrollo costero en la región ha dado lugar a la construcción de estructuras de protección costera mal planificadas que han modificado negativamente la dinámica hidrosedimentaria ocasionando el aumento de la erosión.

La opresión costera resultante impide la migración de los ecosistemas costeros hacia el interior, lo que lleva a su degradación y a la disminución de la provisión de servicios ecosistémicos como la protección contra tormentas (Galbraith *et al.*, 2002; Dugan *et al.*, 2010). Por ejemplo, las costas de Playa Bonita, Sabancuy, Playa Norte y Nuevo Campechito están amenazadas por el desarrollo de infraestructura, cambios en el uso del suelo y la construcción de estructuras de protección y zonas recreativas, lo que se traduce en erosión, pérdida de ecosistemas costeros y cambios en la dinámica del transporte de sedimentos.

Considerando que la degradación de la vegetación natural facilita el establecimiento de nuevos asentamientos humanos y conduce a la pérdida de los servicios de protección del

ecosistema, la falta de planificación del uso de suelo alienta a una expansión descontrolada en áreas altamente vulnerables.

Los nuevos asentamientos requieren instalaciones eléctricas, líneas telefónicas, y protección costera. La electricidad y las líneas telefónicas generalmente se extienden desde las ciudades más grandes a las más pequeñas o recientemente establecidas, fragmentando las tierras de cultivo y los ecosistemas naturales. Además, las medidas de protección costera a menudo incluyen infraestructura rígida, como espigones que, en muchos casos, interrumpen la dinámica hidrosedimentaria de un área y transfieren la erosión a otras playas. Estos desarrollos impactan la resiliencia y la resistencia del ecosistema y, por lo tanto, aumentan la vulnerabilidad de los asentamientos, lo que resulta en la necesidad de aún más medidas de protección.

La interrupción de la dinámica hidrosedimentaria por la construcción de infraestructura mal planificada es un fenómeno común en todo el mundo y es un factor causal de la opresión costera (Ponte, 2013).

Opresión costera y ecosistemas

La opresión costera es un fenómeno de interés mundial ocasionado principalmente por los asentamientos humanos. El aumento de la población y la migración hacia zonas costeras implica un incremento en la demanda de infraestructura y servicios que satisfagan las necesidades de la misma población. Aunado a esto, la falta de una legislación que permita la convivencia de la ingeniería tradicional con las nuevas alternativas ecológicas provoca que el fenómeno de opresión costera siga incrementándose en todas las costas.

Se sabe que cualquier ecosistema posee características propias que son el resultado de la interacción entre procesos físicos y morfológicos y que dependen de la zona geográfica en la que se encuentren, por lo que la cuantificación del proceso de opresión costera se hará con base en las condiciones físicas y morfológicas presentes en cada sitio. Un punto importante para considerar es la conectividad que existe entre la zona costera, los ecosistemas que se desarrollan en ésta y la influencia antropogénica, ya que el entendimiento de la conectividad de dichos elementos permitirá un manejo óptimo y, a la vez, evitará la presencia de daños irreparables que no permitan la resiliencia en cada zona.

El manejo costero integrado es una tarea de importancia mundial, ya que los bienes y servicios provenientes de la zona costera tienen un gran valor económico y, a veces, son irremplazables. Promover el manejo costero integrado, así como alternativas multifuncionales que incluyan el uso de infraestructura verde, permitirá contar con diversas soluciones para problemas particulares de una o varias zonas de estudio.

Similitud y diferencias con otros métodos para medir la opresión costera

El índice para medir la opresión costera propuesto aquí es similar a los índices de Martínez *et al.* (2014) y Schlepner (2008), quienes consideraron variables cualitativas y cuantitativas. Sin embargo, esos estudios midieron la opresión costera a través de modelos matemáticos clásicos y ecuaciones analíticas. En consecuencia, las variables que inducen la opresión costera no estaban ordenadas jerárquicamente.

En contraste, en este estudio se implementó un enfoque de lógica difusa como alternativa para medir la opresión costera. Este enfoque se ha utilizado para resolver problemas complejos similares, como es el caso de Torio y Chmura (2013). Estos autores utilizaron varias herramientas para identificar lugares donde es probable que se produzca una opresión costera con el fin de mejorar el manejo costero allí. También desarrollaron un índice que se puede utilizar para evaluar el potencial de la opresión costera en las fronteras de un solo humedal y para clasificar las amenazas que enfrentan múltiples humedales. El índice se calcula de acuerdo con la topografía circundante y las superficies impermeables, que se identifican mediante técnicas de detección de luz y rango, basadas en emisión térmica avanzada en el espacio, imágenes de radiometría de reflexión y un enfoque de lógica difusa. Estos autores suponen que la opresión costera varía continuamente sobre un paisaje costero y probaron varias funciones de lógica difusa antes de asignar un peso continuo (de 0 a 1) correspondiente a la influencia de la pendiente y las superficies impermeables en la opresión costera.

La principal similitud entre el índice propuesto en este trabajo y el planteado por Torio y Chmura (2013) es que ambos evalúan el grado de opresión costera, es decir, ambos índices proveen de un valor numérico para el sitio que se está evaluando. Además, consideran variables como el cambio en el uso de suelo y la presencia de infraestructura costera. Sin embargo, cada autor tiene un enfoque diferente del uso de la lógica difusa. Torio y Chmura miden la incertidumbre de su índice de opresión costera, mientras que en este estudio la lógica difusa se empleó para medir todas las variables relacionadas con el fenómeno de opresión costera.

Una de las principales ventajas del enfoque de lógica difusa es que facilita la integración de variables de distinta naturaleza, como el desarrollo de infraestructura costera, la cuantificación y valoración de los ecosistemas costeros y la erosión. Además, este enfoque proporciona resultados cuantitativos, en términos del grado de opresión costera. Los beneficios concretos de esta herramienta se basan en su capacidad para aplicarse en numerosas áreas costeras y en el uso de un modelo matemático que permite una mayor precisión.

10. CONCLUSIONES

Los principales factores que inducen la opresión costera son la creciente intensidad y frecuencia de las tormentas, las estructuras de protección costera y los cambios en el uso del suelo.

Otras variables, como es la pérdida de conectividad de los ecosistemas costeros, la instalación de infraestructura de comunicación y el aumento del nivel del mar también tienen importantes impactos en el proceso de opresión costera.

La metodología propuesta aquí para medir el grado de opresión costera se puede utilizar para ayudar a los administradores de recursos costeros estatales y locales a tomar decisiones informadas con respecto a la planificación costera.

El empleo del enfoque de lógica difusa es útil para evaluar la interacción de variables de diferentes tipos, ya que este enfoque permite el uso de variables con valores numéricos o lingüísticos.

Este método puede aplicarse fácilmente a gran escala. Es una herramienta útil en la práctica del manejo integrado de la zona costera y sirve como marco para aumentar la resistencia y la resistencia de las comunidades a los eventos de perturbación extrema.

Finalmente, el método propuesto aquí puede auxiliar a los tomadores de decisiones y planificadores con fondos limitados para identificar áreas prioritarias de conservación, y también determinar las variables con mayor impacto en un sitio en particular, para concentrar los esfuerzos en estas.

Los resultados sugieren que la costa de Campeche está experimentando un proceso de opresión costera que amenaza sus ecosistemas costeros altamente diversos y pone en peligro la infraestructura y la vida humana debido al creciente riesgo de erosión e inundaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Alexandra Fries: Integration and Application Network, University of Maryland Center for Environmental Science (ian.umces.edu/imagelibrary/).

ANIDE, 2005. Metodología para la determinación de erosión costera. Informe UO-IT-01. Cuernavaca, Morelos 120 p. (Citado con autorización del propietario de la tecnología).

Ayala-Pérez, L. A., Vasco-Villa, O., & Sosa-López, A. (2014). Evaluación de las asociaciones de peces dominantes influenciadas por el ciclo nictemeral y la variación temporal en la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche, México. *CienciaUAT*, 9(1), 33-43.

Black & Veatch: 2006. Coastal squeeze study. Issue 2. Report produced for the Environment Agency, 30 pp + appendices.

Carbajal Domínguez, J.A., 2010. Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. p. 359-380. *En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p*

Carranza-Edwards, A., Márquez-García, A. Z., Tapia-González, C. I., Rosales-Hoz, L. & Alatorre-Mendieta, M. A. 2015. Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 21-43.

CONABIO: Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (2017)

D´Negri, C. & De Vito, E. L.2006. Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, 6(3),126-136

Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D.S., Schlacher, T.A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M. and Scapini, F. 2009. Threats to sandy beach ecosystems: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81, 1-12.

Defra, 2003. Guidance note on managed realignment: Land purchase, compensation and payment for alternative beneficial land use., s.l.: s.n.

Defra, 2005. Coastal squeeze implications for flood management the guidance, s.l.: s.n.

Doody, J.P. 2004. 'Coastal Squeeze': An Historical Perspective. *Journal of Coastal Conservation* 10: 129-138.

Doody, J.P. 2013. Coastal squeeze and managed realignment in southeast England, does it tell us anything about the future? *Ocean & Coastal Management* 79: 34-41.

Dugan, J.E., Defeo, O., Jaramillo, E., Jones, A.R., Lastra, M., Nel, R., Peterson, C.H., Scapini, F., Schlacher, T., Schoeman, D.S. 2010. Give Beach Ecosystems Their Day in the Sun. *Science* 329: 1146.

English Nature Staff, 2006. Coastal squeeze, saltmarsh loss and Special Protection Areas., Peterborough: Report produced by Royal Haskoning for English Nature.

Galbraith, H., Jones, R., Park, R., Clough, J., Herrod-Julius, S., Harrington, B., Page, G. 2002. Global Climate Change and Sea Level Rise: Potential Losses of Intertidal Habitat for Shorebirds. *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology* 25: 173-183.

García, E.: Clasificación climática de Köppen, UNAM. Instituto de Geografía. UNAM (1973)

González-Morcillo, C. 2005. Lógica difusa. Una introducción práctica. Técnicas de Softcomputing.

González-Morcillo, C. 2012. Lógica Difusa. Una introducción práctica. España: s.n.

Google Earth. Image©: DigitalGlobe. Image ©2017. TerraMetrics. Data 510, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO., (2017)

Guzmán-Hernández, V. & Andrade, M. G. 1998. Changes in the nesting levels of *Eretmochelys imbricata* in Campeche, Mexico after two decades of protection. In EIGHTEENTH INTERNATIONAL SEA TURTLE SYMPOSIUM (p. 9).

IMSE-CNM 2018. Copyright (c) 2018, Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM). Todos los derechos reservados.

INEGI: Censo de Población y Vivienda. INEGI (2010)

INEGI: Información por entidad. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/poblacion/densidad.aspx?tema=me&e=04> (2017)

IPCC: Climate change 2007. The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. pp. 333. Cambridge University Press: Cambridge, UK

(https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm) (2007)

Jackson, A.C. & McIlvenny, J. 2011.: Coastal squeeze on rocky shores in northern Scotland and some possible ecological impacts. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 400: 314-321.

Kouro, S., & Musalem, R. 2002. Control mediante lógica difusa. *Técnicas Modernas en Automática* 1: 1-7.

Lithgow, D., Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., Hesp, P.A., Flores, P., Gachuz, S., Rodríguez-Revelo, N., Jiménez-Orocio, O., Mendoza-González, G., Álvarez-Molina, L.L. 2013.: Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology* 199: 214-224.

Mamdani, E. H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8(6), 669-678.

Martinez M. Luisa, Silva Rodolfo, Van Tussenbroek B., Guzmán-Rodríguez O., Mendoza Edgar and López-Portillo J.A. 2020. Coastal squeeze: a multi-scale process. *Global Environmental Change. Human and Policy Dimensions*.

Martínez-Vázquez, L.M., Mendoza-González, G., Silva-Casarín, R., Mendoza-Baldwin, E. 2014. Land use changes and sea level rise may induce a “coastal squeeze” on the coasts of Veracruz, Mexico. *Global Environmental Change* 29: 180-188.

Mateo-Cid, L.E.; Mendoza-González, A.C.; Ávila-Ortiz, A.G., and Díaz Martínez, S., 2013. Algas marinas bentónicas del litoral de Campeche, México. *Acta Botánica Mexicana*, 104, 53-92.

Nava-Fuentes, C.J.; Arenas-Granados, P., and Cardoso-Martins, F., 2018. Integrated coastal management in Campeche, Mexico; a review after the Mexican marine and coastal national policy. *Ocean and Coastal Management*, 154(1), 34-45.

PED-Campeche: Plan Estatal de Desarrollo de Campeche. pp. 136. Gobierno del estado de Campeche. Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado (COPLADE). Edición: Secretaría de Planeación (www.campeche.gob.mx), Mexico (2015)

Pérez, M. A. O., & Linares, A. P. M. (2000). Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. INE, SEMARNAP, UNAM, US, Country Studies Program, Mexico, 83-102.

Pontee, N. 2013. Defining coastal squeeze: A discussion. *Ocean & Coastal Management* 84: 204-207.

Posada-Vanegas, G., Vega-Serratos, E., Silva-Casarín, R. 2013. Peligros naturales en el estado de Campeche: cuantificación y protección civil. CENAPRED.

Quintero, J. D. 2016 Guía de buenas prácticas para carreteras ambientalmente amigables. Panamá. The Nature Conservancy & Latin America Conservation Council.

Ramos-Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama-Campillo, L. M., Pech-Pool, D. & Ortiz-Pérez, M. A.. 2016. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68(3): 581-598.

Reggiani, A., Nijkamp, P., Lanzi, D. 2015. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81: 4-15.

Rivera-Arriaga, E., & Villalobos, G. (2001). The coast of Mexico: approaches for its management. *Ocean & coastal management*, 44(11-12), 729-756.

Sancho-Caparrini, F. 2019. NetLogo: Fundamentos. <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=179>

Schleupner, C. 2008. Evaluation of coastal squeeze and its consequences for the Caribbean island Martinique. *Ocean & Coastal Management* 51: 383-390.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Gaceta Ecológica (Listado de proyectos que ingresan a evaluación de Impacto Ambiental). <http://sinat.semarnat.gob.mx/Gaceta/aniosgaceta> (2017)

Silva, R., Ruíz, G., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Espinal, J. & Mendoza, E. 2008. *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Atlántica Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Silva, R.; Mendoza, E.; Mariño-Tapia, I.; Martínez, M.L., and Escalante, E., 2016. An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. In: VilaConcejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (ICS) 2016 (Sydney, Australia)*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 75, pp. 467-471.

Silva, R.; Villatoro, M.M.; Mendoza, E.; Delgadillo, M.A.; Escudero, M.; Delgado, A., and Ortiz, M.A., 2011. *Caracterización de la Zona Costera y Planteamiento de Elementos Técnicos para la Elaboración de Criterios de Regulación y Manejo Sustentable*. Mexico City, Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 152p.

SOPRAM. 2006. MANIFESTACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. MODALIDAD PARTICULAR DE LA OBRA: "PROYECTO DEL ESTABLECIMIENTO DE ARRECIFES ARTIFICIALES TIPO REEF BALL FRENTE A LA ZONA COSTERA DE ISLA ARENA, MUNICIPIO DE CALKINÍ, ESTADO DE CAMPECHE. 2DA. ETAPA".

The WAVEWATCH III R *Development Group* (WW3DG), 2016: *User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16*. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices

Thorslund, J., Jarsjö, J., Jaramillo, F., Jawitz, J.W., Manzoni, S., Basu, N.B., Chalov, S.R., Cohen, M.J., Creed, I.F., Goldenberg, R., Hylin, A., Kalantari, Z., Koussis, A.D., Lyon, S.W., Mazi, K., Mård, J., Persson, K., Pietroń, J., Prieto, C., Quin, A., Van Meter, K., Destouni, G. 2017. Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering* 108: 489-497.

Tol, R. S. (2012). On the uncertainty about the total economic impact of climate change. *Environmental and Resource Economics*, 53(1), 97-116.

Torio, D.D., & Chmura, G.L.: Assessing Coastal Squeeze of Tidal Wetlands. *Journal of Coastal Research* 29: 1049-1061.

Torres, V., Márquez-García, A., Bolongaro Crevenna Recaséns, A., Chavarria-Hernández, J., Márquez-García, E., Expósito-Díaz, G. 2010. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. FALTA NÚMERO DE PÁGINAS Y NÚMERO DE REVISTA

Van der Biest, K., De Nocker, L., Provoost, S., Boerema, A., Staes, J., Meire, P. 2017. Dune dynamics safeguard ecosystem services. *Ocean & Coastal Management* 149: 148-158 .

Vázquez, A. (2008). Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y de los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe Final INE/A1-051. México DF: Instituto Nacional de Ecología.

Villalobos-Zapata, G.J. & Mendoza Vega, J. 2010. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México.FALTA EL NÚMERO DE PÁGINAS

Yan, X.; Zhang, R., and Knutson, T.R., 2017. The role of Atlantic overturning circulation in the recent decline of Atlantic major hurricane frequency. *Nature Communications*, 8(1), 1695.

Zadeh, L., 1965. Fuzzy set. *Information and Control*, 8:338-353. s.l.:s.n.

Zadeh, L., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex system.. s.l.:IEEE Transaction of System Man and Cybernetics, 1:28-44.

Zadeh, L., 1975. The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. *Science* 8-9:199-249, 301-357, 43-80.

Zarco-Perelló, S., Mascaró, M., Garza-Pérez, R. y Simoes, N. 2013. Topografía y comunidad coralina de los arrecifes de Sisal, Banco de Campeche, Yucatán, México. *Hidrobiológica* 23(1): 28-41.

Zarco-Perelló, S., Mascaró, M., Garza-Pérez, R. y Simoes, N. 2013. Topografía y comunidad coralina de los arrecifes de Sisal, Banco de Campeche, Yucatán, México. *Hidrobiológica* 23(1): 28-41.

Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2011. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 315-334. *En*: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.): *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p.