



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

“Determinación de los procesos de erosión y acreción en la zona litoral entre Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec, Oaxaca, México”

T E S I S

Que para optar el grado académico de:

MAESTRA EN CIENCIAS

(Geología Marina)

P r e s e n t a

Hidrobióloga Inna Valeria Acevedo Granados

Tutor Principal:

Dr. Antonio Zoilo Márquez García

(Universidad Autónoma Metropolitana)

Comité Tutorial

Dra. María Luisa Machain Castillo (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)

Dr. Armstrong Aldrin Sam John Selvamony (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)

Dr. Juan José Kasper Zubillaga (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)

Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)

CDMX, ENERO, 2022



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.



Universidad Nacional
Autónoma de México



Biblioteca Central

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM



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 está 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.

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México por permitir formarme en la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que por medio del apoyo económico brindado mediante la beca 676677 durante los estudios de maestría permitió dedicarme a la investigación.

Al Dr. Antonio Z. Márquez G., tutor principal, por el apoyo y dirección durante la realización de esta tesis, por el apoyo económico y logístico para la recolección de muestras mediante el proyecto de la UAM Iztapalapa: *Caracterización ecológica de los ambientes costeros mexicanos*.

Al Dr. John S. Armstrong Altrin S., Dra. Ma. Luisa Machain C., Dr. J. J. Kasper Zubillaga y el Dr. Miguel A. Alatorre M., quienes forman parte del Jurado de Examen de grado y que siempre estuvieron atentos a mis avances generando cuestionamientos que me ayudaron a profundizar los temas.

Al apoyo proporcionado por el Dr. John S. Armstrong Altrin S. y a Ricardo Martínez por la facilidad y apoyo del uso del laboratorio de sedimentología para el tratamiento de muestras.

Al Ing. Manuel Islas por la enseñanza en Sistemas de Información Geográfica, base para la realización de esta tesis y la presentación de Liliana, y a ella por la organización del conocimiento en el taller de tesis.

DEDICATORIA

Al Dr. Antonio Márquez, por emprender conmigo este proyecto y por compartir sus conocimientos con risas y todo el apoyo siempre.

A mi mamá que siempre me hizo saber que podía todo, a mi papá que me dijo, tu no dejas las cosas para después papás; a mis hermanos ejemplo de trabajo y perseverancia, y con ellos a toda la red de amistades y soporte que generaron y me ayudaron a llegar a este punto, especialmente: Anabel y Armando, que me ayudaron a crecer con la paz de contar en ellos, a Lupita Quiroz que desde su amor a mi madre y extensión a mí y a mi hijo me forzó a ser mejor siempre.

A mis amigos que siempre me dieron alas cuando sentí que ya no podía más: a Victor Luna, que me enseñó de todo, a mis niñas por las horas de estudio y retro durante el posgrado tanto presencial como en línea: Bren, Fabi, Lu y Andee; a Pao que me ayudó siempre a entender química, a Carlos con su ejemplo entusiasta durante el posgrado y a Rodrigo que me explica física, matemáticas y todas las dudas que me surgen.

A mi tío Fernando que me revisó tantas veces mi redacción y ortografía.

A Francisco y a Erick mi hijo y motor, por el apoyo, amor y comprensión estos dos años y siempre, todo mi amor.

"If there is magic on this planet, it is contained in water"

Loren Eisely

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	14
I.I	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
I.II	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	16
I.III	HIPÓTESIS	16
I.IV	OBJETIVOS	17
I.V	JUSTIFICACIÓN	18
II.	MARCO TEÓRICO	19
II.I	ANTECEDENTES	19
II.II	LÍNEA DE COSTA	22
II.III	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA	23
II.IV	SEDIMENTOLOGÍA	26
II.V	CAMBIO CLIMÁTICO	27
II.VI	VULNERABILIDAD	29
III.	ÁREA DE ESTUDIO	31
III.I	LOCALIZACIÓN.....	31
III.II	FISIOGRAFÍA.....	31
III.III	GEOLOGÍA	31
III.IV	TECTÓNICA	32

III.V	CLIMA.....	34
III.VI	CORRIENTES MARINAS.....	34
III.VII	VEGETACIÓN	38
III.VIII	DUNAS	39
III.IX	HIDROLOGÍA.....	39
IV.	METODOLOGÍA.....	40
IV.I	EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LA ZONA LITORAL	40
IV.II	DETERMINACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE LA ZONA LITORAL	43
IV.III	CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOLOGÍA DE PLAYA	46
IV.IV	DETERMINACIÓN DE VULNERABILIDAD COSTERA POR EROSIÓN ..	48
V.	RESULTADOS Y DISUSIÓN.....	54
V.I	EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA.....	54
V.II	MORFOLOGÍA DE PLAYA	67
V.III	SEDIMENTOLOGÍA DE PLAYA.....	74
V.IV	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA	79
VI.	CONCLUSIONES.....	94
VII.	REFERENCIAS	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis histórico de las declaratorias emitidas de desastre natural para el municipio de Santa María Colotepec, Oaxaca en el periodo 2001-2010. Fuente: SEDESOL, 2012.	20
Tabla 2. Tendencias del nivel medio del mar para algunas estaciones mareográficas del SMN en el Pacífico Mexicano. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles. Fuente: Zavala, et al., 2010.....	29
Tabla 3. Clasificación de la variable MOR "geología/geomorfología". Fuente: Ojeda, et al., 2008.	49
Tabla 4. Clasificación de la variable ERO "tasas de cambio de la línea de costa". Fuente: Ojeda et al., 2008.....	50
Tabla 5. Clasificación de la variable "Susceptibilidad a los procesos de inundación marina (pendiente costera)". Fuente: Ojeda et al., 2008.....	50
Tabla 6. Ponderación de valores del Índice Topográfico (ITOPO).....	51
Tabla 7. Valores para clasificación de variable Hs, altura de oleaje significativo Fuente: Ojeda et al., 2008.	51
Tabla 8. Valores para clasificación de variable LEV, nivel relativo del mar. Fuente: Ojeda et al., 2008.	52
Tabla 9. Valores para clasificación de variable TID, rango mareal medio. Fuente: Ojeda et al., 2008.	52
Tabla 10. Valores de clasificación para el IVC.	53
Tabla 11. Valores de distancia, pendiente y altura de playa.....	69

Tabla 12. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable geológica/geomorfológica (MOR) 1= muy baja, 2 = baja, 3 = media, 4 = alta, 5 = muy alta, de acuerdo con Ojeda et al., 2008.....	79
Tabla 13. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable del cambio en la línea de costa a largo plazo (ERO) 1= muy baja, 2 = baja, 3 = media, 4 = alta, 5 = muy alta, de acuerdo con Ojeda et al., 2008	81
Tabla 14. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de distancia de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA	84
Tabla 15. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de pendiente de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA	85
Tabla 16. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de altura de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA	86
Tabla 17. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable topográfica (ITOPO) de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA	87
Tabla 18. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable de altura media significativa (HS) de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA.....	88
Tabla 19. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable de tasa de cambio del nivel relativo del mar (LEV) de acuerdo con Ojeda et al., 2008.....	89
Tabla 20. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable rango mareal medio (TID) de acuerdo con Ojeda et al., 2008.	89

Tabla 21. Valores obtenidos para el IVC de acuerdo con la ecuación propuesta por Ojeda et al., 2008.	90
Tabla 22. Clasificación del IVC	91
Tabla 23. IVC calculado para los 11 puntos.....	92
Tabla 24. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de la zona de estudio.	94
Tabla 25. Recopilación de material cartográfico e imágenes satelitales obtenidas para el presente estudio	106
Tabla 26. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Punta Bacocho.	112
Tabla 27. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Puerto Angelito.	113
Tabla 28. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Bahía Principal.	114
Tabla 29. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Zicatela.	115
Tabla 30. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Desembocadura	117
Tabla 31. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de punto 1 Los Naranjos.....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la relación espacial de algunos de los indicadores costeros de uso común. Fuente: Boack y Turner, 2005.	22
Figura 2. Formaciones costeras asociadas a la erosión costera. Fuente: Silva y Mendoza, 2015.	23
Figura 3. Formaciones costeras asociadas a la acumulación costera. Fuente: Silva y Mendoza, 2015.	24
Figura 4. Anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019 con respecto a la media de 1951- 1980. Todos señalan que la última década ha sido la más cálida en el registro. Fuente: NASA GISS.	27
Figura 5. Elevación del nivel del mar para el S. XXI, en relación con el periodo 1986-2005, para los 4 escenarios RCP. Fuente: Reporte IPCC-AR5.	28
Figura 6. Mapa de ubicación de zona de estudio con la delimitación de zonas: (1(Los Naranjos), 2 y 3 (Barra de Colotepec): Desembocadura del Río Colotepec, 4, 5 y 6: Zicatela, 7: Bahía Principal, 8: Puerto Angelito y 9, 10 y 11: Punta Bacocho) y los 11 puntos de muestreo. Fuente: Elaboración propia con información obtenida de INEGI.	30
Figura 7. Carta geológica Puerto Escondido Fuente: SGM, 2002.	32
Figura 8. Estructuras geológicas regionales en el Estado de Oaxaca. Fuente: INEGI, 2012.	33
Figura 9. Corrientes de marea durante invierno con dirección al sureste. Fuente: windy.com Satélite – Copernicus.	35
Figura 10. Oleaje durante el invierno.	35
Figura 11. Regiones matrices de huracanes. Fuente: INEGI.	37

Figura 12. Puntos de muestreo del área de estudio en los que se realizaron 3 perfiles por cada punto muestreado abarcando 100 m de largo con una separación de 50 m entre perfil para infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 13. Esquema de perfil de playa. El muestreo de los 11 puntos se obtuvo en las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Fuente: Carranza-Edwards y Caso, 1994.	45
Figura 14. Tasas de erosión (mov. neto/ años) obtenidas a partir de un total de 128 transectos con mediciones de desplazamiento para los últimos 17 años (2003 - 2020).....	55
Figura 15. Tasa de erosión y acreción promedio anual para 8 destinos turísticos ubicados en el Pacífico. Fuente: SECTUR - ANIDE, 2017.	56
Figura 16. Mapa de procesos de erosión-acreción Punta Bacocho. Fuente: Elaboración propia con imagen base obtenida de Google Earth Professional.....	57
Figura 17. Comparativa de imágenes satelitales de Punta Bacocho obtenidas de Google Earth Professional para los años 2020 y 2009 respectivamente.....	58
Figura 18. Mapa de procesos de erosión-acreción Puerto Angelito. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 19. Comparativa de imágenes satelitales de Puerto Angelito obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.....	60
Figura 20. Mapa de procesos de erosión-acreción Bahía Principal. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 21. Comparativa de imágenes satelitales de Bahía Principal obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.....	62
Figura 22. Mapa de procesos de erosión-acreción en la zona de Zicatela. Fuente: Elaboración propia.....	63

Figura 23. Comparativa de imágenes satelitales de Zicatela obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.....	64
Figura 24. Mapa de procesos de erosión-acreción en la zona de Desembocadura. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 25. Comparativa de imágenes satelitales de la zona de Desembocadura obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.	66
Figura 26. Clasificación geomorfológica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 27. Perfil de playa del punto 11 (Bacocho).....	70
Figura 28. Perfil de playa del punto 4 (Zicatela).....	71
Figura 29. Perfil de playa del punto 5 (Zicatela).....	71
Figura 30. Perfil de playa para el punto 9 (Punta Bacocho).....	72
Figura 31. Tamaño de partículas ($Mz \phi$) de sedimentos obtenidas para los 11 puntos de muestreo	74
Figura 32. Desviación estándar de partículas sedimentarias (σ) obtenidas para los 11 puntos	76
Figura 33. Asimetría de partículas sedimentarias obtenidas para los 11 puntos de muestreo	77
Figura 34. Curtosis de partículas sedimentarias obtenidas para los 11 puntos de muestreo	78
Figura 35. Representación de la variable de vulnerabilidad geológica geomorfológica (MOR)	80
Figura 36. Representación de la variable del cambio en la línea de costa a largo plazo (ERO)	82

Figura 37. Representación del Índice de Vulnerabilidad Costera en la zona de estudio (de Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec)	93
Figura 38. Visualización de valores de píxeles	109
Figura 39 . Imagen con línea seco-húmeda delimitada por píxeles en color negro	110

I. INTRODUCCIÓN

I.I DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La zona litoral es conocida por ser una de las áreas más dinámicas en la Tierra en donde se localizan ecosistemas únicos en la interacción de la tierra, mar y atmósfera; adaptados a la constante modificación de la línea de costa, la cual avanza o retrocede según predomine la acumulación o erosión de los sedimentos; dichas adaptaciones les permiten amortiguar la energía (oleaje, viento y corrientes) brindando protección a las poblaciones y ecosistemas que se encuentran en esta interfaz (Torres Rodríguez *et al.*, 2010; Silva Casarin *et al.*, 2017).

El cambio en la línea de costa implica un conjunto de procesos como la marea, el oleaje, los ciclones, el transporte de sedimento y sus barreras ya sean naturales o creadas por el hombre; los procesos que afectan esta zona pueden ocurrir en diversas escalas, desde instantes (horas) hasta intervalos geológicos (miles o más años) y la comprensión de estos procesos requiere del estudio de la dinámica que domina y controla la zona litoral (Krumbein y Sloss, 1963; Bird, 2008).

La detección de cambios en la morfología costera forma parte de la fase inicial del diagnóstico sobre el estado de un sistema costero y la causalidad de estos cambios es parte de un proceso más complejo que debe considerar los procesos costeros naturales y los antropogénicos (Palacio Aponte, 2001).

Las zonas costeras se han identificado como escenarios propicios para el desarrollo de actividades turísticas, siendo la tendencia la migración hacia ellas con el consiguiente aumento en la demanda de espacios y el incremento de la estructura urbana, el consumo de recursos y la generación de desechos; estando sometida a una constante modificación

antropogénica afectando la dinámica natural de los ecosistemas modificando a su vez, las cualidades de protección de los sistemas naturales (CONABIO, 2015; Jiménez Arenas *et al.*, 2021).

La invasión urbana ha derivado en la modificación de la playa, cuando la forma de la playa retrocede (existe erosión) o cambia, ciertos sitios que no eran propensos a inundaciones pueden llegar a serlo y aumenta su vulnerabilidad ante eventos meteorológicos extremos como huracanes, ciclones o marea de tormenta (Silva Casarin *et al.*, 2017, Portal, Espinoza & Carreño, 2014; Pulido & López, 2016).

Por tal motivo es necesario realizar estudios de vulnerabilidad, entendiendo esta como el grado de susceptibilidad o incapacidad de enfrentar efectos adversos; de los cuales, la erosión costera, el aumento del nivel del mar, y las inundaciones en el contexto del cambio climático son considerados entre los efectos más graves (Pachauri, Meyer, y Stocker, 2014).

I.II PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuál es el comportamiento de los procesos de erosión y acreción presentes en la zona de estudio?
2. ¿Existe una correlación entre las zonas más erosionadas con los sectores de mayor presión antrópica?
3. ¿Existe algún tipo de vulnerabilidad por erosión costera en la zona de estudio que requiera un plan de riesgos?

I.III HIPÓTESIS

La zona se localiza en una margen activa con grandes pendientes, por lo tanto, se espera encontrar una erosión menor, es decir, se espera encontrar un avance del mar tierra adentro de extensiones no mayores a las registradas para las costas del sur del Pacífico mexicano.

Considerando la pérdida de ecosistemas y cambio de uso de suelo por ocupación del ser humano, puede verse reflejado en una mayor erosión de ciertas zonas. Se espera encontrar una relación entre las zonas con mayor erosión con las zonas de mayor modificación del uso de suelo, las cuales, a su vez, serán las más vulnerables ante eventos meteorológicos extremos.

I.IV OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar los procesos de erosión y acreción presentes en la zona litoral de Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec, Oaxaca, México, que permitan proponer medidas de conservación o adaptación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una evaluación histórica de la zona litoral.
- Determinar la morfología de la zona litoral.
- Caracterizar la sedimentología de las playas.
- Determinar la vulnerabilidad costera por erosión.
- Proponer medidas de conservación o adaptación.

I.V JUSTIFICACIÓN

El estudio de los procesos costeros requiere explicar los diferentes tipos de formas costeras y comprender sus factores y mecanismos. Esto es cada vez más importante para el manejo sostenible de los recursos costeros (Krumbein y Sloss, 1963; Bird, 2008; Woodroffe, 2002).

El cambio en la línea de costa es clave para el desarrollo en la franja litoral, estudiar sus características y cambios a través del tiempo nos permite obtener una idea del porqué se generan cambios en este sistema ambiental.

Un manejo sostenible requiere de un estudio completo de procesos, factores y mecanismos que ocurren; permitiendo evaluar el impacto de las amenazas y así tener un manejo de la zona para minimizar los posibles riesgos.

Realizar un monitoreo de los procesos del litoral mexicano (11 592 Km) es una tarea muy grande que requiere tiempo, recursos humanos y económicos, por lo que con este estudio se pretende hacer un aporte para conocer los procesos costeros presentes y los efectos en un área de interés turístico como lo es la región de Puerto Escondido, en donde además encontramos diferentes ecosistemas (áreas naturales protegidas con manglares, zona de anidación de tortugas, lagunas costeras, la playa) y una actividad socio-económica en crecimiento (viviendas, áreas de recreación, pesca, zonas turísticas, hoteles, restaurantes, etc.).

Se propone una evaluación temporal que permita dar una perspectiva de los cambios ya ocurridos y una evaluación del estado actual de la costa en esta zona, que permita iniciar un monitoreo para un mejor manejo de los recursos, reduciendo los riesgos ante futuras amenazas.

II. MARCO TEÓRICO

II.I ANTECEDENTES

Oaxaca es uno de los estados con mayor erosión en su territorio tierra adentro, lo cual también tiene efecto en los ecosistemas de la zona costera. De acuerdo con el Instituto de Protección Civil de Oaxaca, el 51% del territorio del estado presenta una erosión moderada principalmente en la costa del Pacífico del Istmo de Tehuantepec y en algunas zonas de bosque en las Sierras Madre de Oaxaca y del Sur (González Ríos, 2011).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático realizó un análisis del impacto del cambio climático para cada estado de la República comprendido por el periodo de año 1980 – 2001, en él reportan que los desastres hidrometeorológicos más frecuentes para el estado de Oaxaca son las lluvias (55 registros en el periodo), las inundaciones (se registraron 48), los huracanes (20 registros), los incendios (18) y los vendavales (14); siendo los huracanes los que más afectan la zona costera (Moreno Casasola *et al.*, 2014).

Cabrera y Carranza - Edwards (2019), hicieron un estudio de la sedimentología de la playa la Escobilla donde también hicieron un análisis morfológico de la playa de esta zona. Sin embargo, para la zona de Puerto Escondido no se reportan estudios relacionados con la erosión de sus playas o vulnerabilidad costera.

Específicamente para el municipio de Santa María Colotepec se realizaron Atlas de Riesgos para el año 2003 y el 2012, en donde se señala la importancia de evaluar la dinámica de la zona, debido a su ubicación geográfica y a las condiciones de desarrollo de su población que han generado un estado de riesgo constante, se presenta el análisis histórico de desastres naturales realizado en dicho Atlas (Tabla 1) (SEDESOL, 2012).

Tabla 1. Análisis histórico de las declaratorias emitidas de desastre natural para el municipio de Santa María Colotepec, Oaxaca en el periodo 2001-2010. Fuente: SEDESOL, 2012.

Fechas en las que aconteció el desastre	Causa de la declaratoria	Fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación
26 y 27 de junio 2003	Daños provocados por las lluvias atípicas e impredecibles causadas por la Tormenta Tropical "Carlos"	11 de julio de 2003
3, 4 y 5 de octubre de 2005	Lluvias extremas ocasionadas por el Huracán Stan, mismas que afectaron a la población de las comunidades de Loma Bonita y Los Vargas, específicamente en la infraestructura del agua potable y saneamiento	11 de noviembre de 2005
30 de mayo al 2 de junio de 2007	Daños provocados por la Tormenta Tropical Bárbara hacia la población de bajos ingresos	5 de julio de 2007
25 – 27 de septiembre de 2010	Lluvias severas que afectaron al municipio, llevándolo a declararlo en estado de emergencia	15 de octubre de 2010
25 – 27 de septiembre de 2010	Inundaciones provocadas por el desbordamiento del Arroyo Corozal. Por lo menos, 4 localidades quedaron incomunicadas, puentes caídos y derrumbes	14 de enero de 2011
1 enero – 31 de diciembre de 2011	212 sismos registrados a lo largo de todo el año 2011, afectados en los bienes inmuebles de la población en general.	Diversas fuentes periodísticas

Puerto Escondido fue incorporado al programa mexicano de Playas Limpias en 2004 y al programa de Turismo Sustentable (antes agenda 21) en 2005. Ambas debido a la identificación de problemas ambientales generadas por la presencia de actividades humanas, tales como la descarga directa de aguas residuales al mar, rellenos sanitarios fuera de la normativa mexicana, la integración a dichos programas forma el parteaguas para una mayor participación e integración social (CONAGUA, 2010; Comité de Información SECTUR, 2013, Jiménez Arenas, *et. al.* 2021).

II.II LÍNEA DE COSTA

La ubicación de la línea de costa provee información con respecto a la zona litoral adyacente como es el volumen y ancho de playa, y se utiliza para cuantificar tasas históricas de cambio ya sea de erosión o acreción (Boak y Turner, 2005).

El cambio continuo de la línea de costa se convierte en algo poco práctico de investigar cuando se quiere referir a periodos cortos de tiempo. Sin embargo, a largo plazo (> 10 años) provee información sobre la modificación de esta en el tiempo con respecto a la erosión y la acreción (Carranza Edwards, 2010; García, 2017).

Para esto existen diversas maneras de analizar el movimiento (Figura 1), basadas en características apreciables a simple vista, en datos de mareas y basadas en indicadores de la línea de costa (imágenes digitales con identificadores no necesariamente visibles al ser humano) (Boak y Turner, 2005).

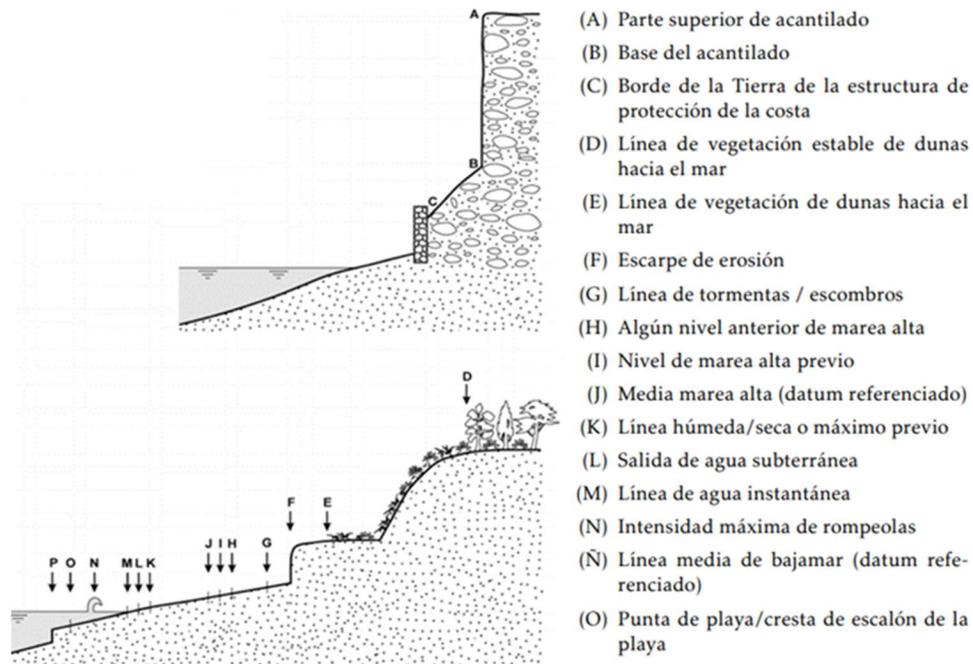


Figura 1. Esquema de la relación espacial de algunos de los indicadores costeros de uso común.
Fuente: Boack y Turner, 2005.

II.III GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La erosión y sedimentación cambian la forma de las costas y de esta manera se genera una gran variedad de formaciones litorales y paisajes. El proceso de erosión debido a los agentes marinos se inicia con las olas rompiendo sobre las rocas y haciendo retroceder los relieves terrestres que se encuentran a su paso. El contorno de la costa, en cuanto a formas relativas a la erosión se clasifica en (Figura 2) (Silva Casarin *et al.*, 2017):

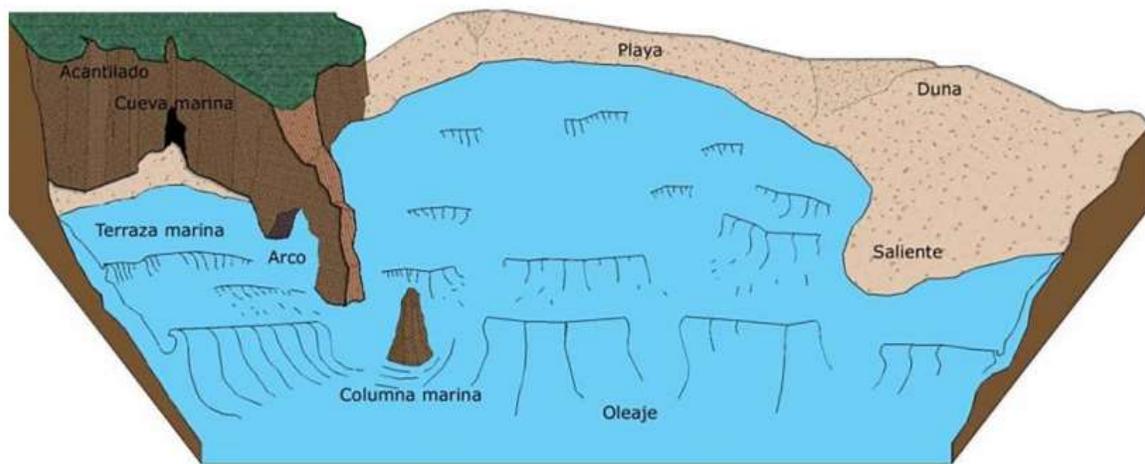


Figura 2. Formaciones costeras asociadas a la erosión costera. Fuente: Silva y Mendoza, 2015.

- Acantilados marinos (riscos): muros verticales de roca que se erosionaron por la acción principalmente, del oleaje, la abrasión hidráulica y la corrosión que induce el medio marino.
- Puntas rocosas (salientes, promontorios): cuando la roca que forma un acantilado es más resistente se forman contornos conocidos como salientes.
- Ensenadas y bahías: cuando la roca que forma un acantilado es de menor dureza resultan contornos como las ensenadas o bahías.

- Cuevas y arcos marinos: cuando una saliente es erosionada por ambos lados en su parte inferior se generan cuevas marinas que con el paso del tiempo se unen formando un arco marino.
- Plataformas de abrasión (plataforma construida por las olas): se origina a partir de fragmentos de un acantilado que fueron depositados en la parte frontal del mismo, La parte superior de la plataforma es visible cuando el fondo rocoso queda seco con la bajamar.
- Terrazas marinas (plataforma cortada por olas): Las terrazas marinas son antiguas plataformas cortadas por las olas y resultan de la degradación que sufre un acantilado.

Las formas costeras relacionadas con la acumulación son (Figura 3) (Silva Casarín *et al.*, 2017):



Figura 3. Formaciones costeras asociadas a la acumulación costera. Fuente: Silva y Mendoza, 2015.

- Playas: son zonas de depósito o acumulación de sedimento no consolidado, que se extiende hacia la tierra desde la línea de marea baja hasta un cambio topográfico como un acantilado, línea de dunas o punto en donde existe una vegetación permanente.
- Flechas y barras: depósitos de sedimentos, que cuando se forman de manera paralela a la costa se le conoce como flecha litoral.
- Barreras: es un cordón de sedimento dispuesto en paralelo a la costa continental, es la prolongación de una flecha y no siempre se une a tierra firme.
- Tómbolos: se generan por la unión de una barra con una isla, esta unión es conocida como tómbolo.
- Barras: islas largas y angostas, generalmente conformadas por arena que se extienden en una dirección casi paralela a la costa.
- Bajos: son acumulaciones de material que se ubican en la zona exterior de una playa y generalmente se encuentran sumergidos o pueden descubrirse ocasionalmente en condiciones de marea baja.

Desde el punto de vista geológico, los litorales rocosos son los que presentan menos modificaciones a los procesos de erosión-depósito, desarrollando una morfología muy característica como son los acantilados, terrazas marinas, farallones, puntas, bahías, playas de bolsillo principalmente.

Generalmente este tipo de litorales rocosos se asocian en el Pacífico a zonas costeras de colisión donde también se encuentran playas de poca amplitud y pendientes fuertes (Carranza *et al.*, 1975).

II.IV SEDIMENTOLOGÍA

Uno de los principales contribuyentes a la geomorfología costera, es el flujo de sedimentos proveniente desde la cuenca superior, media y baja de los sistemas fluviales que se encarga de mantener el equilibrio litoral, por lo que es importante conocer la procedencia de estos (Silvia Casarin *et al.*, 2017).

A manera regional, a lo largo de una costa, el material más grueso está más cerca del área fuente y el más fino más lejos, por eso el tamaño de grano es un criterio usado para conocer la fuente y la trayectoria del sedimento en la costa.

En una misma playa, las variaciones en la granulometría son indicadoras de cambios de energía; las variaciones longitudinales muestran cambios en la energía del oleaje, con las arenas más finas localizadas en áreas protegidas por salientes, donde la refracción reduce la energía de la ola (SNET, 2010).

Así también, la composición mineral de los sedimentos proporciona información de la procedencia a partir de la determinación de características geológicas de la zona costera que son erosionadas por los sistemas fluviales que transportan los sedimentos de diferente composición mineralógica a las playas, prevaleciendo las más resistentes a los procesos químicos y de abrasión.

Una de las propiedades físicas de mayor significado para conocer las condiciones hidrodinámicas que rigen el depósito de los sedimentos es el tamaño de la partícula (textura), frecuentemente denominada como: arena, limo o arcilla. Igualmente, es importante determinar la distribución de los tamaños en el ambiente, toda vez que son variables que frecuentemente determinan la mayoría de otras propiedades sedimentarias, por ejemplo, las

relacionadas con la velocidad de sedimentación, conductividad hidráulica, porosidad y grado de clasificación, entre otras (Pérez Rojas y Márquez García, 2017).

II.V CAMBIO CLIMÁTICO

La tendencia del cambio climático ha sido evidenciada por las diversas observaciones del incremento de las temperaturas oceánicas y atmosféricas (Figura 4), derretimiento de glaciares y el incremento del nivel del mar, que al mismo tiempo implican variaciones en la intensidad, trayectoria y frecuencia de huracanes y tormentas (Pachauri *et al.*, 2014).

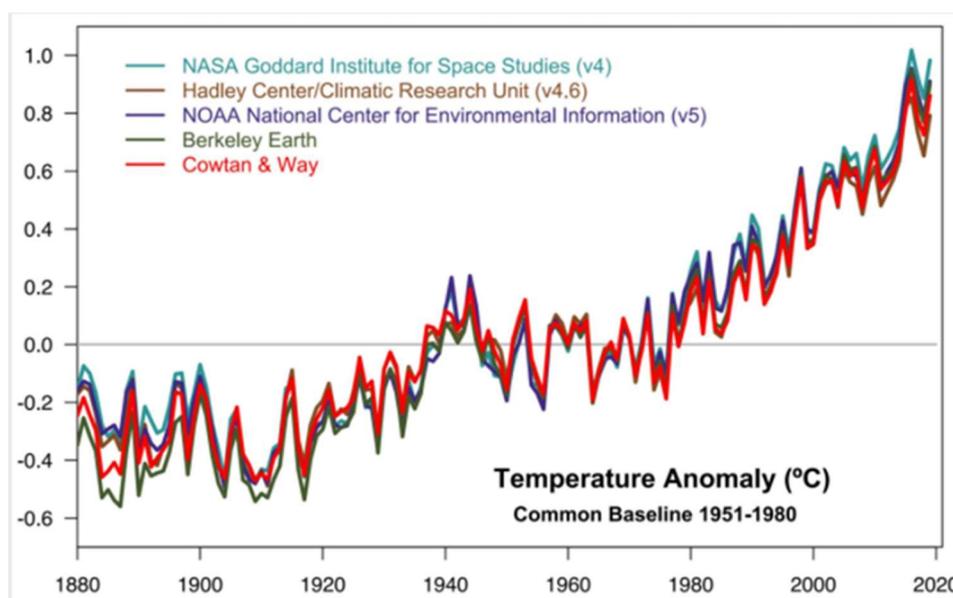


Figura 4. Anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019 con respecto a la media de 1951-1980. Todos señalan que la última década ha sido la más cálida en el registro. Fuente: NASA GISS.

De acuerdo con el equipo de trabajo I del IPCC, con cada grado de calentamiento adicional, aquellos fenómenos que en el pasado se producían una vez cada 100 años tendrán periodicidad anual a mediados de siglo en muchas regiones, agravando los riesgos a los que están expuestas muchas islas pequeñas y ciudades costeras de baja altitud (IPCC, 2019).

Los efectos de la elevación del nivel del mar en promedio de 3.6 mm/año (Figura 5) de acuerdo con el reporte del IPCC, así como el incremento en la intensidad y frecuencia de huracanes, son los impactos que generan los mayores cambios en la línea de costa, por lo que es importante considerarlos al momento de los estudios de los procesos costeros de erosión-depósito de la zona litoral.

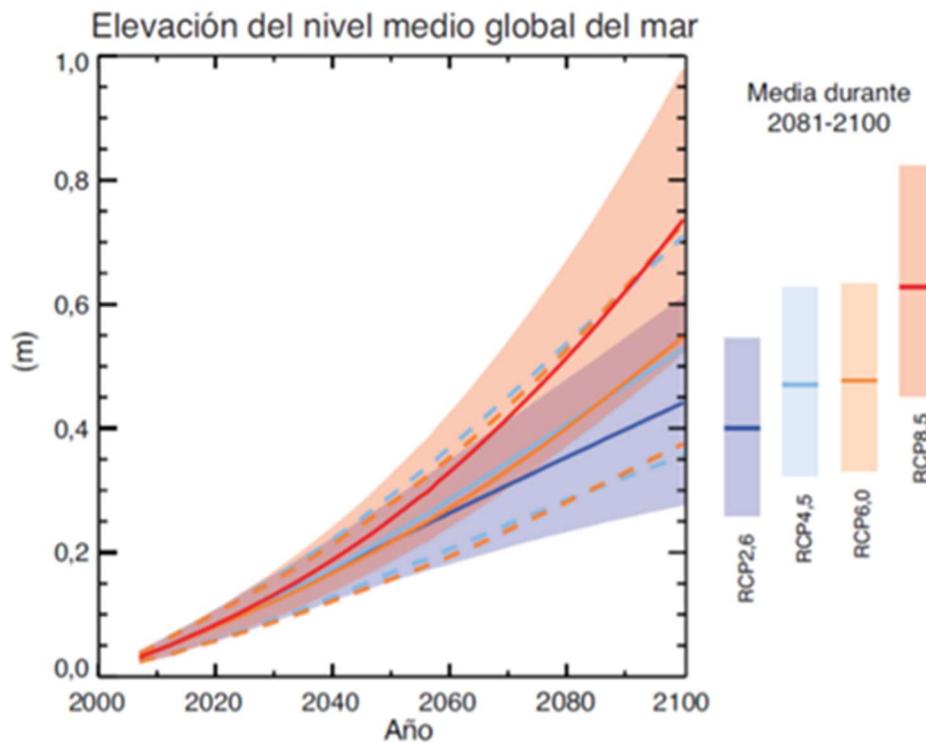


Figura 5. Elevación del nivel del mar para el S. XXI, en relación con el periodo 1986-2005, para los 4 escenarios RCP. Fuente: Reporte IPCC-AR5.

Las tendencias de cambio en el nivel medio del mar en el Océano Pacífico de México obtenidos de los registros del Servicio Mareográfico Nacional (SMN) (Tabla 2), muestran que el nivel medio del mar está en incremento con tasas variables; se observa que para Puerto Ángel y Salina Cruz, la tendencia es de 1.7 ± 11.7 mm año⁻¹ y de 1.1 ± 1.7 mm año⁻¹ respectivamente (Zavala, *et al.*, 2010).

Tabla 2. Tendencias del nivel medio del mar para algunas estaciones mareográficas del SMN en el Pacífico Mexicano. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles. Fuente: Zavala, et al., 2010.

Sitio	Tendencia (mm/año)	Período	No. de años en el cálculo
Acapulco, Gro.	-2.4 ± 3.2	1952-1999	36
Ensenada, B.C.	2.7 ± 1.7	1956-1992	30
La Paz, B.C.S.	1.0 ± 2.2	1952-1991	20
Manzanillo, Col.	3.3 ± 2.5	1954-1988	25
Mazatlán, Sin.	1.9 ± 3.3	1953-1992	19
Puerto Angel, Oax.	1.7 ± 11.7	1967-1990	7
Salina Cruz, Oax.	1.1 ± 1.7	1952-1992	26
San Carlos, B.C.S.	16.1 ± 13.2	1968-1987	8
Topolobampo, Sin.	3.0 ± 4.3	1952-1992	19
Guaymas, Son.	4.2 ± 1.7	1951-1991	25

II.VI VULNERABILIDAD

Las playas, dunas, estuarios y manglares, entre otros humedales costeros están integralmente adaptados de forma natural para mitigar los incrementos del nivel mar, la intensidad del oleaje, corrientes y vientos dominantes (Sánchez Montante, 2010).

No obstante, los cambios previstos como resultado del cambio climático se realizan con mayor rapidez en comparación con el índice de cambio natural a los que estos sistemas están adaptados teniendo como consecuencia: inundaciones, daños por inundación y tormentas, pérdida de humedales, erosión, intrusión de agua salada y aumento en los niveles freáticos (Pachauri *et al.*, 2014; Botello y Villanueva Fragoso, 2010).

Todo esto acrecienta la importancia de determinar la vulnerabilidad y riesgo de la zona costera ante amenazas como lo es la erosión, siendo necesario evaluar el riesgo en que se encuentran los ecosistemas costeros y las actividades humanas.

La erosión costera causa efectos como la pérdida de: playas, playas barreras y lagunas costeras, afectando las actividades socioeconómicas de la zona, lo que hace importante determinar la vulnerabilidad y riesgo ante dicha amenaza, sobre todo con la evolución de los cambios causados por el cambio climático.

El Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), es una de las metodologías pioneras para su evaluación, que evalúa y valora la sensibilidad del sistema costero al cambio del nivel del mar asociado al cambio climático, y su capacidad de adaptación, permitiendo definir medidas que reduzcan la vulnerabilidad (Ojeda Zújar, Álvarez Francoso, Matín Cajaraville, y Fraile Jurado, 2008).

En México se han realizado estudios del IVC con dicha metodología, como son:

- Tesis de Maestría (2013): *Morfodinámica y vulnerabilidad costera por erosión en playas de Tabasco* de Ayala Pérez Martha Patricia;
- Tesis de Maestría (2015): *Morfología y vulnerabilidad costera por erosión en el litoral de Campeche* de Castro Soriano Bianca; PEMA, UAM Iztapalapa.
- La Secretaría de Turismo (SECTUR) a través de CONACYT, realizó, a un estudio de vulnerabilidad costera de las bahías de Huatulco, así como de otros 20 sitios turísticos a lo largo de las costas del Golfo de México, Pacífico Mexicano y Mar Caribe: *Diagnósticos de la Vulnerabilidad ante el Cambio Climático*, desarrollados por la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A. C. (2011, 2014, 2018).

III. ÁREA DE ESTUDIO

III.I LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra en el sureste de México, en las costas del Estado de Oaxaca entre los límites municipales de San Pedro Mixtepec y Santa María Colotepec (entre las coordenadas N 15.80°, 15.86° y O 97.10°, 97.01°), colindando al sur con el Pacífico Tropical (Figura 6).

Puerto Escondido se conforma de 7 playas (Zicatela, Bahía Principal, Bacocho, Marinero, Carrizalillo, Puerto Angelito y Manzanillo), anexando el área de la desembocadura del río Colotepec, fueron muestreadas:

Punto 1: Los Naranjos

Punto 7: Bahía Principal

Puntos 2 y 3: Barra de Colotepec

Punto 8: Puerto Angelito

Puntos 4, 5 y 6: Zicatela

Puntos 9, 10 y 11: Bacocho

Se caracterizan por dunas frontales que facilitan el desarrollo de actividades recreativas, con una afluencia en su mayoría nacional, su oferta turística se basa en pequeñas y medianas empresas (SECTUR, 2019). Bahía Principal y Zicatela son las que presentan mayor actividad económica y recreativa, siendo para Bahía Principal la pesca y el turismo; y para Zicatela, además del turismo tiene importancia a nivel mundial para la actividad del surf, ya que presenta oleajes de hasta 6 m de altura (Zannie, 2020).

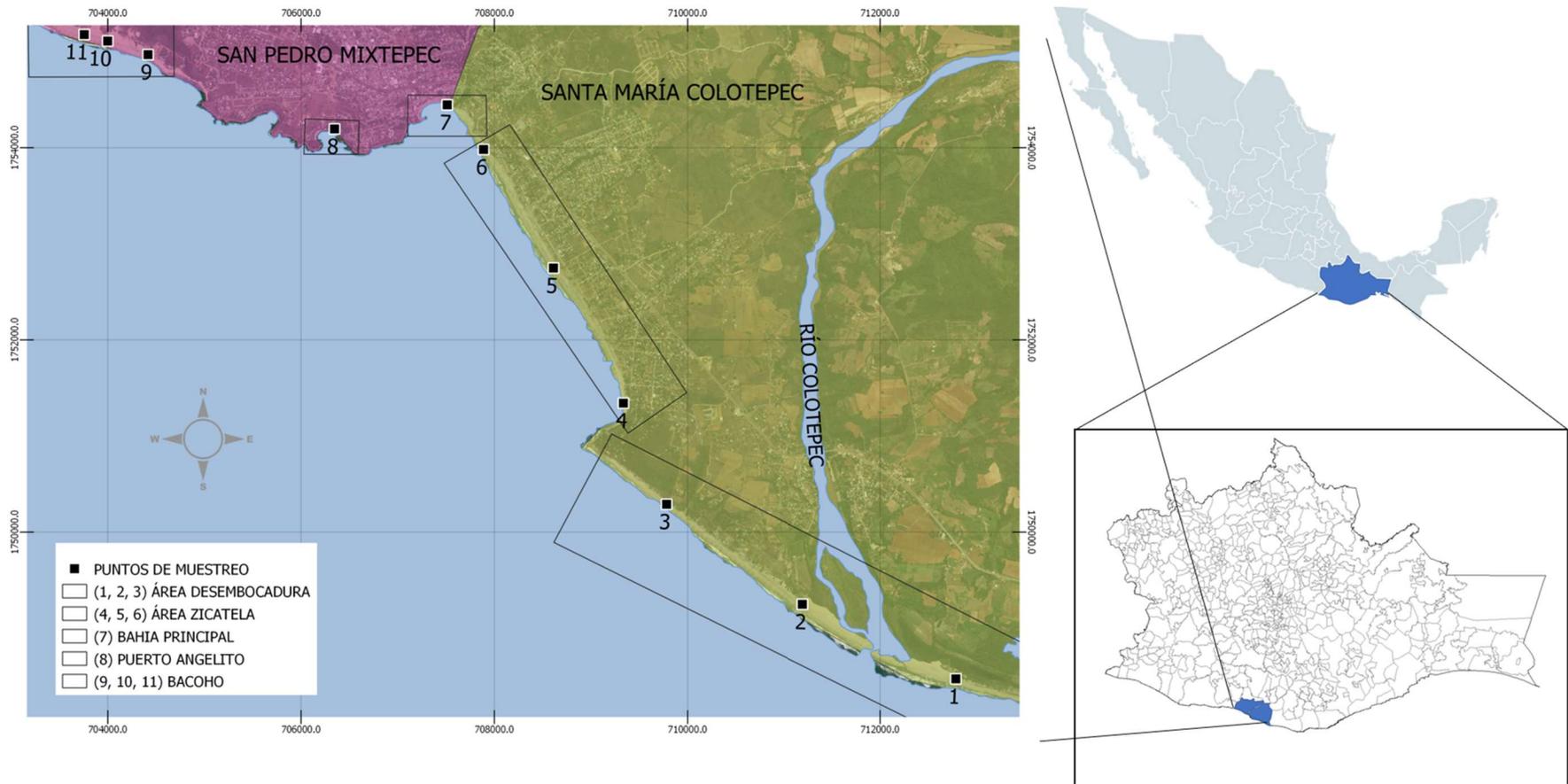


Figura 6. Mapa de ubicación de zona de estudio con la delimitación de zonas: (1(Los Naranjos), 2 y 3 (Barra de Colotepec): Desembocadura del Río Colotepec, 4, 5 y 6: Zicatela, 7: Bahía Principal, 8: Puerto Angelito y 9, 10 y 11: Punta Bacocho) y los 11 puntos de muestreo. Fuente: Elaboración propia con información obtenida de INEGI.

III.II FISIOGRAFÍA

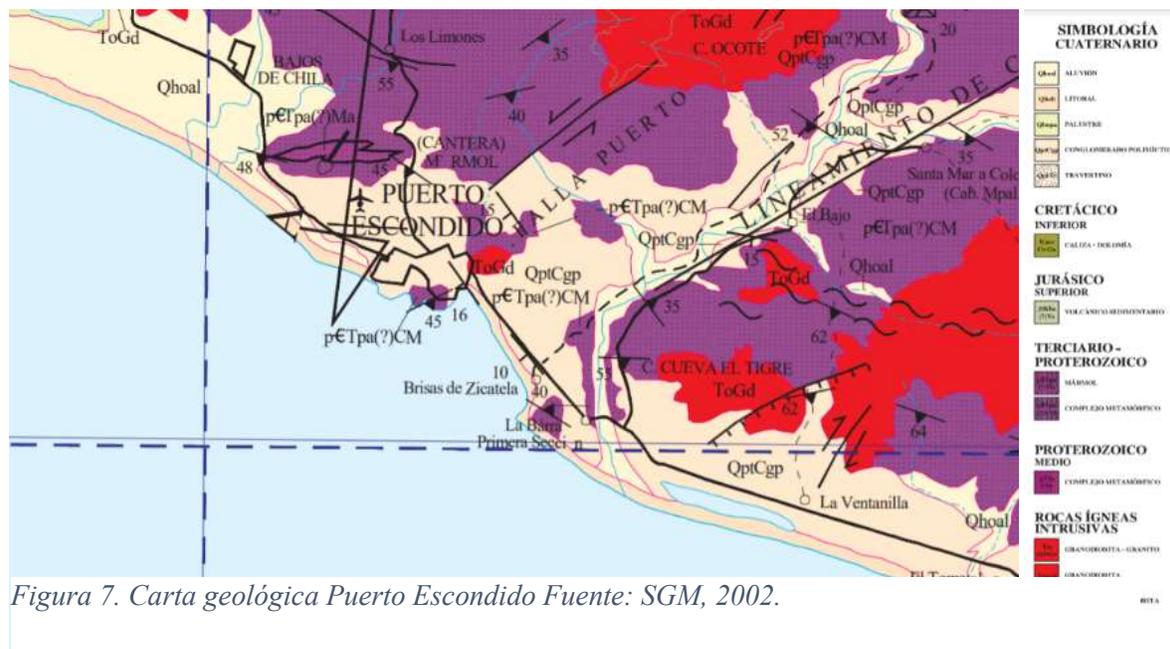
El territorio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur de la cual muchos de sus rasgos se deben a la relación con la Placa de Cocos (INEGI, 2012). Esta es una de las placas móviles que integran la litosfera o corteza exterior terrestre; emerge a la superficie del fondo del Océano Pacífico al suroeste y oeste de la costa, hacia las que se desplaza lentamente dos o tres centímetros al año para encontrar a lo largo de las mismas costas el sitio llamado "de subducción" donde buza nuevamente hacia el interior de la Tierra (SEDESOL, 2012).

La región de Puerto Escondido, Oaxaca se encuentra ubicada dentro de la subprovincia de Costas del Sur, ubicada junto a línea de costa, conformada por llanuras costeras con rocas y llanuras costeras con lomeríos. El paisaje que identifica esta región se caracteriza por una llanura estrecha, predominando áreas montañosas con pendientes prominentes, así como el desarrollo de una planicie costera de 14 km de longitud y una amplitud máxima de 3 km (INEGI, 2012).

III.III GEOLOGÍA

El municipio tiene una litología muy compleja en la que las rocas intrusivas cristalinas, especialmente los granitos y las metamórficas, tienen más importancia que en la mayoría de las provincias del norte. Debido a la variada litología que se presenta en estas sierras, se encuentran muchas y diferentes rocas cretácicas y terciarias, como calizas y calizas-lutitas del Cretácico Inferior, que se distribuyen principalmente al occidente. La Sierra Madre del Sur es la más compleja en cuanto a su constitución litológica y a la variedad de edades de las rocas, desde cerca del millón de años a más de 600 millones de años. Debe tener una actividad de ascenso vertical por su vecindad con la trinchera Mesoamericana y los ascensos bruscos

locales que se han producido debido a sismos en la costa. El territorio municipal se conformó de diferentes eventos tectónicos, remontándose su origen a la era Mesozoica. Las formaciones geológicas que la componen presentan una variada gama de litologías donde se distinguen sedimentos de origen marino asociados a secuencias volcánico – sedimentarias, derrames lávicos, cuerpos intrusivos y amplios dominios metamórficos (Figura 7) (SGM, 2002).



III.IV TECTÓNICA

La Región de Oaxaca se encuentra en una zona de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana, zona en donde se localizan aproximadamente el 85-90% de los sismos que ocurren en México (Atlas Riesgos Geológicos, 2003); se clasifica tectónicamente como de arrastre de Neo-eje Y geológica y genéticamente como primarias (deposición subaérea por ríos y viento, por movimientos diastróficos) (Carranza *et al.*, 1975)

Regionalmente, se caracteriza por la presencia de montañas conformadas por rocas cretácicas y paleozoicas, que forman topografía abrupta y escarpada, con elevaciones máximas,

aproximadas, de 3,800 m. El sistema de drenaje desarrollado sobre las rocas de la zona montañosa se enmarca en el de tipo rectangular, similar al patrón de fracturamiento regional que las afecta.

En la zona se encuentra la falla de Colotepec la cual es lateral derecha y se extiende desde Puerto Escondido hasta Miahuatlán (Figura 8).

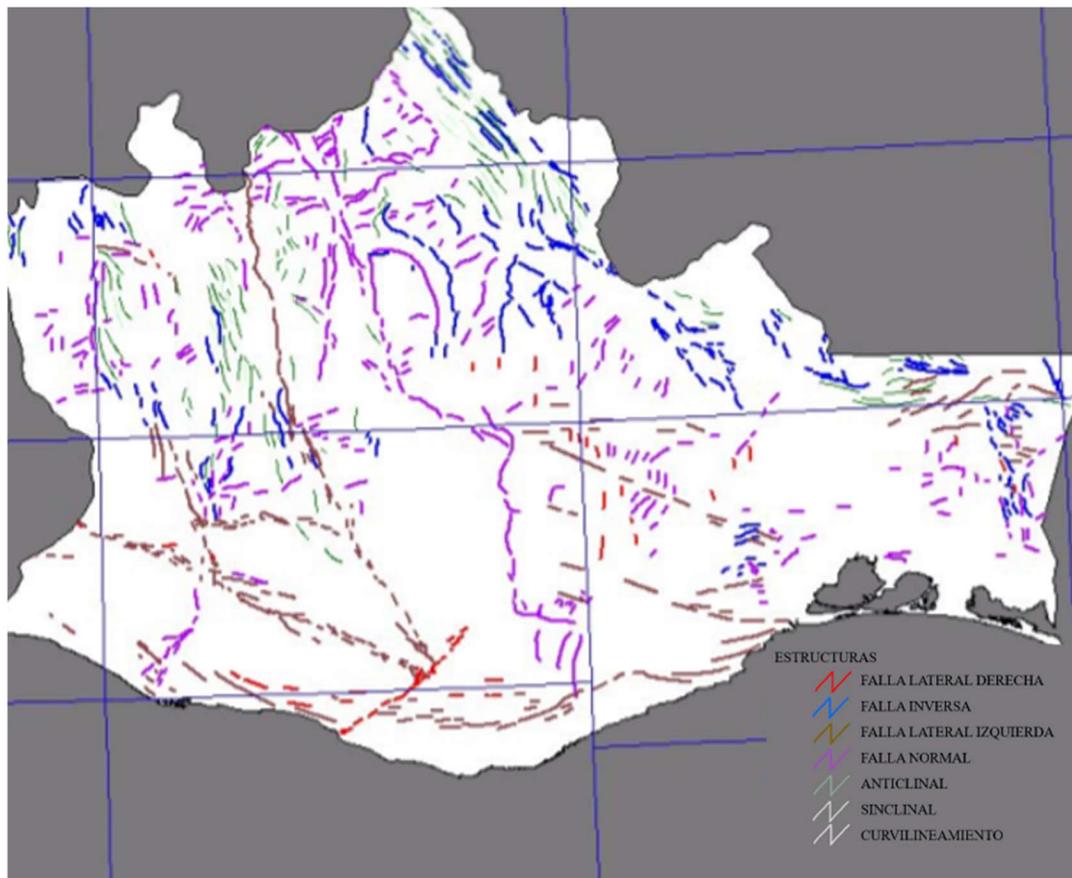


Figura 8. Estructuras geológicas regionales en el Estado de Oaxaca. Fuente: INEGI, 2012.

III.V CLIMA

La costa de Oaxaca pertenece a la región del trópico seco con una estacionalidad de lluvias muy marcada, meses extremadamente secos (enero – abril) y meses muy lluviosos (mayo – octubre). El clima predominante de esta región, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García, es el clima cálido-húmedo con lluvias en verano, el cual se manifiesta en los municipios como subtipo cálido sub-húmedo con lluvias en verano Aw2 (w) mismo que comprende un periodo intraestival sin lluvias (Atlas de riesgos, 2003)

En los municipios de San Pedro Mixtepec presenta un clima cálido, se caracteriza por sus temperaturas medias anuales que varían de 22 a 28° C y su temperatura media del mes más frío es de 18° C o más.

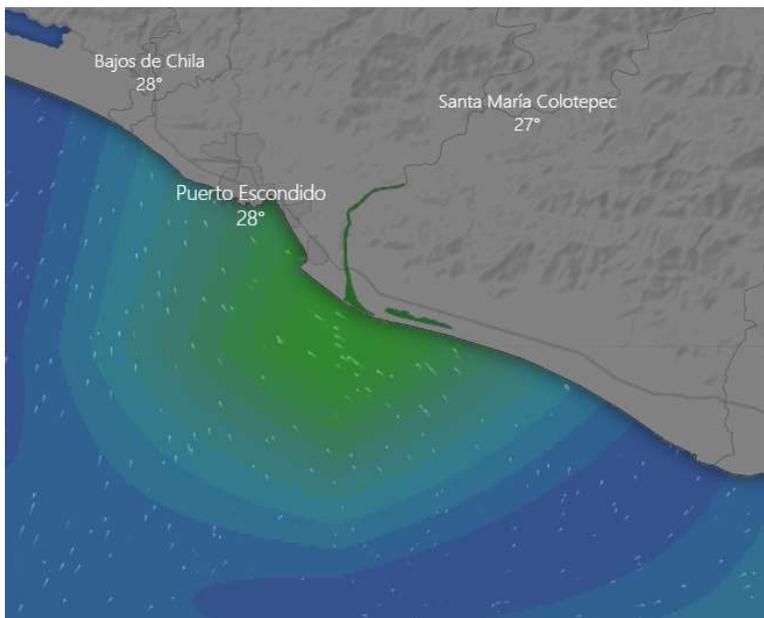
III.VI CORRIENTES MARINAS

La zona de estudio se encuentra en el límite Sur de la región oceanográfica mexicana que comprende desde Cabo San Lucas en Baja California Sur hasta el límite con el Golfo de Tehuantepec; con corrientes débiles y variables que en invierno tienen una dirección predominante hacia el sureste (Figura 9) y en el verano hacia el noreste; su temperatura superficial y salinidad son altas (Acevedo y Turok, 2000); las mareas están clasificadas como mixtas (valores de 0.77, 0.35 y 0.29) de acuerdo con la estación mareográfica de Puerto Ángel.



Figura 9. Corrientes de marea durante invierno con dirección al sureste.
Fuente: windy.com Satélite – Copernicus.

Anualmente predomina oleaje de procedencia Oeste con un componente Sur en el verano (Figura 10) donde las olas alcanzan alturas entre 0.3 y 2.4 m. (Díaz, 1995 citado en



Universidad del Mar, 2000):

- 1.94 m y 8 s en invierno
- 1.33 m y 7 s en primavera
- 2.46 m y 10 s en verano
- 1.68 m y 8 s en otoño

Figura 10. Oleaje durante el invierno.
Fuente: windy.com Satélite - Copérnicus.

El estado de Oaxaca por su orografía y situación geográfica es propenso a sufrir los embates de tormentas, las regiones que se consideran como generadoras son: La Cañada, Sierra Norte, Cuenca del Papaloapan e Istmo de Tehuantepec, pero cuando se tiene una afluencia importante de aire húmedo proveniente del Océano Pacífico, también los Valles Centrales sufren afectaciones por los efectos de estos sistemas (Atlas de riesgos, 2003).

Las ondas tropicales se originan en el Océano Atlántico, realizando un largo recorrido hasta el Océano Pacífico a su paso por el estado de Oaxaca provocan fuertes precipitaciones siendo las regiones del Istmo de Tehuantepec, Costa y Cuenca del Papaloapan las de mayor afectación por estos sistemas.

Cuando se presenta el fenómeno de “La Niña” las Ondas se originan muy fuertes ya que la temperatura superficial del Atlántico se eleva unos cuantos grados por arriba de lo normal (27° C), mientras que en la región tropical del Océano Pacífico se caracteriza por un enfriamiento, la zona intertropical de convergencia se desplaza al norte, originando fuertes precipitaciones el paso de estos sistemas sobre el estado lo que provoca severas afectaciones tales como: inundaciones, desbordamiento de ríos y deslaves de zonas montañosas (Atlas de riesgos, 2003).

Los huracanes que afectan directamente al territorio Oaxaqueño tienen cuatro regiones matrices o de origen (Figura 11) y en ellas aparecen con distinto grado de intensidad, que va creciendo a medida que progresa la temporada, que se extiende iniciando la segunda quincena de mayo hasta la primera quincena de noviembre.

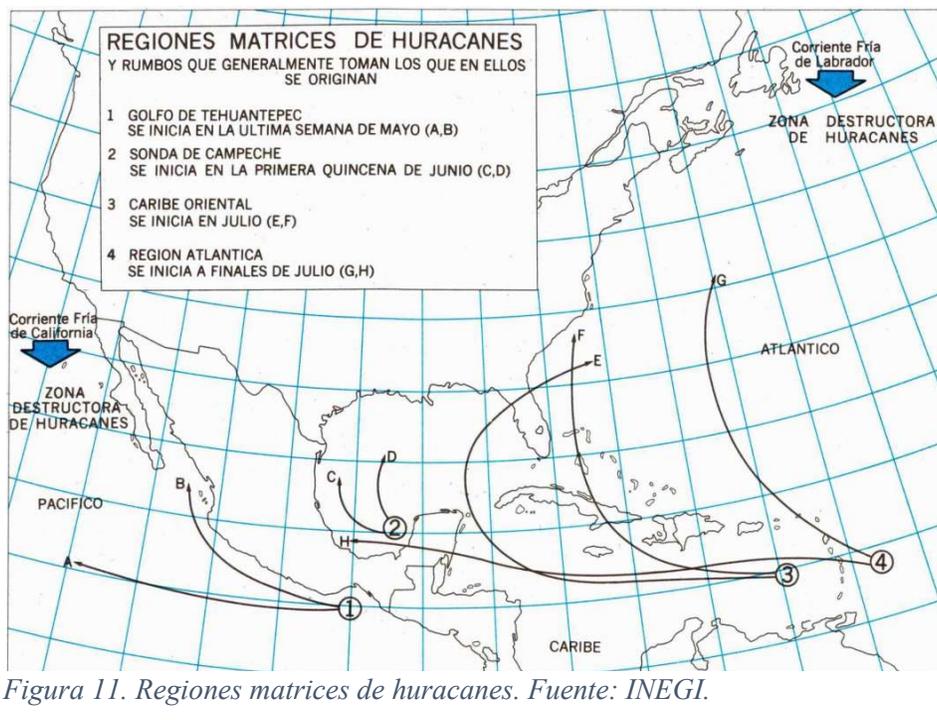


Figura 11. Regiones matrices de huracanes. Fuente: INEGI.

La zona 1 tiene una influencia directa sobre la zona de estudio y actualmente se conocen las trayectorias de las rutas de huracanes y ciclones tropicales que han afectado esta zona; lo que permite el pronóstico de futuros eventos de esta naturaleza, sin embargo como ya se mencionó con anterioridad, el aumento de temperatura global ocasiona un aumento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos, centrando importancia en la predicción de los posibles riesgos ya que estos a su vez generan pérdidas de tipo social, ecológico y económico.

III.VII VEGETACIÓN

En el municipio de Santa María Colotepec En el municipio de Santa María Colotepec se encuentran tres tipos de vegetación natural: la selva subcaducifolia, la vegetación inducida y el bosque de coníferas. El desarrollo de la vegetación parece encontrarse en un estado sucesional secundario, debido probablemente a la extracción de madera o prácticas de barbecho largo. La vegetación inducida corresponde a la vegetación que ha sido favorecida por la perturbación de la vegetación natural a causa de actividades antrópicas o incendios forestales. Dentro de los tipos de vegetación que existen en la zona se encuentran bosques, palmar, manglar y matorral de dunas costeras (Plan municipal de desarrollo, 2008).

En el municipio de San Pedro Mixtepec el ecosistema que se puede ubicar, entre el litoral y los 500 m de altitud, es la selva media subperenifolia. Este ecosistema se entremezcla con asociaciones de manglar y vegetación halófila en algunos esteros y desembocaduras, de particular importancia es la presencia de una franja de transición vegetal entre la zona netamente costera y la continental (SEDESOL, 2012).

III.VIII DUNAS

Oaxaca es uno de los estados con dunas mejor conservadas de los tres tipos, las frontales que son las predominantes, las parabólicas y las transgresivas. Es además el único estado con una población indígena (huaves) viviendo sobre, y manejando las dunas en San Mateo del Mar (Zizumbo y Colunga, 1982). Es también uno de los estados donde se han realizado menos estudios sobre la zona costera.

En la laguna de Manialtepec y Puerto Escondido existe una mayor transformación de las dunas por la actividad ganadera y uso agropecuario, y zonas rocosas aisladas en el mar (SEMARNAT, 2014).

III.IX HIDROLOGÍA

Se encuentra dentro de la cuenca del Río Colotepec, en donde se ven involucradas varias localidades al paso de su cauce, directa e indirectamente estos afluentes llegan a proveer de recurso hídrico a dichos lugares y en temporada de lluvias intensas el caudal del río se eleva y provoca inundaciones. Algunas como la cabecera municipal de Santa María Colotepec, la localidad de El Bajo, Los Naranjos, El Camarón, Barra de Navidad y Barra de Colotepec están circunscritas por la vertiente de este río, esta cercanía las hace más vulnerables. Otras zonas como Brisas de Zicatela y La Nopalera son irrigadas por corrientes intermitentes que en algunos casos se secan haciendo que la población disponga los lechos secos para construir vivienda o como camino (SEDESOL, 2012).

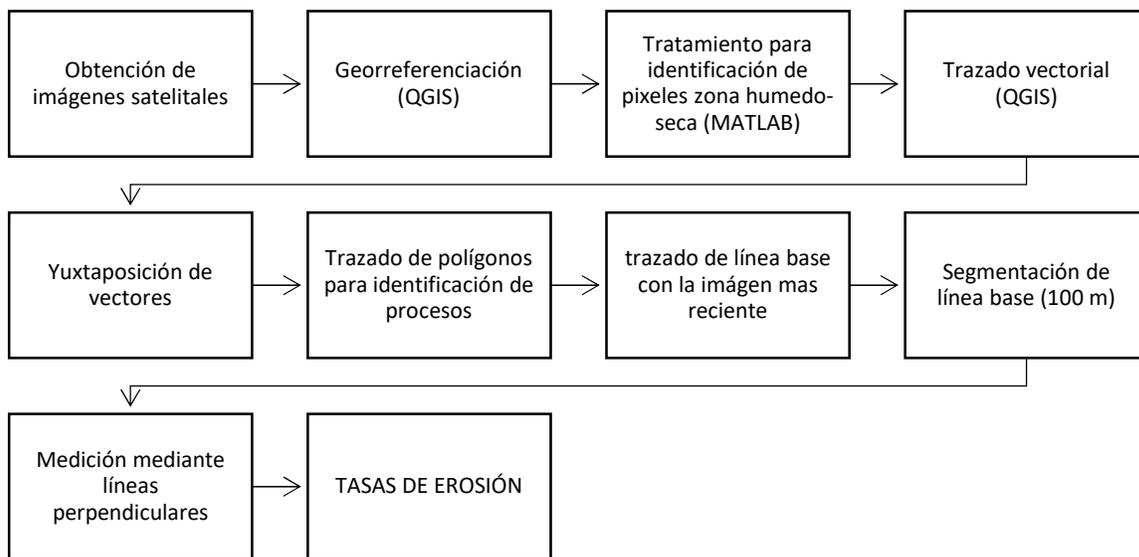
El oleaje en las playas es generalmente moderado únicamente la playa Zicatela, que gracias a sus extraordinarias olas de gran altura la convierte en una gran opción para la práctica del surfing, habiendo olas de hasta 6 metros de altura (Zannie, 2020).

IV. METODOLOGÍA

El estudio de la dinámica costera requiere una metodología compuesta; la presente investigación abarca técnicas sedimentológicas, sistemas de información geográfica, tratamiento de imágenes satelitales y uso del índice de vulnerabilidad costera (IVC) que integra los resultados.

IV.I EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LA ZONA LITORAL

Para la evaluación histórica se analizó la evolución de la línea de costa a largo plazo mediante un procedimiento básico descrito a detalle por numerosos autores (Dolan, Fenster y Holme, 1991, Crowell, Leatherman y Buckley, 1991) el cual se basa en imágenes satelitales y una serie de procesos iterativos para cada imagen seleccionada con la finalidad de obtener la tasa de erosión, estos procesos se muestran en el siguiente esquema:



Para la obtención de imágenes satelitales se llevó a cabo una revisión de los sensores satelitales de libre acceso: Copernicus, Landstat y World-View, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de imágenes de un mismo sensor y evitar distorsiones geométricas, el material obtenido se puede encontrar en el **ANEXO 1**.

Gracias a la mayor disponibilidad de información, se utilizaron las imágenes proporcionadas por Google Earth Professional correspondientes al satélite World View las cuales fueron georreferenciadas en el software QGIS con transformación polinomial con al menos 4 puntos de referencia. En todos los casos se utilizaron imágenes del tipo ráster, la proyección del datum WGS84 (Sistema Geodésico Mundial de 1984), y el sistema de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) para la zona 14 N.

Las imágenes georreferenciadas se transformaron a imágenes en escala de grises mediante el programa MATLAB, esto se llevó para facilitar la identificación de píxeles de la zona seco-húmeda mediante un código creado para cada imagen que se encuentra en el **ANEXO 2**.

Con las imágenes obtenidas en MATLAB se hizo una nueva georreferenciación polinomial con puntos control obtenidos de las imágenes georreferenciadas inicialmente y sobre los píxeles marcados se hizo un trazado vectorial para poder obtener las líneas históricas en una sola capa, con la que se trazaron polígonos para identificación visual de los procesos (erosión-acreción).

La base del proyecto se definió con la imagen más reciente para facilitar el reconocimiento de los puntos de control y se trabajó retrocediendo en el tiempo progresivamente. Como fuente de coordenadas se utilizó la imagen satelital obtenida de Google Earth Professional del satélite WorldView del 30 de agosto del 2020 con resolución de 0.5 m.

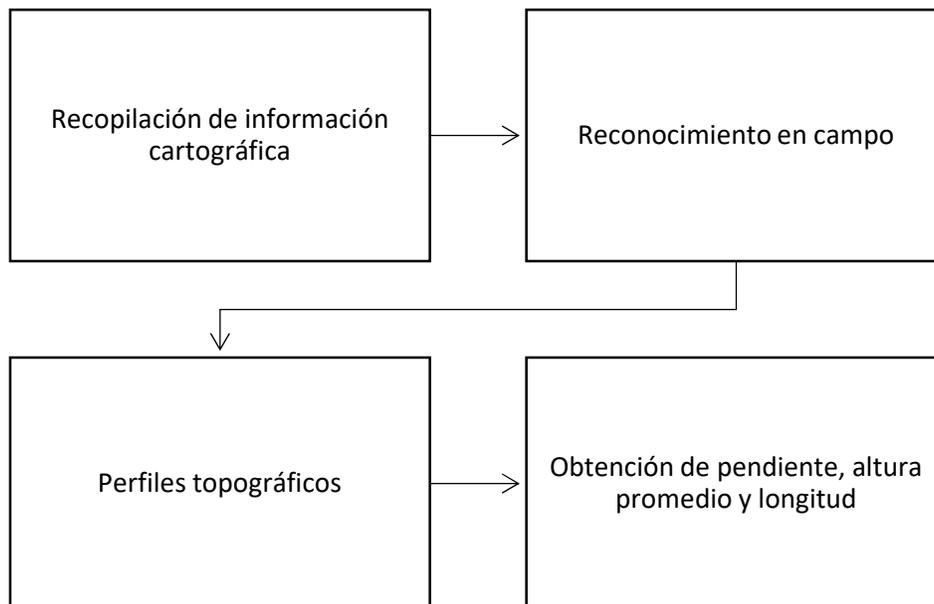
Con la imagen se realizó la definición de una línea base disectada de forma regular cada 100m mediante la herramienta v.split QGIS-GRASS para la descripción de los movimientos hacia tierra o mar. Se realizaron líneas perpendiculares a la línea con un total de $n=128$ transectos como resultado de la subdivisión cada 100m, para la medición del avance mediante las líneas históricas y la intersección con las líneas perpendiculares a la línea base obteniendo la longitud con la calculadora de QGIS.

Las mediciones obtenidas representaron el movimiento neto en el total de años analizados, con esos datos se obtuvieron:

- Promedio de movimiento neto por zona: se obtuvo el promedio de la medición del movimiento neto de todos los transectos medidos por zona.
- Promedio anual de zona: se obtuvo mediante el promedio de movimiento neto entre número de años analizados.
- Tasa de erosión: se obtuvo mediante la división del movimiento neto entre años evaluados (mov. neto/años).
- Promedio: se generó un promedio anual para todas las zonas.

IV.II DETERMINACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE LA ZONA LITORAL

Para la determinación de la morfología se hizo una recopilación cartográfica de la geología de la zona para determinar la resistencia a los efectos de la erosión. Posteriormente se hizo un reconocimiento en campo, lo cual se hizo para cada punto de muestreo, como se observa en el siguiente esquema:



PERFILES DE PLAYA

Los perfiles de playa son resultado de complejos procesos de transporte y acumulación de sedimento que indican la dinámica costera (Zetina *et al.*, 2008). Se realizaron 11 puntos de muestreo de levantamientos de perfiles (Figura 12) distribuidos a lo largo de la zona de estudio de acuerdo con la accesibilidad.

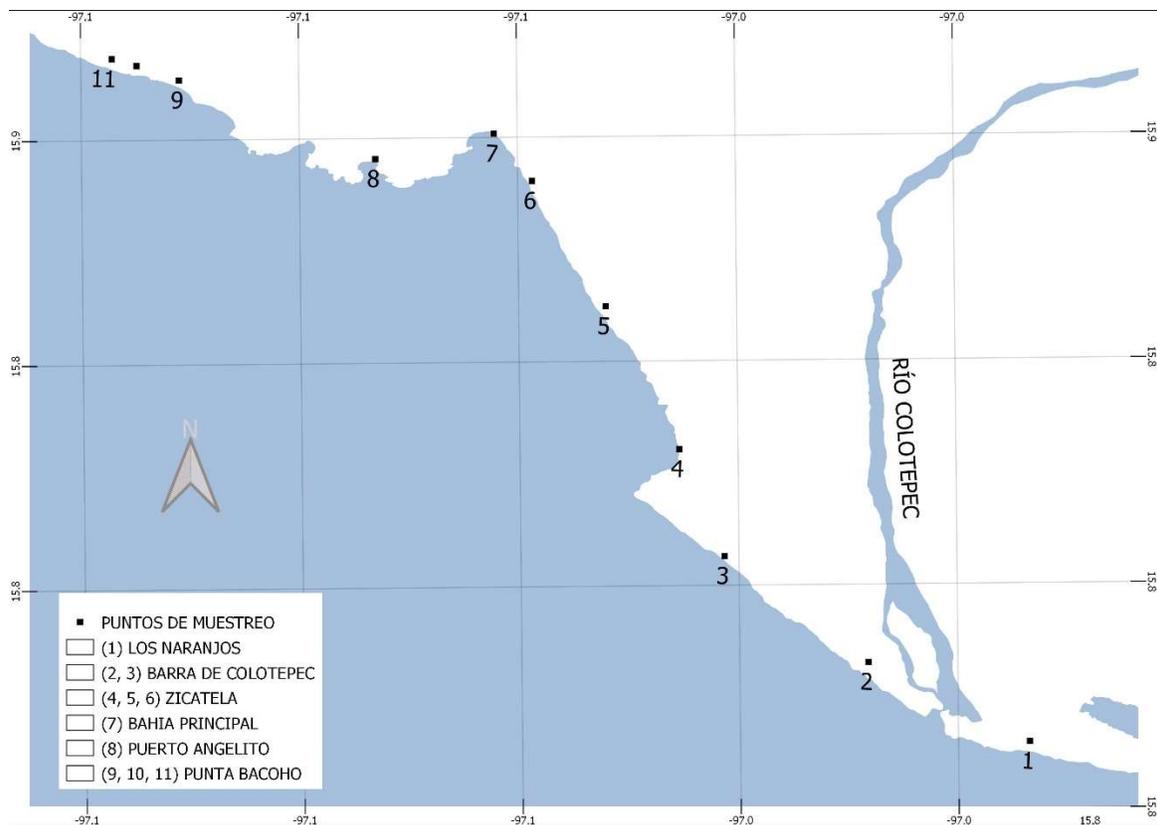


Figura 12. Puntos de muestreo del área de estudio en los que se realizaron 3 perfiles por cada punto muestreado abarcando 100 m de largo con una separación de 50 m entre perfil para infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Fuente: Elaboración propia

En cada punto se realizaron 3 perfiles de playa con una separación de 50 metros uno de otro. Los perfiles topográficos se realizaron con el método de nivelación diferencial (Márquez, 2000), con un nivel fijo y estatal midiendo las distancias horizontales entre los puntos visados (Wolf et al., 2013). Determinando longitud, pendiente y altura de playa, delimitando las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya de acuerdo con Carranza y Caso, 1994 (Figura 13).

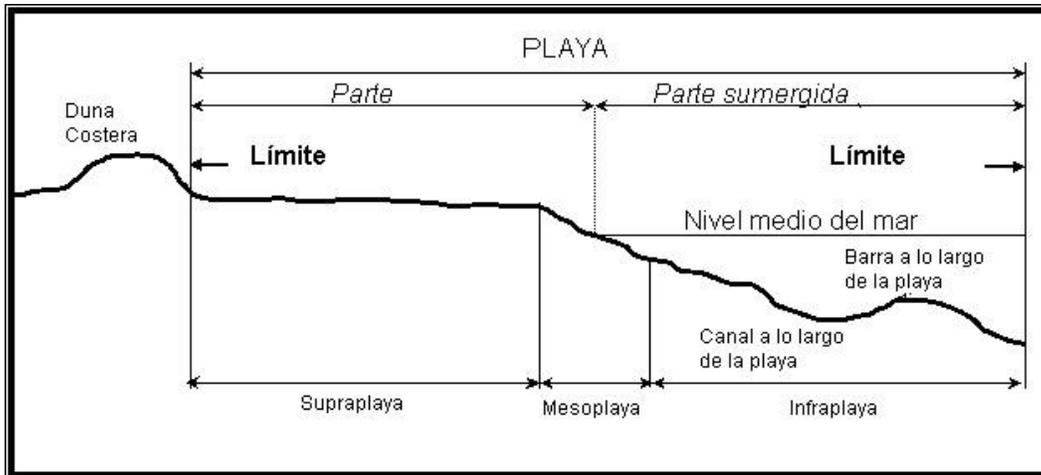


Figura 13. Esquema de perfil de playa. El muestreo de los 11 puntos se obtuvo en las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Fuente: Carranza-Edwards y Caso, 1994.

La distancia para calcular longitud de playa se calculó por Pitágoras como:

Distancia =

$$\sqrt{(\text{coord } x \text{ base} - \text{coord } x \text{ punto } n) + (\text{coord } y \text{ base} - \text{coord } y \text{ punto } n)}$$

La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los catetos siendo estos las coordenadas X y Y , debido a no se ubican en el origen, se resta de la primera medición a la que se requiere conocer su distancia a la primera.

La altura de playa se obtiene de la resta de la primera medición menos la cota n :

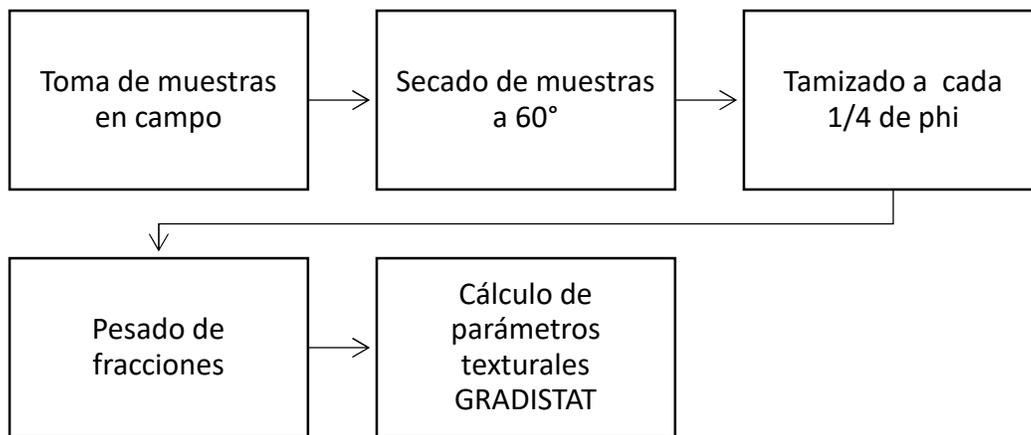
Altura =

$$= \text{altura infraplaya medida en campo} - \text{altura cota } n - \text{altura de punto de referencia}$$

Con estos datos se generaron los perfiles en donde se obtiene la pendiente mediante una regresión lineal, en grados y porcentaje.

IV.III CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOLOGÍA DE PLAYA

Se realizó el muestreo durante la temporada de lluvias en septiembre de 2019 recolectando el primer centímetro de playa el cual representa las propiedades texturales de los sedimentos litorales a nivel regional (Carranza-Edwards, 2001). Se obtuvieron muestras de cada playa en las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya por cada perfil topográfico realizado, teniendo un total de $n = 99$ muestras, sin embargo, el proceso de análisis se realizó para 11 puntos para evaluar los parámetros texturales como el que se describe en el siguiente esquema:



Cada muestra de sedimento fue secada y dividida para el análisis textural.

El análisis granulométrico realizado en el Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, se utilizaron tamices U.S. Standard Soil cada $\frac{1}{4}$ de phi (ϕ) en el tamizador de laboratorio Ro-Tap®. Los resultados del análisis textural de las muestras se obtuvieron pesando en la balanza analítica la muestra total, y luego pesando cada fracción obtenida por tamiz y generar el análisis granulométrico por medio de la gráfica de frecuencia acumulada con ayuda del paquete estadístico y de distribución del tamaño de

grano para el análisis de sedimentos no consolidados Gradistat, con el que se calcularon los parámetros estadísticos de acuerdo con Folk (1980):

- Tamaño gráfico promedio ($Mz \phi$): que da como resultado el tamaño promedio de la muestra dividido en secciones desde grava, arena, limo y arcilla.
- Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_1\phi$): Permite determinar la uniformidad del tamaño de los sedimentos; la clasificación será: ≤ 0.35 , Muy bien clasificado; 0.35 – 0.50, Bien clasificado; 0.50 – 0.71, Moderadamente bien clasificado; 0.71 a 1.0, Moderadamente clasificado; 1.0 a 2.0, mal clasificado; 2.0 – 4.0 Muy mal clasificado; ≥ 4.0 Extremadamente mal clasificado.
- Grado de asimetría gráfica inclusiva (Sk_1): En función de los valores obtenidos será: 1.0 – 3.0 Muy asimétrico hacia los finos, 0.30 – 0.10 Asimétrico hacia los finos, 0.10 – -0.10 Simétrico, -0.10 – -0.30 Asimétrico hacia los gruesos, -0.30 – -1.00 Muy asimétrico hacia los gruesos
- Curtosis (K_G): Indica si una muestra tiene muchos tamaños de grano o si su tendencia es hacia uno solo. En función de los valores obtenidos será: ≤ 0.67 Muy platicúrtico, 0.67 – 0.90 Platicúrtico, 0.90 – 1.11 Mesocúrtico, 1.11 – 1.50 Leptocúrtico, 1.50 a 3.00 Muy leptocúrtico, ≥ 3 Extremadamente leptocúrtico.

IV.IV DETERMINACIÓN DE VULNERABILIDAD COSTERA POR EROSIÓN

Se utilizó la metodología propuesta por Ojeda *et al.*, 2008 que calcula el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), esta metodología utiliza 6 variables que se agrupan en dos grandes grupos:

1. Variables geológicas/geomorfológicas
 - a. Resistencia que ofrece el soporte geológico/geomorfológico a la erosión
 - b. Las tendencias del cambio en la línea de costa a largo plazo (tasa de erosión)
 - c. Susceptibilidad a los procesos de inundación marina (pendiente costera)
2. Variables físicas
 - d. Altura media del oleaje significativo
 - e. Tasas de cambio del nivel relativo del mar
 - f. Rango mareal medio

Estas variables se integran en la siguiente ecuación para conocer el grado de vulnerabilidad, el cual es una ponderación de 1 (muy baja vulnerabilidad) a 5 (muy alta vulnerabilidad):

$$CVI = \sqrt{\frac{a * b * c * d * e * f}{6}}$$

VARIABLES GEOLÓGICAS/GEOMORFOLÓGICAS

RESISTENCIA DEL SOPORTE GEOLÓGICO (MOR)

Una vez determinada la geomorfología de playa se asignó un valor entre 1 y 5 relacionando la variable con la descripción que se presenta en la metodología de Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 3) y se hizo una clasificación visual en QGIS de estas zonas.

Tabla 3. Clasificación de la variable MOR "geología/geomorfología". Fuente: Ojeda, *et al.*, 2008.

VARIABLES	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
Variable A (descripción)	Acantilados altos sobre rocas coherentes	Acantilados medios sobre rocas de resistencia media	Acantilados medios/bajos sobre formaciones sedimentarias de alta erodibilidad	Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias poco elevadas	Playas adosadas a formaciones de islas-barrera, tómbolos, flechas litorales, deltas, etc. También sectores que protegen formaciones de marismas mareales o fluvio-mareales

TENDENCIA DE CAMBIO DE LÍNEA DE COSTA (ERO)

Una vez trazadas las líneas de costa y línea base se hicieron las mediciones del avance o retroceso de estas con respecto a la línea base y posterior se obtuvo la tasa de erosión anual a la cual se le otorgó un valor de acuerdo con la clasificación de Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de la variable ERO "tasas de cambio de la línea de costa". Fuente: Ojeda *et al.*, 2008.

Variables	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
ERO (m/año)	(2, máx.]	(1, 2]	(-1, 1]	(-2,-1]	[min., -2]

SUCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE INUNDACIÓN (PENDIENTE COSTERA) (ITOP)

Con los perfiles obtenidos se calculó la distancia respecto al oleaje máximo reportado para la zona (1.5 – 2.0 m), la pendiente media y altura máxima, a las cuales se les otorgó un valor de acuerdo con la clasificación de Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de la variable "Susceptibilidad a los procesos de inundación marina (pendiente costera)". Fuente: Ojeda *et al.*, 2008.

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

Y finalmente se obtiene el índice topográfico con la media aritmética de los valores clasificado, posteriormente se hace una ponderación de los valores obtenidos (Tabla 6)

$$ITOPPO = \frac{D + P + A}{3}$$

Tabla 6. Ponderación de valores del Índice Topográfico (ITOPPO).

VARIABLES	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
<i>ITOPPO</i>	(0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]

VARIABLES FÍSICAS OCEANOGRÁFICAS

Todos los datos para las variables físicas fueron obtenidos de revisión bibliográfica de diversas fuentes de información y a lo obtenido se le otorgó un valor de acuerdo con la clasificación de Ojeda *et al.*, 2008.

ALTURA MEDIA DE OLEAJE SIGNIFICANTE (Hs)

Para el cálculo y clasificación se promediaron los registros de la Estación Mareográfica del Servicio Mareográfico de Geofísica de la UNAM, tomando como referencia las tablas de Puerto Ángel, Oaxaca y los valores clasificados por Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 7).

Tabla 7. Valores para clasificación de variable Hs, altura de oleaje significativa Fuente: Ojeda *et al.*, 2008.

VARIABLES	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
HS (m)	[0, 0.75]	(0.75, 0.85]	(0.85, 0.95]	(0.95, -1.05]	(1.05., 1.15]

HS= oleaje significativa medio

TASAS DE CAMBIO DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR (LEV)

Esta tasa de cambio está ligada a oscilaciones del nivel del mar, los cuales pueden derivarse de diversos factores, como el derretimiento de glaciares, movimientos de márgenes continentales, entre otros, se utilizaron los registros obtenidos por la SEMAR y se les clasificó con la clasificación de Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 8).

Tabla 8. Valores para clasificación de variable LEV, nivel relativo del mar. Fuente: Ojeda *et al.*, 2008.

Variables	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
LEV (mm/año)	(0, 1.8]	(1.8, 2.5]	(2.5, 3.0]	(3.0, 3.5]	(3.5, máx.]

RANGO MAREAL MEDIO

Este valor está determinado por el comportamiento mareal y predicciones basadas en modelos el valor medio. Dicha información fue obtenida a través de la SEMAR donde la zona de estudio tiene un tipo de marea mixta – semidiurna y se les clasificó con los valores propuestos por Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 9).

Tabla 9. Valores para clasificación de variable TID, rango mareal medio. Fuente: Ojeda *et al.*, 2008.

Variables	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor clasificado	1	2	3	4	5
TID (m)	(6, máx]	(4, 6]	(2, 4]	(1, 2]	(0, 1]

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

Los valores obtenidos se integran en la fórmula propuesta por Ojeda et al., 2008, que engloba los 6 parámetros evaluados y nos da como resultado un valor para cada zona, los cuales se dividen en percentiles del 25%, 50% y 75% para calcular los rangos y categorías de riesgo (

Tabla 10), teniendo así:

Tabla 10. Valores de clasificación para el IVC.

Categoría	Valor
Muy bajo	1
Bajo	2
Medio	3
Alto	4
Muy alto	5

V. RESULTADOS Y DISUSIÓN

Se evaluó la tasa de erosión/acreción (m/año), la distancia por elevación del nivel del mar (m), pendiente media (%), altura media (m), oleaje significativo (m), tasa de cambio del nivel relativo del mar (mm/año) y el rango mareal medio (m) para el destino turístico que abarca de Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec, para conjuntarlos y analizarlos mediante el Índice de Vulnerabilidad Costera que indica el riesgo potencial ante el aumento del nivel del mar bajo condiciones normales de oleaje y marea.

V.I EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA

En la (Figura 14) se observan los resultados obtenidos a partir de un total de 128 transectos perpendiculares a la costa, ubicados a intervalos de 100m para cada playa, mediante los cuales se estimó la tasa de erosión (movimiento neto/ metros por año); de manera individual (para cada transecto), se obtuvo el promedio para cada playa, y el promedio de toda la zona de estudio entre los años 2003 y 2020, el cual se registra predominantemente positivo con un valor promedio de 1.03 m/año indicando ganancia de terrenos al mar.

Tan solo el 25% de los transectos (32 de 128) registraron pérdidas de terreno, las cuales corresponden a las zonas de Puerto Angelito (Punto8) y playa Los Naranjos (Punto 1).

Si bien la playa Los Naranjos (punto 1) presenta una erosión promedio de -1.5 m/año, la cual es mayor que la erosión que se presenta dentro de Puerto Angelito (Punto 8) $= -0.29$ m/año, es la segunda la que llama especial atención debido a su naturaleza de playa de bolsillo, la cual de acuerdo con la literatura se caracteriza por procesos de acumulación o bien, equilibrio ya que se encuentra protegida por salientes rocosas.

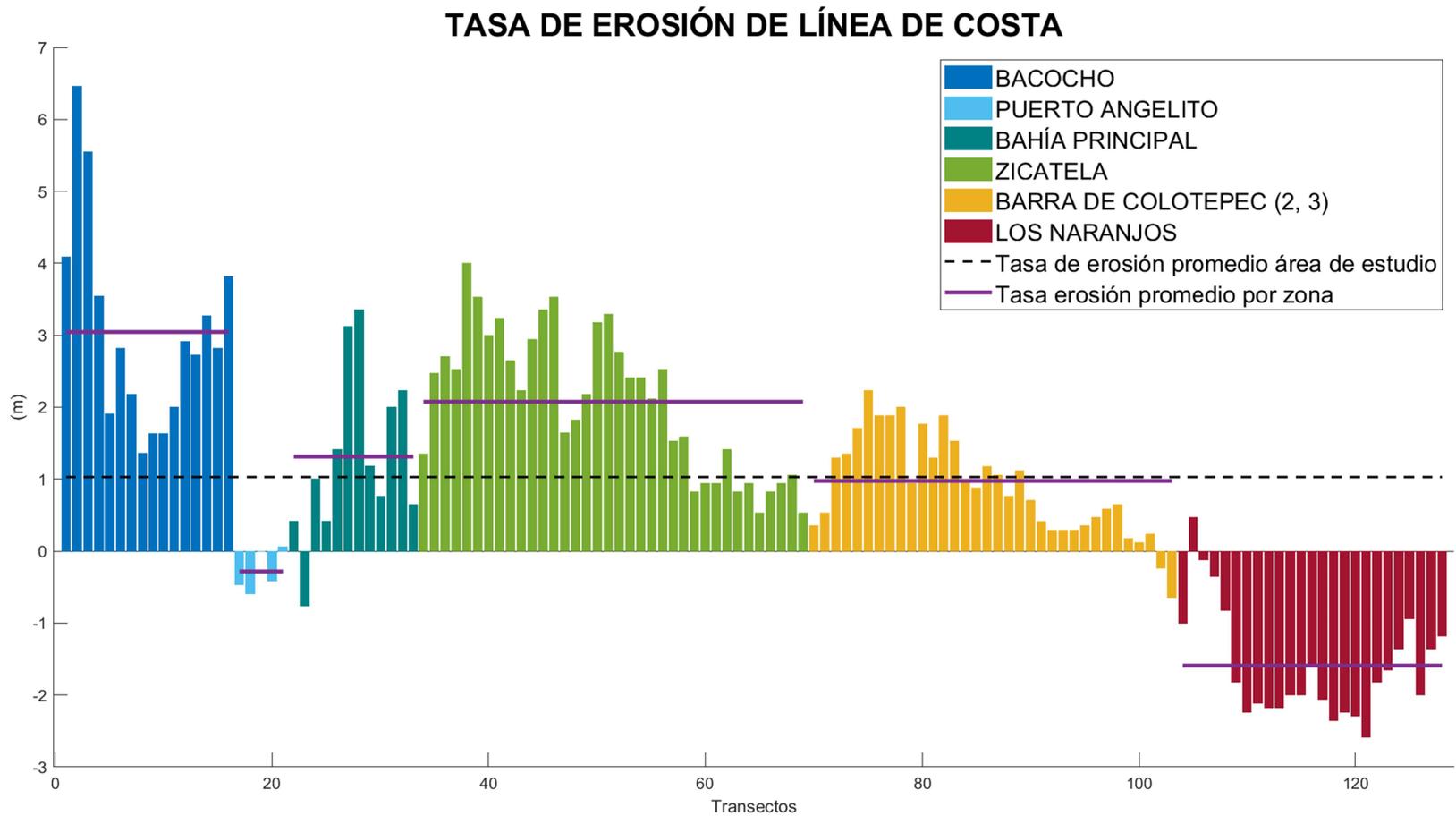


Figura 14. Tasas de erosión (mov. neto/años) obtenidas a partir de un total de 128 transectos con mediciones de desplazamiento para los últimos 17 años (2003 - 2020).

En comparación con otras zonas cercanas del Pacífico (Figura 15), presenta un comportamiento diferente (Huatulco, Bahía de Acapulco y Zihuatanejo) que han sido evaluados por la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo, A: C. (ANIDE) en conjunto con la UAM Iztapalapa, UAM Azcapotzalco, mediante CONACYT - SECTUR, así como zonas del Pacífico más alejadas: Los Cabos, Mazatlán que fueron evaluados en los años 2013 – 2014 presentando datos erosivos a excepción de Nuevo Vallarta que presentó una acreción de 2.22 m/año (SECTUR – ANIDE, 2017).

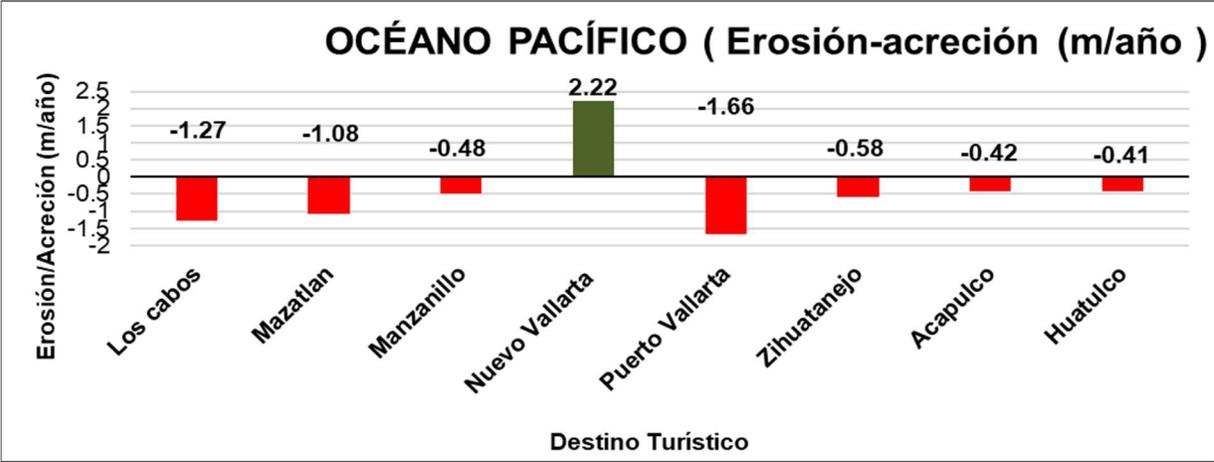


Figura 15. Tasa de erosión y acreción promedio anual para 8 destinos turísticos ubicados en el Pacífico. Fuente: SECTUR - ANIDE, 2017.

PUNTA BACOCHO

La evaluación histórica de línea de costa para Punta Bacocho refleja una acreción del año 2009 al 2020 (Figura 16), con un promedio de 33.5 m desplazados en 11 años, lo que representa una tasa 3.05 m/año.



Figura 16. Mapa de procesos de erosión-acreción Punta Bacocho. Fuente: Elaboración propia con imagen base obtenida de Google Earth Professional.

En la Figura 16 podemos observar las líneas comparativas entre la imagen más antigua y la más reciente (2009 – 2020); para el 2020 se observa un aporte de sedimentos proveniente del Noreste, el cual no se registra en la imagen del 2009, por lo que posiblemente se pueda relacionar a la ruptura de un canal de agua pluvial, así como aportaciones de agua del aeropuerto Internacional de Puerto Escondido generando un arrastre y acumulación de sedimentos por causas antrópicas en la zona litoral; siendo un factor para la acreción que se observa en los años de evaluación (Figura 17).

2020



2009



Figura 17. Comparativa de imágenes satelitales de Punta Bacocho obtenidas de Google Earth Professional para los años 2020 y 2009 respectivamente.

PUERTO ANGELITO

Puerto Angelito es una playa de bolsillo protegida por puntas rocosas en la cual se observa erosión en las playas (Figura 18) y un equilibrio en la zona central debido a su naturaleza rocosa, en donde se obtuvo un movimiento de -4.8 m en 17 años y una tasa de -0.28 m/año.

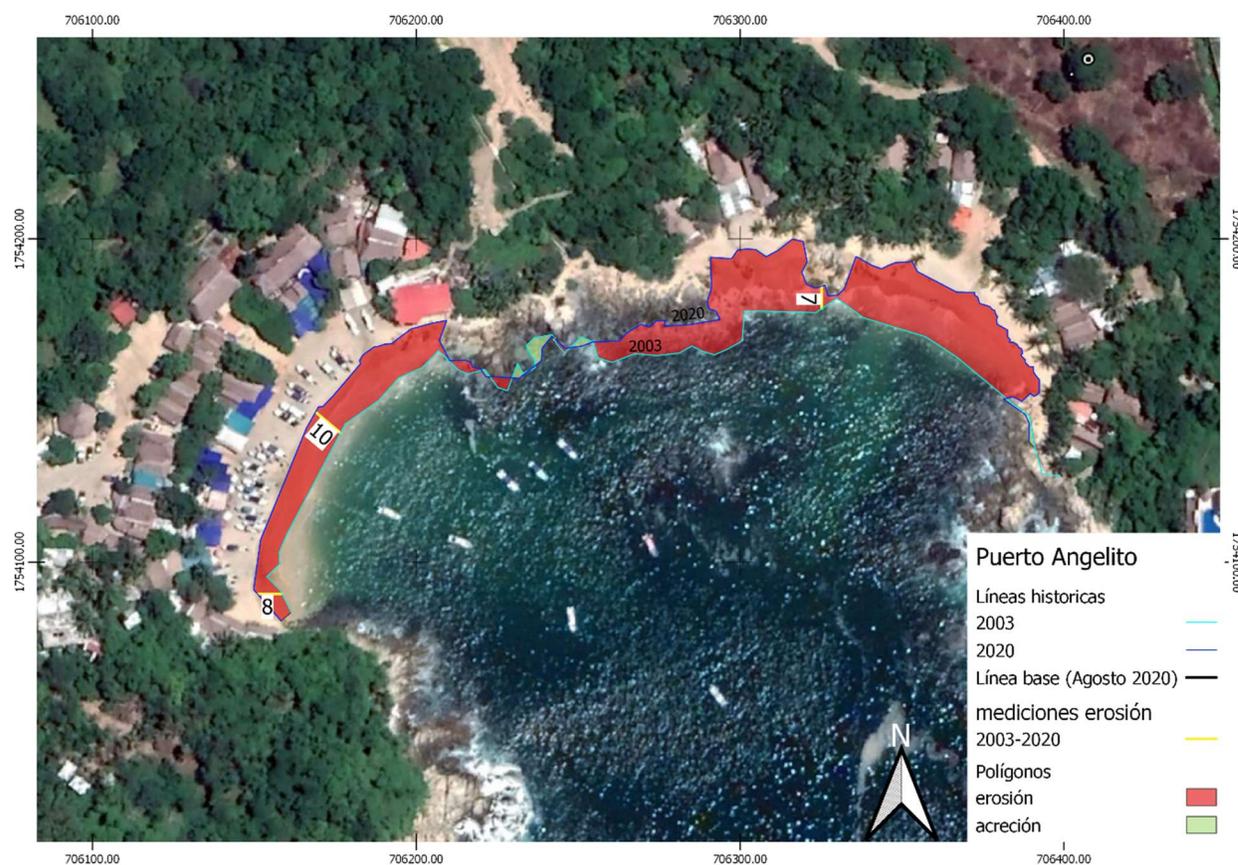


Figura 18. Mapa de procesos de erosión-acreción Puerto Angelito. Fuente: Elaboración propia.

Esto puede relacionarse a: que a través de los años Puerto Angelito presenta un crecimiento en la ocupación de la zona litoral por comercios y embarcaciones, los cuales influyen en el cambio erosivo que presenta esta playa, particularmente llama la atención ya que de acuerdo con la literatura el comportamiento natural esperado sería de acreción o bien, de equilibrio; sin embargo, como se observa en la Figura 19, algunos de los aportes sedimentarios de tierra dentro a la zona litoral (marcados con flechas) han sido perturbados antrópicamente,

reteniéndolos o bien simplemente reduciendo el aporte, se observa encerrado en un círculo punteado la ganancia de terreno por la ocupación humana en zonas rocosas, la ocupación de terrenos en zona de playas es evidente en la zona oeste en donde los comercios para el 2020 se han ubicado frente a los ya establecidos en el 2003 ganando el terreno de la playa y disminuyendo el intercambio natural de sedimentos.

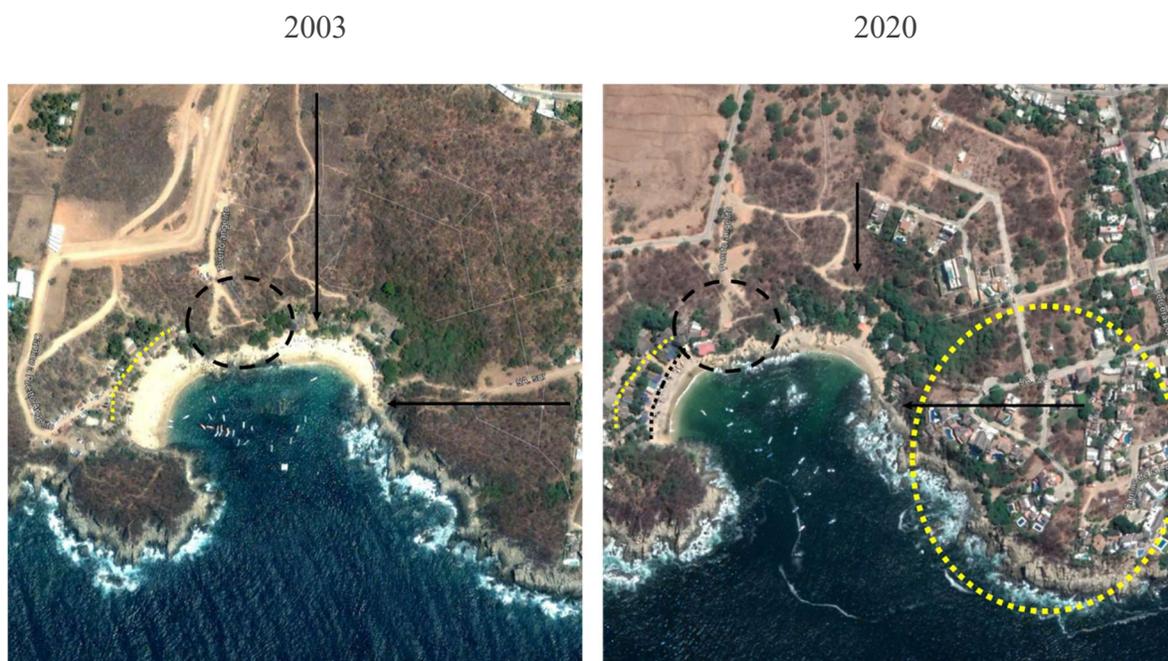


Figura 19. Comparativa de imágenes satelitales de Puerto Angelito obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.

BAHÍA PRINCIPAL

Se observa una acreción general en la zona, siendo más pronunciada en la parte de la desembocadura de la laguna (Figura 20), en el último transecto del extremo este, en el año 2003 no había paso y para el año 20020 se tienen 11 metros de arena que permiten el libre tránsito de los pobladores y visitantes; en el extremo oeste, se presenta una erosión, la cual se conjunta con un desagüe que ha desgastado la zona haciendo un canal el cual está representado por una línea seco – húmeda ininterrumpida generando este desgaste.



Figura 20. Mapa de procesos de erosión-acreción Bahía Principal. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se observa en los recuadros negros el crecimiento de la zona poblacional, el cual a través de estos años ha generado un desplazamiento de sedimentos tierra dentro hacia la zona costera, aunado a los aportes provenientes de la corriente litoral, que en esta zona es de sur a norte; en el círculo punteado se observa la transformación de una zona que en el año 2003 era puramente rocosa a un plano unido a un aporte de sedimentos que se observa proveniente de la carretera que baja a través de las calles; existe también una disminución de la laguna de agua dulce la cual está encerrada en un óvalo punteado, esto puede haberse generado por un fuerte aporte de sedimentos que desembocan y se asientan en la zona litoral reduciendo la laguna en la zona de su desembocadura.

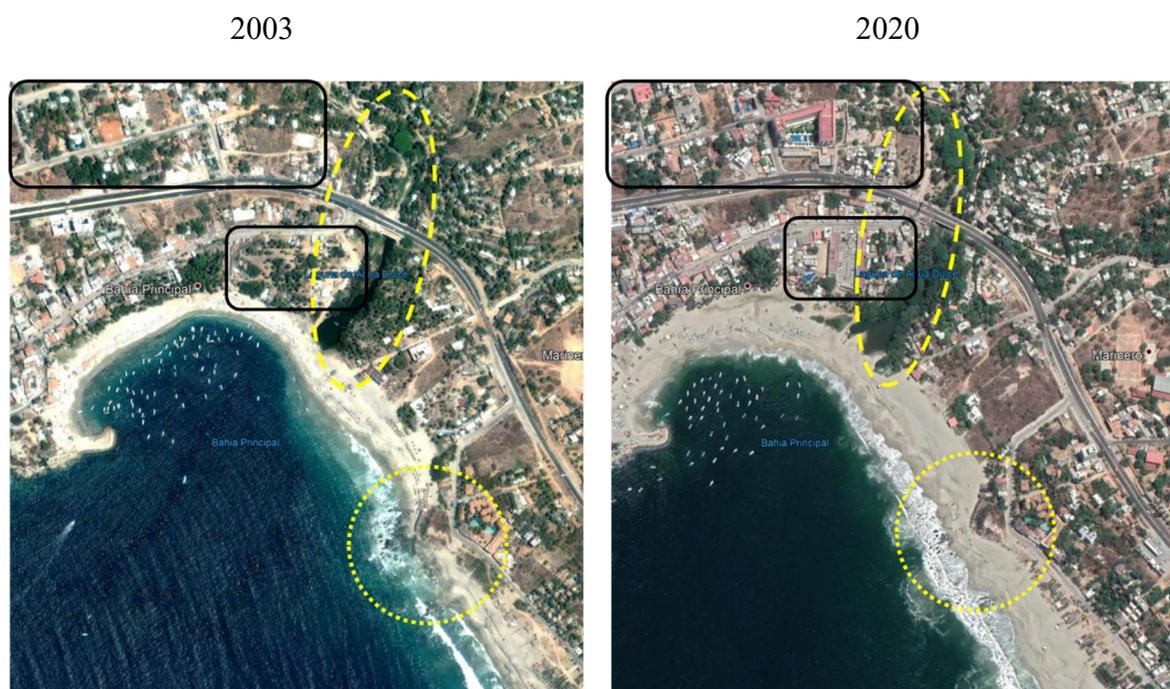


Figura 21. Comparativa de imágenes satelitales de Bahía Principal obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.

ZICATELA

En la zona de Zicatela y playas cercanas encontramos que se presenta el fenómeno de acreción (Figura 22), así como un crecimiento poblacional, esta zona es una de las más importantes para el surf, ya que en cierta época del año las olas son mayores a los 6 metros, por lo que la actividad turística es de vital importancia para la economía local, observando que en la zona cercana a la costa se encuentran principalmente establecimientos comerciales.



Figura 22. Mapa de procesos de erosión-acreción en la zona de Zicatela. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23 se observa un crecimiento antrópico el cual está marcado en un rectángulo de línea continua, este se asocia directamente a una zona en donde se observa acreción, además de varias aportaciones de sedimento tierra dentro a la zona costera a través de las calles que bajan a la costa desde las partes altas de la ciudad, sobre todo en época de lluvias; de igual manera se ven disminuidas y modificadas a lo largo del tiempo, principalmente en secas.

Debemos tomar en cuenta la protección que tiene ante la marea y corriente litoral que va de sur a norte, con el flujo de sedimentos provenientes de la pluma generada en la desembocadura del Río Colotepec como se representa con las flechas amarillas, el cual a pesar de ser un aporte natural puede presentar cambios antrópicos debido a los cambios ocurridos en su cauce.



Figura 23. Comparativa de imágenes satelitales de Zicatela obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.

DESEMBOCADURA DEL RÍO COLOTEPEC

En la zona costera ubicada en la desembocadura del Río Colotepec tenemos del lado Este, el punto 1 (Los Naranjos) en donde se observa un fenómeno de erosión mientras que del lado Oeste en los puntos 2 y 3 (Barra de Colotepec), se observa acreción (Figura 24).

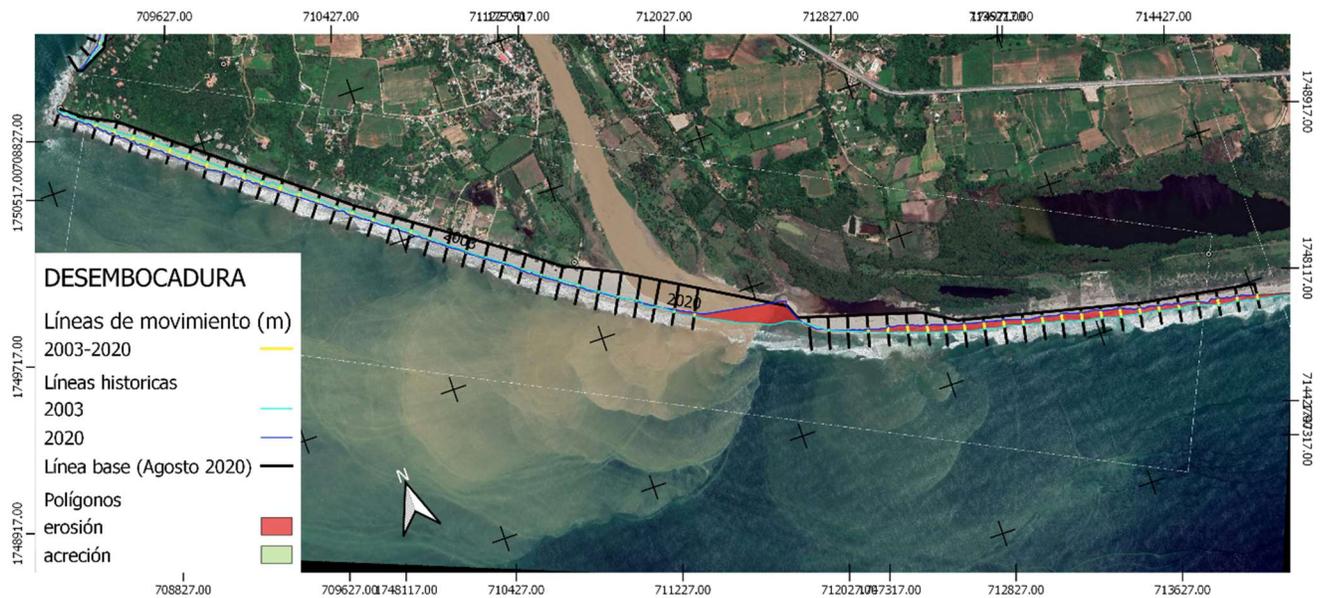


Figura 24. Mapa de procesos de erosión-acreción en la zona de Desembocadura. Fuente: Elaboración propia.

El cambio de uso de suelo es comparativamente menor a las otras zonas, sin embargo, como se observa en la Figura 25 mediante una línea punteada, que ya existe una modificación antrópica, mediante la creación de un puente y carreteras. Sin embargo, por la tasa de erosión que presenta puede que este proceso sea un proceso natural que, aunado a la naturaleza de la corriente litoral que va de sur a norte como es evidenciado por la pluma de sedimentos de la desembocadura es de esperarse que la zona del sur respecto a la desembocadura presente erosión mientras que la norte una acreción al estar recibiendo los aportes de esta.



Figura 25. Comparativa de imágenes satelitales de la zona de Desembocadura obtenidas de Google Earth Professional para los años 2003 y 2020 respectivamente.

V.II MORFOLOGÍA DE PLAYA

De acuerdo con la información obtenida de INEGI y la validada en campo, se determinaron 6 geofomas en la zona litoral las cuales se muestran en la Figura 26 siendo:

- 1) Playa abierta: que corresponde a playas totalmente desprotegidas sin ningún cabo o espigón en sus extremos.
- 2) Playa de bolsillo: de poca extensión con forma de semicírculo ubicadas entre cabos rocosos o espigones.
- 3) Punta Rocosa: Saliente de roca resistente que se erosiona por acción principalmente del oleaje.
- 4) Acantilado Rocoso: Muro vertical de roca erosionado por el oleaje, abrasión hidráulica y corrosión que induce el medio marino.
- 5) Playa asociada a desembocadura: playa que se asocia a la desembocadura de un río por lo que presenta cambios de acuerdo con la evolución de descarga sedimentaria del río.
- 6) Bahía: Concavidad amplia, menor que un golfo y de mayor extensión que una playa de bolsillo.

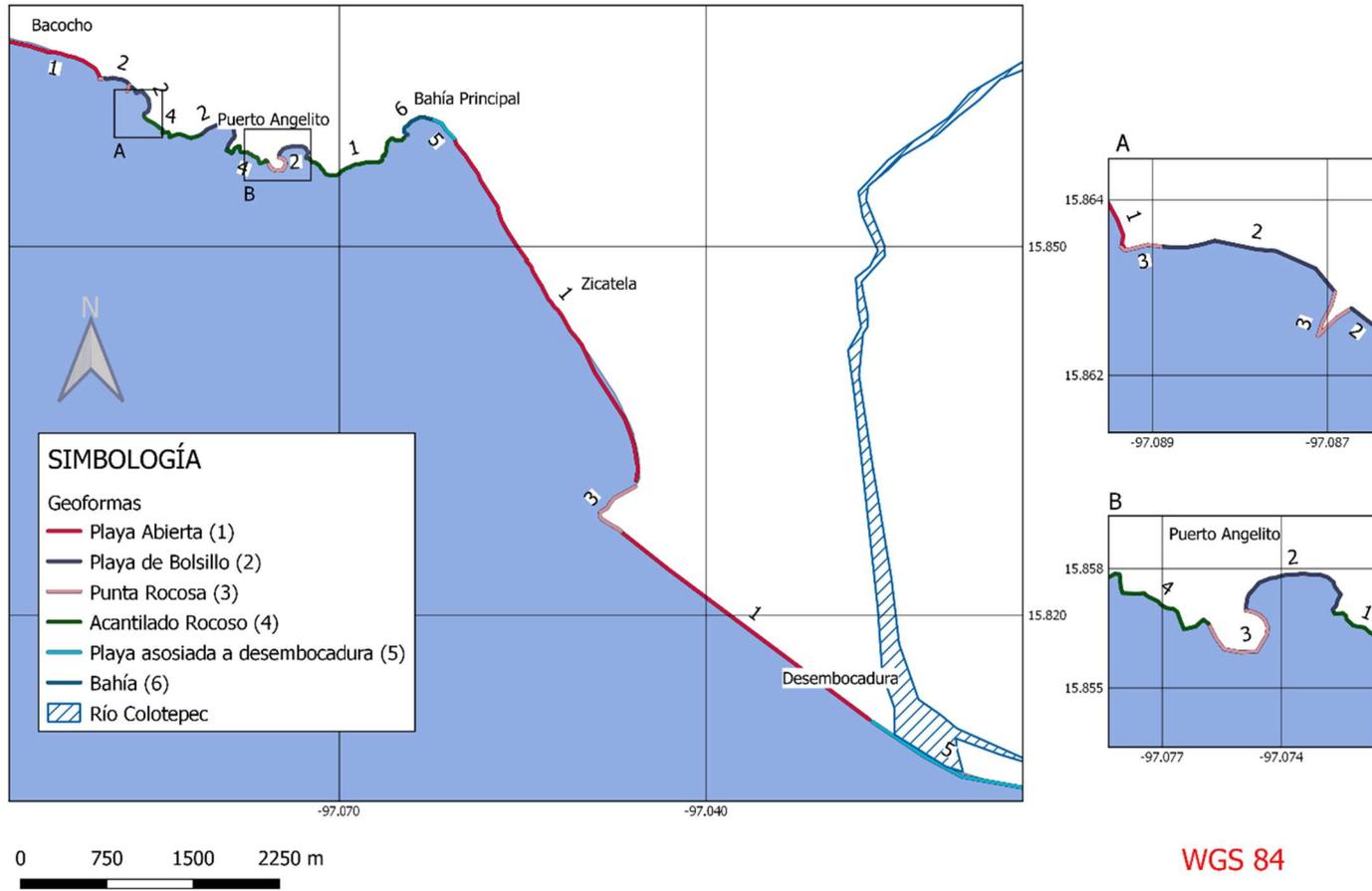


Figura 26. Clasificación geomorfológica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

PERFILES DE PLAYA

Los perfiles de playa son resultado de complejos procesos de transporte y acumulación de sedimento que indican la dinámica costera (Zetina *et al.*, 2008). En el ANEXO 4 se presentan gráficas de los 33 perfiles y los datos de distancia, pendiente y altura de los 11 puntos muestreados (Figura 12). A continuación, se presenta el promedio de estos datos para los 11 puntos (Tabla 11).

Tabla 11. Valores de distancia, pendiente y altura de playa.

Punto	Distancia (m)	Pendiente (%)	Altura(m)
P1 (Los Naranjos)	5.8	10.2	2.9
P2 (Barra de Colotepec)	7.8	7.1	3.6
P3 (Barra de Colotepec)	6.5	8.3	3.3
P4 (Zicatela)	10.8	8.5	3.1
P5 (Zicatela)	2.8	6.1	2.3
P6 (Zicatela)	5.9	4.0	2.7
P7 (Bahía Principal)	4.2	13.4	5.3
P8 (Puerto Angelito)	6.3	20.5	2.7
P9 (Punta Bacocho)	2.8	19.3	4.5
P10 (Punta Bacocho)	6.3	14.7	3.8
P11 (Punta Bacocho)	17.8	5.0	1.9

La distancia evaluada se refiere a la distancia con respecto al oleaje máximo, el cual es de ≈ 1.06 m, las playas con una mayor distancia se encuentran en el punto 11 (Punta Bacocho, ubicado en la zona oeste del muestreo) y en el Punto 4 (Zicatela, playa para actividades de surf) en ambos casos son playas amplias con más de 30 m de distancia entre las zonas de infraplaya y supraplaya.

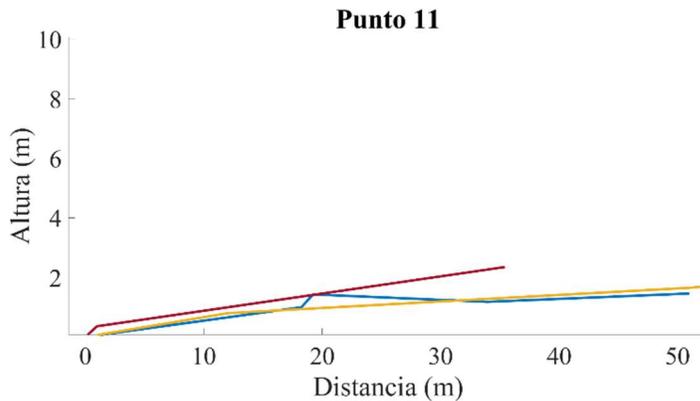


Figura 27. Perfil de playa del punto 11 (Bacocho)

En el punto 11 la distancia determinada es de 17.8 m, esta es la playa con mayor distancia respecto a la altura de oleaje. Es una playa amplia (Figura 27) con poca actividad turística y con acceso exclusivo de la zona ubicada al

este (Punto 9), no se presta para estar dentro del agua; si no para caminatas o tomar el sol y no hay hoteles en este punto, por lo que se mantiene relativamente prístina. Presenta un ambiente seco y vegetación de matorral, además de estar protegida por una punta rocosa en el extremo oeste del muestreo, por lo que no tiene conexión con playas hacia el oeste. En el punto 10 se encuentra el canal de agua que se ha formado desde tierra arriba, considerando la corriente litoral y la protección rocosa, en este punto es en donde más se acumulan sedimentos, como se puede observar en la Figura 16 existe una acreción de alrededor de 40 a 70 m, así como puede verse la mayor tasa de acumulación representada en las barras de la gráfica de la (Figura 15).

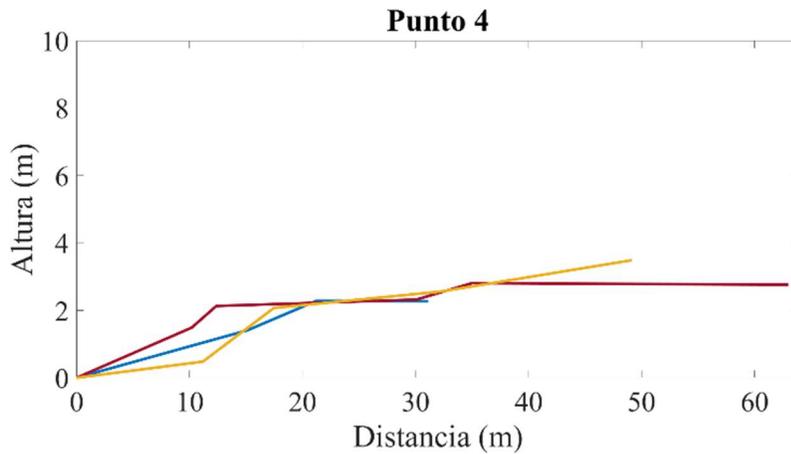


Figura 28. Perfil de playa del punto 4 (Zicatela)

El punto 4 presenta también una gran amplitud (10.8 m) respecto al oleaje máximo (Tabla 11), este punto se encuentra protegido al sur por una punta rocosa (Figura 23), que puede ser una fuente de aporte de

sedimentos. Por otro lado, es una playa de oleaje disipativo, lo que genera que el oleaje rompa antes de llegar a la costa y se acumulen sedimentos en esta zona. Presenta también un escarpe (0.5 – 1 m) propio de la temporada de muestreo (lluvias) septiembre 2019.

Los puntos de menor distancia respecto a la altura del oleaje son el punto 5 (Zicatela) y el punto 9 (Bacocho). El punto 5 se encuentra al norte del punto 4 (Figura 12) y se encuentra en

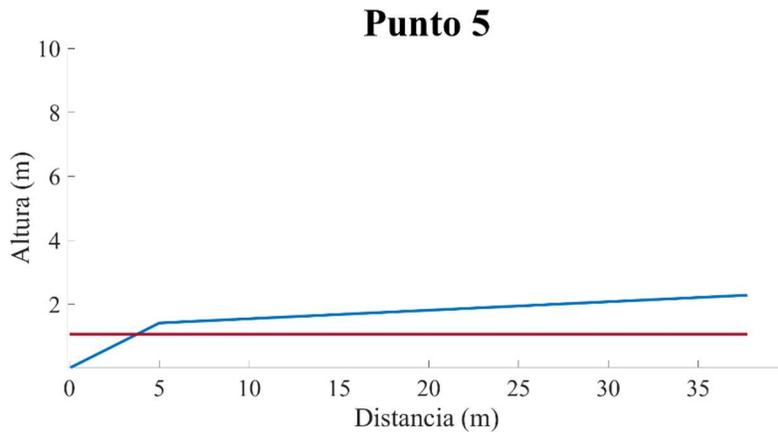


Figura 29. Perfil de playa del punto 5 (Zicatela)

el centro de una playa abierta, por lo que la energía que llega del oleaje es más fuerte, generando una continua erosión, en este punto se encuentra un escarpe muy marcado (> 1 m) (Figura 29), que genera una pendiente de 2.8° (6.12 %) en la zona de mesoplaya, ocasionando que la distancia sea corta. En esta distancia se presenta una acreción, por lo que esta condición puede atribuirse a la temporada de lluvia durante la cual se muestreó el perfil.

El punto 9 (Bacocho) se encuentra al este del punto 11; el cual es de los más amplios, en este punto se encuentra la única entrada a toda la playa Bacocho, también existe un escarpe muy pronunciado ($> 2\text{m}$) como se observa en la Figura 30, ubicado en las cercanías de la zona hotelera, y de un campamento tortugero, el cual es importante mencionar ya que el escarpe no permite una entrada de las tortugas más que a pocos metros de distancia fuera del mar.

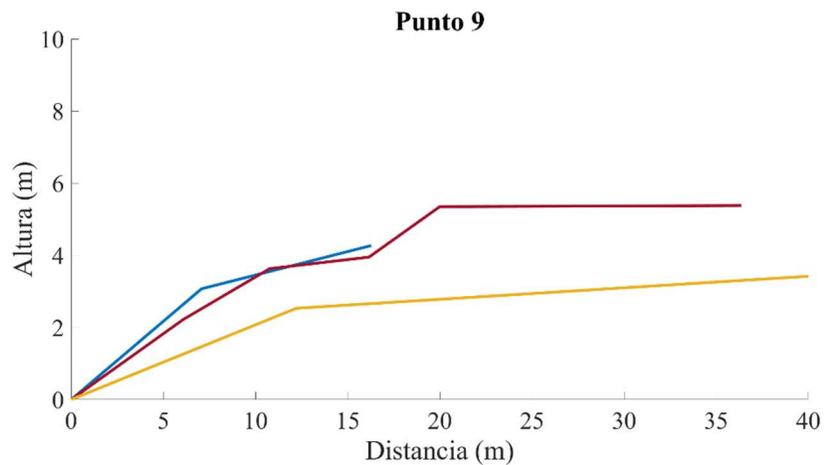


Figura 30. Perfil de playa para el punto 9 (Punta Bacocho)

Las pendientes fuertes nos hablan de un ambiente erosivo, el punto 9 presenta una pendiente de 8.7° (19.3%), y el punto 8 presenta una pendiente de 9.3° (20.5%).

El punto 9 en el análisis histórico presenta una acreción de $\approx 33.5\text{ m}$ (3.5 m/año), sin embargo es evidente el crecimiento poblacional para esta zona que también se encuentra a una gran altura (4.5m) dentro de la transición de infraplaya a mesoplaya, por lo que es importante plantearse si esto es una evolución que eventualmente se verá reflejada en erosión, ya que el escarpe y la pendiente son muy pronunciadas generando desniveles, las cuales no son atribuibles a la energía del oleaje propia a la temporada,

En el punto 8 se encuentra el perfil con la mayor pendiente, y al mismo tiempo es en este punto en donde se observa un ambiente erosivo dentro de la evaluación histórica, ligado a las

observaciones hechas, se puede atribuir a un efecto antrópico por crecimiento de actividad en la zona desplazando sedimentos hacia el mar.

El punto 6 (Zicatela) y el punto 11 (Punta Bacocho) son los que presentan menor pendiente; para el punto 6 que se encuentra en la zona oeste de Zicatela, es en donde existe una mayor acreción, en las imágenes satelitales se observa que la pluma de sedimentos provenientes del río Colotepec llegan hasta esa zona, depositando sedimentos; por otro lado, en las imágenes comparativas (Figura 23) observamos que en esta zona existe un crecimiento poblacional que ha desplazado sedimentos a la zona litoral.

El punto 11 (Punta Bacocho) se encuentra en la zona oeste de la playa, en donde anteriormente se describió la amplitud del perfil y su evolución que hasta ahora ha presentado una acreción, lo que corresponde con la pendiente; de la misma manera es este punto el que presenta menor altura de los perfiles (1.9 m) esto puede deberse a la poca presencia de urbanización que permite la acumulación libre a lo largo de toda la playa.

La altura se refiere al punto más alto obtenido en el perfil, el punto 7 (Bahía Principal) tiene la mayor altura evaluada (5.3 m); es una playa amplia en la que se observa acreción (Figura 20) y el punto de mayor altura se encuentra en la zona de supraplaya, por lo que puede ligarse al continuo aporte de sedimentos tierra dentro, como posible consecuencia del desplazamiento antrópico, además de los aportes sedimentarios de la desembocadura de la laguna y la del río Colotepec.

V.III SEDIMENTOLOGÍA DE PLAYA

TEXTURA

De las 11 muestras procesadas, indican una tendencia hacia tamaños de arena media, moderadamente bien clasificada para las zonas de mesoplaya y supraplaya, así como a arenas gruesas para las zonas de infraplaya de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas (Figura 31).

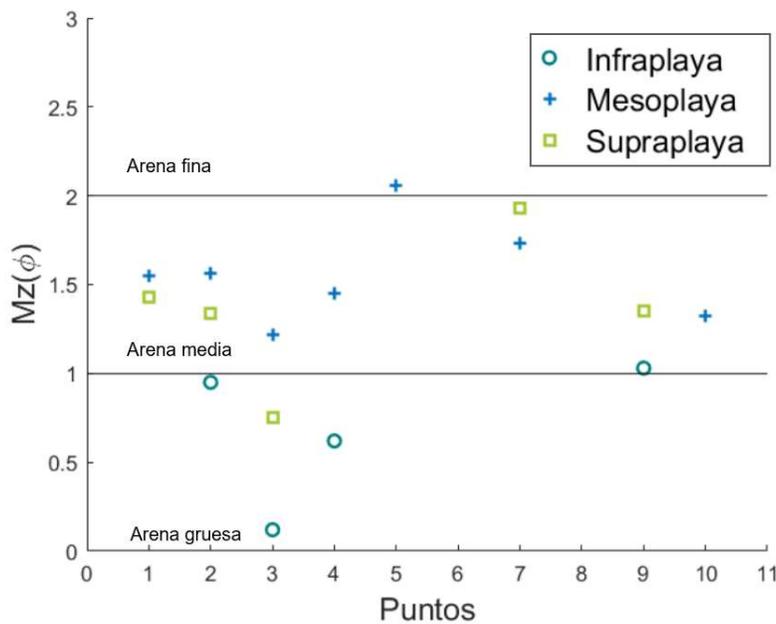


Figura 31. Tamaño de partículas ($Mz \phi$) de sedimentos obtenidas para los 11 puntos de muestreo

Los puntos 1, 2 y 3 corresponden a la zona de la desembocadura del Río Colotepec: El punto 1, que es el único que se encuentra del lado este, se observa el tamaño de arena correspondiente a arenas medias, considerando que las corrientes marinas transportan los sedimentos a la zona oeste, es consistente y corresponde a los sedimentos de playa que describe Carranza-Edwards, 2001 para México.

Los puntos 2 y 3 se encuentran de lado oeste, los cuales se ven influenciados por el depósito de sedimentos acarreado desde la desembocadura del Río por la corriente litoral, esto se representa con arenas que tienden a gruesas en la zona de infraplaya, ya que corresponde a un depósito fluvial, el tamaño de partícula corresponde a arenas medias especialmente para la zona de meso y supraplaya, en el punto 3 se observa un cambio en el que se tiende a arenas gruesas, siendo este el punto más alejado de la desembocadura del río y cercano a una punta rocosa se puede considerar que estos sedimentos son aportes producto de la erosión generada en las puntas por el oleaje y en menor medida del transporte marino con aporte fluvial.

Los puntos 4, 5 y 6 corresponden a la zona de Zicatela, se observa una mayor variación desde sedimentos finos a gruesos; en el punto 4, la arena de mesoplaya se sitúa dentro de arenas medias e infraplaya en arenas gruesas generadas por un aporte de sedimentos de la punta rocosa a la zona de infraplaya; la arena fina del punto 5 para la zona de mesoplaya puede deberse a un aporte de sedimentos desde la zona urbana por la antropización y el desplazamiento sedimentario por las calles hacia la zona de playa, así como por la selección del viento, ya que la planicie costera es amplia y permite esta selección.

El resto de las muestras: punto 7 (Bahía Principal), punto 8 (Puerto Angelito) y puntos 9, 10 y 11 (Punta Bacocho) se concentran dentro de las arenas medias, lo cual concuerda con el valor de $Mz (\phi)$ de 1.62 (arenas medias) proporcionado por Carranza-Edwards, 2001 para toda la zona.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR GRÁFICA INCLUSIVA

La desviación estándar (Figura 32) se concentra en moderadamente bien clasificada teniendo algunos puntos de los puntos 1 y 4 en la zona de mesoplaya como bien clasificados y para infraplaya de los puntos 2 y 3 así como supraplaya del punto 3 dentro del rango moderadamente clasificados.

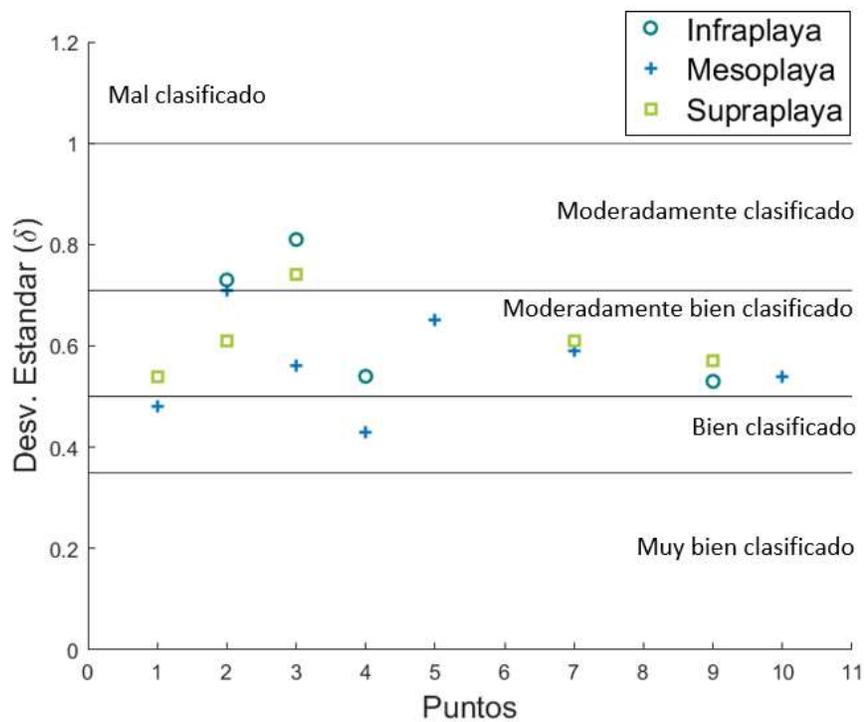


Figura 32. Desviación estándar de partículas sedimentarias (σ) obtenidas para los 11 puntos

ASIMETRÍA GRÁFICA INCLUSIVA

En su mayoría son arenas casi simétricas (Figura 33), con excepciones para los primeros 3 puntos que corresponden a la zona ubicada en las cercanías de la desembocadura de Río Colotepec, que para los puntos 1 y 2 más cercanos a la misma desembocadura presentan una tendencia de asimetría hacia los finos que se liga a la dinámica fluvial de la zona, y en la zona de infraplaya para los puntos 2 y 3 que se encuentran de lado oeste de la desembocadura se observa que son asimétricos hacia los gruesos.

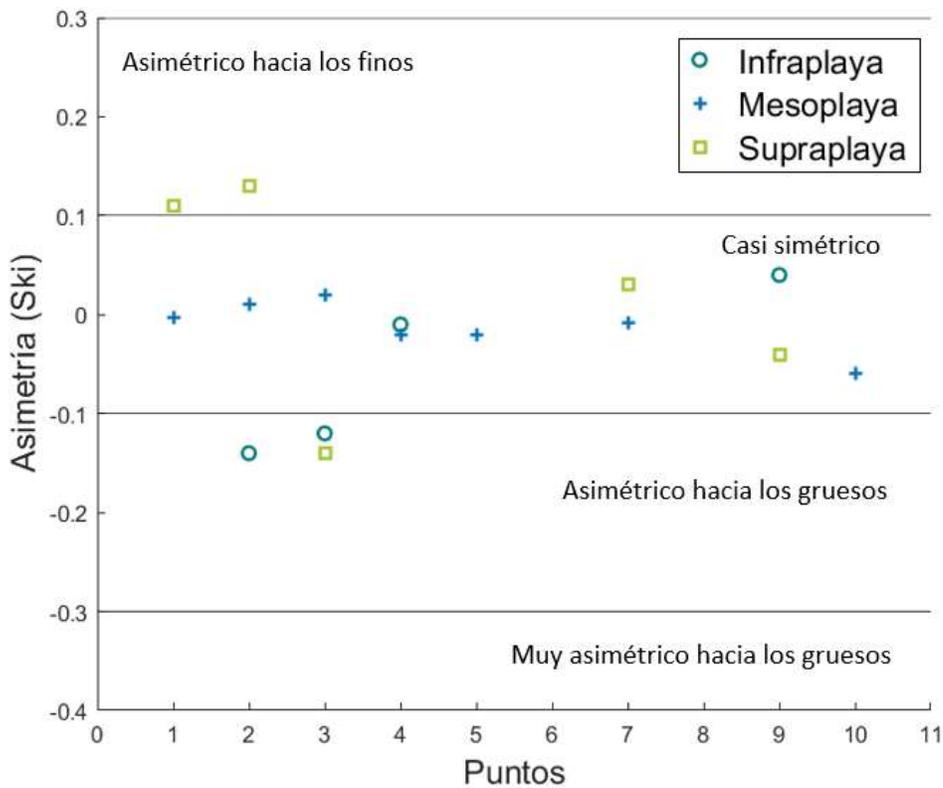


Figura 33. Asimetría de partículas sedimentarias obtenidas para los 11 puntos de muestreo

CURTOSIS

La curtosis también presenta una tendencia hacia arenas mesocúrticas (Figura 34), con una tendencia a leptocúrticas en el punto 3 el cual puede ser relacionado al aporte constante de material erosionado de la punta rocosa. También observamos que el punto 5 se encuentra dentro del rango de arenas platicúrticas, esto puede deberse a la arena que proviene de las zonas urbanas que cambia la tendencia de arenas mesocúrticas.

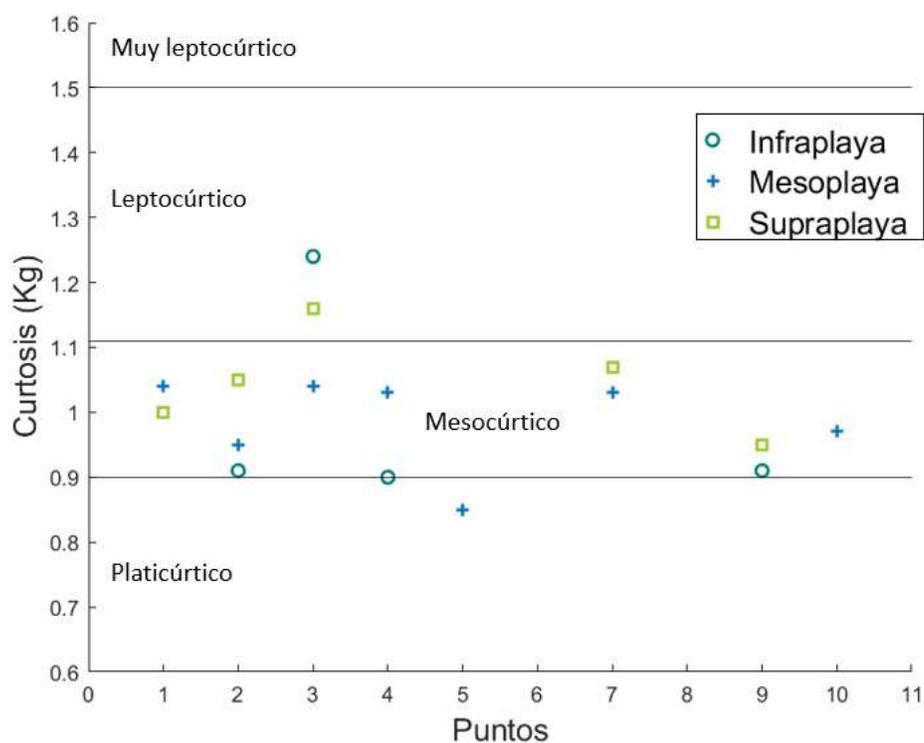


Figura 34. Curtosis de partículas sedimentarias obtenidas para los 11 puntos de muestreo

V.IV ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

Con los análisis obtenidos, se hizo una comparativa de las 6 variables que, de acuerdo con el sistema de clasificación de Ojeda, *et al.*, 2008 descrito en la metodología; tienen una clara influencia en la evolución de la costa:

RESISTENCIA QUE OFRECE EL SOPORTE GEOLÓGICO/GEOMORFOLÓGICO A LA EROSIÓN (MOR)

Esta variable expresa la erodibilidad de las diferentes formaciones costeras, con los resultados obtenidos en el apartado V.II Morfología de playa se realizó una asignación de las geoformas con la clasificación de Ojeda, *et al.*, 2008, para así obtener un valor de vulnerabilidad entre 1 y 5 (Tabla 12).

Tabla 12. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable geológica/geomorfológica (MOR) 1= muy baja, 2 = baja, 3 = media, 4 = alta, 5 = muy alta, de acuerdo con Ojeda et al., 2008

Clasificación geomorfológica	Clasificación variable geológica/geomorfológica de acuerdo con Ojeda <i>et al.</i>, 2008	Grado de vulnerabilidad
Acantilado rocoso Punta rocosa Playa de bolsillo	Acantilados altos sobre rocas coherentes	1
Bahía	Acantilados medios/bajos sobre formaciones sedimentarias de alta erodabilidad.	3
Playa abierta	Playa extensa	4
Playa asociada a desembocadura (playa-barrera)	Playas adosadas a formaciones de isla-barrera	5

Con esta variable se observa una vulnerabilidad alta, siendo que en su mayoría la zona de estudio son playas abiertas, son menores las zonas rocosas que presentan una vulnerabilidad muy baja, estas se concentran cercanas al punto 8 (Puerto Angelito), entre la Bahía Principal y Punta Bacocho. Las zonas asociadas a desembocaduras de ríos son las que presentan una vulnerabilidad muy alta debido a la energía que existe en estas zonas que se refleja en una continua modificación de acuerdo con el comportamiento fluvial (Figura 35).

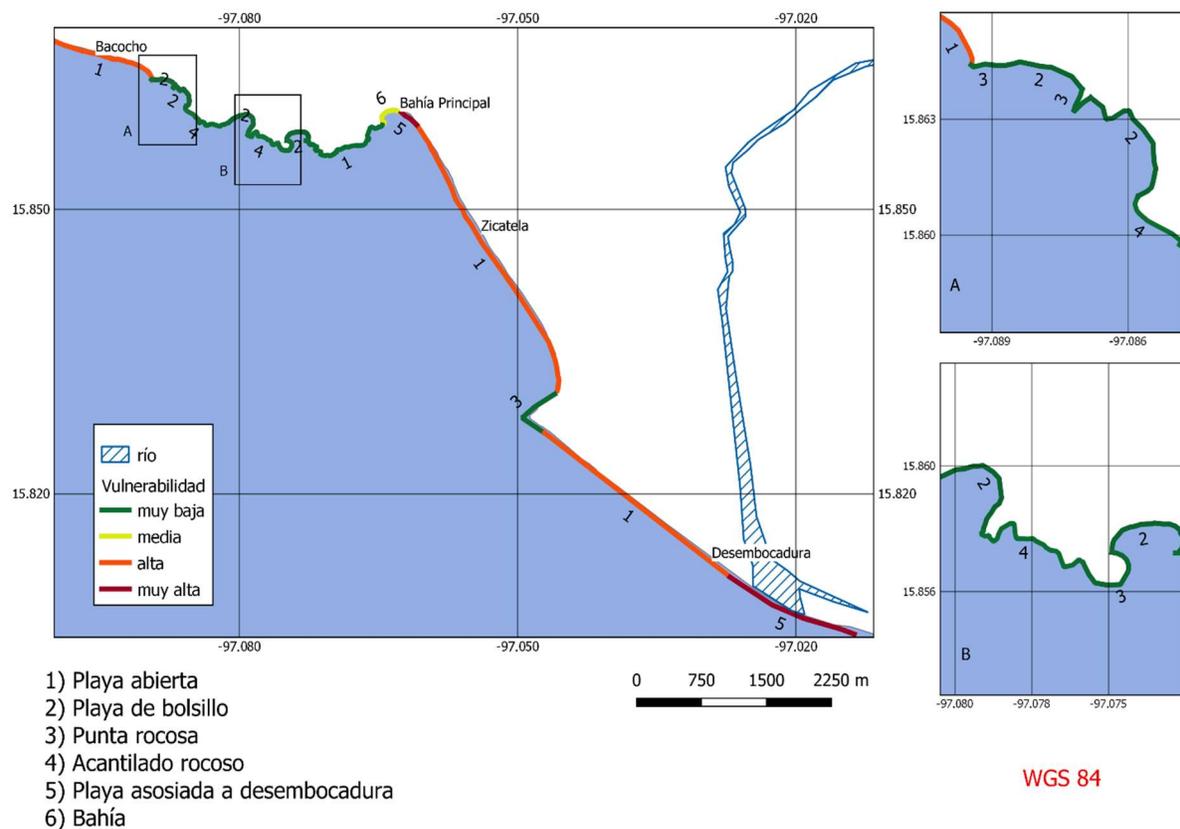


Figura 35. Representación de la variable de vulnerabilidad geológica geomorfológica (MOR)

LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO EN LA LÍNEA DE COSTA A LARGO PLAZO (ERO)

Se hizo una clasificación utilizando la tasa de erosión evaluada, asignando valores entre 1 y 5 utilizando los rangos establecidos por el USGS para el CVI de acuerdo con Ojeda *et al.*, 2008 (Tabla 13).

Tabla 13. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable del cambio en la línea de costa a largo plazo (ERO) 1= muy baja, 2 = baja, 3 = media, 4 = alta, 5 = muy alta, de acuerdo con Ojeda et al., 2008

Sitio	Años	Intervalo (años)	Desplazamiento total promedio (m)	Desplazamiento anual promedio	Vulnerabilidad
Bacocho	2009-2020	11	33.5	3.04	1
Puerto Angelito	2003-2020	17	-4.8	-0.28	3
Bahía Principal	2003-2020	17	22.3	1.31	2
Zicatela	2003-2020	17	35.3	2.08	1
Desembocadura (puntos 2 y 3)	2003-2020	17	16.5	0.98	3
Los Naranjos (punto 1)	2003-2020	17	-27.04	-1.5	4

Mediante los resultados obtenidos para la tasa de erosión se generó un mapa para la visualización de la vulnerabilidad (Figura 36), y aunque se ha detallado el análisis histórico de la línea de costa, de una manera general se observa una vulnerabilidad alarmante por erosión de costa a largo plazo, incluso la zona de Los Naranjos (Punto 1) con una vulnerabilidad de 4, se puede explicar por la naturaleza cambiante de la zona en particular.

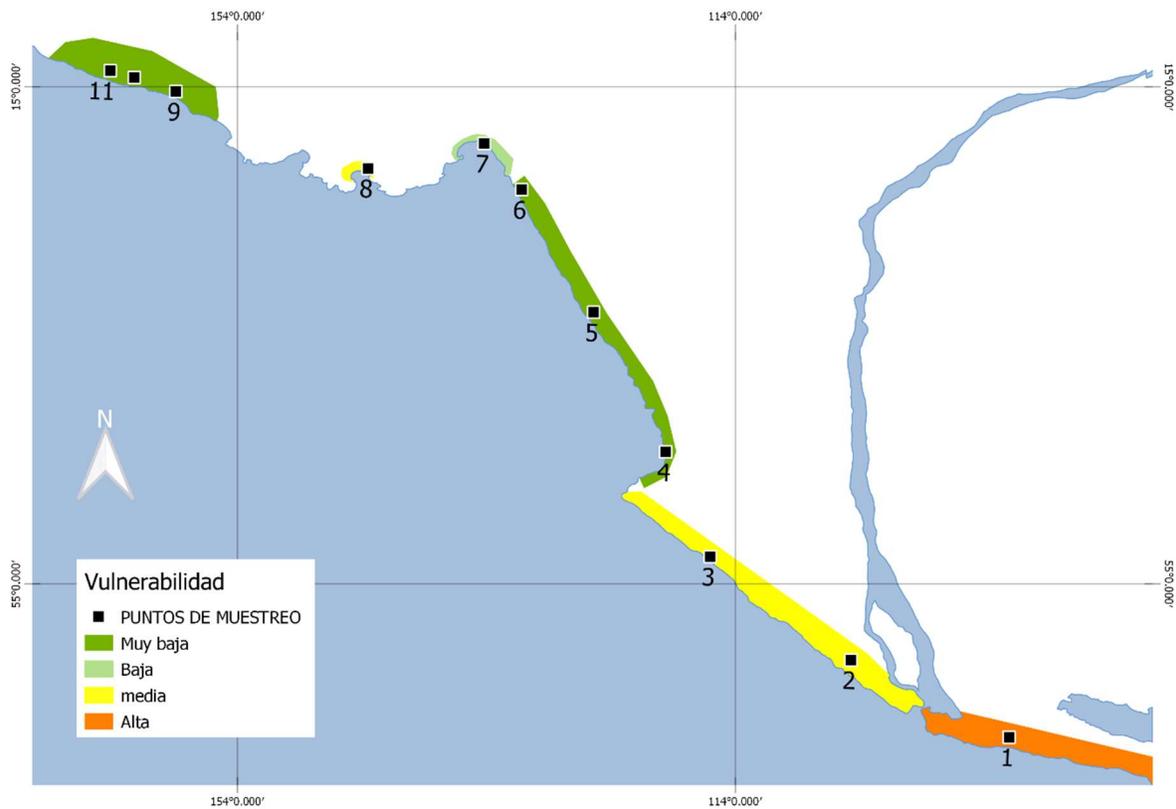


Figura 36. Representación de la variable del cambio en la línea de costa a largo plazo (ERO)

Tenemos una vulnerabilidad muy baja para punta Bacocho y Zicatela, en estas zonas existe un notorio aporte de sedimentos por parte de la zona urbana, y aeroportuaria por lo que el desplazamiento es predominantemente positivo disminuyendo su vulnerabilidad

La Bahía Principal presenta una vulnerabilidad baja, a pesar de que existe una fuerte acreción, ésta solo se representa en la zona este de la playa y en la otra, existe una erosión en donde existe una escollera que modifica la sedimentación para la zona oeste, los aportes sedimentarios de la laguna, y posiblemente los provenientes del río se acumulan en la zona de la desembocadura de la laguna, la cual trae sedimentos de la zona hotelera.

Puerto Angelito y la Barra de Colotepec (Puntos 2 y 3) presentan una vulnerabilidad media, para el caso de puerto angelito llama la atención por ser una playa de bolsillo protegida por puntas rocosas; sin embargo, considerando su naturaleza mayormente rocosa y la urbanización de la zona se puede considerar que el sedimento está siendo desplazado de manera antrópica de tierra a mar, siendo esta acción más rápida de la que pudiera generar un aporte de sedimentos o una acción de erosión- depósito. Al estar protegida los sedimentos que llegan a la zona son mínimos, en su mayoría son generados en la zona por lo que el acarreo a mar dentro se vuelve más rápido causando esta erosión.

Para el caso de Los Naranjos (Punto 1), presenta una vulnerabilidad alta, la cual, considerando su naturaleza de barra, se puede considerar un proceso natural ya que además es el sedimento es sometido al transporte por las corrientes litorales y fluviales que van de este a oeste, generando una erosión continua no permitiendo el depósito en este punto.

SUSCEPTIBILIDAD A LOS PROCESOS DE INUNDACIÓN MARINA (ITOPPO)

Esta variable conjunta la pendiente, distancia y altura con respecto al oleaje máximo para evaluar la susceptibilidad ante procesos de inundación marina mediante el Índice Topográfico (ITOPPO) que se muestra en la *Tabla 17*.

Distancia

Este parámetro indica la distancia que hay entre la zona de infraplaya y el punto al cual el oleaje máximo reportado puede penetrar la playa, en este punto se considera que, a mayor penetración, existe una mayor vulnerabilidad por procesos de inundación. Para el caso de la zona de estudio encontramos que existe de manera general una vulnerabilidad muy baja (Tabla 14), ya que se analizan los primeros 10 metros de costa y en todos ellos la pendiente sobrepasa la altura de oleaje máximo.

Tabla 14. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de distancia de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA

PUNTO	DISTANCIA (m)	VALOR VULNERABILIDAD
P1	5.8	1
P2	7.8	1
P3	6.5	1
P4	10.8	1
P5	2.8	1
P6	5.9	1
P7	4.2	1
P8	6.3	1
P9	2.8	1
P10	6.3	1
P11	17.8	1

PENDIENTE

Este parámetro indica en porcentaje, la inclinación del perfil de playa, en el cual se considera: a menor pendiente, mayor vulnerabilidad. Para el caso de la zona de estudio encontramos pendientes pronunciadas que ya se han analizado dentro de los perfiles de playa, teniendo una vulnerabilidad en su mayoría muy baja, siendo el punto 6 el que presenta una vulnerabilidad media, en este punto existe un crecimiento antrópico que puede ligarse a un desplazamiento de sedimentos de tierra dentro a la zona de playa (Tabla 15).

Tabla 15. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de pendiente de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4=ALTA, 5=MUY ALTA

PUNTO	PENDIENTE (%)	VALOR VULNERABILIDAD
P1	10.2	1
P2	7.1	2
P3	8.3	1
P4	8.5	1
P5	6.1	2
P6	4.0	3
P7	13.4	1
P8	20.5	1
P9	19.3	1
P10	14.7	1
P11	5.0	2

ALTURA

Este parámetro nos habla de la altura máxima encontrada en el perfil de playa, en donde: a menor altura mayor vulnerabilidad. Se encuentra en el análisis que la vulnerabilidad del punto 1 al punto 6 (Zona de la Desembocadura y Zicatela) es Alta, ya que son playas no tan amplias y que a pesar de presentar escarpes, no tienen una altura mayor a 6 m, el punto 7 (Bahía Principal) y 9 (Punta Bacocho) presentan una Vulnerabilidad Moderada, ambos presentan escarpes que propician esta condición, el punto 8 y 9 tienen una vulnerabilidad Baja, ya que presentan una mayor pendiente al ser playas más angostas y el punto 11 que presenta la vulnerabilidad más alta se le puede atribuir a su amplitud y la baja influencia antrópica para el punto (Tabla 16).

Tabla 16. Asignación de valor de vulnerabilidad para el parámetro de altura de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA

PUNTO	ALTURA (m)	VALOR VULNERABILIDAD
P1	2.9	4
P2	3.6	4
P3	3.3	4
P4	3.1	4
P5	2.3	4
P6	2.7	4
P7	5.3	3
P8	2.7	2
P9	4.5	3
P10	3.8	2
P11	1.9	5

ITOPO

Una vez conjuntados los valores y obteniendo el índice topográfico (ITOPO) se le asignó un valor al cual se le hizo clasificación para la ponderación (Tabla 6), obteniendo así el índice topográfico y su valor de vulnerabilidad (Tabla 17).

Tabla 17. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable topográfica (ITOPO) de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA

PUNTO	DISTANCIA	PENDIENTE	ALTURA	TOPO	ITOPO
P1	1	1	4	2.0	2
P2	1	2	4	2.3	3
P3	1	1	4	2.0	2
P4	1	1	4	2.0	2
P5	1	2	4	2.3	3
P6	1	3	4	2.7	3
P7	1	1	3	1.7	2
P8	1	1	2	1.3	2
P9	1	1	3	1.7	2
P10	1	1	2	1.3	2
P11	1	2	5	2.7	3

Observamos que a pesar de que en las evaluaciones de los parámetros por separado existen vulnerabilidades de altas a muy altas, para el ITOPO tenemos solo Bajas y Moderadas, ya que la combinación de estos factores genera cierta resiliencia permitiendo mayor adaptación a los procesos de inundación, sin embargo, algunos parámetros deben seguir

siendo determinados ya que pueden cambiar drásticamente en época de secas y/o por acciones antrópicas.

ALTURA MEDIA DE OLEAJE SIGNIFICANTE

Se obtuvo mediante los datos de tablas para Puerto Ángel, Oaxaca de los registros de la Estación Mareográfica del Servicio Mareográfico de Geofísica de la UNAM, solo se consideran los valores dentro de los rangos “normales”, evitando aquellos que entran dentro de condiciones extremas, siendo este valor: $H_s = 1.5 - 2.0$ m, el cual fue clasificado dentro de vulnerabilidad muy alta para toda la zona de estudio (Tabla 18).

Tabla 18. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable de altura media significativa (HS) de acuerdo con Ojeda et al., 2008. 1=MUY BAJA, 2=BAJA, 3=MEDIA, 4= ALTA, 5=MUY ALTA

PUNTO	HS (m)	VALOR VULNERABILIDAD
P1	<i>1.5 – 2.0</i>	5
P2		
P3		
P4		
P5		
P6		
P7		
P8		
P9		
P10		
P11		

HS = oleaje significativa medio

TASAS DE CAMBIO DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR

Esta tasa de cambio está ligada a oscilaciones del nivel del mar que pueden derivarse por varios factores externos de acuerdo con lo reportado se encuentra dentro de una vulnerabilidad muy baja (Tabla 19), el servicio mareográfico de la UNAM reporta que el rango de marea es 1.7 mm/año

Tabla 19. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable de tasa de cambio del nivel relativo del mar (LEV) de acuerdo con Ojeda et al., 2008.

<i>Variables</i>	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
<i>Valor clasificado</i>	1	2	3	4	5
<i>LEV (mm/año)</i>	(0, 1.8]	(1.8, 2.5]	(2.5, 3.0]	(3.0, 3.5]	(3.5, máx.]

RANGO MAREAL MEDIO

Este valor fue obtenido por datos de la SEMAR, determinado por el comportamiento mareal y predicciones basadas en modelos y el valor medio (Tabla 20). La zona de estudio tiene un tipo de marea:

Marea mixta semidiurna

$$\text{Rango de marea} = 1.058 - (-0.477) = 1.535 \text{ m}$$

Tabla 20. Asignación para el grado de vulnerabilidad de la variable rango mareal medio (TID) de acuerdo con Ojeda et al., 2008.

<i>Variables</i>	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
<i>Valor clasificado</i>	1	2	3	4	5
<i>TID (m)</i>	(6, máx]	(4, 6]	(2, 4]	(1, 2]	(0, 1]

VULNERABILIDAD FÍSICA

Los valores obtenidos de las 6 variables analizan las amenazas de manera individual, en el IVC se conjuntan para obtener el índice de vulnerabilidad que considera todos estos aspectos sin que el valor se asocie a cambios específicos (Tabla 21), mediante la ecuación:

$$CVI = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$$

PUNTO	MOR	TOPO	ERO	HS	LEV	TID	IVC
1	5	2	3	5	1	4	10.0
2	4	3	3	5	1	4	10.9
3	4	2	3	5	1	4	8.9
4	4	2	1	5	1	4	5.2
5	4	3	1	5	1	4	6.3
6	4	3	1	5	1	4	6.3
7	5	2	2	5	1	4	8.2
8	1	2	3	5	1	4	4.5
9	4	2	1	5	1	4	5.2
10	4	2	1	5	1	4	5.2
11	4	3	1	5	1	4	6.3

Tabla 21. Valores obtenidos para el IVC de acuerdo con la ecuación propuesta por Ojeda et al., 2008.

El valor calculado del IVC se dividieron en 5 clases utilizando los percentiles 20%, 40%, 60% y 80%, con la finalidad de ordenar los resultados de la vulnerabilidad. Los rangos obtenidos para la clasificación de la vulnerabilidad total calculada fueron (Tabla 22):

Tabla 22. Clasificación del IVC

VARIABLES	MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
VULNERABILIDAD CLASIFICADA	1	2	3	4	5
VALOR DEL CVI	(0 - 5.1]	(5.1 – 6.3]	(6.3 – 7.6]	(7.6 – 8.9]	(8.9 – 10.9]

Mediante la ponderación de los valores y la clasificación de las variables se obtuvo el IVC de los 11 puntos (Tabla 23), con esto podemos hablar de la vulnerabilidad relativa de cada tramo costero emergido en condiciones normales de oleaje, marea y elevación del nivel del mar, cabe recalcar que no se evalúa la vulnerabilidad a fenómenos extremos como huracanes (Figura 37).

Se observa que la vulnerabilidad mas alta está en la zona de la desembocadura del Río Colotepec (punto 1 – Los Naranjos, puntos 2 y 3 – Barra de Colotepec) que corresponde a la respuesta que existe por naturaleza al encontrarse cerca de la desembocadura del río y ser una Barra, disminuyendo hacia el punto 3 por la lejanía y la protección de una punta rocosa.

Se encontró una vulnerabilidad de baja a muy baja en los puntos de Zicatela, Puerto Angelito y Punta Bacocho, aunque no en todos predominan los procesos de acreción, los procesos de erosión se ven disminuidos como consecuencia a las protecciones naturales que presentan ante la energía que produce los procesos de erosión.

La Bahía Principal es el único punto que presenta una vulnerabilidad media a pesar de presentar una acreción durante los últimos años, esto se puede asociar a que es de las zonas con mayor presión y cambios antrópicos, generando cambios bruscos a los naturales generando cambios abruptos en los procesos naturales de la zona.

Tabla 23. IVC calculado para los 11 puntos.

ZONA	PUNTO	VALOR PONDERADO	
LOS NARANJOS	1	5	MUY ALTA
	2	5	MUY ALTA
BARRA DE COLOTEPEC	3	4	ALTA
	4	1	MUY BAJA
ZICATELA	5	2	BAJA
	6	2	BAJA
	7	3	MEDIA
BAHÍA PRINCIPAL	8	1	MUY BAJA
PUERTO ANGELITO	9	1	MUY BAJA
	10	1	MUY BAJA
PUNTA BACOCHO	11	2	BAJA

MAPA DEL INDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

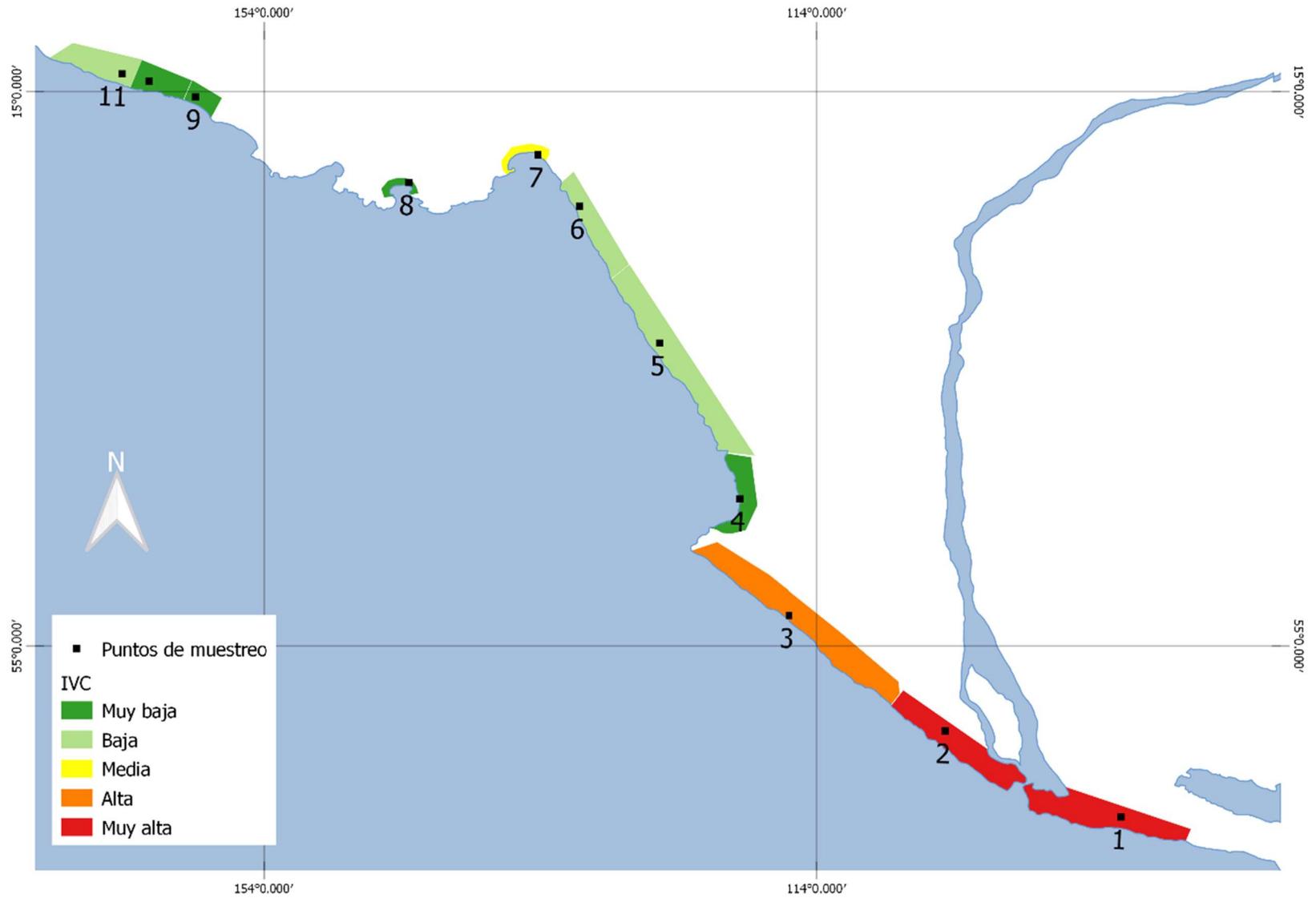


Figura 37. Representación del Índice de Vulnerabilidad Costera en la zona de estudio (de Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec)

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados y análisis obtenidos dentro de esta investigación se puede concluir respecto a las preguntas de investigación;

¿Cuál es el comportamiento de los procesos de erosión y acreción presentes en la zona de estudio?

Dentro de la zona de estudio conformada de Punta Bacocho a la desembocadura del Río Colotepec, en el punto Los Naranjos; el movimiento neto de la línea de costa entre los años 2003 y 2020 ha sido predominantemente positivo indicando ganancia de terrenos al mar, con un promedio para toda la zona de estudio de 0.93 m/año (Tabla 24).

Tabla 24. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de la zona de estudio.

PUNTO	\bar{x} desplazamiento neto (m)	\bar{x} desplazamiento anual (m)
Punta Bacocho	33.5	3.05
Puerto Angelito	-4.80	-0.28
Bahía Principal	22.3	1.31
Zicatela	35.3	2.08
Desembocadura	16.6	0.98
Los naranjos	-27.04	- 1.5

n = 128 transectos, \bar{x} desplazamiento anual = 0.93 m

Tanto el punto 1 (Los Naranjos), como el punto 8 (Puerto Angelito) presentan el fenómeno de erosión (-1.5 y -0.28 m/años respectivamente) sin embargo, estos dos puntos tienen características específicas; para el caso del punto 1 (Los Naranjos) la conjunción de las corrientes litorales y la naturaleza de barra hacen prevalecer la erosión y para el punto 8, los factores antrópicos propician el movimiento de sedimento hacia el mar y la protección de puntas rocosas limitan la entrada del mismo, lo que genera el efecto inverso al esperado para una playa de bolsillo.

Punta Bacocho es el punto que presenta una acreción mayor dentro de toda la zona de estudio (3.04 m/año), y esto se encuentra ligado a ser la zona menos urbanizada, así como la que recibe un impacto directo de sedimentos encausados a desembocar en esta zona.

¿Existe una correlación entre las zonas más erosionadas con los sectores de mayor presión antrópica?

El punto Los Naranjos, ubicado al este de la desembocadura del Río Colotepec indica una tendencia erosiva, en donde se observa de acuerdo con la pluma de arrastre de sedimentos, es el transporte natural que genera este comportamiento considerando la baja presencia de urbanización en la zona.

Existe una relación inversa a la planteada en la hipótesis: en donde existe una mayor presión antrópica, se observan los fenómenos de acreción, los cuales pueden ligarse al crecimiento durante los años evaluados y el arrastre de los sedimentos de tierra dentro a la zona litoral a través de las calles.

En Puerto Angelito los efectos de depósito y erosión se relacionan estrechamente con la actividad antrópica en la zona litoral, la cual se ha visto acrecentada a lo largo de los años, creando una erosión relacionada al cambio de uso de suelo, en donde además se potencia por la protección que tiene de dos puntas rocosas, haciendo más lenta la entrada de sedimentos que la salida de estos.

¿Existe algún tipo de vulnerabilidad por erosión costera en la zona de estudio que requiera un plan de riesgos?

Será importante comenzar a generar planes de riesgos para la zona de Desembocadura que se conforma por los puntos 1- Los Naranjos, 2 y 3 – Barra de Colotepec, ya que es la zona que presentan una mayor vulnerabilidad por erosión, aunque es la zona en donde hay menor actividad antrópica; sin embargo, su estudio está ligado a los puntos siguientes: Zicatela y Bahía Principal (4, 5, 6 y 7) ya que es donde se acumulan los sedimentos transportados generados por esta erosión.

La acreción en las playas puede deberse a un gran aporte de sedimentos tierra dentro, el cual es producto de un crecimiento urbano que ha sido paulatino durante los años de estudio, es por ello que se recomienda evaluar la procedencia de los sedimentos de una manera puntual para conocer de dónde provienen los aportes y si estos podrán consolidarse lo suficiente para mantener este crecimiento o bien, si llegará un punto en el que el aporte disminuya, generando que el mar comience a ganar terreno debido a la naturaleza de los sedimentos, posiblemente con mayor rapidez con la que se observa la acreción.

VII. REFERENCIAS

- Acevedo, J., M. A. Escalante & M. Turok (1996) *El caracol Púrpura*. p. 1071-1100. En *Pesquerías Relevantes de México. XXX Aniversario del Instituto Nacional de la Pesca. 1962–1992*. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México DF.
- Atlas de Riesgos del Estado de Oaxaca. (2003) Gobierno del Estado de Oaxaca. 85p. (online) <https://www.oaxaca.gob.mx/proteccioncivil/atlas-de-riesgo/>
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology. An introduction*. 1st edition. John Wiley & Sons, LTD, England, 322 p.
- Boak, E. H., y Turner, I. L. (2005). *Shoreline definition and detection: A review*. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688:703 p.
- Botello, A. V., y Villanueva Fragoso, S. (2010). *Introducción*. En A. V. Botello (Ed.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (p. 514). SEMARNAT - INE, UNAM - ICMYL.
- Cabrera-Ramirez, M., A. Carranza-Edwards. (2018). *Influence of the Cozoaltepec River sediment on turtle nesting at La Escobilla beach in Oaxaca, on the Mexican Pacific coast*. *Hidrobiológica*. 28. 71-81. 10.24275/uam/izt/dcbi/hidro/2017v28n1/Cabrera.
- Carranza Edwards, A. (2010). *Causas y consecuencias de la erosión de playas*. En A. Yáñez Arancibia (Ed.), *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, CDMX: Instituto de Ecología (INECOL), 36:50 p.
- Carranza Edwards, A., A. Z. Márquez García, C. I. Tapia González, L. Rosales Hoz y M. A. Alatorre Mendieta (2015). *Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del*

sur del Golfo de California y del Caribe: Causas y consecuencias de la erosión de playas.
En A. Yáñez Arancibia (Ed.), *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, CDMX:
Instituto de Ecología (INECOL), 36:50 p.

- Carranza Edwards, A., M. Gutierrez Estrada y R. Rodríguez Torres (1975). *Unidades morfo-tectónicas continentales de las costas mexicanas*. Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología. México, UNAM, 9 p.
- Carranza-Edwards, A. y M. Caso Chávez (1994). *Zonificación del perfil de playa*. Geo-UNAM, 2 (2), 26:32 p.
- Castro B. (2014). *Morfología y vulnerabilidad costera por erosión en el litoral de Campeche, México*. (Tesis de posgrado) Universidad Autónoma Metropolitana, México, 175 p.
- Cerdá V. (2002). La gestión integrada de la costa. ¿La última oportunidad? *Revista de obras públicas ingeniería y territorio*. (61) 8:15 p.
- CONABIO. (2015) *Política Nacional de mares y costas de México*. Gestión Integral de las Regiones mas Dinámicas del Territorio Nacional.
- CONAGUA (2010). *Playas limpias*. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=4&n2=45&n3=45%0D>
- Folk, R. L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphills, Austin, Texas, 170 pp.
- García Rubio, G. (2017). *¿Por qué se mueve la línea de costa?* *Ciencia*, 68(3), 22-27p.

- Goman M., A. Joyce, R. Mueller (2005). *Stratigraphic evidence for anthropogenically induced coastal environmental change from Oaxaca, México*. University of Washington, Quaternary Research (63), 250:260 p.
- González Ríos, A. (2011). *Oaxaca 2011: Un diagnóstico breve*. México: Grupo Mesófilo A. C., 66 p.
- inecc.gob.mx
[www://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/estados.html](http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/estados.html)
- INEGI. (2012). Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos [San Pedro Mixtepec -Distr. 22-, Oaxaca Clave geoestadística 20318].
- IPCC (2007). Cambio Climático 2007. *Informe de Síntesis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM, PNUMA, 114 p.
- IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 p.
- IPCC. (2019). *Comunicado de prensa del IPCC*. Descargado de [https : / /www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/09/sroccp51 – pressreleasees s.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/09/sroccp51_pressreleasees.pdf)
- Jiménez-Arenas, Olga-Lidia, J. Rojas R. R., V. R. Oliva-Aguilar, R., Tejeida-Padilla. (2021). *Desarrollo de territorios costeros turísticos en México mediante la autogestión con base sistémica*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 5:28 pp.

- Krumbein, W.C. y Sloss L.C. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*, W.H. Freeman. Company, San Francisco, 660 p.
- Lanza G., J.L. García, C. Tovilla y J.L. Arredondo (1993). Ambientes y pesquerías en el litoral Pacífico Mexicano. INEGI, México, 52 p.
- Martínez Correa, J. R. (2010). Importancia de la textura de los sedimentos de playa y su relación con anidaciones de tortugas marinas mexicanas. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias, Carrera de Biólogo, 61 p.
- Moreno Casasola, P., H. López Rosas, D. M. Infante Mata, I. Espejel, O. Jiménez Orocio, N. Rodríguez Revelo, V. E. Espejel, M. L Martínez y R. Monroy (2014). Diagnóstico por estado: Oaxaca. En: M. L. Martínez, P. Moreno Casasola, I. Espejel, O. Jiménez Orocio, D. M. Infante Mata y N. Rodríguez Revelo (Eds.), Diagnóstico de las Dunas Costeras de México, SEMARNAT, CONAFOR, México, 241:252 p.
- Ojeda Zujar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. Boletín de la A. G. E. (30), 103:118 p.
- Ojeda Zujar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D., & Fraile Jurado, P. (2008). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa Andaluza. En L. Hernández, & M. Parreño J., Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial. España, Las Palmas de Gan Canaria: Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC, 660:671 p.
- Palacio Aponte, G. (2001). *Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal*

de imágenes de satélite. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía (46), 7:14 pp.

- Pérez-Rojas, A. y Márquez, A. (2017). *Sedimentología* (1.^a ed.). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Plan municipal de Desarrollo (2008). H. ayuntamiento constitucional San Pedro Mixtepec, Oaxaca, 152 p.
- Ponce Bastidas, J. S. (2015). *Dinámica costera en las playas El Cardonal y Cabo Pulmo, Baja California Sur*. Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos. México: Centro Disciplinario de Ciencias Marinas, 100 p.
- Portal Valenzuela, B. F., Espinoza Ramírez, J. C. & Carreño Zúñiga, M. (2014). *Impacto de la demanda de un turismo social en la sustentabilidad de la actividad en el balneario de El Quisco, Provincia de San Antonio-Chile*. Investigaciones Geográficas, 83, 102-115. <https://doi.org/10.14350/rig.34429>
- Pulido, J. & López, Y. (2016). *La cadena de valor del destino como herramienta innovadora para el análisis de la sostenibilidad de las políticas turísticas*. El caso de España. Revista Innovar, 26(59), 155-175. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n59.54369>
- Rothwell R.G. 1989. *Minerals and Mineraloids in Marine Sediments*. Elsevier Applied Science, London. 279 p.
- Sánchez Montante, O. (2010). *Elementos oceánicos que impactan la hidrología costera*. En E. Rivera Arriaga, I. Azuz Adeath, L. Alpuche Gual, & G. J. Villalobos Zapata,

Cambio Climático en México un Enfoque Costero – Marino. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, 23:32 p.

- SECTUR (2019). *Indicadores de la actividad turística*. Oaxaca de Juárez. Recuperado de: <http://www.sectur.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2018/03/01.indicadores-turismo-2017-Cierre-definitivo.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2002). *Carta Geológico-Minera Zihuatanejo E14-7-10, Guerrero*, Esc. 1:250,000. Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano).
- SNET. (2010). *Erosión costera*. Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección General del Observatorio Ambiental, 11.
- Comité de Información SECTUR. (2013). Oficio CI/203/2013, 00021004513.
- SEDESOL (2012). *Atlas de riesgos naturales en el municipio de San Pedro Mixtepec, Oax.* México, 113 p.
- Seingier, G., Espejel, I., Fermán, J. L., & Delgado, Ó. (2010). *Vulnerabilidad de las poblaciones costeras ante la peligrosidad natural, enfoque estatal y municipal*. En E. Rivera Arriaga, I. Azuz Adeath, L. Alpuche Gual, & G. J. Villalobos Zapata, Cambio Climático en México. Un Enfoque Costero-Marino. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, 669:688 p.
- SEMARNAT (2014). *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias*. México, SEMARNAT, 99 p.

- SEMARNAT. (2016). Información de la Situación del Medio Ambiente en México. Indicadores Clave, de Desempeño ambiental y de Crecimiento Verde. México: SEMARNAT, 498 p.
- Silva Casarin, R., Martínez, M., Moreno Casasola, P., Mendoza Baldwin, E., López Portillo, J., Lithgow, D., ... Boy Tamborell, M. (2017). *Aspectos generales de la zona costera* (UNAM, Ed.).
- Silva Casarin, R. y Mendoza, E. (2015) *Capítulo A.2.17 Obras Marítimas: Tomo I al Tomo V, Sección A: Hidrotecnia, Tema 2: Hidráulica. Manual de Diseño de Obras Civiles.* Comisión Federal de Electricidad. México.
- Torres Rodríguez, V., Márquez García, A., Bolongaro Crevena, A., Chavarria Hernández, J., Expósito Díaz, G., & Márquez García, E. (2010). *Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático.* En A. V. Botello, S. Villanueva Fragoso, J. Gutierrez, & J. L. Rojas Galaviz, Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático México: SEMARNAT- INE, UNAM- ICMYL, 325:344 p.
- Universidad del Mar. (2000), *Diagnóstico preliminar en la porción marina del Parque Nacional Huatulco*, Universidad del Mar, Oaxaca, México.
- Wolf P. R., D. Charles y D. Ghilani (2013). *Topografía. Alfaomega* (14) 936 p.
- Woodroffe, C. D., 2002. *Coasts: Form, Process and Evolution.* Cambridge University Press, Cambridge, 623 pp.

- Zannie, M. (2020) *Dónde se forman las olas más altas y poderosas del mundo* (online) <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/las-olas-mas-impresionantes-del-mundo> (accessed 22 april 2020).
- Zavala Hidalgo, J., de Buen Kalman, R., Romero Centeno, R., y Hernández Maguey, F. (2010). *Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas*. En A. V. Botello (Ed.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (p. 514). SEMARNAT - INE, UNAM- ICMYL.
- Zetina, M., Sánchez, P., Osorio, R., Mariño, T.; Castillo, C., Cauich, T. (2008). *Análisis de modelos de perfil de playa en equilibrio aplicados a una playa de Yucatán, México*. Ingeniería, septiembre-diciembre. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México. 12 (3), 15 – 31.
- Zizumbo, D. y P. Colunga (1982). *Aspectos etnobotánicos entre los Huaves de San Mateo del Mar, Oaxaca, México*. Biótica (7) 223-271 p.

Anexo 1. Material cartográfico y de imágenes satelitales obtenido para la determinación de procesos de erosión-acreción de la zona litoral del área de estudio.

Tabla 25. Recopilación de material cartográfico e imágenes satelitales obtenidas para el presente estudio

PLATAFORMA	AÑO	RESOLUCIÓN/ESCALA	TIPO DE ARCHIVO
INEGI	2017	1:250 000	Carta topográfica
INEGI	2007	1:250 000	Carta topográfica
INEGI	2002	1:50 000	Carta topográfica
INEGI	1988	1:50 000	Carta topográfica
INEGI	1981	1:50 000	Carta topográfica
Google Earth Pro	2003	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2004	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2005	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2006	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2007	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2008	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2009	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2010	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2011	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2012	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2013	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2014	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2015	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2016	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2017		Imagen Satelital/ NASA
Google Earth Pro	2018		Imagen Satelital/ NASA
Google Earth Pro	2019	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2020	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	7/2009	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies

Tabla 25. Recopilación de material cartográfico e imágenes satelitales obtenidas para el presente estudio

Google Earth Pro	1/2011	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	11/2011	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	1/2012	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	12/2012	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	8/2013	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW
Google Earth Pro	12/2013	0.5 m	Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	7/2014	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	10/2014	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	12/2015	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	4/2016	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	10/2017	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2/2018	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	12/2018	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	2/2019	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	7/2019	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	11/2019	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Google Earth Pro	1/2020	0.5 m	SATELITE WORLD VIEW Imagen Maxar Technologies
Copernicus	04/01/2019	10 m	Sentinel 2-A
Copernicus	19/03/2020	10 m	Sentinel 2-A
Copernicus	24/03/2020	10 m	Sentinel 2-B
Copernicus	04/03/2020	10 m	Sentinel 2-B
Copernicus	13/04/2020	10 m	Sentinel 2-B
Copernicus	16/04/2020	10 m	Sentinel 2-A

**Anexo 2. Códigos de MATLAB para
identificar línea seco – húmeda**

Las imágenes georreferenciadas se pasaron al programa MATLAB y se transformaron a imágenes en escala de grises mediante el siguiente código:

```
imagen= imread ('2020AGOSTO30BP.jpg');
```

```
G= rgb2gray(imagen);
```

Esto se llevó para facilitar la identificación de pixeles de la zona seco-húmeda mediante un código creado para cada imagen:

Herramienta para detección de pixeles y visualización de estos (Figura 38): `imtool(G)`

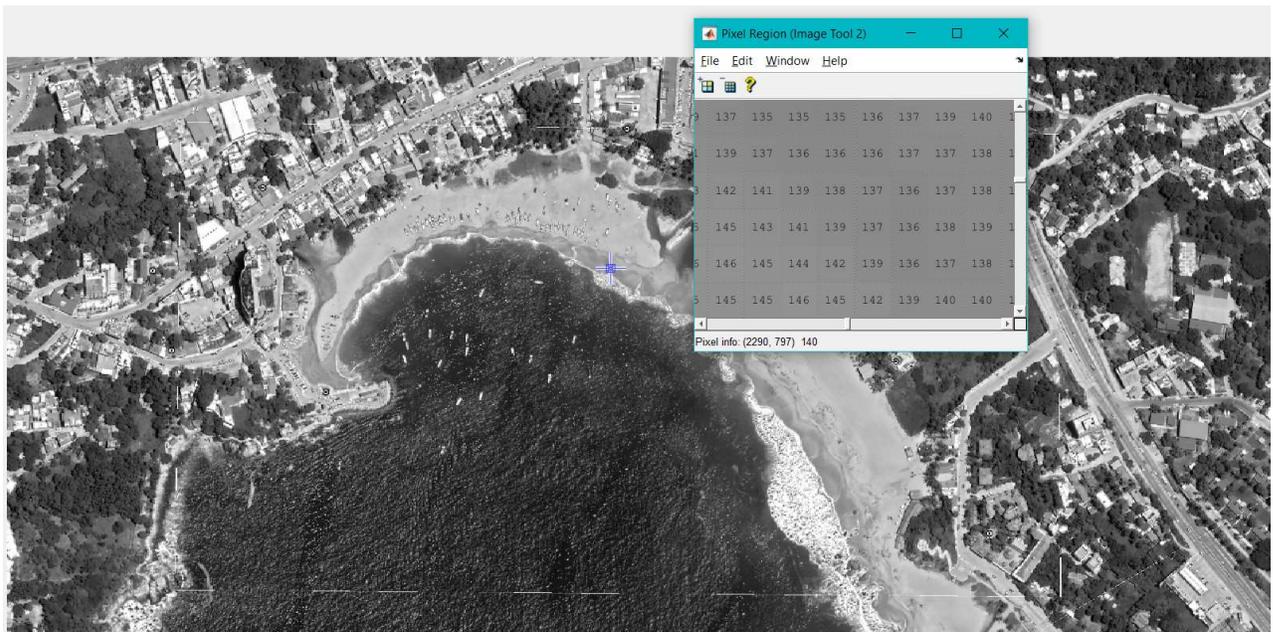


Figura 38. Visualización de valores de pixeles

Código para transformación de pixeles:

```
G (G>140 & G<160)=0;
```

```
G (G<160)=255;
```

```
G (G>190)=255;
```

Código para visualización de imagen transformada (Figura 39)

```
imshow(G)
```



Figura 39 . Imagen con línea seco-húmeda delimitada por píxeles en color negro

Con las imágenes obtenidas en MATLAB se hizo una nueva georreferenciación polinomial con puntos control obtenidos de las imágenes georreferenciadas inicialmente y sobre los píxeles marcados se hizo un trazado vectorial para poder obtener las líneas históricas en una sola capa.

Anexo 3. Datos para la evaluación de la tasa de erosión de la zona de estudio

Tabla 26. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Punta Bacocho.

PUNTA BACOCHO		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
1	45	4.09
2	71	6.45
3	61	5.55
4	39	3.55
5	21	1.91
6	31	2.82
7	24	2.18
8	15	1.36
9	18	1.64
10	18	1.64
11	22	2.00
12	32	2.91
13	30	2.73
14	36	3.27
15	31	2.82
16	42	3.82
<p>Años evaluados = 11, n = 16, \bar{x} desplazamiento neto = 33.5 m, \bar{x} desplazamiento anual = 3.05 m</p>		

Tabla 27. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Puerto Angelito.

PUERTO ANGELITO		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
17	-8	-0.471
18	-10	-0.588
19	0	0.000
20	-7	-0.412
21	1	0.059
<p>Años evaluados = 17, $n = 5$, \bar{x} desplazamiento neto = -4.8 m, \bar{x} desplazamiento anual = -0.28 m</p>		

Tabla 28. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Bahía Principal.

BAHÍA PRINCIPAL		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
22	7	0.41
23	-13	-0.76
24	17	1.00
25	7	0.41
26	24	1.41
27	53	3.12
28	57	3.35
29	20	1.18
30	13	0.76
31	34	2.00
32	38	2.24
33	11	0.65
Años evaluados = 11, n = 12, \bar{x} desplazamiento neto = 22.3 m, \bar{x} desplazamiento anual = 1.31 m		

Tabla 29. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Zicatela.

ZICATELA		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
34	23	1.35
35	42	2.47
36	46	2.71
37	43	2.53
38	68	4.00
39	60	3.53
40	51	3.00
41	55	3.24
42	45	2.65
43	38	2.24
44	50	2.94
45	57	3.35
46	60	3.53
47	28	1.65
48	31	1.82
49	37	2.18
50	54	3.18
51	56	3.29
52	47	2.76
53	41	2.41
54	41	2.41
55	36	2.12
56	43	2.53
57	26	1.53
58	27	1.59

Tabla 29. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Zicatela

59	14	0.82
60	16	0.94
61	16	0.94
62	24	1.41
63	14	0.82
64	16	0.94
65	9	0.53
66	14	0.82
67	16	0.94
68	18	1.06
69	9	0.53
<p>Años evaluados = 17, n = 35, \bar{x} desplazamiento neto = 35.3 m, \bar{x} desplazamiento anual = 2.08 m</p>		

Tabla 30. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Desembocadura

DESEMBOCADURA		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
70	6	0.35
71	9	0.53
72	22	1.29
73	23	1.35
74	29	1.71
75	38	2.24
76	32	1.88
77	32	1.88
78	34	2.00
79	16	0.94
80	30	1.76
81	22	1.29
82	32	1.88
83	26	1.53
84	17	1.00
85	15	0.88
86	20	1.18
87	18	1.06
88	13	0.76
89	19	1.12
90	12	0.71
91	7	0.41
92	5	0.29
93	5	0.29
94	5	0.29

<i>Tabla 30. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de Desembocadura</i>		
95	6	0.35
96	8	0.47
97	10	0.59
98	11	0.65
99	3	0.18
100	2	0.12
101	4	0.24
102	-4	-0.24
103	-11	-0.65
<p>Años evaluados = 17, n = 33, \bar{x} desplazamiento neto = 16.6 m, \bar{x} desplazamiento anual = 0.98 m</p>		

Tabla 31. Datos de desplazamiento para la obtención de tasa de erosión de punto 1 Los Naranjos

LOS NARANJOS		
Transecto	Desplazamiento neto (m)	Tasa (movimiento neto/años)
104	-17	-1.00
105	8	0.47
106	-2	-0.12
107	-6	-0.35
108	-14	-0.82
109	-31	-1.82
110	-38	-2.24
111	-36	-2.12
112	-37	-2.18
113	-37	-2.18
114	-34	-2.00
115	-34	-2.00
116	-27	-1.59
117	-35	-2.06
118	-40	-2.35
119	-38	-2.24
120	-39	-2.29
121	-44	-2.59
122	-31	-1.82
123	-28	-1.65
124	-23	-1.35
125	-16	-0.94
126	-34	-2.00
127	-23	-1.35
128	-20	-1.18

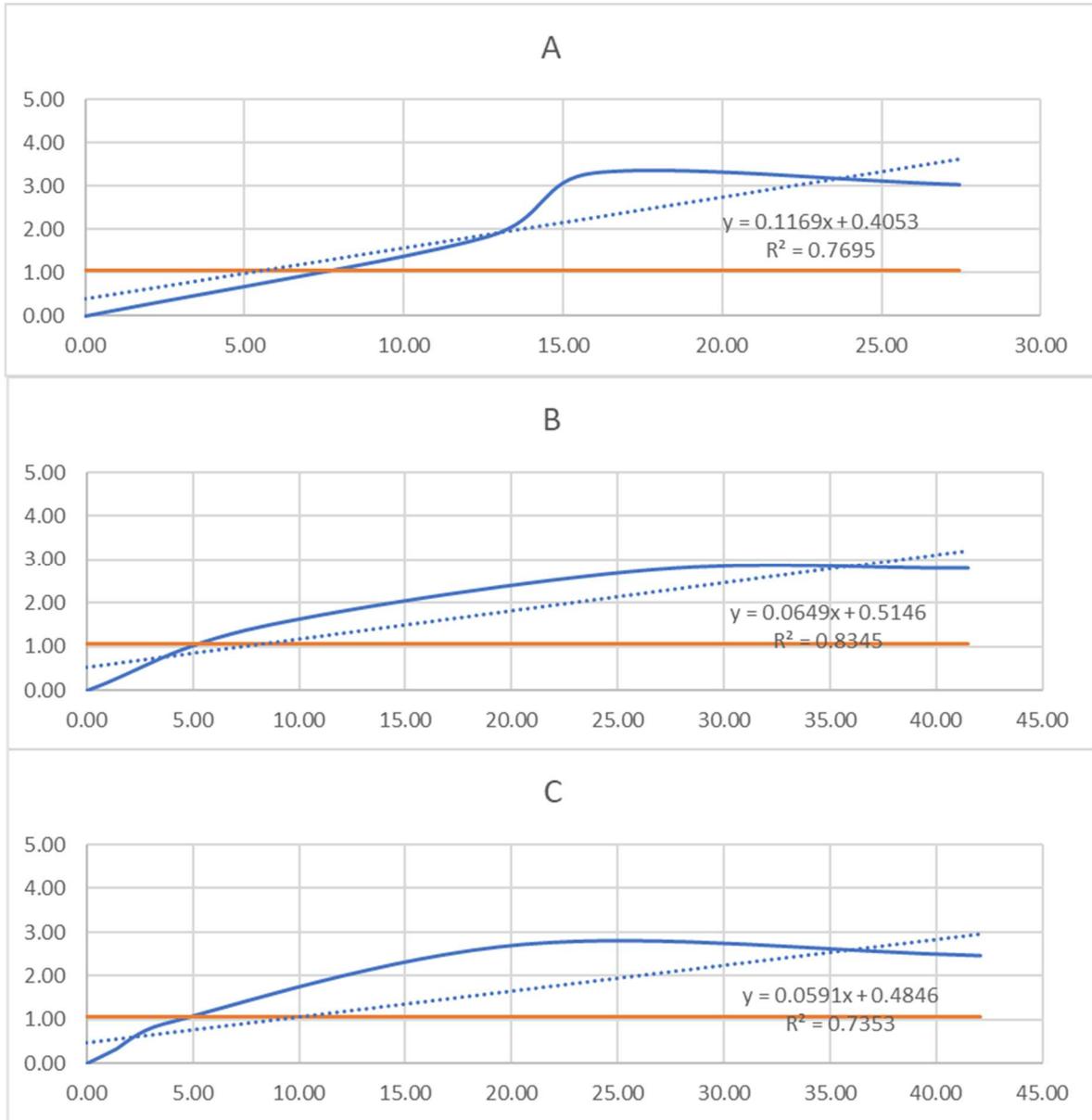
Años evaluados = 17, n = 24, \bar{x} desplazamiento neto = -27.04 m,
 \bar{x} desplazamiento anual = -1.5 m

Anexo 4. Perfiles de la zona de estudio

PUNTO 1

	zona	Altura medida campo	en Altura calculada (l1-n)	Coord X	Coord Y	Distancia (m)
1	infra	4.5	0	712812	1748424	0.000
A	meso	2.663	1.837	712816	1748436	12.649
	meso	1.193	3.307	712812	1748440	16.000
	supra	1.465	3.035	712817	1748451	27.459
2	infra	4.143	0	712759	1748442	0.000
B	infra	2.682	1.461	712761	1748450	8.246
	meso	1.388	2.755	712768	1748467	26.571
	supra	1.347	2.796	712770	1748482	41.485
3	infra	3.966	0	712712	1748465	0.000
C	infra	3.628	0.338	712713	1748466	1.414
	meso	3.063	0.903	712714	1748468	3.606
	meso	1.248	2.718	712722	1748483	20.591
	supra	1.505	2.461	712725	1748505	42.059

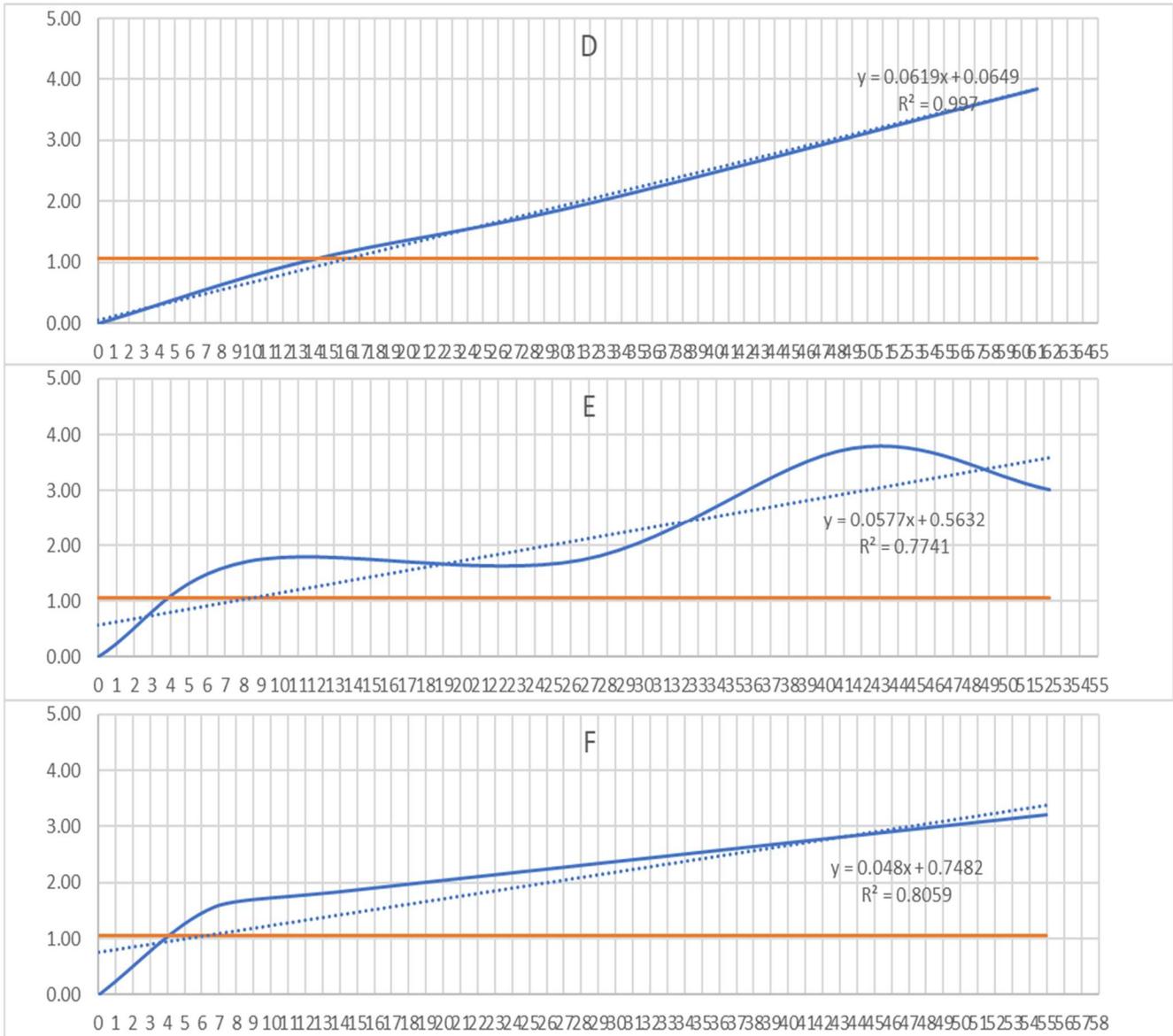
PUNTO 1



PUNTO 2

		Altura	Altura			
4	zona	medida en	calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
		campo	(l1-n)			
	infra	4.997	0	711211	1749183	0.000
D	meso	3.966	1.031	711219	1749194	13.601
	meso	3.042	1.955	711229	1749209	31.623
	supra	1.148	3.849	711243	1749235	61.057
5						
	infra	4.883	0	712759	1748442	0.000
	infra	3.166	1.717	712761	1748450	8.246
E	meso	3.142	1.741	712768	1748467	26.571
	supra	1.123	3.76	712770	1748482	41.485
	supra	1.866	3.017	712712	1748465	52.326
6						
	infra	4.982	0	711129	1749242	0.000
F	infra	3.411	1.571	711132	1749248	6.708
	meso	3.124	1.858	711137	1749254	14.422
	supra	1.765	3.217	711178	1749267	55.009

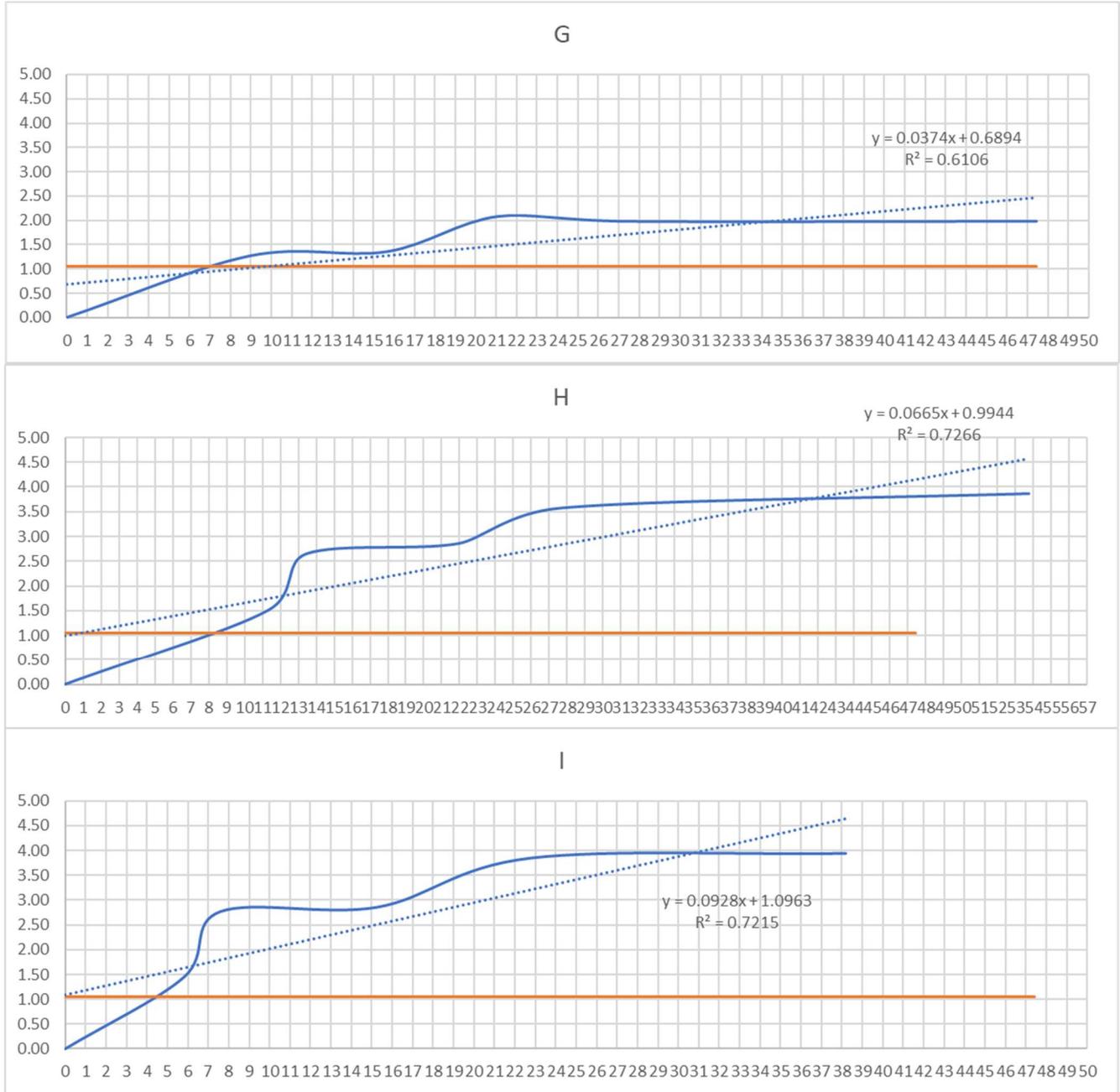
PUNTO 2



PUNTO 3

		Altura	Altura	Coord X	Coord Y	Distancia
7	zona	medida en	calculada			
		campo	(11-n)			
	infra	2.56	0	709803	1750235	0.000
	infra	1.295	1.265	709807	1750243	8.944
G	meso	1.208	1.352	709810	1750249	15.652
	meso	0.483	2.077	709814	1750253	21.095
	supra	0.585	1.975	709818	1750258	27.459
	supra	0.585	1.975	709830	1750274	47.434
8						
	infra	3.912	0	709761	1750266	0.000
	infra	2.401	1.511	709769	1750274	11.314
H	meso	1.256	2.656	709770	1750276	13.454
	meso	1.049	2.863	709776	1750282	21.932
	supra	0.329	3.583	709779	1750287	27.659
	supra	0.0376	3.8744	709799	1750304	53.740
9						
	infra	3.953	0	709724	1750300	0.000
	infra	2.498	1.455	709727	1750305	5.831
I	meso	1.175	2.778	709727	1750307	7.616
	meso	1.09	2.863	709732	1750313	15.264
	supra	0.095	3.858	709738	1750318	22.804
	supra	0.002	3.951	709750	1750328	38.210

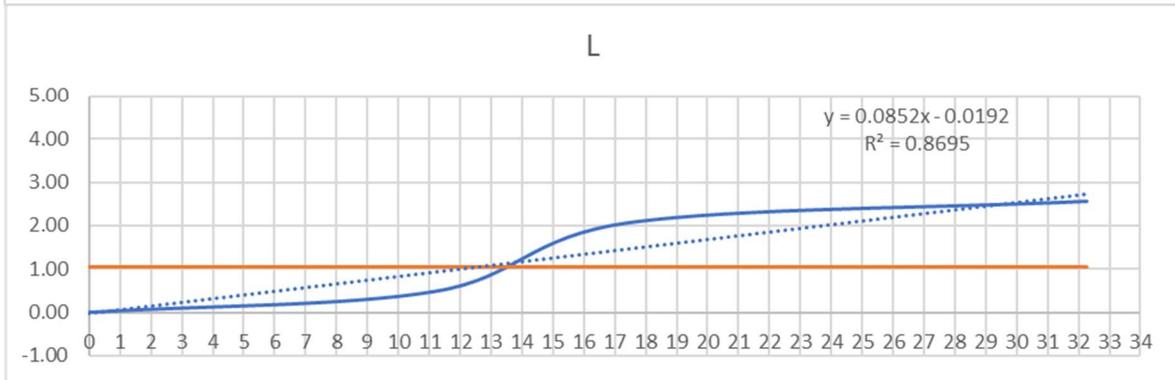
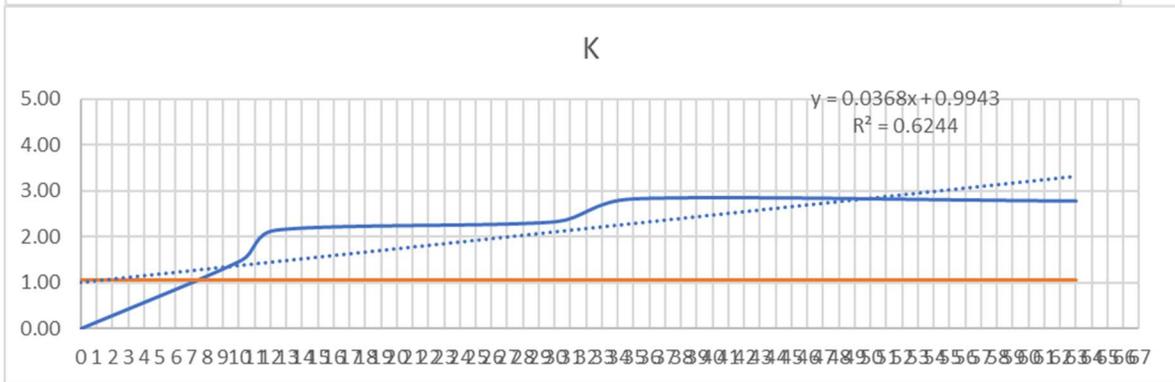
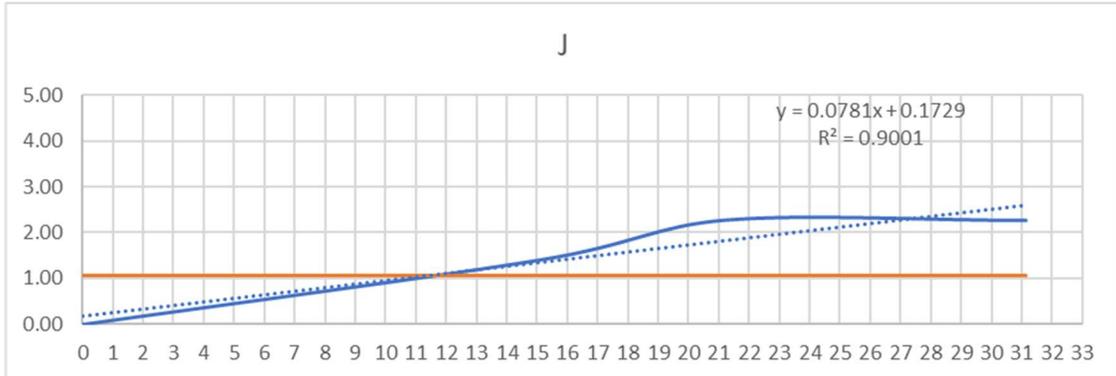
PUNTO 3



PUNTO 4

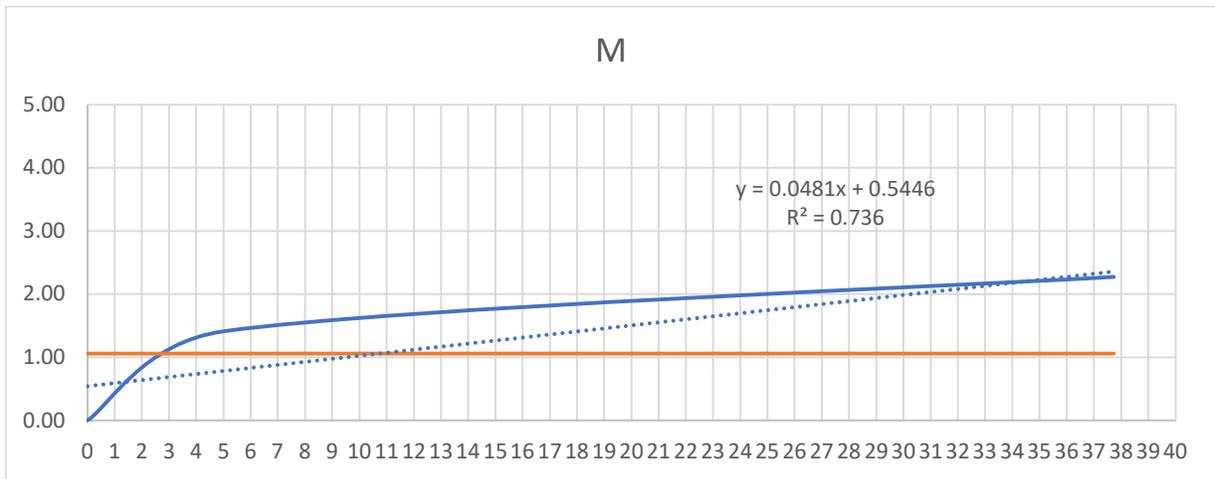
		Altura	Altura			
10	zona	medida en	calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
		campo	(11-n)			
	infra	3.843	0	709319	1751296	0.000
	infra	2.43	1.413	709334	1751294	15.133
J	meso	1.566	2.277	709340	1751293	21.213
	meso	1.572	2.271	709350	1751293	31.145
	supra	0.834	3.009	709368	1751291	49.254
11						
	infra	3.667	0	709312	1751340	0.000
	infra	2.182	1.485	709322	1751342	10.198
	meso	1.533	2.134	709324	1751343	12.369
K	meso	1.351	2.316	709342	1751342	30.067
	supra	0.856	2.811	709347	1751340	35.000
	supra	0.903	2.764	709375	1751341	63.008
12						
	infra	3.721	0	709308	1751389	0.000
	infra	3.238	0.483	709318	1751394	11.180
L	meso	1.653	2.068	709325	1751393	17.464
	supra	1.162	2.559	709340	1751393	32.249
	supra	0.232	3.489	709357	1751393	49.163

PUNTO 4



PUNTO 5

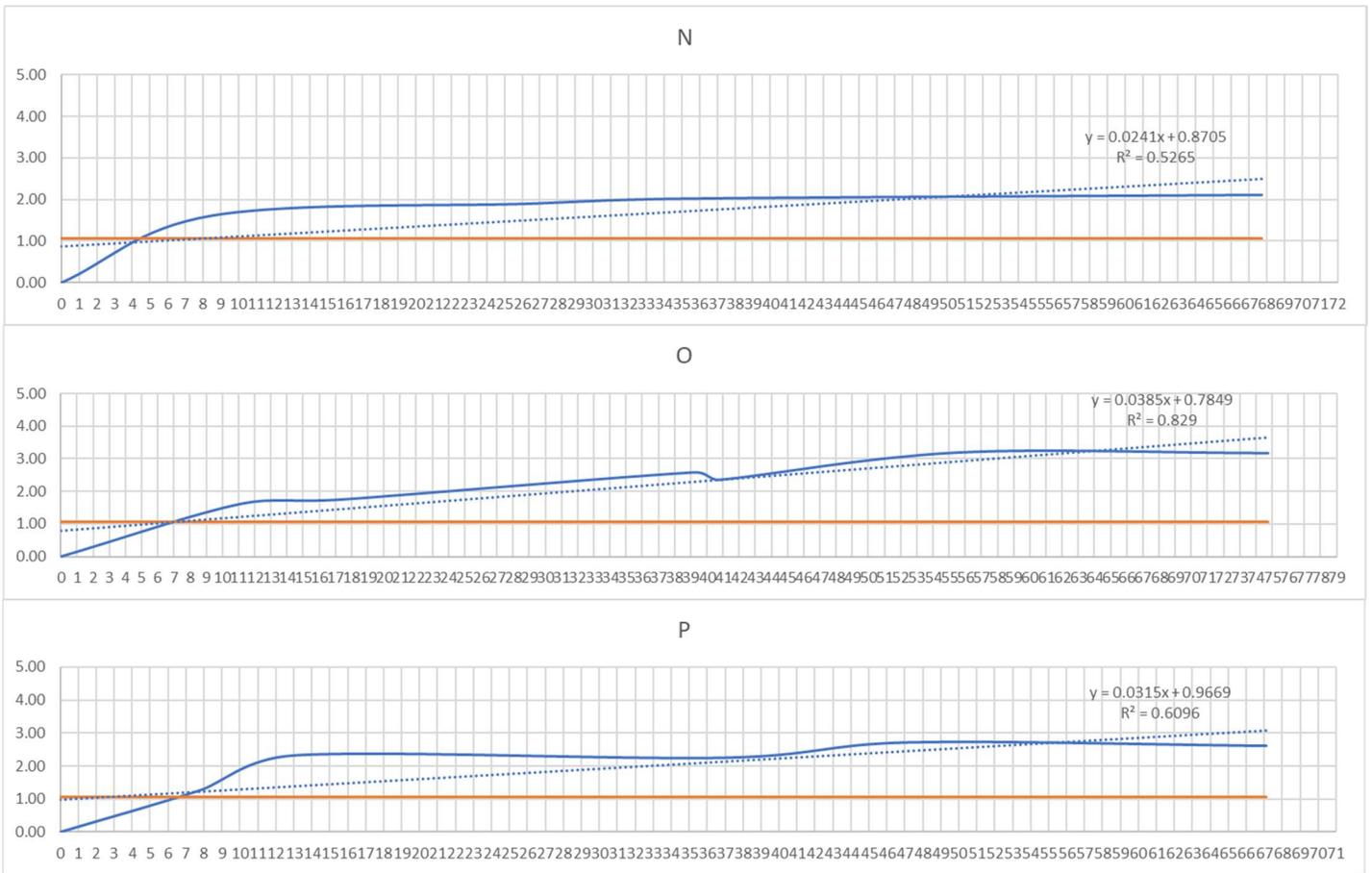
		Altura medida en campo	Altura calculada (11-n)	Coord X	Coord Y	Distancia
13	zona infra	3.843	0	708601	1752741	0.000
M	meso	2.43	1.413	708597	1752738	5.000
	meso	1.566	2.277	708633	1752761	37.736



PUNTO 6

		Altura	Altura			
14	zona	medida en	calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
		campo	(11-n)			
	infra	3.666	0	707830	1753996	0.000
	infra	2.043	1.623	707838	1753999	8.544
N	meso	1.758	1.908	707851	1754012	26.401
	meso	1.637	2.029	707859	1754016	35.228
	supra	1.548	2.118	707888	1754031	67.742
15						
	infra	3.666	0	707844	1753960	0.000
	infra	2.043	1.623	707854	1753965	11.180
	meso	1.911	1.755	707860	1753967	17.464
O	meso	1.083	2.583	707881	1753973	39.217
	meso	1.309	2.357	707881	1753977	40.719
	supra	0.475	3.191	707894	1753984	55.462
	supra	0.492	3.174	707912	1753991	74.733
16						
	infra	3.387	0	707873	1753916	0.000
	infra	2.111	1.276	707878	1753922	7.810
	meso	1.052	2.335	707884	1753923	13.038
P	meso	1.127	2.26	707904	1753936	36.892
	supra	0.66	2.727	707913	1753941	47.170
	supra	0.762	2.625	707932	1753948	67.119

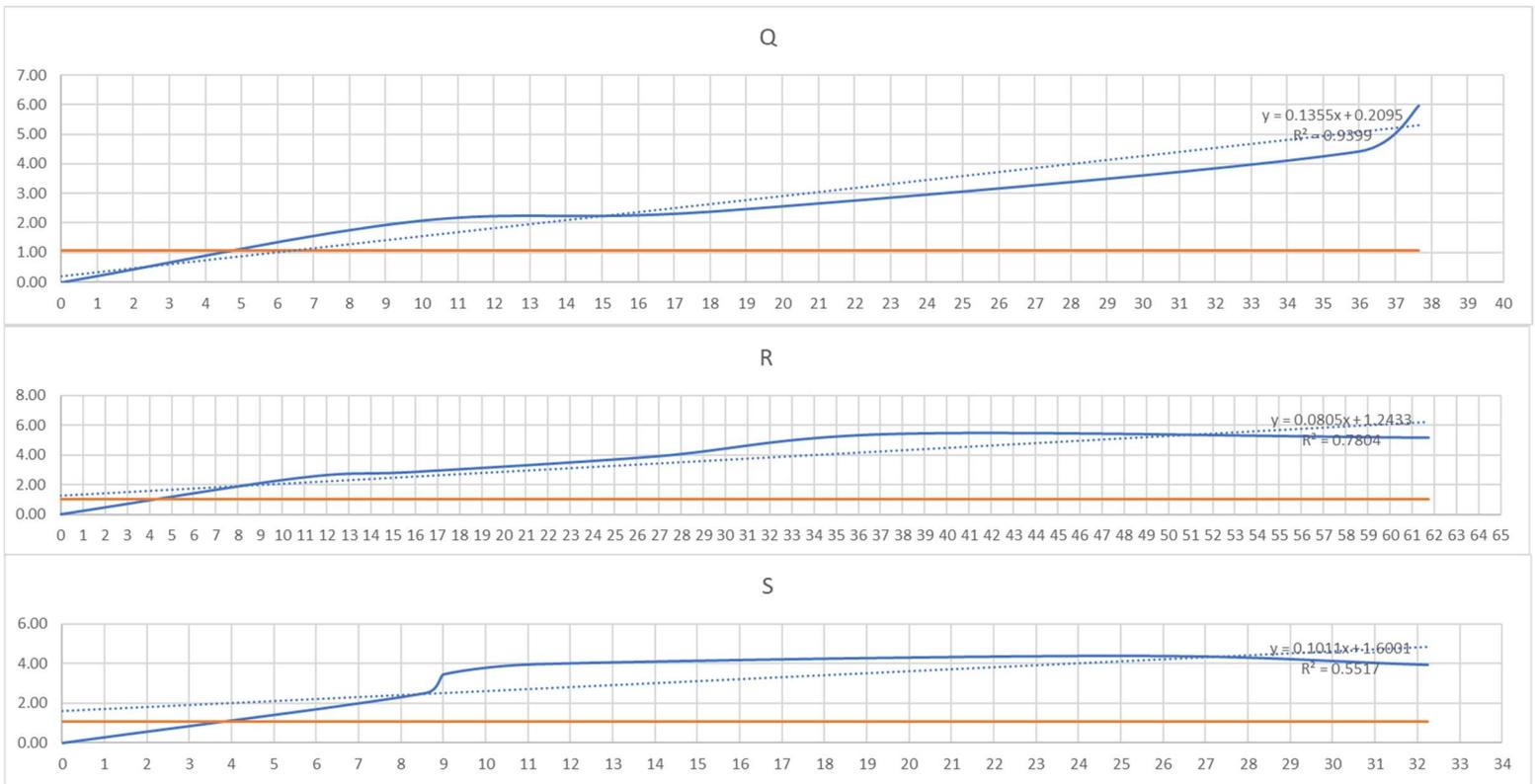
PUNTO 6



PUNTO 7

		Altura	Altura			
	zona	medida en	calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
		campo	(11-n)			
17	infra	6.338	0	707456	1754443	0.000
	infra	4.274	2.064	707460	1754452	9.849
Q	meso	3.919	2.419	707463	1754460	18.385
	meso	1.921	4.417	707456	1754479	36.000
	supra	0.38	5.958	707449	1754480	37.656
18						
	infra	5.719	0	707500	1754426	0.000
	infra	3.268	2.451	707504	1754436	10.770
	meso	2.85	2.869	707506	1754441	16.155
R	meso	1.813	3.906	707510	1754451	26.926
	supra	0.31	5.409	707514	1754461	37.696
	supra	0.561	5.158	707526	1754482	61.741
19						
	infra	5.318	0	707540	1754403	0.000
	infra	2.789	2.529	707545	1754410	8.602
	meso	1.858	3.46	707540	1754412	9.000
S	meso	1.341	3.977	707545	1754413	11.180
	supra	0.922	4.396	707552	1754425	25.060
	supra	1.372	3.946	707556	1754431	32.249

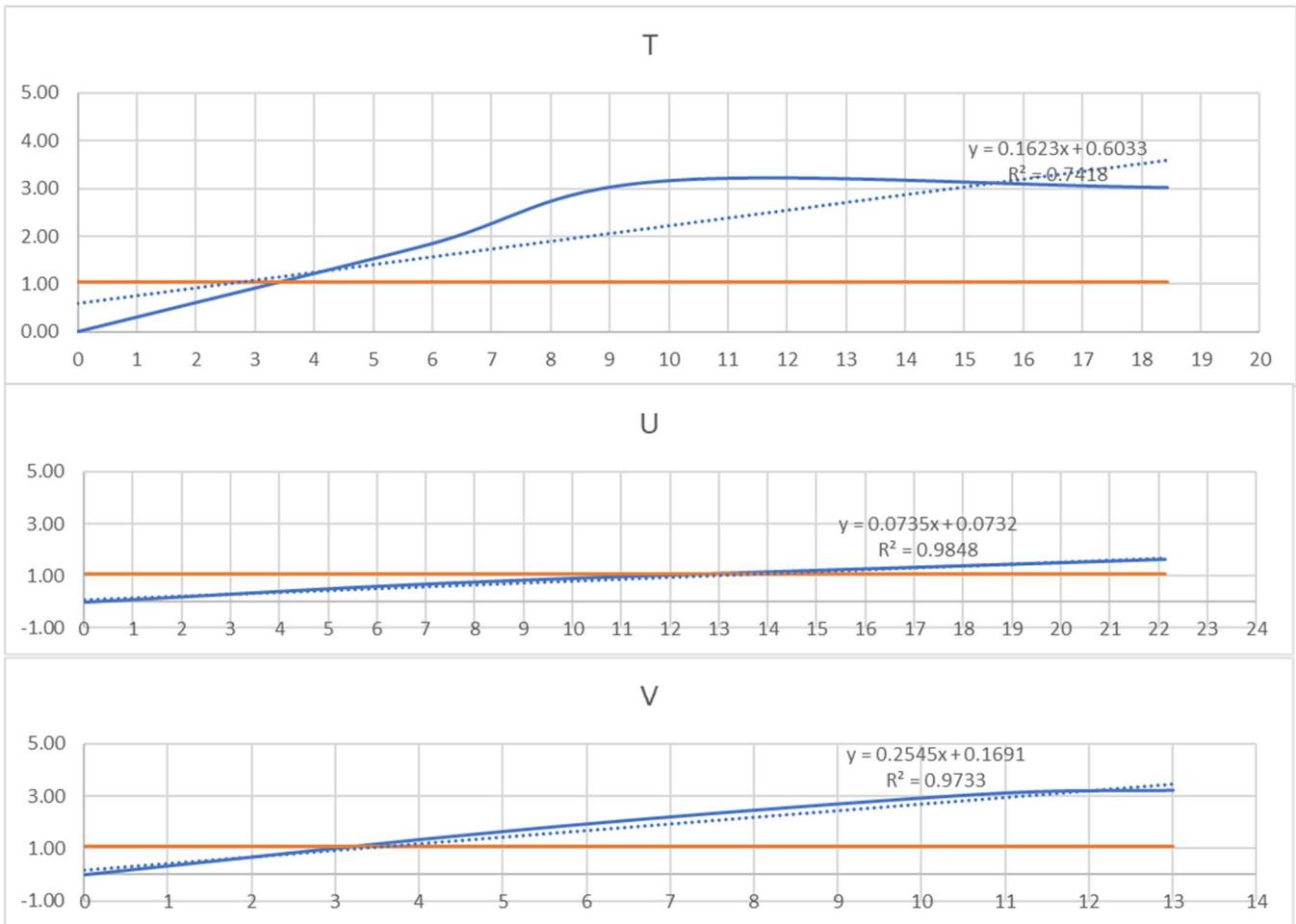
PUNTO 7



PUNTO 8

		Altura	Altura	Coord X	Coord Y	Distancia
20	zona	medida en	calculada			
		campo	(l1-n)			
	infra	4.475	0	706382	1754164	0.000
T	meso	2.687	1.788	706385	1754169	5.831
	meso	1.328	3.147	706386	1754173	9.849
	supra	1.459	3.016	706386	1754182	18.439
21						
	infra	2.981	0	706342	1754183	0.000
U	meso	2.185	0.796	706344	1754191	8.246
	supra	1.324	1.657	706349	1754204	22.136
22						
	infra	4.65	0	706314	1754187	0.000
V	meso	2.88	1.77	706312	1754192	5.385
	meso	1.589	3.061	706306	1754194	10.630
	supra	1.421	3.229	706309	1754199	13.000

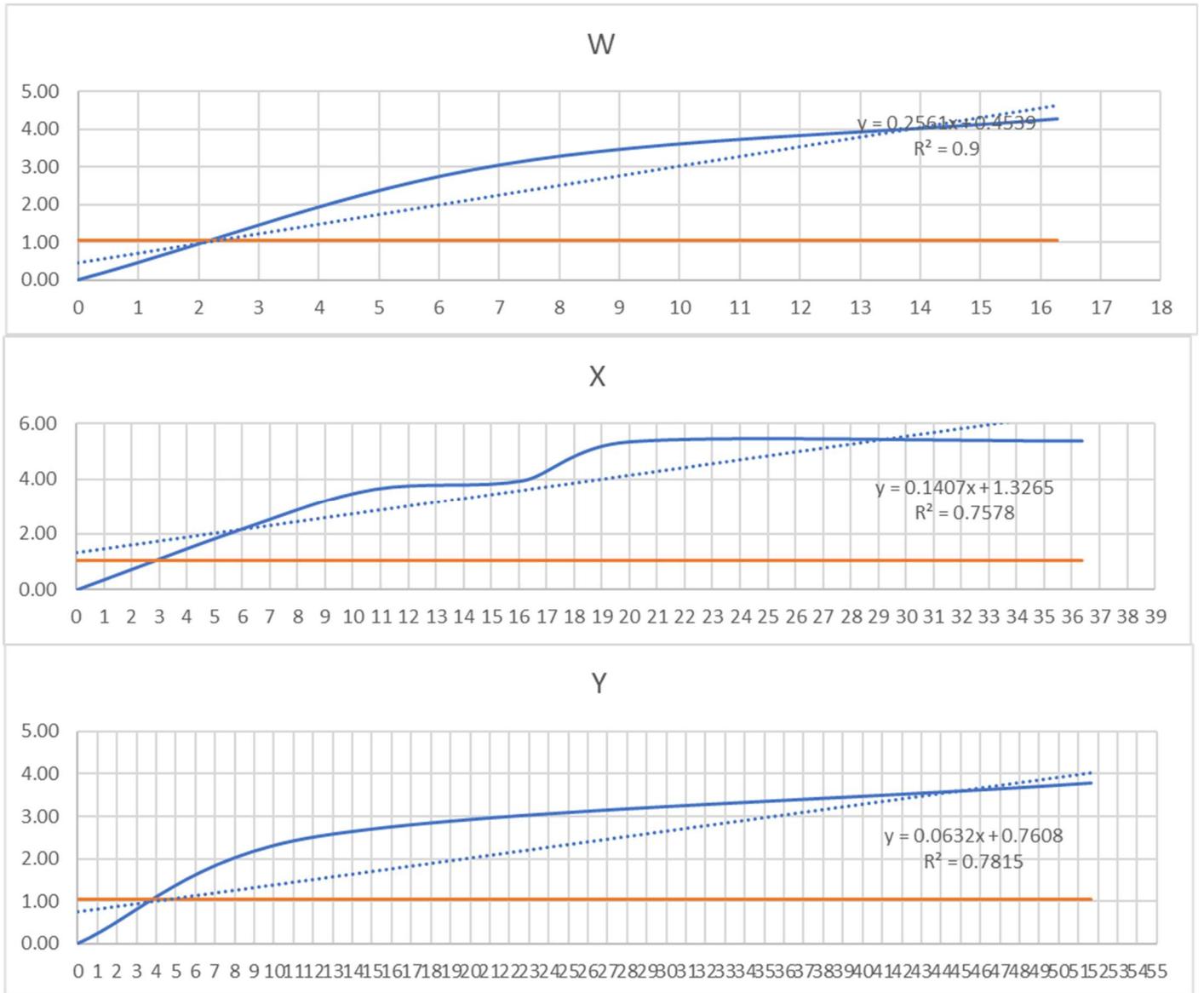
PUNTO 8



PUNTO 9

		Altura medida en	Altura calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
23	zona	campo	(11-n)			
	infra	6.449	0	704464	1754938	0.000
W	meso	3.382	3.067	704469	1754943	7.071
	supra	2.175	4.274	704475	1754950	16.279
24						
	infra	5.771	0	704422	1754958	0.000
	infra	3.549	2.222	704423	1754964	6.083
X	meso	2.139	3.632	704426	1754968	10.770
	meso	1.823	3.948	704428	1754973	16.155
	supra	0.422	5.349	704434	1754974	20.000
	supra	0.389	5.382	704441	1754989	36.359
25						
	infra	5.318	0	704397	1754910	0.000
Y	meso	2.789	2.529	704390	1754920	12.207
	supra	1.529	3.789	704389	1754961	51.624

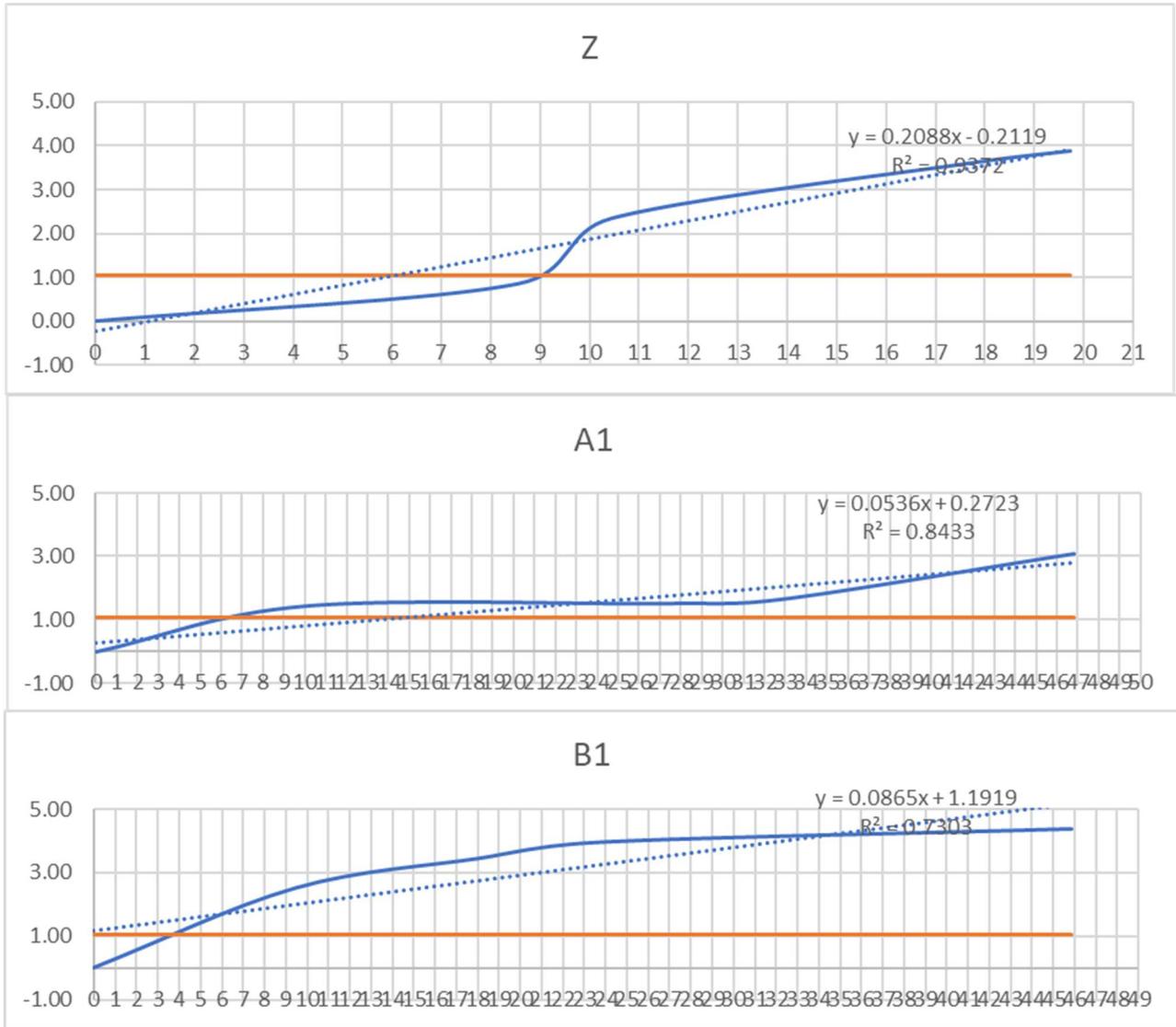
PUNTO 9



PUNTO 10

		Altura	Altura	Coord X	Coord Y	Distancia
	zona	medida	calculada			
		en campo	(11-n)			
26	infra	4.274	0	704046	1755091	0.000
	meso	3.419	0.855	704049	1755099	8.544
Z	meso	1.921	2.353	704049	1755101	10.440
	supra	0.653	3.621	704051	1755108	17.720
	supra	0.38	3.894	704056	1755108	19.723
27						
	infra	4.241	0	703996	1755092	0.000
	infra	3.059	1.429	703997	1755102	10.050
A1	meso	1.63	1.507	704004	1755118	27.203
	meso	1.552	1.635	704003	1755124	32.757
	supra	1.424	3.059	704009	1755137	46.840
28						
	infra	5.318	0	703937	1755106	0.000
	infra	2.789	2.529	703940	1755115	9.487
B1	meso	1.858	3.46	703943	1755123	18.028
	meso	1.341	3.977	703946	1755128	23.770
	supra	0.922	4.396	703953	1755149	45.880

PUNTO 10

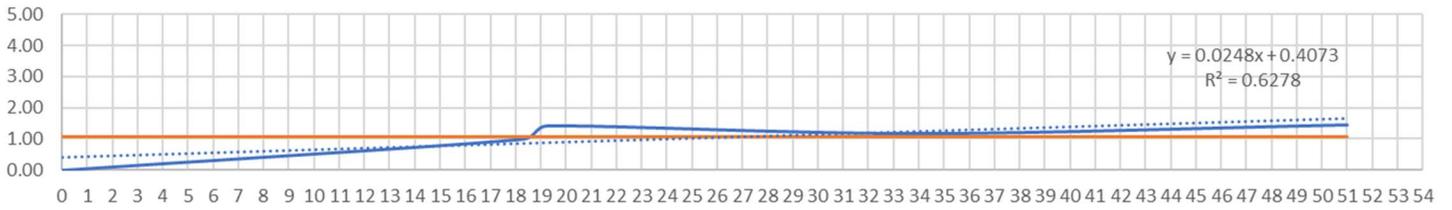


PUNTO 11

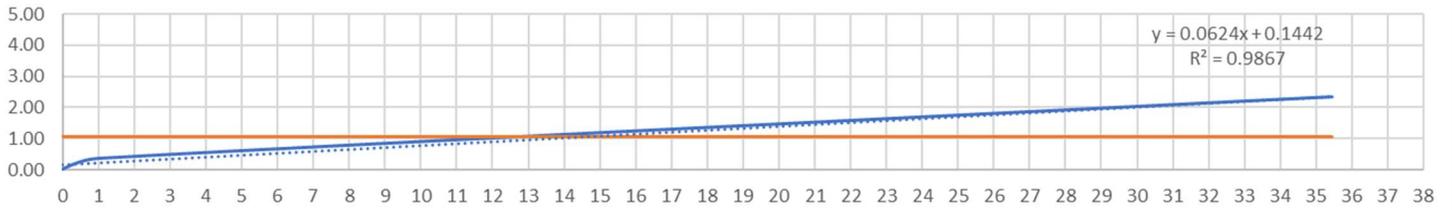
		Altura	Altura			
	zona	medida en	calculada	Coord X	Coord Y	Distancia
		campo	(11-n)			
29	infra	2.889	0	703795	1755129	0.000
	infra	1.889	1	703798	1755147	18.248
C1	meso	1.459	1.43	703798	1755148	19.235
	supra	1.706	1.183	703803	1755162	33.956
	supra	1.428	1.461	703805	1755179	50.990
30						
	infra	4.274	0	703750	1755159	0.000
D1	meso	3.919	0.355	703751	1755159	1.000
	supra	1.921	2.353	703760	1755193	35.440
31						
	infra	2.981	0	703708	1755119	0.000
	meso	2.185	0.796	703700	1755128	12.042
E1	supra	1.324	1.657	703702	1755170	51.352
	supra	1.088	1.893	703704	1755175	56.143

PUNTO 11

C1



D1



E1

