



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS NUMÉRICO
DEL PAPEL DE LA DUNA COSTERA
EN LA ESTABILIDAD DE LA PLAYA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ALFONSO ISMAEL VENTURA VALDÉS

TUTOR:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN



México, D.F.

ABRIL 2014



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/26/2014

Señor
ALFONSO ISMAEL VENTURA VALDÉS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

"ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PAPEL DE LA DUNA COSTERA EN LA ESTABILIDAD DE LA PLAYA"

INTRODUCCIÓN

- I. ESTADO DEL ARTE**
- II. OLEAJE**
- III. METODOLOGÍA**
- IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS**
- V. CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 4 de Abril de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTH

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]
8/04/14

[Handwritten signature]
Reserva Silva
11/04/2014

[Handwritten signature]
11-04-14

[Handwritten signature]
10/abril/14

[Handwritten signature]

AGRADECIMIENTOS

A **Ismael** y **Sandra**, no sólo por ser mis excelentes padres, sino por enseñarme día tras día a ser una mejor persona, emulando el ejemplo que me dan. Todo lo que soy, y seré, es gracias a ustedes. Los amo mucho.

A mi hermano, mi mejor amigo y mi complemento, **Adrián**. Por apoyarme en todo, siempre.

A **Xare**. Por tu amor, apoyo incondicional y comprensión.

A **toda mi familia**. Abuelos, tíos y primos. Por haber contribuido en mi educación desde pequeño, y por seguir haciéndolo. ¡Una porra para todos!

A los doctores: **Edgar Gerardo Mendoza Baldwin**, **Rodolfo Silva Casarín**, y **María Luisa Martínez Vázquez**. Por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo, y por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

A mis compañeros del **Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del IIUNAM**. Por su apoyo, consejos, y generosidad al compartir sus conocimientos conmigo.

A mi alma máter, **Universidad Nacional Autónoma de México**. Por ser mi segundo hogar desde los 12 años de edad. Por todo lo que me ha brindado para mi formación profesional y humana.

Alfonso Ismael Ventura Valdés

“Por mi raza hablará el espíritu”

RESUMEN

Las dunas costeras y las playas son interdependientes, es decir, una depende de la otra. Se consideran como un ecosistema cambiante debido al continuo intercambio de sedimento entre ellas, y a la vez frágil, porque algunos cambios en su dinámica, ya sea por eventos naturales o de origen humano, resultan en cambios abruptos y radicales para el ecosistema costero.

Actualmente, muchos ecosistemas costeros se encuentran severamente degradados como resultado de la explotación excesiva de sus recursos, el crecimiento urbano, industrial y turístico, la contaminación, entre otras. Muchas de estas actividades priorizan ciertos aspectos como grandes ganancias económicas o la simple supervivencia de parte de la sociedad y descuidan el ambiente.

La necesidad de buscar soluciones a este problema da lugar a la presente tesis, la cual parte desde un enfoque Ingenieril, pero de la mano con la Ecología, busca no sólo conocer sino entender los procesos naturales como el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas costeros para proponer soluciones bien fundamentadas ante el problema de erosión.

El presente estudio expone resultados y conclusiones obtenidos a través de la modelación numérica del comportamiento morfológico de diferentes perfiles de playa con duna ante condiciones de oleaje, con y sin tormenta, para observar la dinámica de playas y explicar el papel que juegan las dunas costeras.

Además, este trabajo de investigación impulsa una educación ambiental para sensibilizar a la gente sobre la importancia que tiene la conservación y manejo adecuado de los ecosistemas que se desarrollan en la playa-duna, y así poder disfrutar de los servicios ambientales que nos brindan estos ecosistemas sin dañarlos. Se espera que al final, los profesionistas encargados de las actuaciones en la zona costera se sumen a la filosofía del manejo adecuado y conservación de las costas.

ABSTRACT

Coastal dunes and beaches are interdependent, namely, one depends on the other. Both are a dynamic ecosystem due to the continuous exchange of sediment between them, and they are both quite fragile systems, because any small change in its dynamics, either by natural or human-induced events, may result in abrupt and radical perturbations.

At the present time, many coastal ecosystems are severely degraded as a result of overexploitation of their resources, urban, industrial and tourism growth and pollution. Many of these activities prioritize certain aspects as economic benefits or just plain the survival of society and neglect the environment relevance.

The need to find solutions to this problem is the main motivation of this Thesis, which begins from an engineering approach, but holds hands closely with ecology, aims not only to know but to understand the natural processes in coastal ecosystem in order to propose well-grounded solutions against erosion problem.

This study presents results and conclusions obtained through the numerical model of morphological behavior of different beach profiles with dune against wave conditions (mean and storm conditions) in order to observe the dynamics of beaches and explain the role of coastal dunes in the stability of the beach profile.

The research presented here also promotes environmental education to make people aware of the importance of preservation and proper management of the ecosystems that develop on the beach-dune and thus be able to take advantage of the environmental services that these ecosystems provide, without damaging them. It is expected that the professionals responsible for proceedings in the coastal zone feels attracted to join the philosophy of the responsible use and preservation of the coast.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Objetivos	5
I.2 Organización del trabajo	6
II. ESTADO DEL ARTE.....	7
II.1 Geomorfología	7
II.1.1 Formas en planta	7
II.1.2 Formas Transversales.....	9
II.2 Morfodinámica de Playas.....	9
II.2.1 Forma en planta.....	10
II.2.2 Perfil Transversal	11
II.2.3 Perfil de Equilibrio.....	13
II.3 Dunas Costeras.....	15
II.3.1 Historia.....	15
II.3.2 Papel de las Duna Costeras	16
II.3.3 Morfología	16
II.4 Erosión de Dunas	20
II.4.1 Avalancha.....	22
II.4.2 Modelo de Vellinga.....	23
III. OLEAJE.....	25
III.1 Clasificación del oleaje	27
III.1.1 Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa	27
III.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas.....	27
III.1.3 Clasificación de acuerdo a la zona de generación.....	29
III.2 Análisis estadístico del oleaje	30
III.2.1 Hipótesis básicas	30
III.2.2 El oleaje como proceso estocástico	31
III.2.3 El oleaje como un proceso estacionario	32
III.2.4 El oleaje como un proceso ergódico	32
III.2.5 Definición de estado de mar.....	32
III.2.6 Ascenso máximo del oleaje (Run-up)	33
IV. METODOLOGÍA	34
IV.1 Zona de estudio	34

ÍNDICE

IV.2	Perfiles de playa - duna	35
IV.2.1	Perfil de playa.....	35
IV.2.2	Perfil de duna	35
IV.3	Parámetros.....	37
IV.3.1	Oleaje	37
IV.3.2	Sedimento.....	42
IV.4	Modelación.....	43
IV.5	XBeach.....	44
IV.5.1	Funcionamiento del modelo	45
IV.5.2	Calibración del modelo	45
V.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
V.1	Índice de esbeltez (<i>IE</i>).....	49
V.2	Erosión de la duna.....	51
V.3	Desplazamiento horizontal de la línea de costa.....	52
V.4	Desplazamiento vertical de la línea de costa.....	53
V.5	Resultados	54
V.5.1	Régimen Medio	55
V.5.2	Régimen Extremal e Insólito.....	70
VI.	DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	88
VI.1	Discusión.....	88
VI.2	Conclusiones	89
VI.3	Futuras líneas de investigación	91
VII.	REFERENCIAS Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	93
VIII.	ANEXO A: RESULTADOS	96
VIII.1	Playa El Raudal	96
VIII.1.1	Régimen Medio.....	96
VIII.1.2	Régimen Extremal e Insólito.....	100
VIII.2	Playa Navarro.....	107
VIII.2.1	Régimen Medio	107
VIII.2.2	Régimen Extremal e Insólito.....	111
VIII.3	Playa Paraíso	118
VIII.3.1	Régimen Medio	118
VIII.3.2	Régimen Extremal e Insólito.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1. Interacción del sedimento en el perfil de playa con duna. (Pye & Tsoar, 2009)	3
Figura II-1. Principales formas costeras en planta	7
Figura II-2. Perfiles erosivo y acumulativo.....	9
Figura II-3. Variables de la ecuación parabólica de (Hsu & Evans, 1989).....	11
Figura II-4. Estados morfodinámicos de una playa. (Wright & Short, 1984).....	12
Figura II-5. Perfil de equilibrio propuesto por Bruun. Modificado de (Bruun, 1954)	15
Figura II-6. Morfología y terminología de una duna transversal simple.....	17
Figura II-7. Avance de las dunas. (Pye & Tsoar, 2009).....	17
Figura II-8. Dunas costeras clasificadas de acuerdo a su grado de estabilización.	18
Figura II-9. Dunas frontales	18
Figura II-10. Hondonadas	19
Figura II-11. Dunas Parabólicas.....	19
Figura II-12. Barjanes	20
Figura II-13. Erosión de una duna por marea de tormenta. Modificado de (Vellinga, 1986).....	21
Figura II-14. Principios del modelo para predecir la erosión de las dunas. (Vellinga, 1986).....	23
Figura III-1. Definición de parámetros asociados a la onda. Modificado de (Cantabria, 2000)	26
Figura III-2. Periodo - energía de las ondas. (Silva R. , 2005)	29
Figura III-3. Oleaje tipo SEA (izquierda) y oleaje tipo SWELL (derecha)	30
Figura III-4. Oleaje aleatorio.....	30
Figura III-5. Ascenso máximo (Run-up).....	33
Figura IV-1. Perfil de pseudo-equilibrio. (Delgadillo, 2011)	35
Figura IV-2. Fotos de las playas de estudio. (Jiménez, 2010)	36
Figura IV-3. Perfiles medidos de las playas de estudio. (Jiménez, 2010).....	37
Figura IV-4. Coordenadas de la estación de monitoreo	38
Figura IV-5. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y periodo medio de ola.....	39
Figura IV-6. Duración media de tormentas.....	39
Figura IV-7. Presentación de alturas de ola significativa por año.....	40
Figura V-1. Definición del Índice de Esbeltez de la duna	50
Figura V-2. Erosión de la duna	51
Figura V-3. Componente horizontal del nivel de Run-up.....	53
Figura V-4. Fotos comparativas del recorrido de la línea de costa en Punta Cancún	54
Figura V-5. Caso RM1. Erosión de la duna	56

LISTA DE FIGURAS

Figura V-6. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa.....	56
Figura V-7. Caso RM2. Erosión de la duna	57
Figura V-8. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa.....	57
Figura V-9. Caso RM3. Erosión de la duna	58
Figura V-10. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa.....	58
Figura V-11. Caso RM4. Erosión de la duna	59
Figura V-12. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa.....	59
Figura V-13. Resultados de la erosión contra el índice de esbeltez	61
Figura V-14. Ajuste de la erosión de la duna contra el Índice de Esbeltez.....	63
Figura V-15. Resultados del desplazamiento horizontal de la línea de costa contra Índice de Esbeltez	65
Figura V-16. Ajuste del desplazamiento horizontal de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez	67
Figura V-17. Resultados del desplazamiento vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez	68
Figura V-18. Ajuste del desplazamiento vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez..	70
Figura V-19. Caso RE1. Erosión de duna	72
Figura V-20. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa.....	72
Figura V-21. Caso RE2. Erosión de la duna	73
Figura V-22. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa.....	73
Figura V-23. Caso RE3. Erosión de la duna	74
Figura V-24. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa.....	74
Figura V-25. Caso RE4. Erosión de la duna	75
Figura V-26. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa.....	75
Figura V-27. Caso RE5. Erosión de la duna	76
Figura V-28. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa.....	76
Figura V-29. Caso RE6. Erosión de la duna	77
Figura V-30. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa.....	77
Figura V-31. Caso RI1. Erosión de la duna	78
Figura V-32. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa.....	78
Figura V-33. Resultados de la Erosión contra el Índice de esbeltez	81
Figura V-34. Ajuste de la Erosión de la duna contra el Índice de Esbeltez	82
Figura V-35. Resultados de Desplazamiento horizontal de la línea de costa contra Índice de Esbeltez	84

LISTA DE FIGURAS

Figura V-36. Ajuste del Desplazamiento Horizontal contra el Índice de Esbeltez 85

Figura V-37. Resultados de Desplazamiento Vertical de la línea de costa contra Índice de Esbeltez 86

Figura V-38. Ajuste del Desplazamiento Vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez 87

Figura VIII-1. Caso RM1. Erosión de la duna 96

Figura VIII-2. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa..... 96

Figura VIII-3. Caso RM2. Erosión de la duna 97

Figura VIII-4. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa..... 97

Figura VIII-5. Caso RM3. Erosión de la duna 98

Figura VIII-6. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa..... 98

Figura VIII-7. Caso RM4. Erosión de la duna 99

Figura VIII-8. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa..... 99

Figura VIII-9. Caso RE1. Erosión de la duna 100

Figura VIII-10. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa..... 100

Figura VIII-11. Caso RE2. Erosión de la duna 101

Figura VIII-12. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa..... 101

Figura VIII-13. Caso RE3. Erosión de la duna 102

Figura VIII-14. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa..... 102

Figura VIII-15. Caso RE4. Erosión de la duna 103

Figura VIII-16. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa..... 103

Figura VIII-17. Caso RE5. Erosión de la duna 104

Figura VIII-18. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa..... 104

Figura VIII-19. Caso RE6. Erosión de la duna 105

Figura VIII-20. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa..... 105

Figura VIII-21. Caso RI1. Erosión de la duna 106

Figura VIII-22. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa..... 106

Figura VIII-23. Caso RM1. Erosión de la duna 107

Figura VIII-24. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa..... 107

Figura VIII-25. Caso RM2. Erosión de la duna 108

Figura VIII-26. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa..... 108

Figura VIII-27. Caso RM3. Erosión de la duna 109

Figura VIII-28. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa..... 109

Figura VIII-29. Caso RM4. Erosión de la duna 110

Figura VIII-30. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa..... 110

LISTA DE FIGURAS

Figura VIII-31. Caso RE1. Erosión de la duna	111
Figura VIII-32. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa.....	111
Figura VIII-33. Caso RE2. Erosión de la duna	112
Figura VIII-34. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa.....	112
Figura VIII-35. Caso RE3. Erosión de la duna	113
Figura VIII-36. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa.....	113
Figura VIII-37. Caso RE4. Erosión de la duna	114
Figura VIII-38. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa.....	114
Figura VIII-39. Caso RE5. Erosión de la duna	115
Figura VIII-40. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa.....	115
Figura VIII-41. Caso RE6. Erosión de la duna	116
Figura VIII-42. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa.....	116
Figura VIII-43. Caso RI1. Erosión de la duna	117
Figura VIII-44. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa.....	117
Figura VIII-45. Caso RM1. Erosión de la duna	118
Figura VIII-46. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa.....	118
Figura VIII-47. Caso RM2. Erosión de la duna	119
Figura VIII-48. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa.....	119
Figura VIII-49. Caso RM3. Erosión de la duna	120
Figura VIII-50. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa.....	120
Figura VIII-51. Caso RM4. Erosión de la duna	121
Figura VIII-52. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa.....	121
Figura VIII-53. Caso RE1. Erosión de la duna	122
Figura VIII-54. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa.....	122
Figura VIII-55. Caso RE2. Erosión de la duna	123
Figura VIII-56. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa.....	123
Figura VIII-57. Caso RE3. Erosión de la duna	124
Figura VIII-58. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa.....	124
Figura VIII-59. Caso RE4. Erosión de la duna	125
Figura VIII-60. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa.....	125
Figura VIII-61. Caso RE5. Erosión de la duna	126
Figura VIII-62. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa.....	126
Figura VIII-63. Caso RE6. Erosión de la duna	127
Figura VIII-64. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa.....	127

LISTA DE FIGURAS

Figura VIII-65. Caso RI1. Erosión de la duna 128

Figura VIII-66. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa..... 128

LISTA DE TABLAS

Tabla II-1. Formas en planta de las playas.....	8
Tabla II-2. Rangos para establecer los estados morfodinámicos de la playa. (Short, 2000).....	13
Tabla III-1. Periodo – energía de las ondas. (Silva R. , 2005).....	28
Tabla IV-1. Modelaciones realizadas.....	41
Tabla IV-2. Nivel de ascenso máximo para cada perfil.....	42
Tabla IV-3. Características del sedimento.....	43
Tabla IV-4. Valores de los parámetros en la modelación de avalancha.....	48
Tabla V-1. Valores del IE para los diferentes perfiles.....	51
Tabla V-2. Condiciones de modelación para Régimen Medio.....	55
Tabla V-3. Resumen de los resultados modelados con Régimen Medio.....	60
Tabla V-4. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna.....	61
Tabla V-5. Resumen de los datos obtenidos para el desplazamiento horizontal de la línea de costa.....	64
Tabla V-6. Resumen de los datos obtenidos para el desplazamiento vertical de la línea de costa....	67
Tabla V-7. Condiciones de modelación para Régimen Extremal e Insólito.....	70
Tabla V-8. Resumen de los resultados modelados con Régimen Extremal e Insólito.....	79
Tabla V-9. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna.....	80
Tabla V-10. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna.....	83
Tabla V-11. Resumen de los datos obtenidos para el Desplazamiento Vertical.....	86

LISTA DE SÍMBOLOS

R_n	radio vector a partir del cual se obtiene la curva parabólica, en m
R_β	longitud de la línea de control, en m
β	ángulo de oblicuidad del oleaje, en $^\circ$
θ_n	ángulo de los radios vectores, en $^\circ$
C_0, C_1, C_2	coeficientes que están en función de la oblicuidad del oleaje
Ω	parámetro adimensional de la velocidad de caída
Σ	índice de escala de la rompiente
I_r	número de Iribarren
K	índice de estabilidad de playas
H_b	altura de ola antes de la rotura, en m
T	periodo de la ola, en s
ω_f	velocidad de caída del sedimento, m/s
a	amplitud de ola, en m
σ	frecuencia angular del oleaje, en s ⁻¹
β	ángulo de inclinación de la playa, en $^\circ$
H_0	altura de ola en aguas profundas, en m
L_0	longitud de la ola en aguas profundas, en m
D_{50}	diámetro 50 de las partículas del sedimento de una muestra
H	altura de ola, en m
T	periodo de ola, en s
L	longitud de ola, en m
d	duración de la tormenta modelada, en h
h	profundidad, en m
z	marea de tormenta, en m
g	constante gravitacional, en m/s^2
π	pi=3.1416
R_u	nivel de ascenso máximo del oleaje (<i>Run-up</i>), en m

LISTA DE SÍMBOLOS

P	porosidad del sedimento
ρ	densidad del sedimento, en kg/m^3
D_w	disipación de energía del oleaje debido a la rotura, en W/m^2
A_w	acción de las olas, en W/m^2
σ	frecuencia de ola intrínseca
c	velocidad de propagación de las olas, en m/s
θ	ángulo de incidencia del oleaje con respecto al eje X
$A_{m\acute{a}x}$	tasa máxima de transporte de avalancha, en $m^3 / s / m$
h_{switch}	profundidad en la transición de pendiente crítica húmeda a seca, en m
$m_{cr,wet}$	pendiente crítica húmeda
$m_{cr,dry}$	pendiente crítica seca
IE	índice de esbeltez de la duna
A_d	ancho de la duna, en m
h_d	altura de la duna, en m
E_d	erosión de la duna, en m^3/m
V_{id}	Volumen inicial de la duna por ancho unitario, en m^3/m
E	Erosión relativa, en %
D_H	desplazamiento horizontal de la línea de costa
D_V	desplazamiento vertical de la línea de costa
p_s	pérdida de playa seca obtenida con la modelación de la tormenta, en m
d_p	profundidad medida después de la modelación, en m
R_{u_x}	componente horizontal del nivel del <i>Run-up</i> , en m

Capítulo I:
INTRODUCCIÓN

México es un país en el cual la zona costera es muy importante. 17 de sus 32 estados tienen playas, lo que representa más de 11,000 km de línea de costa, con una ubicación geográfica privilegiada, ya que se localiza entre los dos océanos más grandes del planeta.

La costa es una zona única donde coinciden tres ambientes contrastantes: la tierra, el agua y el aire (Carter, 1991). Las zonas costeras son uno de los lugares favoritos para el establecimiento de poblados y ciudades, muchos países muestran concentración superior a la media de la población cerca de la costa, y dos terceras partes de las ciudades más grandes del mundo se encuentran en estas zonas. Actualmente, casi el 40% de la población humana del mundo vive a menos de 100 km de la costa, pero debido a que la poblaciones costeras se están expandiendo más rápido, se estima que para el año 2020, hasta el 75% de la población humana del mundo podría estar viviendo a menos de 60 km de la costa. Hay muchas razones para el aumento de la densidad de población cerca de la costa, y éstas incluyen: asentamiento histórico, el comercio o los vínculos políticos, el clima, la disponibilidad de suelos aluviales fértiles, la proximidad a las poblaciones de peces y, más recientemente, la estética y actividades de recreación y esparcimiento humano (Carter, 1998).

Las dunas costeras, al igual que otros ecosistemas litorales, han sido utilizadas por el hombre desde la antigüedad con diferentes propósitos relacionados, principalmente, con la instalación de asentamientos, explotación de los recursos y otras oportunidades que

INTRODUCCIÓN

estos ecosistemas ofrecen. Las dunas se encuentran en cualquier costa arenosa frecuentemente en la parte posterior de las playas.

Las dunas y las playas son interdependientes, ya que intercambian sedimentos continuamente y esta interacción tiene un fuerte impacto en la evolución y desarrollo de las costas (Packham & Willis, 1997). En general, las dunas son menos apreciadas que las playas; por ello una práctica común es aplanar y eliminar las dunas con el fin de construir lo más cercano posible de la playa.

La playa de arena y grava son zonas en la que se desplazan los sedimentos no consolidados y que son transportados por la acción del oleaje cercano a la costa. Dicha zona abarca desde el límite inferior de la bajamar hasta el límite superior de la pleamar considerando el ascenso del oleaje. Dabrio (1992) define a las playas como acumulaciones de arena que se extienden a lo largo de los océanos, mares, frentes deltaicos y de las islas, caracterizadas por una desproporcionada relación entre su pequeña anchura y su gran longitud. Debido a que las playas son formadas con materiales resultantes del intemperismo, se considera que éstas son el mejor elemento que existe para disipar la energía del oleaje.

La construcción de obras civiles en la costa produce cambios que afectan las tasas de transporte litoral y generan modificaciones en la línea costera. Estos cambios no se observan de inmediato porque su efecto es a largo plazo, muchas veces el resultado final se descubre cuando el daño ya es irreparable. Por esta razón es recomendable que se analicen cuidadosamente las posibles modificaciones que se pueden ocasionar a la playa antes de proceder a construir obras civiles.

El comportamiento dinámico de las playas depende de cuatro factores (Pilkey, 1998): la energía del oleaje, la cantidad y tipo de sedimento, la orientación de la playa y la tasa de incremento/descenso del nivel del mar. De manera natural, las playas mantienen un equilibrio entre estos factores; cuando uno de los cuatro cambia se desarrolla un ajuste en los otros tres para volver al equilibrio.

Es ahí cuando entra en operación la duna costera, ya que una de sus principales funciones es la de suministro de material frente a episodios catastróficos de invasión del agua sobre intereses humanos; es decir, protege durante tormentas, nortes, huracanes y marejadas. Los países bajos son un buen ejemplo de protección de dunas, ya que gran parte de su territorio se sitúa por debajo del nivel medio del mar y sus ciudades son muy importantes ya que están densamente pobladas; para prevenir inundaciones cuentan con un sistema de defensa que consiste principalmente en playas de arena y dunas.

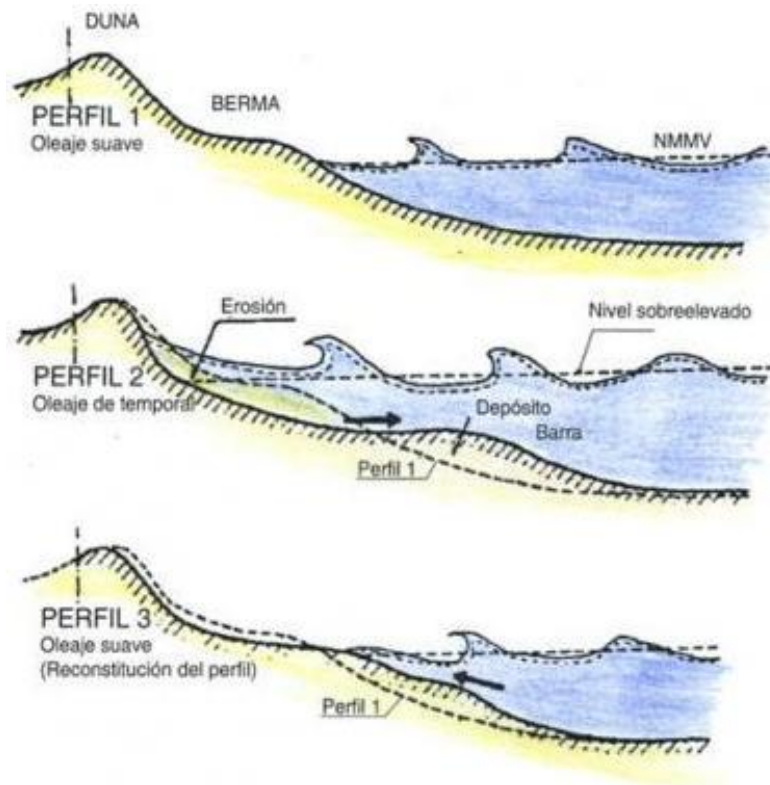


Figura I-1. Interacción del sedimento en el perfil de playa con duna. (Pye & Tsoar, 2009)

Para ilustrar la función de una duna, baste un ejemplo. Cuando se altera el equilibrio dinámico de la playa, se ocasiona un reajuste entre los 4 factores de los que se ha dicho que depende su estabilidad, estos ajustes pueden ser responsables de daños cuantiosos en las construcciones humanas. Durante las tormentas y huracanes las olas incrementan su altura y por ende su energía, esa energía para ser amortiguada por la playa ha de recorrer una larga distancia sobre una pendiente suave. Es la duna quien aporta la mayor cantidad de sedimento a la playa para formar ese perfil. Si en un sitio específico la duna se

INTRODUCCIÓN

encuentra alterada no hay suficiente aporte de sedimento a la playa y se mantiene un perfil con pendiente pronunciada que no podrá disipar el impacto del oleaje de alta energía; en consecuencia, la playa entrará en un proceso de erosión y las construcciones cercanas a la playa son las que reciben la energía sufriendo daños severos.

Considerando la gran cantidad de usos que han tenido las playas y las dunas a lo largo del tiempo y a lo largo de los litorales en todo el mundo, es de esperarse que estos ecosistemas estén severamente degradados como resultado de la explotación excesiva de sus recursos naturales, la expansión demográfica caótica y el crecimiento urbano, industrial y turístico.

Debido a lo anterior, muchos sistemas dunares están desapareciendo o se encuentran en estado crítico. Las costas formadas de arena que se movía para proteger se han transformado de flexibles a rígidas al cubrirla con estructuras de cemento, haciendo que pierda su función. En los últimos años, la sociedad está tomando conciencia de que la degradación de estos ecosistemas naturales supone la pérdida, no sólo de un paisaje y sus valores intrínsecos, sino también de los bienes y servicios que todos los elementos de ese ecosistema, aportan para el bienestar humano (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

A la luz de lo expuesto hasta ahora, es importante comprender la dinámica e interacción entre playas y dunas; tema principal de esta tesis. Para esto se requiere modelar los procesos que intervienen en dicha dinámica.

La implementación de los modelos físicos y numéricos en la Ingeniería de Costas se usa como parte de un procedimiento para la solución de diferentes tipos de problemas. Los modelos numéricos se usan para estudiar escenarios bajo condiciones ambientales que ocurren en el litoral. La información obtenida de la simulación de diferentes escenarios permite un mejor entendimiento de los procesos ambientales y su influencia sobre otros procesos.

Un modelo numérico en su sentido más simple puede ser considerado como cualquier representación de un proceso que puede ocurrir. Lo ideal sería que dicha representación simule por completo todos los aspectos del proceso, pero en la naturaleza los procesos son demasiados complejos o no se tienen suficientes conocimientos de todos los aspectos. Por esta razón, un modelo es casi siempre una representación simplificada de un proceso. Un modelo numérico puede ser descrito como un conjunto de principios recogidos en una formulación matemática con el propósito de simular un determinado proceso.

Los modelos de una playa se clasifican en empíricos y teóricos; los empíricos, a su vez, se dividen en descriptivos o de correlación, éstos incluyen nomogramas y relaciones gráficas y relaciones estadísticas entre las variables independientes y la forma bidimensional del perfil. Los modelos teóricos se dividen de acuerdo con los procedimientos matemáticos que son usados para resolver las ecuaciones de un modelo numérico.

I.1 **Objetivos**

El objetivo principal de esta tesis es evaluar la erosión de dunas bajo diferentes condiciones meteorológicas, para la determinación de la dinámica y estabilidad del perfil de playa.

Para alcanzar dicho objetivo se han planteado las siguientes metas particulares:

- Elegir la zona de estudio y algunos perfiles comunes de dunas
- Calcular las condiciones de oleaje bajo las cuales estarán sometidos los perfiles elegidos
- Con ayuda del modelo Xbeach, simular el comportamiento de los perfiles para valorar los efectos del oleaje.

I.2 Organización del trabajo

Esta tesis se ha dividido en cuatro capítulos, buscando cubrir tanto el marco teórico general como el experimental que dieron lugar a los resultados obtenidos.

El Capítulo 2 presenta una revisión del estado del arte y se resume el conocimiento disponible en la literatura respecto a las dunas costeras, y también una descripción general de las playas en planta y perfil.

El Capítulo 3 está dedicado a la representación lineal del oleaje, misma que se toma como base para el diseño de los experimentos, la interpretación de las mediciones y resultados de la tesis.

El Capítulo 4 es la descripción de la metodología experimental, el arreglo de modelado numérico, el programa de pruebas y las condiciones de modelado.

El Capítulo 5 trata el análisis de los resultados obtenidos a partir de las modelaciones realizadas tanto en régimen medio como régimen extremal.

El Capítulo 6 plantea la discusión de los resultados, así como las conclusiones de los mismos. Además propone las posibles futuras líneas de investigación y señala las que han quedado inconclusas al término de esta tesis.

Capítulo II:

ESTADO DEL ARTE

II.1 Geomorfología

De acuerdo con (Silvester & Hsu, 1997) la geomorfología costera estudia las formas de las costas, su evolución, los procesos que se dan en ellas y los cambios que toman lugar dentro de ellas. Clayton (1979) define la geomorfología costera como el estudio de los procesos involucrados en la forma y ubicación de la línea de costa y las fuerzas que causan dicho cambio.

II.1.1 Formas en planta

En la Tabla II-1 se describen las formas principales en planta que puede tener la costa, ilustradas en la Figura II-1.

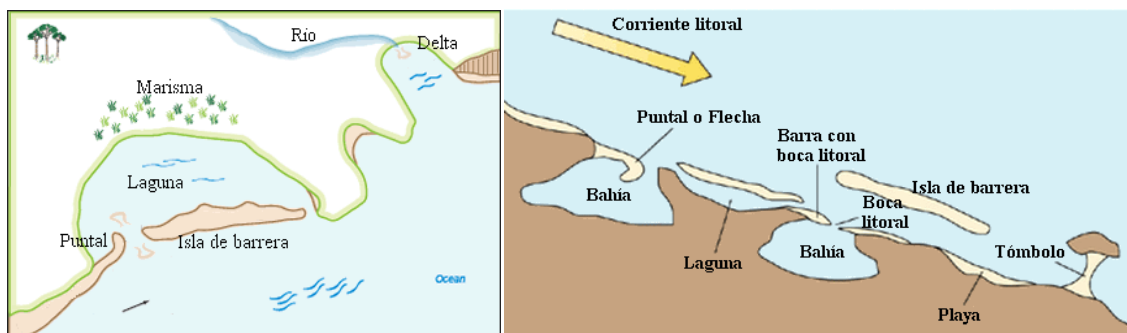


Figura II-1. Principales formas costeras en planta

Tabla II-1. Formas en planta de las playas

Forma	Descripción
Barras	Son islas largas y angostas generalmente conformadas por arena que se extienden en una dirección casi paralela a la costa. Las barras se consideran formas costeras disipadoras de la energía del oleaje, (Dean & Dalrymple, 2002).
Bajos	Los bajos son acumulaciones de material que se ubican en la zona exterior de la playa y generalmente se encuentran sumergidos o pueden descubrirse ocasionalmente en condiciones de marea baja.
Bahía	Porción del mar que penetra al continente, de configuración más o menos cóncava y su área es igual o mayor que la del semicírculo que conforma.
Cordones litorales	Cordón arenoso paralelo a la dirección general de la línea de costa, producido por los cambios de dirección de la misma, en zonas con importante transporte longitudinal de sedimentos.
Deltas	Es un depósito arenoso aluvial, normalmente de forma triangular o formado en la desembocadura de un río, resultado de la interacción entre el sedimento aportado por el río y el transporte longitudinal generado por el oleaje.
Islas de barrera	Si un cordón litoral queda separado por dos salidas al mar de la marisma interior, se denomina isla barrera.
Tómbolos	Formación arenosa producida por la presencia de una isla o estructura separada de la costa que, debido al cambio de la dinámica del oleaje, produce la acumulación de arena y se une a la estructura o isla con la costa formando un espigón natural de arena.
Salientes o hemitómbolos	Saliente de arena con el mismo origen del tómbolo o debido al encuentro de dos corrientes costeras opuestas. En el caso de estar producido por una estructura, la saliente no alcanza la misma.
Marisma o Albufera	Laguna que se forma en la zona de tierra cuando un cordón litoral tiende a cerrar una bahía en zonas sin marea, o con poca aportación fluvial.
Laguna	Cuerpo de agua poco profundo, como un estanque o lago, parcial o totalmente separado del mar por una isla de barrera o arrecife. A veces conectado con el mar a través de una entrada temporal o permanente.

II.1.2 Formas Transversales

En función de su perfil transversal, las playas pueden clasificarse como playas acumulativas o erosivas (Figura II-2). Las acumulativas tienen una pendiente casi continua y se presentan en períodos de tiempo donde el oleaje tiene poca altura; su característica principal es una acumulación de sedimento en la parte emergida. Las playas erosivas, por su parte, se desarrollan a partir de oleajes de gran altura; este tipo de playas se forma en un período de tiempo muy corto debido a la gran energía del oleaje.

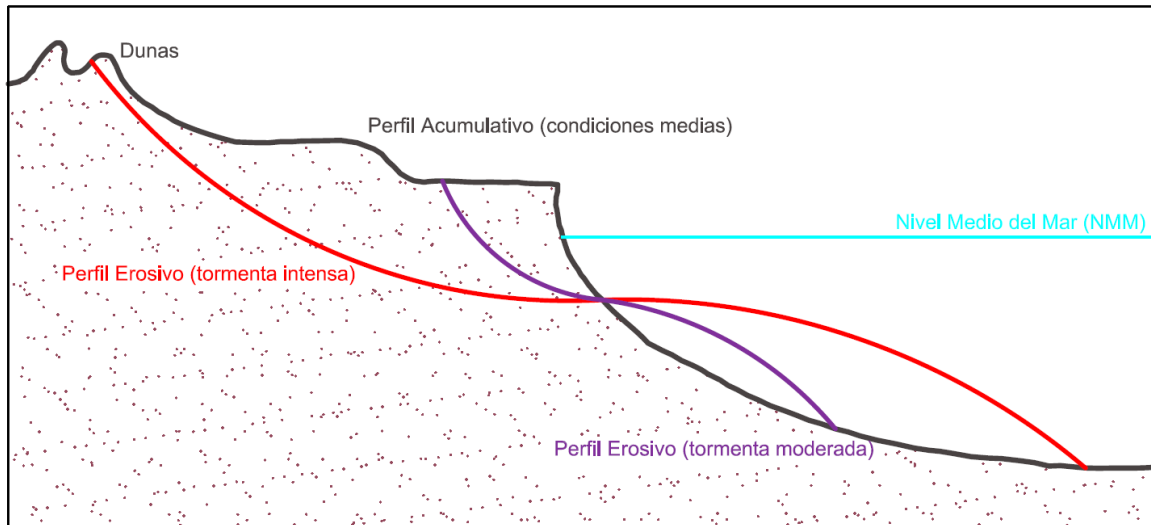


Figura II-2. Perfiles erosivo y acumulativo

II.2 Morfodinámica de Playas

La morfodinámica es la rama del estudio de las costas que se encarga de medir el estado de un sistema costero. Su estudio se ha abordado tradicionalmente desde dos puntos de vista ortogonales e independientes: transporte longitudinal y transporte transversal. Se analizan por separado para caracterizar ciertos elementos fundamentales, pero esto no representa la realidad, puesto que las variaciones en un perfil de playa dependen tanto del el transporte transversal como también por el transporte longitudinal. Pero cuando la variación longitudinal de las características morfológicas de una playa es muy pequeña, se podrá asumir que la playa es bidimensional y podrá ser descrita por las características de su perfil transversal.

II.2.1 Forma en planta

Cuando una playa alcanza el equilibrio tenderá a describir, en su forma en planta, una curvatura que se irá ajustando en la medida que el oleaje afecta la zona litoral, (Tanner, 1958). La curvatura en planta que adquiere una playa es producto de los procesos que continuamente actúan sobre ella, el oleaje es el proceso que suministra la mayor energía y por lo tanto es el principal moldeador de la forma en planta de la playa.

Los resultados morfológicos son siempre similares, por lo que la curva se ha intentado representar con expresiones analíticas, la mayoría de las cuales asemejan curvas geométricas. Hsu y Evans (1989) propusieron una ecuación parabólica para determinar la curva de equilibrio estático de una playa en planta:

$$\frac{R_n}{R_\beta} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta_n} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta_n} \right)^2 \quad (\text{II-1})$$

Donde:

R_n radio vector a partir del cual se obtiene la curva parabólica, en m

R_β longitud de la línea de control, en m

β ángulo de oblicuidad del oleaje, en $^\circ$

θ_n ángulo de los radios vectores, en $^\circ$

C_0, C_1, C_2 coeficientes que están en función de la oblicuidad del oleaje:

$$C_2 = \alpha$$

$$C_1 = \beta \cot \beta - 2\alpha$$

$$C_0 = 1 - \beta \cot \beta + \alpha$$

$$\alpha = -2.3833 + 0.2374\beta - 0.0087043\beta^2 + 0.00012836\beta^3 - 6.8815 \times 10^{-5} \beta^4$$

Hsu y Evans indican que en una saliente habrá un punto específico en donde las olas se difractarán antes de que arriben a la playa. Para una playa en equilibrio se satisface que el tiempo que tarda cualquier ola en recorrer la distancia entre el punto de difracción y cualquier punto de la línea de costa, será el mismo; esto causará el rompimiento simultáneo de las olas en la periferia de la playa. La ortogonal del oleaje incidente será

normal a la tangente del punto donde la playa comienza a ser recta de una bahía estable. Si el oleaje rompe constantemente en un ángulo pequeño en esta sección de la playa, su ortogonal deberá ser refractada a por las profundidades que existen hasta que se encuentren alineadas con el punto de inicio de la saliente (Figura II-3). La ola refractada viaja a través de la saliente hasta encontrar el punto de la difracción; el alineamiento de la cresta del oleaje, es normal a esta ortogonal, en el mismo punto de la difracción (Yu & Hsu, 2006).

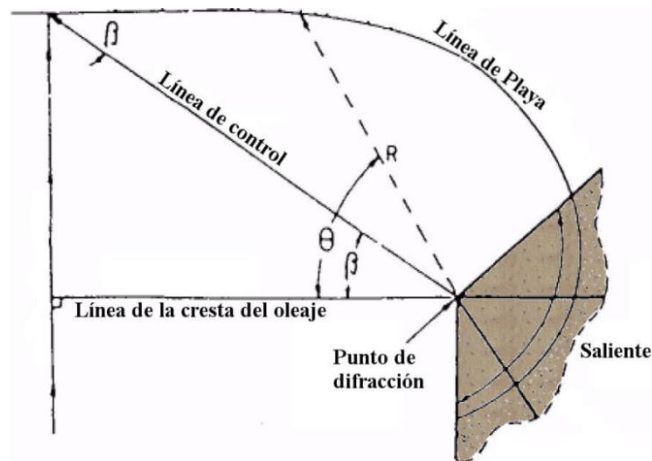


Figura II-3. Variables de la ecuación parabólica de (Hsu & Evans, 1989)

II.2.2 Perfil Transversal

El perfil transversal de una playa es la variación de la profundidad del agua con la distancia a la línea de costa, en dirección normal a la misma. Al igual que la forma en planta, el perfil transversal de las playas cambiará de acuerdo con la dinámica marina, siendo el oleaje proceso que suministra mayor energía.

De acuerdo con la clasificación morfodinámica, y de manera general, una playa puede considerarse como disipativa o reflejante, o ubicarse en un estado de transición (intermedio) entre ambos estados.

Las playas disipativas, como su nombre lo indica, disipan gran parte de la energía del oleaje debido a que la zona de rompientes es muy amplia, por lo tanto la energía de la ola incidente alcanza un valor máximo en el punto de rotura y disminuye conforme el

oleaje se aproxima a la costa. Entre sus características principales, su perfil transversal tiene la forma clásica de un perfil acumulativo y pendiente muy suave (entre 0.01 y 0.03). Además, suelen tener un volumen grande de sedimentos.

Las playas reflejantes pueden presentar sedimentos gruesos, razón por la cual la playa tiende a reflejar la energía del oleaje. En este tipo de playas, sólo se identifica una zona de rompientes, la máxima energía del oleaje se presenta en la proximidad de la zona de lavado, y con frecuencia se forman dunas después de dicha zona. Su perfil trasversal es similar a un perfil acumulativo y la pendiente de la playa suele ser más pronunciada (entre 0.10 y 0.20).

Entre estos dos tipos extremos de morfología del perfil se presenta toda una gama de estados intermedios que poseen elementos tanto de una playa disipativa como de una reflejante, dependiendo del oleaje que actúa en ellas. Según (Wright & Short, 1984), los diferentes estados morfodinámicos que se pueden observar en una playa son: disipativo, barra paralela a la costa, barra rítmica, barra transversal, terraza mareal y reflejante.

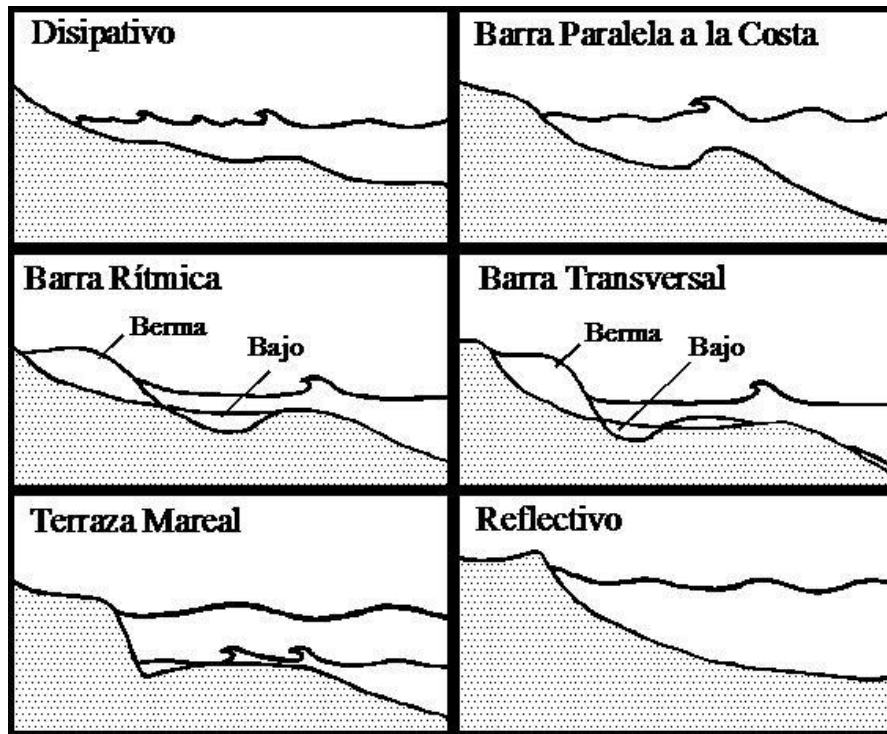


Figura II-4. Estados morfodinámicos de una playa. (Wright & Short, 1984)

Para conocer el estado morfodinámico de una playa es necesario determinar ya sea el parámetro de la velocidad de caída, el índice de escala de la rompiente, el coeficiente de similitud de la rompiente o el parámetro de estabilidad de la playa. En la tabla II-2, se muestran las expresiones para calcular dichos parámetros; y los rangos, a partir de los cuales, se puede determinar el estado morfodinámico de las playas.

Tabla II-2. Rangos para establecer los estados morfodinámicos de la playa. (Short, 2000)

Parámetro	Expresión	Disipativa	Intermedia	Reflectiva
Parámetro adimensional de la velocidad de caída	$\Omega = \frac{H_b}{T\omega_f}$	<1	2-5	>6
Índice de escala de la rompiente	$\Sigma = \frac{a\sigma^2}{g \tan^2 \beta}$	0.1-2.5	2.5-20	20-200
Número de Iribarren	$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$	>1	1-0.23	<0.23
Índice de la estabilidad de playas	$K = \frac{H_b^2}{gT^2D_{50}}$	<3.5	10-20	>20
<p>H_b, altura de ola antes de la rotura, en m; T, periodo de la ola, en s; ω_f, velocidad de caída del sedimento, m/s;</p> <p>a, amplitud de ola, en m; σ, frecuencia angular del oleaje, en s^{-1}; β, inclinación de la playa, en °;</p> <p>H_0, altura de ola en aguas profundas, en m; L_0, longitud de la ola en aguas profundas, en m.</p>				

II.2.3 Perfil de Equilibrio

Una playa está en estado de equilibrio cuando el sistema es capaz de mantener balanceadas la cantidad de material que pierde y recupera. Pueden clasificarse según su estado de equilibrio como playas en equilibrio estático, dinámico y metaestable. Una playa se encuentra en equilibrio estático cuando su forma y comportamiento, a lo largo del tiempo, no presenta modificaciones significativas; cuando exhibe una serie de cambios cíclicos, el equilibrio se denomina dinámico. Existe un tercer tipo de equilibrio que sucede cuando el entorno de una playa sufre cambios importantes y el sistema litoral

se adapta a ellos en un tiempo relativamente corto, alcanzando una determinada estabilidad. Eventualmente puede presentarse un evento que altere de nuevo la playa y que ocasionará un nuevo ajuste del entorno que, a su vez, conducirá a un nuevo estado de equilibrio distinto del que se tenía antes del evento extremo. Este tipo de equilibrio se conoce como metaestable o hiperestático, (Woodroffe, 2002).

Las playas que presentan un equilibrio estático son aquellas donde no existe un aporte o pérdida de sedimento que modifique la forma de la playa a lo largo del tiempo. El perfil de equilibrio es conceptualmente el resultado de la balanza de las fuerzas destructivas contra las fuerzas constructivas.

En el laboratorio, es relativamente fácil de construir un perfil de equilibrio corriendo un tren de ondas constantes en una playa arenosa después de un largo tiempo de modelado. Después del remodelamiento del perfil inicial, resulta un “perfil final” que cambia poco con el tiempo. Este es el perfil de equilibrio para cierto tipo de sedimento y ciertas condiciones de oleaje. En la naturaleza, el perfil de equilibrio se considera un concepto dinámico, para el campo de onda incidente y la continua variación del nivel de agua, por lo tanto, el perfil está en evolución constante. Promediando estos perfiles durante un largo período, se puede definir un perfil de equilibrio.

Desde el punto de vista científico diferentes autores han encontrado expresiones analíticas que reproducen la curva que adopta el perfil de playa en condiciones de equilibrio. Keulegan y Krumbein (1949) investigaron las características de una pendiente de fondo suave tal que las ondas nunca rompen sólo son disipadas continuamente por las pérdidas de energía debido a la fricción de fondo. Bruun (1954) analizó los perfiles de playa de la costa danesa del mar del Norte y Mission Bay, California, y encontró que seguían la simple relación:

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (\text{II-2})$$

Donde:

- h posición del perfil
- y distancia a la línea de costa, en m

D_c profundidad de cierre del perfil, en m

A parámetro de escala relacionado con las características del sedimento

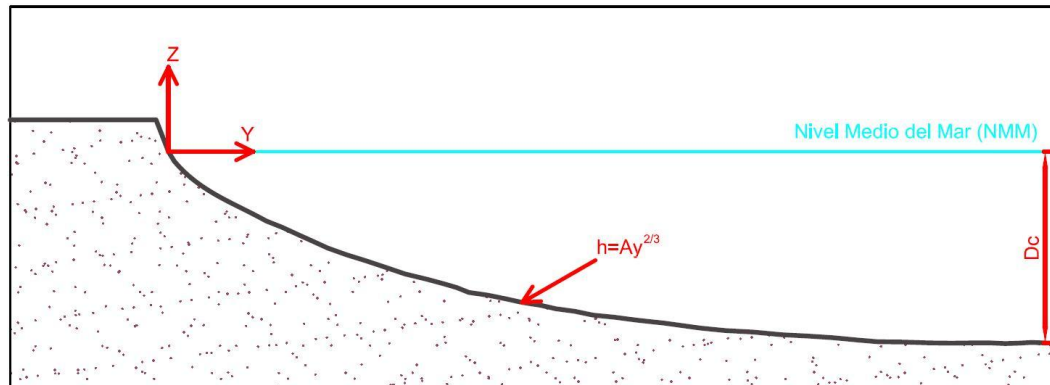


Figura II-5. Perfil de equilibrio propuesto por Bruun. Modificado de (Bruun, 1954)

II.3 Dunas Costeras

Las dunas costeras son acumulaciones sedimentarias arenosas a manera de montículos debidas al viento. Carter (1991) las define como formaciones arenosas de origen eólico que se desarrollan a lo largo de cualquier costa donde haya suficiente sustrato suelto y que es susceptible de ser transportado por el viento.

El factor crucial que controla su formación es el suministro de sedimentos ya que, prácticamente, no hay costas sin viento pero sí sin sedimentos. Usualmente, presentan pendientes empinadas en dirección del viento y más suaves al lado contrario. Las dunas costeras son ecosistemas terrestres únicos situados en la transición entre ambientes continentales y marinos (Martínez & Psuty, 2004).

II.3.1 Historia

El término duna, o algún derivado de la palabra, se utilizan en muchos idiomas. El origen de la palabra se remonta a los antiguos celtas, se cree que los celtas de las costas de los Países Bajos y Flandes fueron los primeros en utilizar las dunas costeras de manera intensiva. Estos pobladores utilizaban la palabra *dûn*, que probablemente se

refería a las partes bajas de las dunas, las cuales eran las zonas más ocupadas. Posteriormente los romanos entraron en contacto con estos asentamientos celtas en los Países Bajos y usaron la palabra *dunum*, de donde se derivó la palabra española, italiana y portuguesa *duna*. Probablemente la palabra celta llegó a las lenguas germanas a través del griego y derivó en el alemán *Düne*, el francés y el inglés *dune*, el sueco *dyn*, el noruego *dyne* y el holandés moderno *duin* (Martínez, 2009).

II.3.2 Papel de las Duna Costeras

Las dunas costeras juegan un papel muy importante, aunque no siempre apreciado, para la sociedad. Destaca en primer lugar la defensa frente a episodios catastróficos de invasión del agua de mar sobre intereses humanos, ya que actúan como amortiguador contra los vientos y oleajes fuertes, disminuyendo notablemente el impacto que podrían tener tierra adentro las tormentas y huracanes. Es de gran importancia su función como almacén de arenas para la regeneración natural de playas. Muchas veces también facilitan la retención del agua del subsuelo, la cual es vital para cualquier actividad humana.

Entre los servicios de tipo cultural tiene un apreciable valor estético, pero sobre todo, el valor recreativo relacionado con la visita de millones de personas anualmente. Finalmente, las dunas tienen una gran utilidad económica: el turismo, los desarrollos urbanos, las industrias, la ganadería, la agricultura, los campos de entrenamiento militar y hasta las plantas nucleoelectricas son algunos de los muchos usos que se les da en la actualidad (Martínez, 2009).

II.3.3 Morfología

El tipo de duna más simple es la duna creciente o transversal, en la que el viento fluye prácticamente perpendicular a la línea de cresta. La sección transversal de dicha duna debe su forma al viento. En la cara de barlovento el viento intenso golpea y arrastra consigo los sedimentos formando una pendiente suave; al llegar a la cresta va perdiendo

velocidad hasta que deposita los granos en la cara de sotavento formando una pendiente más pronunciada, generalmente similar al ángulo de reposo del sedimento.

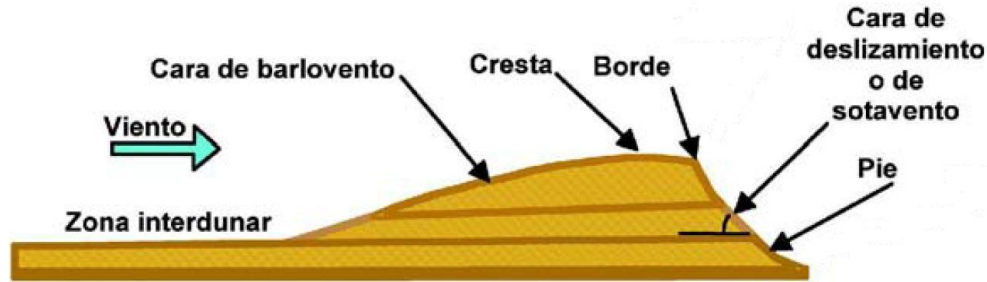


Figura II-6. Morfología y terminología de una duna transversal simple.

(Manual de restauración de dunas costeras, 2007)

Este proceso, erosivo en cara de barlovento y acumulativo en la cara de sotavento, es el responsable de la movilidad de las dunas (Martínez, 2009). La velocidad a la que avanzan las dunas depende de varios factores: la velocidad y dirección del viento, la morfología dunar, el tipo de sedimento, el terreno sobre el que avanza, el tipo de obstáculo que se presente en el camino, y la cubierta vegetal de la duna. Su velocidad puede variar desde unos cuantos centímetros por año, hasta varios metros por día.

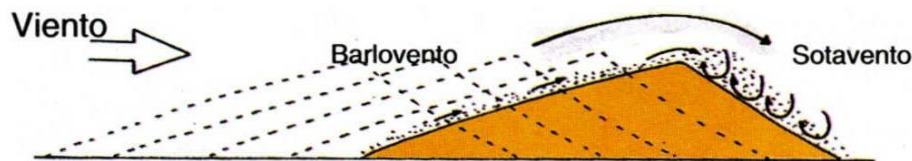


Figura II-7. Avance de las dunas. (Pye & Tsoar, 2009)

II.3.3.1 Clasificación

Las dunas se clasifican en función de su estabilidad, y de acuerdo con su forma.

II.3.3.1.1 Función

De acuerdo con su movilidad las dunas se pueden clasificar en dunas móviles, semimóviles o estabilizadas. El principal factor del que depende la movilidad es la vegetación, generalmente las dunas móviles carecen de vegetación, mientras que las estabilizadas se encuentran totalmente cubiertas de plantas. Las dunas semimóviles son las que se encuentran parcialmente vegetadas.



Figura II-8. Dunas costeras clasificadas de acuerdo a su grado de estabilización.

a)duna móvil, El Farallón, Ver.; b)duna semimóvil, Doña Juana, Ver.;

c)duna estabilizada, La Mancha, Ver., (fotos: Natalia Rodríguez)

II.3.3.1.2 Forma

Según su forma, las dunas costeras se clasifican como sigue:

II.3.3.1.2.1 Dunas frontales.

Su nombre correcto es duna frontal, del inglés *foredune*. Estas son las que se forman en la zona más cercana al mar, en la parte posterior de la playa; generalmente se distribuyen de manera paralela a la costa. Su formación inicia cuando la arena transportada por el viento queda atrapada por la vegetación de la playa u otros obstáculos, por ejemplo troncos. Su altura es variable, desde un metro, hasta unos 30m (Hesp, 2000). Debido a su cercanía al mar, son éstas la primera defensa contra la intrusión del agua de mar durante las tormentas, pero también las más susceptibles a la erosión. Es por tal importancia el estudio de erosión del sistema playa-duna frontal presentado en esta tesis.



Figura II-9. Dunas frontales

II.3.3.1.2.2 *Hondonadas*

Las hondonadas son el resultado del proceso erosivo, ya sea por la acción de los vientos o por oleajes intensos, su formación inicia cuando disminuye la vegetación y generalmente se encuentran en las partes más bajas de los sistemas de dunas. En muchas ocasiones la erosión continúa hasta alcanzar el nivel del agua del subsuelo o alguna superficie menos erosionable. Se pueden clasificar como húmedas, cuando se inundan al subir el nivel del manto freático, o secas, cuando nunca se inundan (Ranwell, 1972). Las hondonadas pueden tener una gran variedad de formas, pero la mayoría se clasifica como hondonadas en forma de plato (formando un semicírculo) o bien hondonadas alargadas (Hesp, 2000).



Figura II-10. Hondonadas

II.3.3.1.2.3 *Dunas parabólicas*

Las dunas parabólicas tienen forma de “U” invertida y, como su nombre lo indica, semejan una parábola. Se caracterizan por tener dos brazos y una cima. La cima está orientada hacia la dirección donde viajan los vientos dominantes, es la parte más alta y donde se unen los brazos. En algunas ocasiones se presentan hondonadas entre los brazos de las dunas parabólicas. Se puede reconocer una pendiente interna en dirección de donde viene el viento (barlovento), y una externa en dirección hacia donde sopla el viento (sotavento).



Figura II-11. Dunas Parabólicas

II.3.3.1.2.4 *Barjanes*

Los barjanes se forman donde la disponibilidad de arena es limitada, tienen forma de media luna y se parecen a las dunas parabólicas. La principal diferencia entre ambos tipos es que los brazos de los barjanes apuntan hacia donde avanzan los vientos predominantes, contrario a las dunas parabólicas. Esto provoca en los barjanes que sus brazos avancen más rápido que la cima y la pendiente pronunciada de sotavento se encuentra entre los brazos. Los barjanes pueden medir entre 9 y 30 metros de altura y la distancia entre la punta de un brazo y la otra puede ser de hasta 365 m (Gallant, 1997).

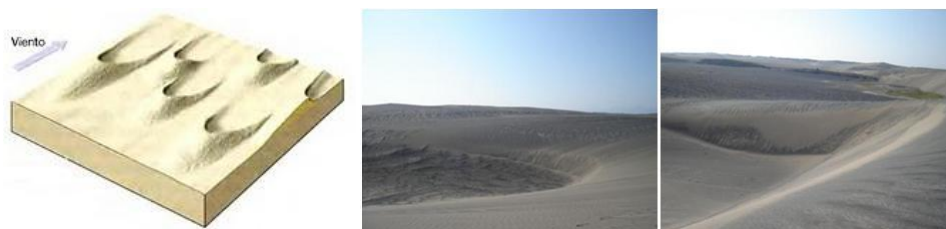


Figura II-12. Barjanes

II.3.3.1.2.5 *Dunas transgresivas*

Se denominan como dunas transgresivas al conjunto de dunas que pueden tener una gran variedad de formas y que están avanzando, o han avanzado, rumbo a tierra adentro. Éstas avanzan sobre todo tipo de terrenos, desde aquellos totalmente cubiertos por vegetación hasta los que carecen de plantas en su superficie. También pueden avanzar en zonas planas o con pendientes muy pronunciadas. La extensión que abarcan los campos de dunas transgresivas es muy variable, y fluctúa entre algunos cientos de metros a lo largo de las costas y tierra adentro hasta muchos kilómetros.

II.4 **Erosión de Dunas**

La erosión de las dunas generalmente se lleva a cabo durante las mareas de tormenta, cuando se incrementa el nivel medio del mar y las olas alcanzan a impactar la cara de la duna (Figura II-13). Durante una tormenta se desprende arena de la cara de la duna y cae en la playa, los sedimentos suspendidos son recogidos por las olas que los transportan hacia el mar. Conforme va disminuyendo la capacidad de transporte del flujo el sedimento empieza a asentarse formando un nuevo perfil costero, más elevado, que

estará en mejor equilibrio con las condiciones de marea de tormenta. De hecho, el proceso de erosión de las dunas se puede considerar como un caso extremo del ajuste continuo del perfil de la costa a las condiciones hidráulicas y meteorológicas cambiantes (Vellinga, 1986).

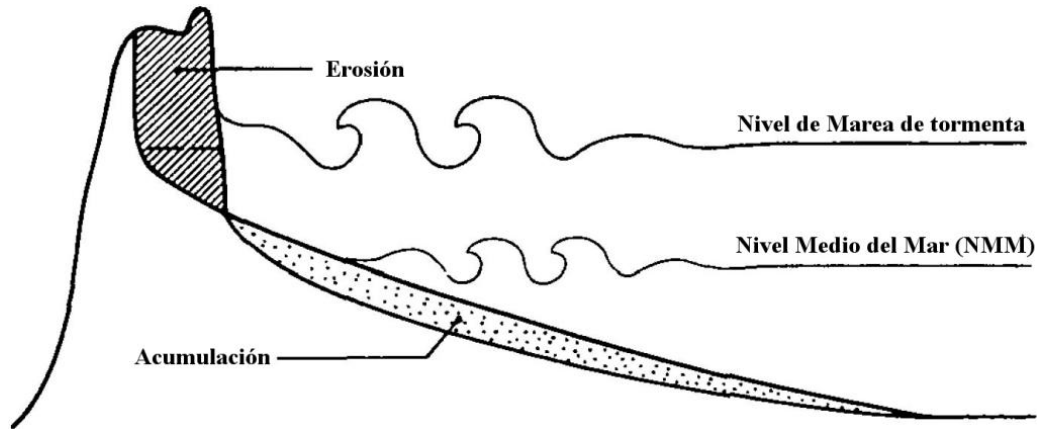


Figura II-13. Erosión de una duna por marea de tormenta. Modificado de (Vellinga, 1986)

Edelman (1968) en Holanda, fue el primer científico en desarrollar un método cuantitativo para la predicción de la erosión de dunas. El método se basa en la suposición de que durante una marea de tormenta se desarrollará una pendiente normal a la playa pero un nivel más alta que la anterior. La pendiente de playa que aplica Edelman en sus cálculos es recta de 1:50. Posteriormente Van de Graff (1977) mejoró el método de Edelman proponiendo un perfil de erosión cóncavo más realista. La forma de este perfil se obtuvo a partir de mediciones de campo inmediatamente después de la oleada de la tormenta de 1953 en la parte norte del norte de Holanda. Van de Graaff supone que este perfil de playa se puede considerar como típico de los perfiles que se desarrollarán durante las mareas de tormenta.

Van der Meulen y Gourlay (1968) fueron los primeros en investigar el proceso de erosión de las dunas en modelos de fondo a pequeña escala. Llevaron a cabo ensayos en una cuenca con ondas monocromáticas y obtuvieron respuestas cualitativas de cómo influyen en la erosión de las dunas, parámetros como: altura de dunas, perfil inicial de la playa, altura de ola, periodo de ola, reflexión del oleaje, variación del nivel del mar y las características del sedimento. Más tarde, Hulsbergen (1974) encontró que esas pruebas

deben haber sufrido el efecto de las ondas secundarias. A partir de varias pruebas encontró que, para condiciones con ondas monocromáticas generadas por una pala articulada en la base, el desarrollo del perfil de playa está relacionado con la distancia que hay entre la pala generadora y el litoral; y demostró que dicha relación se debe a la presencia de ondas secundarias. Previamente, Fontanet (1961) había demostrado que esas ondas secundarias son subproducto de las ondas monocromáticas generadas por este tipo de palas. Investigación experimental adicional en Delft Hydraulics Laboratory ha demostrado que los efectos de las ondas secundarias en un campo de ondas al azar en el desarrollo del perfil del fondo son uno o dos órdenes de magnitud más pequeñas que en condiciones con ondas monocromáticas (Delft Hydraulics Laboratory, 1981).

El proceso de erosión de las dunas puede ser modelado como una función del transporte litoral debido al flujo de retorno, especialmente teniendo lugar durante condiciones de tormenta. En el caso de fuerte transporte litoral se puede producir socavación en el frente de la duna e incluso derrumbes repentinos del sedimento, mejor conocidos como *slumping*. Estos fenómenos crean pendientes muy pronunciadas, lo que representa un perfil poco realista.

La mayoría de los modelos numéricos no detallan procesos geotécnicos y procesos de la zona de lavado en la parte superior de las dunas (zona seca). Un método para extrapolar, el transporte litoral que se lleva a cabo en la zona húmeda, a zona seca, es introducir un algoritmo que representa el fenómeno conocido como avalancha.

II.4.1 Avalancha

El fenómeno avalancha, fue descrito por Allen (1970). Este fenómeno ocurre cuando el nivel de arena alcanzado en algún punto supera el límite del ángulo de reposo del material y por tanto, se desploma.

En el modelado numérico de la erosión de dunas, primero se debe definir la pendiente crítica. Cuando ésta se excede entre dos celdas adyacentes de la cuadrícula, las profundidades del lecho entre esas celdas cambian a la cantidad necesaria para que el

valor de la pendiente vuelva a ser el crítico. Este cambio se limita por una tasa máxima de transporte de avalancha, especificada por el usuario, que para ambientes arenosos se establece tan alto como para no tener influencia en el resultado, al tiempo que garantiza la estabilidad numérica. La transición de la pendiente crítica húmeda a la pendiente crítica seca se lleva a cabo a una profundidad de agua especificada por el usuario (h_{switch}).

II.4.2 Modelo de Vellinga

Tomando como base la combinación de estudios de campo y laboratorio, acerca del efecto de las olas de tormenta sobre las dunas Vellinga (1986) encontró, que existía una relación entre el volumen de arena erosionada de las dunas y el perfil submarino resultante en la playa.

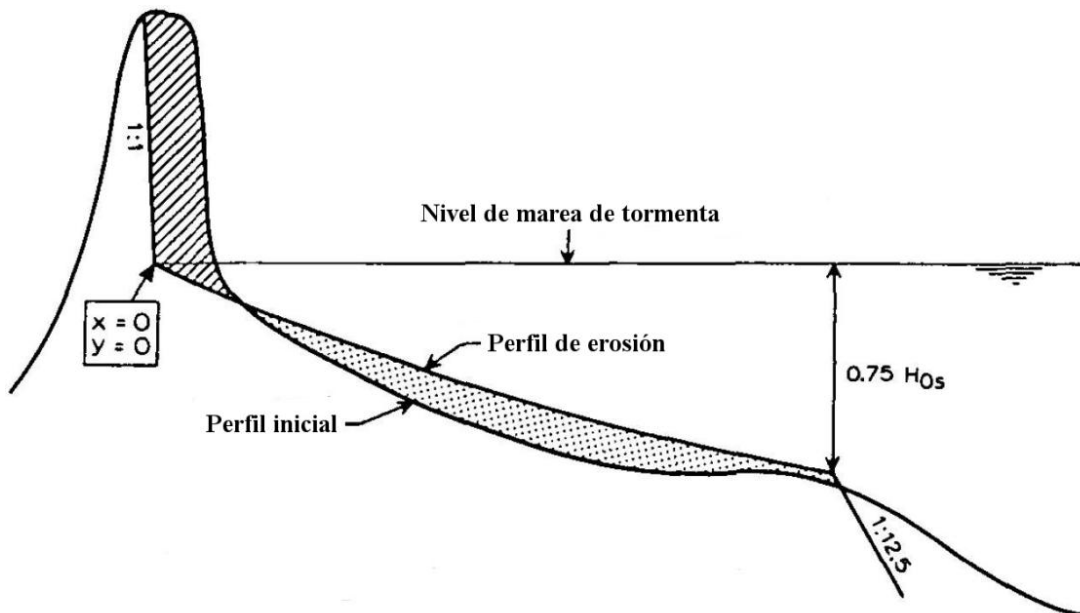


Figura II-14. Principios del modelo para predecir la erosión de las dunas. (Vellinga, 1986)

Los resultados de las mediciones de laboratorio y en el campo, le permitieron a Vellinga encontrar la siguiente expresión matemática para calcular la forma del perfil de erosión

$$h = 0.7 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.17} \omega^{0.44} x^{0.78} \quad (\text{II-3})$$

Donde:

- H_0 altura de ola significativa, en m
- L_0 longitud de la ola significativa, en m
- ω velocidad de caída de las partículas correspondientes a D_{50} , en m/s
- D_{50} mediana del diámetro de las partículas del sedimento de la playa
- x distancia desde la línea de costa, en m
- h profundidad, en m

Este modelo resulta de utilidad en las aplicaciones de ingeniería pues, de manera sencilla y rápida permite para una tormenta de diseño dada, predecir el volumen de arena que puede ser removido de las dunas.

Capítulo III:

OLEAJE

La costa sufre cambios debido a una gran cantidad de procesos naturales que actúan de forma simultánea o en secuencia; sin embargo, el oleaje es el proceso que predomina en términos energéticos. El oleaje, a su vez, es un fenómeno determinado por la acción de fuerzas de la naturaleza en la superficie de cualquier de agua, dando como resultado una serie de ondas de forma compleja. Entre las fuerzas generadoras de oleaje se encuentran los terremotos, deslizamientos de tierras o glaciares, atracción de cuerpos celestes, gravedad, pero sin duda la más importante de estas fuerzas es la acción del viento.

El estudio del oleaje se remonta hasta la época de los antiguos griegos, quienes estaban conscientes de la interacción entre el mar y la atmósfera. Aristóteles (1996), señaló la importancia que juega el viento en el desarrollo del oleaje. Durante los siglos XVI al XIX hubo varias contribuciones en el plano teórico, entre las más importantes están las teorías de (Airy, 1845) y (Stokes, 1847); pero el primer estudio de predicción de oleaje se realizó durante la segunda guerra mundial, por Sverdrup y Munk (1947).

La forma más sencilla de poder entender un estado de mar es considerándolo como ideal, es decir, definido por ondas perfectas, con crestas y valles idénticos, periodo único y movimiento orbital progresivo. Bajo este supuesto, sobre una escala espacial, se pueden definir ciertos parámetros. Si se observa durante buen tiempo el paso de una onda por un nivel medio de referencia (NM), y un nivel en reposo (NR) que corresponde al nivel del fluido en ausencia de ondas; el desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto al nivel medio se le denomina *desplazamiento de la superficie libre*,

η . En el paso de una onda, su *periodo* T , es el tiempo que transcurre hasta que se observa un punto idéntico de la superficie. La *longitud de onda* L es la distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos sucesivos de la superficie libre. El punto en el que la superficie libre alcanza un máximo se llama *cresta*, mientras que el punto donde alcanza un mínimo se llama *valle*. La distancia vertical total entre la cresta y el valle de la onda se denomina *altura de la onda* H . La distancia vertical máxima entre el nivel en reposo y la cresta se denomina *amplitud de la cresta* A_c , análogamente, se puede definir la *amplitud del seno* A_s . La *profundidad o calado* h , es la distancia entre el fondo y el nivel de reposo. La velocidad a la que se propagan las ondas en el fluido, llamada generalmente *celeridad* c , se define como la longitud entre el periodo de onda.

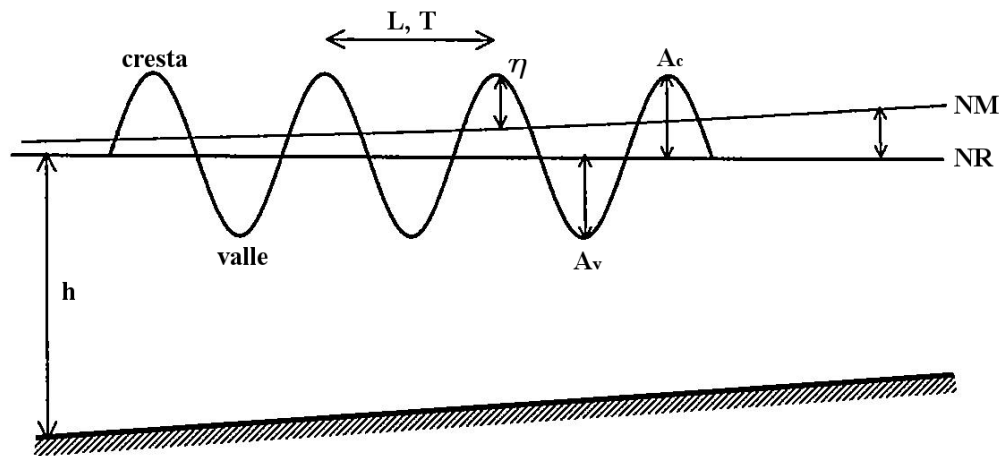


Figura III-1. Definición de parámetros asociados a la onda. Modificado de (Cantabria, 2000)

El oleaje no puede ser representado por un modelo tan sencillo como el de la onda simple, ya que no se repite en el espacio ni en el tiempo y cuando se observa una altura de ola en un punto dado del mar, no se puede precisar cuál será la altura de ola siguiente en ese punto. Considerando la gran variabilidad del oleaje real, la forma más razonable de caracterizarlo es a través de los métodos estadísticos, tratando al oleaje como un fenómeno aleatorio.

III.1 Clasificación del oleaje

Existen tres formas de clasificar al oleaje, las cuales corresponden a la profundidad relativa sobre la cual se propaga, la fuerza principal que lo genera y su periodo de onda.

III.1.1 Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa

Teóricamente, las ecuaciones que representan al oleaje que se propaga en cualquier *profundidad relativa* h/L , se denominan ondas en aguas intermedias o en zona de transición. Frecuentemente, este tipo de ecuaciones se simplifican aceptando que las ondas sólo son dependientes de su longitud o periodo y de la profundidad. Esto conlleva a dos extremos de aproximaciones según su profundidad relativa:

- *Aguas profundas*: Cuando la profundidad es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda, el oleaje no experimenta modificaciones apreciables debidas al efecto de la profundidad.

$$h \geq \frac{L}{2} \quad (\text{III-1})$$

- *Aguas poco profundas*. Cuando la profundidad es igual o menor que un vigésimo de su longitud de onda, el oleaje está propiamente controlado por la profundidad del agua.

$$h \leq \frac{L}{20} \quad (\text{III-2})$$

III.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas

Las ondas en el océano pueden ser clasificadas de acuerdo con las fuerzas que generan al oleaje, con su periodo y la cantidad de energía que normalmente portan, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica. Así, por ejemplo:

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan el oleaje local y distante
- Los maremotos o terremotos generan grandes ondas conocidas como tsunamis, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.

OLEAJE

- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas.

Tabla III-1. Periodo – energía de las ondas. (Silva R. , 2005)

Nombre	Periodo (T)	Longitud (L)	Altura (H)	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1s	2 a 7cm	1 a 2mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30s a 30min	100 a 200m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5min a 24h	Pueden llegar a ser de escala planetario	1 a 5m	Sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24h	-	0 a 12m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

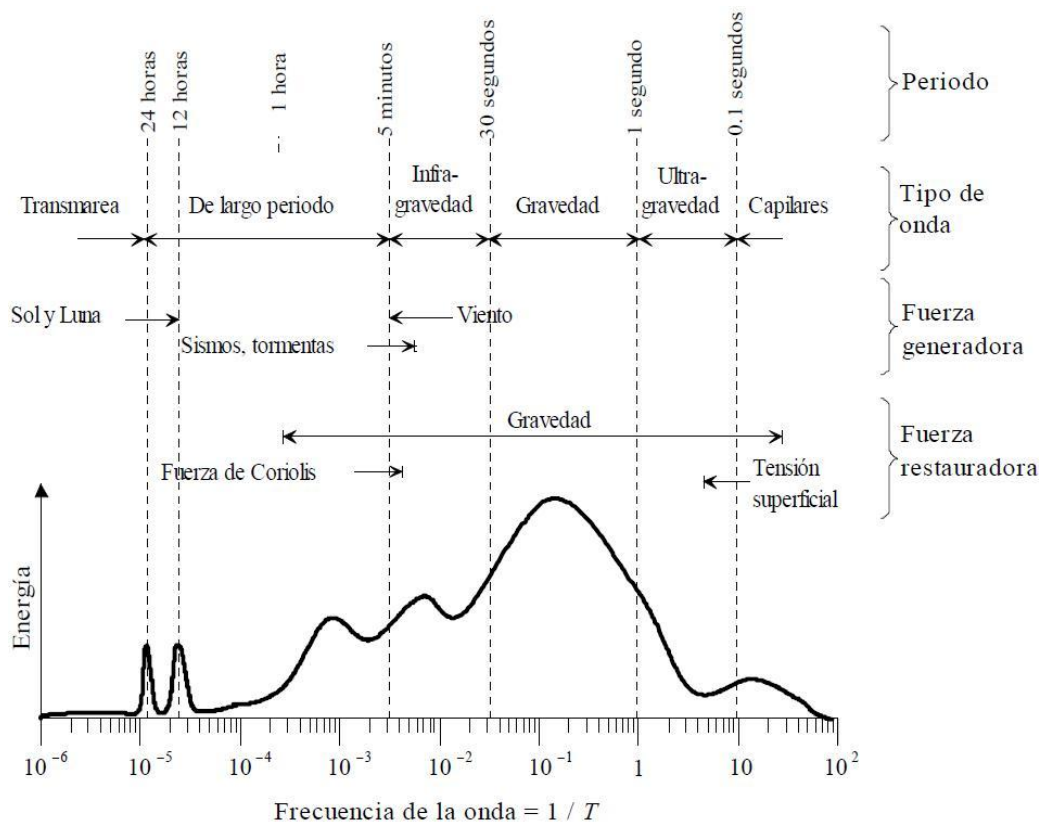


Figura III-2. Periodo - energía de las ondas. (Silva R. , 2005)

III.1.3 Clasificación de acuerdo a la zona de generación

El área de generación, o fetch, es la región donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar. Ahí el oleaje es completamente aleatorio, se propaga en diferentes direcciones pero la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación. De acuerdo con su génesis, se distinguen dos tipos extremos de oleaje, entre los cuales existen un sinnúmero de estados intermedios.

- ***Oleaje local o SEA***: Este tipo de oleaje es generado en alta mar, su forma es irregular y es difícil definir periodo y altura de onda. Tiene gran asimetría entre sus valles y crestas.
- ***Oleaje distante o SWELL***: Este tipo de oleaje se encuentra lejos del área de generación al propagarse, las direcciones no son tan dispersas y se presentan ciertas direcciones predominantes, lo que proporciona un estado más regular.

Debido a la zona donde se presenta este oleaje, cercana a la costa y a profundidades reducidas, influye en su forma el fenómeno de refracción, haciendo que las ondas se propaguen paralelamente a las líneas batimétricas.



Figura III-3. Oleaje tipo SEA (izquierda) y oleaje tipo SWELL (derecha)

III.2 Análisis estadístico del oleaje

III.2.1 Hipótesis básicas

En general, las olas en el mar no son regulares. El oleaje es un proceso esencialmente aleatorio, que en términos prácticos puede ser considerado como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones, con diferentes amplitudes y frecuencias (Figura III-4); de tal forma que puede ser estudiado como una superposición lineal de ondas armónicas simples.

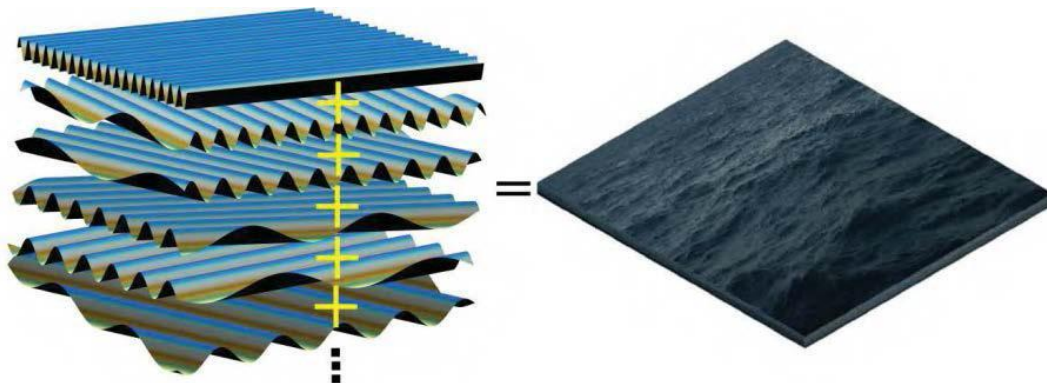


Figura III-4. Oleaje aleatorio

III.2.2 El oleaje como proceso estocástico

Dado que el oleaje es un fenómeno aleatorio su estudio debe realizarse haciendo uso del análisis estadístico. Éste debe ser considerado como un proceso estocástico, es decir, resultado de un experimento, que no es un número sino una función. En el análisis estadístico, los parámetros del oleaje (desplazamiento de la superficie libre, altura de ola, periodo, etc.) son considerados como sucesos aleatorios. Los valores medidos de un determinado parámetro forman un juego de realizaciones aleatorias de dicha variable; los resultados se expresan mediante las funciones de distribución y densidad, y los momentos estadísticos de las citadas variables. El perfil de la superficie libre puede ser descrito como:

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[\frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \operatorname{sen} \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad (\text{III-3})$$

Donde:

- a amplitud, en m
- σ frecuencia angular ($2\pi/T$)
- T periodo de la onda, en s
- θ ángulo de incidencia con respecto al eje X, en $^\circ$
- ε fase
- x, y posición espacial de la onda
- t tiempo, en s

Si se utiliza la teoría de la correlación es posible simplificar el estudio de estos procesos, ya que ésta toma en consideración exclusivamente los dos primeros momentos del proceso. De tal forma que:

- El valor medio, $\mu_\eta(k)$, queda definido como:

$$\mu_\eta(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_k(t) dt \quad (\text{III-4})$$

- Y, la función de correlación (o autocorrelación), $R_{\eta\eta}(k)$, es expresada como:

$$R_{\eta\eta}(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta_k(t) \eta_k(t + \tau) dt \quad (\text{III-5})$$

A pesar de restringir el proceso al uso de los dos primeros momentos, éste sigue siendo inabordable, por lo que se hace necesario admitir dos importantes hipótesis estadísticas: *estacionariedad* y *ergodicidad*.

III.2.3 El oleaje como un proceso estacionario

Un fenómeno físico es estacionario si todas las funciones de distribución que definen al proceso permanecen constantes en un intervalo de tiempo, es decir, se puede considerar estacionario si las características externas que influyen en él permanecen constantes durante un cierto periodo de tiempo.

III.2.4 El oleaje como un proceso ergódico

El teorema de ergodicidad, aplicable a la mayor parte de los procesos estacionarios, dice:

Si un proceso aleatorio $\eta(t)$ es estacionario y $\mu_\eta(k)$ y $R_{\eta\eta}(k)$ definidos en las ecuaciones (III-4) y (III-5), no difieren cuando se calculan sobre diferentes muestras, se dice que el proceso es ergódico.

De esta forma, la hipótesis de ergodicidad permite sustituir los promedios espaciales de realizaciones por promedios temporales sobre una realización. La descripción de un estado de mar a partir de un único registro, (realización temporal), se basa en admitir que se trata de un proceso ergódico y estacionario.

III.2.5 Definición de estado de mar

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.

Otra definición es la que establece que el estado de mar representa cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar al proceso como estacionario (Silva *et al.*, 2002).

III.2.6 Ascenso máximo del oleaje (Run-up)

El ascenso del oleaje sobre un talud inicia con la rotura de las olas, que es cuando la mayor parte de la energía del oleaje se disipa y el movimiento oscilatorio de la superficie desaparece dando lugar a una lengua o lámina de agua que recorre el talud hasta que no es capaz de seguir ascendiendo pues ha perdido toda su energía por efectos de fricción principalmente. El ascenso máximo del oleaje sobre un talud, R_u , es la cota máxima vertical que alcanza el agua, medida desde el nivel medio de la misma. Para su estimación en este proyecto, se utilizará el criterio de (Losada & Giménez-Curto, 1980) con el ajuste de (Silva *et al.*, 1998) considerando la duna como un dique homogéneo.

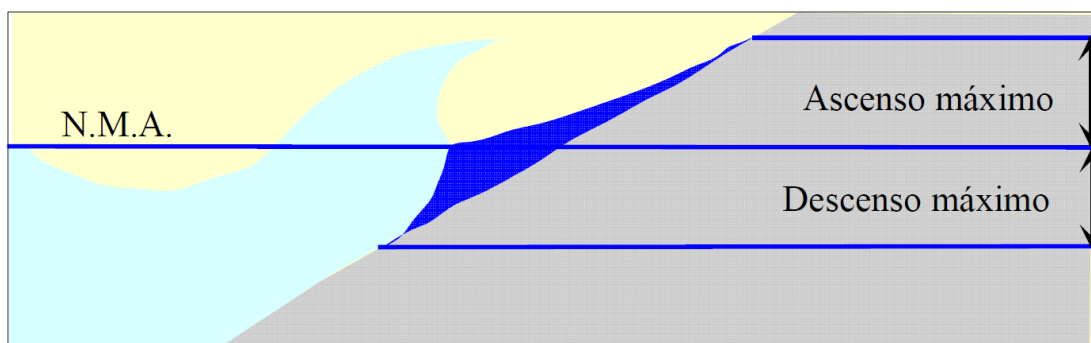


Figura III-5. Ascenso máximo (Run-up)

$$\frac{R_u}{H} = Au(1 - e^{-BuIr}) \quad (\text{III-6})$$

Donde:

- R_u ascenso máximo del oleaje (Run-up), en m
- H altura de ola, en m
- Ir número de Iribarren
- Au y Bu coeficientes de ajuste que dependen del tipo de piezas de manto principal y por tanto, de la porosidad.

$$Au = -4.706n + 3.293$$

$$Bu = -1.569n + 0.038$$

Capítulo IV:

METODOLOGÍA

IV.1 Zona de estudio

El primer paso de este estudio fue elegir una zona de análisis. Después de una exhaustiva búsqueda a lo largo del litoral mexicano, se eligió el estado de Veracruz como zona de estudio ya que el contorno envolvente del Golfo de México, entre otros factores, propicia la deposición de sedimentos continentales (López-Portillo *et al.*, 2011), y por lo tanto abundan las dunas costeras. Muchos de los sistemas de dunas costeras más importantes y extensos del país se encuentran en las costas de Veracruz, además de que albergan especies endémicas exclusivas de las dunas costeras mexicanas, y una de ellas es incluso endémica de Veracruz (Martínez *et al.*, 1993).

Otra de las razones por la cual se eligió esta zona de estudio, es la facilidad de acceso a información ecológica que se tiene de Veracruz, ya que muchas instituciones especializadas se encargan de estudiar, monitorear y documentar todo el estado, facilitando así la obtención de información para este proyecto.

El estado de Veracruz se localiza en la porción oriental del país, en las inmediaciones del Golfo de México, entre los 17°03'56" y los 22°27'18", de latitud norte y los 93°36'13", y los 98°36'00", de longitud oeste (Jiménez, 2010). Limita al norte con Tamaulipas; al este con el Golfo de México; al oeste con San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla; al sur y suroeste con Oaxaca; y al sureste con Chiapas y Tabasco.

IV.2 Perfiles de playa - duna

Estos perfiles constituyen un instrumento que permite evaluar el estado y los cambios morfodinámicos en playas y dunas. Su forma es resultado de complejos procesos naturales. Para este proyecto, se construirán y analizarán 4 perfiles bajo climas marítimos correspondientes a régimen medio, extremal e insólito. Los perfiles estarán compuestos por un perfil de duna y uno de playa, elegidos de proyectos anteriores del INECOL (Jiménez, 2010) y del IIUNAM (Delgadillo, 2011). El punto en que se cruzan ambos perfiles será considerado en la línea del nivel de marea alta, asignando a dicho nivel la cota 0. La parte seca del perfil, comprendida desde el nivel de marea alta hacia tierra adentro, será el perfil de duna. La parte húmeda comprenderá desde el nivel de marea alta hacia mar adentro.

IV.2.1 Perfil de playa

Para el perfil de la playa, se usará un perfil de pseudo-equilibrio (Delgadillo, 2011), cuya pendiente aproximada es 1:30. Este perfil fue desarrollado experimentalmente en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM, resultado de la evolución de una playa artificial con 6 m^3 de arena y talud recto con pendiente 1:6 en el lado del mar, bajo condiciones de oleaje irregular de espectro Jonswap equivalente a una tormenta ($T=2 \text{ s}$, $H=0.18 \text{ m}$) durante 48 horas continuas.

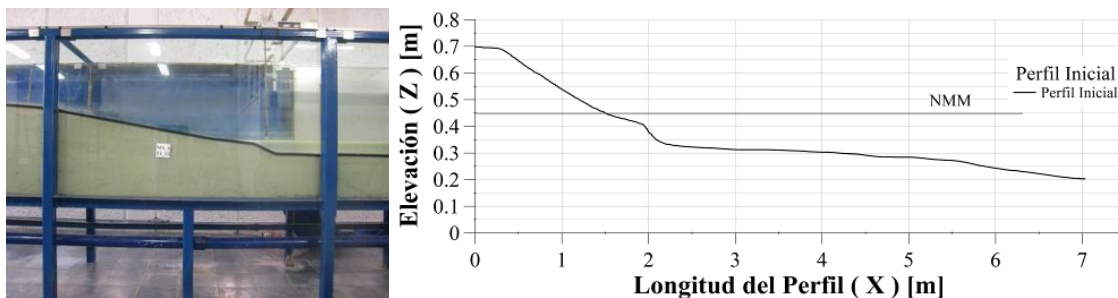


Figura IV-1. Perfil de pseudo-equilibrio. (Delgadillo, 2011)

IV.2.2 Perfil de duna

Del estado de Veracruz, se seleccionaron 4 playas de diferentes formas para ser modeladas bajo ciertas condiciones de oleaje. Dichos perfiles fueron seleccionados de (Jiménez, 2010).

IV.2.2.1 *Playa Paraíso*

El primer perfil corresponde a playa Paraíso, que se localiza en el sur del municipio de Tecolutla. Está compuesto por dos cordones de dunas, el primero con una altura alrededor de 3.5 m y el segundo de 4.5 m aproximadamente.

IV.2.2.2 *Playa El Raudal*

Playa El Raudal, se localiza en la zona noroeste del municipio Vega de Alatorre, de la región Nautla. Su primer cordón de duna es angosto y de baja altura, 3 m.

IV.2.2.3 *Playa Navarro*

Al sureste de la misma región se encuentra Playa Navarro, cuya duna frontal supera los 4m de altura, está compuesta por dos angostos cordones de dunas embrionarias, el primero un poco más alto que el segundo.

IV.2.2.4 *Playa Lechuguillas*

Entre los municipios de Vega de Alatorre y Alto Lucero se encuentra Playa Lechuguillas, cuya duna frontal tiene una altura máxima de 5 m.

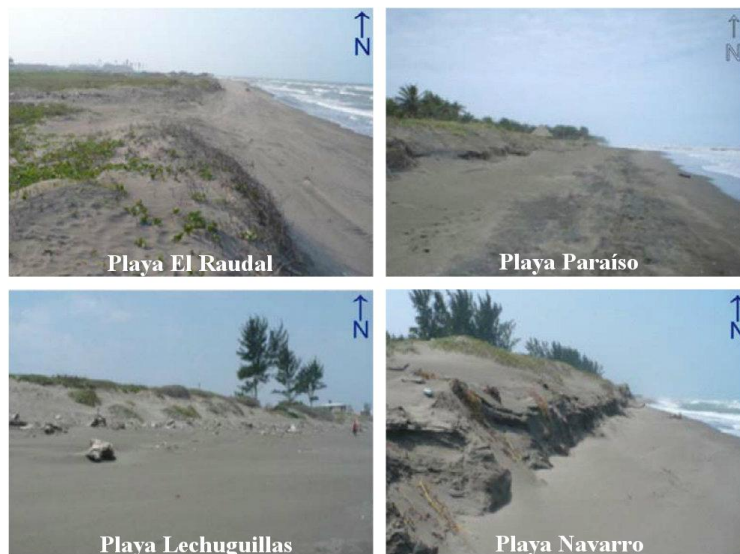


Figura IV-2. Fotos de las playas de estudio. (Jiménez, 2010)

Para la digitalización de los perfiles, se utilizó un nivel topográfico para medir la variación altitudinal sobre un transecto perpendicular a la línea de costa. Se tomaron datos tierra adentro a partir de la línea de marea alta, midiendo a cada metro con el nivel para registrar la morfología de la duna frontal. Los perfiles digitalizados son los siguientes:

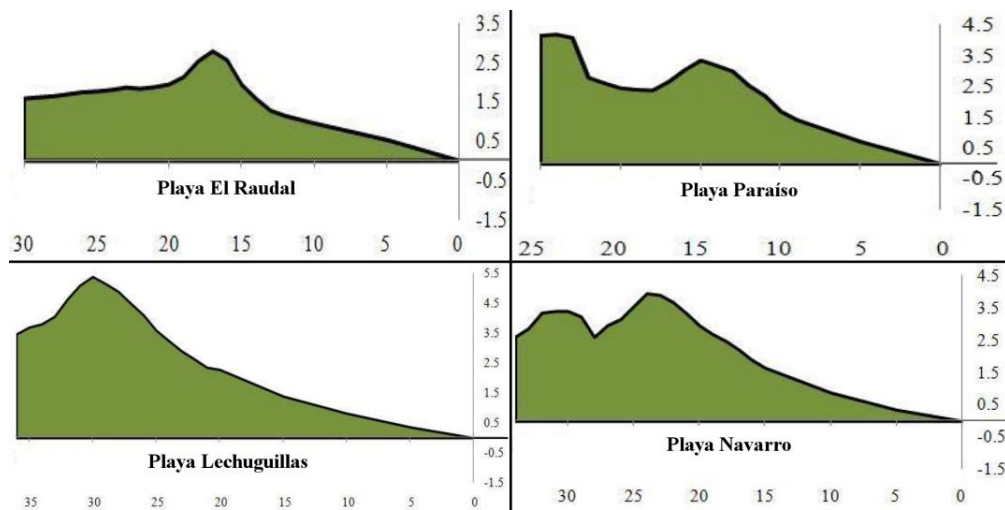


Figura IV-3. Perfiles medidos de las playas de estudio. (Jiménez, 2010)

IV.3 Parámetros

IV.3.1 Oleaje

Dado que el oleaje es el factor más importante tanto en la configuración del perfil de playa como en la erosión de dunas, es necesario conocer el clima marítimo de la zona de estudio para poder elegir las condiciones de las modelaciones. Las variables utilizadas para el estudio de esta tesis, son:

- altura de ola, H
- periodo de la ola, T
- duración de las modelaciones, d
- marea de tormenta, z

IV.3.1.1 *Determinación*

Los parámetros del oleaje más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo, son proporcionados por la estadística. En la ingeniería, sobre todo en el proceso de diseño o caracterización, lo más conveniente es asociar las alturas con periodos de ola (Silva R. , 2005).

La precisión que ofrece cualquier modelo depende en gran medida de la calidad de los datos que se utilizan. Para contar con información precisa y confiable, se consultó el Atlas de clima marítimo de la vertiente atlántica mexicana, elaborado por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para el Departamento de Oceanografía de la Comisión Federal de Electricidad. Esta es una institución especializada que cuenta con estaciones a lo largo de todo el litoral mexicano para llevar a cabo monitoreo en campo y archiva los datos históricos y estadísticos.

De las estaciones de monitoreo se seleccionó la del puerto de Veracruz, cuyas coordenadas geográficas son longitud 96° W y latitud 19.5 N, para obtener datos estadísticos de oleaje representativos para todo el estado (Figura IV-4).

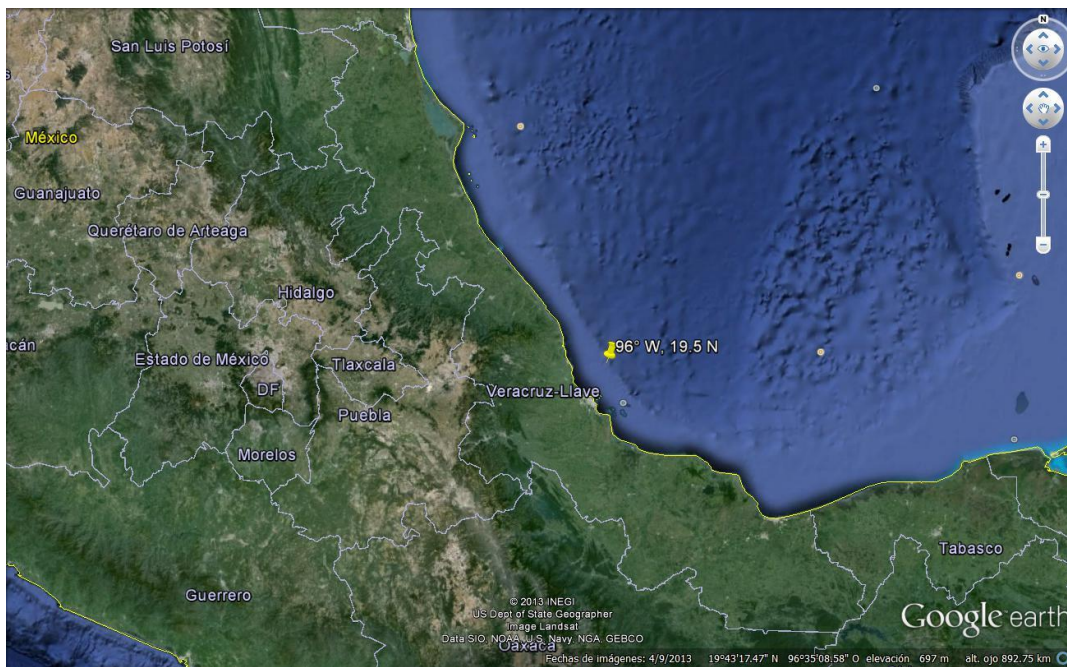


Figura IV-4. Coordenadas de la estación de monitoreo

En el resumen de resultados del periodo de 1948 a 2007, reportado en el atlas por la estación elegida, se obtuvieron las gráficas de probabilidad conjunta anual de altura significativa y periodo medio de ola (Figura IV-5), duración media de tormentas (Figura IV-6), y presentación de alturas de olas significantes por año (Figura IV-7). De estas gráficas se eligieron las condiciones de oleaje para las modelaciones del presente estudio.

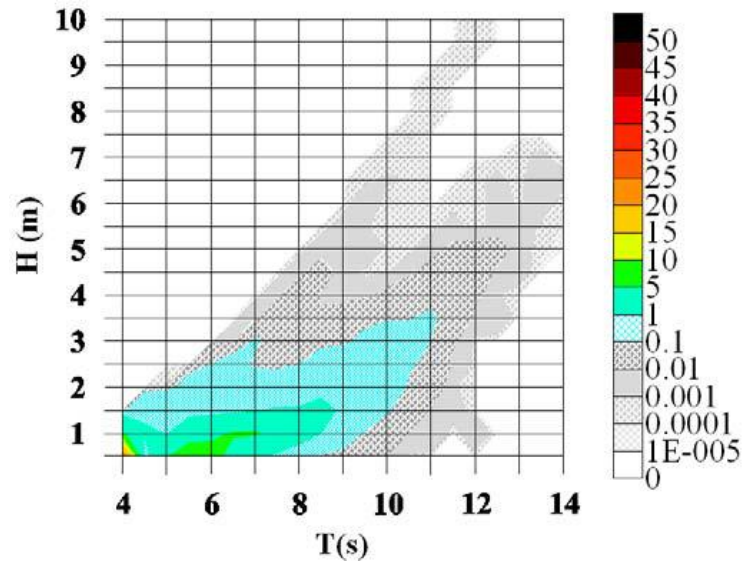


Figura IV-5. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y periodo medio de ola

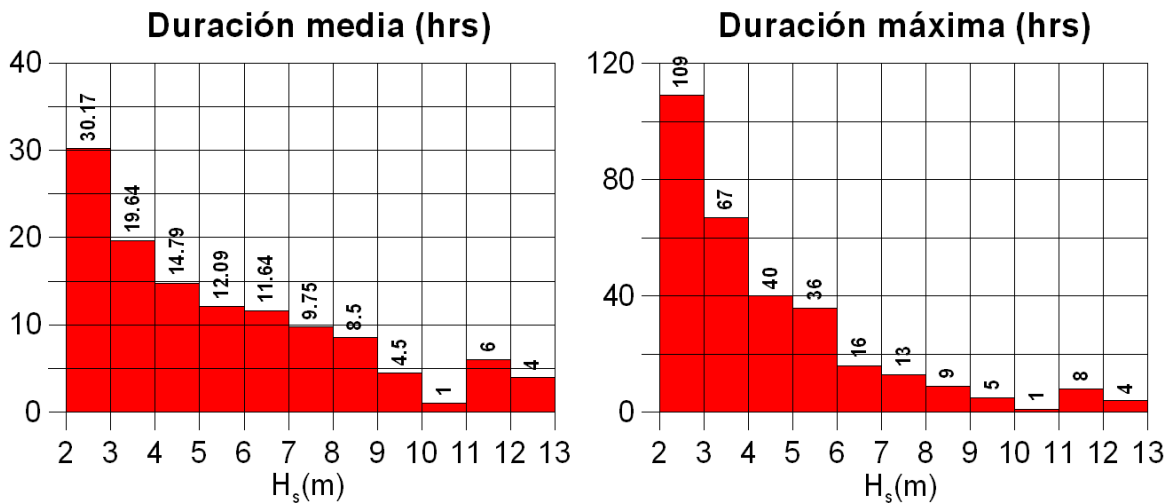


Figura IV-6. Duración media de tormentas

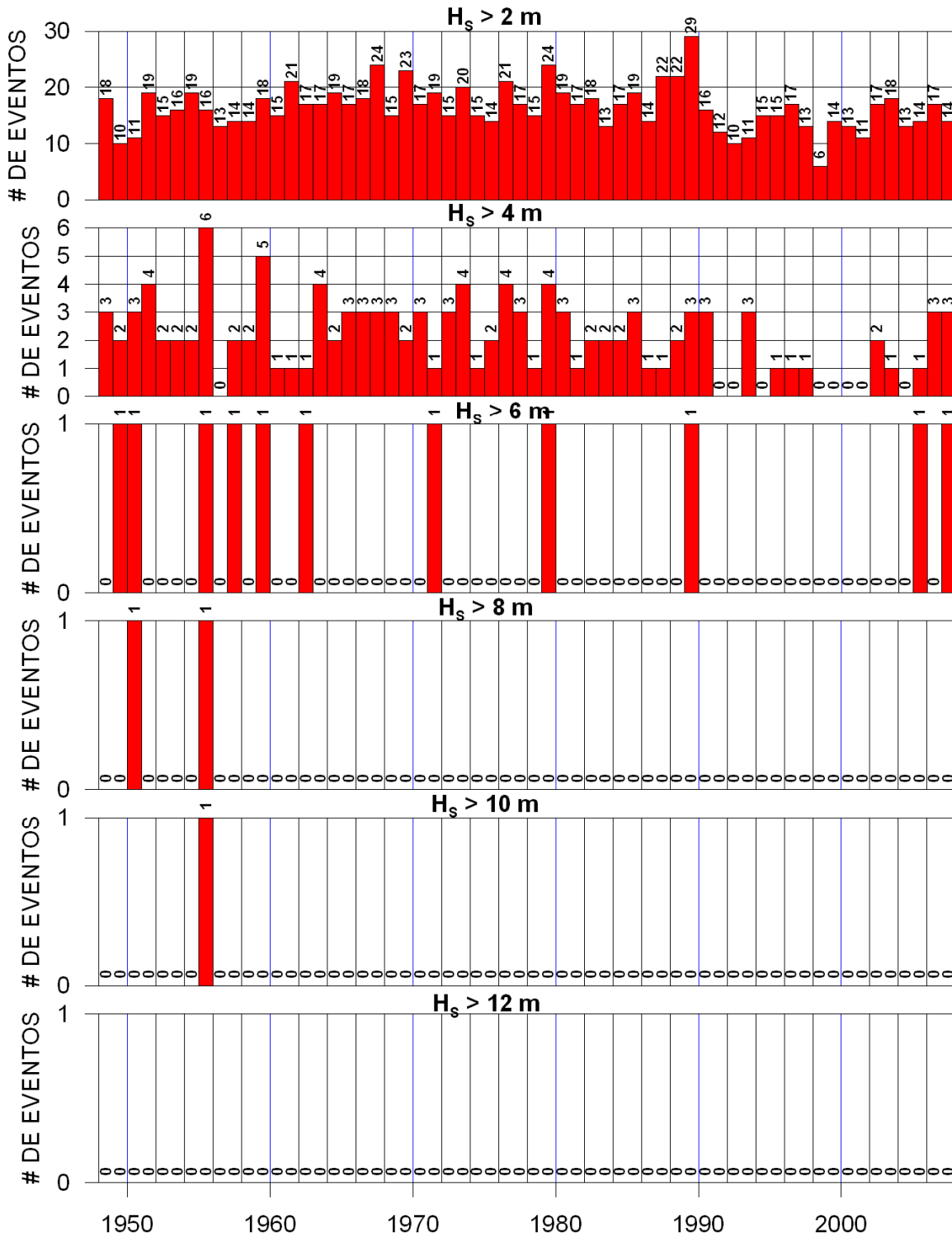


Figura IV-7. Presentación de alturas de ola significativa por año

El modelado en este trabajo se diseñó para representar las condiciones de oleaje irregular a través de un espectro Jonswap, para esto se analizarán los perfiles bajo cuatro condiciones de régimen medio (RM), seis condiciones de régimen extremal (RE) y una condición insólita (RI), teniendo un total de once casos por modelar. En la tabla IV-1, se identifican todas las modelaciones que se realizaron. Para tener un control de las pruebas realizadas a cada perfil, se asignaron abreviaturas en dichas pruebas: Las primeras dos letras del nombre de la prueba, corresponden al nombre del perfil en análisis, mientras que las siguientes dos letras representan el régimen bajo el cual se están modelando; por último, el número al final del nombre de la prueba pertenece al número de caso de cada régimen.

Tabla IV-1. Modelaciones realizadas

Régimen	Caso	Condiciones de oleaje			
		H [m]	T [s]	z_s [m]	d [h]
Medio	RM1	0.5	4	0	168
	RM2	0.5	6	0	168
	RM3	1.0	4	0	168
	RM4	1.0	6	0	168
Extremal	RE1	2.0	6	0.5	20
	RE2	2.0	8	0.5	20
	RE3	5.0	8	1.0	12
	RE4	5.0	10	2.0	7
	RE5	10.0	10	2.0	3
	RE6	10.0	12	2.0	3
Insólito	RI1	13.0	12	2.0	3

El nivel de ascenso máximo (Run-up) se calculó para cada perfil, considerando condiciones de régimen medio, para una H=1m y T=6s. (Tabla IV-2).

Tabla IV-2. Nivel de ascenso máximo para cada perfil

Perfil	m [1]	Ir [1]	R _u [m]
El Raudal	0.0769	0.5765	0.4065
Paraíso	0.0881	0.6605	0.4550
Lechuguillas	0.0735	0.5510	0.3913
Navarro	0.0741	0.5555	0.3940

IV.3.2 Sedimento

Además de los parámetros del oleaje, también son muy importantes los parámetros del sedimento del perfil, como la densidad, porosidad, y diámetros nominales del sedimento.

IV.3.2.1 *Determinación*

Para la determinación de los parámetros del sedimento, se tomaron muestras en campo y se analizaron en laboratorio. Al ser muy difícil tomar muestras de todos los perfiles elegidos, se decidió tomar una sola muestra y aceptar, dado que todos los perfiles pertenecen al estado de Veracruz y se encuentran cercanos unos a otros, que el sedimento presenta propiedades muy similares en todos los perfiles.

Las demás características de la arena fueron determinadas utilizando el sistema de análisis granulométrico por imágenes CAMSIZER de la firma Retsch Technology, el cual es capaz de medir el tamaño y la forma de partículas. El CAMSIZER está basado en el principio del análisis dinámico de imágenes: el material pasa entre la luz de la fuente y dos cámaras digitales, las imágenes de las partículas son grabadas ópticamente, digitalizadas y procesadas por una computadora con el software CAMSIZER, el cual realiza el análisis estadístico de la muestra en función del número de partículas detectadas o del volumen de la muestra.

Tabla IV-3. Características del sedimento

Característica	Valor	Unidades
Densidad	2693	$\left[\frac{kg}{cm^3} \right]$
Porosidad	0.4	
D50	0.000202	$[m]$
D90	0.000365	$[m]$

IV.4 Modelación

La modelación de los fenómenos físicos es muy compleja y hasta las mejores representaciones son sólo simplificaciones de la realidad. Estas simplificaciones ocasionan que cualquier diseño, por meticuloso que sea, contenga incertidumbres implícitas que afectan su idealización. Por otro lado, las mediciones directas en campo representan la realidad en el pasado y no hay garantía que éstas vayan a presentar el mismo comportamiento en el futuro.

Como se mencionó, para una buena modelación se debe contar con una correcta caracterización de los parámetros (por ejemplo, configuración del lecho, materiales, sedimentos) y bases confiables de la información ambiental (por ejemplo, viento, oleaje, mareas).

Actualmente, se aplican modelos numéricos como herramientas para resolver problemas en el ámbito costero. Su aplicación para simular cualquier tipo de escenario conducirá a la predicción sobre el comportamiento del proceso. Para el modelado numérico de esta tesis se utilizó el software XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009), proporcionado por Deltares. Este modelo resuelve ecuaciones de propagación de ondas, flujo, transporte de sedimentos y cambios de fondo, para oleaje espectral y el flujo de las condiciones de frontera. La razón principal de esta elección, es que este modelo toma en cuenta las oscilaciones en el nivel del mar causadas por el flujo de retorno, conocidas como surf

beat (Munk, 1949); uno de los principales agentes en la erosión de dunas. Por esto el modelo Xbeach es capaz de modelar con mejor precisión el desarrollo del perfil de erosión de las dunas, para predecir cuándo comenzará el rebase y embrechamiento del oleaje en la duna y modelar los acontecimientos a lo largo de estas fases.

IV.5 XBeach

XBeach es un modelo numérico de evolución costera por procesos. Esta herramienta fue desarrollada para calcular el comportamiento y la respuesta a variaciones temporales de la zona costera ante los impactos de huracanes y tormentas. Las modelaciones realizadas con XBeach pueden incluir casos de erosión de dunas, rebase o embrechamiento de barreras; teniendo como máxima prioridad el proporcionar estabilidad numérica. El modelo consiste en una serie de fórmulas que representan la propagación de onda corta, ecuaciones no estacionarias para aguas someras, ecuaciones para transporte de sedimentos y la variación de la batimetría. Su respuesta está basada en soluciones de refracción del oleaje que permiten determinar la variación espacial (X, Y) y temporal de la acción del oleaje sobre el espacio direccional, simulando la propagación y disipación de trenes de olas sin la necesidad de utilizar otro modelo diferente para predecir la dirección media del oleaje, por tanto, ofrece la posibilidad de que diferentes grupos de ola se propaguen en diferentes direcciones.

XBeach hace uso de diferentes fórmulas para la concentración de sedimentos en equilibrio, para producir los vectores de transporte que serán utilizados en la actualización morfológica del perfil. Las ecuaciones de transporte de sedimentos son la de Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997) y la adaptación de Van Thiel a la ecuación de Van Rijn (Van Rijn, 2007). Para las simulaciones de esta tesis se aplica la formulación de Van Thiel (Van Thiel, 2009), en la que se incluye el efecto de la turbulencia en la rotura de las olas. Una descripción detallada del modelo se puede encontrar en (Roelvink *et al.*, 2009).

El modelo XBeach se puede utilizar para aplicaciones costeras de pequeña escala (escala de proyecto), pero también se utiliza en los sistemas de mayor tamaño, donde será conducido por las condiciones de contorno proporcionadas por el viento y las olas, mientras que el principal resultado que arroja es la variación de la batimetría. El modelo XBeach fue probado y calibrado con los resultados de experimentos en el Deltaflume a gran escala llevados a cabo en 2006 (véase (Van Thiel, 2009) para más detalles).

IV.5.1 Funcionamiento del modelo

Para correr el modelo basta con ejecutar el archivo *xbeach.exe*; este leerá e interpretará, del archivo *params.txt* del directorio actual, las combinaciones de '*comando=valor*' que se encuentran en él. Los comandos se refieren a los valores de los parámetros y se pueden enumerar en cualquier orden; las líneas que no contengan el signo '=' son ignoradas por el ejecutable, sólo sirven como comentarios para el usuario.

IV.5.2 Calibración del modelo

Se conoce como calibración al ajuste de los parámetros del modelo para mejorar la predicción de un conjunto de datos observados. El nivel de precisión y la coherencia de un modelo numérico es función de qué tan bien los principios matemáticos utilizados son capaces de describir el proceso que se simula y qué tan bien los parámetros del modelo pueden ser estimados. Para una calibración correcta en el modelo, se modificarán los parámetros más sensibles, dejando para los parámetros con menor influencia los valores que el modelo tiene por defecto.

IV.5.2.1 Parámetros de la malla

El comando '*depfile*', hace referencia al archivo de la batimetría del perfil en análisis, que debe contener el número de filas de la malla, '*nx*', más uno; y los valores de profundidad '*ny*', más uno. El sentido de la malla será definido con el comando '*posdwn*', cuando sea igual a 1 la profundidad será positiva hacia abajo, cuando sea -1 será positivo hacia arriba. Para elegir una malla variable se especifica con la

combinación de comando '*vardx=1*'. Los archivos que definirán la malla se especifican con los comandos '*xfile*' y '*yfile*'.

IV.5.2.2 *Constantes físicas*

Para especificar las constantes que toman en cuenta las ecuaciones, se usan los comandos '*rho*' para la densidad del agua, y '*g*' para la gravedad.

IV.5.2.3 *Gestión del tiempo*

Para indicar el instante en el que se iniciará y finalizará la simulación hidrodinámica se usan los comandos '*tstar*' para el inicio, y '*tstop*' para el fin. Para indicar un intervalo de tiempo en el cual se mostrarán resultados se usa el comando '*tint*'. El paso de tiempo real de la simulación hidrodinámica se determina basándose en un número de Courant máximo dado a través del comando '*CFL*'.

IV.5.2.4 *Disipación de oleaje*

Para resolver las ecuaciones de la acción del oleaje, se utiliza una ecuación de balance de la acción del oleaje en función del tiempo con un criterio similar al modelo HISWA (Holthuijsen *et al.*, 1989) de la Universidad de Delft. Se toma en cuenta la distribución de la onda direccional, mientras que el espectro de frecuencia está representado por una frecuencia media.

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial c_x A_w}{\partial x} + \frac{\partial c_y A_w}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A_w}{\partial \theta} = \frac{-D_w}{\sigma} \quad (\text{IV-1})$$

Donde:

$D_w [W / m^2]$ disipación de energía del oleaje debido a la rotura

$A_w [W / m^2]$ acción de las olas

σ frecuencia de la onda intrínseca,

$c [m / s]$ velocidad de propagación de las olas

$\theta [^\circ]$ ángulo de incidencia con respecto al eje x

La disipación de la energía de oleaje debido a la ruptura (D_w), se modela según el criterio de (Roelvink, 1993a), y debe ser introducida en el *params.txt* como *'break=1'*, ya que los valores que tiene por defecto el modelo están calibrados a dicho criterio.

IV.5.2.5 *Condiciones de frontera del oleaje*

Para modelar el oleaje irregular con espectro Jonswap se utiliza la combinación *'instant=jons'* en el *params.txt*, además de especificar, con el comando *'bcfile'*, el nombre del archivo separado del cual se leerán e interpretarán los parámetros correspondientes a las condiciones de frontera.

IV.5.2.6 *Flujo*

La fricción de fondo está definida por el coeficiente de Chezy 'C'. La viscosidad horizontal está compuesta por la viscosidad global 'nuh', y por una viscosidad en función de la disipación de rodillo 'nuhfac'.

IV.5.2.7 *Transporte de sedimentos*

La concentración de sedimentos de equilibrio se puede calcular con diversas fórmulas de transporte de sedimentos. La que se modelará es la propuesta por (Van Thiel, 2009), para esto hay que especificar en el *params.txt* la combinación *'waveform=2'* y *'form=2'*. La densidad del sedimento se introduce con el comando *'rhos'*.

IV.5.2.8 *Morfología*

El comando *'morfac'* es el factor de aceleración morfológica. Este acelera la escala de tiempo morfológica en relación con la escala temporal hidrodinámica. Esto significa que si se tiene una simulación de 10 minutos con una *'morfac=6'*, la simulación efectiva de la evolución morfológica del perfil es de una hora.

IV.5.2.8.1 *Avalancha*

El algoritmo de la avalancha en el Xbeach es sensible a los parámetros:

METODOLOGÍA

$A_{m\acute{a}x}$ tasa máxima de transporte de avalancha, en $m^3 / s / m$

h_{switch} profundidad en la transición de pendiente crítica húmeda a seca, en m

$m_{cr,wet}$ pendiente crítica húmeda

$m_{cr,dry}$ pendiente crítica seca

Debido a que las áreas inundadas de la duna son mucho más propensas al derrumbe repentino que las áreas secas, se separa la pendiente crítica para zonas secas y zonas inundadas. Los valores que XBeach tiene por defecto son 0.3 para la zona húmeda y 1 para la zona seca. La estimación estos valores está basada en la observación de experimentos. Para la pendiente de la zona seca observaron los experimentos del perfil de equilibrio de (Vellinga, 1986) quien dice que la pendiente debe ser mayor que el ángulo de reposo del sedimento, y debe ser tomada como una pendiente media observada después de erosión de las dunas. Para la pendiente de la zona inundada se tomaron en cuenta las pendientes máximas submarinas observadas en experimentos como la prueba de Zwin, y las de la Universidad del Estado de Oregon. En cuanto a la tasa máxima de transporte de avalancha $A_{m\acute{a}x}$, el valor por defecto de Xbeach es de 0.003 [$m^3 / s / m$], mientras que la profundidad del agua en la transición de pendiente crítica húmeda a pendiente crítica seca es de 0.1m; pero para ajustar ese valor a cada caso se modificará en cada modelación tomando el mismo valor que la marea de tormenta, z_s .

Para ajustar esos parámetros a las dunas de estudio, los valores que usarán todas la modelación y para todos los perfiles, se muestran en la tabla V-1; recordando que sólo varía en cada caso la profundidad del agua en la transición de pendiente crítica húmeda a seca, mientras los demás parámetros son fijos en todos los casos y para todos los perfiles.

Tabla IV-4. Valores de los parámetros en la modelación de avalancha

$A_{m\acute{a}x}$ [$m^3/s/m$]	h_{switch} [m]	$m_{cr,wet}$	$m_{cr,dry}$
0.003	z_s	0.20	0.75

Capítulo V:

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la modelación numérica con el objeto de definir la respuesta de los perfiles playa-duna ante las condiciones medias y de tormenta modeladas numéricamente, el fin último es caracterizar el grado de evolución morfológica de cada uno. Todos los resultados, a continuación expuestos, fueron obtenidos con ayuda del software MATLAB.

Los resultados se presentan como una comparación entre el perfil inicial y el perfil final y, a partir de dicha comparación, se estima la evolución. Al sobreponer los perfiles inicial y final es posible calcular algunos parámetros de deformación morfológica como son: el volumen removido de la duna y el desplazamiento de la línea de costa horizontal y verticalmente. Dichos parámetros se comparan para los diferentes perfiles y condiciones de oleaje a fin de analizar la evolución de la duna, específicamente respecto de la posición del pie de la misma. Finalmente, los valores obtenidos se agrupan en función de un número adimensional llamado Índice de Esbeltez de la duna (*IE*) el cual se describe a continuación.

V.1 Índice de esbeltez (*IE*)

Para relacionar la morfología de la duna con la capacidad disipativa de los perfiles, se propone utilizar un índice de esbeltez, obtenido con las dimensiones de altura y semi-ancho de la duna. Es claro que primero se deben definir las dimensiones de la duna, en este trabajo se considera que la altura de la duna comprende desde el nivel de máximo

ascenso del oleaje en condiciones medias, run-up, hasta la cresta de la duna; mientras que el semi-ancho es la distancia horizontal medida desde el nivel de ascenso máximo hasta la posición del punto más elevado de la duna (Figura VI-1). Para los casos donde el perfil se compone de 2 cordones de dunas, las dimensiones consideran sólo la duna frontal, es decir, el primer cordón.

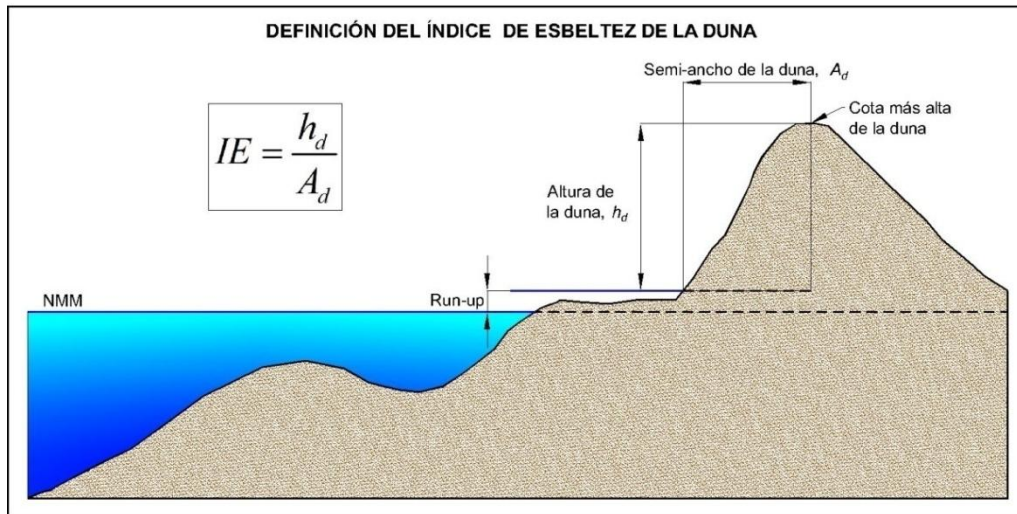


Figura V-1. Definición del Índice de Esbeltez de la duna

Se define, entonces, como Índice de Esbeltez al cociente de la altura de la duna entre el ancho de la misma.

$$IE = \frac{h_d}{A_d} \quad (V-1)$$

Donde:

- IE Índice de Esbeltez
- h_d Altura de la duna, en m
- A_d Ancho de la duna, en m

Se puede decir que entre mayor sea este índice, será más esbelta la duna. Posteriormente se comparará dicho índice con la evolución morfológica de la playa desde tres enfoques diferentes: pérdida de sedimento en la duna, recorrido horizontal de la línea de costa y desplazamiento vertical de la línea de costa.

Los valores del IE para las dunas consideradas en este trabajo se muestran en la Tabla VI-1:

Tabla V-1. Valores del IE para los diferentes perfiles estudiados en este trabajo

El Raudal	Navarro	Lechuguillas	Paraíso
0.1663	0.1778	0.1978	0.2358

V.2 Erosión de la duna

En este enfoque se utiliza el concepto de erosión de la duna como la pérdida de volumen de la misma. Para evaluar esta erosión, se calcularon el volumen inicial y final de la parte emergida del perfil y a la diferencia de volúmenes, cuando resultó negativa, se le denominó erosión. Es importante señalar que la parte emergida del perfil incluye, además de la duna, la berma y la zona de lavado, sin embargo, por considerarlo como un sistema interdependiente, se calculó el volumen de toda la parte emergida del perfil. En las figuras de los resultados, el volumen erosionado estará indicado con rojo como en la Figura VI-2.

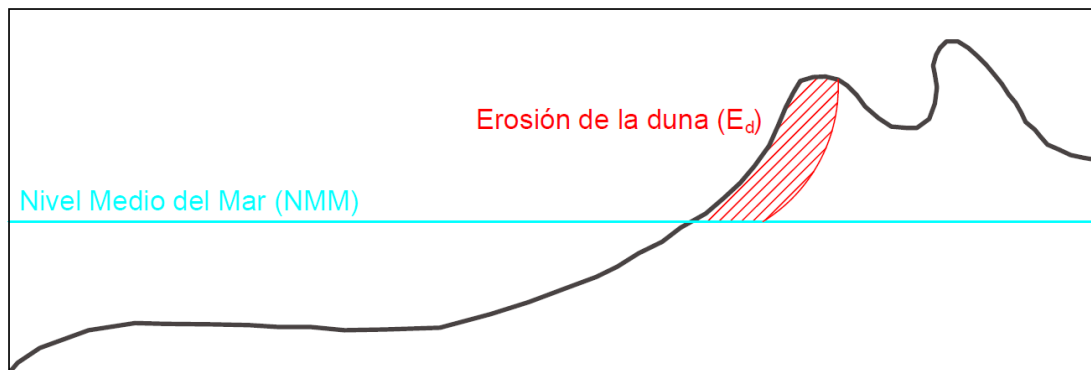


Figura V-2. Erosión de la duna

Dado que existe una gran diferencia de volumen inicial entre los perfiles, llegando al grado de tener un perfil casi con el doble de volumen que otro, no es preciso definir cantidades de volumen erosionado. Es por esto que se hablará de un volumen erosionado relativo de cada perfil, expresado en porcentaje de erosión, resultado de dividir el volumen erosionado de la duna entre el volumen inicial de la misma.

$$E = \frac{E_d}{V_{id}} \quad (V-2)$$

Donde:

E Erosión relativa, en %

E_d Erosión de la duna por ancho unitario, en m^3/m

V_{id} Volumen inicial de la duna por ancho unitario, en m^3/m

V.3 Desplazamiento horizontal de la línea de costa

En este enfoque de erosión se mide el recorrido o desplazamiento, en horizontal, de la línea de costa, cuya posición inicial se sitúa a la altura del Nivel Medio del Mar (NMM). El desplazamiento resulta de restar la posición del perfil final a la posición del perfil inicial; un resultado positivo se traduce en una ganancia de playa seca, mientras que un resultado negativo se traduce en una pérdida de playa seca. En la Figura V-3 se ejemplifica, por medio de fotografías comparativas, la erosión debida al recorrido de la línea de costa, traducido en una pérdida de playa seca.

Para poder comparar el desplazamiento entre los diferentes perfiles, al igual que en el caso de la erosión de la duna, se requiere que sea un parámetro adimensional. Por lo tanto, el desplazamiento medido después de la modelación será dividido entre la componente horizontal del *Run-up* (Figura V-3), es decir, la distancia horizontal comprendida desde la posición del perfil inicial en el Nivel Medio del Mar hasta la posición del perfil inicial al nivel del *Run-up* correspondiente a dicho perfil.

$$D_H = \frac{p_s}{R_{u_x}} \quad (V-3)$$

Donde:

D_H desplazamiento horizontal de la línea de costa

p_s pérdida de playa seca obtenida con la modelación de la tormenta, en m

R_{u_x} componente horizontal del nivel del *Run-up*, en m

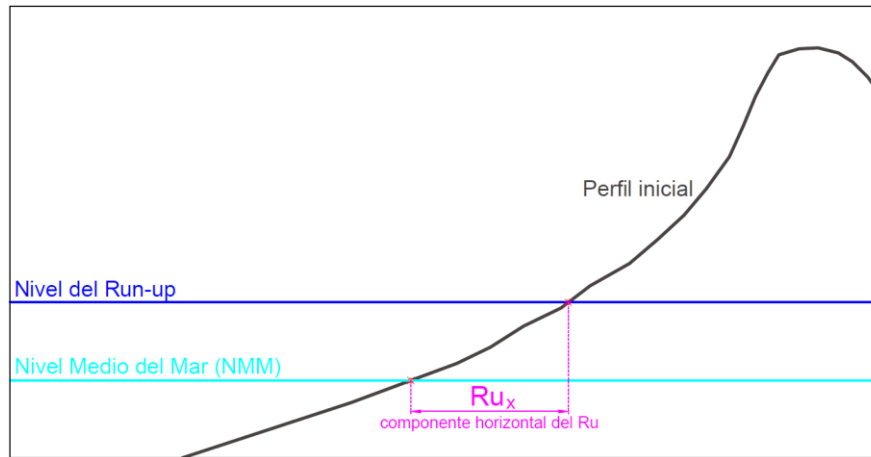


Figura V-3. Componente horizontal del nivel de Run-up

V.4 Desplazamiento vertical de la línea de costa

En este enfoque de erosión se mide el recorrido o desplazamiento, de modo vertical, de la línea de costa, cuya posición inicial coincide con la altura del Nivel Medio del Mar (NMM). Este desplazamiento resulta de fijar en el eje x la posición de la línea de costa del perfil inicial, y comparar con la posición del perfil final en el eje y. En los casos donde se pierde playa seca el desplazamiento, en este trabajo, se considera negativo aunque el punto final queda sumergido y en los casos donde se gana playa seca el desplazamiento se considera positivo y el punto final queda por arriba del nivel medio del mar. Del mismo modo que en los anteriores casos, se necesita un parámetro adimensional para poder comparar la erosión por desplazamiento vertical. Por lo tanto, la profundidad medida después de la modelación se dividirá entre el nivel del *Run-up* de cada perfil.

$$D_v = \frac{d_p}{R_u} \quad (\text{V-4})$$

Donde:

- D_v desplazamiento vertical de la línea de costa
- d_p profundidad medida después de la modelación, en m
- R_u nivel de ascenso máximo del oleaje (*Run-up*), en m



Figura V-4. Fotos comparativas del recorrido de la línea de costa en Punta Cancún

V.5 Resultados

Para analizar las diferentes condiciones de oleaje y compararlas caso por caso, pero con la finalidad de sintetizar el trabajo, se eligió mostrar sólo los resultados correspondientes al perfil de playa Lechuguillas; los demás resultados se podrán consultar en el Anexo 1. Sin embargo, en los resultados de tendencia se incluyeron todos los ensayos numéricos.

V.5.1 Régimen Medio

Los casos régimen medio se modelaron bajo condiciones de oleaje sin tormenta. Todos con la misma duración de 168 horas que equivalen a 7 días, y sin marea de tormenta.

Tabla V-2. Condiciones de modelación para Régimen Medio

Régimen	Caso	Condiciones de oleaje			
		H [m]	T [s]	z_s [m]	d [h]
Medio	RM1	0.5	4	0	168
	RM2	0.5	6	0	168
	RM3	1.0	4	0	168
	RM4	1.0	6	0	168

A continuación se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para el caso de playa Lechuguillas bajo condiciones de régimen medio, donde se compara el perfil inicial (línea negra) con el perfil final (línea azul). En las Figuras V-4, V-6, V-8 y V-10 se indica el volumen erosionado de la duna (rojo), mientras que en las Figuras V-5, V-7, V-9 y V-11 se indica el recorrido, horizontal (línea roja) y vertical (línea verde) de la línea de costa.

En ellas se puede observar balance entre la cantidad de sedimento erosionado y el sedimento depositado. Se corrobora que coincide el cambio de pendiente de seca a húmeda del perfil final, como se explicó en el apartado II.4.1 de esta tesis, en la posición asignada con los parámetros del XBeach, correspondiente al nivel de marea de tormenta; recordando que en régimen medio no hay marea de tormenta y por lo tanto coincide con el Nivel Medio del Mar.

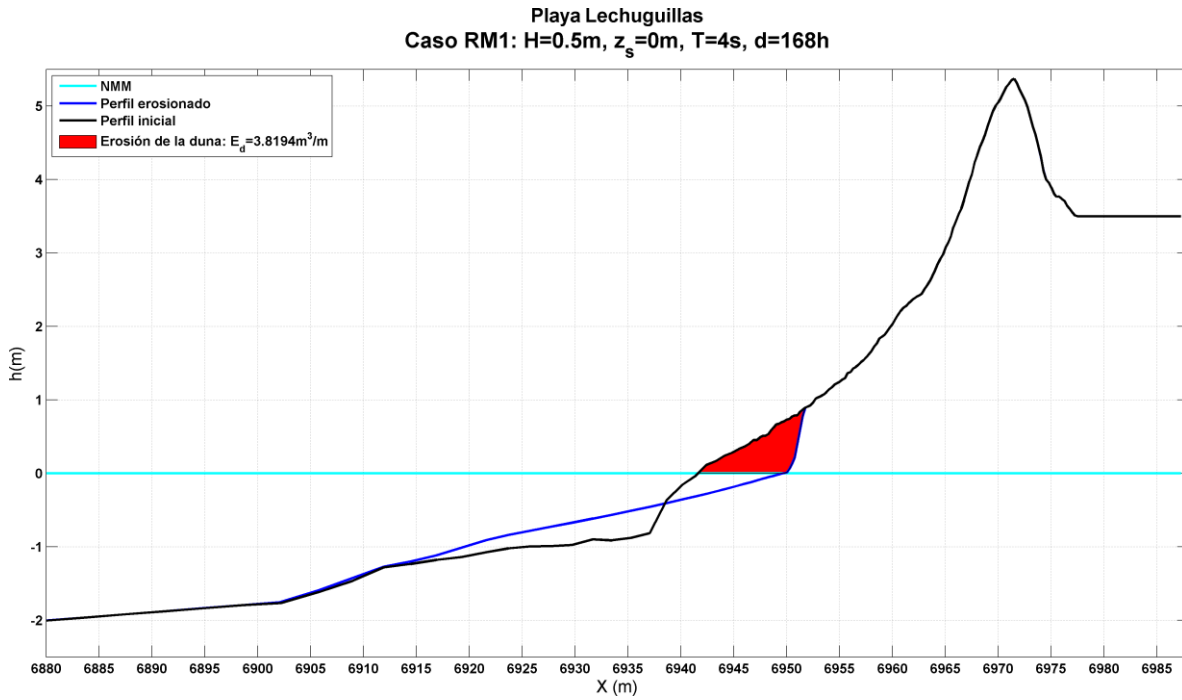


Figura V-5. Caso RM1. Erosión de la duna

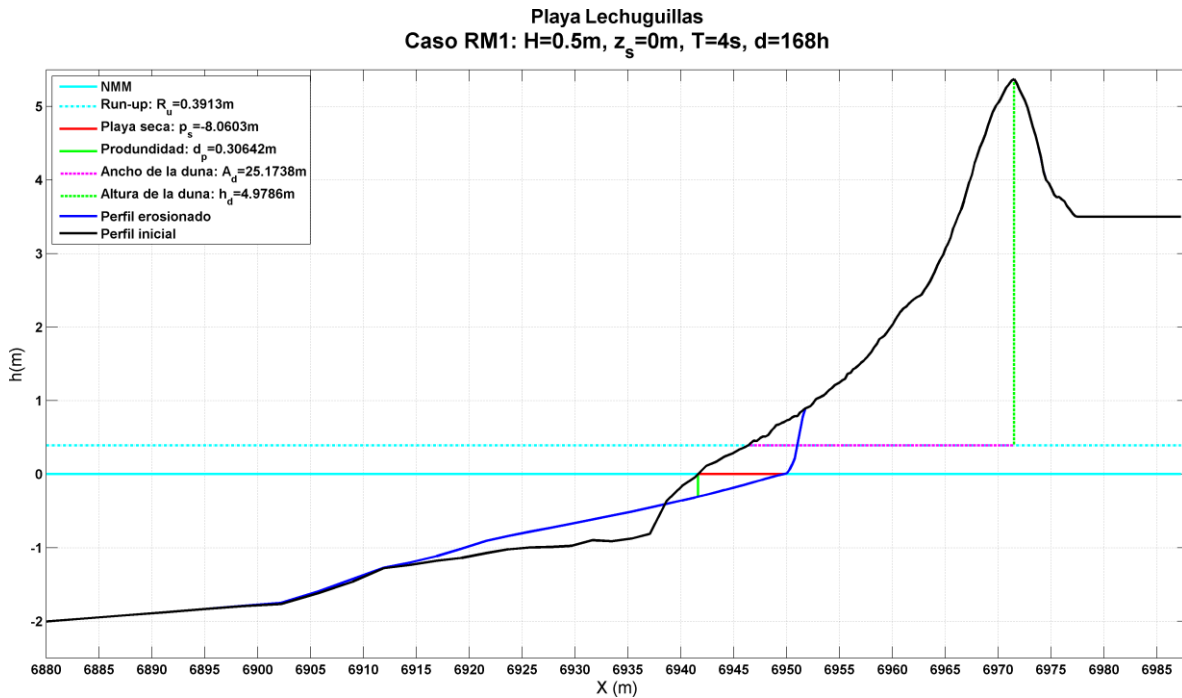


Figura V-6. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa

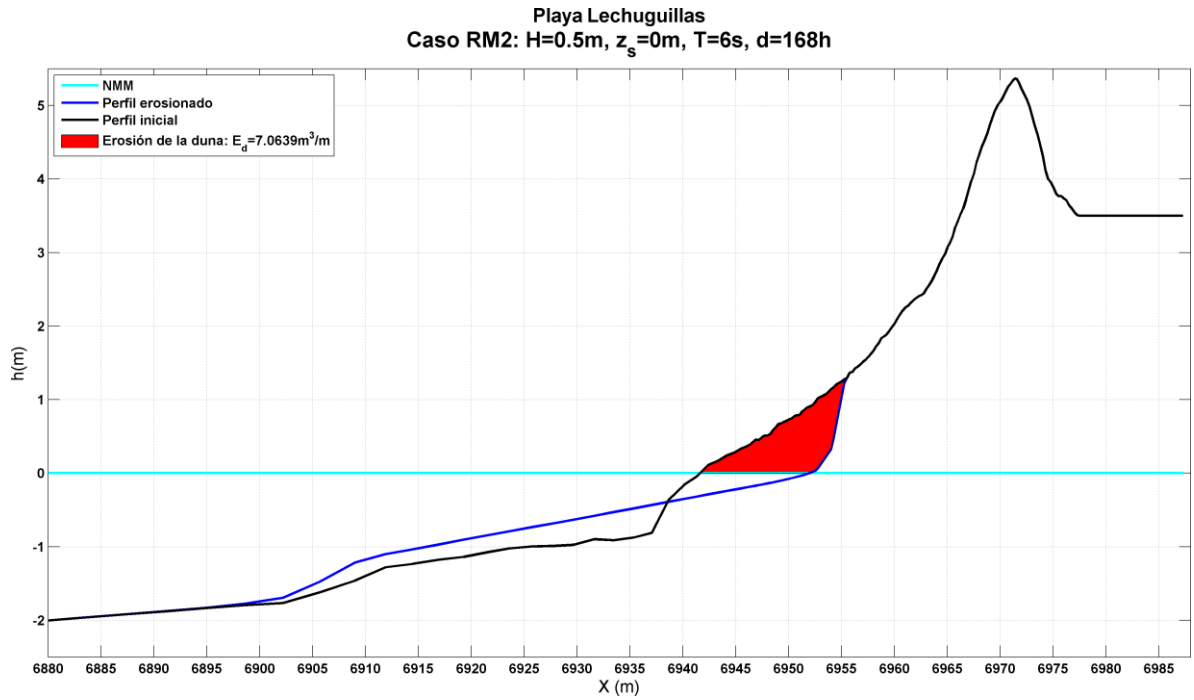


Figura V-7. Caso RM2. Erosión de la duna

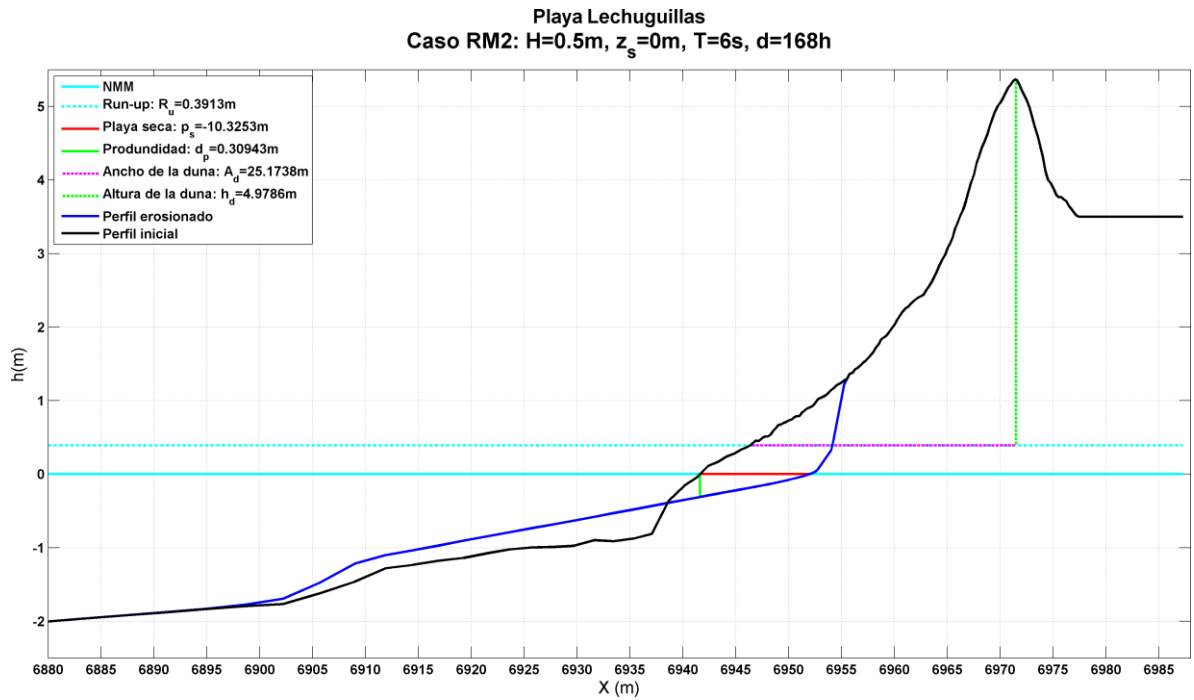


Figura V-8. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa

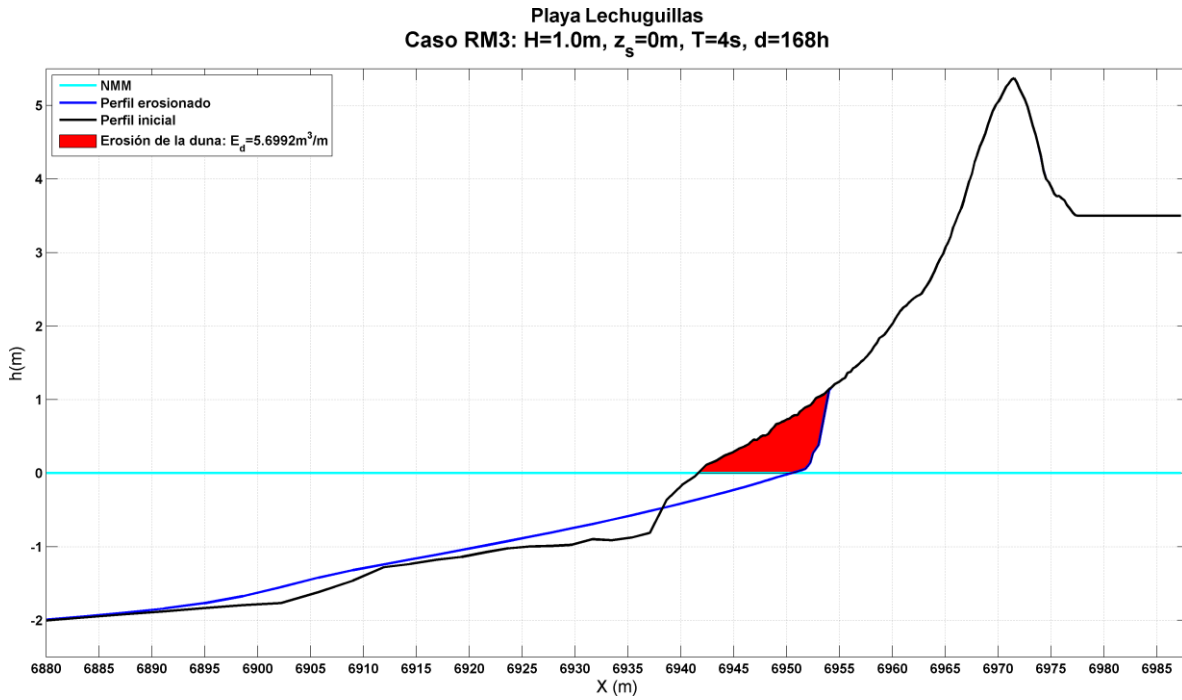


Figura V-9. Caso RM3. Erosión de la duna

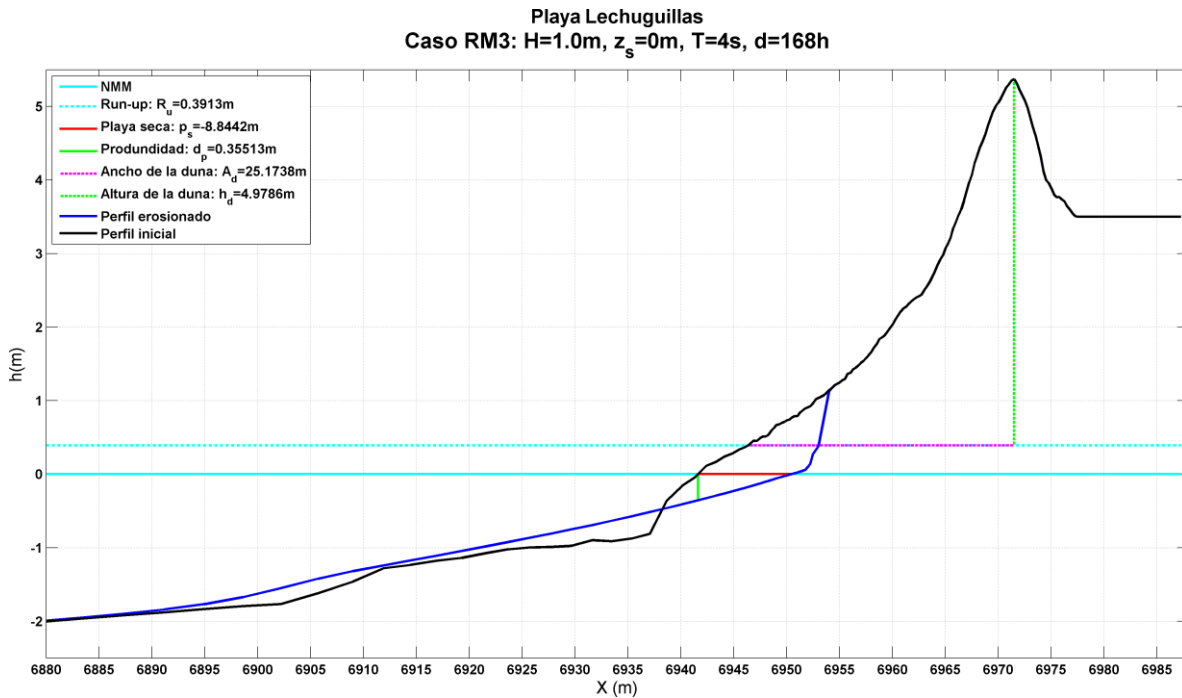


Figura V-10. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa

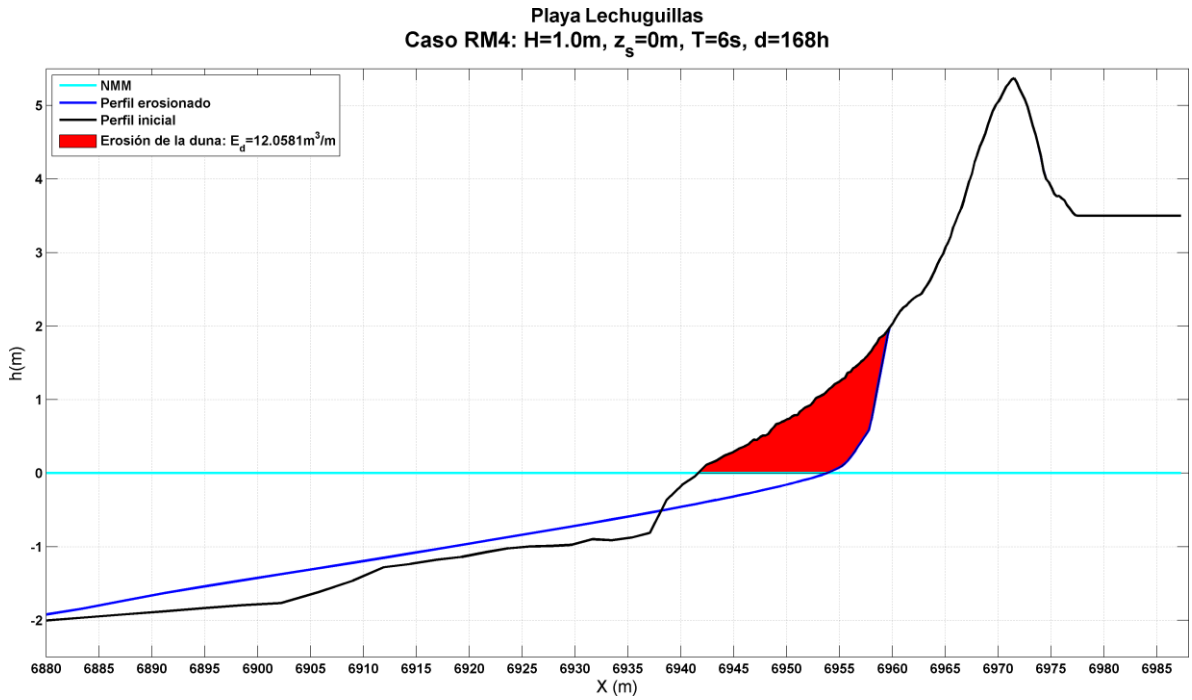


Figura V-11. Caso RM4. Erosión de la duna

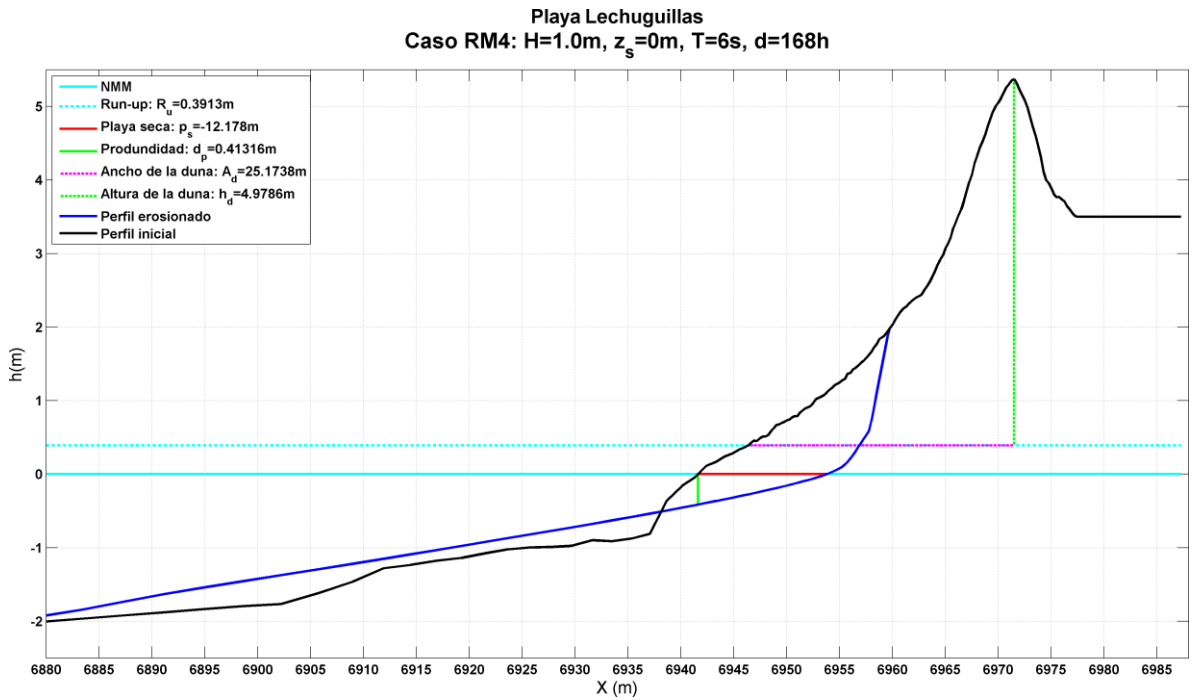


Figura V-12. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa

La Tabla V-3 muestra un resumen de los resultados de los casos modelados en régimen medio del perfil de playa Lechuguillas.

Tabla V-3. Resumen de los resultados modelados con Régimen Medio

Caso	E [%]	D_H	D_V
RM1	3	-1.65	0.78
RM2	6	-2.12	0.79
RM3	5	-1.81	0.91
RM4	10	-2.50	1.06

Los datos presentados en la Tabla V-3 permiten comparar la intensidad erosiva de los casos modelados. En cuanto al recorrido horizontal de la playa se observa que en todos los casos de régimen medio se perdió playa seca, y por ende los desplazamientos verticales provocados son positivos.

Los casos no están en orden de intensidad erosiva, ya que se observa que el caso RM2 es más erosivo que el caso RM3, en los enfoques de erosión por pérdida de volumen y desplazamiento horizontal de la línea de costa, pero no en el enfoque de desplazamiento vertical de la línea de costa.

Comparando el caso RM1 con el RM2, donde sólo se aumenta el periodo de ola, comparando el RM1 con el RM3, donde sólo se aumenta la altura de ola, y dado que el RM2 es más erosivo que el RM3, se puede concluir que la erosión es más sensible al parámetro de periodo que a la altura de ola.

Ahora se analizan los resultados de cada caso modelado de acuerdo a cada tipo de erosión y comparando contra el índice de esbeltez de los cuatro perfiles, separados por régimen.

V.5.1.1 Erosión de la duna

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos en el enfoque de porcentaje de erosión de la duna entre todos los casos de régimen medio y para cada perfil. En la Tabla V-4 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-13.

Tabla V-4. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna

Perfil	IE	RM1	RM2	RM3	RM4
El Raudal	0.1663	7	13	11	22
Navarro	0.1778	4	7	6	12
Lechuguillas	0.1978	3	6	5	10
Paraíso	0.2358	5	10	8	18

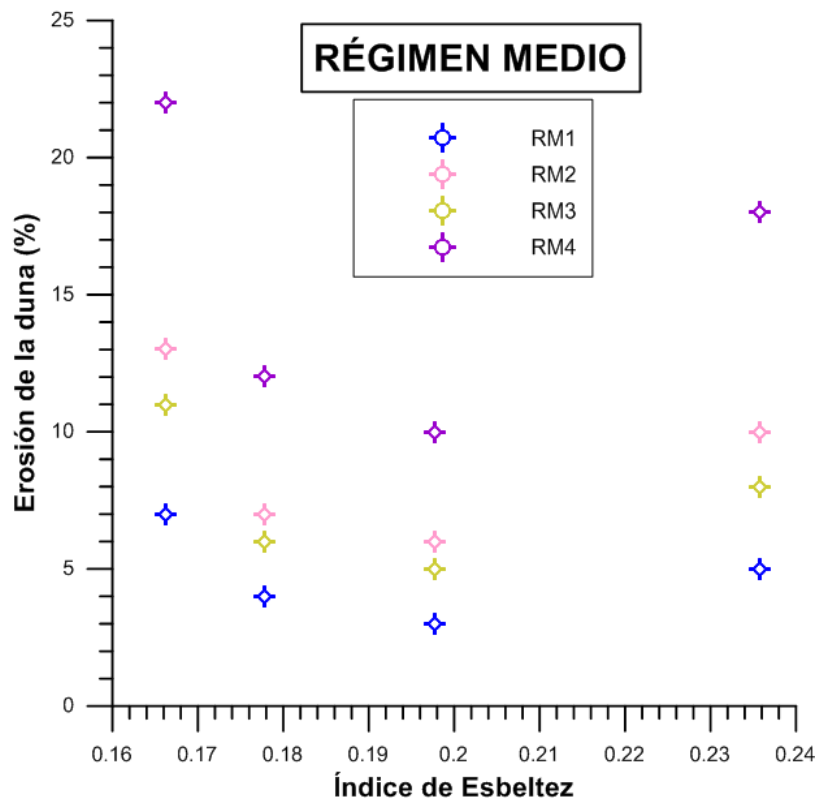


Figura V-13. Resultados de la erosión contra el índice de esbeltez

Al graficar los resultados de cada caso modelado se observa una clara tendencia, definida por curvas como función del Índice de Esbeltez de cada perfil. Para representar ese comportamiento con el objeto de poder predecir la erosión de cualquier perfil conocidas sus dimensiones, se recurre a métodos matemáticos para obtener las ecuaciones de las curvas que describen el comportamiento de la erosión para diferentes perfiles.

Para la erosión de la duna en régimen medio, el mejor ajuste obtenido fue el de la ecuación de Steinhart-Hart (V-5), perteneciente a la familia de regresiones.

$$E(\%) = \frac{1}{A + B \ln(IE) + C(\ln(IE))^3} \quad (V-5)$$

Los coeficientes A , B y C , fueron ajustados con una regresión recíproca en función de las condiciones modeladas: altura de ola, longitud de ola en aguas profundas y el diámetro del sedimento.

$$A = \frac{1}{-0.051065 - 0.000216 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)} \quad (V-6)$$

$$B = \frac{1}{-0.051932 - 0.000225 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)} \quad (V-7)$$

$$C = \frac{1}{0.395454 + 0.001764 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)} \quad (V-8)$$

Donde:

- H altura de ola, en m
- L_0 longitud de ola en aguas profundas, en m
- D_{50} diámetro 50 del sedimento, en mm

En la Figura V-14 se muestran las curvas de ajuste a los datos obtenidos de porcentaje de erosión contra Índice de Esbeltez. Se observa que la erosión presenta un comportamiento muy parecido en todos los casos modelados con régimen medio, variando un poco entre

las cantidades de cada perfil. El volumen de erosión en la duna va desde el 3% en el perfil menos erosionado, aumentando proporcionalmente de acuerdo a la intensidad de las condiciones de oleaje, hasta el 22% en el perfil más erosionado. En las gráficas de perfil inicial y final, se aprecia equilibrio entre el volumen erosionado y el volumen depositado en todos los perfiles (Anexo 1). La máxima erosión la presentó el perfil de playa con la duna menos esbelta, playa El Raudal; mientras que la mínima erosión la presentó el perfil de playa Lechuguillas, que no es precisamente la duna más esbelta. La duna más esbelta es la del perfil de playa Navarro, la cual ocupa el segundo lugar en máxima erosión.

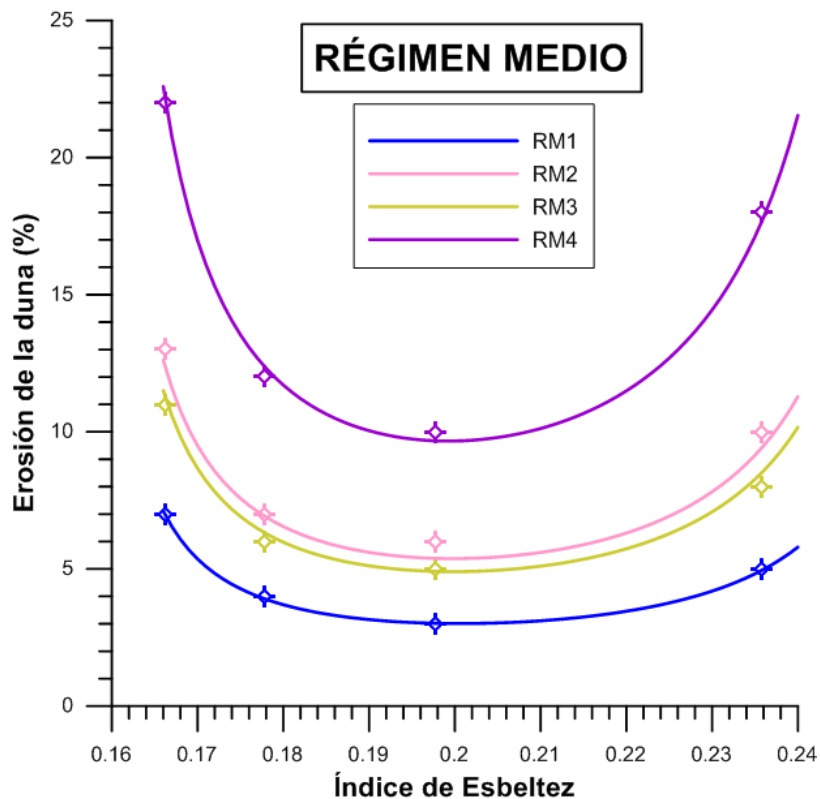


Figura V-14. Ajuste de la erosión de la duna contra el Índice de Esbeltez

Lo más relevante de la Figura V-14, donde los casos de régimen medio presentan un comportamiento parecido a una parábola, es que se puede apreciar un intervalo del índice de esbeltez de las dunas donde la erosión es la mínima. Se puede decir, entonces, que para que una duna sea más capaz de mitigar la erosión provocada en condiciones de

oleaje de régimen medio debe tener un índice de esbeltez de entre 0.19 a 0.21, lo que se traduce en que el ancho de la duna debe ser cinco veces mayor que la altura.

V.5.1.2 Desplazamiento horizontal de la línea de costa

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos del desplazamiento horizontal de la línea de costa entre los casos de régimen medio y para cada perfil. En la Tabla V-5 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-15.

Tabla V-5. Resumen de los datos obtenidos para el desplazamiento horizontal de la línea de costa

Perfil	IE	RM1	RM2	RM3	RM4
El Raudal	0.1663	-2.38	-3.07	-2.61	-3.55
Navarro	0.1778	-1.81	-2.28	-1.97	-2.67
Lechuguillas	0.1978	-1.65	-2.12	-1.81	-2.50
Paraíso	0.2358	-2.40	-2.89	-2.53	-3.23

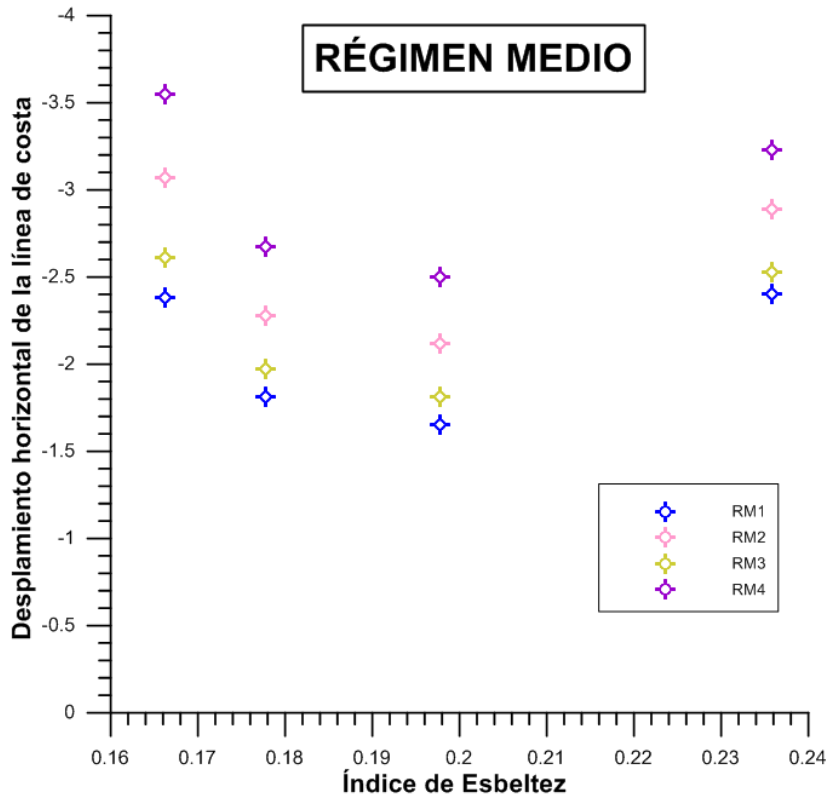


Figura V-15. Resultados del desplazamiento horizontal de la línea de costa contra Índice de Esbeltez

De igual forma que en la erosión de duna, se nota una tendencia que depende del Índice de Esbeltez. El mejor ajuste fue nuevamente la ecuación de Steinhart-Hart, con diferentes parámetros.

$$D_H = \frac{1}{A + B \ln(IE) + C (\ln(IE))^3} \quad (V-9)$$

$$A = -1.893 + 0.074 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) - 0.000123 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^2 + 0.000000054 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^3 \quad (V-10)$$

$$B = -1.857 + 0.072 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) - 0.00012 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^2 + 0.000000052 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^3 \quad (V-11)$$

$$C = 0.222 - 0.009 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) + 0.000015 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^2 - 0.000000065 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^3 \quad (V-12)$$

Donde:

H altura de ola, en m

L_0 longitud de ola en aguas profundas, en m

D_{50} diámetro 50 del sedimento, en *mm*

De la Figura V-16 se observa que el desplazamiento horizontal de la línea de costa presenta un comportamiento muy parecido en todos los casos modelados, variando poco en cada perfil. El desplazamiento horizontal de la línea de costa siempre es negativo, es decir, siempre se pierde playa seca. El desplazamiento horizontal, al igual que el porcentaje de erosión, aumenta proporcionalmente a la intensidad del oleaje, que a la vez está regida por el aumento del periodo de ola en las modelaciones. En otras palabras, ambos enfoques de erosión son proporcionales ya que el perfil que más playa seca pierde, es el que mayor profundidad tendrá, y viceversa.

La pérdida de playa seca va desde 1.65 en el perfil menos erosionado, hasta 3.55 en el perfil más erosionado. El mayor desplazamiento, o máxima erosión, sigue presentándose en el perfil de playa El Raudal, mientras que la menor erosión se mantiene en el perfil de playa Lechuguillas, conservando el Índice de Esbeltez óptimo.

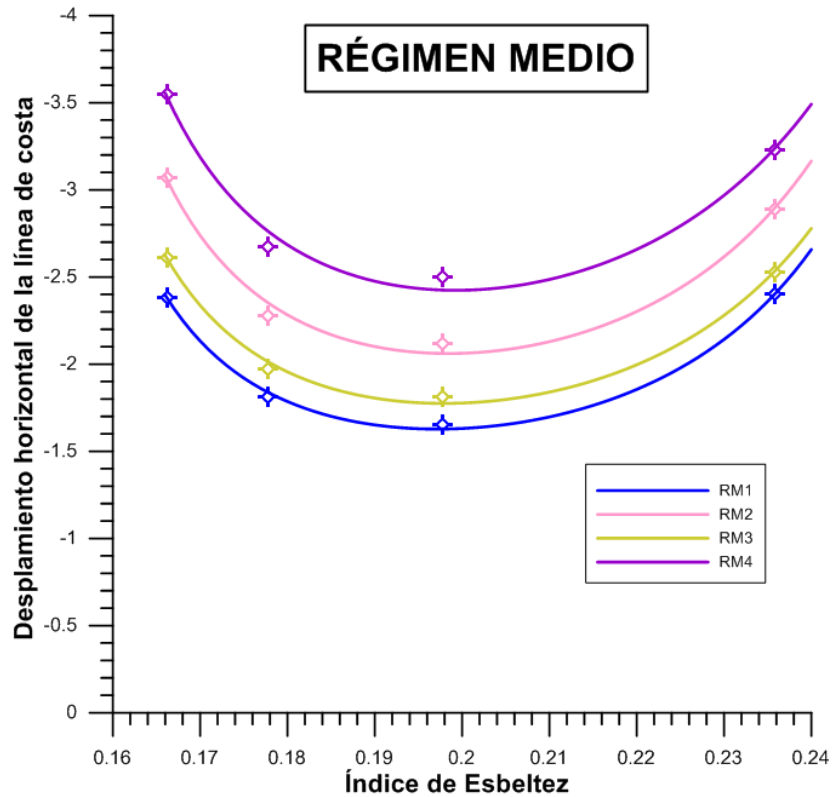


Figura V-16. Ajuste del desplazamiento horizontal de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez

V.5.1.3 Desplazamiento Vertical de la línea de costa

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos del desplazamiento vertical de la línea de costa entre los casos de régimen medio y para cada perfil. En la Tabla V-6 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-17.

Tabla V-6. Resumen de los datos obtenidos para el desplazamiento vertical de la línea de costa

Perfil	IE	RM1	RM2	RM3	RM4
El Raudal	0.1663	0.70	0.73	0.82	0.96
Navarro	0.1778	0.77	0.78	0.89	1.03
Lechuguillas	0.1978	0.78	0.79	0.91	1.06
Paraíso	0.2358	0.58	0.57	0.65	0.72

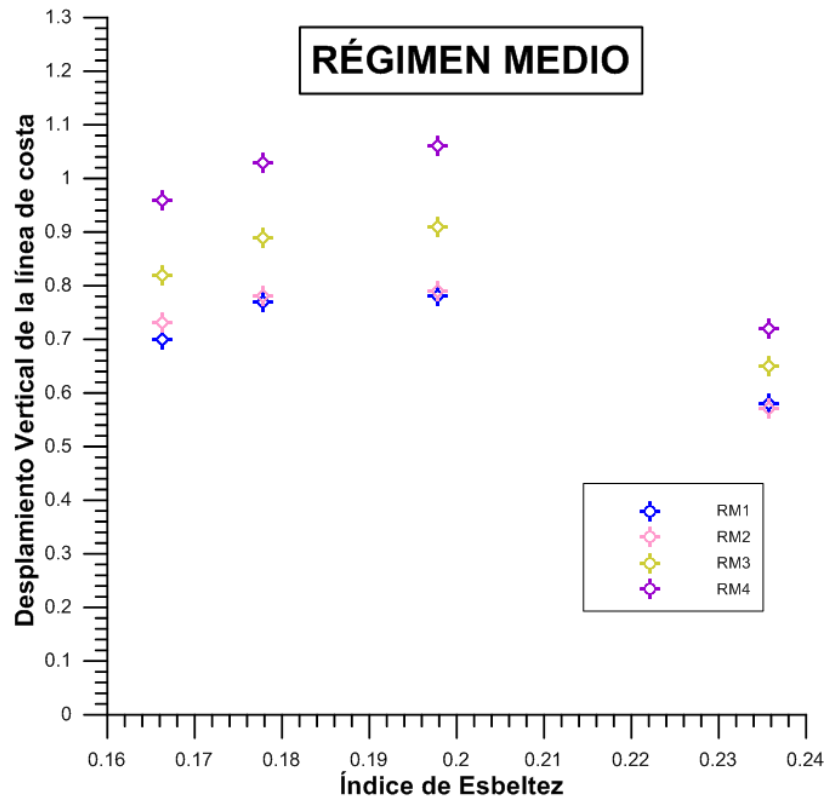


Figura V-17. Resultados del desplazamiento vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez

De la misma forma que los casos anteriores, se nota una tendencia que depende del Índice de Esbeltez. El mejor ajuste fue ahora una regresión racional, descrita por la siguiente ecuación.

$$D_v = \frac{a + b(IE)}{1 + c(IE) + d(IE)^2} \quad (V-13)$$

Los coeficientes a , b , c y d , fueron ajustados por dos métodos diferentes, pero siempre en función de las condiciones modeladas. Los coeficientes a y b fueron ajustados con una regresión de tipo racional, mientras que los coeficientes c y d fueron ajustados con una regresión tipo sinusoidal.

$$a = \frac{-0.1856434814 + 0.0005123112 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)}{1 + 0.0000269715 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) + 0.000000606606 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^2} \quad (V-14)$$

$$b = \frac{0.9979167713 - 0.0015888504 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)}{1 - 0.0013065675 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) + 0.000001420507 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right)^2} \quad (V-15)$$

$$c = -9.13384188 + 0.97220068 * \cos \left(0.00368213 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) + 2.30238942 \right) \quad (V-16)$$

$$d = 25.7123664 + 5.84926166 * \cos \left(0.00263123 \left(\frac{HL_o}{D_{50}^2} \right) + 0.17539004 \right) \quad (V-17)$$

Donde:

H altura de ola, en m

L_0 longitud de ola en aguas profundas, en m

D_{50} diámetro 50 del sedimento, en mm

Las curvas de ajuste se muestran en la Figura V-18. Como se esperaba, el desplazamiento es positivo, ya que en régimen medio siempre se presentó pérdida de playa seca en todos los casos.

La erosión por desplazamiento vertical no es proporcional a los casos anteriores de erosión. Una peculiaridad de esta gráfica es el caso RM2, quien no sigue esa proporción de erosiones. De haber seguido esa proporción, debió tener mayor erosión que el caso RM3, en cambio mostró un comportamiento casi igual que el caso RM1.

La profundidad provocada va desde 0.58 en el perfil menos erosionado, hasta 1.06 en el perfil más erosionado. La menor erosión la presenta ahora el perfil con la duna más esbelta, playa Navarro, teniendo una notable ventaja contra los demás perfiles en la disipación de este tipo de erosión y dificultando así el poder definir un intervalo óptimo del índice de esbeltez para la mitigación de este enfoque de erosión.

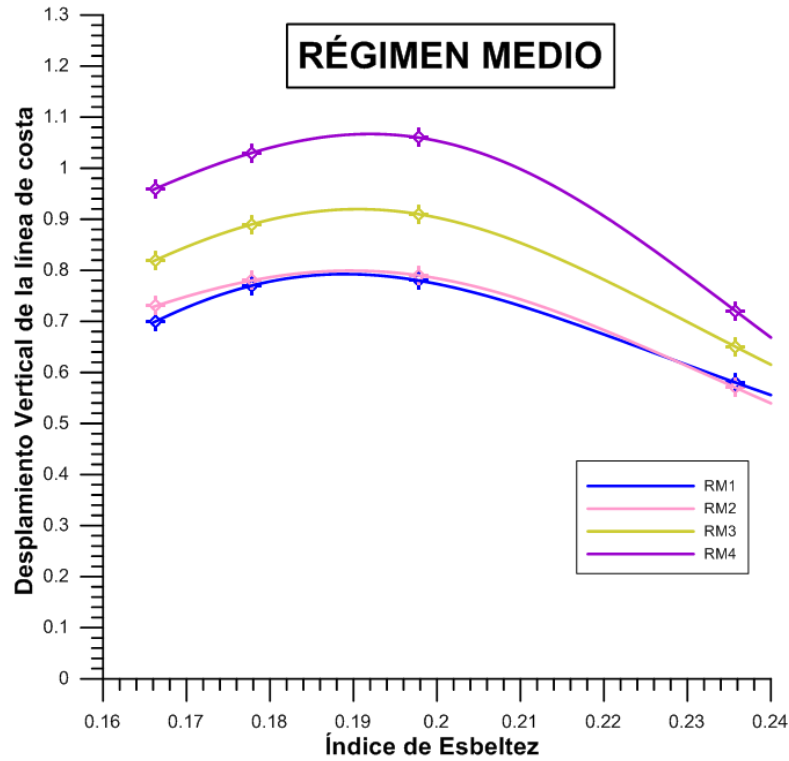


Figura V-18. Ajuste del desplazamiento vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez

V.5.2 Régimen Extremal e Insólito

Los casos de régimen extremal se modelaron bajo condiciones de oleaje con tormenta.

Tabla V-7. Condiciones de modelación para Régimen Extremal e Insólito

Régimen	Caso	Condiciones de oleaje			
		H [m]	T [s]	z_s [m]	d [h]
Extremal	RE1	2.0	6	0.5	20
	RE2	2.0	8	0.5	20
	RE3	5.0	8	1.0	12
	RE4	5.0	10	2.0	7
	RE5	10.0	10	2.0	3
	RE6	10.0	12	2.0	3
Insólito	RI1	13.0	12	2.0	3

A continuación se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para el caso de playa Lechuguillas bajo condiciones de régimen extremal e insólito, donde se compara el perfil inicial (línea negra) con el perfil final (línea azul). En las Figuras V-19, V-21, V-23, V-25, V-27, V-29 y V-31 se indica el volumen erosionado de la duna (rojo), mientras que en las Figuras V-20, V-22, V-24, V-26, V-28, V-30 y V-32 se indica el recorrido, horizontal (línea roja) y vertical (línea verde) de la línea de costa.

En ellas se puede observar que no siempre hay equilibrio entre la cantidad de sedimento erosionado y el sedimento depositado. Es importante recordar que para resumir los resultados sólo se muestran los resultados del perfil de Playa Lechuguillas. Los demás perfiles se encuentran en el Anexo 1.

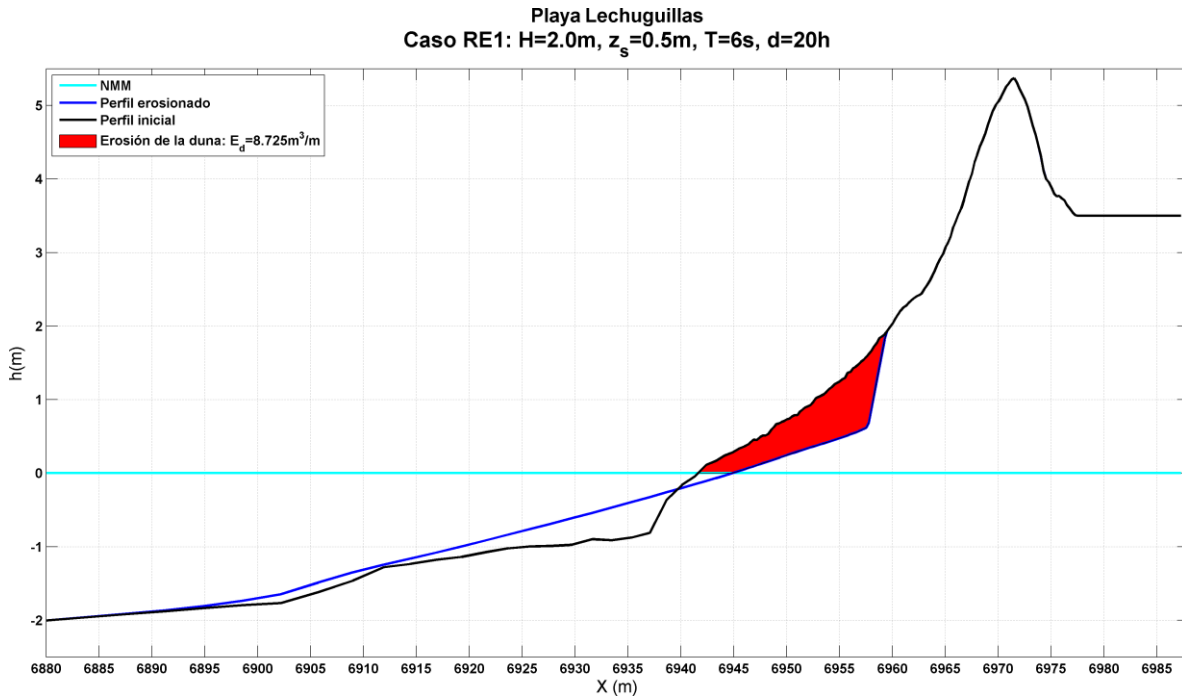


Figura V-19. Caso RE1. Erosión de duna

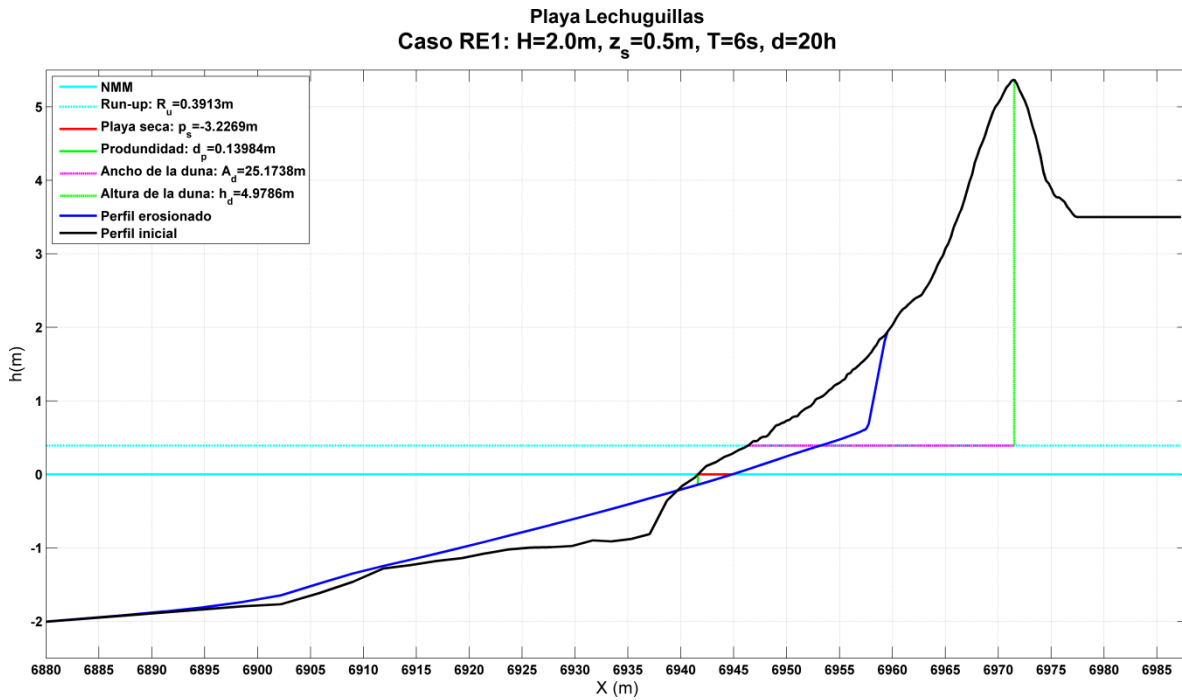


Figura V-20. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa

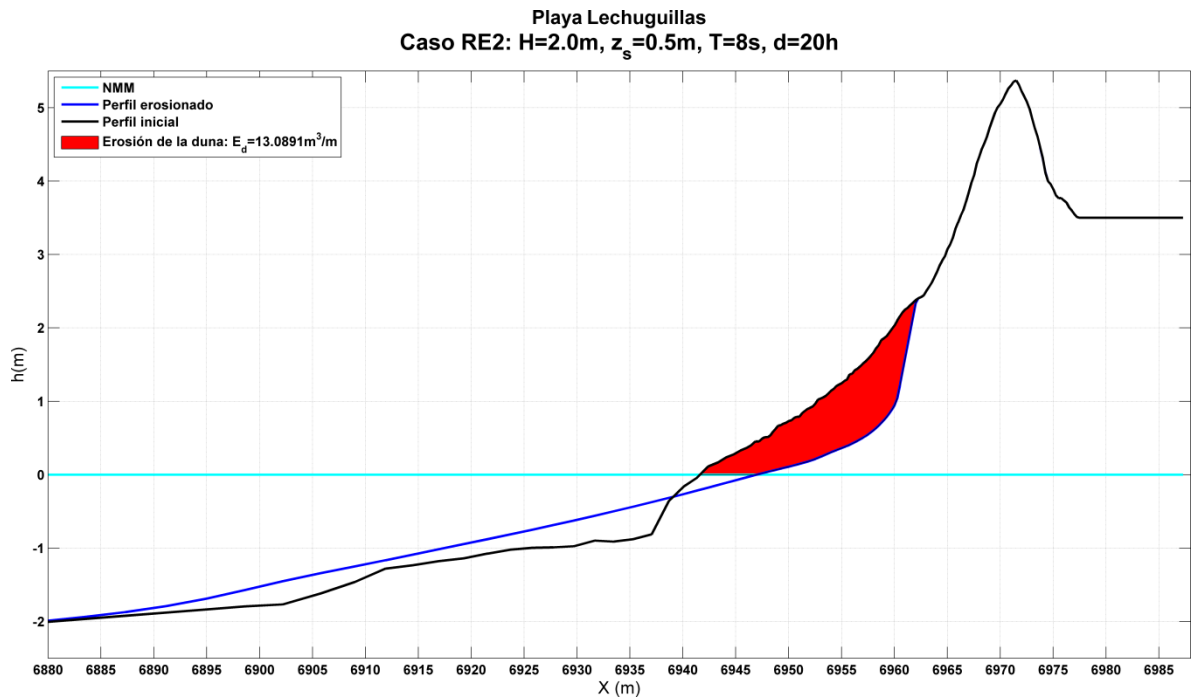


Figura V-21. Caso RE2. Erosión de la duna

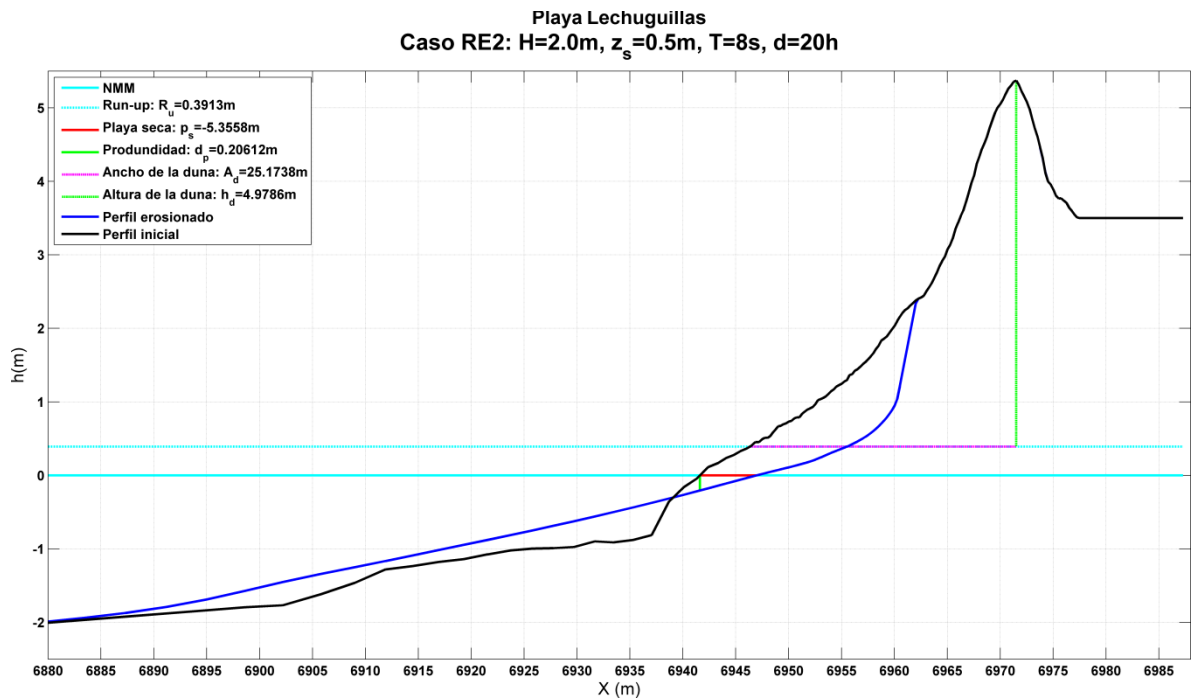


Figura V-22. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa

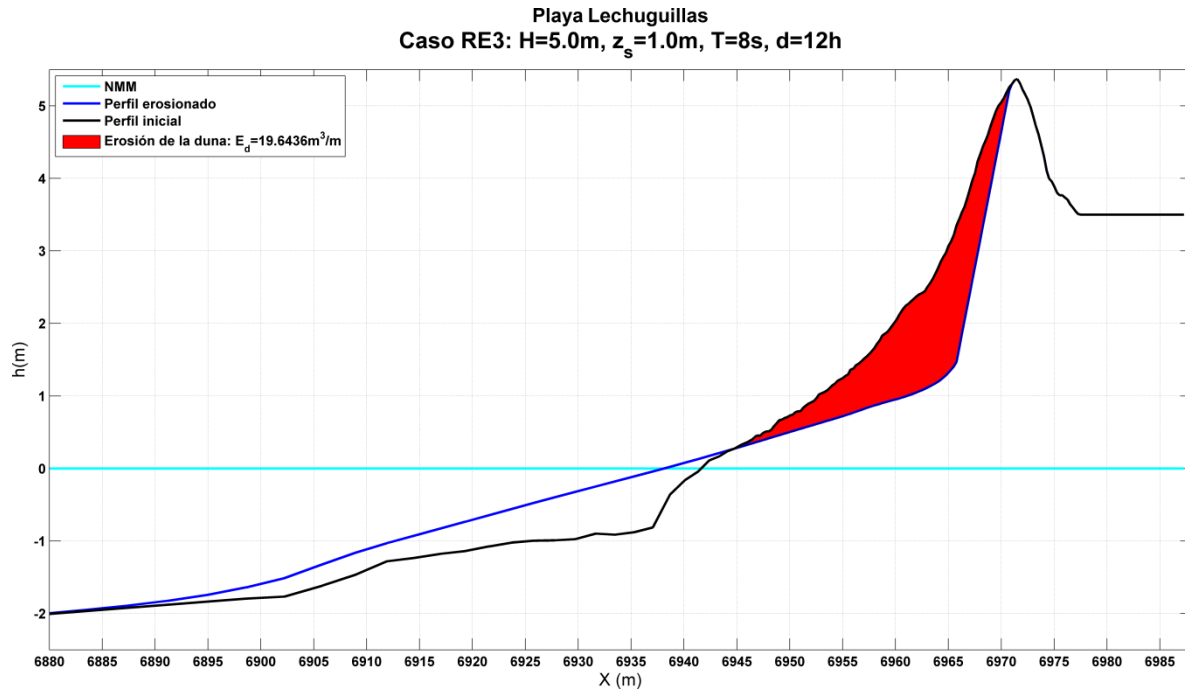


Figura V-23. Caso RE3. Erosión de la duna

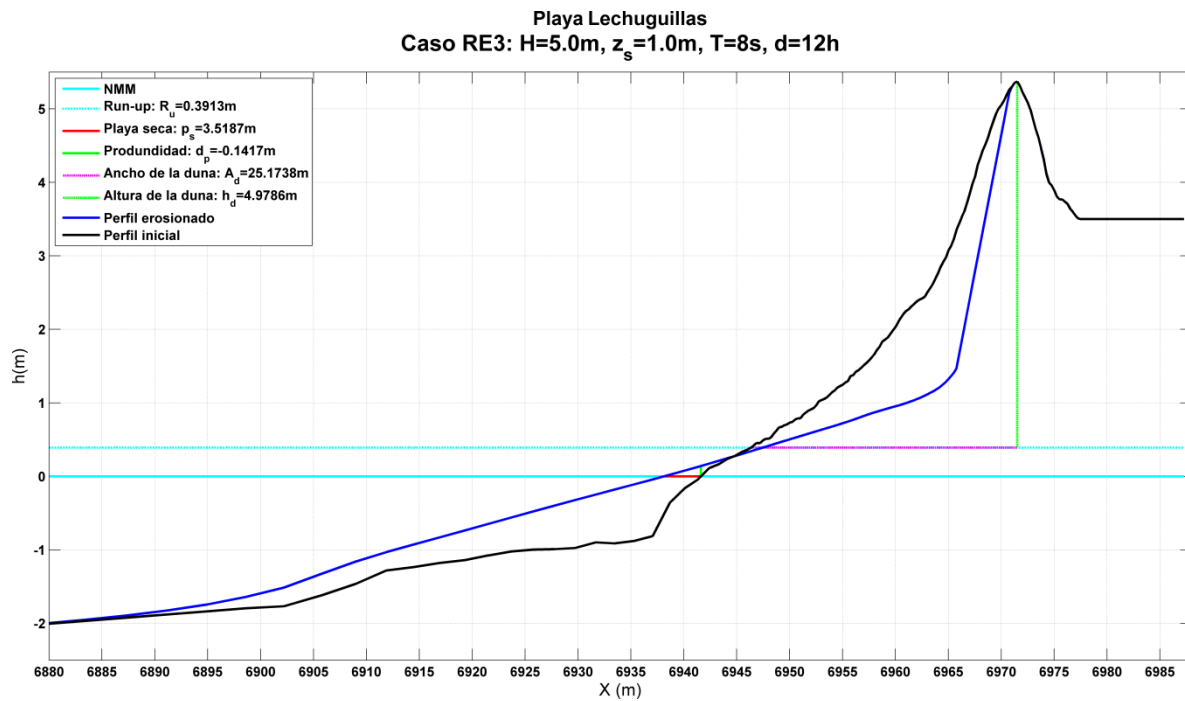


Figura V-24. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa

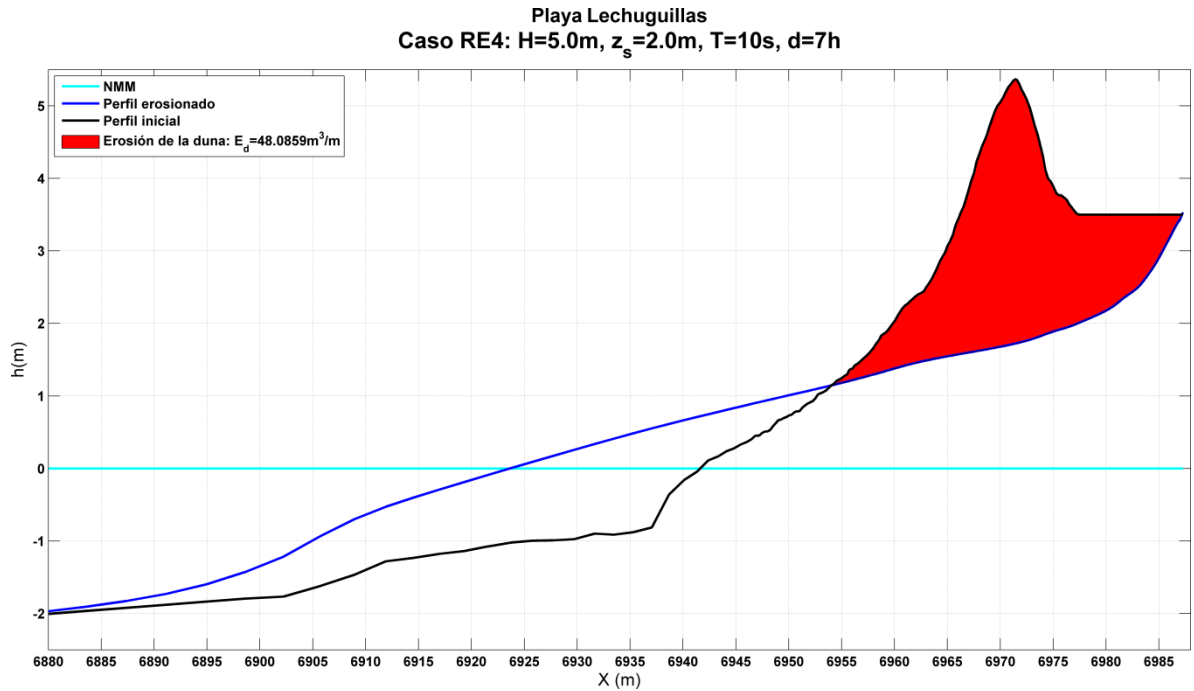


Figura V-25. Caso RE4. Erosión de la duna

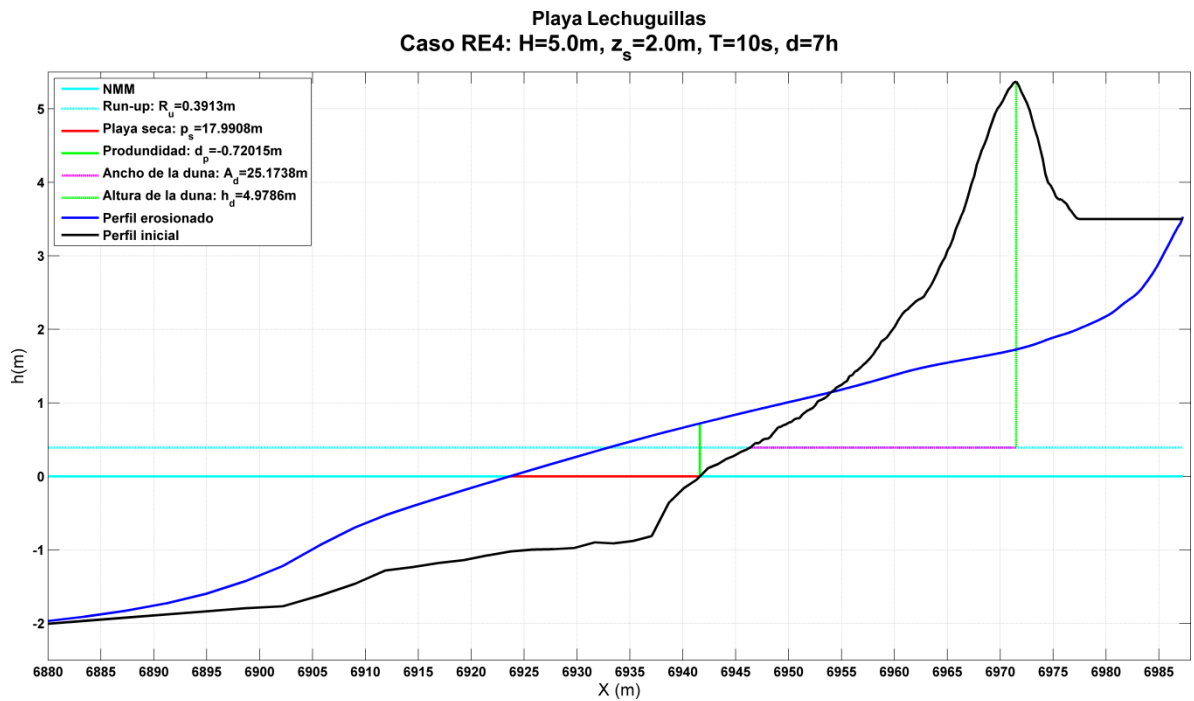


Figura V-26. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa

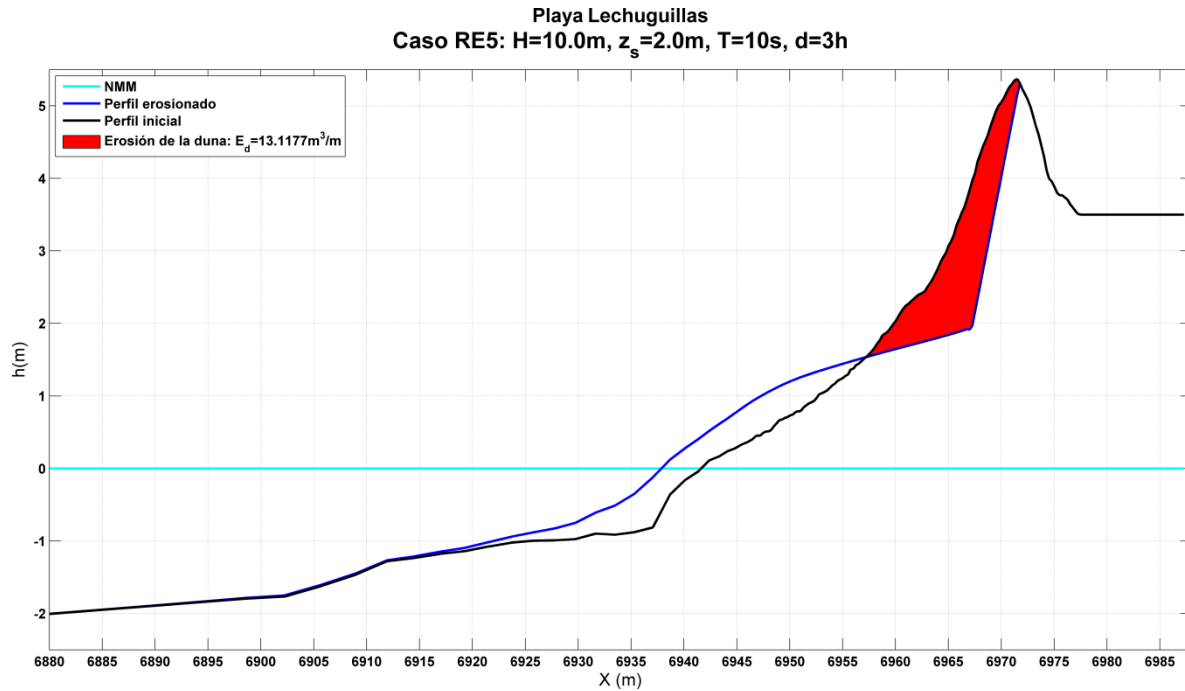


Figura V-27. Caso RE5. Erosión de la duna

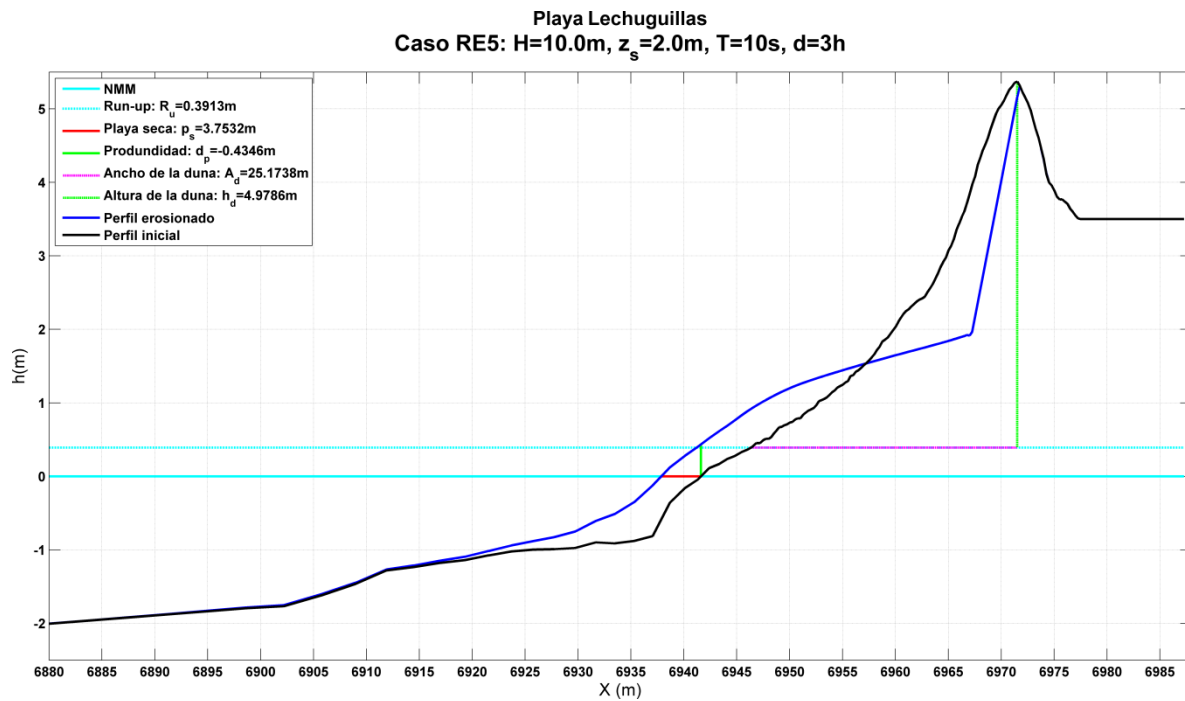


Figura V-28. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa

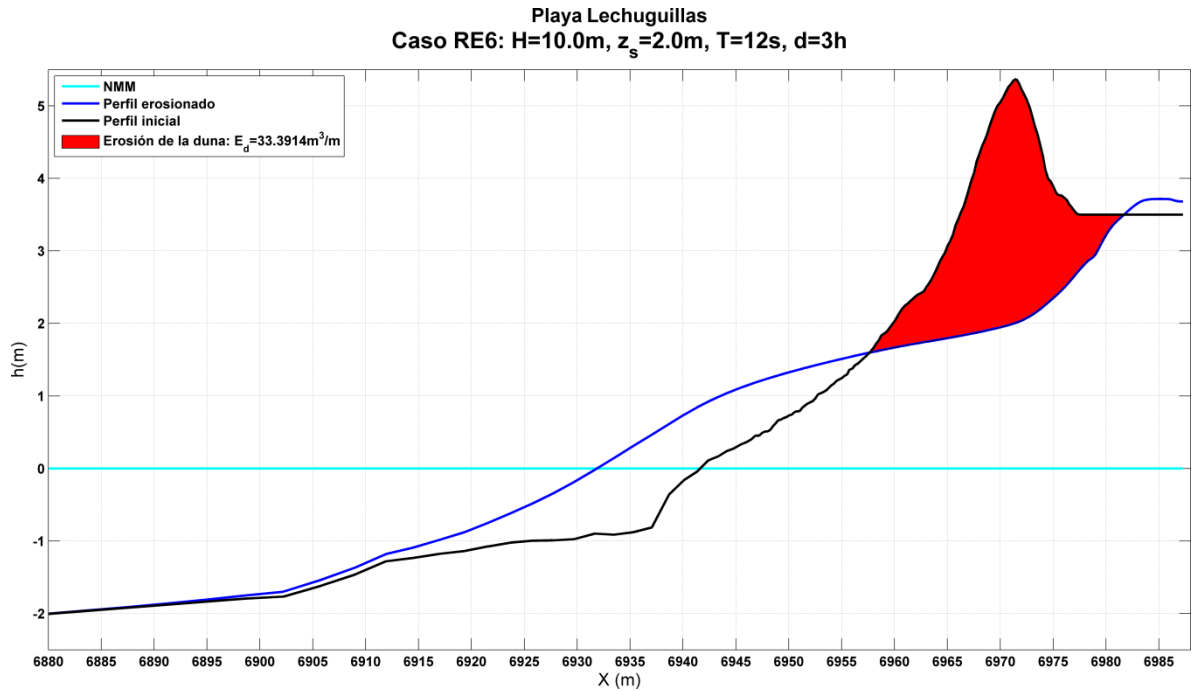


Figura V-29. Caso RE6. Erosión de la duna

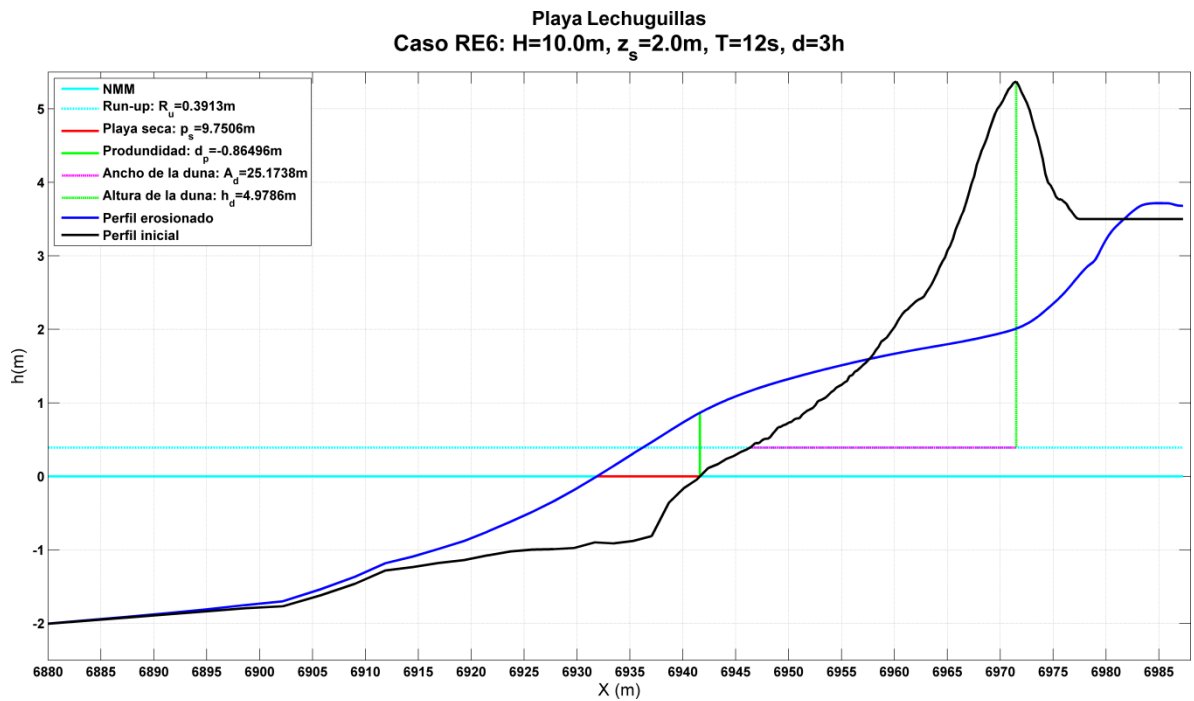


Figura V-30. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa

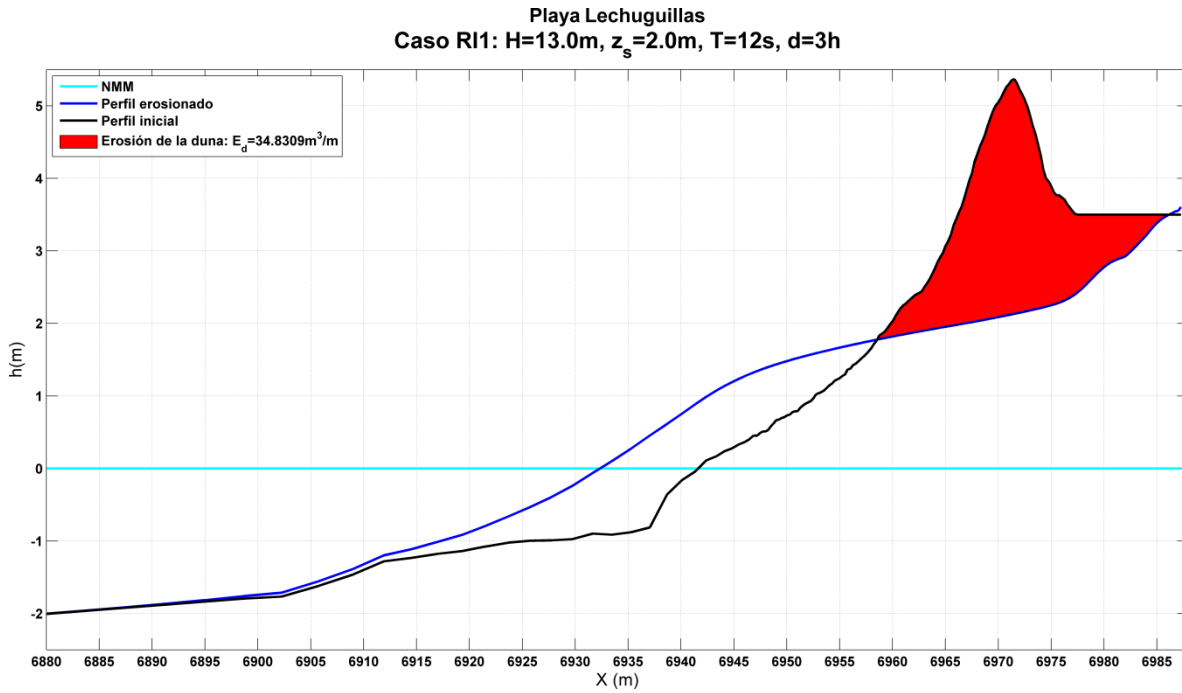


Figura V-31. Caso RI1. Erosión de la duna

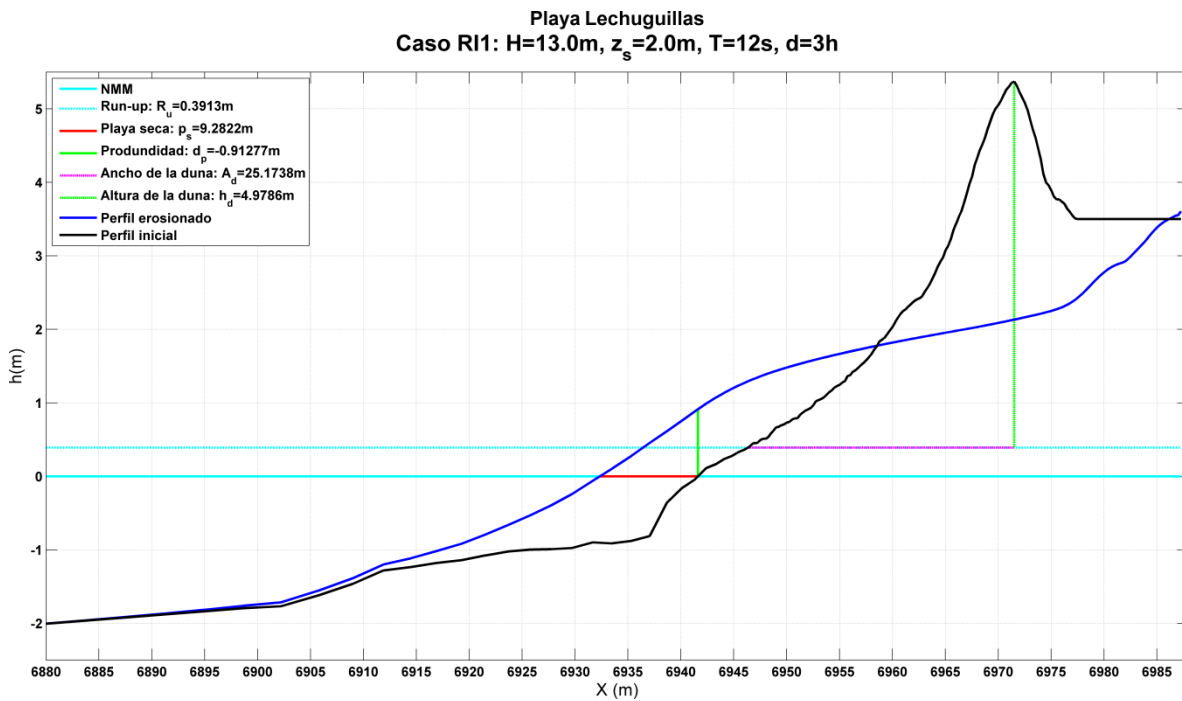


Figura V-32. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa

La Tabla V-8 muestra un resumen de los resultados de los casos modelados en régimen extremal e insólito del perfil de playa Lechuguillas.

Tabla V-8. Resumen de los resultados modelados con Régimen Extremal e Insólito

Caso	E_d [m ³ /m]	E_d [%]	P_s [m]	D_p [m]
RE1	8.73	7	-3.23	0.14
RE2	13.09	11	-5.36	0.21
RE3	19.64	17	3.52	-0.14
RE4	48.09	41	17.99	-0.72
RE5	13.12	11	3.75	-0.43
RE6	33.39	29	9.75	-0.86
RI1	34.83	30	9.28	-0.91

De los resultados presentados en la Tabla V-8 se puede comparar la intensidad erosiva de los casos modelados. En cuanto al recorrido horizontal de la playa se observa que en los casos RE1 y RE2, se pierde playa seca, mientras que en los demás casos se gana. El perfil de playa el Raudal es un caso extraño, porque es el único que no muestra el mismo comportamiento que los demás perfiles; ya que el único caso de régimen extremal que gana playa seca es el caso RE3, en los demás casos toda la duna resulta erosionada y se pierde playa seca. Esto puede ser porque es la duna con menor volumen inicial. Ver otros resultados en el Anexo 1.

El perfil de playa Lechuguillas también presentó un comportamiento inesperado, ya que los casos RE2 y RE5 provocan casi la misma erosión a pesar las grandes diferencias en sus parámetros de oleaje. Los demás perfiles sí tienen diferencias notables entre ambos casos.

Estos casos tampoco están en orden de intensidad erosiva, ya que se observa que el caso RE4 es el más erosivo, incluso más que el caso de régimen insólito RI1. Esto se debe a que, a pesar de que hay casos con mayor altura y mayor periodo que el RE4, éste supera a todos ellos en duración. Con esto se puede concluir que el parámetro más sensible de

las modelaciones de los casos extremales e insólitos es la duración, sólo superado por el parámetro de marea de tormenta, ya que como anteriormente se mencionó, es el principal responsable de la erosión de dunas (Vellinga 1986).

Ahora se analizarán los resultados de cada caso modelado de acuerdo con cada tipo de erosión y comparando contra el índice de esbeltez de los cuatro perfiles.

V.5.2.1 Erosión de la duna

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos en el enfoque de porcentaje de erosión de la duna entre todos los casos de régimen extremal e insólito para cada perfil. En la Tabla V-9 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-33.

Tabla V-9. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna

Perfil	IE	RE1	RE2	RE3	RE4	RE5	RE6	RI1
El Raudal	0.1663	16	24	50	64	30	54	60
Navarro	0.1778	9	13	20	44	21	33	31
Lechuguillas	0.1978	7	11	17	41	11	29	30
Paraíso	0.2358	12	18	26	45	22	39	37

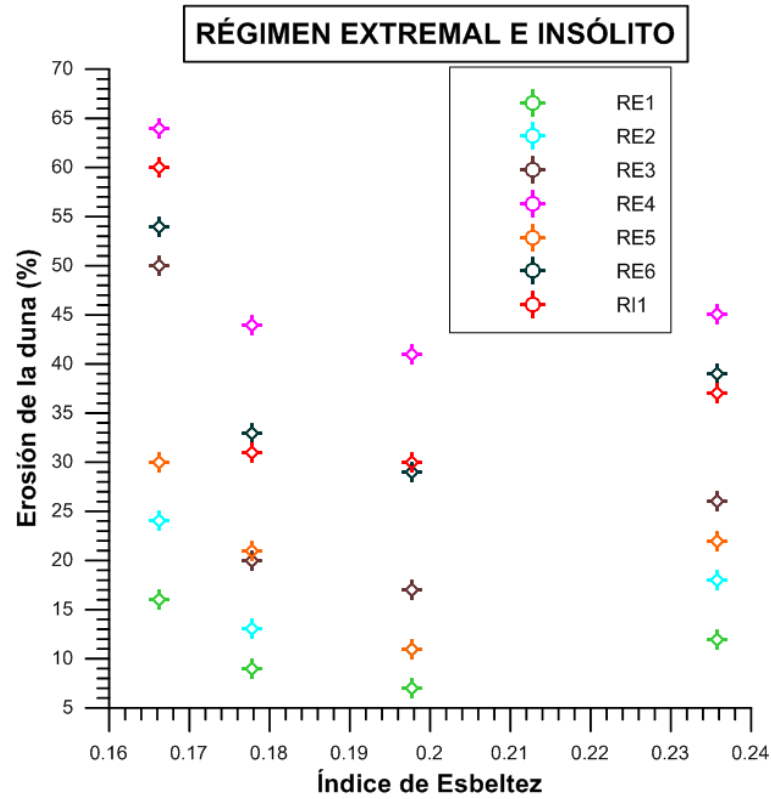


Figura V-33. Resultados de la Erosión contra el Índice de esbeltez

Al graficar los resultados de cada caso modelado en régimen extremal e insólito, no se nota que los casos compartan alguna tendencia entre ellos. Por tal motivo, es imposible obtener una curva que ajuste a todos los casos y queda fuera de los alcances del presente estudio la determinación de una ecuación que describa el comportamiento de los resultados obtenidos. Para suplir eso y poder comparar el comportamiento de los diferentes perfiles en cada caso modelado, se trazó un ajuste suavizado para cada caso. Cabe mencionar que este tipo de graficas suavizadas es imposible describirlas con una ecuación.

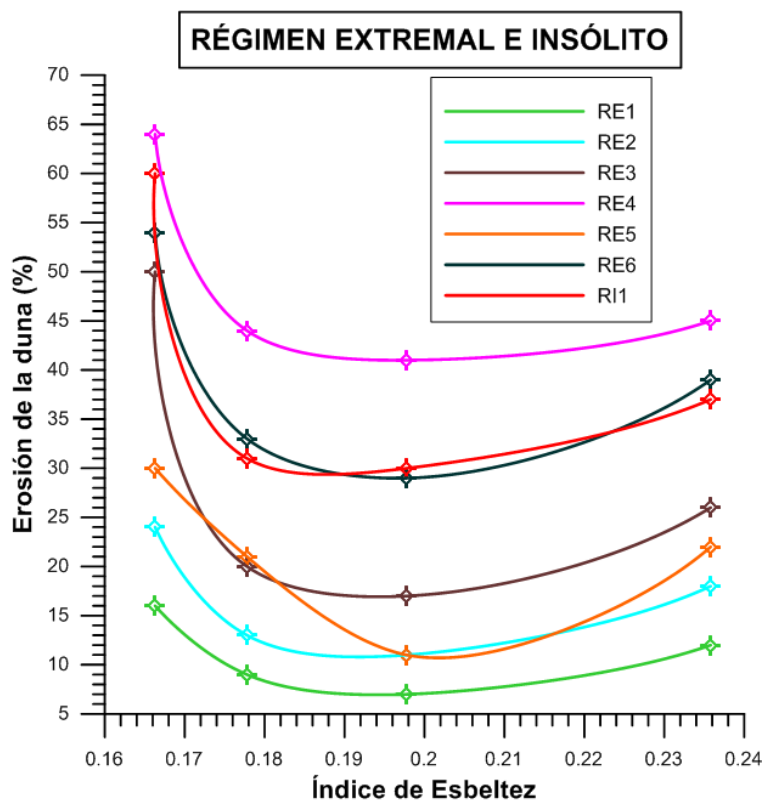


Figura V-34. Ajuste de la Erosión de la duna contra el Índice de Esbeltez

En el caso de régimen extremal, ya no son tan parecidos todos los casos entre sí, pero la tendencia general es notoria, a excepción del caso RE5 que muestra un comportamiento diferente a los demás. Los casos RE1 y RE2, que corresponden a tormentas muy pequeñas, muestran comportamiento muy parecido al de régimen medio, el caso RE1 incluso menos erosivo que el RM4. Los casos RE3, RE4, RE6 y RI1, varían con respecto al comportamiento de régimen medio, pero mantienen casi la misma tendencia entre ellos.

El volumen de erosión en la duna va desde el 7% en el perfil menos erosionado, hasta el 64% en el perfil más erosionado. A diferencia que en régimen medio, no presenta un aumento proporcional con respecto a la intensidad de las condiciones de oleaje. En las gráficas de perfil inicial y final, sólo se aprecia equilibrio entre el volumen erosionado y el volumen depositado en los casos RE1 y RE2; en los demás casos no siempre hay balance, en algunos se aprecia mayor volumen erosionado que el depositado (Anexo 1).

Se recomienda analizar los criterios que toma el software, como línea futura de investigación, para comprender qué pasa con el sedimento perdido, ya que en primera instancia se suponía tener equilibrio en todos los casos.

En general, todos los casos mantienen el intervalo óptimo de índice de esbeltez, sólo que en algunos casos se recorre un poco. Por ejemplo, el en caso RI1 disminuye un poco y ahora será de 0.18 a 0.19, y en el caso RE5 aumenta y ahora será de 0.20 a 0.21.

V.5.2.2 Desplazamiento horizontal de la línea de costa

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos en el enfoque de porcentaje de erosión de la duna entre todos los casos de régimen extremal e insólito para cada perfil. En la Tabla V-10 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-35.

Tabla V-10. Resumen de los datos obtenidos para la Erosión de la duna

Perfil	IE	RE1	RE2	RE3	RE4	RE5	RE6	RI1
El Raudal	0.1663	-0.79	-1.31	1.23	-3.05	-0.37	-1.82	-2.46
Navarro	0.1778	-0.68	-1.1	0.82	2.14	0.92	1.41	0.69
Lechuguillas	0.1978	-0.66	-1.1	0.72	3.69	0.77	2	1.9
Paraíso	0.2358	-0.24	-0.64	2.44	6.29	3	5.12	4.93

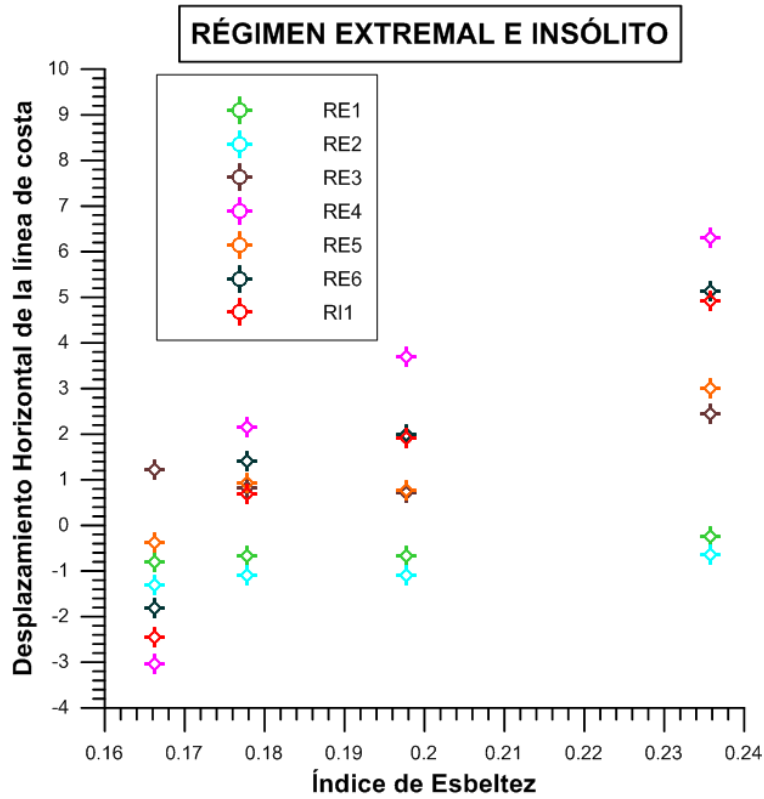


Figura V-35. Resultados de Desplazamiento horizontal de la línea de costa contra Índice de Esbeltez

Al igual que en el enfoque anterior de erosión, no se nota que los casos modelados en régimen extremal e insólito compartan alguna tendencia entre ellos, y también queda fuera de los alcances del presente estudio; nuevamente se trazará una curva suavizada con el fin de comparar los perfiles.

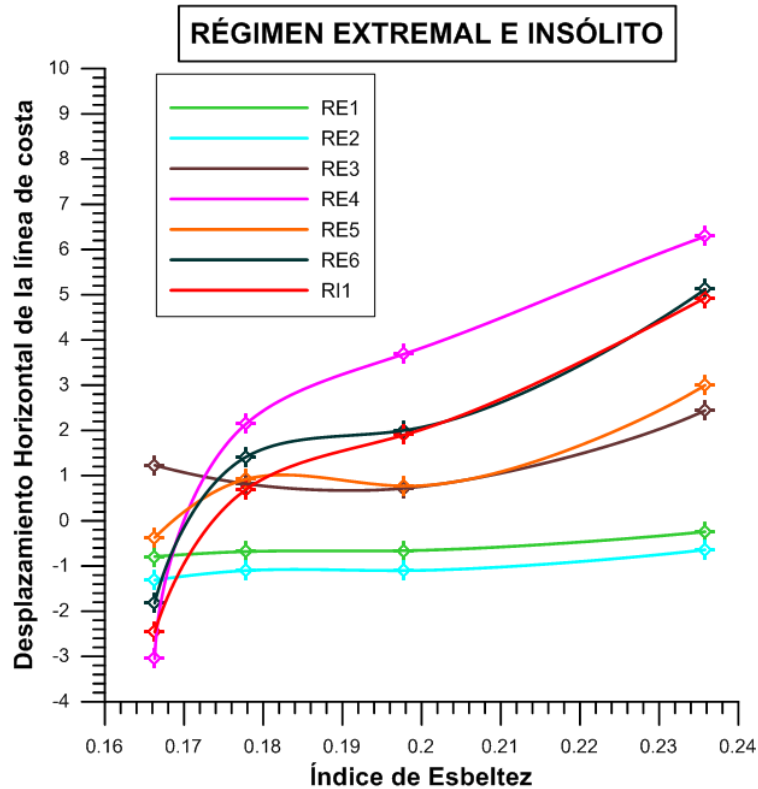


Figura V-36. Ajuste del Desplazamiento Horizontal contra el Índice de Esbeltez

Con esta gráfica se confirma que en régimen extremal los escenarios estudiados se comportan diferente unos de otros, es decir, no siempre se sigue un comportamiento similar y se dificulta poder definir un intervalo, e incluso un valor, de índice óptimo de esbeltez. El desplazamiento horizontal de la línea de costa no siempre es negativo, en algunos casos se gana playa seca y en otros se pierde. La pérdida de playa seca va desde 0.24 en el perfil menos erosionado, hasta 3.05 en el perfil más erosionado; mientras que la ganancia de playa seca va desde 0.69 hasta 6.29.

El caso RE5 sigue comportándose muy diferente a todos los demás, los casos RE1 y RE2 mantienen el mismo comportamiento erosivo que los casos de régimen medio pero en menor grado. El caso RE3 es interesante, ya que bajo esta modelación todos los perfiles ganaron playa seca, teniendo más ganancia la duna más esbelta, la de playa Paraíso. Los casos RE4, RE6 y RI1 se comparten de forma similar entre sí, perdiendo playa seca en el perfil menos esbelto, playa El raudal, pero ganando playa seca en los demás perfiles.

V.5.2.3 Desplazamiento vertical de la línea de costa

A continuación se realizará una comparación de los resultados obtenidos en el enfoque de porcentaje de erosión de la duna entre todos los casos de régimen extremal e insólito para cada perfil. En la Tabla V-11 se muestra el resumen de los datos obtenidos y su representación gráfica en la Figura V-37.

Tabla V-11. Resumen de los datos obtenidos para el Desplazamiento Vertical

Perfil	IE	RE1	RE2	RE3	RE4	RE5	RE6	RI1
El Raudal	0.1663	0.27	0.4	-0.32	0.9	0.2	0.67	0.78
Navarro	0.1778	0.33	0.48	-0.44	-1.04	-1.32	-1.19	-0.58
Lechuguillas	0.1978	0.36	0.53	-0.36	-1.84	-1.11	-2.21	-2.33
Paraíso	0.2358	0.07	0.16	-0.6	-1.54	-2.06	-2.27	-2.42

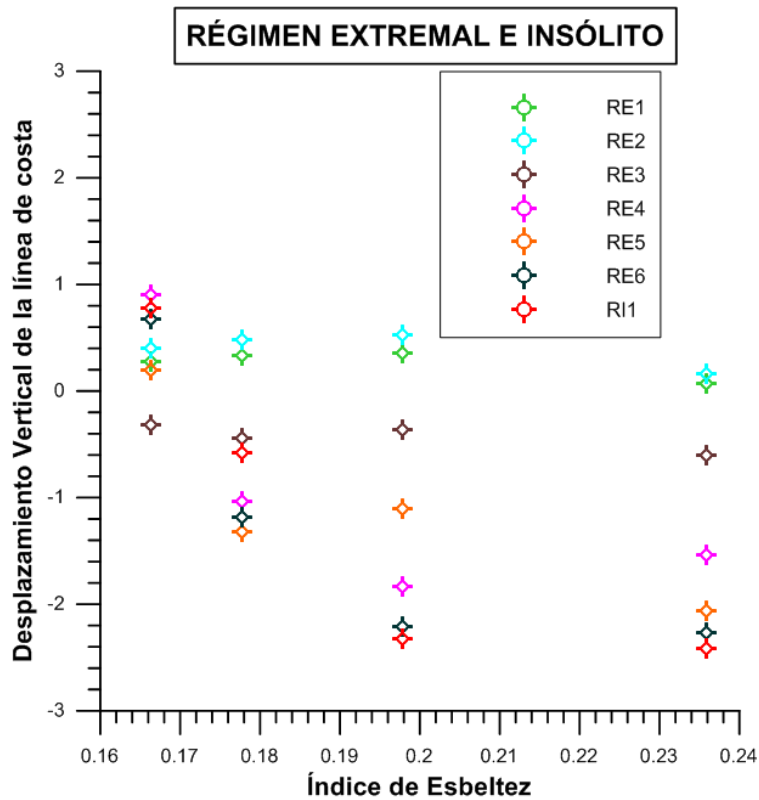


Figura V-37. Resultados de Desplazamiento Vertical de la línea de costa contra Índice de Esbeltez

Al igual que los enfoques anteriores de erosión, en el desplazamiento vertical de la línea de costa modelado con régimen medio e insólito no hay comportamientos similares entre los casos y no se puede obtener una ecuación que describa el comportamiento general. Por ende, nuevamente se trazará una curva suavizada con el fin de comparar los perfiles.

En la Figura V-38 se confirma que los casos RE1 y RE2 se comportan casi igual que los casos de régimen medio, e incluso conservando la misma proporción entre pérdida de playa seca y profundidad. Los demás casos muestran comportamientos similares entre la pérdida de playa seca, pero no proporción, y al igual que en la erosión por pérdida de playa seca en régimen extremal, resulta difícil poder definir un valor o intervalo de índice de esbeltez óptimo para la mitigación de la erosión por profundidad. Las profundidades van desde 0.69 en el perfil menos erosionado, hasta 6.29 en el perfil más erosionado; mientras que las alturas van desde 0.36 en el perfil menos erosionado, hasta 2.42 en el perfil más erosionado.

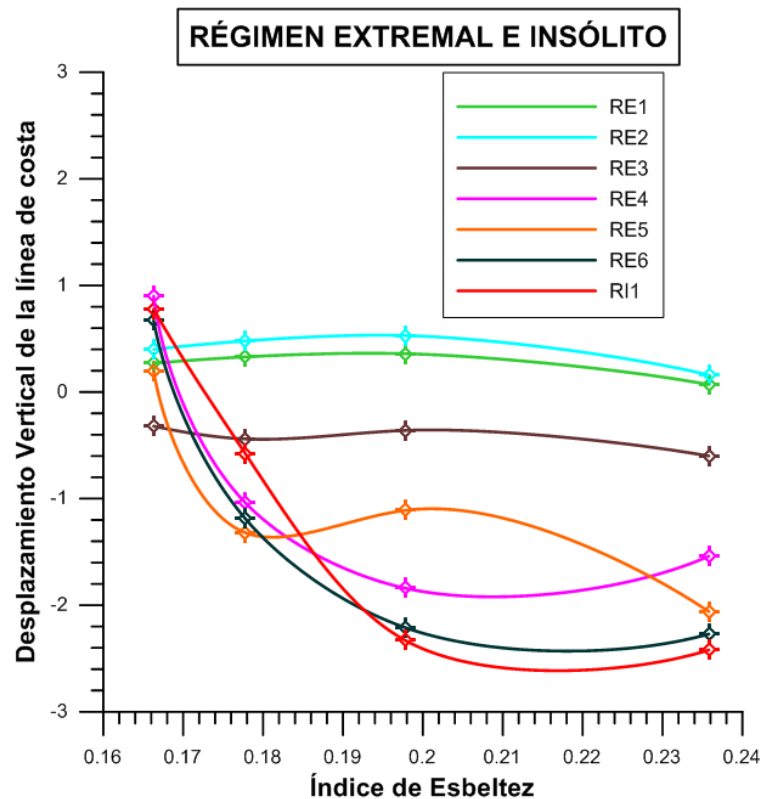


Figura V-38. Ajuste del Desplazamiento Vertical de la línea de costa contra el Índice de Esbeltez

Capítulo VI:

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VI.1 Discusión

El modelado numérico para la realización de esta tesis permitió obtener como resultados los perfiles de playa finales ocasionados por la morfodinámica ante diversos estados de mar, divididos en régimen medio (sin tormenta) y régimen extremal (con tormenta). Con lo cual se puede obtener la posición del pie de la duna para eventos de baja energía y analizar la erosión de la duna en caso de eventos extremos.

La modelación de once casos con las posibles combinaciones de estados de mar, cada uno en cuatro perfiles diferentes, hizo posible la comparación del efecto que tiene la morfología de la duna en la estabilidad de la playa, además de poder jerarquizar los parámetros más influyentes que determinan la intensidad erosiva de una tormenta. Un orden jerárquico propuesto para los parámetros de olaje que provocan erosión, es: marea de tormenta, duración, periodo, altura de ola. Pero también es importante señalar que la altura de ola, a pesar de que parece ser el parámetro con menor influencia en la erosión, es el más importante, ya que gracias a su facilidad de obtención, los demás parámetros están en función de éste.

Un aspecto muy importante de los resultados obtenidos en los diferentes enfoques de erosión es que son congruentes entre sí. Esto quiere decir que los enfoques de erosión van ligados unos con otros; por ejemplo, el caso donde menos se erosiona la duna, es el que menor desplazamiento de la línea de costa presenta. También se observa en los

resultados que las dunas están cumpliendo correctamente con su papel al aportar sedimento a la playa para que ésta pueda disipar la energía del oleaje.

En todos los enfoques de erosión en régimen extremal, los casos modelados no siguen una misma tendencia que permita ajustar mediante una regresión. Por tal motivo es prácticamente imposible describir el comportamiento de todos los casos mediante una ecuación, quedando fuera de los alcances del presente estudio.

Las ecuaciones propuestas, para régimen medio, sirven para ubicar, a nivel de pre-diseño, la posición del pie de las dunas como función de sus dimensiones y las condiciones de oleaje a las que estén sometidas.

Los resultados hasta ahora obtenidos, dan la pauta para seguir investigando el efecto que tiene la forma de la duna en la estabilidad del perfil de playa, ya que sólo se analizaron cuatro perfiles; y para garantizar que el índice de esbeltez se va a comportar siempre de la misma manera se requiere analizar muchos perfiles más, de diferentes formas, tamaños y propiedades.

Es también importante el estudio a fondo y comprensión del funcionamiento del software XBeach en su totalidad, ya que es tan complejo y tiene tantas variables y criterios, que resulta difícil controlar todos los parámetros y por ende se dificulta la modelación de una tormenta. Además de tener siempre presente que dicho software modela tormentas, es decir, siempre busca erosionar el perfil aunque se modele con parámetros oleaje muy bajo que no representen físicamente una tormenta.

VI.2 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se ha comprobado la importancia que tiene la duna en la estabilidad del perfil de playa, y cómo influye su forma en la mitigación de la erosión ocasionada por el oleaje, observando que la deformación a lo largo del perfil de playa es función de las condiciones de oleaje.

Se logró ejemplificar el fenómeno de acreción y erosión a lo largo del perfil, para entender la interacción entre la duna y la playa. En los casos de régimen medio y los casos de régimen extremal menos intensos, RE1 y RE2, hay un balance entre el volumen erosionado de la duna y el volumen depositado en el perfil. Por el contrario, en los demás casos no siempre hay balance, en algunos se aprecia mayor volumen erosionado que el depositado.

En relación con el tipo de erosión representado por la cantidad de sedimento removido de la duna y desplazamiento vertical de la línea de costa, en régimen medio, es posible definir un intervalo del índice de esbeltez de la duna donde la erosión será la mínima, ya que las modelaciones registraron un comportamiento descrito por curvas casi parabólicas. El intervalo óptimo del índice de esbeltez que debe tener una duna para una mejor mitigación de la erosión va de 0.19 a 0.21, esto se traduce en que el ancho de la duna debe ser aproximadamente cinco veces mayor que su altura. En el régimen extremal no se puede definir un valor o intervalo único, ya que su comportamiento es tan variado entre los casos modelados que es prácticamente imposible hallar un solo ajuste representativo para todos los casos.

En cuanto a la erosión representada por el desplazamiento vertical de la línea de costa, el régimen medio, el comportamiento general de los casos impide definir un intervalo óptimo del Índice de Esbeltez para mitigar la erosión; pero sí muestra que entre más esbelta sea la duna, tendrá menor erosión. Esto se concluye debido a que el perfil de playa Paraíso, que tiene la duna más esbelta, cuando pierde playa seca es el que menor distancia se desplaza la línea de costa, y cuando se gana playa seca es el que más mayor distancia se desplaza. Traducido a otras palabras, entre más esbelta sea la duna, menor erosión de desplazamiento vertical de la línea de costa tendrá.

Se concluye también que de los diferentes criterios para cuantificar la erosión, el principal enfoque es el de recorrido de la línea de costa. Esto es porque la pérdida de playa seca representa un gran problema para la humanidad, ya que es un gran peligro

tener el Nivel Medio del Mar cerca de los intereses humanos porque éstos pueden sufrir los impactos directos del oleaje. No hay que impresionarse al ver una imagen donde el oleaje ha erosionado completamente la duna de un perfil de playa, ya que eso no necesariamente representa un problema para la humanidad; por el contrario, representa un adecuado funcionamiento de la duna costera en la estabilidad de la playa.

Cabe mencionar que para tener resultados más confiables, se recomienda modelar más perfiles para tener más valores y poder representar mejor el comportamiento de los mismos; además de validar las modelaciones realizadas con el software XBeach con algún otro software, con modelaciones experimentales de laboratorio, o mediciones en campo.

De la modelación se puede concluir que no fue posible controlar todos los parámetros del XBeach, ya que en algunas partes el perfil inicial presentaba pendientes mayores a la pendiente crítica que toma en cuenta el modelo, y al inicio de la modelación fallaba a pesar que el oleaje aún no tocaba el perfil. Este caso particular se presentó en el segundo cordón dunar del perfil de Playa Paraíso. Se propone como mejora poder establecer una pendiente crítica por segmentos del perfil para una representar mejor la modelación. Es importante mencionar que en el manual del software se encuentran algunas variables mal definidas y eso puede causar problemas en la programación de la modelaciones.

VI.3 Futuras líneas de investigación

Al concluir esta tesis han quedado inconclusas importantes líneas de investigación, y algunas otras han surgido.

En principio queda pendiente la validación de las ecuaciones obtenidas para predecir la erosión de dunas en sus diferentes enfoques, ya sea con mediciones en campo, modelaciones experimentales en el laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del IIUNAM, o con algún otro modelo numérico existente. Además de buscar

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

los ajustes necesarios para poder representar los casos de régimen extremal e insólito y tener más opciones para predecir la erosión en la fase de pre-diseño.

Otra rama que se abre a partir de este proyecto es el estudio de la influencia de la vegetación de la duna en la mitigación de la erosión, además de su modelación, numérica y experimental.

VII. REFERENCIAS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- Airy, G. B. (1845). *Tides and Waves*. Encycl Metrop, Art 192, 241-396.
- Allen, J. R. (1970). The avalanching of granular solids on dune and similar slopes. *Journal of Geology*, 78(3) , 326-351.
- Aristóteles. (1996). *Acerca del cielo; metereológicos*. Madrid.
- Bruun, P. (1954). Coast Erosion and the Development of Beach Profiles. *Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Technical Memorandum, 44* , 1-79.
- Cantabria, U. d. (2000). *Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral*. Cantabria: Dirección General de Costas. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.
- Carter, R. G. (1991). *Coastal Environments*. Gran Bretaña: Academic Press.
- Carter, R. G. (1998). *Coastal Environments. An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press.
- Clayton, K. (1979). *Coastal geomorphology*. London: Macmillan Education.
- Dabrio, C. J. (1992). *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. España: Consejo Superior de Investigaciones científicas.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- Delft Hydraulics Laboratory. (1981). Study on Wave Generation, Bed Deformations due to Secondary Waves in an Irregular Wave Field. *R 702, part V* .
- Delgadillo, M. A. (2011). *Comparación de la respuesta dinámica de perfiles de playa, bajo un gradiente hidráulico*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Edelman, T. (1968). Dune erosion during storm conditions. *Proceedings of the 11 th Conference on Coastal Engineering, London, chapter 46* , 719-722.
- Fontanet, P. (1961). *La Houille Blanche, No. 1, 2*.
- Gallant, R. A. (1997). *The Story of Dunes: Sand on the Move*. EUA: Franklin Watts, A Division of Grolier Publishing.
- Graff, J. V. (1977). Dune erosion during a storm surge. *Coastal Engineer, Volume 1, No. 2* .
- Hesp, P. A. (2000). Coastal Sand Dunes: Form and Function. *Coastal Dune Vegetation Network, Technical Bulletin, núm 4* .
- Holthuijsen, L. H., Booij, N., & Herbers, T. H. (1989). A prediction model for stationary short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering, 13(1)* , 23-54.
- Hsu, J. R., & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings Institution of Civil Engineers, 87* , 557-570.
- Hulsbergen, C. H. (1974). Effect and Suppression of Secondary Waves. *Proceedings of 14th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen* .
- Jiménez, O. A. (2010). *Análisis espacio-temporal de la erosión y acreción de las costas del estado de Veracruz*. Xalapa: Instituto de Ecología, A.C.

- Keulegan, G. H., & Krumbein, W. C. (1949). Stable Configuration of Bottom Slope in a Shallow Sea and Its Bearing on Geological Processes. *Transactions of American Geophysical Union*, 30(6) , 855-861.
- López-Portillo, J., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Hernández, J. R., Méndez, A. P., Vázquez-Reyes, V., y otros. (2011). *Atlas de las costas de Veracruz. Manglares y dunas*. México: Gobierno del estado de Veracruz.
- Losada, M. A., & Giménez-Curto, L. A. (1980). Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering*, 4 , 187-206.
- Martínez, M. L. (2009). *Las playas y las dunas costeras: un hogar en movimiento*. México, DF: Fondo de Cultura Económica, 226.
- Martínez, M. L., & Psuty, N. P. (2004). *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*. Heidelberg: Springer.
- Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., & Castillo, S. (1993). Biodiversidad costera: playas y dunas. En S. I. Salazar-Vallejo, & N. E. González, *Biodiversidad marina y costera de México* (págs. 160-181). México: CIQRO-CONABIO.
- Meulen, T. V., & Gourlay, M. R. (1968). Beach and dune erosion tests. *Proceedings of the 11th Conference of Coastal Engineering, London, Vol. 1* , 701-707.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Munk, W. H. (1949). Surf beats. *Trans. American Geophysical Union*, 30 , 849-854.
- Packham, J. R., & Willis, A. J. (1997). *Ecology of Dunes, Salt Marsh and Shingles*. Cambridge: Chapman & Hall.
- Pilkey, O. H. (1998). *The North Carolina Shore and its Barrier Islands*. EUA: Duke University Press.
- Pye, K., & Tsoar, H. (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin: Springer.
- Ranwell, D. S. (1972). *Ecology of Salt Marshes and Sand Dunes*. Londres: Chapman and hall.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A. V., Van Thiel de Vries, J. S., McCall, R. T., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12) , 1133-1152.
- Roelvink, J. A., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel De Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56 , 1133-1152.
- Short, A. D. (2000). Handbook of beach and shoreface morphodynamics. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 10 , 391-392.
- Silva, e. a. (1998). A statistical tool for breakwater design. *26 International Conference on Coastal Engineering, Copenague* , 192-193.
- Silva, e. a. (2002). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. *International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Cardiff, Wales* .
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Serie de Docencia SD/49.
- Silvester, R., & Hsu, J. R. (1997). *Coastal stabilization*. Singapore: World Scientific.

- Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications*. Wallingford: Thomas Telford.
- Stokes, G. G. (1847). *On the oscillatory waves*. Transactions Cambridge Phil Soc, 8(441), 157-229.
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1947). *Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting*. US, Navy Hydrographic Office Publication.
- Tanner, W. F. (1958). The zig-zag nature of type i and type iv curves. *Journal of Sedimentary Petrology*, 28 , 372-375.
- Van Rijn, L. C. (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6,7) , 649-689 y 761-793.
- Van Thiel, J. S. (2009). *Dune Erosion During Storm Surges*. Amsterdam: Deltares Select Series. Volume 3.
- Vega, C., Gallego Fernández, J., & Vidal Pascual, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Cantabria: Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas.
- Vellinga, P. (1986). *Beach and Dune Erosion during Storm Surges*. Netherlands: Delft Hydraulics Communications No. 372.
- Woodroffe, C. D. (2002). *Coasts: Form, processes and evolution*. Cambridge: University Press.
- Wright, L. D., & Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56 , 93-118.
- Wright, L. D., & Short, A. D. (1983). Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion* , 35-64.
- Wright, L. D., Chappell, J., Thom, B. G., Bradshaw, M. P., & Cowell, P. (1979). Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: southeastern Australia. *Marine Geology*, 32 , 105-140.
- Yu, M., & Hsu, J. R. (2006). Parabolic bay shape equation revisited for practical applications. *Proceedings of the 30st International Conference*, (págs. 3478-3490). San Diego.

VIII. ANEXO A: RESULTADOS

VIII.1 Playa El Raudal

VIII.1.1 Régimen Medio

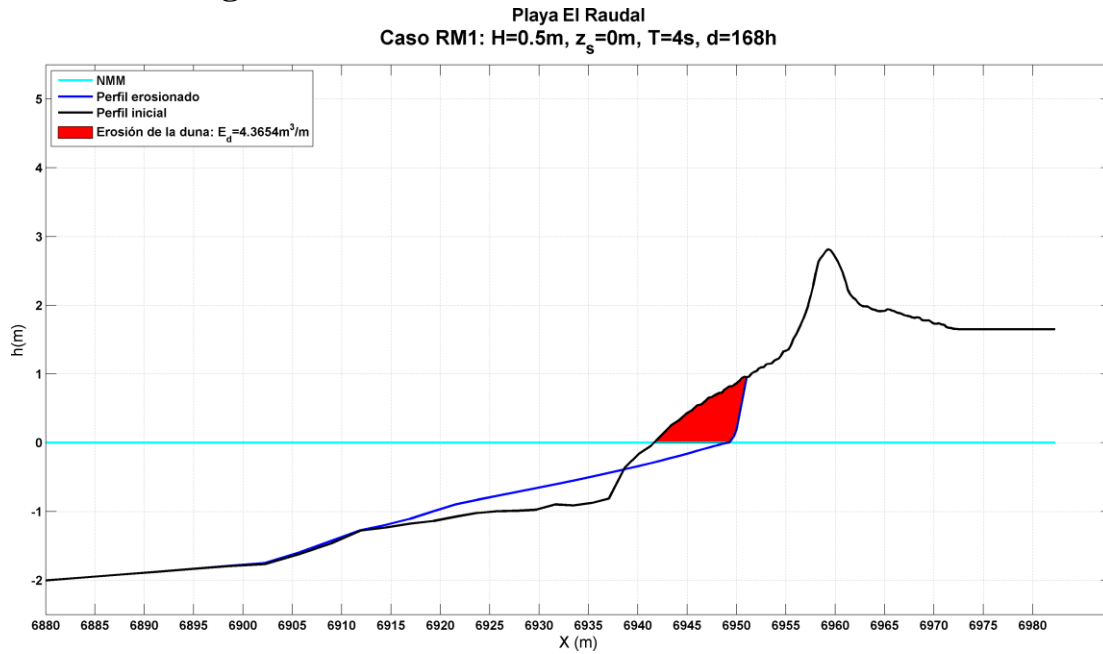


Figura VIII-1. Caso RM1. Erosión de la duna

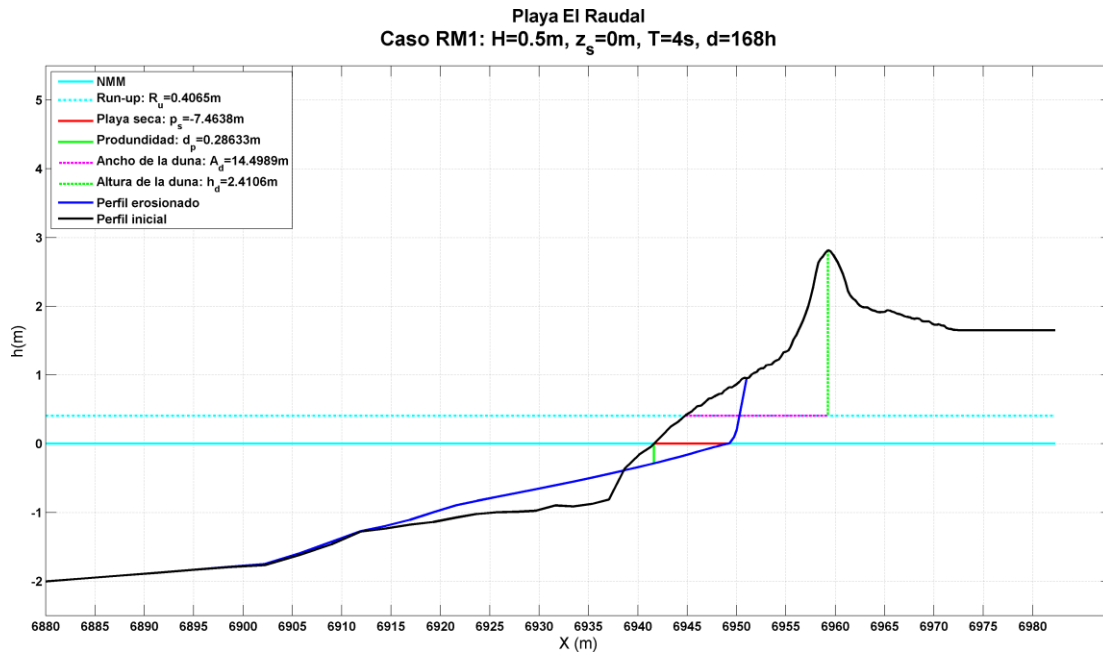


Figura VIII-2. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa

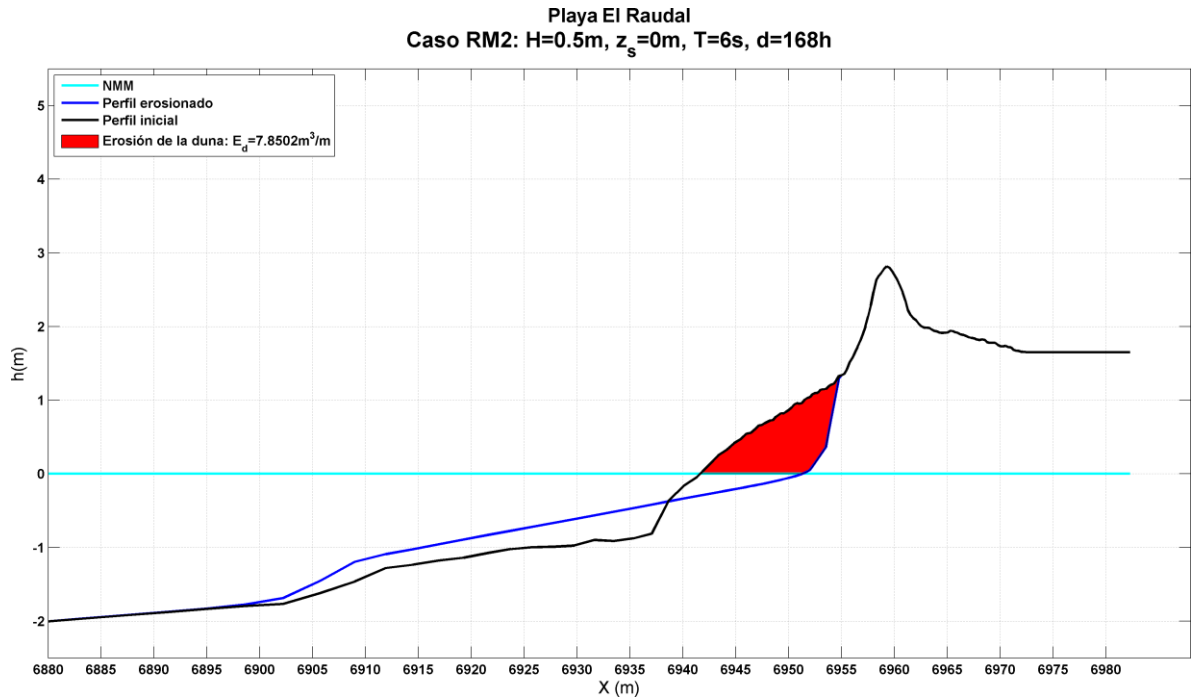


Figura VIII-3. Caso RM2. Erosión de la duna

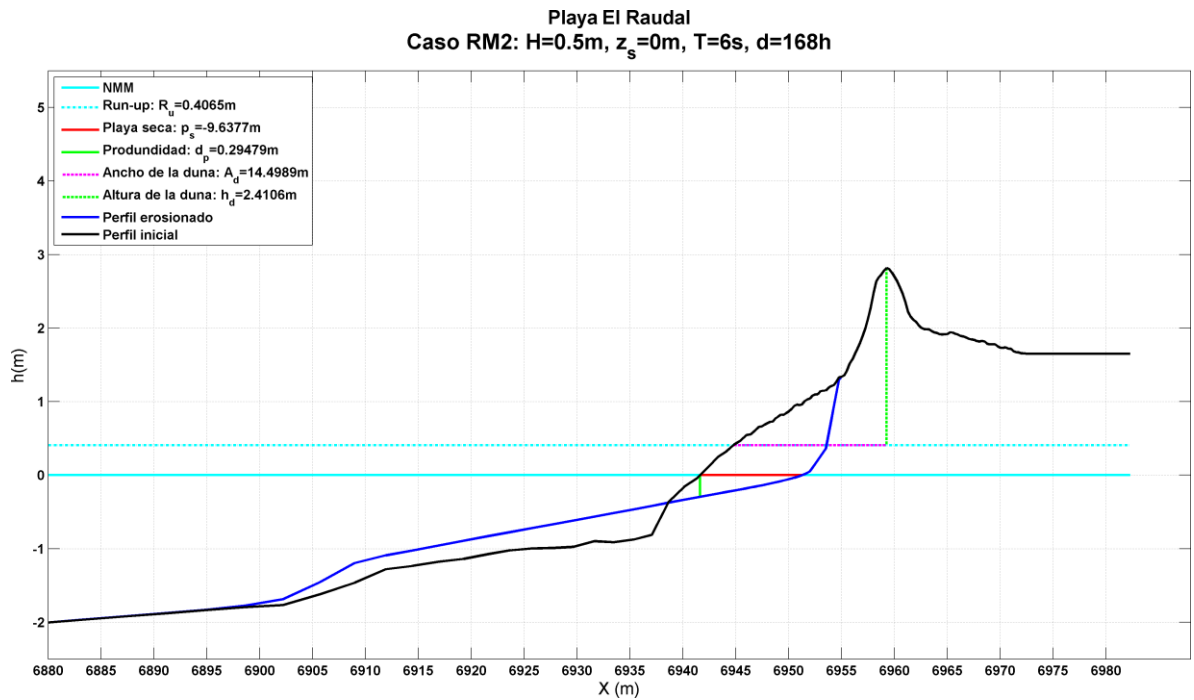


Figura VIII-4. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa

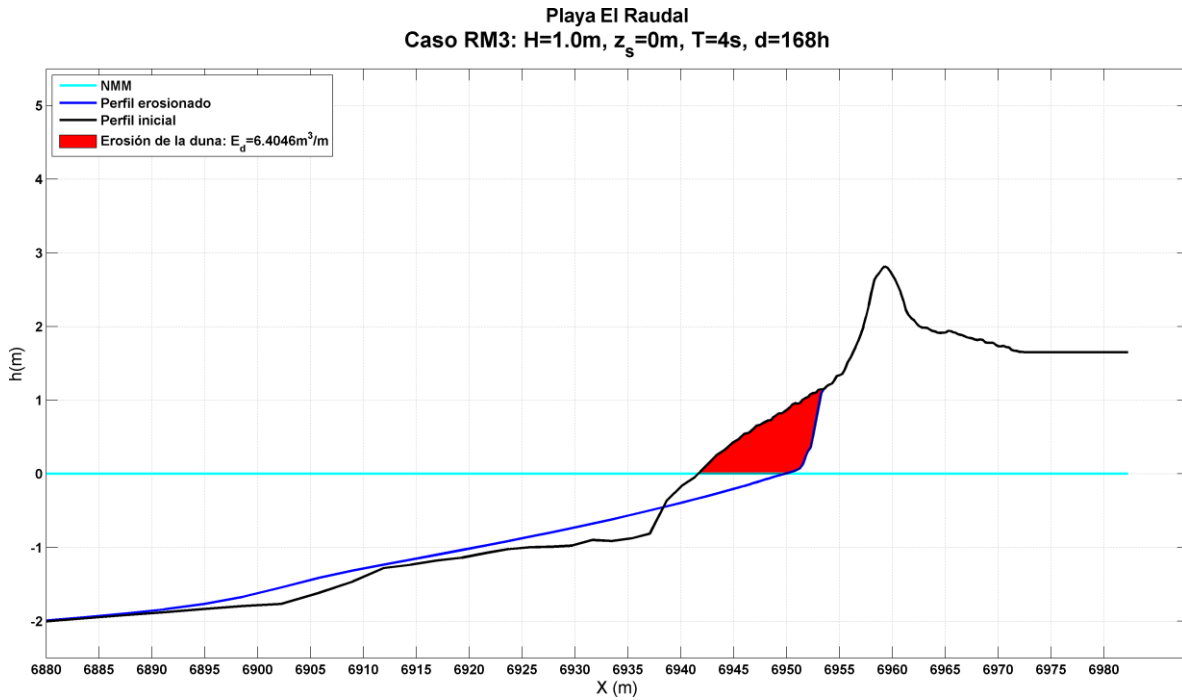


Figura VIII-5. Caso RM3. Erosión de la duna

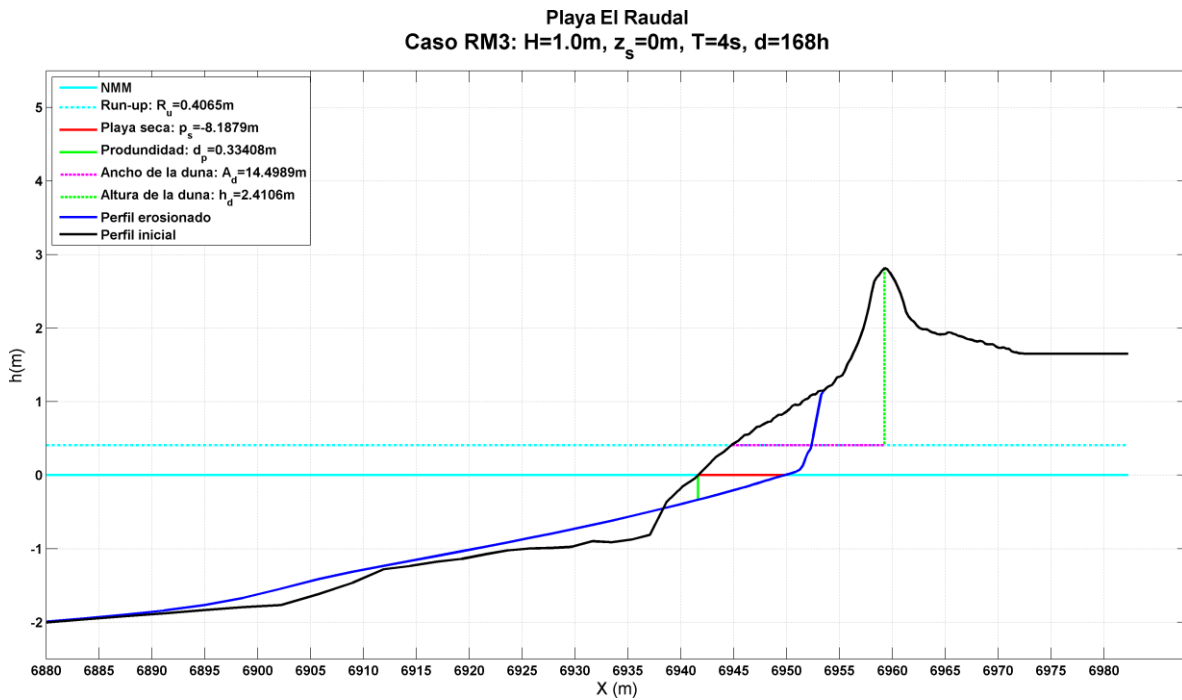


Figura VIII-6. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa

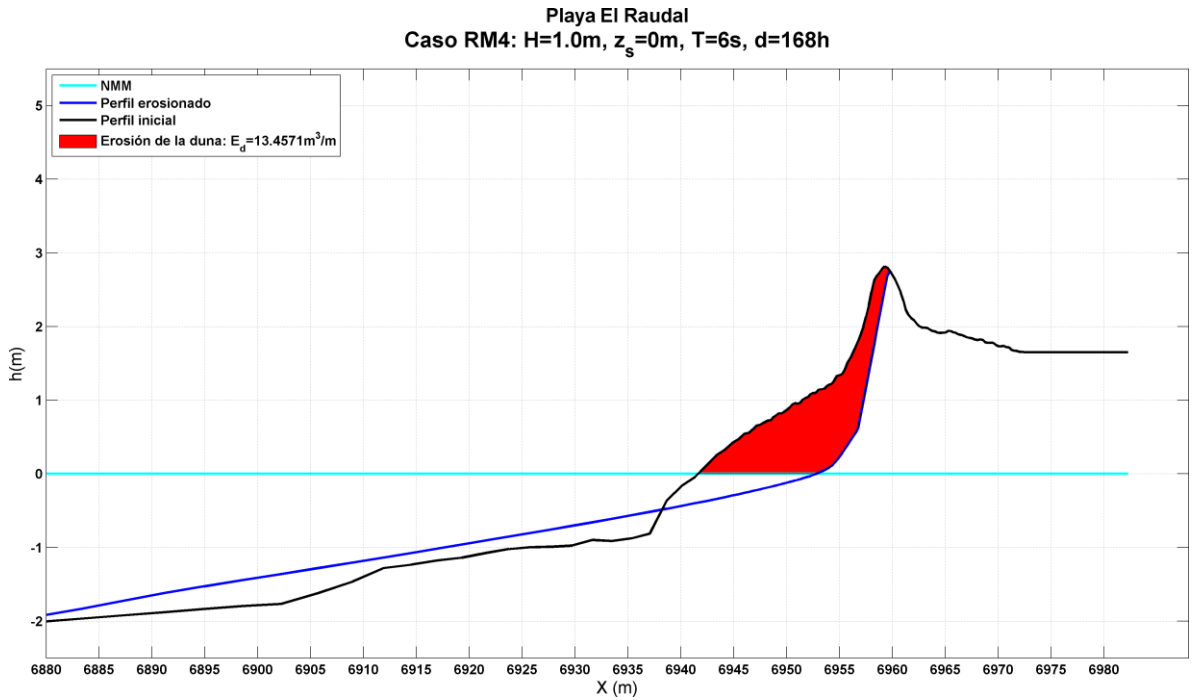


Figura VIII-7. Caso RM4. Erosión de la duna

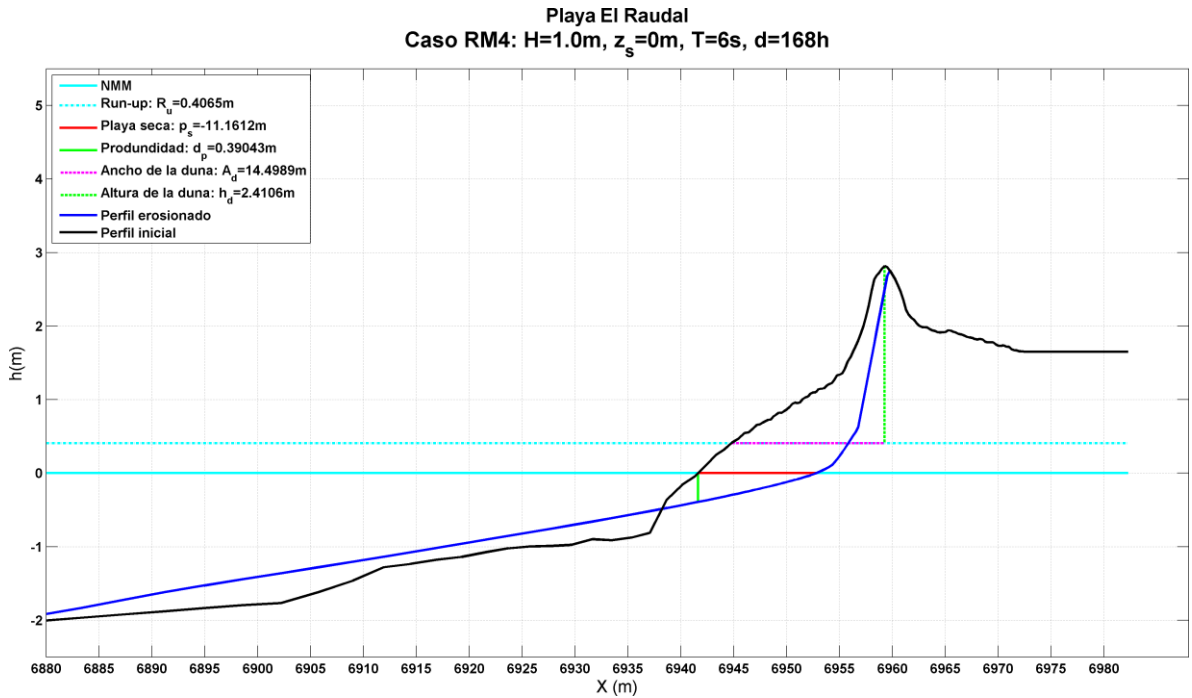


Figura VIII-8. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa

VIII.1.2 Régimen Extremal e Insólito

Playa El Raudal
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

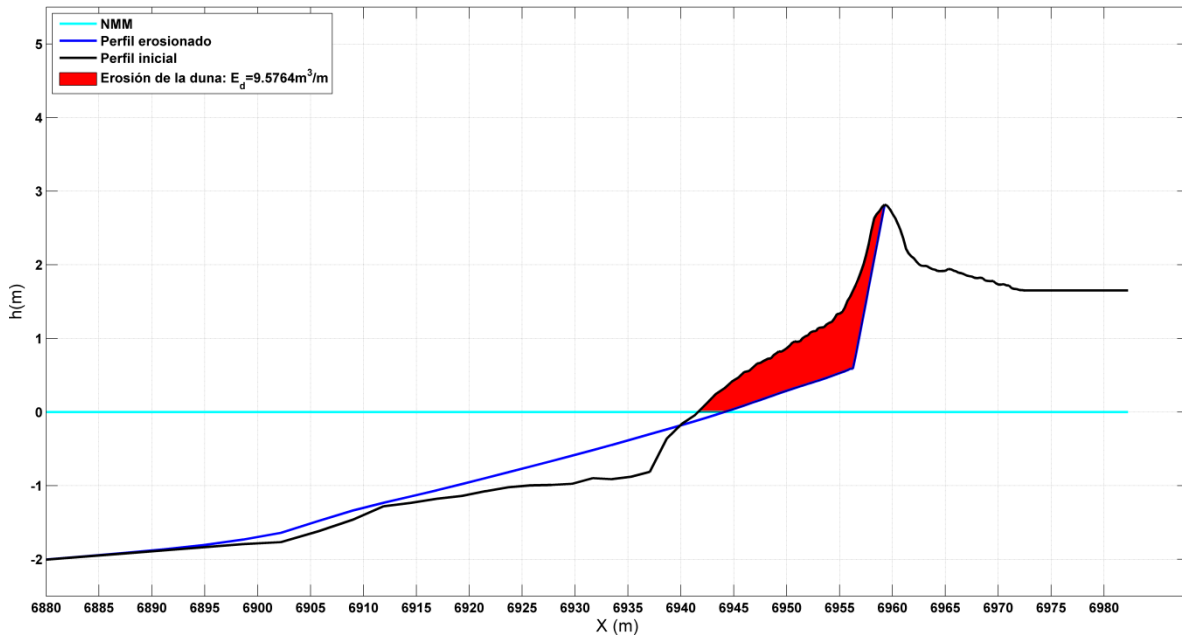


Figura VIII-9. Caso RE1. Erosión de la duna

Playa El Raudal
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

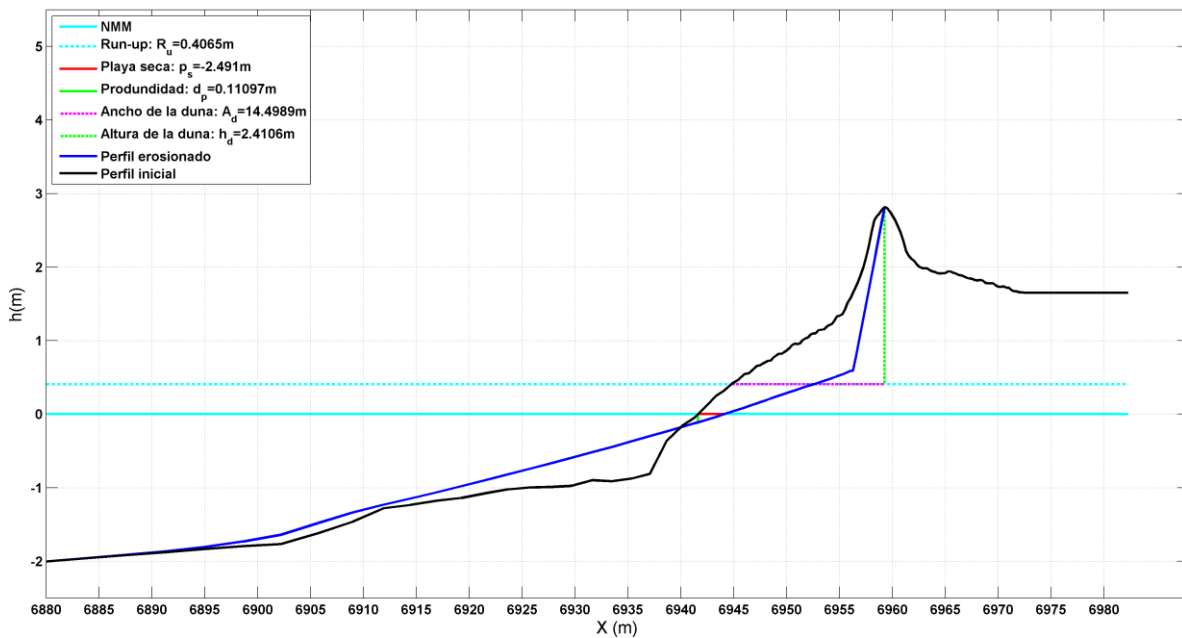


Figura VIII-10. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa

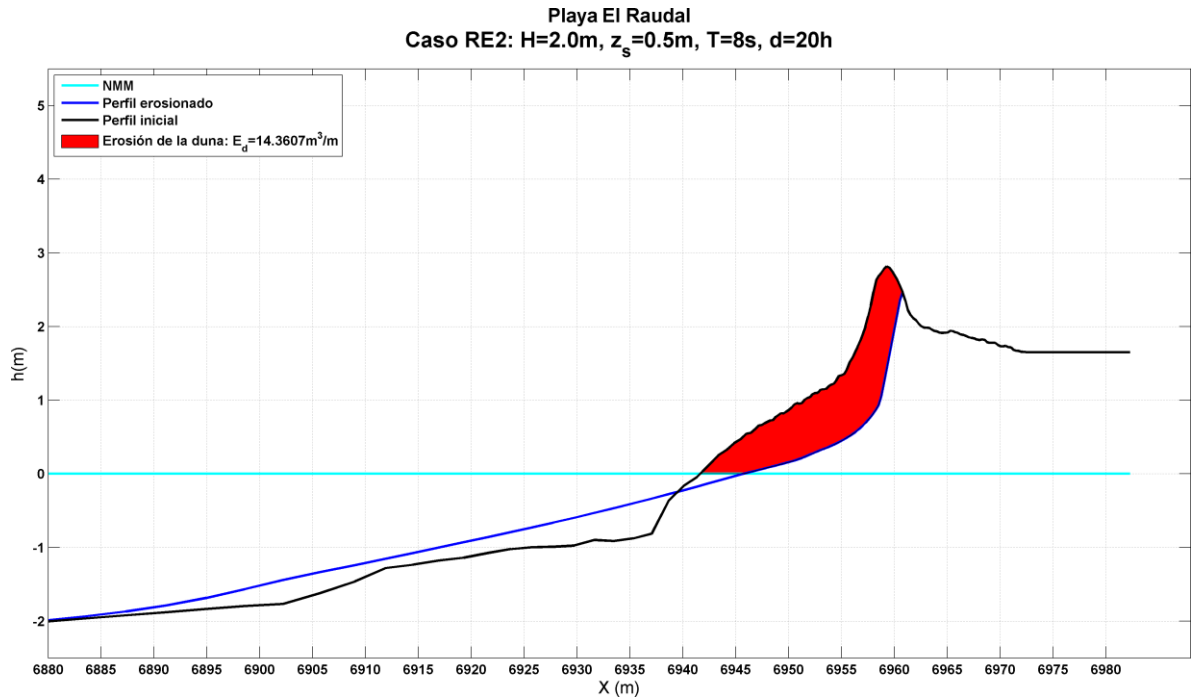


Figura VIII-11. Caso RE2. Erosión de la duna

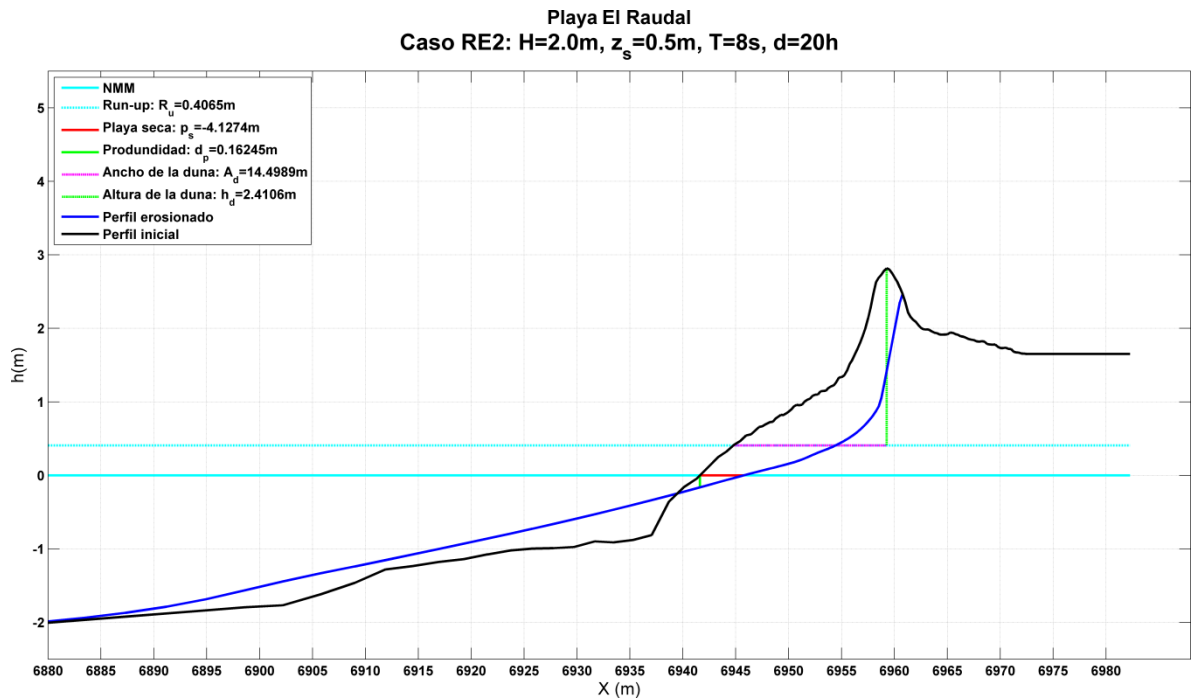


Figura VIII-12. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa

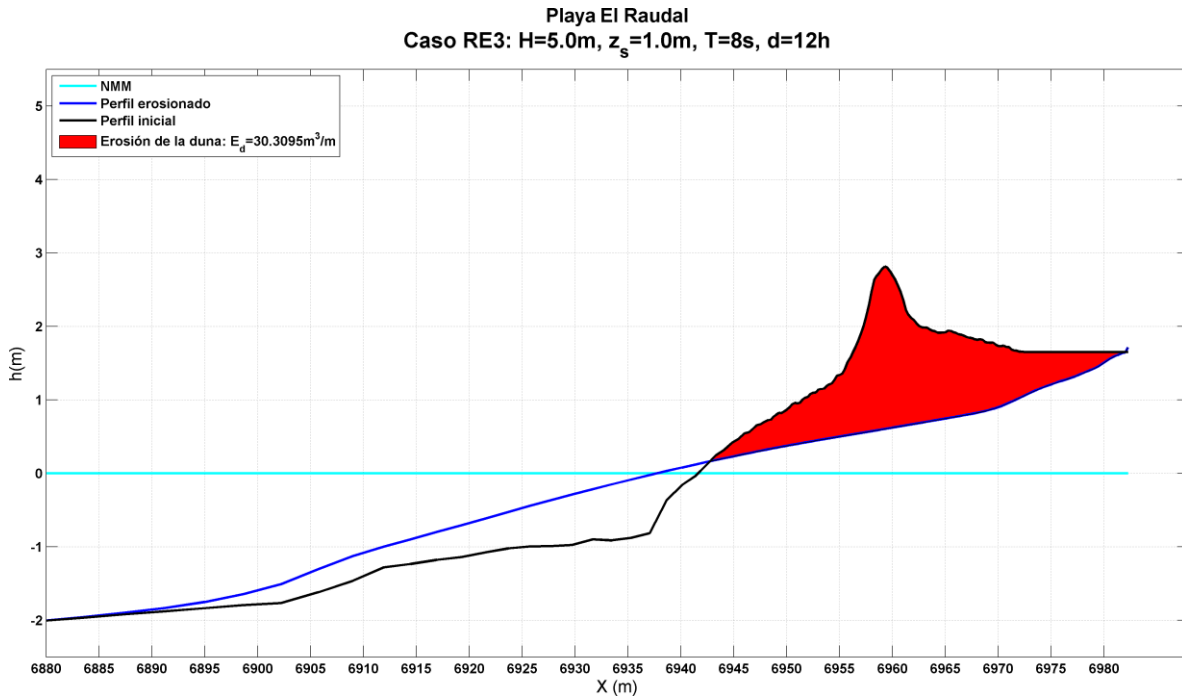


Figura VIII-13. Caso RE3. Erosión de la duna

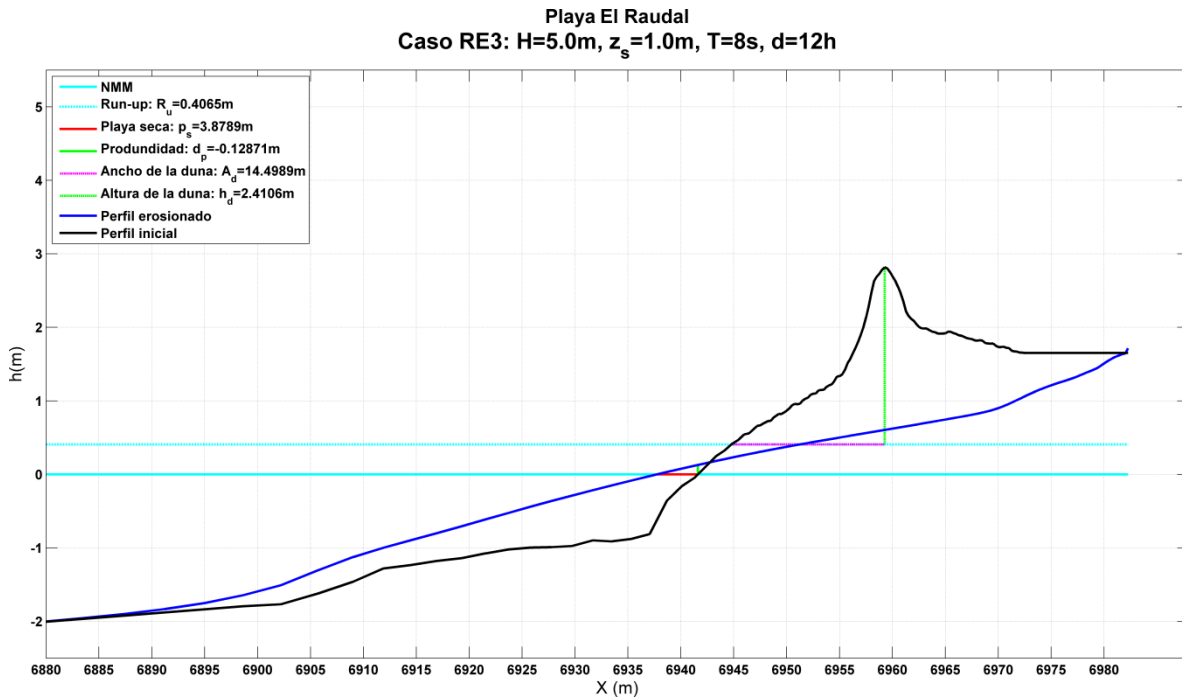


Figura VIII-14. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa

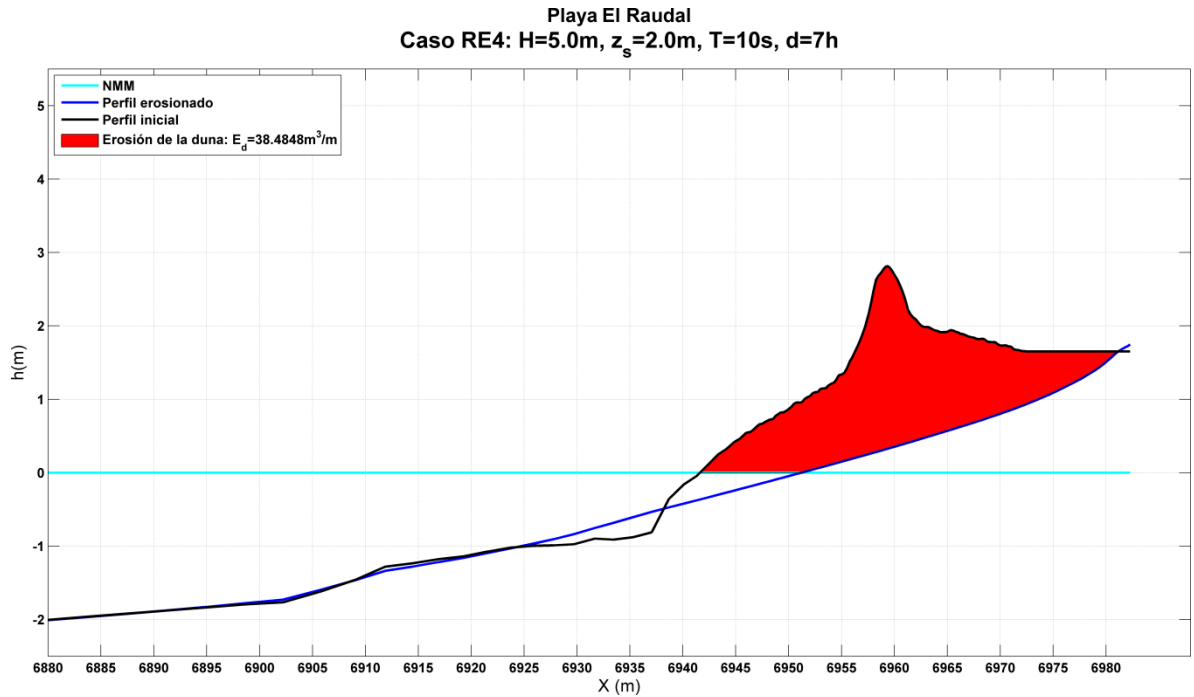


Figura VIII-15. Caso RE4. Erosión de la duna

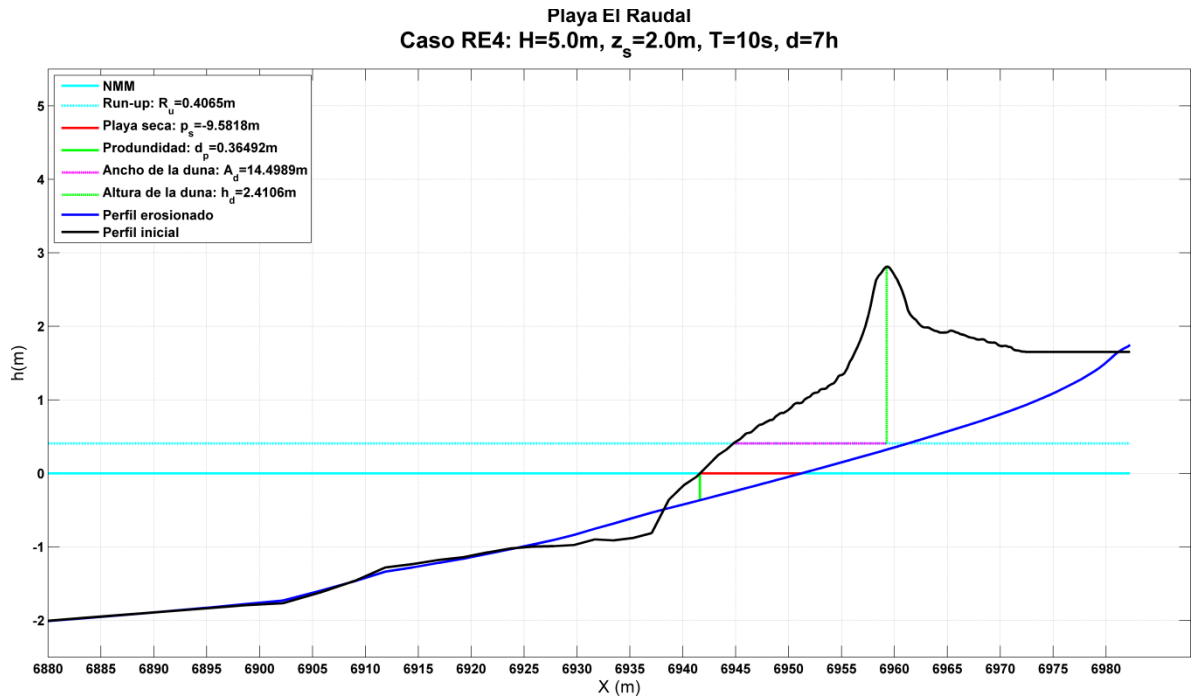


Figura VIII-16. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa

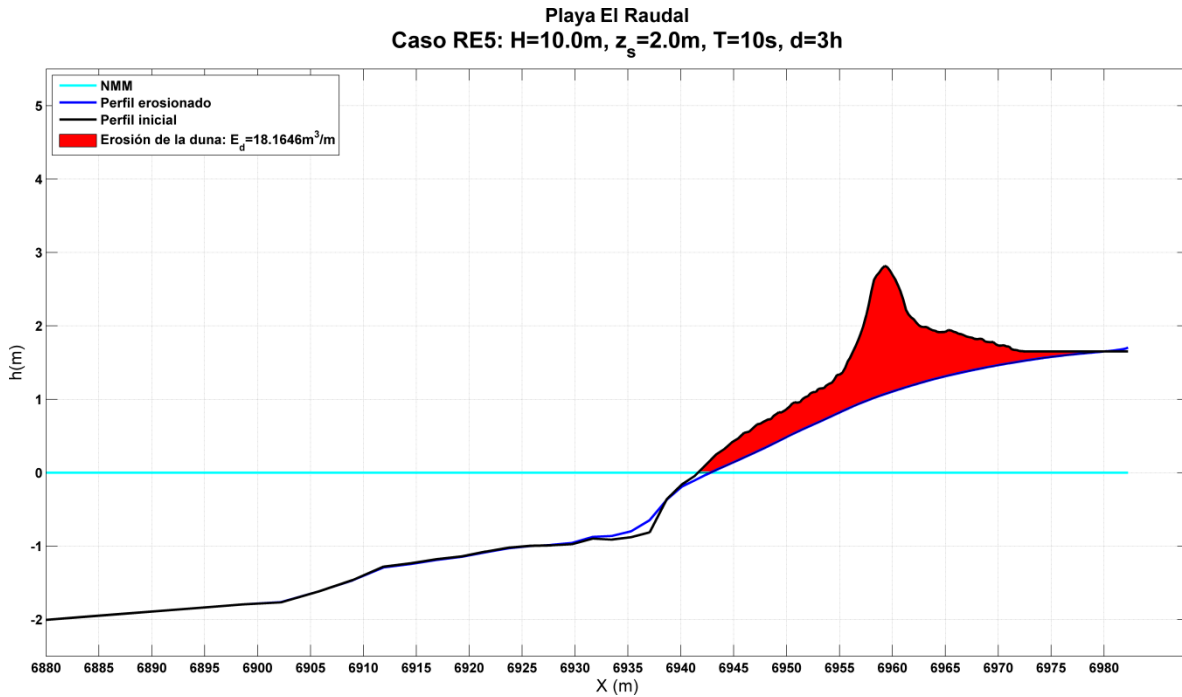


Figura VIII-17. Caso RE5. Erosión de la duna

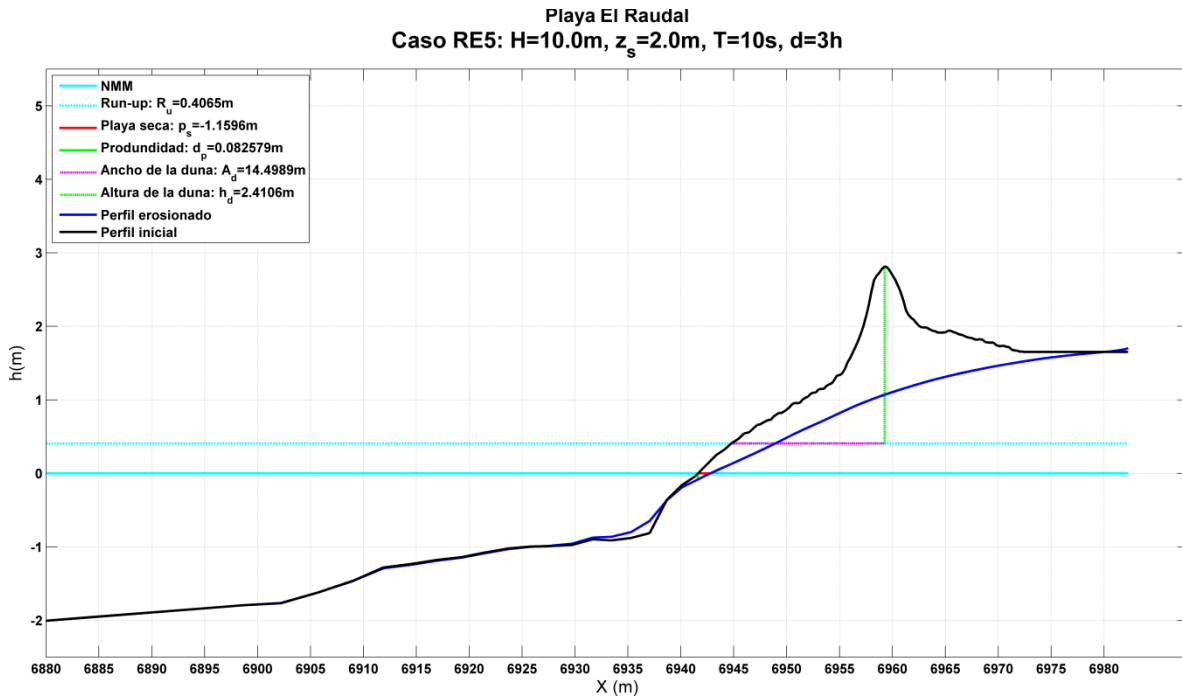


Figura VIII-18. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa

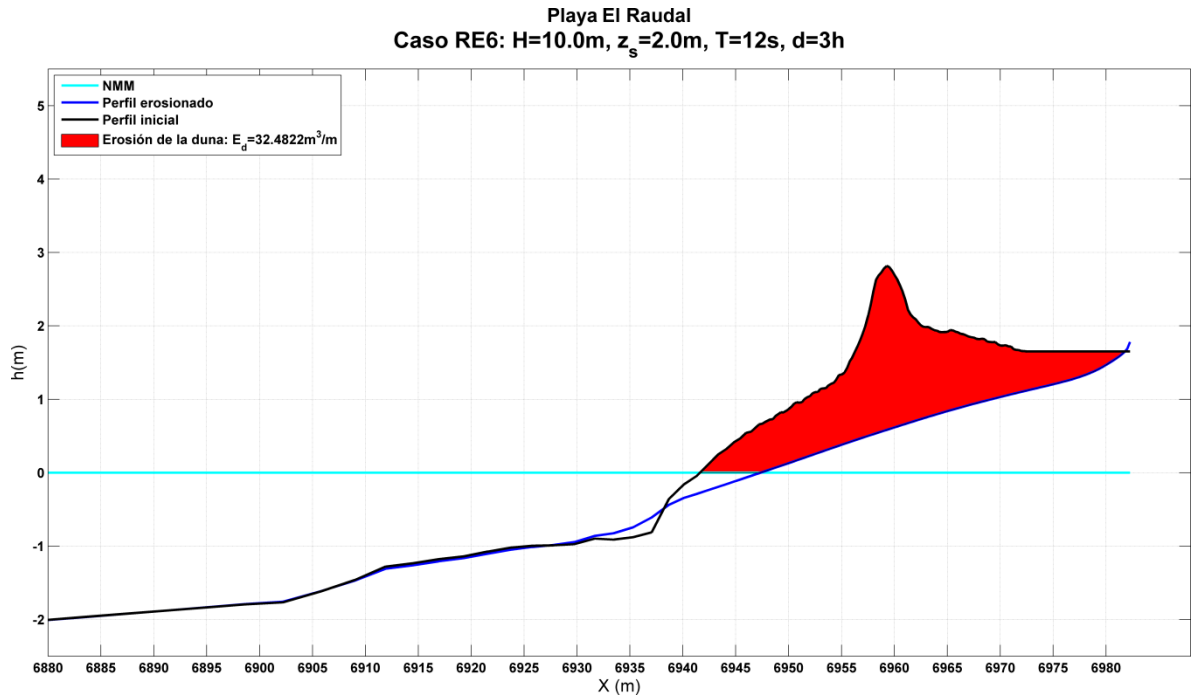


Figura VIII-19. Caso RE6. Erosión de la duna

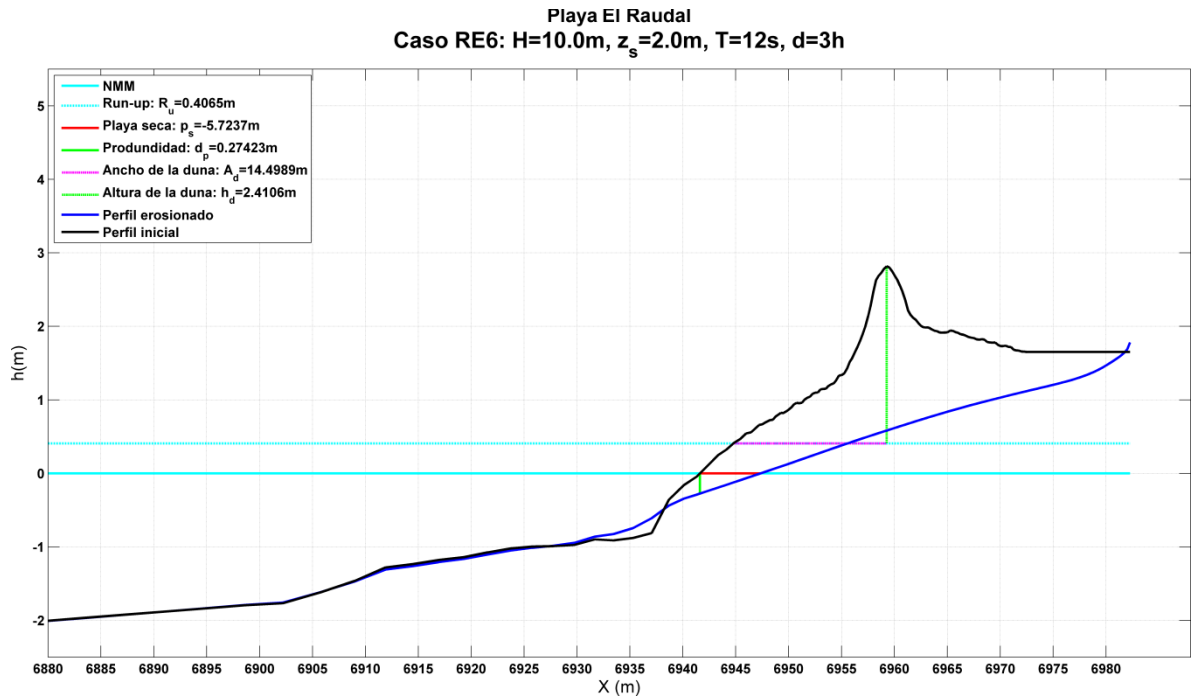


Figura VIII-20. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa

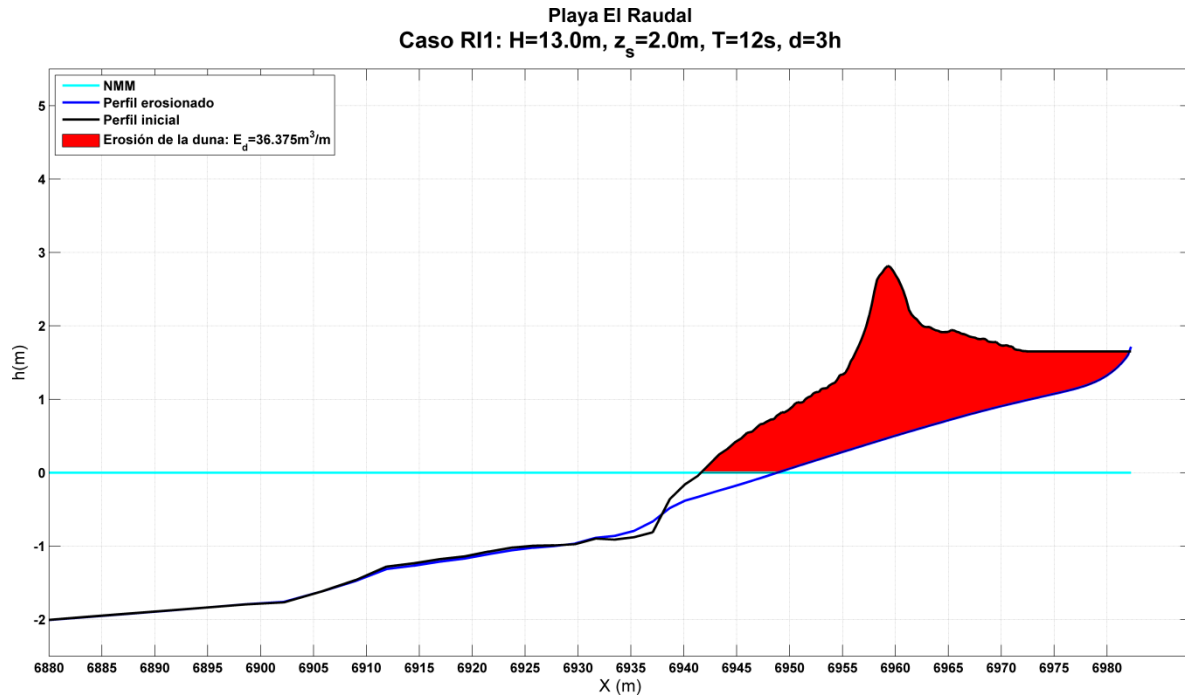


Figura VIII-21. Caso RI1. Erosión de la duna

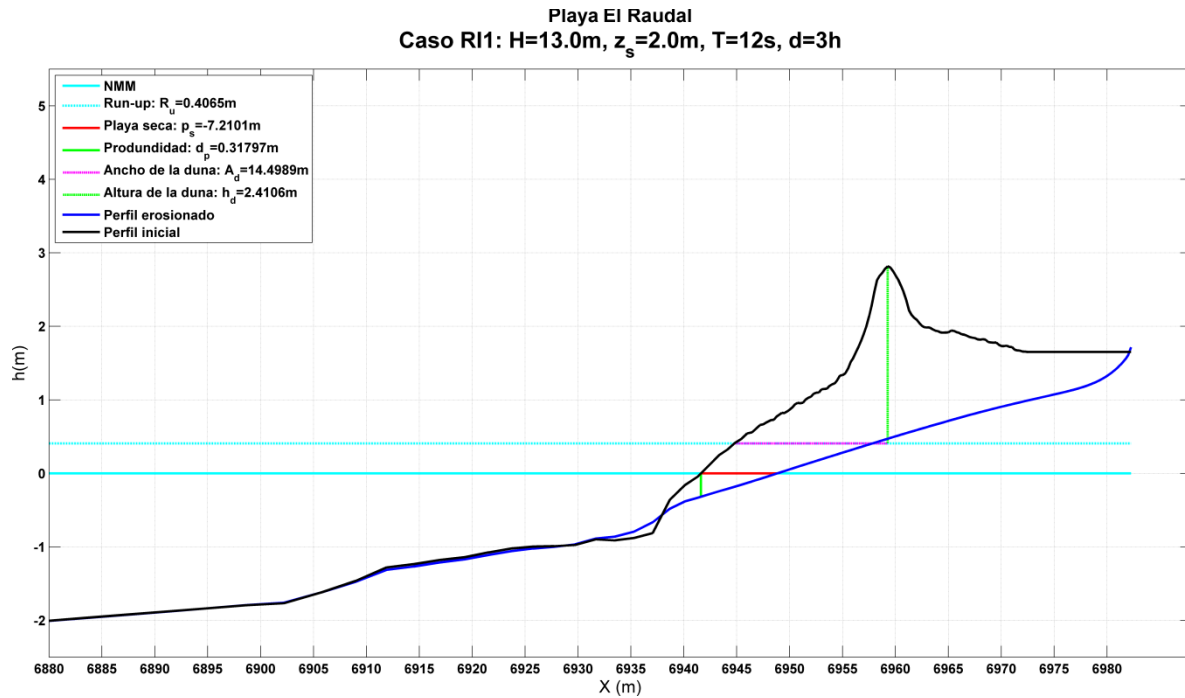


Figura VIII-22. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa

VIII.2 Playa Navarro

VIII.2.1 Régimen Medio

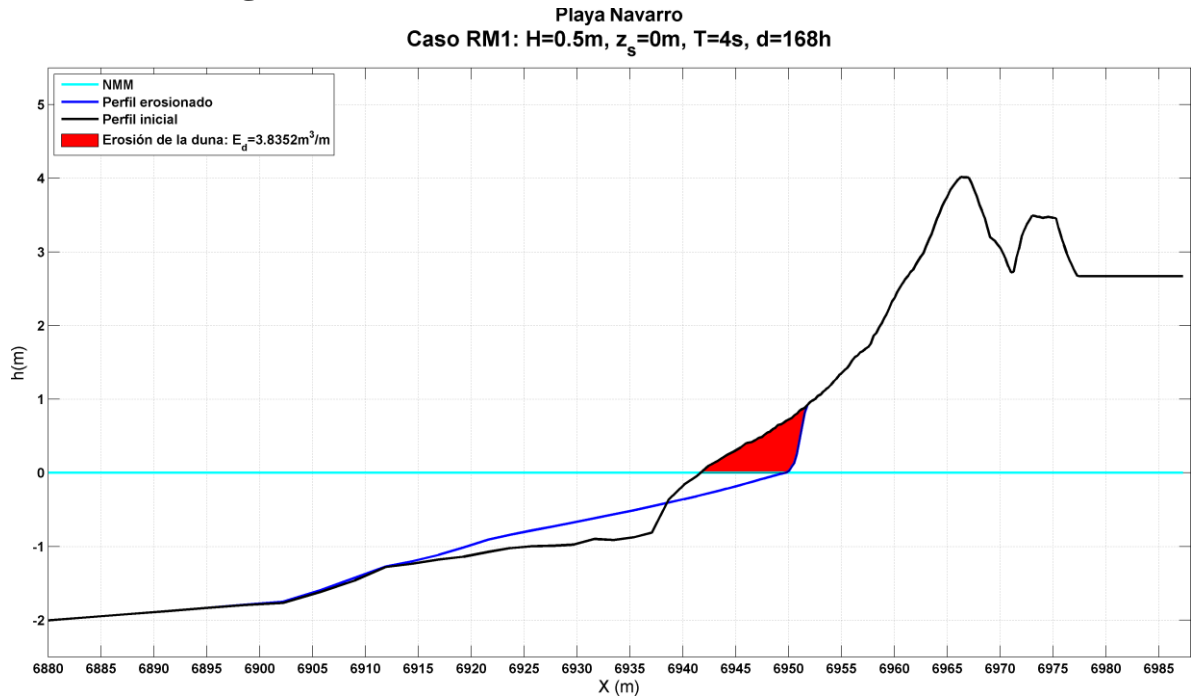


Figura VIII-23. Caso RM1. Erosión de la duna

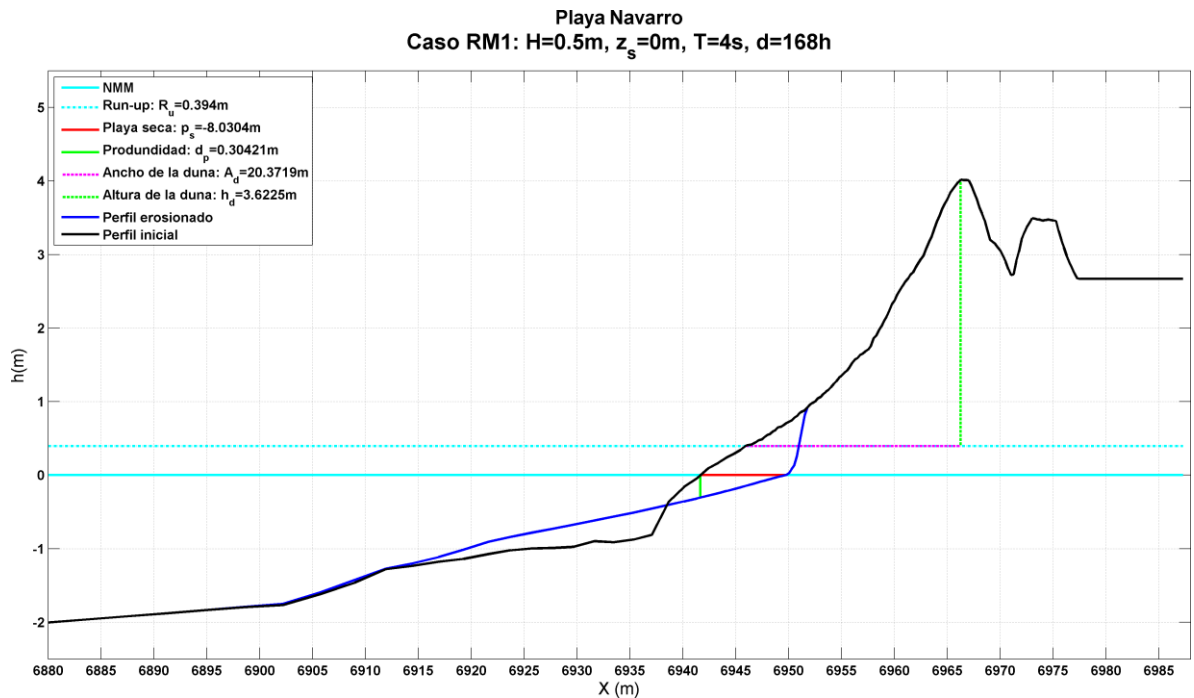


Figura VIII-24. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa

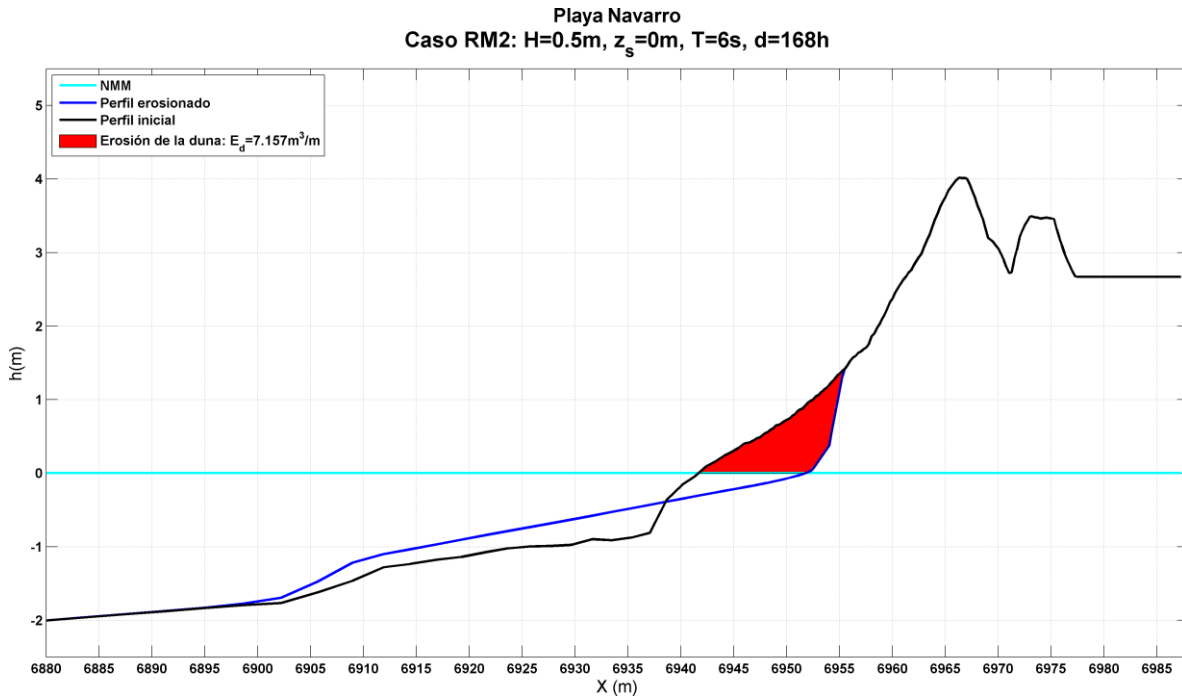


Figura VIII-25. Caso RM2. Erosión de la duna

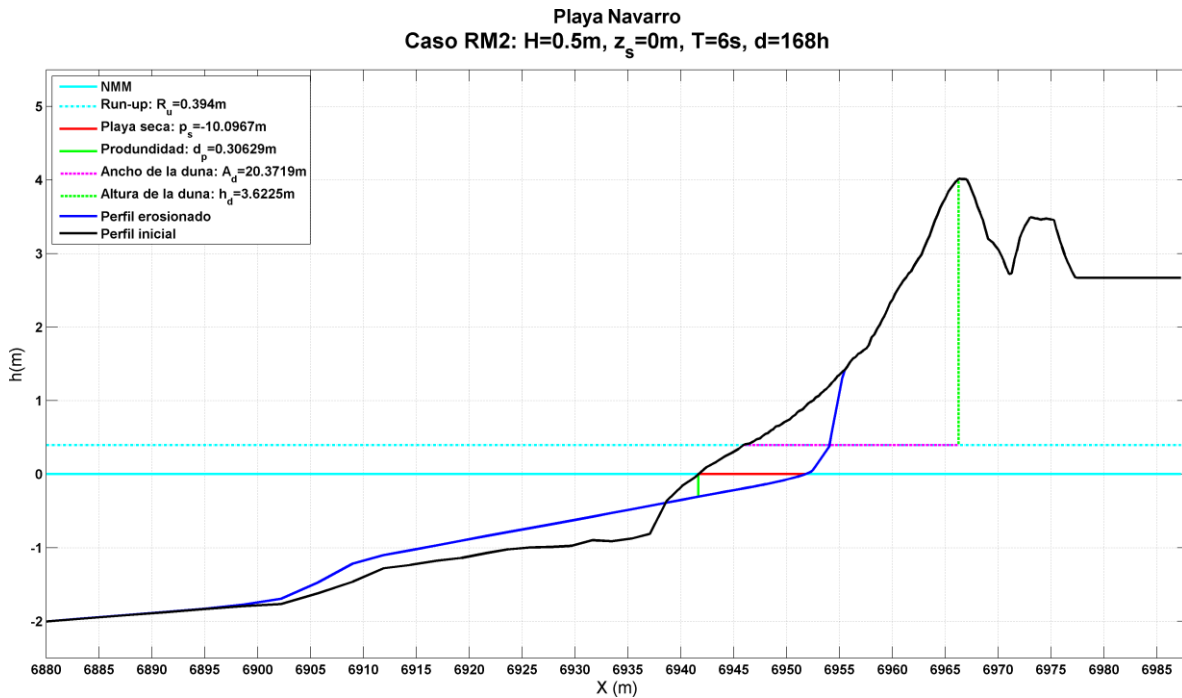


Figura VIII-26. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa

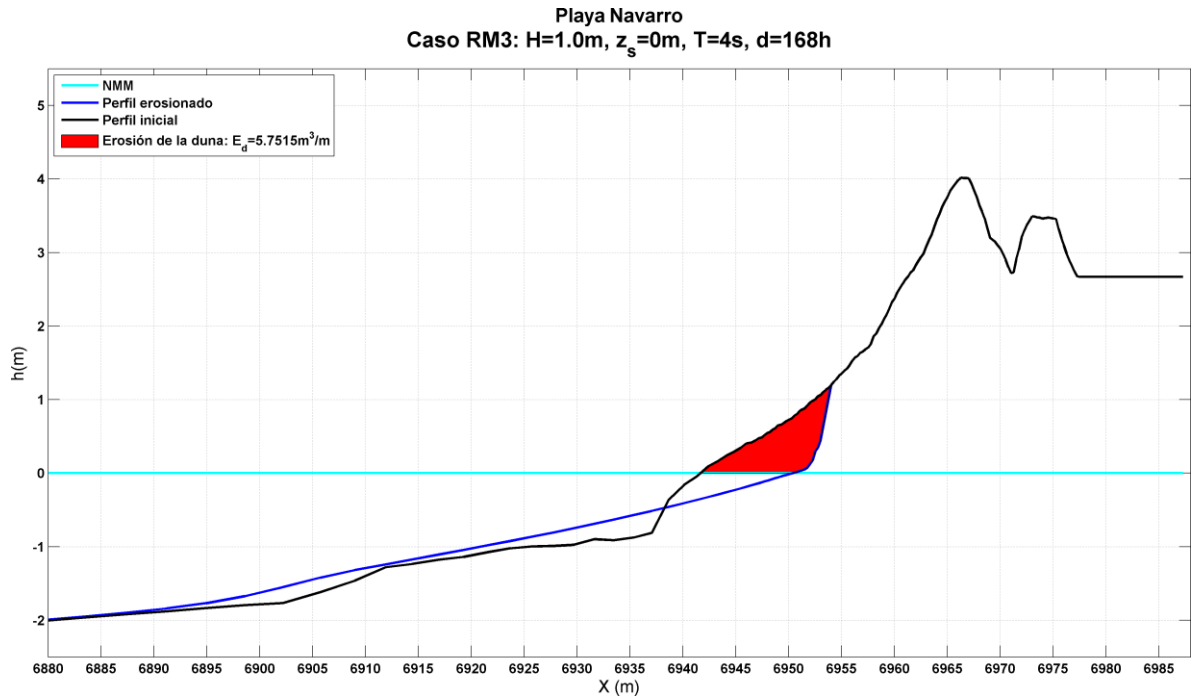


Figura VIII-27. Caso RM3. Erosión de la duna

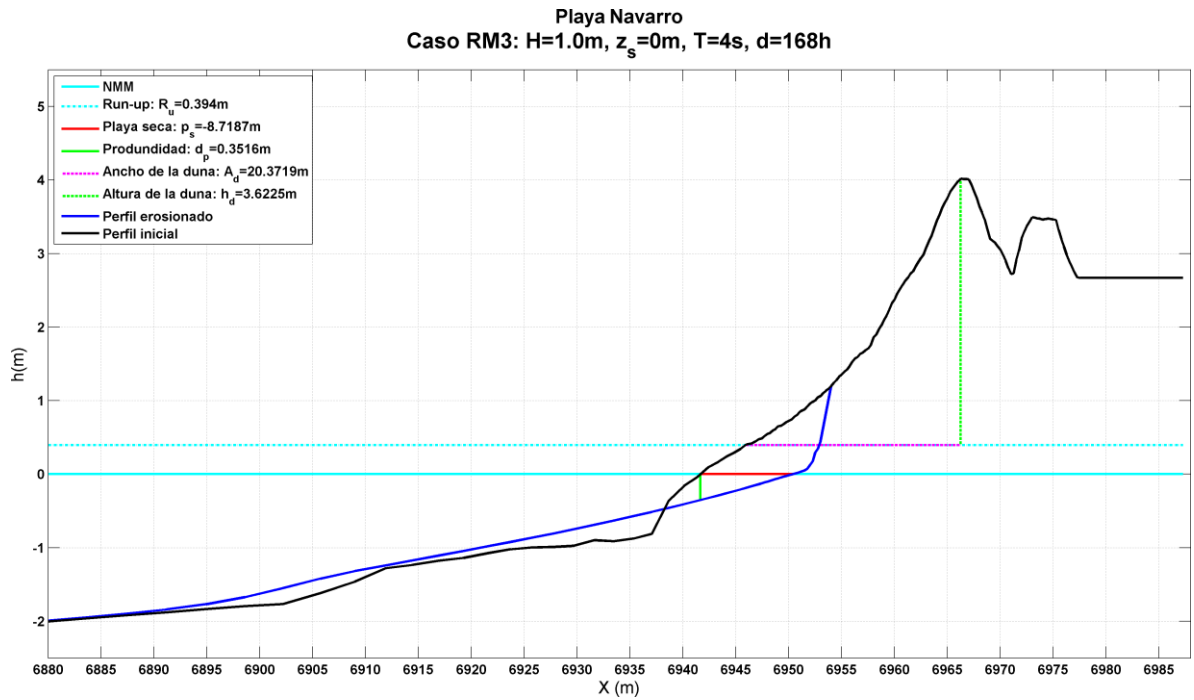


Figura VIII-28. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa

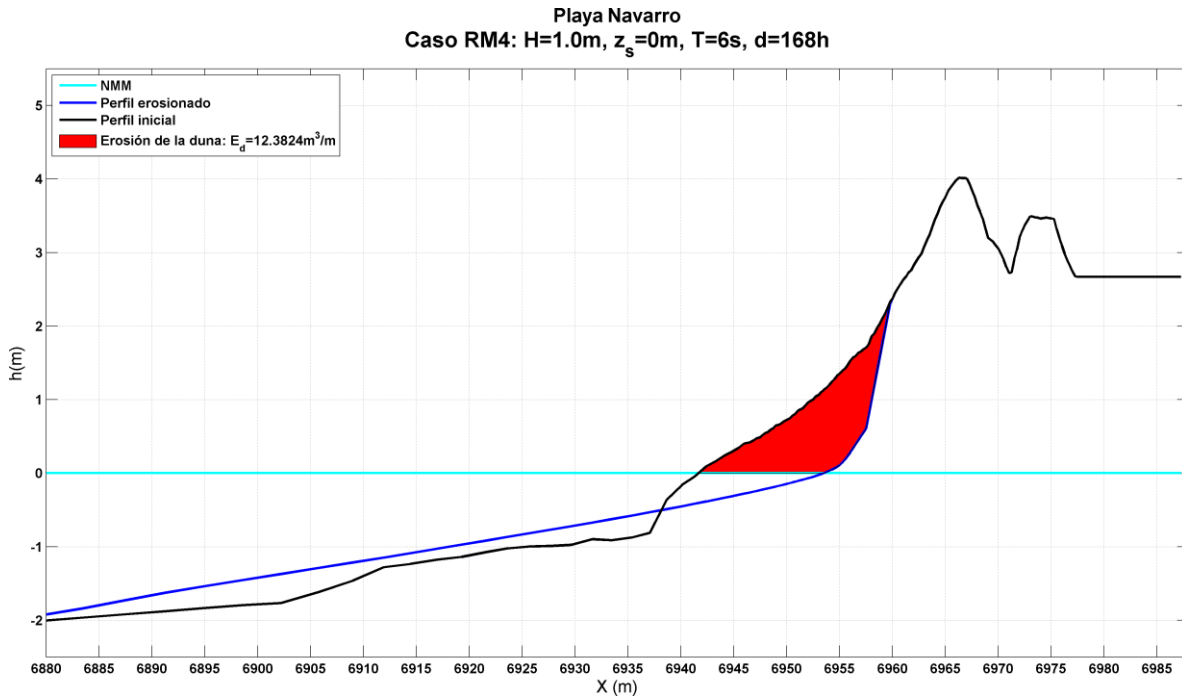


Figura VIII-29. Caso RM4. Erosión de la duna

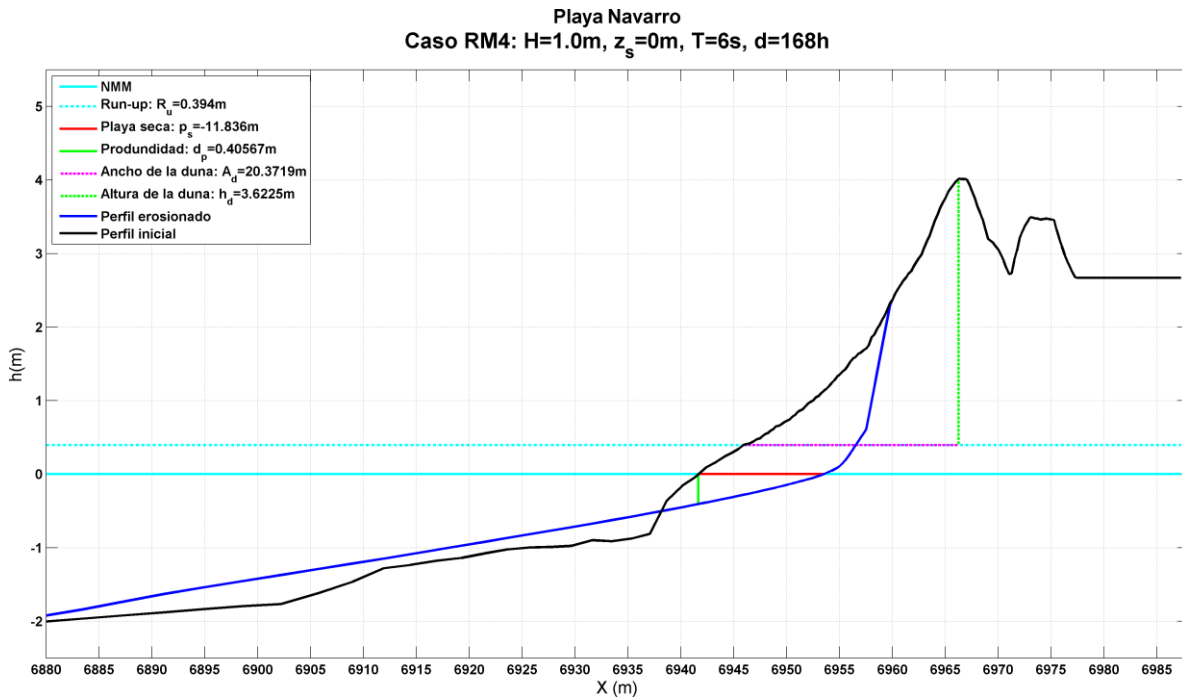


Figura VIII-30. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa

VIII.2.2 Régimen Extremal e Insólito

Playa Navarro
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

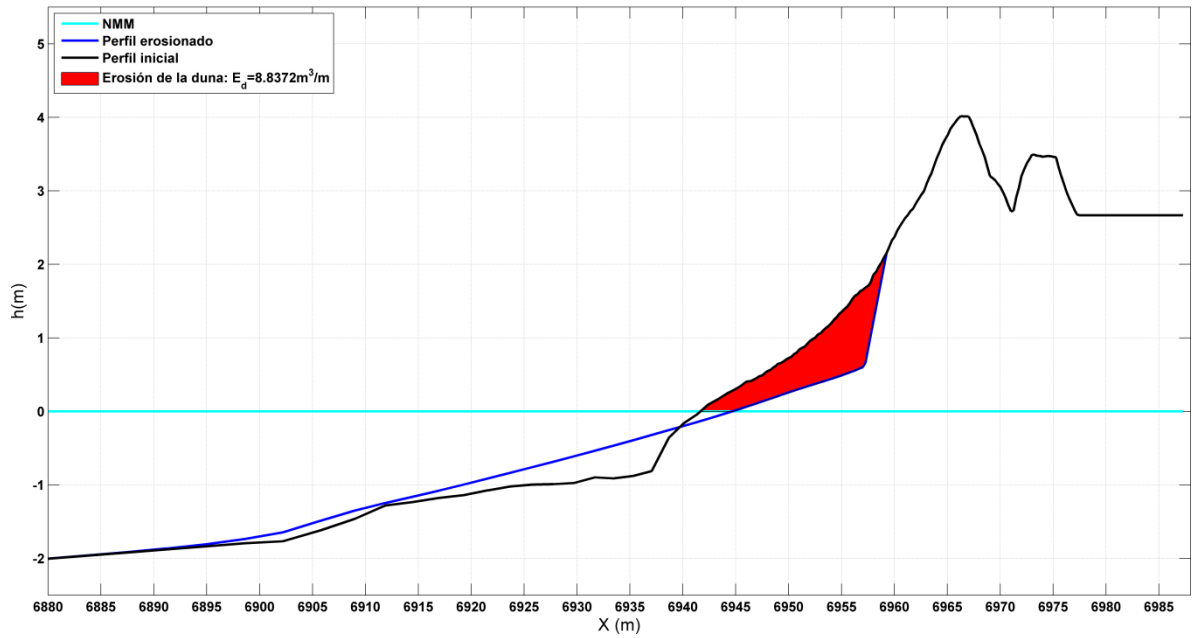


Figura VIII-31. Caso RE1. Erosión de la duna

Playa Navarro
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

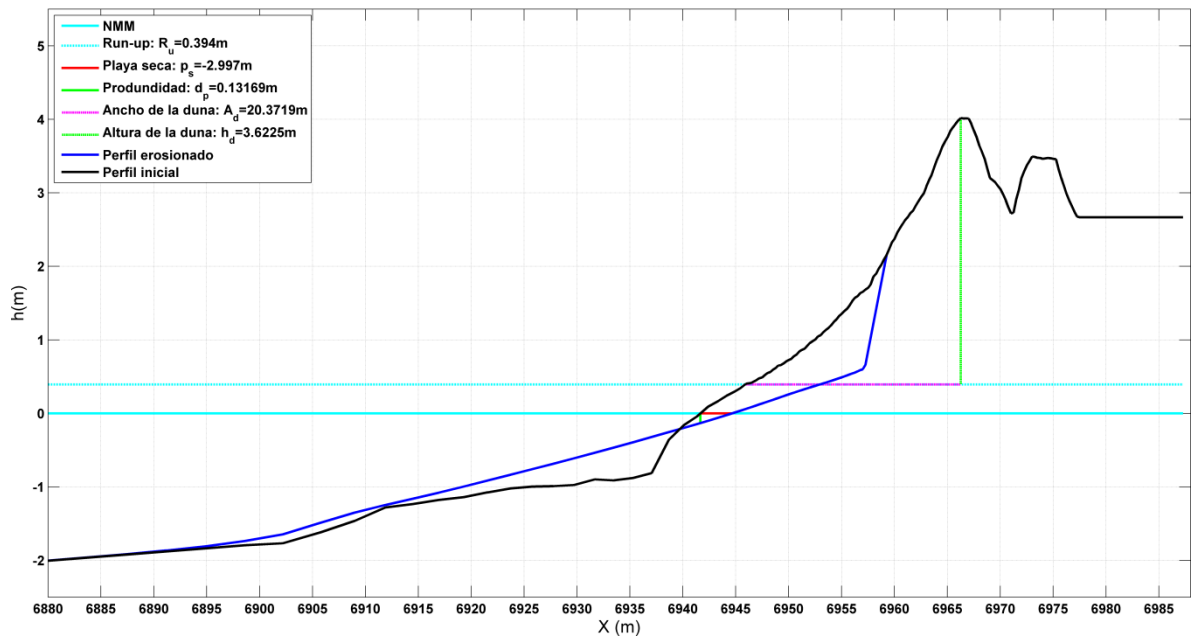


Figura VIII-32. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa

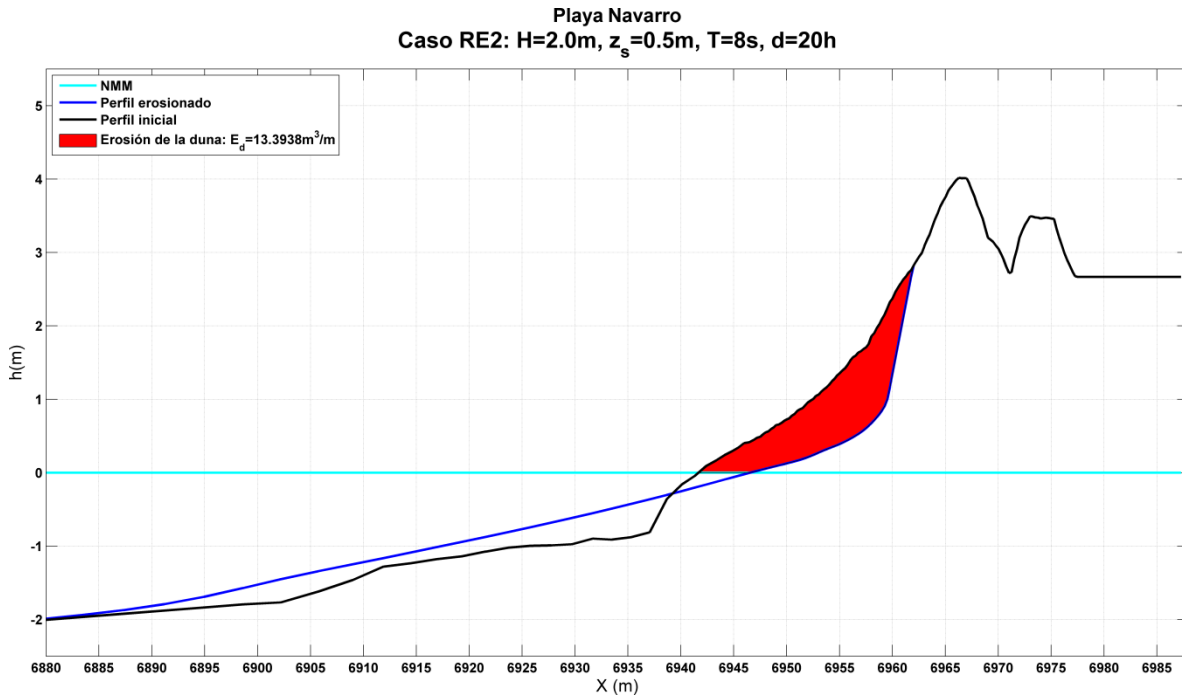


Figura VIII-33. Caso RE2. Erosión de la duna

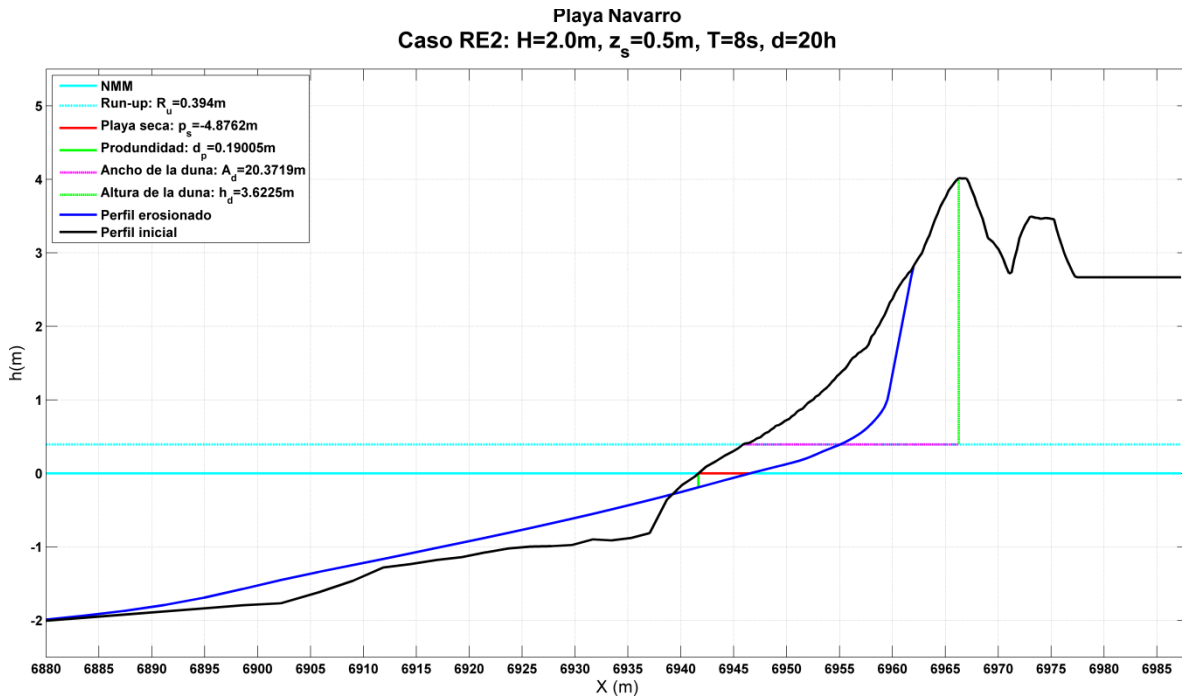


Figura VIII-34. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa

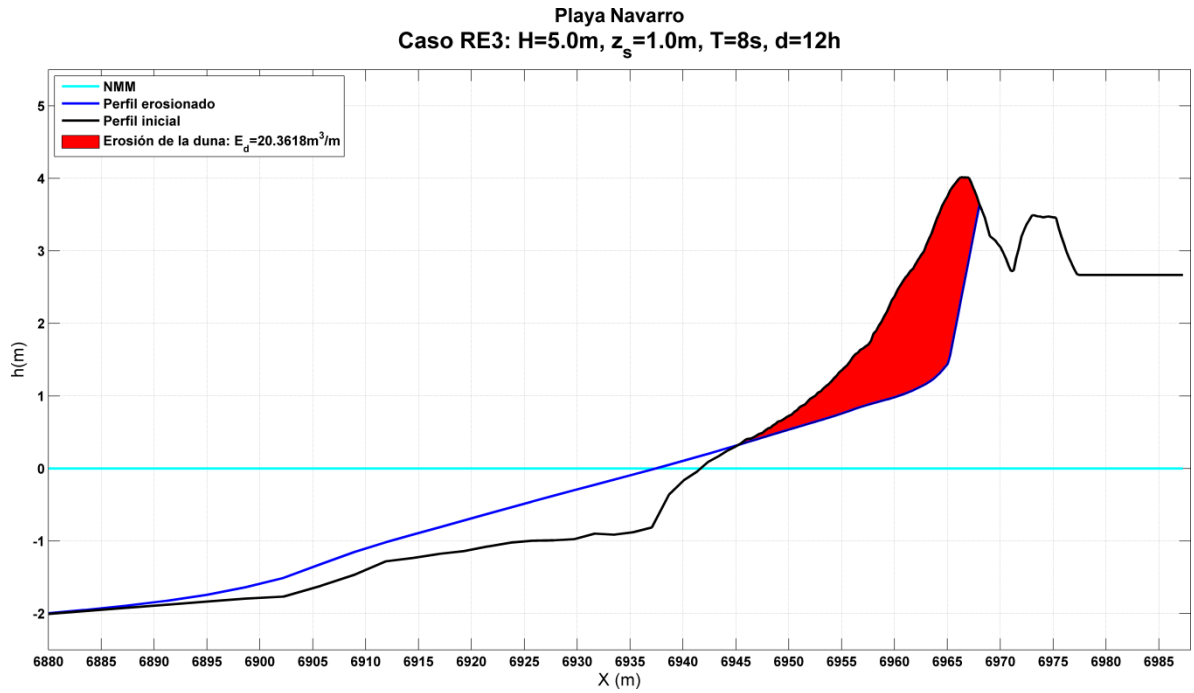


Figura VIII-35. Caso RE3. Erosión de la duna

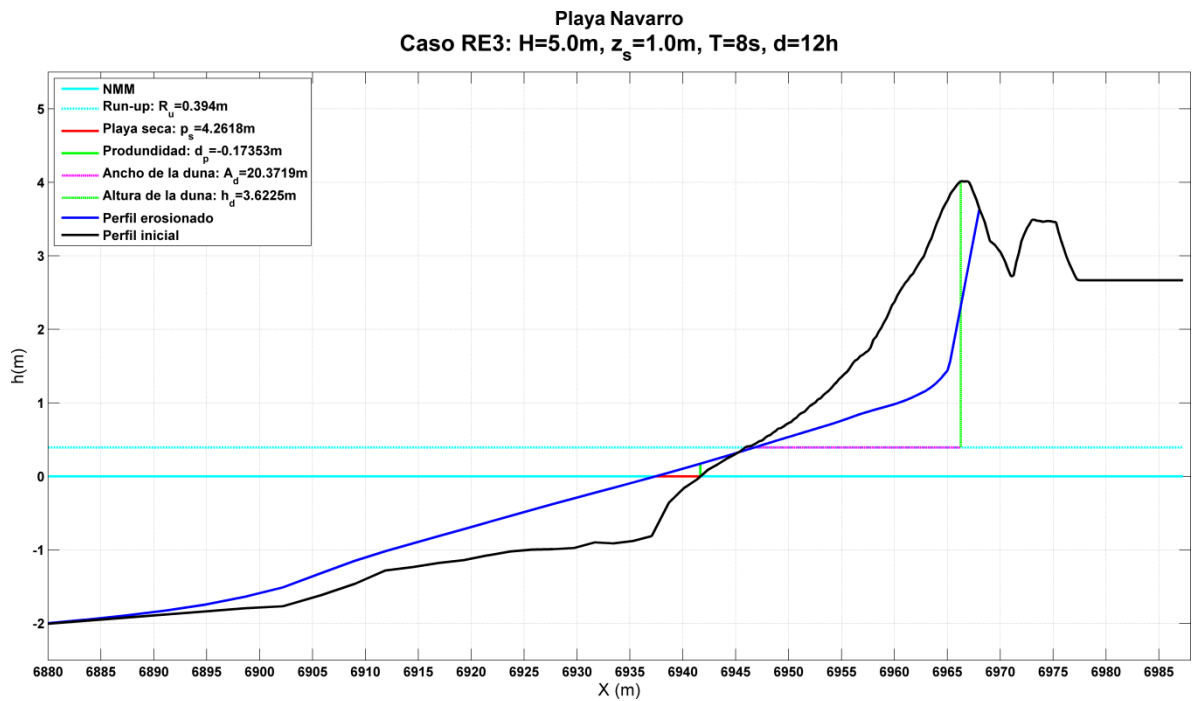


Figura VIII-36. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa

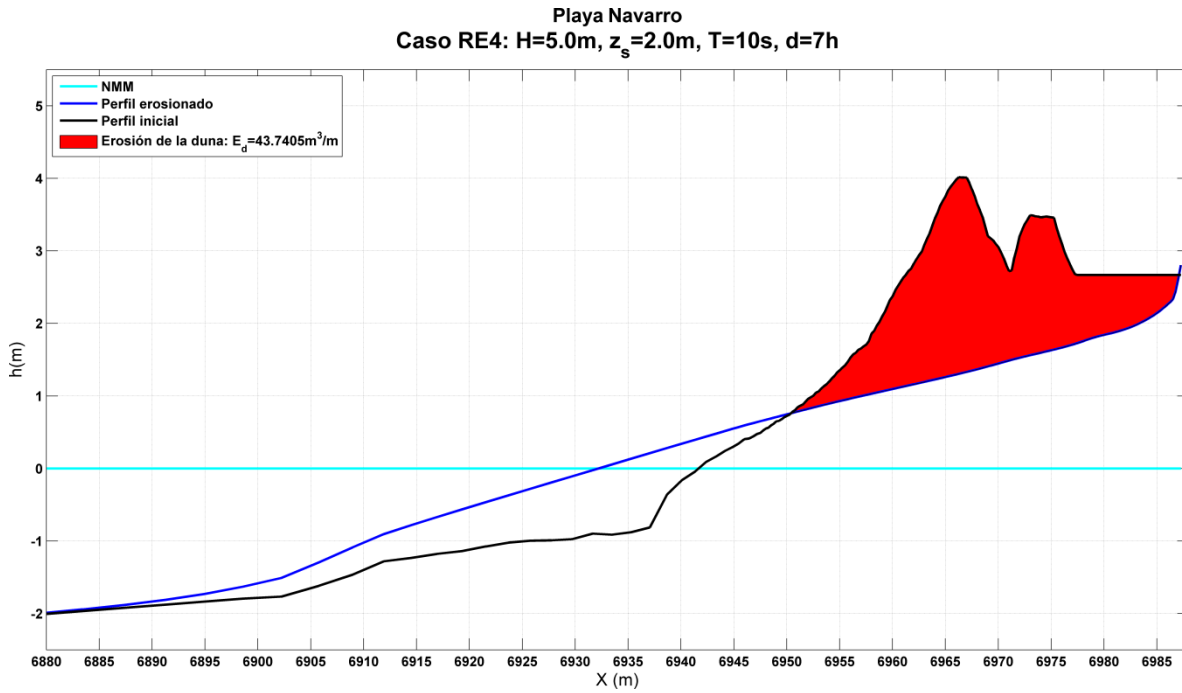


Figura VIII-37. Caso RE4. Erosión de la duna

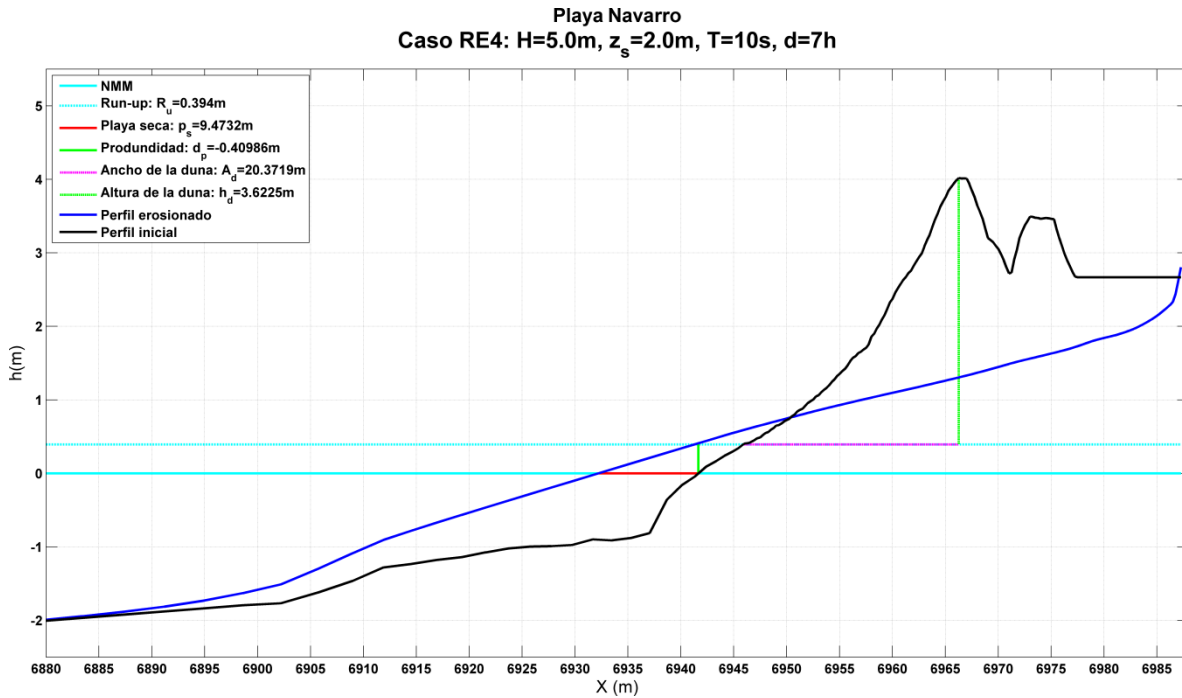


Figura VIII-38. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa

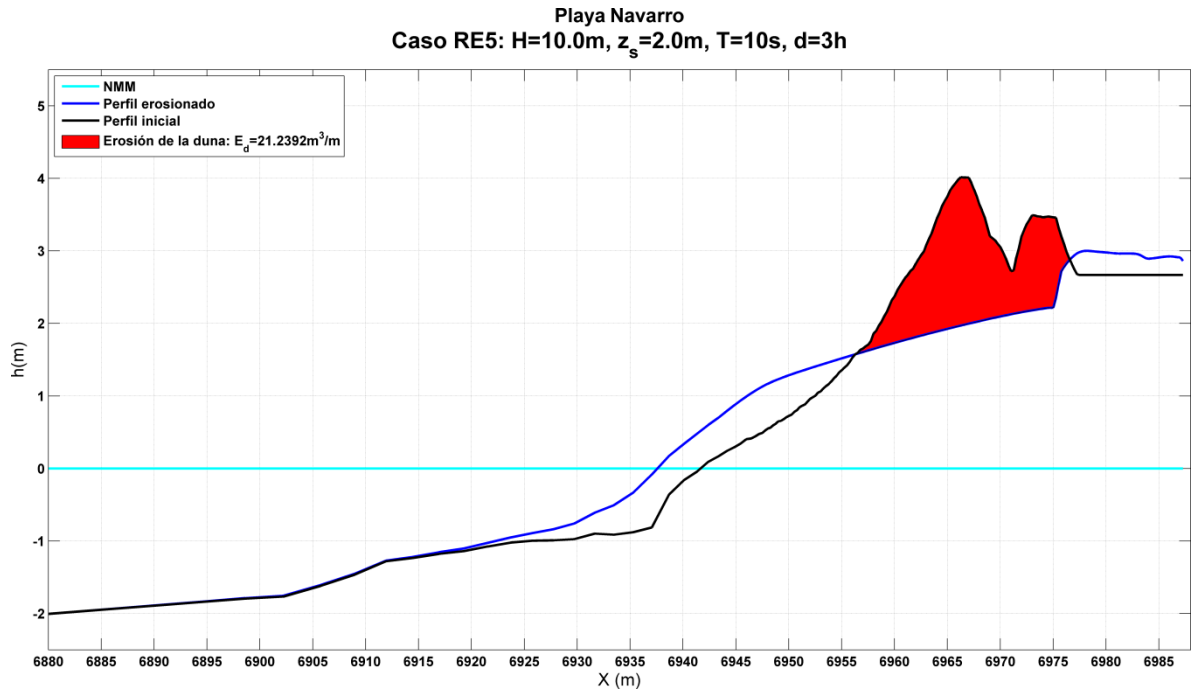


Figura VIII-39. Caso RE5. Erosión de la duna

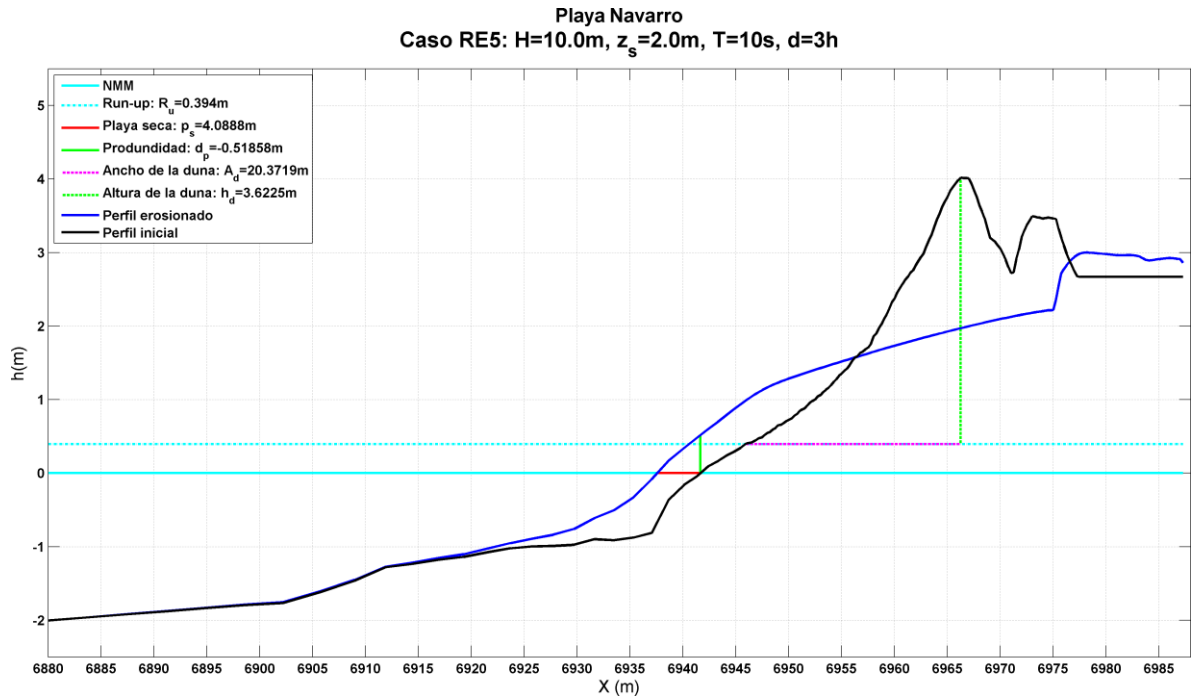


Figura VIII-40. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa

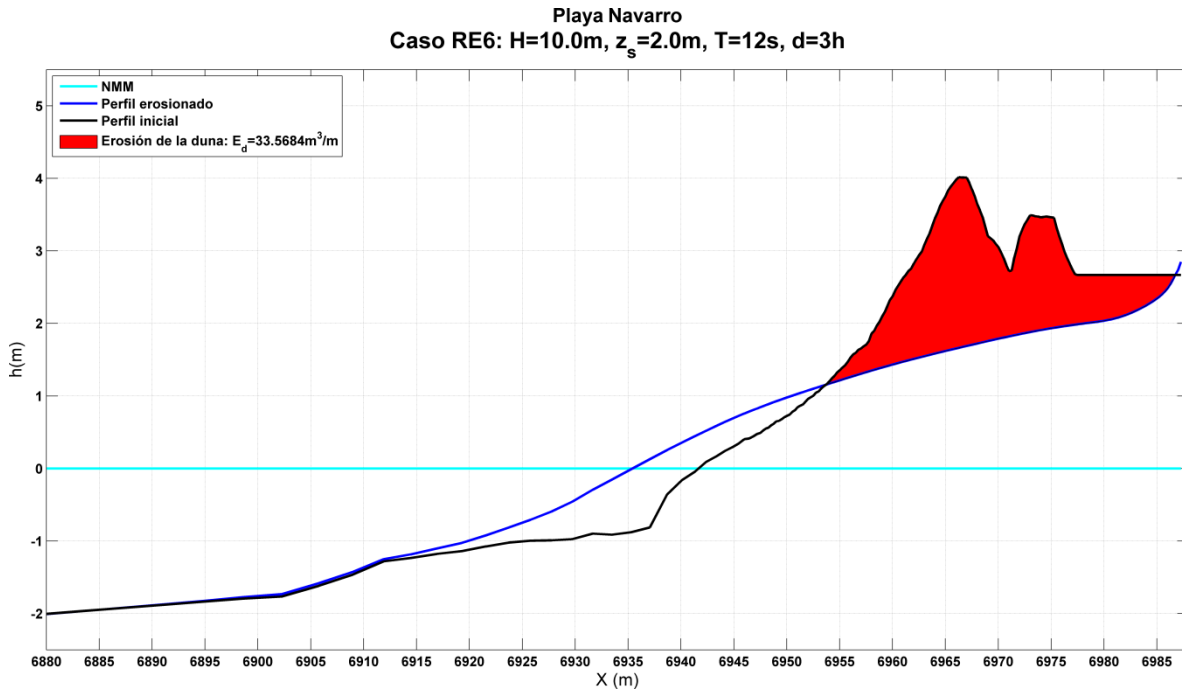


Figura VIII-41. Caso RE6. Erosión de la duna

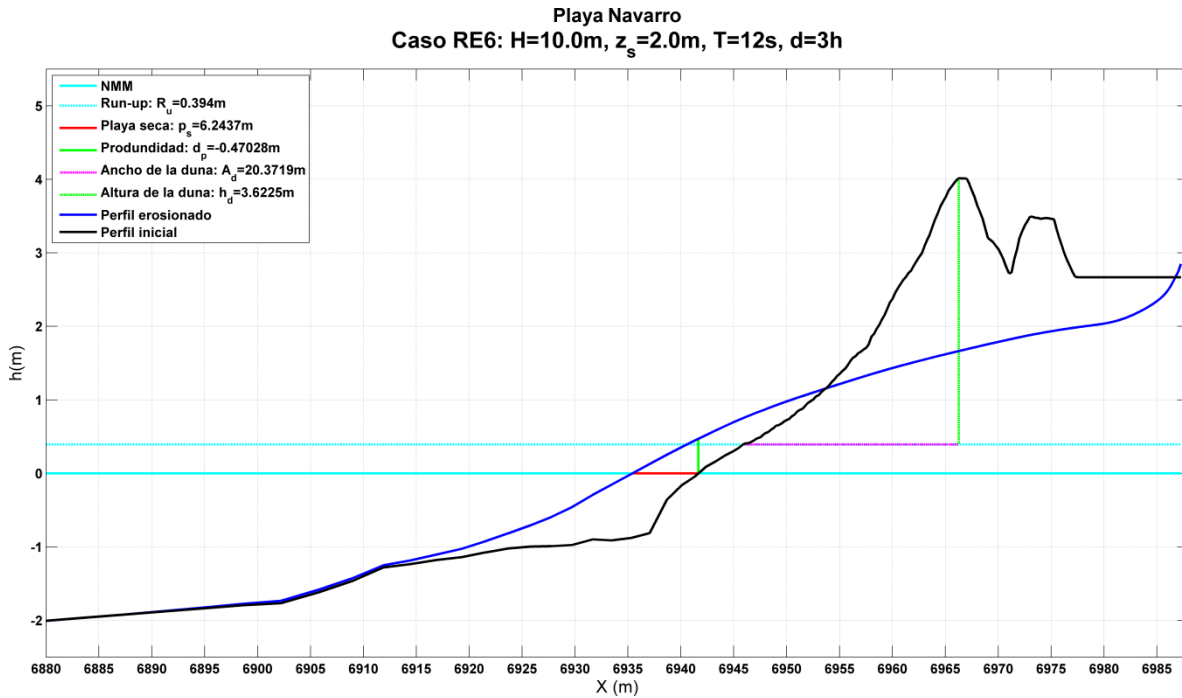


Figura VIII-42. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa

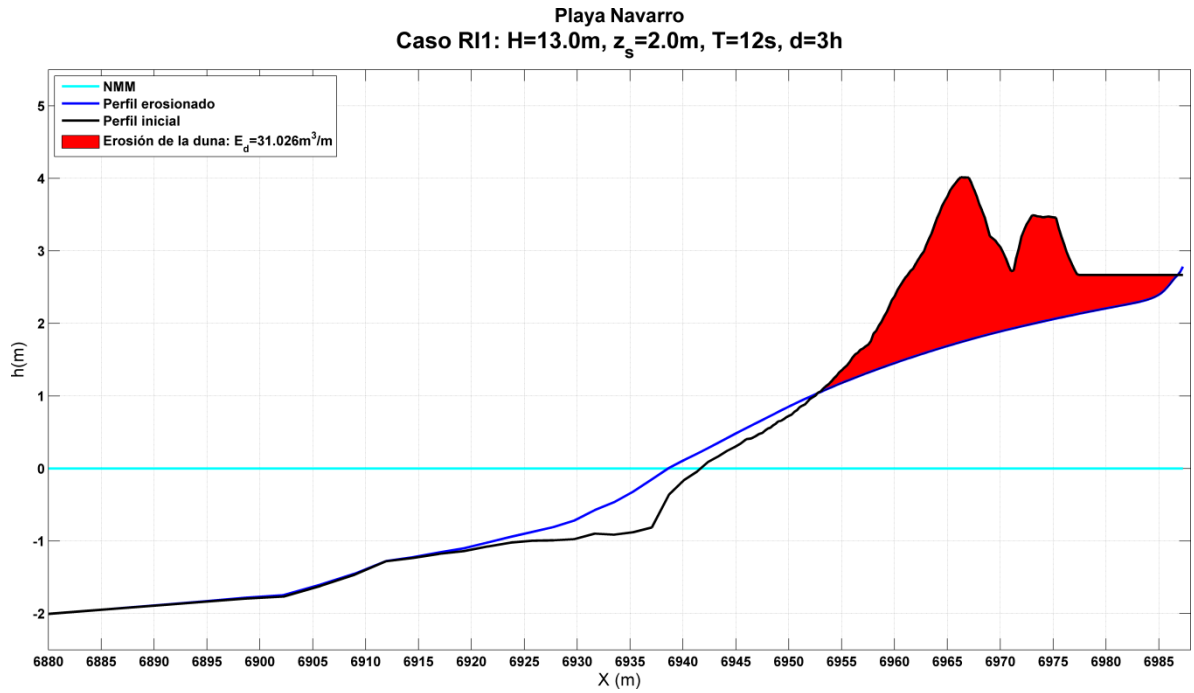


Figura VIII-43. Caso RI1. Erosión de la duna

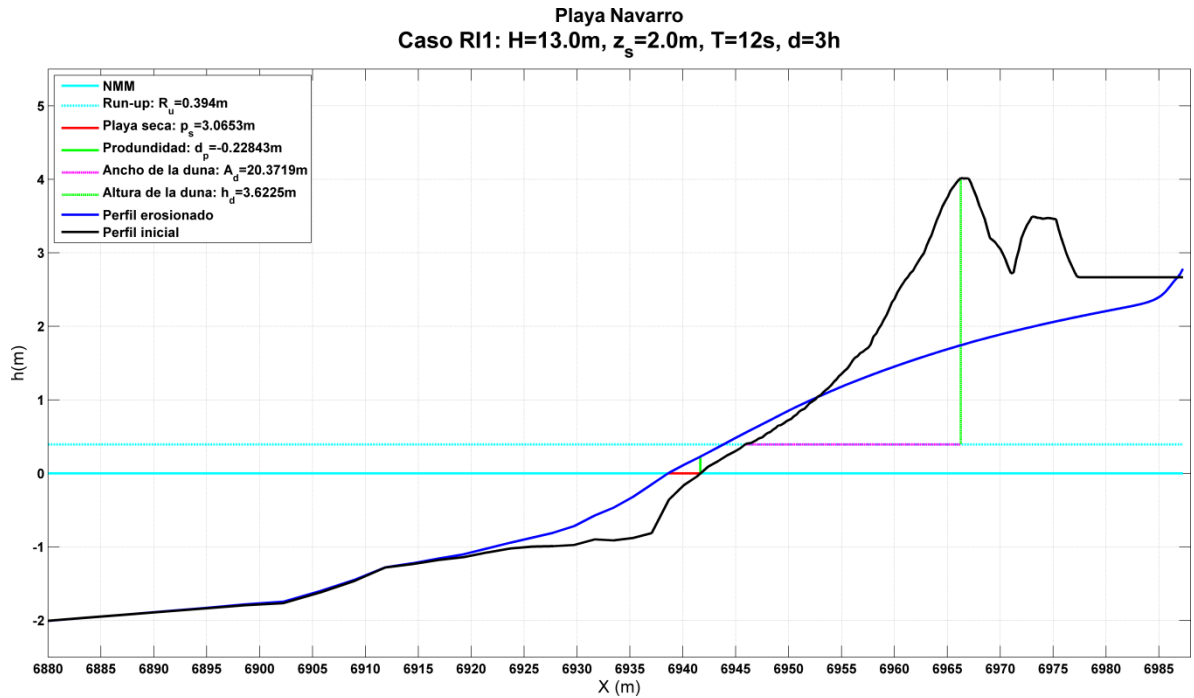


Figura VIII-44. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa

VIII.3 Playa Paraíso

VIII.3.1 Régimen Medio

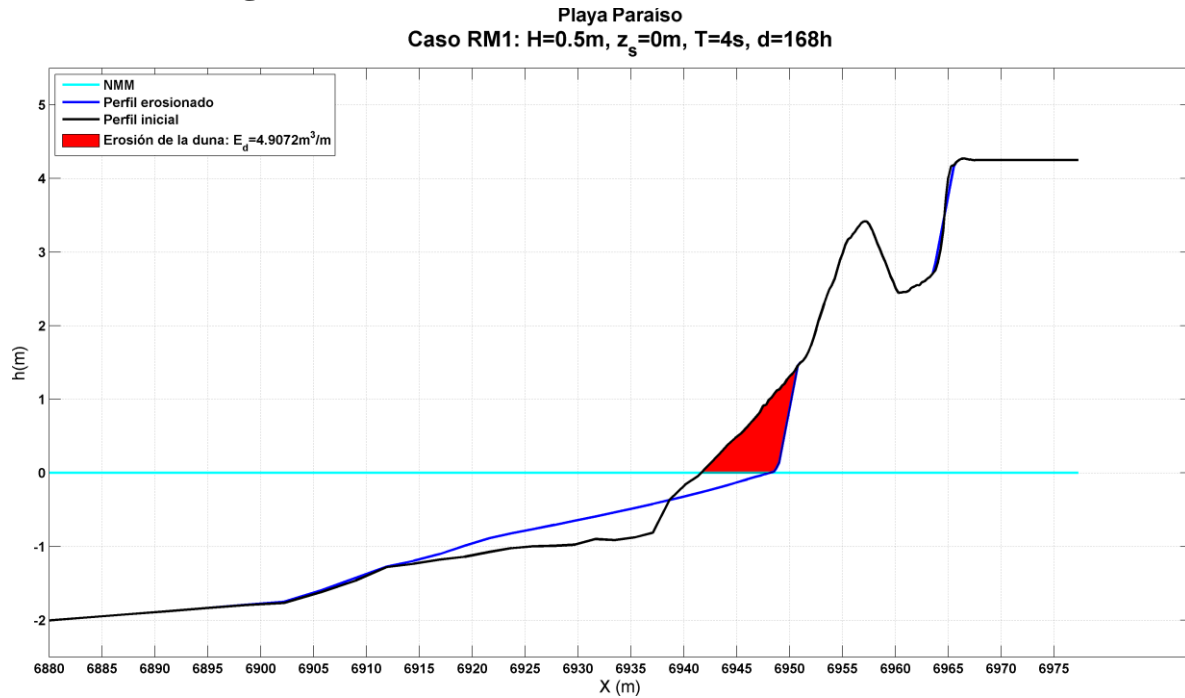


Figura VIII-45. Caso RM1. Erosión de la duna

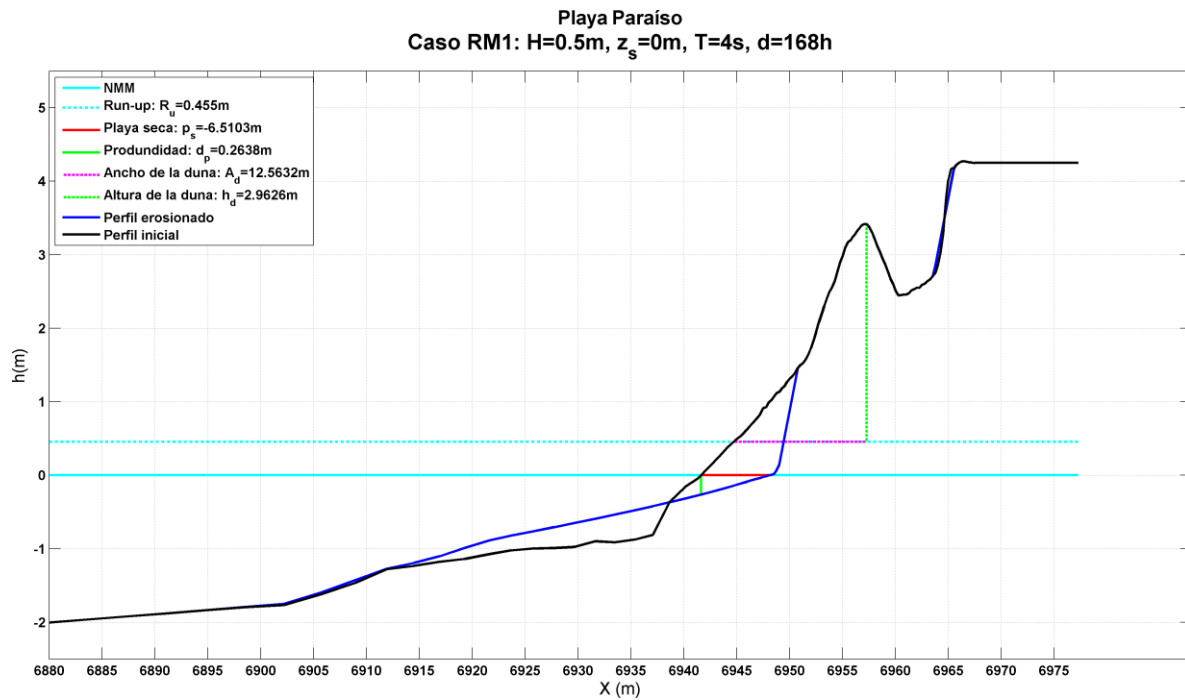


Figura VIII-46. Caso RM1. Recorrido de la línea de costa

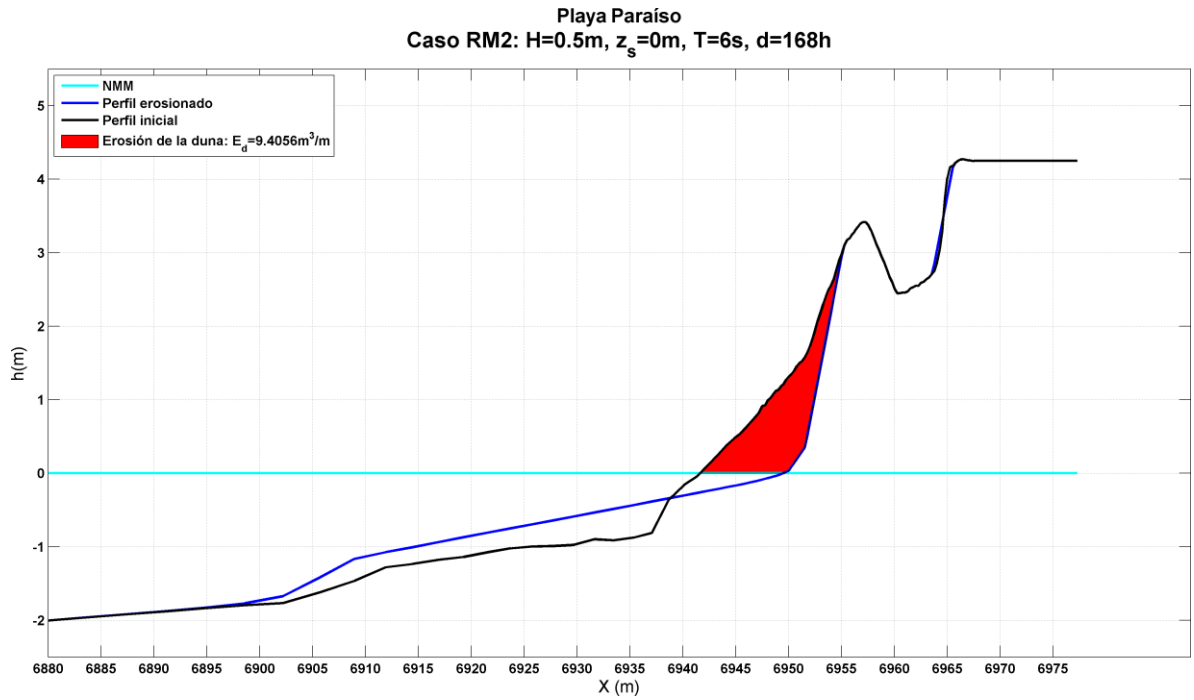


Figura VIII-47. Caso RM2. Erosión de la duna

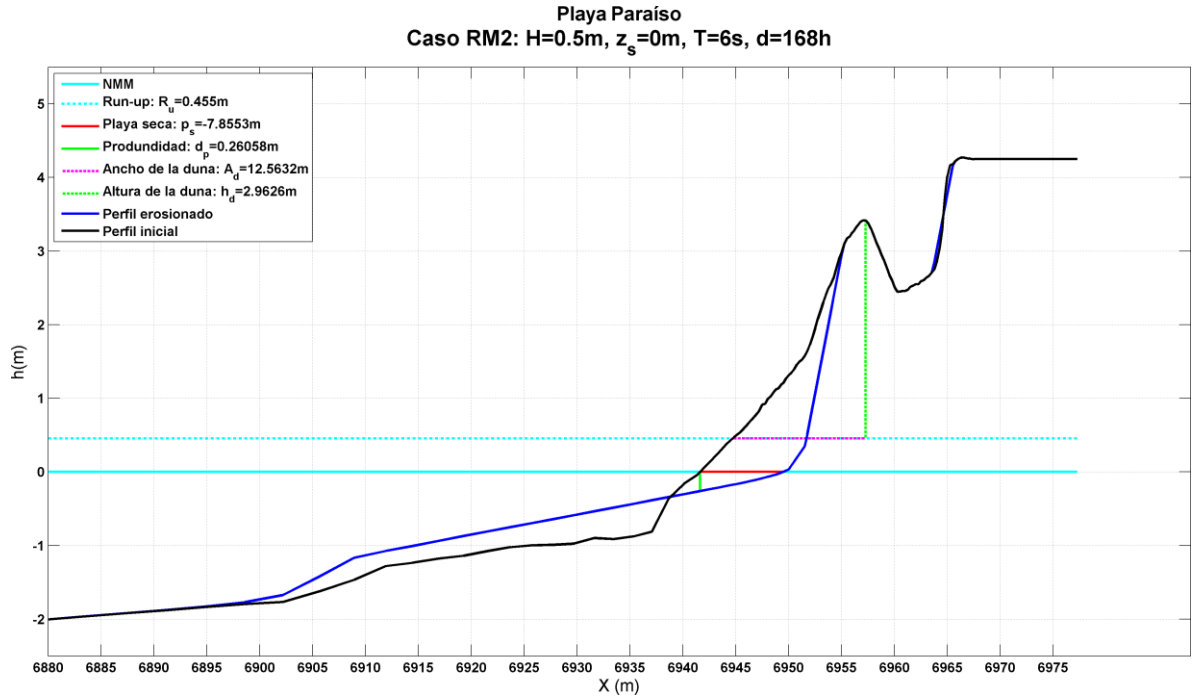


Figura VIII-48. Caso RM2. Recorrido de la línea de costa

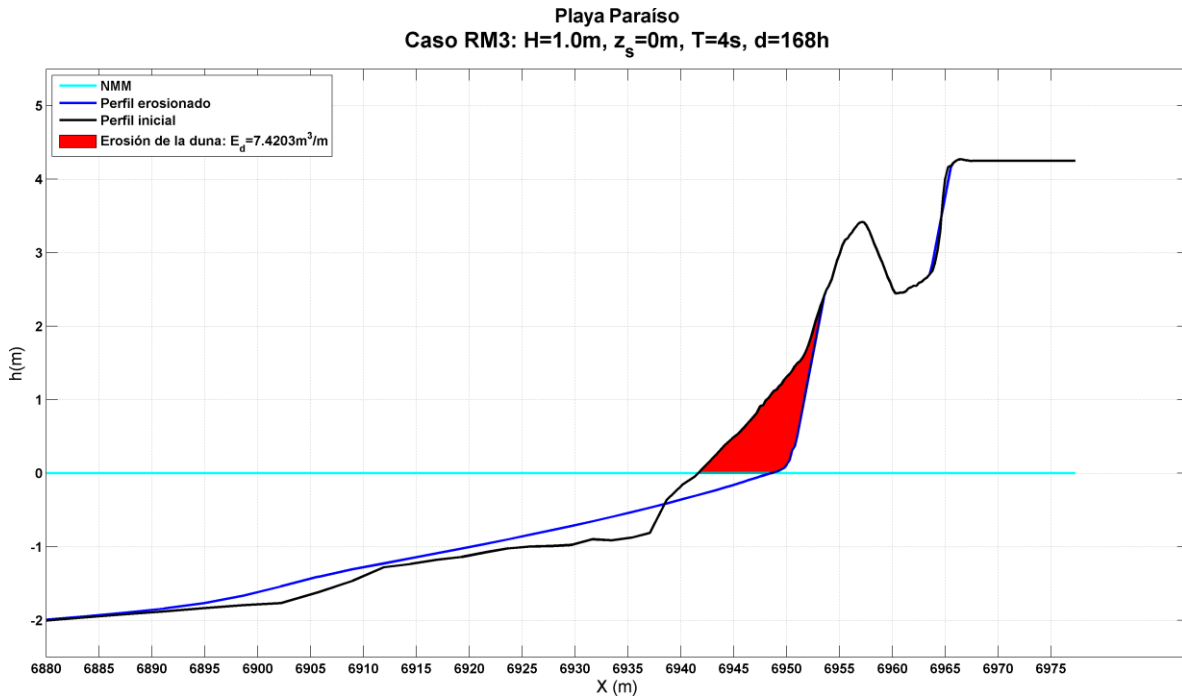


Figura VIII-49. Caso RM3. Erosión de la duna

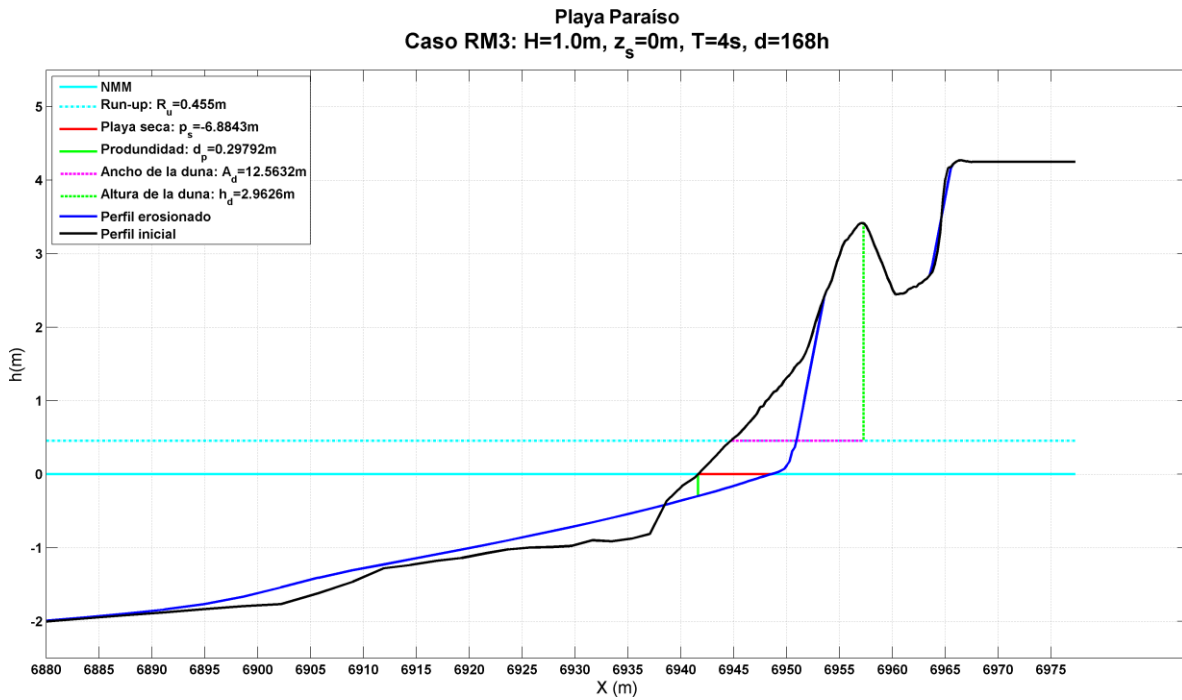


Figura VIII-50. Caso RM3. Recorrido de la línea de costa

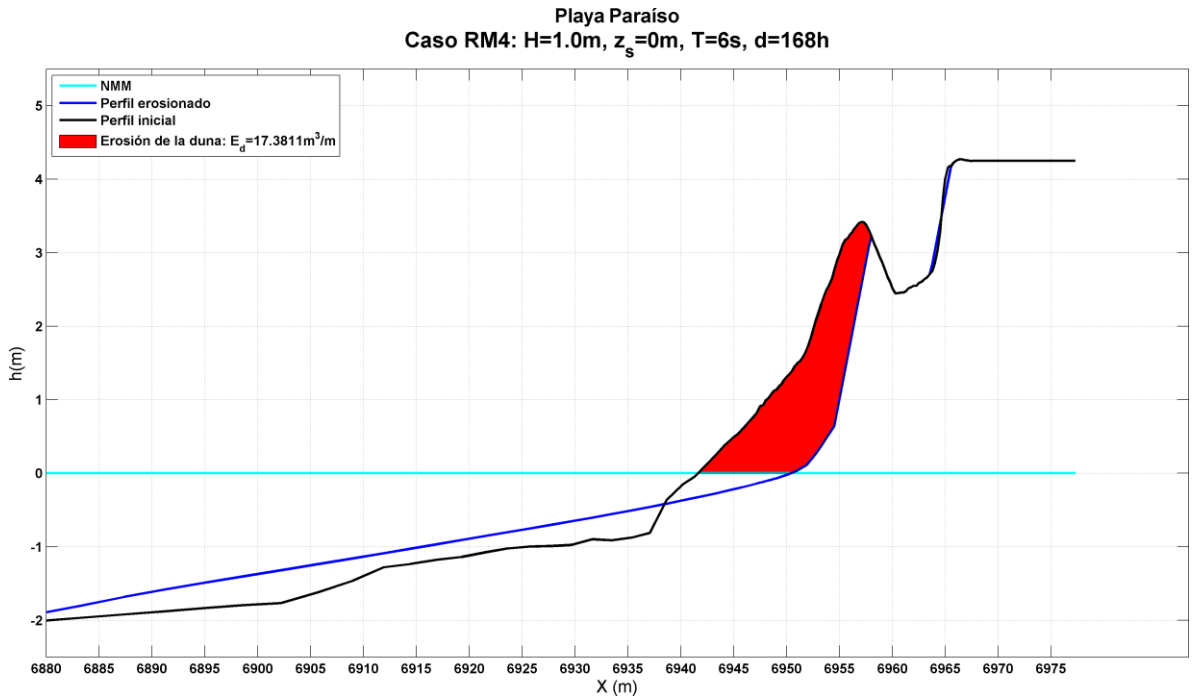


Figura VIII-51. Caso RM4. Erosión de la duna

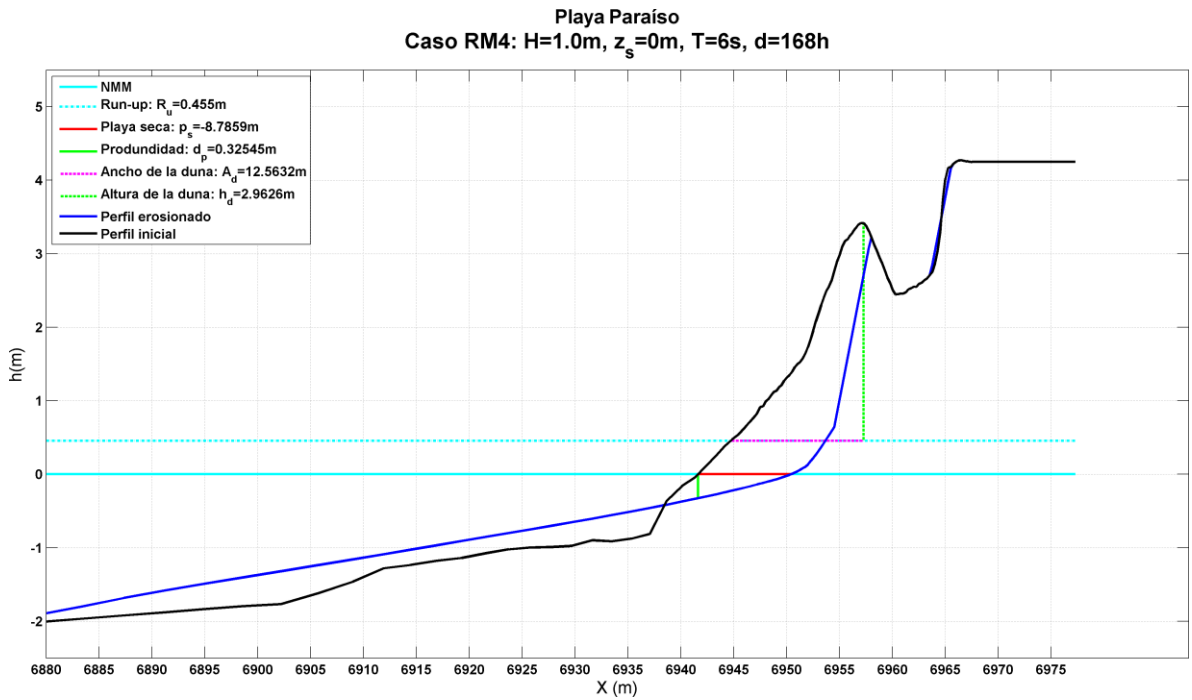


Figura VIII-52. Caso RM4. Recorrido de la línea de costa

VIII.3.2 Régimen Extremal e Insólito

Playa Paraíso
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

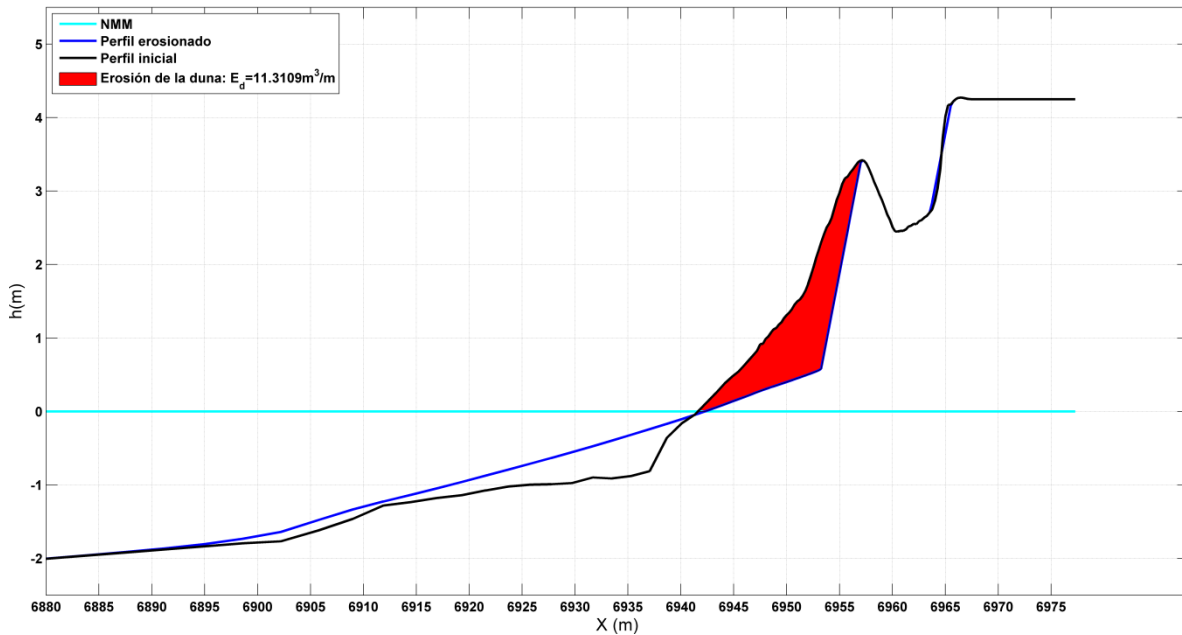


Figura VIII-53. Caso RE1. Erosión de la duna

Playa Paraíso
 Caso RE1: $H=2.0\text{m}$, $z_s=0.5\text{m}$, $T=6\text{s}$, $d=20\text{h}$

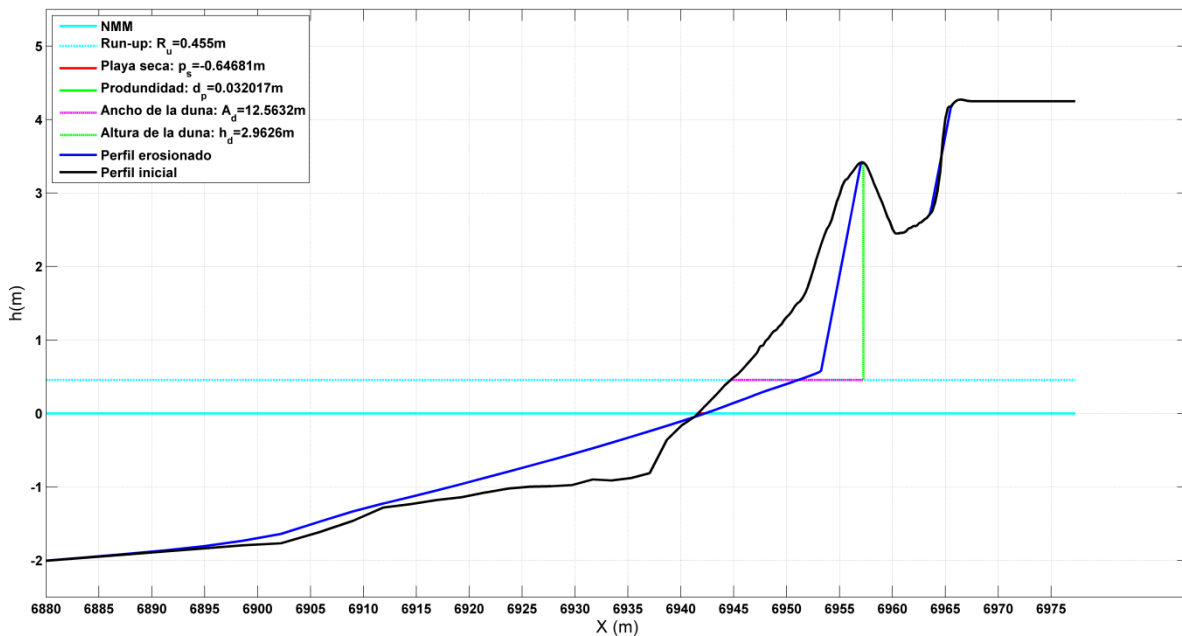


Figura VIII-54. Caso RE1. Recorrido de la línea de costa

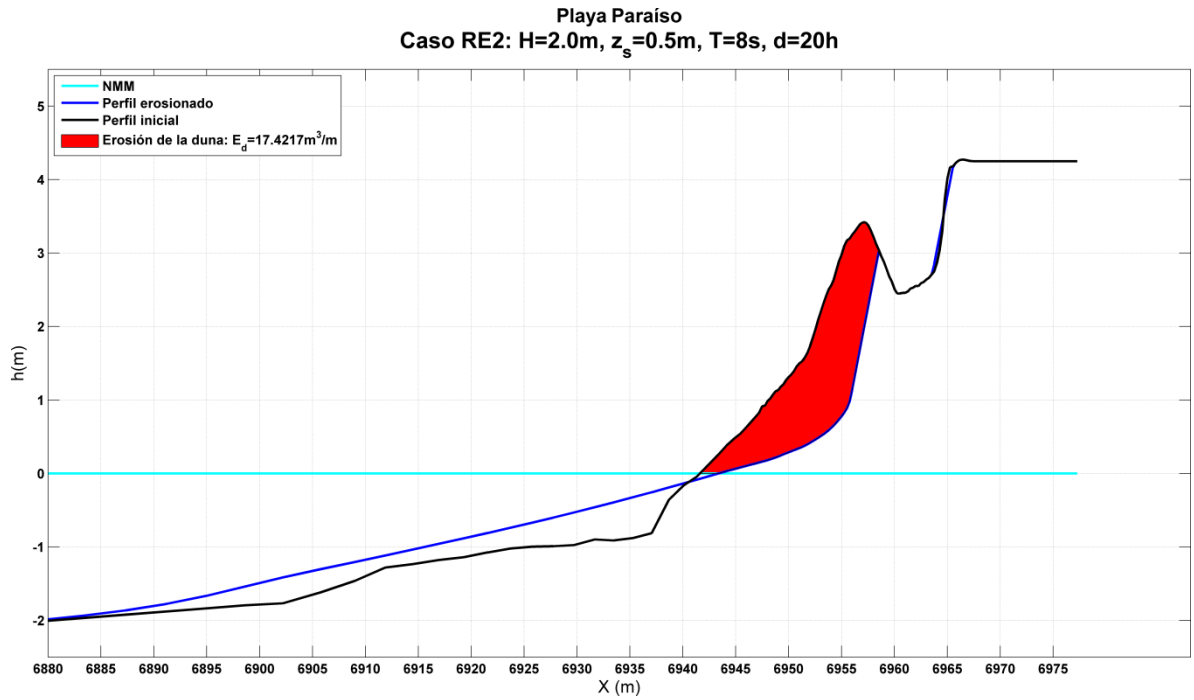


Figura VIII-55. Caso RE2. Erosión de la duna

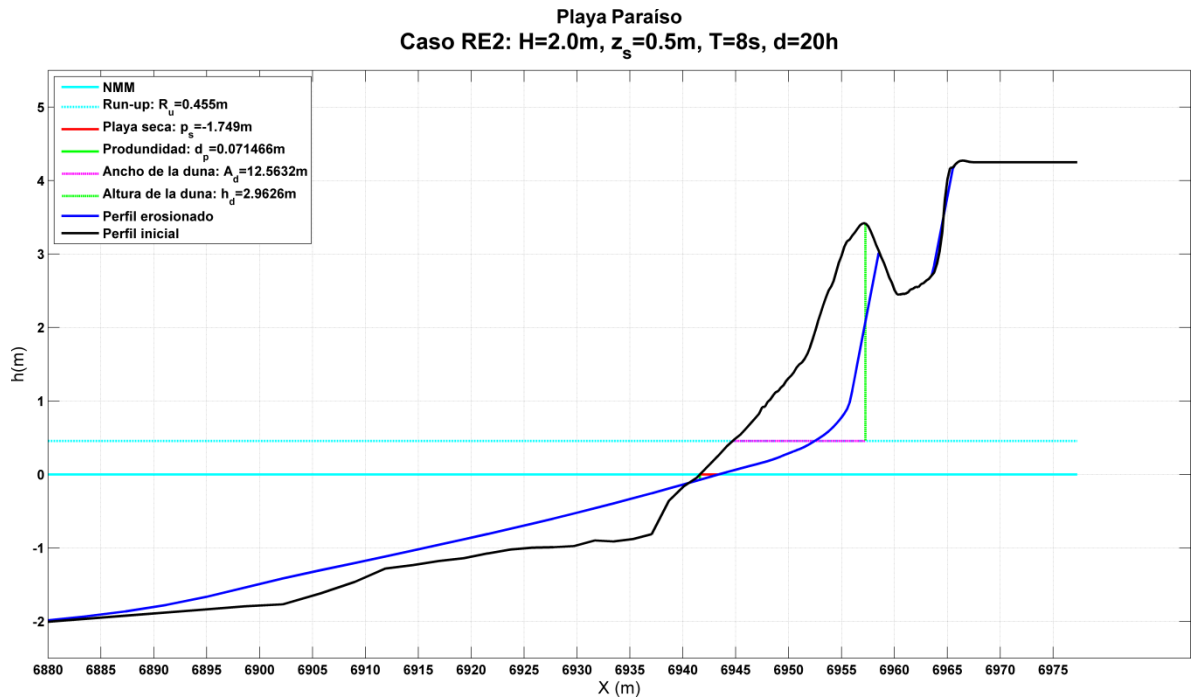


Figura VIII-56. Caso RE2. Recorrido de la línea de costa

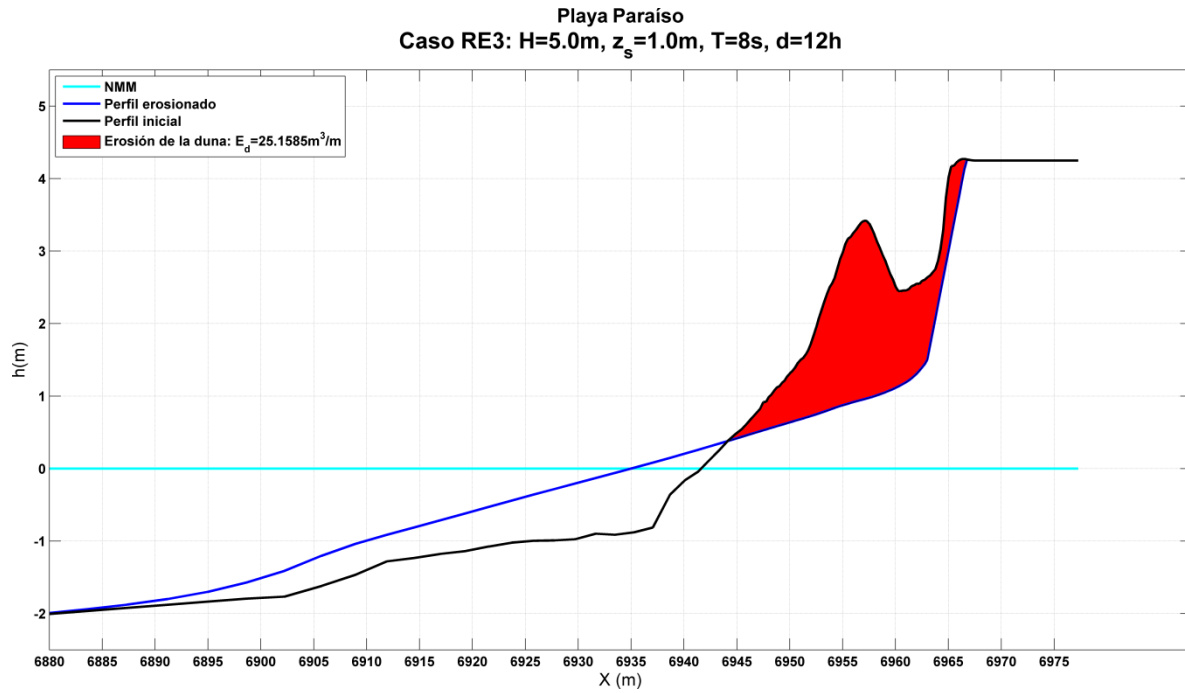


Figura VIII-57. Caso RE3. Erosión de la duna

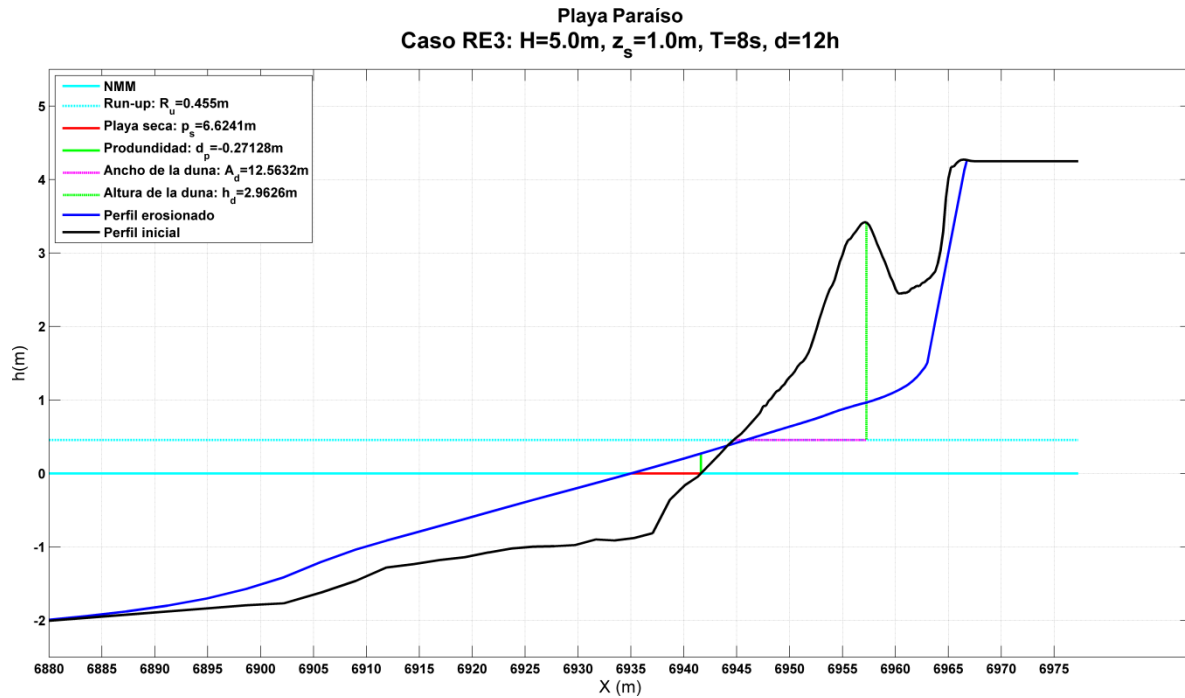


Figura VIII-58. Caso RE3. Recorrido de la línea de costa

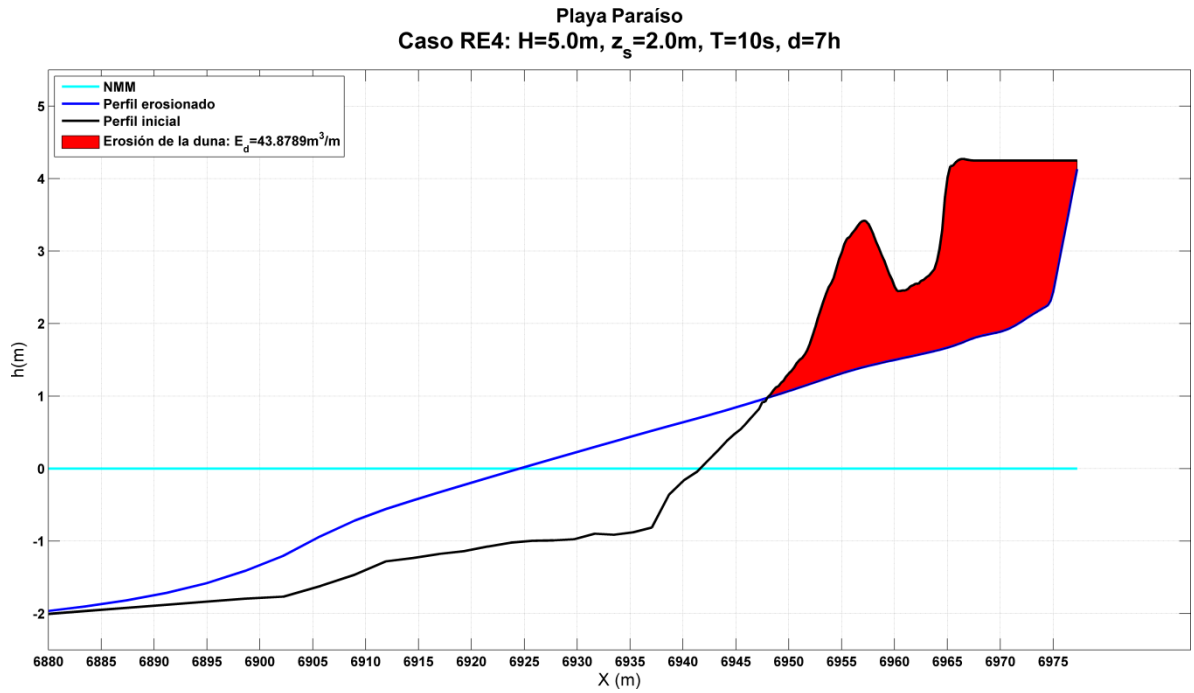


Figura VIII-59. Caso RE4. Erosión de la duna

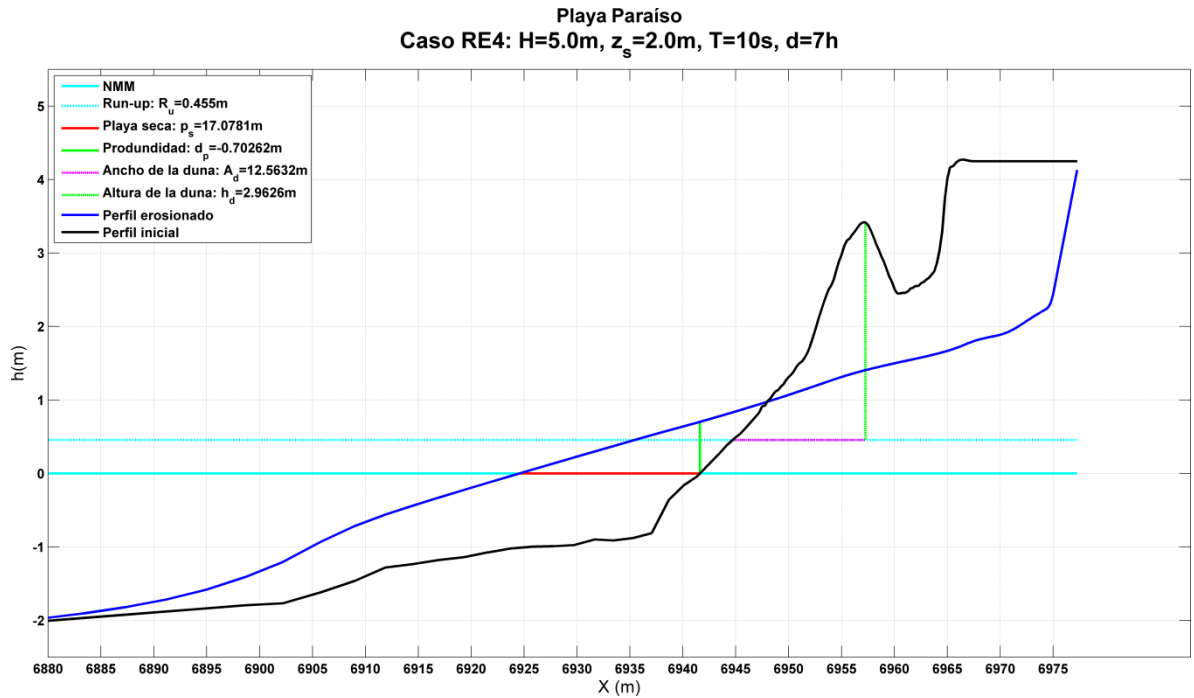


Figura VIII-60. Caso RE4. Recorrido de la línea de costa

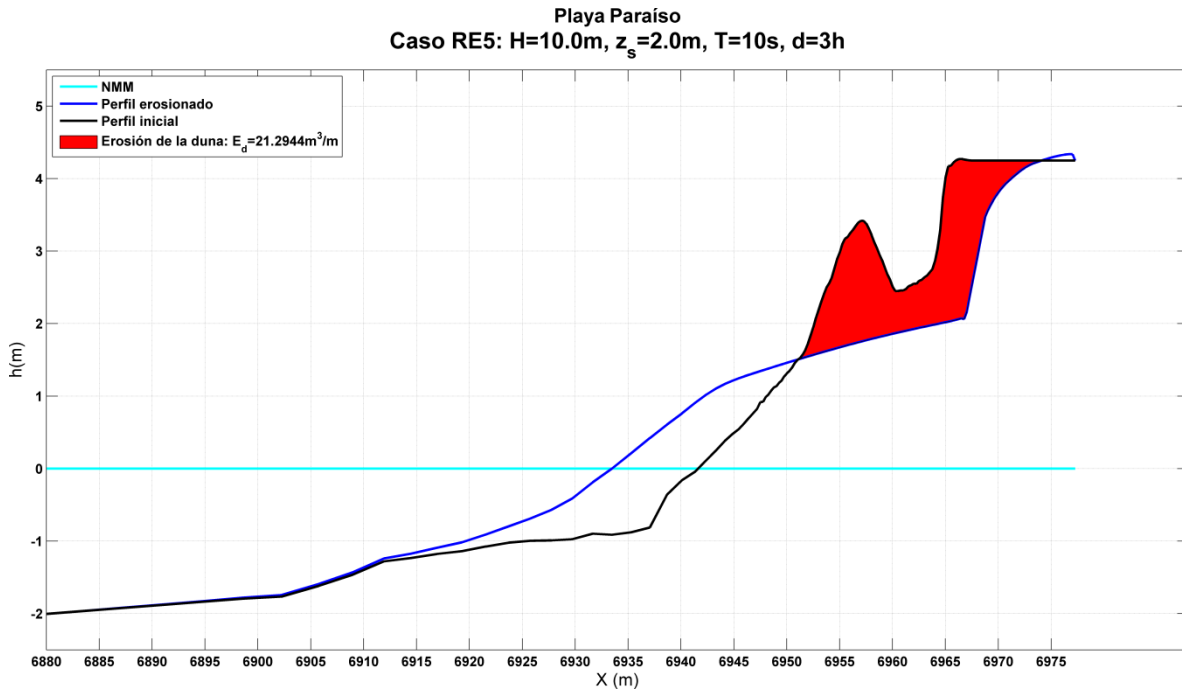


Figura VIII-61. Caso RE5. Erosión de la duna

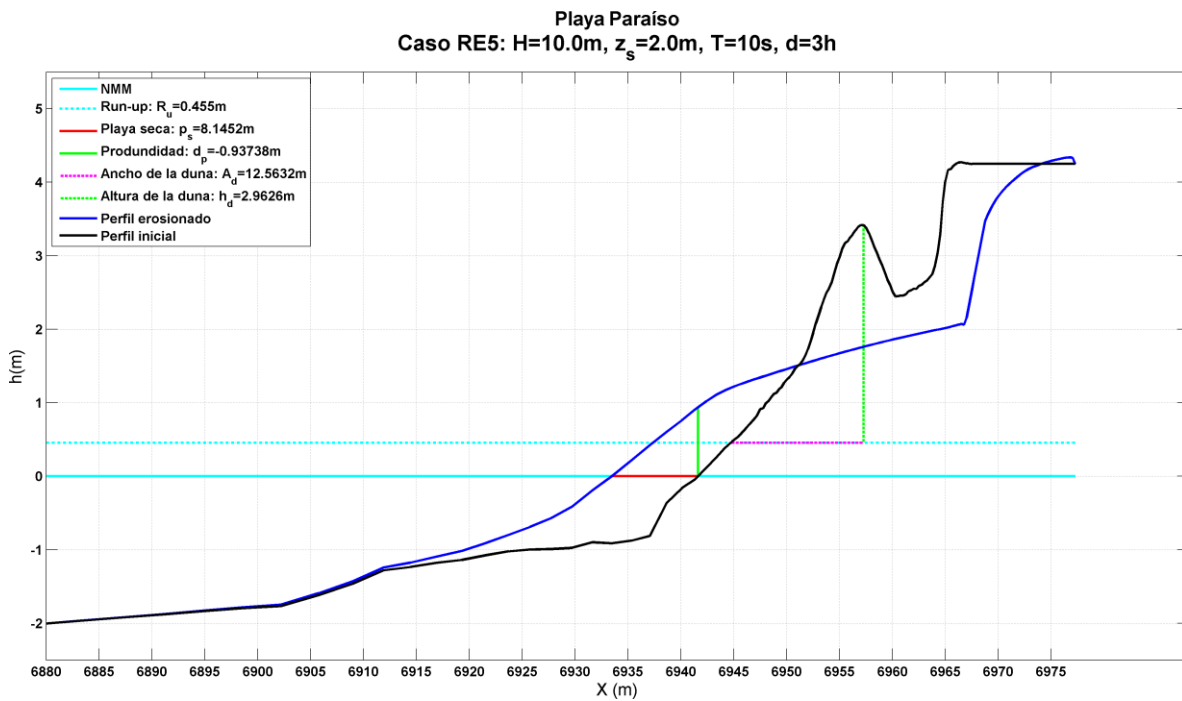


Figura VIII-62. Caso RE5. Recorrido de la línea de costa

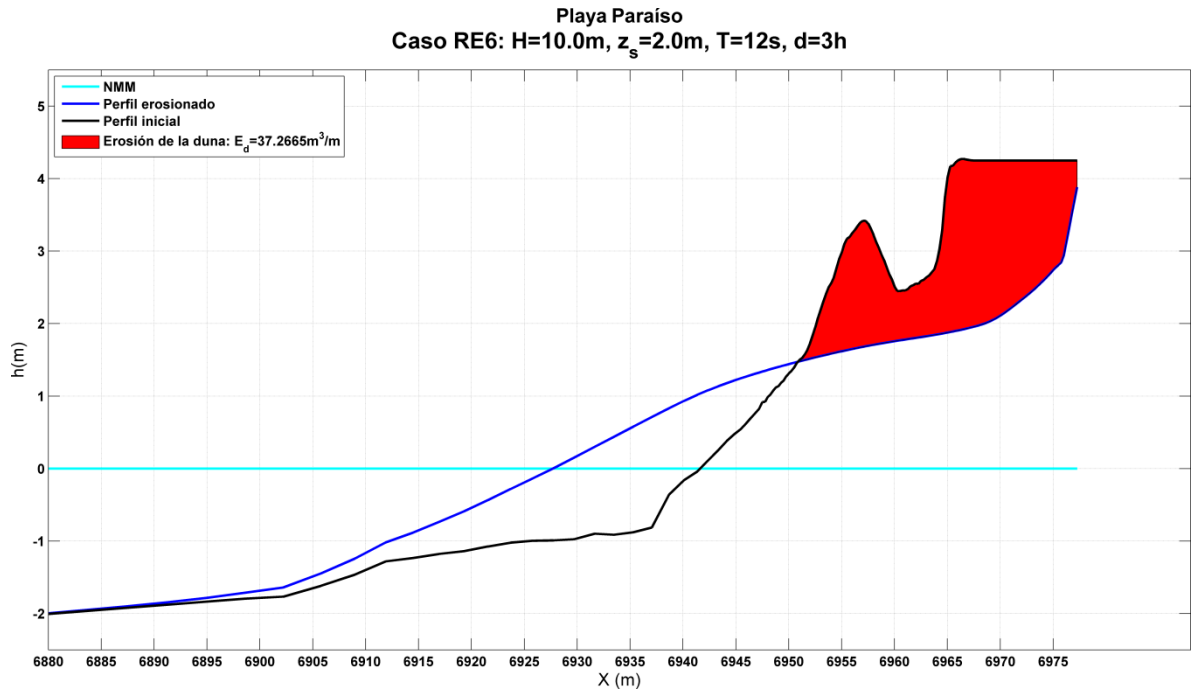


Figura VIII-63. Caso RE6. Erosión de la duna

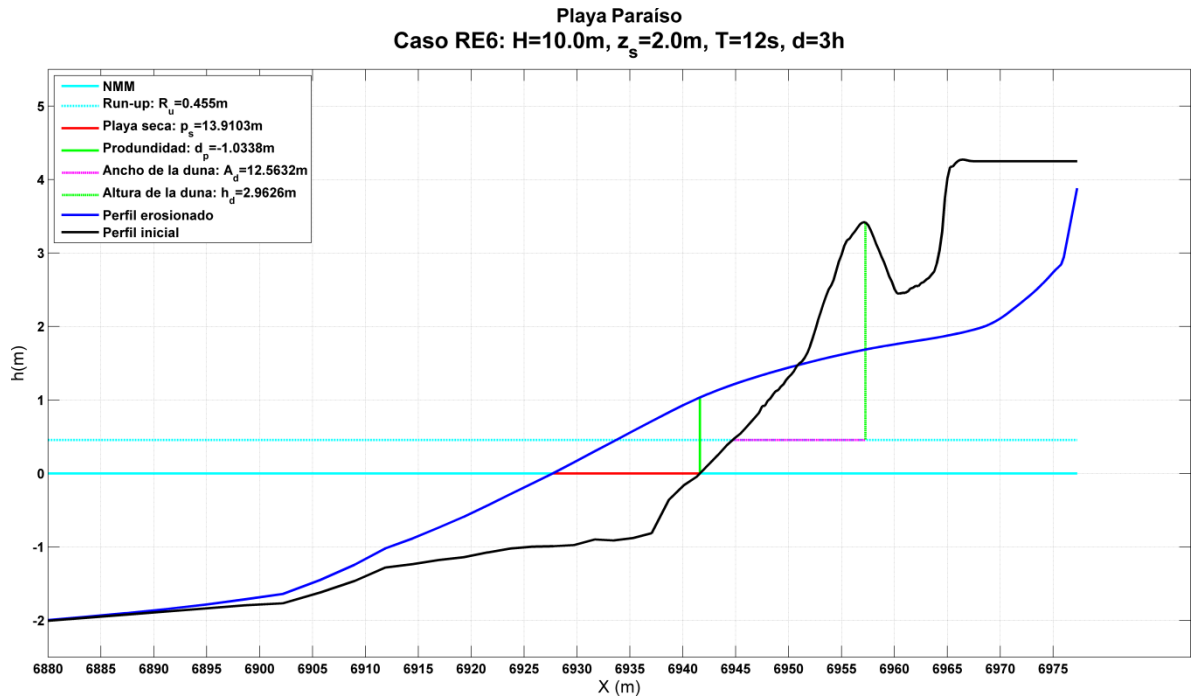


Figura VIII-64. Caso RE6. Recorrido de la línea de costa

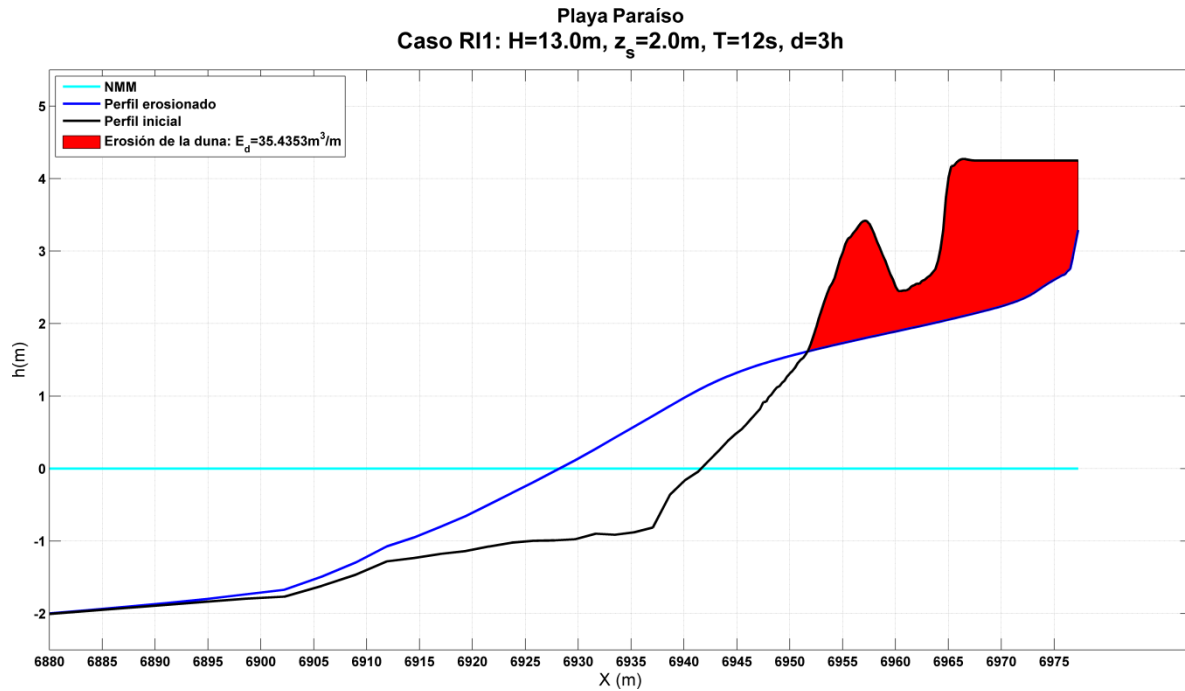


Figura VIII-65. Caso RI1. Erosión de la duna

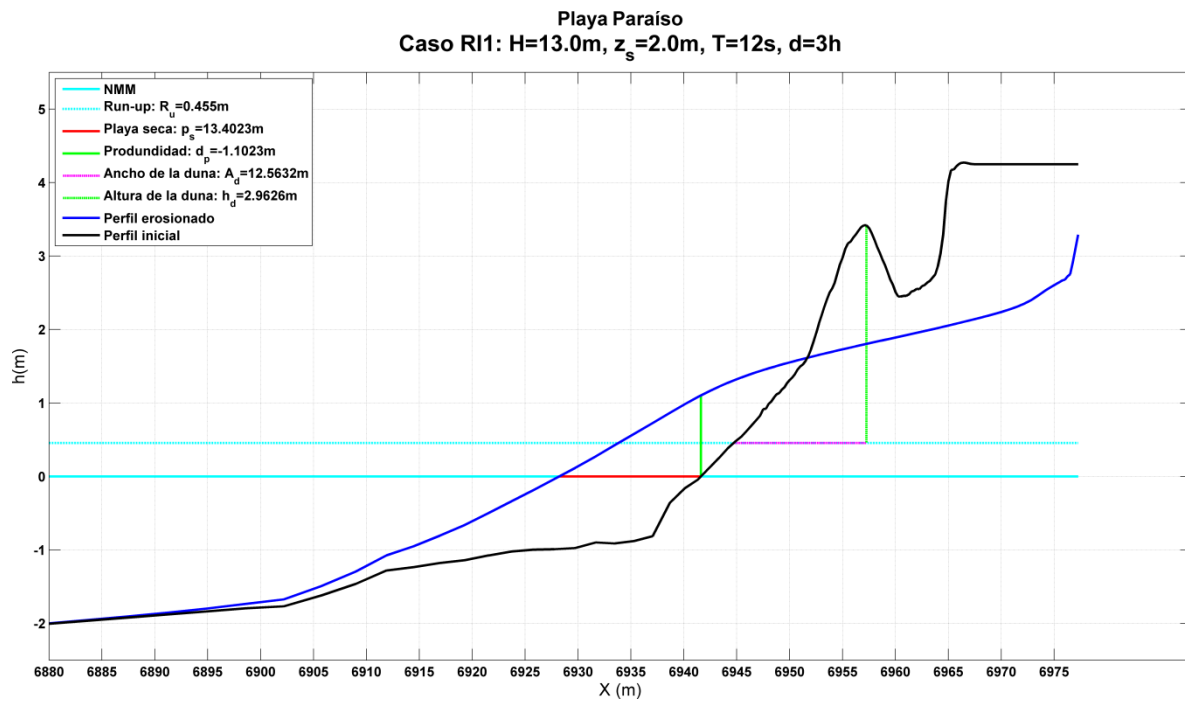


Figura VIII-66. Caso RI1. Recorrido de la línea de costa