Universidad de Valparaíso
CHILE

Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

Determinar si la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, cumple el objetivo al definir la Zona de Protección Litoral.

Sebastián Omar Correa Araya

Marzo 2017

APROBACIÓN

DETERMINAR SI LA NORMA DE EMISIÓN PARA LA REGULACIÓN DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LÍQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES, CUMPLE EL OBJETIVO AL DEFINIR LA ZONA DE PROTECCIÓN LITORAL.

Sebastián Omar Correa Araya

COMISIÓN REVISORA	**NOTA**	**FIRMA**
Mario Herrera Araya. Profesor guía.		
Cristian Flores Pérez Integrante comisión		
Matías Quezada Labra Integrante comisión		

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Sebastián Correa Araya	Mario Herrera Araya
Alumno	Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a:

Mis padres que me formaron como una persona llena de valores y amor incondicional. Mamá por todas las veces que has dejado de sonreír por verme sonreír.

Claudia y Joaquín por sacarme una sonrisa día a día, aunque este fuese el peor. Por demostrarme que se puede formar una familia en cualquier momento de la vida y por levantarme el ánimo cada vez que caí.

Mis hermanos, tíos, primos y sobre todo a mis abuelos, por hacerme sentir que lo más importante de una persona es la familia.

A cada uno profesores que me formaron en esta hermosa etapa universitaria. De manera especial al Sr. Mario Herrera que ha sido de gran apoyo en la etapa final de mi carrera y al Sr. Matías Quezada por todo el conocimiento y paciencia entregada.

Mis amigos Miguel, Ro, Eduardo y Jazmín, que a su modo permitieron que esta etapa sea realmente divertida.

Padres y hermanos de Claudia que me han permitido ser parte de su hermosa familia, abriéndome las puertas de su hogar a medida que crecía como estudiante y padre.

CONTENIDO

1 Resumen 1

2 Introducción 2

3 Objetivo general y Objetivos específicos 3
3.1 Objetivo general 3
3.2 Objetivos específicos 3

4 Alcances 4

5 Fundamento Teórico 5
5.1 Hidráulica Marítima 5
5.1.1 Oleaje 5
5.1.2 Teorías de Olas 7
5.1.3 Oleaje irregular 9
5.1.4 Transformación del Oleaje 14
5.2 Corrientes cercanas a la costa 18
5.2.1 Corrientes longitudinales 20
5.2.2 Corrientes de Retorno 20
5.2.3 Corrientes Transversales (Cross-shore) 21
5.2.4 corrientes de resaca (Undertow) 22
5.3 Modelo de Hindcast 23
5.3.1 Modelos de tercera generación 23
5.3.2 Modelo de Hindcast WAVEWATCH III 24
5.3.3 Modelo de Hindcast ERA-Interim 25
5.4 Modelo Numérico CMS 26
5.4.1 CMS-Wave 26
5.4.2 CMS-Flow 29
5.4.3 Particle Tracking Model (PTM) 30
5.5 Aspectos Normativos 32
5.5.1 Decreto Supremo Nº90 del 2000 32
5.5.2 Circular A-53/004 35

6 Metodología 37
6.1 Definicion de Variables 39
6.1.1 Fuente estadística del oleaje 39
6.1.2 Determinación de pendientes 40
6.2 Zona de Protección Litoral y su relación con la zona de Rotura 41
6.3 Influencia del Coeficiente P 43
6.3.1 Interpolación. 43

6.3.2 Análisis Estadístico. ... *43*
6.4 Modelación con CMS-Wave, CMS-Flow y PTM ... 45

7 Resultados ... **51**
7.1 Relación entre ZPL y AZR ... 51
7.2 Influencia del Coeficiente P ... 53
7.2.1 Interpolación. ... *53*
7.2.2 Interpolación Lineal y Aplicación de Splines Cubicos ... *55*
7.2.3 Análisis Estadístico ... *56*
7.3 Modelación con CMS-Wave, Cms-Flow y PTM. ... 57
7.3.1 Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,07 ... *58*
7.3.2 Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,1 ... *62*
7.3.3 Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,44 ... *66*

8 Análisis de resultados y discusiones ... **70**
8.1 Relación entre la ZPL y el AZR. ... 70
8.2 Influencia del Coeficiente P ... 72
8.2.1 Interpolación Lineal y aplicación de Spline Cúbico ... *72*
8.2.2 Análisis Estadístico al Coeficiente P. ... *72*
8.3 Modelación con CMS-Wave, CMS-Flow y PTM ... 73

9 Conclusiones ... **74**

10 Referencias bibliográficas y otras fuentes de información ... **76**

11 Anexos ... **80**
11.1 Análisis Estadístico del Coeficiente P ... 80
11.2 Graficos del porcentaje de excedencia por nodo ... 86
11.3 Resultados de las modelaciones con SMS ... 97
11.3.1 Para la pendiente 0,07 ... *97*
11.3.2 Para la pendiente 0,1 ... *99*
11.3.3 Para la pendiente 0,44 ... *101*

LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1: Onda Sinusoidal Elementa (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991). 5
Figura 5-2: Clasificación de ola por frecuencia (Fuente: Kinsman, 1965). 5
Figura 5-3: A) Oleaje tipo Swell; B) Oleaje tipo Sea. (Fuente: Silva, 2005) 7
Figura 5-4: Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. (Fuente:Méhauté, 1976). 8
Figura 5-5: A) Serie de desnivelación medida. B) Olas calculadas cruce ascendente por cero. (Fuente: McCormick, 2010) 9
Figura 5-6: El oleaje como suma de ondas sinusoidales. (Fuente: Holthuijsen, 2007) 10
Figura 5-7: A) Banda ancha, función irregular. B) Banda estrecha, función suave. (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991) 11
Figura 5-8: Trasformación de un espectro de aguas profundas JONSWAP a uno de aguas someras TMA. (Fuente: Holthuijsen, 2007) 13
Figura 5-9: Esquema de ola refractada (Fuente: Kamphuis, 2000). 14
Figura 5-10: Esquema de Ola Difractada (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991). 15
Figura 5-11: Patrones de circulación cercanos a la costa en función del ángulo de incidencia del oleaje (Fuente: U.S. Army Corps of Engenieers, 2002)..... 19
Figura 5-12: Corrientes longitudinales (Fuente:http://oceanservice.noaa.gov) 20
Figura 5-13: Corrientes de retorno (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov)..... 21
Figura 5-14: Corrientes transversales (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov)..... 21
Figura 5-15: Corrientes de resaca (Fuente: Svensen, 1984)..... 22
Figura 6-1: Es quema de la metodología (Fuente: Elaboración propia). 38
Figura 6-2: Ubicación de nodos de extracción de datos ERA y NOAA (Fuente: Elaboración propia). 39
Figura 6-3: Esquema Ancho de Zona de Rotura (Fuente: Elaboración propia). 41
Figura 6-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia). 44
Figura 6-5: Ejemplo dominio computacional y batimetría de CMS-Wave con pendiente 0,07. (Fuente: Elaboración propia). 45
Figura 6-6: Mapa de la superficie oceánica indicando la amplitud de la componente armónica de marea M2 extraída del modelo TPXO7.1 (Fuente: Elaboración propia). 47
Figura 6-7: Diagrama de flujo para seleccionar Hs en CMS-Wave (Fuente: Elaboración propia). 48
Figura 6-8: Velocidad de la corriente transversal de 48 horas de simulación en CMS-Flow. (Fuente: Elaboración Propia). 50
Figura 7-1: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 19S (Fuente: Elaboración propia) 52
Figura 7-2: Porcentaje de excedencia por nodo, datos ERA-Interim. (Fuente: Elaboración propia)..... 52
Figura 7-3: Diferencia de ZPL s/coef P vs ZPL c/coef P para una pendiente igual a 0,1. (Fuente: Elaboración propia) 53
Figura 7-4:Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia). 56
Figura 7-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia). 56

Figura 7-6: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia) 59
Figura 7-7: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia) 60
Figura 7-8: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia) 61
Figura 7-9: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia) 63
Figura 7-10: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia) 64
Figura 7-11: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia) 65
Figura 7-12: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia) 67
Figura 7-13: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia) 68
Figura 7-14: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia) 69
Figura 8-1: Comparación % de excedencia datos ERA v/s NOAA. (Fuente: Elaboración propia) 70
Figura 8-2: Comparación de distribución de alturas significativas ERA vs NOAA. (Fuente: Elaboración propia) 71
Figura 11-1:Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia). 80
Figura 11-2 Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia). 80
Figura 11-3: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia). 81
Figura 11-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia). 81
Figura 11-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia). 82
Figura 11-6: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia). 82
Figura 11-7: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia). 83
Figura 11-8: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia). 83
Figura 11-9: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia). 84
Figura 11-10: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia). 84
Figura 11-11: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia). 85
Figura 11-12: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia). 85
Figura 11-13: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 20S (Fuente: Elaboración propia) 86

Figura 11-14: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 21S (Fuente: Elaboración propia) 86
Figura 11-15: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 22S (Fuente: Elaboración propia) 87
Figura 11-16: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 23S (Fuente: Elaboración propia) 87
Figura 11-17: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 24S (Fuente: Elaboración propia) 88
Figura 11-18: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 25S (Fuente: Elaboración propia) 88
Figura 11-19: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 26S (Fuente: Elaboración propia) 89
Figura 11-20: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 27S (Fuente: Elaboración propia) 89
Figura 11-21: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 28S (Fuente: Elaboración propia) 90
Figura 11-22: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 29S (Fuente: Elaboración propia) 90
Figura 11-23: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 30S (Fuente: Elaboración propia) 91
Figura 11-24: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 31S (Fuente: Elaboración propia) 91
Figura 11-25: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 32S (Fuente: Elaboración propia) 92
Figura 11-26: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 33S (Fuente: Elaboración propia) 92
Figura 11-27: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 34S (Fuente: Elaboración propia) 93
Figura 11-28: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 35S (Fuente: Elaboración propia) 93
Figura 11-29: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 36S (Fuente: Elaboración propia) 94
Figura 11-30: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 37S (Fuente: Elaboración propia) 94
Figura 11-31: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 38S (Fuente: Elaboración propia) 95
Figura 11-32: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 39S (Fuente: Elaboración propia) 95
Figura 11-33: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 40S (Fuente: Elaboración propia) 96
Figura 11-34: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 41S (Fuente: Elaboración propia) 96
Figura 11-35: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia) 97
Figura 11-36: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia) 98
Figura 11-37: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia) 99

Figura 11-38: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia) 100
Figura 11-39: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia) 101
Figura 11-40: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia) 102

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1: Características de las olas 6
Tabla 5-2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral..... 32
Tabla 5-3: Límites máximos de concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral. . 34
Tabla 5-4: Tabulación del Coeficiente P..... 36
Tabla 6-1: Estadísticas del Promedio calculado y medido del *runup* del oleaje..... 40
Tabla 6-2: Dimensiones de la batimetría según pendiente..... 45
Tabla 6-3: Parámetros previamente seleccionados para las modelaciones. 46
Tabla 6-4: Parámetros finales utilizados en las modelaciones según pendiente. 49
Tabla 7-1: Diferencias porcentuales al calcular la ZPL con el coeficiente P. 54
Tabla 7-2: Diferencias entre interpolación lineal y *spline* cubico para una pendiente de 0,1. 55
Tabla 7-3: ZPL y punto de descarga por pendiente. 57
Tabla 8-1: Tabla resumen de diferencias ERA..... 72
Tabla 8-2: Tabla resumen de diferencias NOAA 73

1 RESUMEN

La importancia de analizar la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, ya que, esta define una zona sensible a la contaminación generada por el ser humano.

El análisis de la fórmula de la Zona de Protección Litoral (ZPL), permitió determinar que la ZPL es igual al Ancho de la Zona de Rotura (AZR) definida como la distancia transversal a la costa que se genera desde el punto de rotura del oleaje hasta la línea de costa, multiplicada por un factor de seguridad igual a 1,6, que permite que la ZPL sea mayor al AZR, en bahías de fondo plano y pendiente suave.

Se determinó que la ZPL representa un porcentaje de excedencia de los AZR para una data de oleaje. Tal porcentaje de excedencia a su vez dependiente de la forma en que se distribuyan los datos de oleaje del modelo de *hindcast* utilizado (ERA-Interim, WaveWatch III u otra).

Al momento de corroborar la forma de calcular el coeficiente P, en cualquier latitud a lo largo de Chile, no presento una diferencia significativa en la utilización de otros métodos de interpolación con respecto al recomendado por la norma.

Las 90 modelaciones numéricas, permitieron verificar que las partículas descargadas en una zona cercana a la ZPL, ingresan a esta bajo ciertas condiciones hidrodinámicas. Los casos donde más partículas ingresan a la ZPL son cuando el oleaje incide perpendicular a la línea de costa. Además, cuando la dirección de oleaje es de ±30° y la pendiente 0,44, las partículas quedan depositadas en el borde costero, confinadas en la zona de transporte longitudinal, sin posibilidad de retornar a aguas más profundas.

Finalmente, se recomienda utilizar el parámetro P al momento de calcular la ZPL, al no tener información precisa de la zona de estudio; sobre todo de corrientes. Al utilizar el coeficiente P se obtienen resultados más conservadores, lo que conlleva a cumplir el objetivo de la norma.

2 INTRODUCCIÓN

Dado que la mayoría de la población en Chile se encuentra en ciudades costeras (Cifuentes, et al., 1991). Las descargas de residuos directamente al mar o mediante emisarios submarinos, generados por las industrias u hogares, deben ser regulados y normados con el fin de procurar el cuidado del medio ambiente.

Debido al interés que genera el cuidado del medio ambiente en las costas Chilenas, en el año 2001, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia promulgó la "norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales", a través del D.S. (MINSEGPRES) N° 90, más conocida como "D.S. Nº 90/2000", la cual limita los parámetros de concentración que deben cumplir las descargas líquidas a un medio marino, dependiendo si la descarga se realiza dentro de ZPL o fuera de ésta. El objetivo de la norma es asegurar la calidad del agua para los diversos usos y actividades que se desarrollan dentro de la ZPL.

La forma de determinar tal zona esta explicada detalladamente en la Circular DGTM y MM Ordinaria A-53/004. Sin embargo, no existen o no se conocen fundamentos teóricos o técnicos que justifiquen las simplificaciones aplicadas en varios puntos dentro de la circular previamente mencionada (utilización de altura de ola en aguas profundas sin considerar fenómenos como asomeramiento, refracción, y difracción para calcular altura de oleaje en rotura y uso del coeficiente P, entre otros).

El no considerar variables que podrían modificar significativamente la deriva litoral, pueden marcar la diferencia entre contaminar o no el medio marino costero; el cual es muy sensible a variaciones mínimas de las condiciones normales para el crecimiento de flora y fauna marinas y al uso que se le da al borde costero (áreas de manejo, balnearios, cultivo, etc.).

Por los anteriores motivos es que el presente trabajo analiza, mediante el desarrollo de comparaciones numéricas de las formas de obtener la ZPL, bajo diferentes condiciones del medio marino, si se cumple o no con el objetivo de la norma de emisión anteriormente mencionada. Con el fin de entregar conclusiones a considerar al momento de definir la ZPL en una zona costera a lo largo de Chile.

En los capítulos 3 y 4, se definen los objetivos y alcances de este trabajo de investigación. En el capítulo 5, se presenta el fundamento teórico que abarcó el desarrollo de este documento y los aspectos esenciales para la comprensión del medio estudiado. El capítulo 6, define como se ejecutó la investigación, que métodos se utilizaron y de qué forma, para lograr desarrollar los objetivos propuestos. En el capítulo 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de los objetivos y un análisis a dichos resultados, para conocer finalmente en el capítulo 9 las conclusiones que se desprenden del trabajo realizado.

3 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar si se cumple el objetivo establecido en la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, al obtener el ancho de la Zona de Protección Litoral.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Buscar una posible relación entre el ancho de la Zona de Protección Litoral y el Ancho de la Zona de Rotura, utilizando la base de datos de oleaje del modelo global atmosférico de tercera generación llamado ERA-Interim perteneciente al ECMWF[1].
- Determinar la diferencia porcentual entre los anchos de Zona de Protección Litoral calculados con o sin la inclusión del coeficiente P para 23 nodos ubicados a lo largo de Chile.
- Determinar la diferencia entre métodos de interpolación, al obtener el valor no tabulado del coeficiente P descrito en la Tabla 1 de la Circular DGTM Y MM A-53/004, a lo largo de Chile para latitudes comprendidas entre 18°S y 53°S.
- Realizar modelaciones numéricas con Surface-water Modeling System (SMS) para determinar si las partículas descargadas en un punto próximo al límite exterior de la ZPL ingresan a esta y bajo qué circunstancias.

[1] European Centre for Medium-Range Weather Forecast.

4 ALCANCES

El proyecto de título se centró en generar un documento que analice, describa y evalúe la ZPL definida en la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

Los datos de oleaje utilizados corresponden los modelos ERA-Interim (34 años de datos) y WaveWatch III (14 años de datos), los cuales proporcionaron parámetros de resumen espectral. No se utilizaron datos de mediciones con instrumentos u otro modelo de *hindcast*.

Los 23 nodos de extracción de datos de los modelos se encuentran ubicados a la cuadra, desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Lagos.

Debido a la cantidad de tipologías costeras a lo largo de Chile. Las modelaciones numéricas, fueron configuradas de tal manera, que se pudiera simular el movimiento de partículas liberadas en el límite exterior de la ZPL, en un segmento pequeño de playa. La descarga fue analizada como un fenómeno de campo lejano y con un enfoque lagrangiano de las partículas.

No se incluyó la acción del viento en las modelaciones. Como tampoco se consideraron trabajos de campo ni visitas a terrenos de lugares específicos.

Las modelaciones fueron desarrolladas con el software SMS, cuyas licencias comerciales fueron facilitadas por el Ingeniero Matías Quezada L.

El presente estudio analiza la ZPL como un ámbito territorial de carácter normativo, y no como un punto para el diseño de emisarios submarinos.

.

5 FUNDAMENTO TEÓRICO

5.1 HIDRÁULICA MARÍTIMA

5.1.1 OLEAJE

El oleaje es una perturbación del nivel del mar, acompañado por variaciones de corrientes, aceleraciones y presiones (Kamphuis, 2000). Esta perturbación se simplifica mediante la representación de una onda sinusoidal elemental (Figura 5-1), la cual permite identificar el nivel máximo y mínimo de la ola, cresta (crest) y valle (trough) respectivamente, la distancia entre ambos niveles es la altura de ola H. La longitud de la ola L es la distancia entre crestas o valles sucesivos. Además del periodo T y profundidad h.

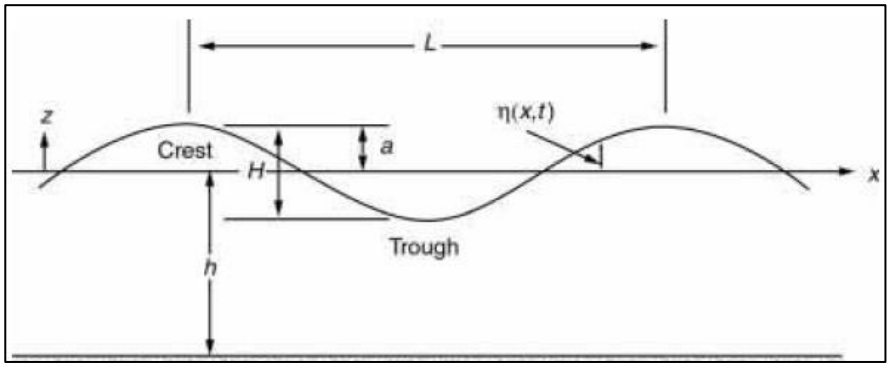


Figura 5-1: Onda Sinusoidal Elemental (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991).

En hidráulica marítima se considera oleaje como aquel que es preferentemente generado por la acción del viento (gravity waves), sin embargo, existen otras ondulaciones con diferentes frecuencias las cuales son indicadas en la Figura 5-2.

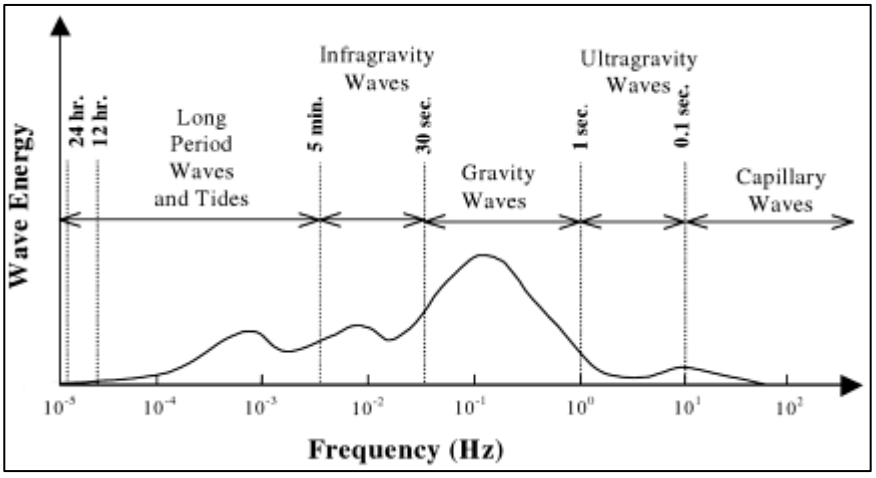


Figura 5-2: Clasificación de ola por frecuencia (Fuente: Kinsman, 1965).

Por otro lado, los periodos típicos, las longitudes de onda, las fuerzas generadoras, las fuerzas de control y ejemplos de las olas en el océano se presentan en la Tabla 5-1

Tabla 5-1: Características de las olas

Movimiento	*Periodo o Long.*	*Fuerzas generadoras*	*Fuerzas de control*	*Ejemplos*
Corrientes oceánicas	10^6 m	grad. de densidad; viento	fricción; Coriolis; gravedad	corriente del golfo
Corrientes costeras	10^5 m	viento y corrientes oceánicas	fricción; Coriolis; gravedad	afloramientos
Corrientes de rotura	10^2 m	ondas gravitatorias	fricción; gravedad	rip-currents
Corrientes de marea	10^3 m	marea astronómica	fricción; gravedad	bahías y estuarios
Ondas capilares	0.1 s/10^{-2} m	viento	tensión superficial; gravedad	rizado del viento
Ondas ultragravitatorias	0.1-1 s/100 m	viento	gravedad	ondas de viento en una charca
Ondas gravitatorias	1-30 s/1-10^3 m	viento y oleaje de viento	gravedad; fricción	sea y swell
Ondas infragravitatorias	30 s-5 min/10^3-10^5 m	viento y ondas gravitatorias	gravedad; Coriolis; fricción	surf-beat, ondas de borde
Ondas largas	5 min/10^5-10^6 m	borrascas y terremotos	gravedad; Coriolis; fricción	Tsunamis
Ondas de mareas astronómica	12-24 h/10^7 m	rotación Tierra/atracción Luna, Sol	gravedad; Coriolis; fricción	marea astronómica
Ondas transmareales	24 h/10^7 m	orbita solar/gravit.	gravedad; Coriolis; fricción	marea meteorológica
Ondas internas	4 min-25 h/10-10^5 min	borrascas,ondas de gravedad	gravedad; Coriolis; fricción	ondas de densidad en la pycnoclina

(Fuente: Universidad de Cantabria, 2000)

A continuación, se desarrolla de manera general los principales fenómenos y teorías asociadas a las olas generadas por viento.

El oleaje se puede clasificar en dos tipos: "*sea*", generado por viento local y "*swell*" generado por tormentas lejanas y propagadas hasta el punto de observación. Normalmente en los océanos se pueden encontrar ambos a la vez.

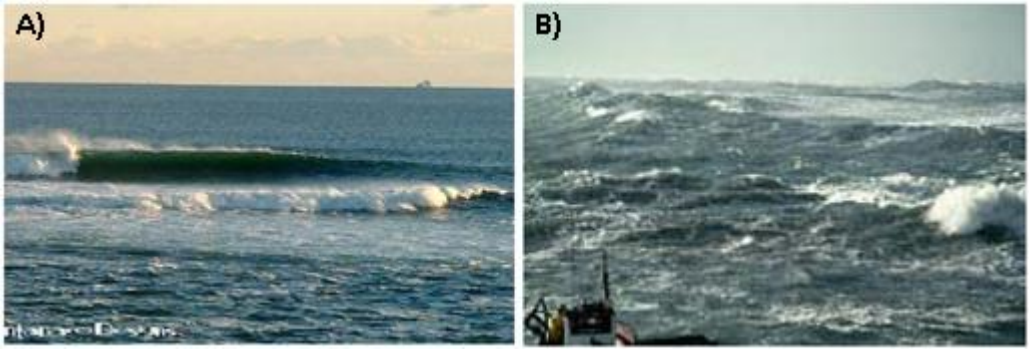


Figura 5-3: A) Oleaje tipo *Swell*; B) Oleaje tipo *Sea*. (Fuente: Silva, 2005)

5.1.2 TEORÍAS DE OLAS

Las teorías que describen el oleaje, son aproximaciones a la realidad. Pueden describir bien aquellos fenómenos cuyo escenario satisfaga las condiciones de borde consideradas en su derivación. Asimismo, pueden no describir otros fenómenos que violen esas condiciones. Al adoptar una teoría, ha de asegurarse de que el fenómeno de interés está descrito razonablemente bien. A modo de ejemplo en estudios de protección del litoral, que es uno de los objetivos del estudio de oleaje y de este proyecto de título, depende de la habilidad para predecir los perfiles de la superficie del mar y el movimiento del agua, así como de la precisión de esas aproximaciones.

5.1.2.1 TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE

Es la teoría de oleaje más simple, también denominada Teoría de Airy, en honor al primer autor que la derivó. Aunque tiene limitaciones en su aplicación, puede ser muy útil para describir los fenómenos principales de las olas, cuyas hipótesis de partida son las siguientes:

- El agua es homogénea e incompresible; (lo que implica que la densidad, ρ, es constante).
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino. El flujo es irrotacional.
- El fondo del mar constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.
- Las ondas son planas (de dos dimensiones).
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.

5.1.2.2 VALIDEZ DE LAS DISTINTAS TEORÍAS DE OLEAJE

El número de Ursell (U_r) es uno de los parámetros adimensionales más importante para clasificar la validez de las distintas teorías de oleaje, ya sea lineal o no. Además, permite definir el régimen al cual corresponden las olas. Éste se puede definir como:

$$U_r = H\frac{L^2}{d^3}$$

Ecuación 5-1

Dónde:

U_r: Número de Ursell.

H: Amplitud o número de la onda.

L: Longitud de la onda.

d: Profundidad.

La Figura 5-4 muestra el gráfico de Le Méhauté (1976) publicado en el Coastal Engeenig Manual (2000), en el cual se representan las áreas de validez de las diferentes teorías de oleaje para el análisis del oleaje regular.

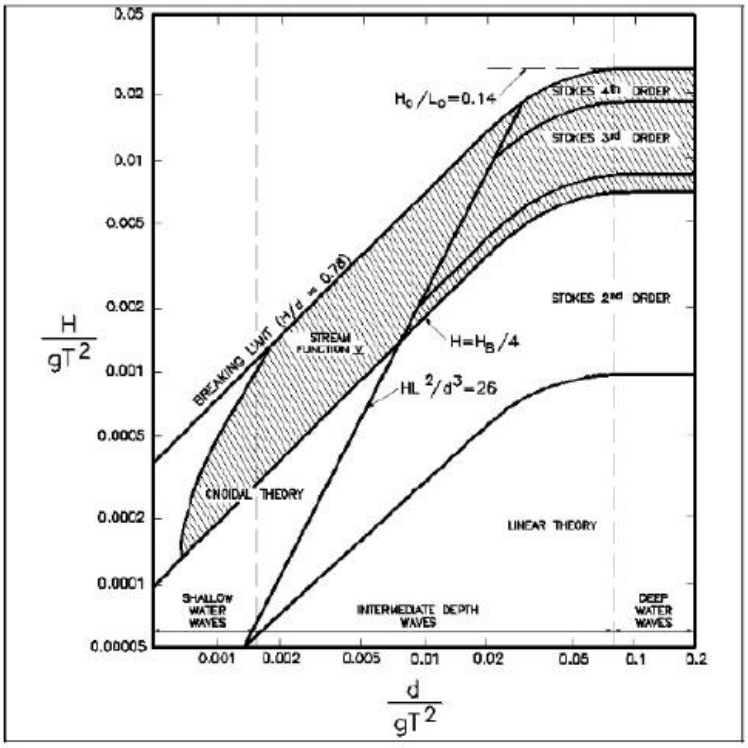


Figura 5-4: Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. (Fuente:Méhauté, 1976).

5.1.3 OLEAJE IRREGULAR

La sección anterior aborda el oleaje regular, lo que facilita su descripción matemática y teórica. Sin embargo, en la realidad cuando se observa el océano, se aprecia un oleaje irregular, caótico y difícil de caracterizar.

5.1.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El oleaje se puede describir como un proceso estocástico debido a que, como concepto matemático, ayuda a explicar eventos aleatorios. También se presenta como un proceso estacionario, donde las características estadísticas se mantienen en un período de tiempo (20 a 40 minutos).

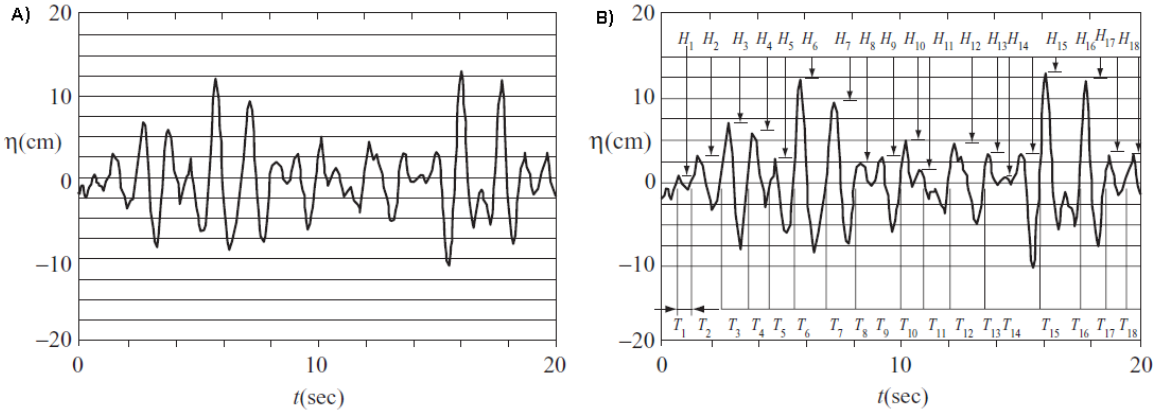


Figura 5-5: A) Serie de desnivelación medida. B) Olas calculadas cruce ascendente por cero. (Fuente: McCormick, 2010)

Existen dos formas de analizar estadísticamente un registro de oleaje. De manera temporal y de forma espectral de un estado de mar.

El análisis estadístico temporal del estado de mar, considera las propiedades estadísticas, parámetros y distribuciones de desnivelaciones, directamente de una serie de tiempo. Y el análisis estadístico espectral que toma en cuenta el estudio del espectro y sus propiedades en el dominio de la frecuencia.

Para analizar un registro de oleaje es fundamental conocer el intervalo de muestreo temporal Δt y el número de datos del registro N_{reg}, que determinarán la duración total del mismo. Para seleccionar olas individuales en una serie temporal de desnivelaciones, existen diversos criterios, dentro de los cuales destaca el análisis de cruce por cero y análisis de crestas.

Una vez separadas las olas individuales y obtenidas los valores de alturas y periodos, se procede al cálculo de parámetros estadísticos.

Los parámetros más comunes son:

- Hmax: Altura máxima de ola.
- Hm: Altura media de ola.
- $H_{1/3}$: Media de las alturas del tercio de olas más altas.

- Tm: Periodo medio de ola.
- Thmax: Periodo de ola de altura máxima
- $T_{1/3}$: Media de los periodos del tercio de olas más altas.

5.1.3.2 ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral, es ampliamente utilizado en la actualidad por su alto potencial en la representación del oleaje irregular, así como también en otros fenómenos de naturaleza oscilatoria.

El proceso estocástico de las elevaciones de la superficie del mar, $\eta(t)$, se puede considerar como una suma de ondas sinusoidales de distintos periodos y amplitudes (ver Figura 5-6).

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_i A_i \sin(i2\pi f_i t + \varphi_i)$$

Siendo: A_i las amplitudes de las ondas, η_0 la elevación media, que se considera nula para el oleaje, y φ_i las fases de las ondas.

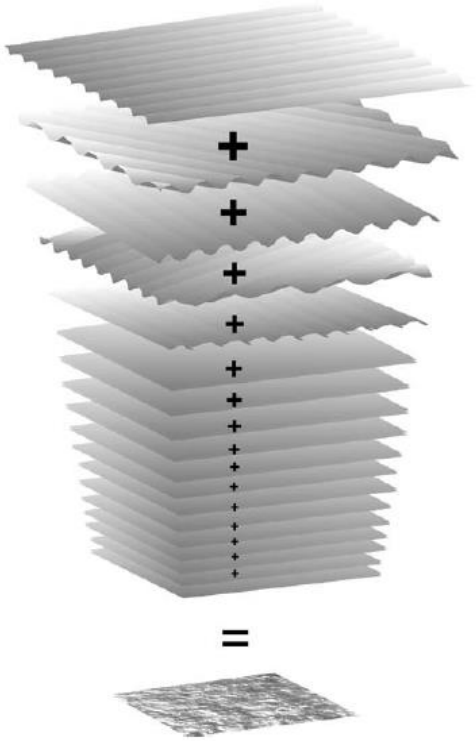


Figura 5-6: El oleaje como suma de ondas sinusoidales. (Fuente: Holthuijsen, 2007)

La energía media del proceso viene dada por:

$$Var_\eta = E[\eta^2(t)] = \int \{\eta(t)\}^2 dt$$

Ecuación 5-2

La cual coincide con la varianza del proceso al tener éste media nula. Si denominamos Zη(f) a la transformada de Fourier de $\eta(t)$,

$$Z_\eta(f) = \int \eta(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

Ecuación 5-3

entonces según el teorema de Parseval:

$$E[\eta^2(t)] = \int \{\eta(t)\}^2 dt = \int \left|Z_\eta(f)\right|^2 df$$

Ecuación 5-4

Por lo tanto, la energía del proceso se puede obtener también en función de la transformada de Fourier. Si consideramos la representación del oleaje como una suma de ondas sinusoidales, la densidad espectral permite estudiar la energía de dichas ondas, agrupadas según su periodo y se define mediante la siguiente expresión:

$$S(f) = \lim_{T\to\infty} 1/T \left|Z_\eta(f)\right|^2$$

Ecuación 5-5

El sentido físico que tienen las frecuencias es el siguiente:

- El valor de la densidad espectral en la frecuencia cero es una constante que indica el valor medio de η(t);
- Los valores de la densidad espectral en las bajas frecuencias informan sobre los cambios lentos del proceso (periodos largos);
- Las frecuencias altas corresponden a periodos cortos, y en ellas, los valores de S(f) indicarán los cambios rápidos del proceso.
- Cuando más suave sea una función, menos componentes de frecuencia tendrá (banda estrecha)
- Si la función es muy irregular, con cambios bruscos, la densidad espectral tendrá más componentes de frecuencia (banda ancha).

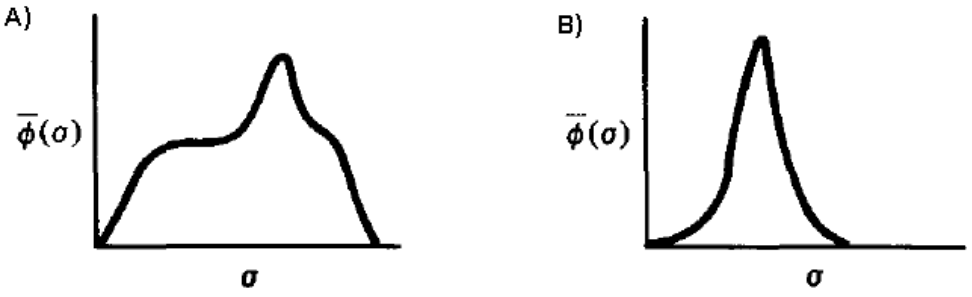


Figura 5-7: A) Banda ancha, función irregular. B) Banda estrecha, función suave. (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991)

A partir de la densidad espectral escalar se obtienen los parámetros de oleaje. Muchos de ellos se obtienen a partir de los momentos espectrales. Se denominan momento de orden k, m_k, a la expresión:

$$m_k = \int f^k S(f) df$$

Ecuación 5-6

Los parámetros más comúnmente utilizados son los siguientes:

- Altura significante espectral: $Hm0 = 4\sqrt{m_0}$
- Periodo medio: para este parámetro se utilizan varios estimadores, siendo los más comunes, $T_{0,2} = \sqrt{(m_0/m_2)}$, $T_{-1,0} = m_{-1}/m_0$ y $T_{0,1} = m_0/m_1$
- Periodo pico: $T_p = 1/f_p$

Existen más parámetros y además algunos están directamente relacionados con los equivalentes estadísticos. A continuación, se indican las relaciones más comunes:

- $Hm0 \sim 1.05\ H_{1/3}$
- $H_{1/3} \sim 1.41\ Hm$
- $T_{02} \sim Tm$
- $0.87T_p < \sim T_{\frac{1}{3}} < \sim 0.98T_p$
- $Hmax \sim H_{1/3}(0.5\ \ln N_{olas})^{1/2}$ (N_{olas} número de olas en el registro).

En el caso de una boya direccional tenemos, además de la serie de elevaciones, $\eta(t)$, en otras dos series, $x(t)$ e $y(t)$ que miden inclinaciones o desplazamientos respecto a los ejes Norte y Este.

La densidad espectral direccional se puede expresar como:

$$E(f,\theta) = S(f)D(f,\theta)$$

Ecuación 5-7

Siendo $S(f)$ la densidad espectral escalar y $D(f,\theta)$ la función de distribución direccional. Para más detalles sobre la densidad espectral direccional ($E(f,\theta)$) y parámetros espectrales direccionales se recomienda (Silva, 2005) y (McCormick, 2010)

La $S(f)$, describe la evolución temporal de las elevaciones del mar, y estas se pueden parametrizar con diversas funciones dependiendo el estado de mar.

Para realizar ajustes de la $S(f)$ a una función teórica se utiliza comúnmente el método de Pierson-Moskowitz (Pierson & Moskowitz, 1964), JONSWAP (Hasselman, et al., 1973), TMA (Kitaigorodskii, et al., 1975); (Bouws, et al., 1985), este último se detalla a continuación debido a su utilización en las modelaciones numéricas con CMS-Wave.

La parametrización espectral TMA es una modificación del espectro JONSWAP para su aplicación en aguas someras, al cual se le multiplica por una función, Φ, que depende de la frecuencia f y de la profundidad de agua d:

$$S_{TMA} = \emptyset(f,d)S_J(f)$$

Ecuación 5-8

La función Φ tiene una expresión muy compleja, por lo que se suele utilizar la siguiente aproximación con un error menor del 4%:

$$\emptyset(f,d) = \begin{cases} 2\pi f^2 d/g & f < (2\pi d/g)^{-0.5} \\ 1 - 0.5[2 - 2\pi f^2 (d/g)^{-0.5}]^2 & f \geq (2\pi d/g)^{-0.5} \end{cases}$$

Ecuación 5-9

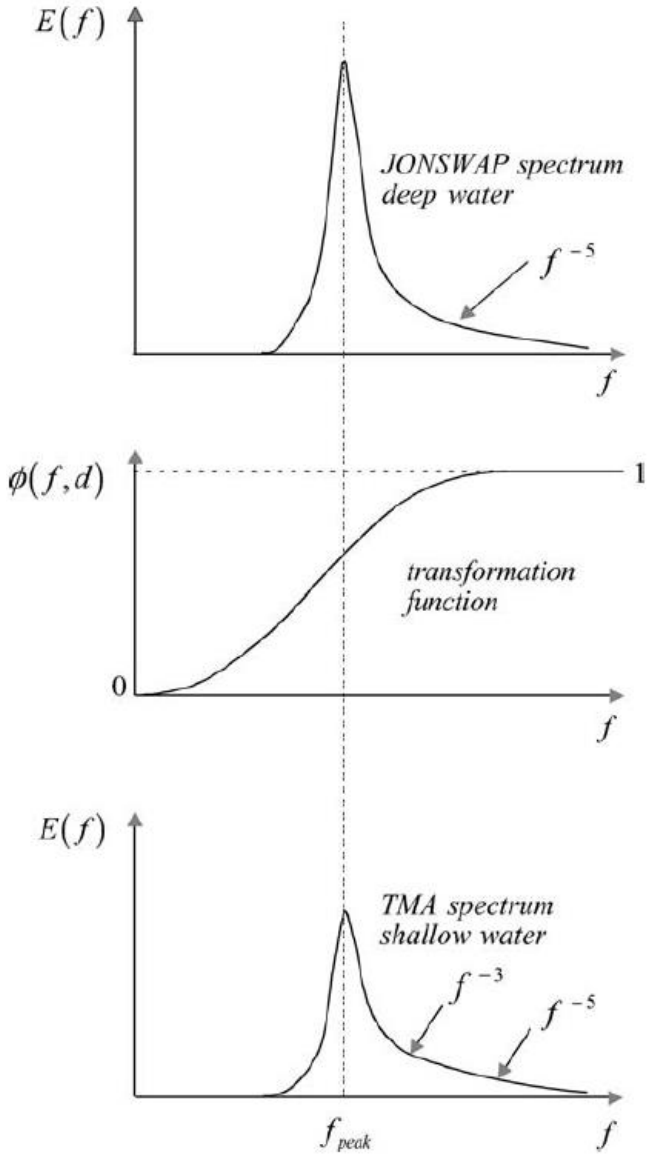


Figura 5-8: Trasformación de un espectro de aguas profundas JONSWAP a uno de aguas someras TMA.

(Fuente: Holthuijsen, 2007)

Se recomienda consultar Universidad de Cantabria (2000), Silva (2005), Holthuijsen (2007) y McCormick (2010).

5.1.4 TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE

A medida que el oleaje se acerca a la costa el efecto del fondo comienza a notarse. Como consecuencia de esta interacción el tren de olas cambia.

Los procesos de transformación son fundamentalmente variaciones en la altura de ola y en la dirección de propagación.

Las alteraciones más comunes que sufre el oleaje son refracción, difracción, *shoaling* y rompimiento, entre otros.

5.1.4.1 REFRACCIÓN

Este fenómeno tiene lugar cuando un tren de ondas incide oblicuamente sobre la costa y se encuentra frente a un cambio de profundidad. En ese caso una parte del frente de la onda viaja en aguas de menos profundidad y, por lo tanto, con menor celeridad que el resto dando lugar a un cambio de dirección. También por la presencia de una corriente se puede producir un retraso de parte del frente con el consiguiente cambio de dirección. Por lo tanto, la refracción es debida tanto al efecto del fondo como a la presencia de una corriente.

Para estimar el efecto de la refracción sobre el oleaje debido al cambio de profundidad se considerará una batimetría recta y paralela a la costa, como se observa en la Figura 5-9:

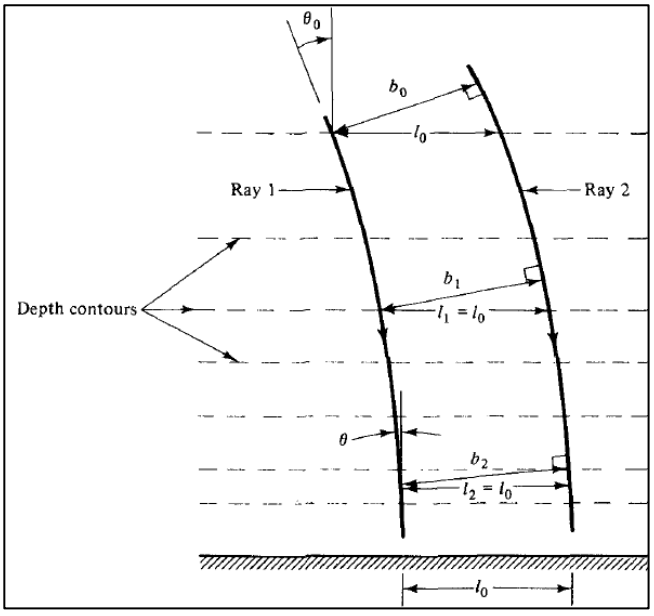


Figura 5-9: Esquema de ola refractada (Fuente: Kamphuis, 2000).

Si se considera la propagación del oleaje entre los puntos de la Figura 5-9 además que el flujo de energía entre ellos es constante, es decir, no existen términos disipativos.

$$\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_1 b_1 = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_2 b_1 = cte$$

Ecuación 5-10 Flujo de energía entre dos puntos.

De donde se obtiene:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

Ecuación 5-11

El término $\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$ corresponde al coeficiente de refracción. Este depende de la separación entre rayos b_1 y b_2, y para su determinación se puede hacer una aproximación simple mediante la Ley de Snell.

5.1.4.2 DIFRACCIÓN

La difracción es un fenómeno que consiste en la transferencia de energía de manera transversal a la dirección de propagación del oleaje (gradientes de altura de ola a lo largo del frente). Se observa cuando una ola llega al extremo de una estructura o formaciones rocosas que tienen dimensiones equivalentes a la mitad de la longitud de onda. También ocurre en concentraciones de energía entre ortogonales (puntos cáusticos en diagramas de refracción).

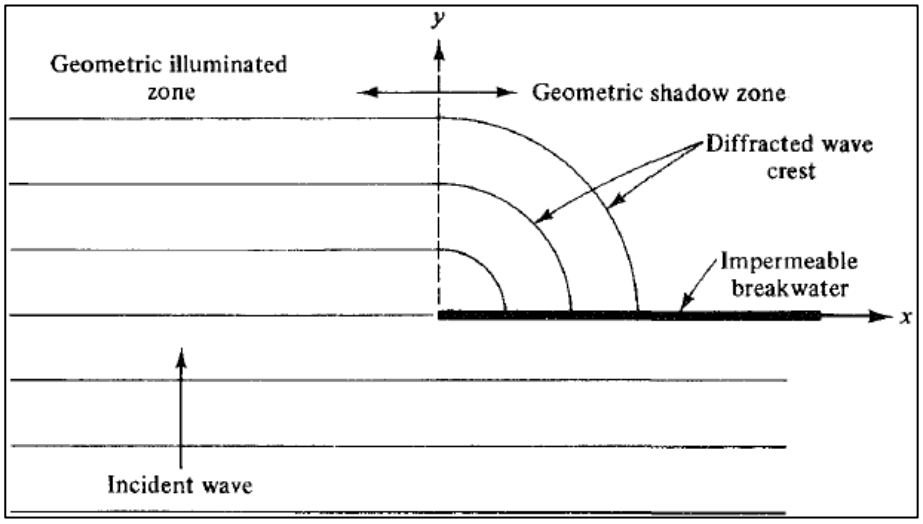


Figura 5-10: Esquema de Ola Difractada (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991).

A partir de la Figura 5-10 se obtiene la siguiente expresión:

$$H_d = K_d * H_i$$

Ecuación 5-12 Altura de Ola Difractada.

El coeficiente de difracción K_d se puede calcular teóricamente mediante la espiral de Cornú, pero en la práctica se recurre a datos empíricos como los diagramas de Wiegel (1962) (Wiegel, 1962) o modelación numérica mediante técnicas no lineales.

5.1.4.3 SHOALING (ASOMERAMIENTO)

A medida que un tren de onda se acerca a la costa, se observa un cambio en la altura y en la longitud de onda, a este proceso se le llama asomeramiento.

Para resolver esta transformación se asume que el proceso es bidimensional y que el periodo de la onda y el flujo de energía en la dirección de propagación son constantes.

Además de estas hipótesis se debe considerar que la variación del fondo sea suave para que no se produzca reflexión y disipación de energía por ficción en el fondo o aporte de energía por viento.

Si se considera una onda que se propaga de una profundad mayor d_2 con altura de ola H_2 a una profundidad d_1 con altura de ola $H_{1,}$ esta puede ser definida como se indica en la Ecuación 5-13:

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}}$$

Ecuación 5-13

Por lo tanto, el Coeficiente de *Shoaling*, K_S, se define como se muestra a continuación en la Ecuación 5-14, que es igual a la raíz de las celeridades de grupo.

$$K_S = \frac{H_1}{H_2}$$

Ecuación 5-14

Definiendo el Coeficiente de *Shoaling* con respecto a aguas profundas, K_S se define como la Ecuación 5-15:

$$K_S = \left(\frac{1}{\sqrt{\left(2n \tanh \frac{2\pi d}{L} \right)}} \right)$$

Ecuación 5-15.

Dónde:

$$n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{4\pi \frac{d}{L}}{senh(4\pi \frac{d}{L}} \right)$$

Ecuación 5-16.

5.1.4.4 ROTURA DE OLEAJE

Cuando el oleaje se aproxima a profundidades relativas excesivamente bajas, hay aumento del peralte (H/L) y disminuye la celeridad de la onda lo que hace que el perfil de la misma vaya cambiando, hasta tornarse inestable y romper.

Al presentarse varios criterios de rotura y autores, el presente documento solo hará referencia a la desarrollada por Komar & Gaughan en 1972 (KG72) y su posterior modificación propuesta por Rattanapitikon & Shibayama en 2000.

Komar & Gaughan utilizaron la teoría lineal del oleaje aplicando conservación de la energía, asumiendo que la relación Hb/hb es constante. Luego de ensayos en laboratorio propusieron:

$$Hb = 0{,}56H_o(\frac{H_o}{L_o})^{\frac{-1}{5}}$$

Ecuación 5-17: Altura de ola rompiente (Komar & Gaughan, 1972)

Luego Rattanapitikon & Shibayama realizaron estudios en laboratorio, el cual consistió en calcular la raíz del error relativo cuadrático medio (ER) con el fin de determinar, para distintas pendientes, la altura de ola en rompiente. Luego identificaron las formulas con menor porcentaje de ER, dentro de las cuales estaba KG72. Finalmente generaron una modificación a la ecuación KG72 para disminuir el ER, la cual se presenta a continuación:

$$Hb = (10{,}02m^3 - 7{,}46m^2 + 1{,}32m + 0{,}55)H_o\left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{\frac{-1}{5}}$$

Ecuación 5-18: Altura de ola rompiente (Rattanapitikon & Shibayama, 2000)

Donde,

Ho=Altura de ola en aguas profundas[m].

Lo=Longitud de ola en aguas profundas[m].

m =pendiente del fondo.

5.2 CORRIENTES CERCANAS A LA COSTA

A medida que el oleaje se acerca a la costa se puede generar una gran variedad de corrientes, con movimientos de diferentes magnitudes y forzadas por varios procesos.

Se puede definir la corriente total en forma esquemática como:

$$u = u_w + u_t + u_a + u_o + u_i$$

Donde las corrientes son impulsadas por:

u_w: Las olas.

u_t: Marea.

u_a: Viento.

u_o: Movimiento orbital debido a las olas de viento.

u_i: Ondas infragravitatorias.

Se pueden distinguir dos patrones de circulación de las olas:

- Cuando aproximan en dirección normal a la costa y sus crestas rompen paralelamente a las líneas batimétricas, las corrientes generadas toman la forma de circulación en celdas con corrientes de retorno, generalmente muy fuerte y estrecho en dirección mar adentro.
- Otro caso de circulación ocurre cuando las olas se aproximan a la costa y rompen con un ángulo considerable con relación a la línea de costa, las corrientes generadas fluyen paralelamente a la línea de costa y queda confinada casi en su totalidad a la zona de surf.

Las corrientes generadas por la rotura del oleaje son el movimiento del agua dominante en la zona cercana a la costa en bahías abiertas, y por lo tanto son importantes en la dispersión de contaminantes, nutrientes, transporte de sedimentos y por lo tanto de la respuesta morfodinámica de una playa.

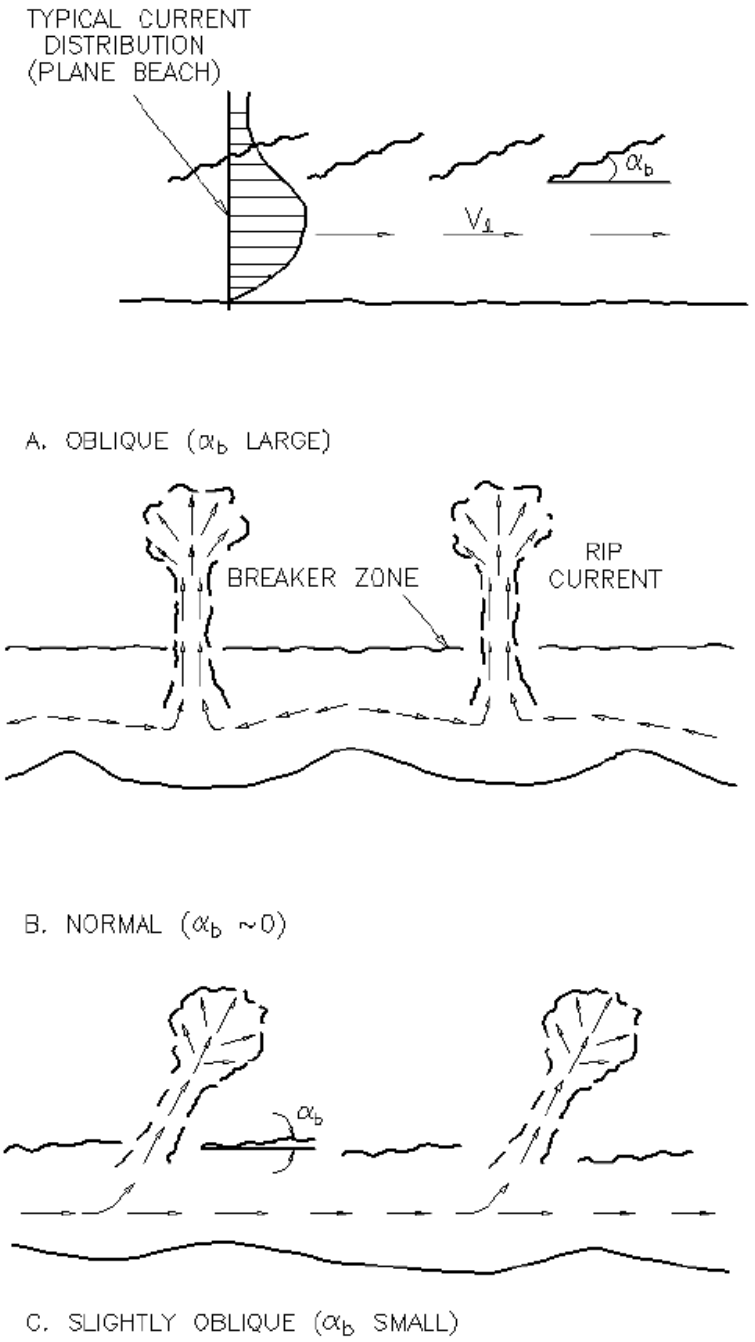


Figura 5-11: Patrones de circulación cercanos a la costa en función del ángulo de incidencia del oleaje (Fuente: U.S. Army Corps of Engenieers, 2002)

5.2.1 CORRIENTES LONGITUDINALES

Las corrientes longitudinales son producidas por la rotura del oleaje con incidencia oblicua y actúan como el mayor mecanismo de transporte de sedimentos. La corriente es inducida básicamente por el oleaje rompiendo en una playa con pendiente y eventualmente puede verse afectada por otros factores impulsores como el viento, mareas y corrientes oceánicas.

Existen diversas teorías para este tipo de corrientes, las primeras por Galvin (1968), Bowen (1969), Longuet-Higgins (1970), Thorton (1970), Komar (1976). Estos estudios emplearon el concepto de tensor de radiación para describir el flujo de *momentum* asociado con el oleaje como el agente impulsor de las corrientes longitudinales.

El análisis de Longuet-Higgins en 1970 representa una solución más simple y ha sido punto de partida para muchos estudios posteriores. Bajo los supuestos de homogeneidad en la batimetría y altura de ola, teoría lineal, pendiente uniforme, sin mezcla lateral, rotura de oleaje de ángulo pequeño.

Se puede encontrar la fórmula de corriente litoral como:

$$V = \frac{5\pi}{16}\frac{\tan\beta^*}{C_f}\gamma_b\sqrt{gd}\sin\alpha\cos\alpha$$

Ecuación 5-19

Con,

V: Velocidad de la corriente litoral.

$\tan\beta^*$: Pendiente de la playa modificada de la fórmula del *setup* del oleaje $= \tan\beta/(1 + (3\gamma_b^2/8))$

C_f: Coeficiente de fricción de fondo.

α: Ángulo entre la cresta de ola y el fondo.

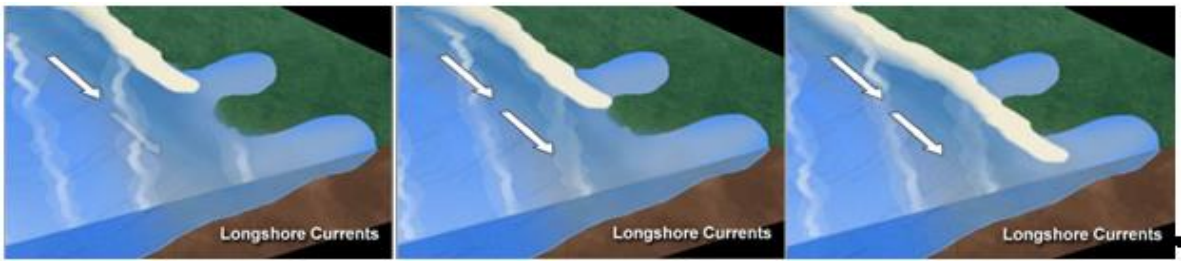


Figura 5-12: Corrientes longitudinales (Fuente:http://oceanservice.noaa.gov)

5.2.2 CORRIENTES DE RETORNO

Las corrientes de retorno son la característica más visible de los sistemas de circulación en la zona cercana a la costa. Ésta se identifica observando una corriente que fluye localizada lejos de la costa hacia el océano, perpendicular o en un ángulo agudo con respecto a la

línea de costa. Son especialmente muy peligrosas para los bañistas, ya que, estas corrientes pueden arrastrar a un nadador muy fuerte hacia el mar.

Las corrientes suelen alcanzar velocidades de 1 a 2 pies por segundo. Sin embargo, algunas corrientes de retorno se han medido a 8 pies por segundo más rápido que cualquier nadador olímpico jamás registrado (NOAA, 2005b)[2]

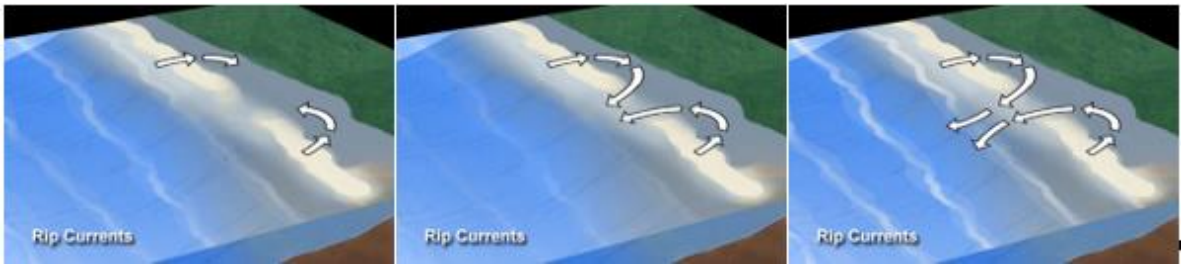


Figura 5-13: Corrientes de retorno (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov)

5.2.3 CORRIENTES TRANSVERSALES (CROSS-SHORE)

A diferencia de las corrientes longitudinales, la corriente transversal no es constante en profundidad. Ésta se caracteriza por tener una circulación perpendicular a la línea de costa. La corriente puede ser relativamente fuerte, por lo general 8-10% por ciento de $\sqrt{gd}$ en la parte inferior.

El perfil vertical de las velocidades transversales se puede resolver por Dally & Dean (1984), Hansen & Svendsen (1984), Stive & Wind (1986), y Svendsen, Schäffer, & Hansen (1987).

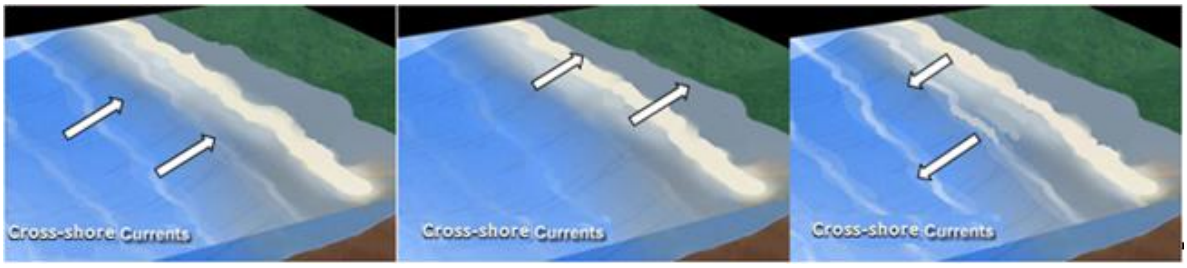


Figura 5-14: Corrientes transversales (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov)

[2] Contenido disponible online en http://www.ripcurrents.noaa.gov., accesada el 20 de enero del 2015

5.2.4 CORRIENTES DE RESACA (UNDERTOW)

Representa a un flujo en el fondo del agua que compensa el transporte de masa en dirección a la costa producido por el oleaje. Las velocidades del agua asociadas a la corriente de resaca son mayores cerca del fondo, por lo que tienen asociada una tensión de corte muy intensa.

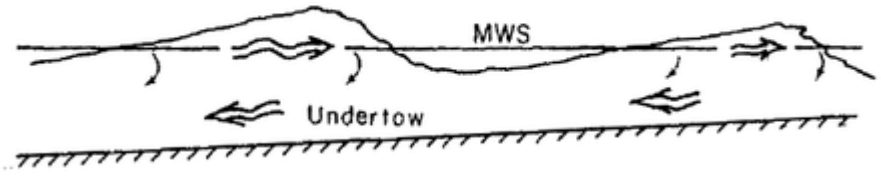


Figura 5-15: Corrientes de resaca (Fuente: Svensen, 1984)

5.3 MODELO DE HINDCAST

Son modelos creados por diferentes investigadores para explicar de forma matemática la irregularidad del océano. En los comienzos usaban relaciones empíricas entre variables dependientes como altura de ola significativa, período, etc. y de variables independientes como la velocidad del viento, profundidad, etc. Sin embargo, debido a las falencias de los modelos denominados de base física surgieron modificaciones considerando la evolución espacial y temporal de la energía que fluye en el crecimiento y decrecimiento del oleaje producido por el viento.

Con las modificaciones aplicadas se crearon los modelos de primera, segunda y tercera generación. Siendo éstos últimos los más importantes y relevantes considerando que todo estudio de oleaje requiere contar con datos estadísticos de lo menos 20 años.

5.3.1 MODELOS DE TERCERA GENERACIÓN

Este modelo impone una forma definida del espectro, la ecuación de transporte de energía y los términos no lineales que pueden calcularse completamente, pudiendo observar la evolución en el espacio y tiempo del espectro de frecuencia, altura de ola significativa y otros parámetros del oleaje, de forma más precisa.

Algunas de las ventajas más importantes son:

- Parametrización de la función exacta de transferencia no lineal de energía con el mismo número de grados de libertad que el espectro en sí mismo.
- Balance de energía ajustado mediante la especificación de una función de disipación desconocida presentada por (Komel, et al., 1984).
- Mejoran el problema de la transferencia de energía del mar de viento a mar de fondo (*Swell*).

Dentro de estos modelos se encuentra el WAM (WAMDI Group, 1988), WAVEWATCH III (Tolman, 1989 y 2002), MRI-III (Ueno & Ishizaka, 1997), JWA3G (Suzuki & Isozaki, 1994),SWAN (Booij, et al., 1999), ERA-Interim (Berrisford, et al., 2011).

Fundamento matemático

El modelo de *hindcast* considera la densidad espectral de cada componente de ola que varía con respecto al tiempo y espacio $E(f, x, y, t)$. Los componentes de olas se determinan usando un enfoque euleriano, que abarca el balance de energía del oleaje en una malla geográfica regular, perteneciente a una malla cartesiana de ejes x e y. En el cual es calculado el espectro a lo largo de un gran número de puntos en el océano, con un balance de energía local en cada locación.

Para poder determinar el espectro en un punto específico, es necesario integrar la ecuación de evolución de la energía del oleaje desde la costa hasta el punto de predicción.

$$\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x}\, E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y}\, E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S(f,\theta;x,y,t)$$

Ecuación 5-20

Donde el término del lado derecho llamado término fuente, representa los efectos de generación, interacción ola-ola y disipación. El primer término del lado izquierdo representa la evolución local del espectro en el tiempo, el segundo y tercero corresponden las velocidades de grupo en los ejes x e y de los componentes de onda ($C_{g,y}$; $C_{g,x}$).

El término Fuente se puede describir de la siguiente manera:

$$S(f,\theta;x,y,t) = S_r + S_{ff} + S_v + S_{nl} + S_{wc}$$

Ecuación 5-21

Donde

S_r: disipación por rotura.

S_{ff}: fricción de fondo.

S_v: Aporte del viento al oleaje.

S_{nl}: Transferencias no lineales entre componentes.

S_{wc}: Disipación por los *white-capping (*desmoronamiento de la cresta de ola por efecto del viento (Svendsen, 2006).

Ahora considerando aguas profundas, sin disipación por rotura y fricción de fondo, además la celeridad de grupo constante no queda la ecuación base de los modelos de hindcast como:

$$\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial t} + C_{g,x}\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + C_{g,y}\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S_v + S_{nl} + S_{wc}$$

Ecuación 5-22

Los modelos de *hindcast* deben ser comparados con mediciones de oleaje *in-situ,* debido a que el uso de cada data de oleaje está sujeto a incertidumbres por las condiciones de oleaje de cada lugar a estudiar (Holthuijsen, 2007).

Los modelos ocupados en este trabajo se describen a continuación.

5.3.2 MODELO DE HINDCAST WAVEWATCH III

Es un modelo de onda de tercera generación desarrollado por NOAA / NCEP, basado en principalmente en WAVEWATCH, desarrollado por la Universidad Tecnológica Delft y WAVEWATCH II desarrollado por la NASA. WAVEWATCH III tiene una diferencia de los modelos anteriores en cuanto a las ecuaciones de gobierno, estructura del modelo, métodos numéricos y las parametrizaciones físicas.

Este modelo resuelve la ecuación de balance de energía de fase aleatoria del espectro para el número de onda y dirección del espectro. La suposición implícita de esta ecuación es que la profundidad, las corrientes y el campo de ondas, varían en escalas de tiempo y espacio que son mucho mayores a las escalas de variación de una onda individual.

El modelo se usa para generar *hindcast* y *forecast* de oleaje, teniendo una cobertura de 77°S-77°N, una resolución de 1,0°x1,25° en latitud/longitud y una profundidad mínima de 25 [m]. Donde los parámetros de oleaje obtenidos corresponden a altura significativa espectral (H_{m0}), dirección *peak* (Dp)y periodo *peak* (T_p) cada 3 [hrs].

Las características físicas que presenta el modelo son la inclusión de la refracción y esfuerzo del campo de oleaje debido a las variaciones temporales y espaciales de la profundidad media del mar y mareas, las ecuaciones de gobierno. Considera además en los términos de fuente el crecimiento y decaimiento de las olas debido a la acción del viendo, disipación por *white-capping*, rotura inducida por profundidad, interacciones no lineales de resonancia y fricción de fondo. Se incluyen los efectos no lineales que sean relevantes en los términos fuente y la propagación de oleaje considerada es lineal.

5.3.3 MODELO DE HINDCAST ERA-INTERIM

Es un modelo que realiza un reanálisis de la atmosfera global desde el año 1979 con 3 meses de retraso aproximadamente, se creó a partir de los modelos ECMWF y ERA-40 (1957-2002). Donde se puede tener acceso a datos de parámetros atmosféricos y oceanográficos. Utilizan el ciclo 31r2 del Sistema Integrado de Pronóstico de ECMWF, introducido operacionalmente en septiembre de 2006. Está acoplado a un modelo de oleaje oceánico que resuelve 30 frecuencias y 24 direcciones de ola, en nodos de la malla reducida de resolución 1,0°x1,0° en latitud/longitud.

Los objetivos de ERA se enfocan en mejorar aspectos como:

- La representación del ciclo hidrológico
- La calidad de la circulación estratosférica
- Los cambios en el sistema de observación
- El uso de análisis de variaciones en 4-dimensiones
- Una revisión al análisis de humedad
- El uso de corrección de sesgo para los datos de satélite y otras mejoras en el manejo de datos.

El modelo genera cuatro análisis diarios, 00, 06, 12 y 18 UTC. El análisis producido a las 00 UTC en un día determinado implica observaciones tomadas entre 15 UTC del día anterior y 03 UTC del día actual; el análisis a las 12 UTC implica observaciones entre 03 UTC y 15 UTC. Los parámetros de oleaje obtenidos de esta base de datos corresponden a altura significativa espectral ($Hm0$), dirección media (Dm) y periodo medio (Tm).

Para mayor información se puede revisar el documento de (Berrisford, et al., 2011).

5.4 MODELO NUMÉRICO CMS

El Surface-water Modeling System (SMS) es una suite integrada de modelos numéricos para simular flujos, olas, transporte de sedimentos y cambios en la morfología en zonas costeras que proporciona interfaz gráfica y herramientas de visualización, análisis de datos entre otras funciones.

Dentro de los modelos numéricos integrados en SMS, se encuentra Coastal Modeling System (CMS) con sus módulos CMS-Wave y CMS-Flow, además del modelo PTM[3], los cuales fueron investigados y desarrollados por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos (USACE por sus siglas en ingles). A continuación, son explicados.

5.4.1 CMS-WAVE

CMS-WAVE fue desarrollado por (Lin, et al., 2006b) y (Demirbilek, et al., 2007), previamente este modelo se llamó WABED (Wave-Action Balance Equation Diffraction) y corresponde a un modelo espectral bidimensional basado en la ecuación con aproximación parabólica, incluyendo disipación de energía y términos que simulan la difracción de acuerdo con (Mase & Kitano, 2000), (Mase, 2001) y (Mase, et al., 2005a).

Las principales capacidades de CMS-WAVE son:

- Refracción.
- Asomeramiento (*Shoaling*).
- Rompiente.
- Disipación debido a la rotura.
- Disipación por fricción de fondo.
- Difracción.
- Reflexión.
- Interacción oleaje corrientes.
- Generación y crecimiento del oleaje (incluyendo *withecapping*).
- Sobrepaso y *runup* del oleaje en playas.
- Interacción no lineal del oleaje.

La ecuación principal que resuelve el modelo CMS-WAVE es la de acción de ondas, descrita según la Ecuación 5-23 y Ecuación 5-24.

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial\left(C_y N\right)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{k}{2\sigma}\left[\left(CC_g cos^2\theta N_y\right)_y - \frac{CC_g}{2} cos^2\theta N_{yy}\right] - \varepsilon_b N - S$$

Ecuación 5-23

[3] Particle Tracking Model.

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Ecuación 5-24

Donde:

N: Acción de onda.

E: Densidad de energía espectral.

σ: Frecuencia.

θ: Dirección.

C: Celeridad de la onda.

C_g: Celeridad de grupo.

N_y y N_{yy}: Primera y segunda derivada de N respecto de y.

$C_{x,y,\theta}$: Celeridad de la onda respecto de x, y o θ, respectivamente.

k: Parámetro empírico que representa la intensidad de la difracción.

ε_b: Disipación de energía debido a la rotura.

S: términos fuente, incluyendo ingreso y pérdidas de energía.

La disipación espectral de energía limitada por profundidad es determinada a partir de cuatro formulas diferentes separadas en 2 clases. Las de primera, determinan la disipación de la energía, truncando la altura de rotura del oleaje, a un valor asociado a un criterio de rotura que se ubique en la cola de una distribución Rayleigh. Las fórmulas de Goda modificada (Sakai, et al., 1989) y Miche modificada (Battjes, 1972) (Mase, et al., 2005b) pertenecen a esta clase. Las de segunda clase, estiman la disipación total de energía basándose en la analogía de modelos del bore (Battjes & Janssen, 1978). Las fórmulas de Battjes y janssen (Battjes & Janssen, 1978), y Chawla y Kirby (Chawla & Kirby, 2002) pertenecen a esta clase.

CMS-Wave calcula el *setup* del oleaje con las ecuaciones de *momentum* horizontal.

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{\rho g h}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)$$

Ecuación 5-25

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{1}{\rho g h}\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right)$$

Ecuación 5-26

Donde ρ es la densidad del agua y S_{xx}, S_{xy}, y S_{yy} son los componentes del tensor de radiación del exceso de flujo de momentum producido por las olas. Usando la teoría lineal del oleaje (Dean & Dalrymple, 1991), S_{xx}, S_{xy}, y S_{yy} quedan expresados como

$$S_{xx} = E(\sigma,\theta)\int\left[n_k(cos^2\theta+1)-\frac{1}{2}\right]d\theta$$

Ecuación 5-27

$$S_{yy} = E(\sigma,\theta)\int\left[n_k(sin^2\theta+1)-\frac{1}{2}\right]d\theta$$

Ecuación 5-28

$$S_{xy} = \frac{E}{2}n_k \sin 2\theta$$

Ecuación 5-29

Dónde,

$$n_k = \frac{1}{2}+\frac{kh}{\sinh kh}$$

Ecuación 5-30

5.4.2 CMS-FLOW

CMS-FLOW es un modelo bidimensional (2D) hidro–morfodinámico en diferencias finitas, que integra en la vertical las ecuaciones de continuidad y momento para representar los movimientos de las masas de agua (Militello, et al., 2004). Las capacidades principales de esta herramienta se describen a continuación:

- Representación de la hidrodinámica por mareas y vientos.
- Representación de la hidrodinámica por olas, integrando resultados de CMS-WAVE.
- Capacidad de simular procesos de mojado/secado de celdas (inundaciones).
- Determinación del transporte de sedimentos mediante la aplicación de la ecuación de advección-difusión.
- Evolución morfodinámica.

Para determinar las velocidades de corriente integradas en la vertical y las desnivelaciones instantáneas de la superficie del mar, CMS-FLOW resuelve la ecuación de continuidad (Ecuación 5-31) y la de conservación de momentum (Ecuación 5-32 y Ecuación 5-33).

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial y q_y}{\partial y}=0$$

Ecuación 5-31: Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial u q_x}{\partial x}+\frac{\partial v q_x}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_x}{\partial y}+f q_y-\tau_{bx}+\tau_{wx}+\tau_{Sx}$$

Ecuación 5-32: Conservación de momentum.

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial u q_y}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_y}{\partial y}+f q_y-\tau_{by}+\tau_{wy}+\tau_{Sy}$$

Ecuación 5-33: Conservación de momentum.

Dónde:

h: Profundidad del agua respecto del nivel medio.

η: Desnivelación instantánea del océano.

t: Tiempo.

q_x y q_y: Flujo por unidad de ancho paralelo al eje x e y, respectivamente.

u y v: Velocidades de corriente, integradas en la vertical, paralelas al eje x e y, respectivamente.

g: Aceleración de gravedad.

D_x y D_y: Coeficiente de difusión en la dirección x e y, respectivamente.

f: Parámetro de Coriolis.

τ_{bx} y τ_{by}: Tensión en el fondo paralela al eje x e y, respectivamente.

τ_{wx} y τ_{wy}: Tensión superficial paralela al eje x e y, respectivamente.

τ_{Sx} y τ_{Sy}: Tensión debido al oleaje paralela al eje x e y, respectivamente.

5.4.3 PARTICLE TRACKING MODEL (PTM)

PTM es un modelo de rastreo de partículas lagrangiano que utiliza los campos vectoriales obtenidos del CMS-Flow para predecir la posición de un número finito de partículas, considerando la masa, densidad, velocidad de deposición, y otras características (MacDonald, et al., 2006). Incluye transporte, deposición y erosión dentro de un campo batimétrico.

La primera posición en el eje x de una partícula en el futuro, x', viene dada por:

$$x' = x_n + \frac{1}{2}(u_A dt + u_D dt)$$

Donde u_A y u_D son los términos de la velocidad de advección y difusión, respectivamente.

Para los siguientes *time-step* la posición viene dada por:

$$x_{n+1} = x_n + u_A' dt + u_D' dt$$

La concentración de las partículas en la columna de agua, es la integral de la concentración sobre la profundidad en Kg/m3:

$$C = \int_{z_0}^{h} C(z) dz$$

La cantidad de transporte ($\overrightarrow{q_s}$) es el producto entre la concentración y la velocidad:

$$\overrightarrow{q_s} = \int_{z_0}^{h} C(z)\vec{u}(z) dz$$

La velocidad de advección promedio de la partícula, u_A, es

$$\overrightarrow{u_A} = \frac{\int_{z_0}^{h} C(z)\vec{u}(z) dz}{\int_{z_0}^{h} C(z) dz}$$

El coeficiente de la difusión turbulenta, E_t, en PTM es calculado de manera independiente al modelo hidrodinámico. El cual está presentado en (Fisher, et al., 1979) y aplicado en (Shen, et al., 1993).

$$E_t = K_{E_t} h u_*''$$

El coeficiente empírico K_{E_t}, relaciona la difusión turbulenta a la velocidad de corte y la profundidad del agua local. Los rangos típicos de K_{E_t} son 0,15 a 0,60.

Para obtener la velocidad horizontal dispersiva, u_D ,PTM utiliza el "Random walk diffusion model" que dando de la siguiente manera:

$$u_D = 2(\Pi - 0{,}5)\sqrt{\frac{6E_t}{dt}}$$

Donde Π es un número aleatorio que varía entre 0 y 1.

Las capacidades del modelo son:

- Modelar con precisión y eficiencia los procesos de advección y difusión de campo lejano.
- La distribución de partículas (tamaño del grano, tipo de sedimento) se simulan mediante la especificación de las características para cada tipo de partícula.
- Las partículas son representadas según su característica de variabilidad natural y su reacción.
- La trayectoria de cada partícula puede ser definida, identificando la fuente y su destino.
- Las simulaciones lagrangianas utilizan menos recursos computacionales en comparación a simulaciones eulerianas, lo que permite la evaluación de numerosas alternativas.

El modelo incluye 3 modos de operación: dos dimensiones (2D), cuasi tridimensional (Q3D) y tridimensional (3D).

Además, incluye la opción de analizar partículas con boyantes neutra, permitiendo así modelar sedimentos finos o contaminantes sin velocidad de deposición. La ubicación de cada partícula se define a través de la velocidad horizontal del flujo.

Para más detalle sobre los modelos descritos anteriormente se recomienda consultar Buttolph (2006), Lackey & MacDonald (2007), (Lin, et al. (2008), Demirbilek & Rosati (2011) y Sánchez, et al. (2014).

5.5 ASPECTOS NORMATIVOS

Existen 2 aspectos normativos importantes de destacar, el primero es el decreto supremo Nº90 del 2000 el cual define la Zona de Protección Litoral (ZPL) y el segundo es la circular A-53/004 del 2003 que establece la forma de fijar el ancho de la ZPL.

5.5.1 DECRETO SUPREMO Nº90 DEL 2000

En el año 2001, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia promulgó la "norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales", a través del D.S. (MINSEGPRES) N° 90, más conocida como "D.S. Nº 90/2000".

La cual en su primer punto indica su objetivo y resultados esperados. Luego en el punto 3.13 define la Zona de Protección Litoral (ZPL) la cual define un ancho (A) mediante la Ecuación 5-34:

$$A = \left[\frac{1{,}28 * Hb}{m}\right] * 1{,}6$$

Ecuación 5-34: Calculo del ancho de la ZPL (D.S Nº90,2000).

Donde,

Hb =altura media de la rompiente [m].

m =pendiente del fondo.

A =ancho de zona de protección de litoral [m].

Además, la norma indica los límites máximos de concentración para las descargas de residuos líquidos dentro de la ZPL (Tabla 5-2) y fuera de esta (Tabla 5-3).

Tabla 5-2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral

CONTAMINANTE	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	1
Arsénico	mg/L	As	0,2
Cadmio	mg/L	Cd	0,02
Cianuro	mg/L	CN-	0,5
Cobre	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70*

Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,2
Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
DBO5	mg O2/L	DBO5	60
Estaño	mg/L	Sn	0,5
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Fósforo	mg/L	P	5
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	10
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	1
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	2
Mercurio	mg/L	Hg	0,005
Molibdeno	mg/L	Mo	0,1
Níquel	mg/L	Ni	2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
PH	Unidad	pH	6,0 - 9,0
Plomo	mg/L	Pb	0,2
SAAM	mg/L	SAAM	10
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Sedimentables	m1/1/h	S SED	5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	100
Sulfuros	mg/L	S^2-	1
Zinc	mg/L	Zn	5
Temperatura	ºC	Tº	30

(Fuente: D.S n°90,2000)

Tabla 5-3: Límites máximos de concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral.

CONTAMINANTE	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE A PARTIR DEL 10º AÑO DE VIGENCIA DEL PRESENTE DECRETO
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	350	150
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	S.SED	50	20
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	S S	700	300
Aluminio	mg/L	Al	10	
Arsénico	mg/L	As	0,5	
Cadmio	mg/L	Cd	0,5	
Cianuro	mg/L	CN-	1	
Cobre	mg/L	Cu	3	
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	1	
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,5	
Cromo Total	mg/L	Cr Total	10	
Estaño	mg/L	Sn	1	
Fluoruro	mg/L	F-	6	
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	20	
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HC	2	
Manganeso	mg/L	Mn	4	
Mercurio	mg/L	Hg	0,02	
Molibdeno	mg/L	Mo	0,5	
Níquel	mg/L	Ni	4	
PH	Unidad	pH	5,5-9,0	
Plomo	mg/L	Pb	1	
SAAM	mg/L	SAAM	15	
Selenio	mg/L	Se	0,03	
Sulfuro	mg/L	S^2-	5	
Zinc	mg/L	Zn	5	

(Fuente: D.S n°90,2000)

5.5.2 CIRCULAR A-53/004

La Dirección General de Territorio Marítimo y Marina Mercante ha dispuesto la Circular DGTM y MM Ordinaria A-53/004, cuya última modificación corresponde a la publicada el 3 de diciembre del 2012. En este instrumento, la Autoridad Marítima ha establecido el procedimiento por medio del cual se puede fijar el ancho de la ZPL. En el capítulo disposiciones y procedimientos, sección de procedimientos, punto determinación de la altura de la ola rompiente (II.B.3), se indica, como calcular la altura de la ola rompiente (Hb) para casos de zonas expuestas al oleaje oceánico, recomendando para ello la relación matemática propuesta por Rattanapitikon & Shibayama (2000), es decir:

$$Hb = (10{,}02m^3 - 7{,}46m^2 + 1{,}32m + 0{,}55)H_o\left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{\frac{-1}{5}}$$

Ecuación 5-35 Altura de ola rompiente (Rattanapitikon & Shibayama, 2000)

Donde,

Ho=Altura de ola en aguas profundas[m].

Lo=Longitud de ola en aguas profundas[m].

m =pendiente del fondo.

De esta forma y para facilitar el cálculo de la relación $H_o\left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{\frac{-1}{5}}$, la Autoridad Marítima propuso un coeficiente P, el cual corresponde a:

$$P = H_o\left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{\frac{-1}{5}}$$

Ecuación 5-36 Parámetro P (Circular A-53/004,2012).

Este coeficiente P ha sido determinado por la Autoridad Marítima para cada uno de las latitudes que se indica en la Tabla 1 de la ya señalada Circular A-53/004:

Tabla 5-4: Tabulación del Coeficiente P.

Latitud	P
18°S	7,54
20°S	7,79
24°S	7,95
27°S	8,27
30°S	9,07
33°S	9,57
35°S	10,50
37°S	10,74
42°S	12,06
53°S	14,61

(Fuente: Circular A-53/004 ,2012)

6 METODOLOGÍA

Para determinar si existe alguna relación entre la ZPL y el Ancho de la Zona de Rotura (zona transversal a la costa, limitada por el punto donde rompe el oleaje hasta la línea de costa), se analizó el fundamento físico de la ZPL definiendo la base de datos de oleaje y pendientes a utilizar.

La ecuación para obtener la ZPL contiene dos variables, altura media de la ola rompiente (Hb) y pendiente del fondo marino (m).

Las pendientes del fondo marino fueron seleccionadas en base a experimentos en canales, realizados por Ratanapitikon & Shibayama. (2000)

Se desarrollaron cálculos con datos de oleaje en aguas profundas obtenidos del modelo atmosférico ERA-Interim en 23 puntos distribuidos a lo largo de Chile, para obtener Hb en cada uno de estos nodos. Una vez conocido Hb se pudo calcular el Ancho de la Zona de Rotura. Se realizó un análisis con gráficos de excedencia utilizando como valor umbral la ZPL.

Para determinar si existe diferencia entre los valores de la ZPL, cuando se utiliza el coeficiente P o no. Se realizó una comparación de diferencias porcentuales entre dichos valores para todos los nodos disponibles. Se incluyeron variaciones en la forma de interpolar el coeficiente P en zonas costeras ubicadas en latitudes no tabuladas en la tabla 1 proporcionada por circular ordinaria A-53/004.

Debido a que el coeficiente P viene determinado en la norma, se procedió a realizar una serie de tiempo de los valores del coeficiente P con los datos de olas obtenidos de la ERA y NOAA, utilizando la Ecuación 5-36. Con la serie de tiempo del coeficiente P, se calculó el promedio, el promedio de valores atípicos sobre umbral de 3 desviaciones estándar, los percentiles 50% 75% 95% y 97,5%, con el fin de poder encontrar alguna definición estadística al valor del coeficiente P.

Los resultados permitieron conocer los parámetros de oleaje y las pendientes, para configurar el modelo hidrodinámico, el cual, sirvió de base para forzar el movimiento de las partículas cerca de la ZPL.

Para verificar bajo qué condiciones ingresan o no las partículas desechadas en un punto próximo al límite exterior de la ZPL, fue necesario conocer el fundamento físico que describe la ecuación propuesta para calcular la ZPL, con el fin de poder modelar el fenómeno de la mejor forma posible.

A continuación, se describe cada uno de los métodos utilizados de manera detallada.

Esquema de la metodología.

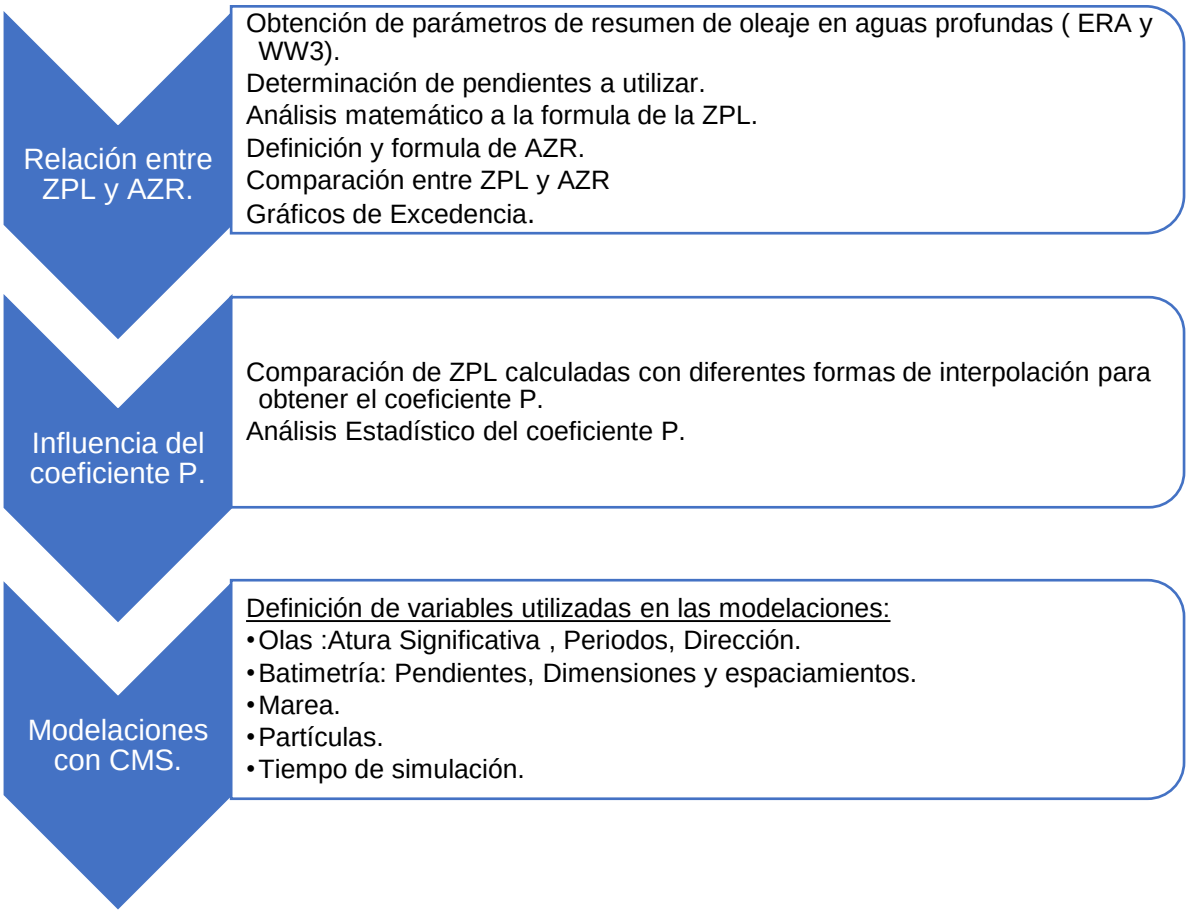


Figura 6-1: Es quema de la metodología (Fuente: Elaboración propia).

6.1 DEFINICION DE VARIABLES

6.1.1 FUENTE ESTADÍSTICA DEL OLEAJE

La fuente estadística de oleaje obtenida del modelo atmosférico ERA-Interim, proporcionó parámetros de resumen espectrales (altura significativa, periodo peak y dirección) de 23 nodos ubicados a la cuadra a lo largo de Chile (ver Figura 6-2). Esta consiste de 36 años simulación con estados de mar cada 6 horas (cuatro por día) desde 1979 hasta el 2015.

Además, se utilizaron datos del modelo atmosférico WaveWatch III con las mismas indicaciones que los datos de ERA, con la diferencia que solo son 14 años de simulación con estados de mar cada 3 horas (ocho por día) desde 1997 hasta 2010, para comparar la distribución de las alturas significativas de ambas datas de oleaje.

Los parámetros utilizados de las datas fueron altura significativa y periodo *peak*.

Debido a que la fórmula para calcular la ZPL requiere de datos de oleaje en aguas profundas, para calcular Hb, los parámetros del oleaje no fueron propagados a aguas someras.

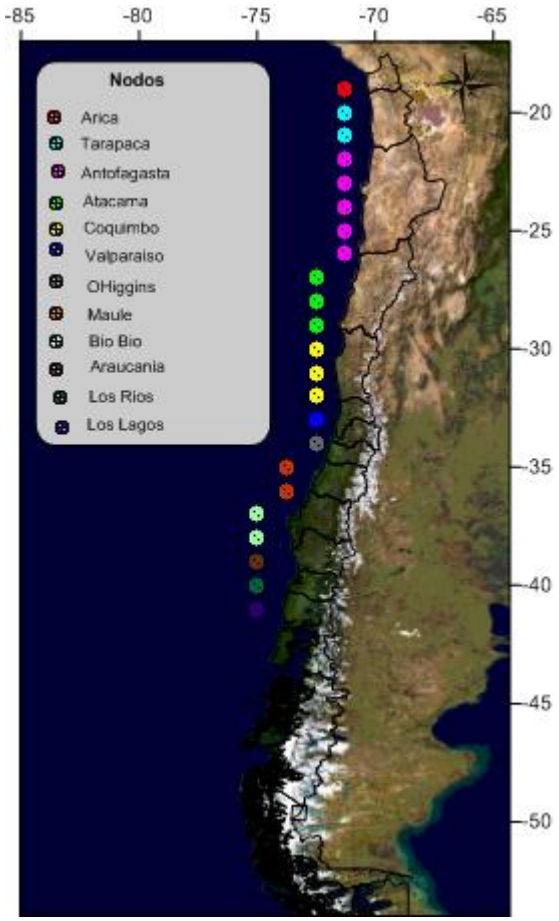


Figura 6-2: Ubicación de nodos de extracción de datos ERA y NOAA (Fuente: Elaboración propia).

6.1.2 DETERMINACIÓN DE PENDIENTES

Para lograr determinar las pendientes a utilizar, se recurrió al trabajo realizado por Rattanapitikon & Shibayama (2000), referenciado tanto en el D.S N°90 del 2000 como en la circular A-53/004 para calcular la ZPL, con el fin de obtener resultados consistentes.

En su experimento, las pendientes fueron clasificadas en cuatro grupos, es decir, horizontal (m=0), suave (m=0,07), intermedia (m=0,1), elevada (m=0,44). Por lo tanto, para los cálculos se utilizaron las 3 últimas, descartando las pendientes horizontales debido a que no representan la real naturaleza del fenómeno.

Las pendientes seleccionadas tienen una correlación cercana al 90% entre los valores de *runup* calculados con el modelo CMS-Wave y los medidos en los experimentos desarrollados por Ahrens & Titus (1981) y Mase & Iwagaki (1984) para canales con pendientes uniformes (Tabla 6-1).

Por lo que el modelo no fue limitado por las pendientes utilizadas.

Tabla 6-1: Estadísticas del Promedio calculado y medido del *runup* del oleaje

Pendiente	Promedio Calculado R2 (m)	Promedio Medido R2	Diferencia Promedio	Coeficiente de correlación
1:1	0,40	0,29	0,11	0,74
2:3	0,41	0,39	0,02	0,86
1:2	0,44	0,43	0,01	0,90
2:5	0,37	0,37	0,00	0,88
1:3	0,33	0,33	0,00	0,79
1:4	0,29	0,28	0,01	0,72
1:5 - 1:30	0,09	0,09	0,00	0,91

(Fuente: Lin, et al., 2008)

R2 = Es *runup* al 2% de excedencia de la altura de ola.

6.2 ZONA DE PROTECCIÓN LITORAL Y SU RELACIÓN CON LA ZONA DE ROTURA

Una vez definido el oleaje y la pendiente del estudio, se realizó un análisis matemático a la Ecuación 6-1 partiendo del supuesto que el AZR es la distancia horizontal que existe desde el punto de rotura y la línea de costa.

Se logró obtener el siguiente esquema trigonométrico y su ecuación.

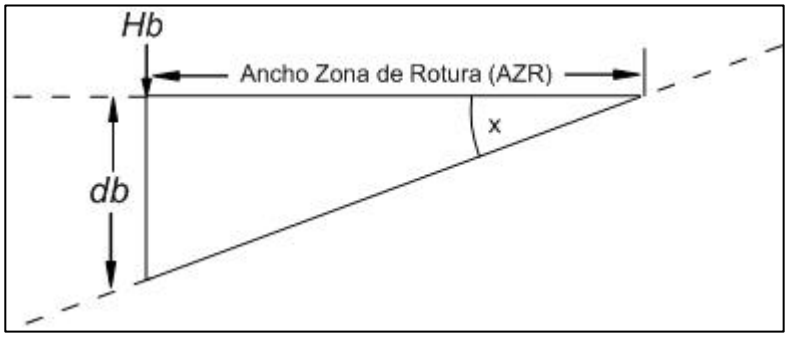


Figura 6-3: Esquema Ancho de Zona de Rotura (Fuente: Elaboración propia).

$$\tan(x) = m = \frac{db}{AZR}$$

Ecuación 6-1 Relación trigonométrica.

Donde db es la profundidad en la que una ola de altura Hb rompe, y su valor estará definida por el criterio de rotura para una onda solitaria (McCowan, 1894), dado por:

$$Hb = 0{,}78 * db \;\leftrightarrow\; db = 1{,}28 * Hb$$

Ecuación 6-2 Altura de ola rompiente.

Hb: Altura de ola rompiente.

db: Profundidad de donde ocurre la rotura.

Que combinado con la Ecuación 6-1, se obtiene el ancho de la zona de rotura (*AZR*):

$$AZR = \frac{1{,}28 * Hb}{m}$$

Ecuación 6-3 Ancho zona de rotura.

La altura de ola rompiente Hb se calculó como lo indica la circular A-53/004, formulada por Komar & Gaughan (1972) y modificada por Rattanapitikon & Shibayama (2000). La fórmula fue obtenida de experimentos en canales, por lo que, se asumió $Hs = Ho$ y Tp para la longitud de onda en aguas profundas Lo.

$$Hb = (10{,}02m^3 - 7{,}46m^2 + 1{,}32m + 0{,}55)H_o\left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{\frac{-1}{5}}$$

Ecuación 6-4 Altura de ola rompiente (Rattanapitikon & Shibayama, 2000)

El valor del AZR se calculó para cada uno de los estados de mar (datos de olas de ERA-Interim), nodos y pendientes definidas anteriormente. Cabe destacar que el AZR es un valor por ola y la ZPL es un promedio por nodo, ya que, utiliza la altura de la ola rompiente promedio. Entonces, para cada nodo y pendiente, se calculan 54056 AZR (estados de mar presentes en la data) y una ZPL.

La ZPL fue utilizado como valor límite para conocer cuál es el porcentaje de veces que excede el valor del AZR. Este valor porcentual fue graficado por cada uno de los nodos, para entender cómo se comporta la excedencia a lo largo de chile, basándonos en la data obtenida del modelo ERA-Interim.

Finalmente, para analizar si el porcentaje de excedencia depende de la curva de distribución de las alturas significativas, que proporciona el modelo atmosférico ERA-Interim, se procedió a comparar los resultados de excedencia con datos de oleaje del modelo WaveWatch III de la NOAA. Sin embargo, solo se compararon datos desde 1997 a 2010, que corresponde a la cantidad de datos disponibles de WaveWatch III.

6.3 INFLUENCIA DEL COEFICIENTE P

6.3.1 INTERPOLACIÓN.

En la circular A-53/004, se presenta el coeficiente P, el cual simplifica la Ecuación 6-4 a:

$$Hb = P * (10{,}02 * m^3 - 7{,}46 * m^2 + 1{,}32 * m + 0{,}55)$$

Ecuación 6-5 Altura de ola rompiente con coeficiente P.

Este coeficiente reemplaza la Ecuación 5-36 con los valores entregados en la Tabla 5-4 elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada con datos de olas oceánicas.

Para conocer la influencia que tiene el coeficiente P en la altura de rotura al definir la ZPL, se realizó una comparación de los resultados utilizando las formulaciones con coeficiente P de la Ecuación 6-5 y sin coeficiente P de la Ecuación 5-35.

En la Tabla 5-4 se define el valor del coeficiente P para ciertas latitudes a lo largo de Chile. Si la latitud de zona de estudio no se encuentra disponible, la circular A-53/004 recomienda utilizar interpolación lineal.

Para determinar la existencia de diferencias significativas al momento de definir la ZPL utilizando otro método que no sea el recomendado. Se realizó una comparación entre los valores de la ZPL para 23 nodos y 3 pendientes, utilizando dos métodos interpolación: Interpolación lineal y *Spline* cúbicos con condición en los extremos; natural, parabólica, periódica y *Hermite* mediante un complemento de Microsoft Excel[4] para los nodos que se encuentran en las latitudes no disponibles en la Tabla 5-4.

6.3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Debido a que el coeficiente P, viene facilitado en la Tabla 5-4, normalmente no se calcula. Sin embargo, se generó una serie de tiempo con los valores de P (coeficiente P) para cada uno de los nodos tabulados en la tabla anteriormente mencionada y para las 2 bases de datos disponibles con el objetivo de determinar si el valor del coeficiente P, está asociado a algún parámetro estadístico.

Para esto se determinó:

- El promedio de P.
- La desviación estándar.
- El umbral de valores atípicos (3 desviaciones estándar sobre el promedio).
- El promedio de los valores atípicos.
- Los Percentiles 50,75,95 y 97,5 de P.

Con estos resultados se procedió a generar un gráfico como se puede apreciar en la Figura 6-4, que permitió determinar la definición estadística más cercana al valor del coeficiente P entregado por la autoridad marítima.

[4] Disponible en http://personales.gestion.unican.es/martinji/Interpolacion.htm, accesada el 15 de marzo de 2016.

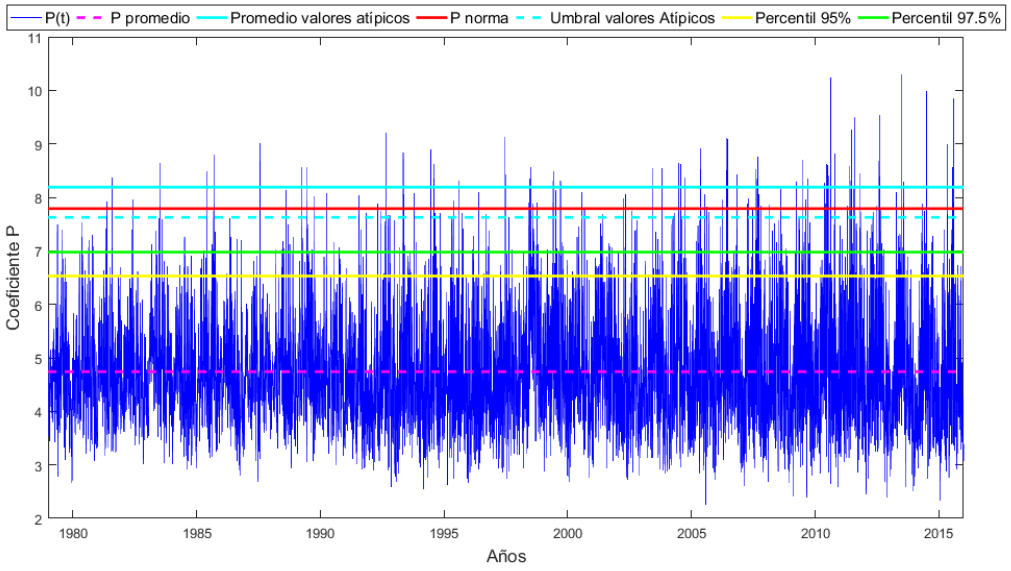


Figura 6-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, conocido el fundamento físico de la ZPL y las relaciones que existen con las formas de calcularla y los fenómenos que representa, se procedió a configurar los modelos hidrodinámicos.

6.4 MODELACIÓN CON CMS-WAVE, CMS-FLOW Y PTM

Para simular una descarga de partículas en un punto adyacente al límite exterior de la ZPL, se utilizaron los modelos CMS-Wave (olas), CMS-Flow (corrientes) y PTM (rastreador lagrangiano de partículas).

Lo primero que se debe definir para una modelación es el lugar físico donde se desarrollara el fenómeno. Como esta memoria pretende simular un ensayo de laboratorio con modelos hidrodinámicos, la batimetría fue definida como una fracción finita de playa, es decir, un segmento rectangular dentro de una bahía (vista en planta), con veriles rectos y paralelos. El perfil de la playa se consideró constante en toda su extensión, por lo tanto, las zonas de berma, intermareal y sumergida conservaron la misma pendiente en todo el dominio. No se incluyó barras longitudinales, ni modificación del perfil en el tiempo (*hard bottom*).

Las dimensiones de cada batimetría se presentan a continuación:

Tabla 6-2: Dimensiones de la batimetría según pendiente.

Pendiente	Lx (m)	Ly (m)	dx (m)	dy (m)
0,07	1100	1000	10	10
0,10	1050	1000	10	10
0,44	1050	1000	10	10

(Fuente: Elaboración propia)

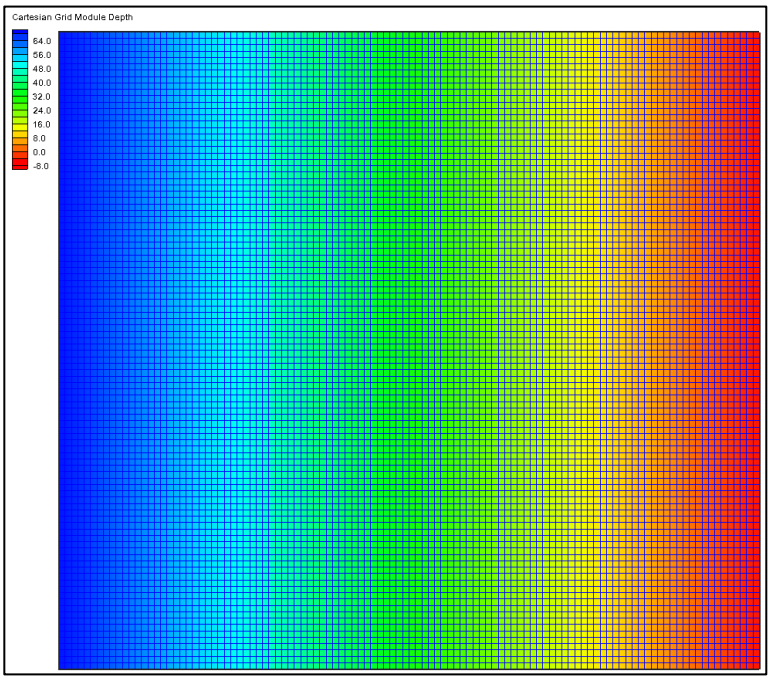


Figura 6-5: Ejemplo dominio computacional y batimetría de CMS-Wave con pendiente 0,07. (Fuente: Elaboración propia).

Con la batimetría claramente fijada, se procedió definir ancho de la ZPL, altura significativa, periodos, direcciones del oleaje y la condición de marea.

Las variables se indican a continuación:

Tabla 6-3: Parámetros previamente seleccionados para las modelaciones.

Pendiente	Periodo (s)	Dirección del oleaje (°)[5]	Amplitud M2 (m)
0,07	8	0	0,2 (Cuadratura) 0,6 (Sicigia)
0,10	12	±15	
0,44	16	±30	

(Fuente: Elaboración propia).

Los tres periodos fueron definidos por el autor, de tal manera que representen oleajes característicos de Chile. Las direcciones fueron cinco, las cuales no superaron los 30° de incidencia, debido a que la zona a modelar es somera (poca profundidad), por lo que el oleaje llega casi de forma perpendicular a la costa.

La marea fue seleccionada de forma armónica, representada por la componente M2 en condiciones de sicigia y cuadratura, la cual tiene una frecuencia de 12,421 horas y es la más importante energéticamente hablando (Pugh, 1987). La diferencia de la amplitud de la componente de marea M2 en condición sicigia y cuadratura se obtuvo basándose en los datos recopilados del modelo desarrollado por Egbert G. & Erofeeva L. llamado TPXO7.1 (Egbert & Erofeeva, 2001) para las costas de Chile.

[5] Dirección perpendicular a la línea de costa en aguas profundas.

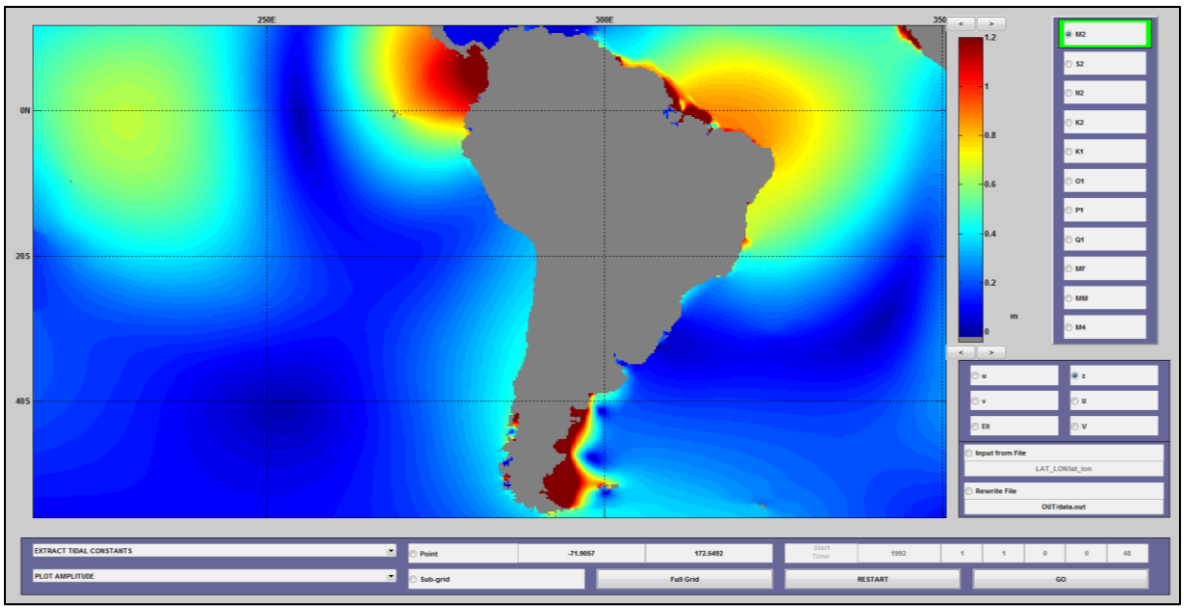


Figura 6-6: Mapa de la superficie oceánica indicando la amplitud de la componente armónica de marea M2 extraída del modelo TPXO7.1 (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente se generó un diagrama de flujo que definió las alturas significativas a utilizar en las modelaciones (Figura 6-7). Este diagrama fijo el valor de la ZPL determinado a partir de los datos en aguas profundas del nodo 35 S para las tres pendientes seleccionadas. Se utilizó el nodo 35S debido a que su valor de ZPL eran cercanos al promedio de la ZPL de los 23 nodos.

Por ejemplo, para determinar la altura significativa siguiendo el diagrama de flujo con periodo de 12 [s], pendiente de fondo 0,1:

- Con los datos de olas ERA-Interim para el nodo 35 S, se procede a calcular altura de rotura promedio $\overline{Hb}$. Con este valor se calcula la ZPL dando como resultado 73[m] app.
- Luego con el periodo de ola ,12 [s], pendiente de fondo, 0,1 y la ZPL, 73[m]. Se busca con un proceso iterativo, que valor de altura significativa Hs se necesita para que el valor de la ZPL sea igual al calculado en el paso anterior.

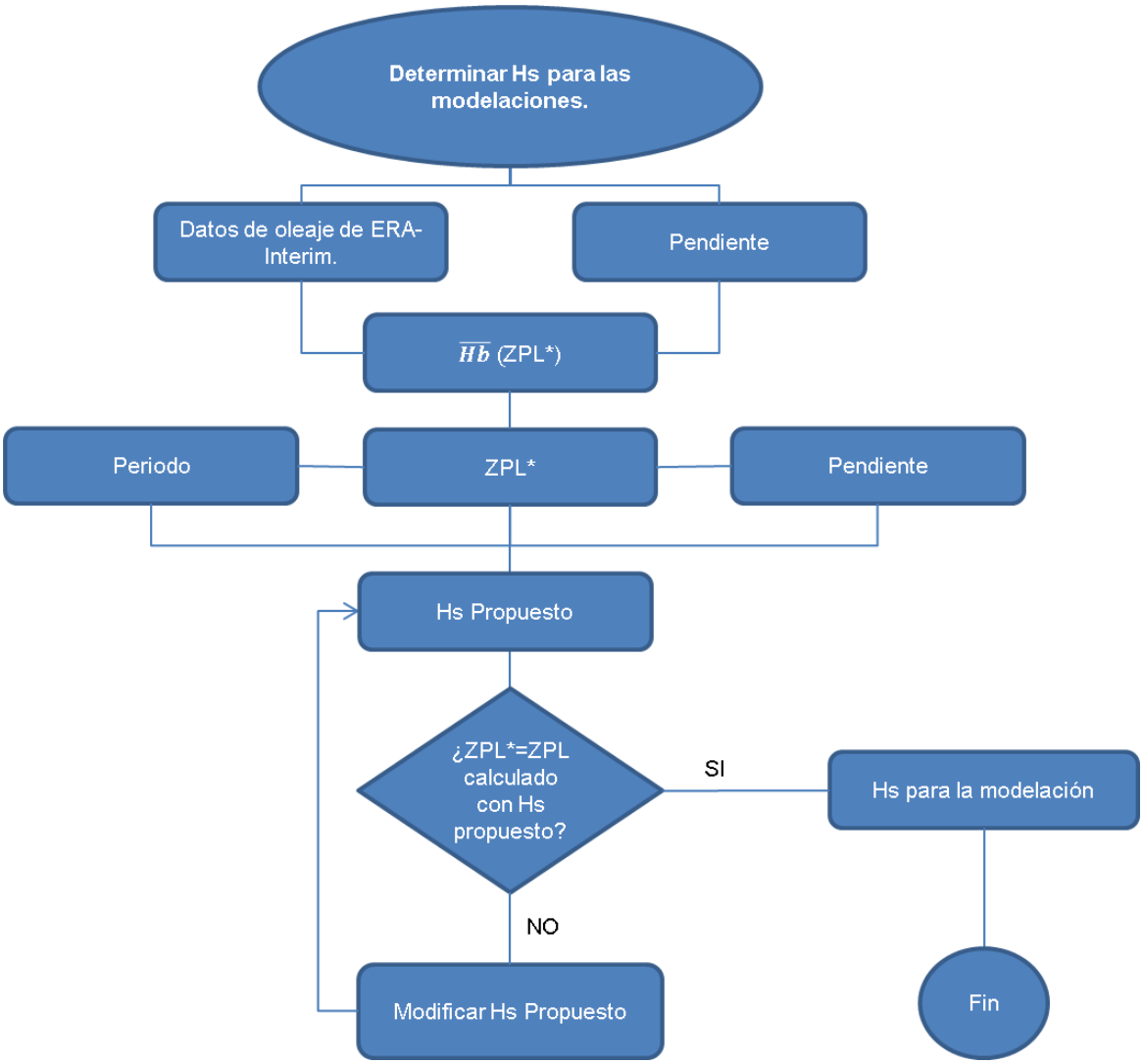


Figura 6-7: Diagrama de flujo para seleccionar Hs en CMS-Wave (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se presenta un resumen en la Tabla 6-4 de los parámetros utilizados en las modelaciones.

Tabla 6-4: Parámetros finales utilizados en las modelaciones según pendiente.

Pendiente	Periodo (s)	Hs (m)	Dirección (°)	Condición de marea (m=	ZPL (m)	Distancia de descarga (m)
0,07	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	102,0	108
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	102,5	108
	16	2,0	±30		102,8	108
0,10	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	72,4	73
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	72,7	73
	16	2,0	±30		72,9	73
0,44	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	14,4	15
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	14,5	15
	16	2,0	±30		14,5	15

(Fuente: Elaboración propia)

La distancia de descarga corresponde a la distancia desde la costa hasta el punto de descarga de las partículas.

Con los parámetros definidos, la cantidad de modelos desarrollados fueron 90 (tres alturas significativas, tres periodos, cinco direcciones, tres pendientes de fondo y dos mareas) debido a todas las combinaciones posibles. La inclusión de solo una variable más implicaba aumentar al doble la cantidad de modelos, tiempos y recursos computacionales necesarios.

El tiempo de modelación para cada caso fue de 48 horas, con tiempo de estabilidad del modelo de 12 horas y los resultados están basados en 24 horas extraídas después que el campo de velocidades lograra una condición de estabilidad como lo indica el siguiente gráfico.

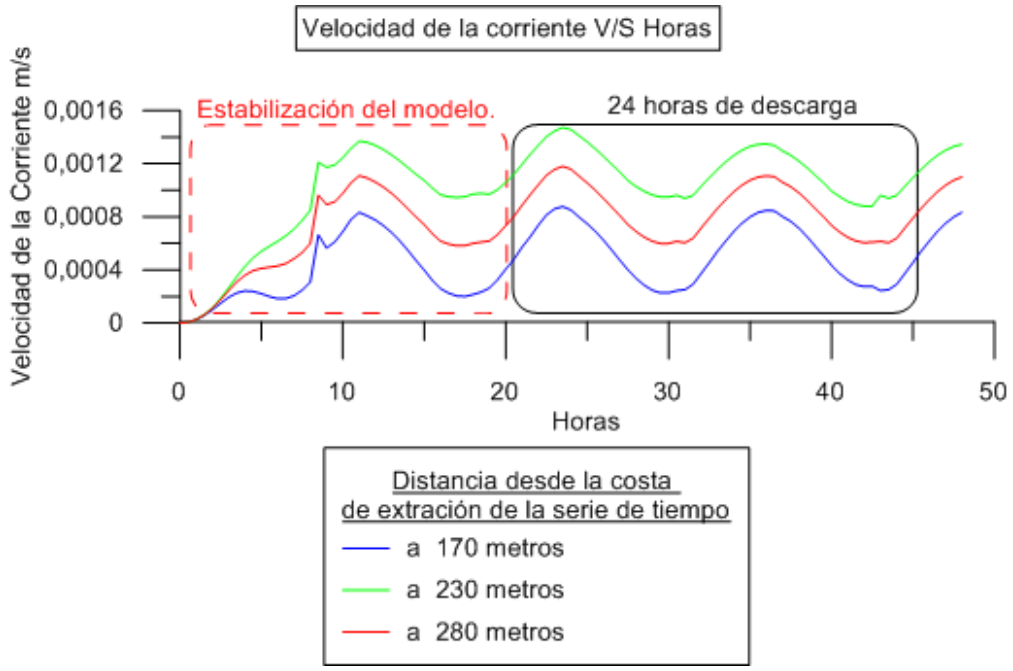


Figura 6-8: Velocidad de la corriente transversal de 48 horas de simulación en CMS-Flow. (Fuente: Elaboración Propia).

La Figura 6-8 indica una serie de tiempo de velocidad de la corriente en un modelo con pendiente de 0,07, periodo de 16 segundos, dirección de incidencia 0°, altura significativa 2 metros y condición de marea en cuadratura de amplitud 0,2 metros, en tres puntos ubicados en la grilla a una distancia desde la costa.

Con los campos hidrodinámicos ya terminados, se procedió a realizar la descarga de partículas con el módulo PTM a una distancia desde la costa indicada en la Tabla 6-4.

Las características de las partículas descargadas dependen del contaminante a estudiar, sin embargo, para este estudio se modeló una partícula con boyantes negativa con densidad 2650 kg/m^3 (arena). Debido que es un estudio de campo lejano, los términos difusivos se tornan insignificantes en comparación a los advectivos, por lo que, no se consideraron valores para el coeficiente de difusión molecular. El radio de la tubería de descarga fue de 1 metro, la cual, descargaba a razón de 0,05 kg/s, lo que implica que por día se descargaron 4,3 toneladas de partículas.

7 RESULTADOS

Para determinar si se cumple el objetivo establecido en la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, al obtener el ancho de la Zona de Protección Litoral:

- Se buscó una relación entre la ZPL y el AZR.
- Se determinó la diferencia que existe entre calcular la ZPL utilizando o no el coeficiente P indicado en A53/004.
- Se determinó la diferencia que existe al aplicar distintos métodos de interpolación cuando se utiliza el coeficiente P para calcular la ZPL en zonas expuestas al oleaje a lo largo de Chile que no se encuentran en latitudes determinadas en la Tabla 5-4.
- Se desarrollaron pruebas numéricas con el software SMS que permitió simular el comportamiento de partículas liberadas en una zona próxima al borde exterior de la ZPL bajo distintas condiciones hidrodinámicas.

Los resultados son presentados a continuación.

7.1 RELACIÓN ENTRE ZPL Y AZR

El análisis matemático a la fórmula para obtener la ZPL, permitió determinar que el AZR multiplicada por un factor de seguridad de 1,6, utilizando el criterio de rotura desarrollado por McCowan en 1894, es igual que la fórmula para determinar la ZPL.

$$AZR = \left[\frac{1{,}28 * Hb}{m}\right] \leftrightarrow ZPL = \underbrace{\left[\frac{1{,}28 * \overline{Hb}}{m}\right]}_{\overbrace{AZR}} * 1{,}6$$

Ecuación 7-1: Relación entre ZPL y AZR.

Además del análisis a la formula, se obtuvo el porcentaje de excedencia del AZR sobre la ZPL para cada nodo, graficando AZR versus frecuencia acumulada, como lo indica la Figura 7-1. Los resultados de todos los nodos se presentan en la Figura 7-2.

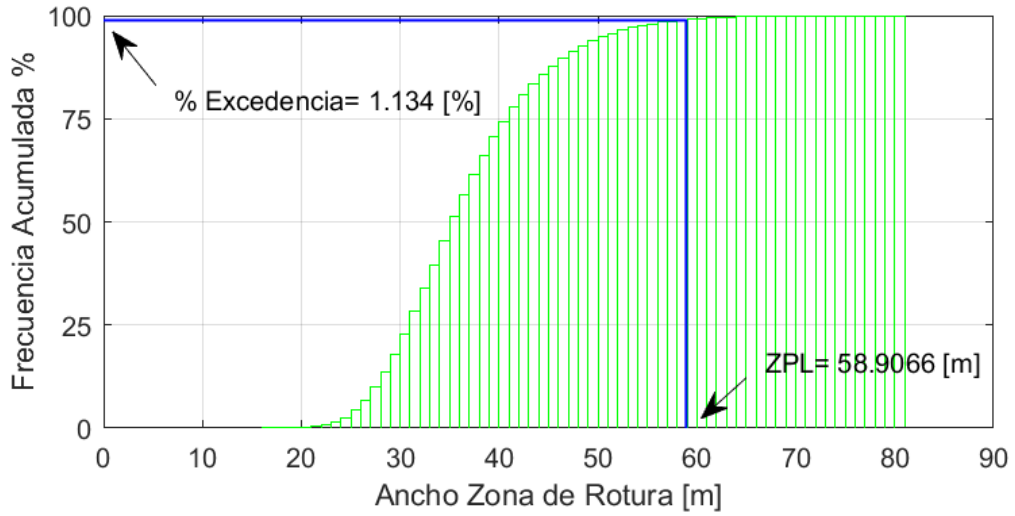


Figura 7-1: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 19S (Fuente: Elaboración propia)

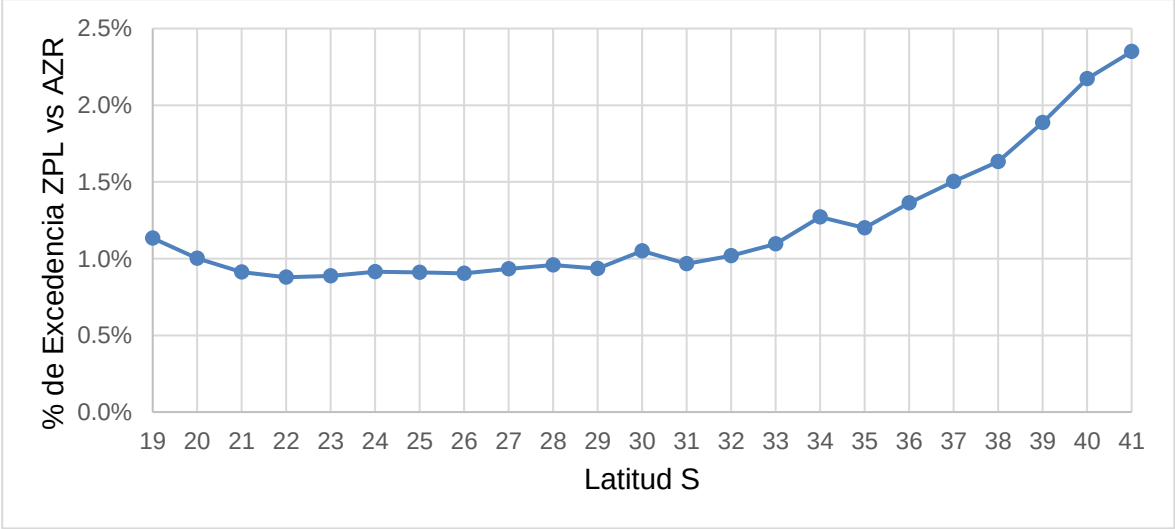


Figura 7-2: Porcentaje de excedencia por nodo, datos ERA-Interim. (Fuente: Elaboración propia)

7.2 INFLUENCIA DEL COEFICIENTE P

7.2.1 INTERPOLACIÓN.

La diferencia que existe al calcular la ZPL utilizando el coeficiente P indicado en la Tabla 5-4 o con la base de datos de oleajes modelos de *hindcast* obtenidos de ERA-Interim, para cada nodo, se presenta a continuación.

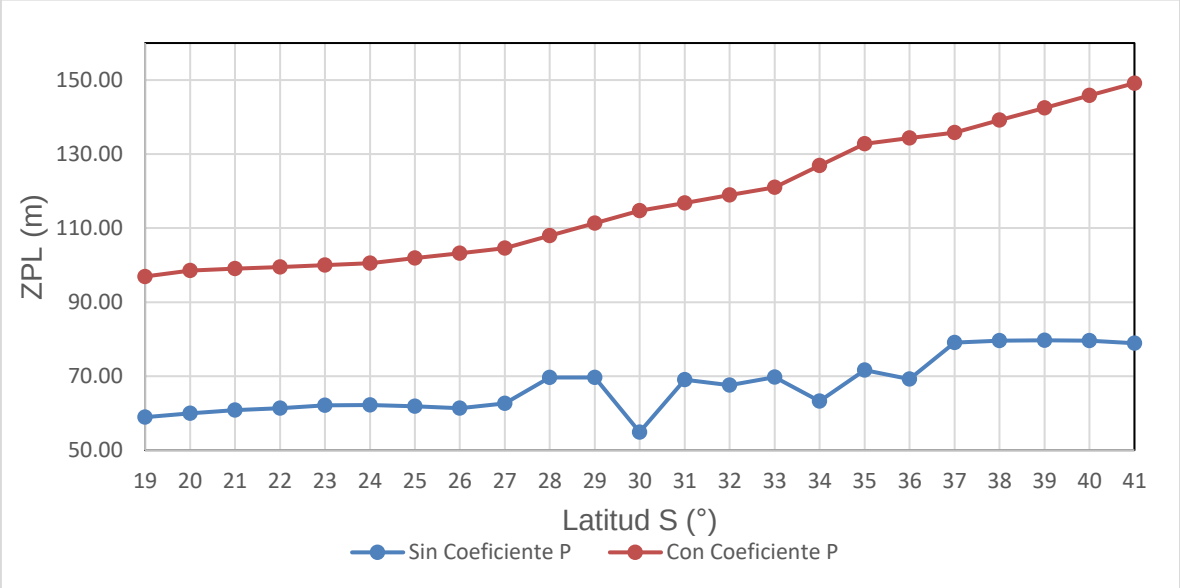


Figura 7-3: Diferencia de ZPL s/coef P vs ZPL c/coef P para una pendiente igual a 0,1. (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Figura 7-3 la línea roja muestra los valores de la ZPL calculados con el coeficiente P (Ecuación 6-5 para calcular Hb) correspondiente a cada latitud y la línea azul indica los valores de ZPL calculados sin el coeficiente P (Ecuación 5-35 para calcular Hb).

La diferencia porcentual de la ZPL para las 3 pendientes y los 23 nodos se presentan a continuación.

Tabla 7-1: Diferencias porcentuales al calcular la ZPL con el coeficiente P.

Latitud S	Zona	Diferencia % base en coeficiente P		
		Pendiente		
		0,07	0,1	0,44
19	Arica	39%	39%	39%
20	Tarapacá 1	39%	39%	39%
21	Tarapacá 2	39%	39%	39%
22	Antofagasta 1	38%	38%	38%
23	Antofagasta 2	38%	38%	38%
24	Antofagasta 3	38%	38%	38%
25	Antofagasta 4	39%	39%	39%
26	Antofagasta 5	41%	41%	41%
27	Atacama1	40%	40%	40%
28	Atacama2	35%	35%	35%
29	Atacama3	37%	37%	37%
30	Coquimbo 1	52%	52%	52%
31	Coquimbo 2	41%	41%	41%
32	Coquimbo 3	43%	43%	43%
33	Valparaíso	42%	42%	42%
34	O'Higgins	50%	50%	50%
35	Maule 1	46%	46%	46%
36	Maule 2	48%	48%	48%
37	Biobío 1	42%	42%	42%
38	Biobío 2	43%	43%	43%
39	Araucanía	44%	44%	44%
40	Los Ríos	45%	45%	45%
41	Los Lagos	47%	47%	47%

(Fuente: Elaboración Propia)

El color verde indica la menor diferencia entre el valor de la ZPL calculado sin el coeficiente P y el calculado con el coeficiente P

El color rojo indica la mayor diferencia entre el valor de la ZPL calculado sin el coeficiente P y el calculado con el coeficiente P

7.2.2 INTERPOLACIÓN LINEAL Y APLICACIÓN DE *SPLINES* CUBICOS

Cuando se utiliza el coeficiente P para obtener la ZPL, la circular A53/004 indica que, para latitudes no tabuladas en la Tabla 5-4, se debe interpolar linealmente. La diferencia de la ZPL entre interpolar linealmente y usar *splines* cúbicos, se presenta a continuación:

Tabla 7-2: Diferencias entre interpolación lineal y *spline* cubico para una pendiente de 0,1.

Interpolación Lineal				*Spline* Cúbico			
				Natural	Parabólica	Periódica	Hermite
Latitud °S	Coef. P	Hb con tabulación	Ancho ZPL	Diferencia con interpolación lineal			
19	7,67	4,73	96,92	0,2%	0,3%	0,2%	0,2%
20	7,79	4,81	98,50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
21	7,83	4,83	99,01	0,4%	0,3%	0,4%	0,4%
22	7,87	4,86	99,51	0,4%	0,3%	0,4%	0,4%
23	7,91	4,88	100,02	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%
24	7,95	4,91	100,53	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
25	8,06	4,97	101,87	-0,8%	-0,7%	-0,7%	-0,8%
26	8,16	5,04	103,22	-0,9%	-0,9%	-0,9%	-0,9%
27	8,27	5,11	104,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
28	8,54	5,27	107,94	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
29	8,80	5,44	111,32	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
30	9,07	5,60	114,69	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
31	9,24	5,70	116,80	-0,5%	-0,5%	-0,5%	-0,5%
32	9,40	5,81	118,90	-1,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%
33	9,57	5,91	121,01	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
34	10,04	6,20	126,89	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
35	10,50	6,48	132,77	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
36	10,62	6,56	134,29	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
37	10,74	6,63	135,80	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
38	11,00	6,79	139,14	-1,2%	-1,2%	-1,2%	-1,2%
39	11,27	6,96	142,48	-1,4%	-1,5%	-1,5%	-1,4%
40	11,53	7,12	145,82	-1,1%	-1,2%	-1,2%	-1,1%
41	11,80	7,28	149,16	-0,6%	-0,6%	-0,6%	-0,6%

(Fuente: Elaboración propia)

Las diferencias porcentuales de la ZPL al utilizar los dos métodos de interpolación van desde un -1,5%(celdas rojas) a 0,6% (celdas verdes). La Tabla 7-2 es representativa para todas las tres pendientes utilizadas, debido a que las diferencias porcentuales no cambian con la variación de pendientes.

7.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En este capítulo solo se presentará, el resultado gráfico de un nodo por base de datos. El resto se podrán revisar en los anexos.

Datos de Oleaje ERA:

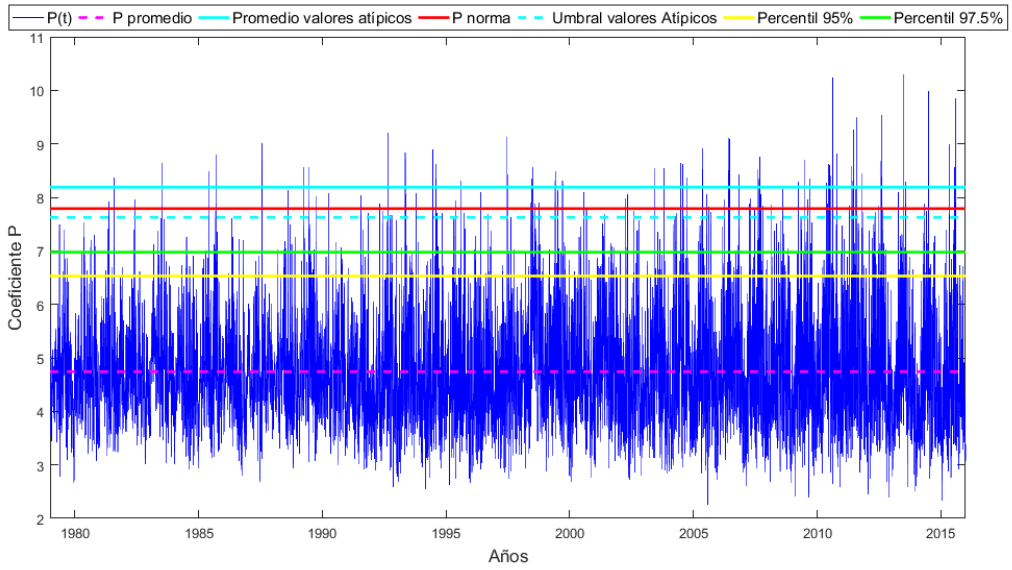


Figura 7-4:Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).

Datos de Oleaje NOAA:

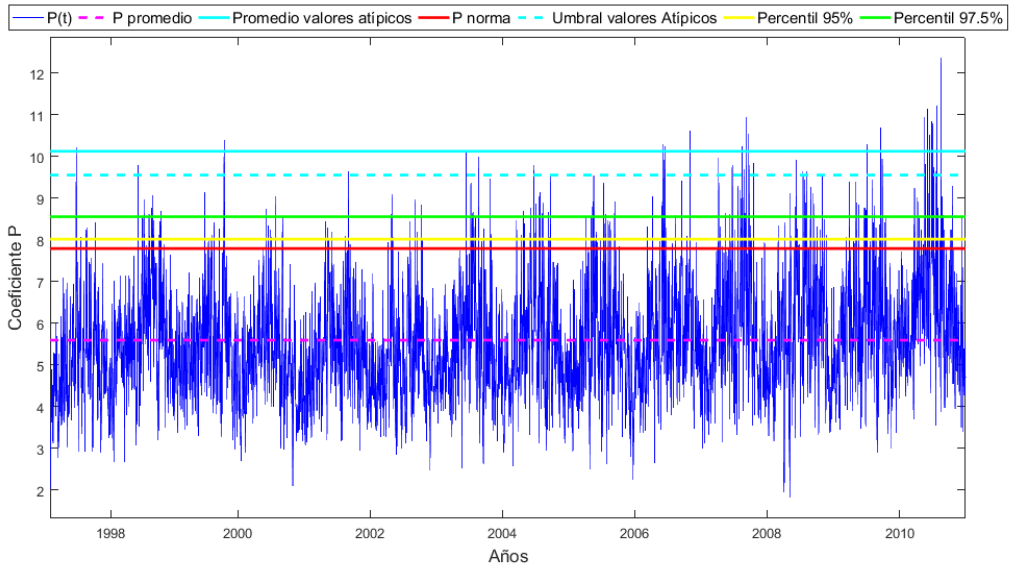


Figura 7-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).

7.3 MODELACIÓN CON CMS-WAVE, CMS-FLOW Y PTM.

A continuación, se presentan los resultados de las modelaciones, distribuidas según pendiente.

En los gráficos se indica la batimetría, el punto de descarga (punto verde), línea límite de la ZPL (línea roja) y la posición de las partículas descargadas; al finalizar 24 horas de simulación. Además, el color de cada partícula representa la densidad de datos en relación a un área circular de 10 metros de radio alrededor de cada partícula (cantidad de partículas por área), clasificadas en la escala de color que va de 0 (amarillo) a 0,5 o mayores (rojo).

Los ejes *x* e *y* , están vinculados al tamaño del dominio batimétrico y no al dominio numérico del modelo. La escala de color de la batimetría va desde los -15 [m] de profundidad (color café, que representa la playa) hasta 208 [m] (azul oscuro). Los veriles están cada 15 [m] de profundidad.

Los gráficos presentados son obtenidos de un oleaje con dirección de incidencia de 0°,15° y 30°. El resto de los gráficos se pueden encontrar en el capítulo de anexos.

Cabe recordar que la posición de los puntos de descarga y ZPL, está determinado para cada pendiente como lo indica la Tabla 7-3.

Tabla 7-3: ZPL y punto de descarga por pendiente.

Pendiente	ZPL (m)	Distancia de descarga (m)
0,07	102	108
0,10	73	73
0,44	14,5	15

(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que las modelaciones son hechas en un dominio numérico prismático, el campo hidrodinámico generado por un oleaje que se aproxima a la costa con una dirección de incidencia de 15°, será similar al campo hidrodinámico generado por un oleaje de -15°. El mismo fenómeno ocurrirá con un oleaje cuya dirección de incidencia sea de 30°. Es por esto, que los resultados de los casos donde la dirección del oleaje sea 15° y -15° se comentan y discuten como ±15°. De igual forma se comentan y discuten los casos en que la dirección del oleaje es de 30° y -30°. Los gráficos de las direcciones negativas para todas las pendientes se pueden encontrar los anexos.

7.3.1 ANÁLISIS DE LA POSICIÓN FINAL DE LAS PARTÍCULAS PARA LA PENDIENTE 0,07

1. Dirección de incidencia 0°: Las partículas son transportadas de manera transversal a la costa, entrando en su gran mayoría a la ZPL, ya sea con 8,12 o 16 segundos de periodo. La mayor densidad de partículas es de 0,2 y ocurre en lugares cercanos al punto de descarga y en el centro de la playa (ver Figura 7-6).

2. Dirección de incidencia ±15°: Las partículas fueron arrastradas por la corriente longitudinal generada por un oleaje oblicuo, saliendo al poco tiempo del dominio numérico. Además, no se logró observar concentración de partículas por lo mismo. Pocas partículas fueron arrastradas a la ZPL (ver Figura 7-7).

3. Dirección de incidencia ±30°: El fenómeno fue similar al observado con dirección de incidencia del oleaje ±15°, pero con mayor intensidad en las corrientes, manteniéndose en el dominio numérico menos tiempo. No se pueden apreciar diferencias entre condición de marea sicigia o cuadratura. La trayectoria de las partículas fue paralelo a la línea de la ZPL, ingresando levemente en ocasiones aleatorias al igual que el observado cuando el oleaje incide con ±15° (ver Figura 7-8).

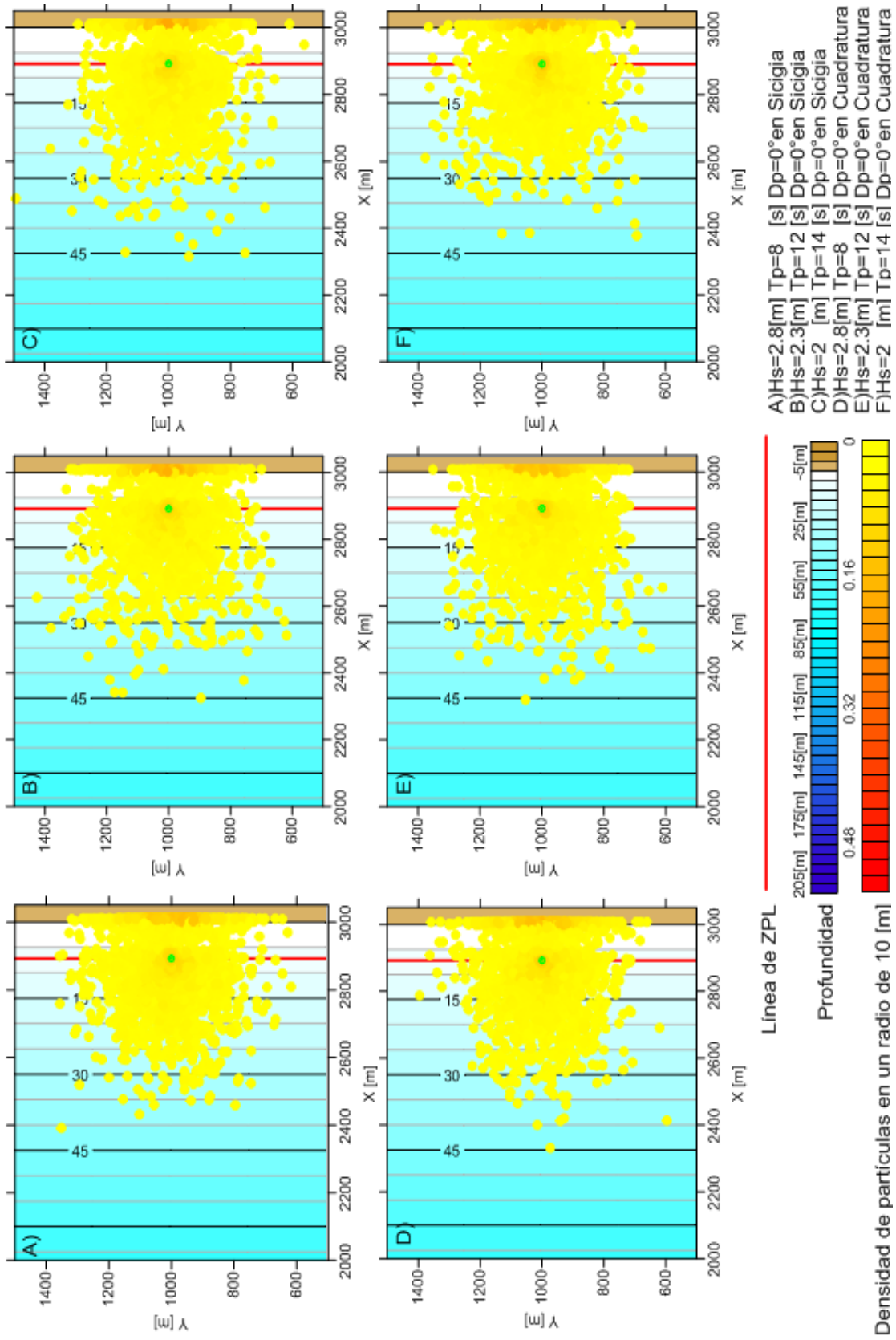


Figura 7-6: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)

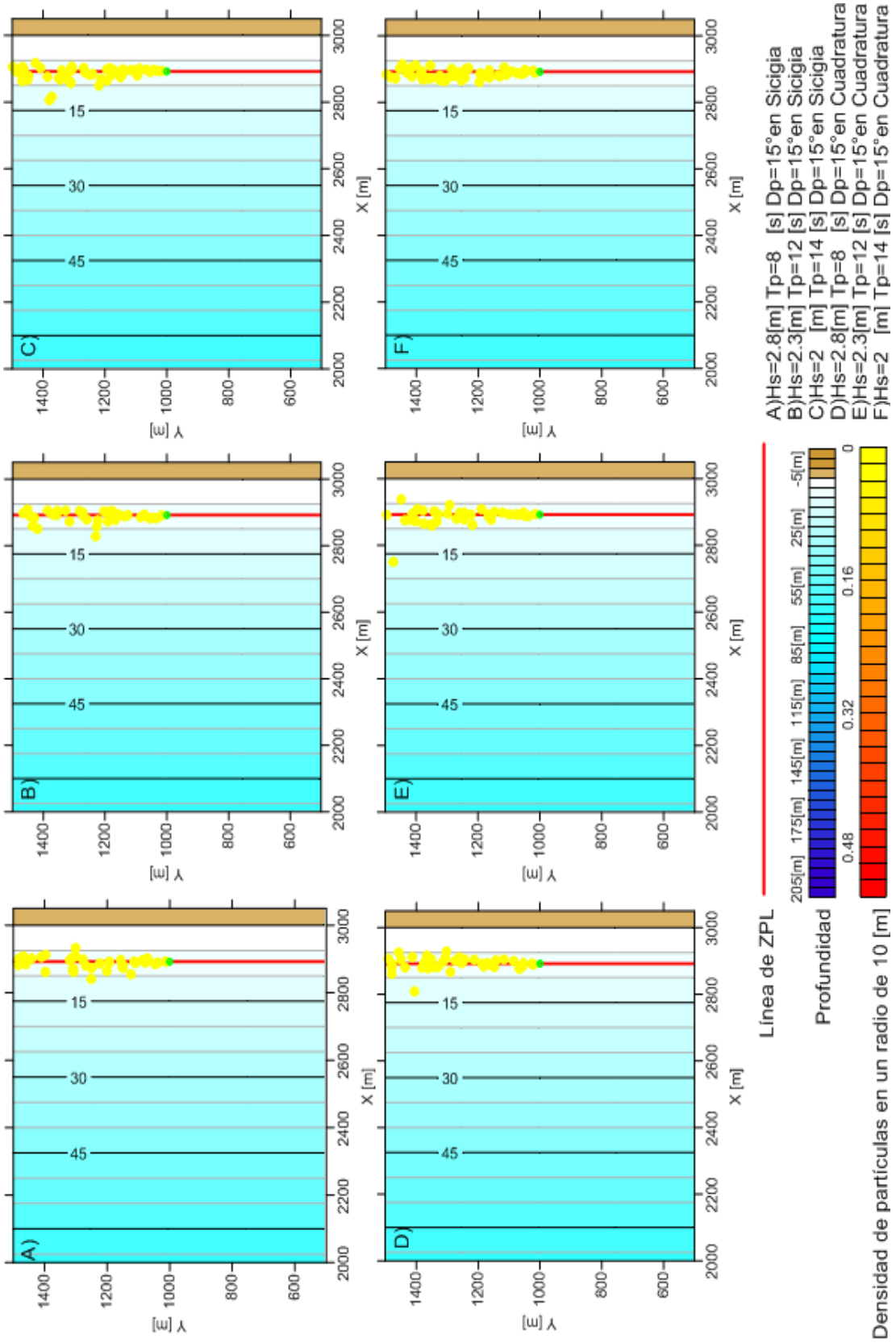


Figura 7-7: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)

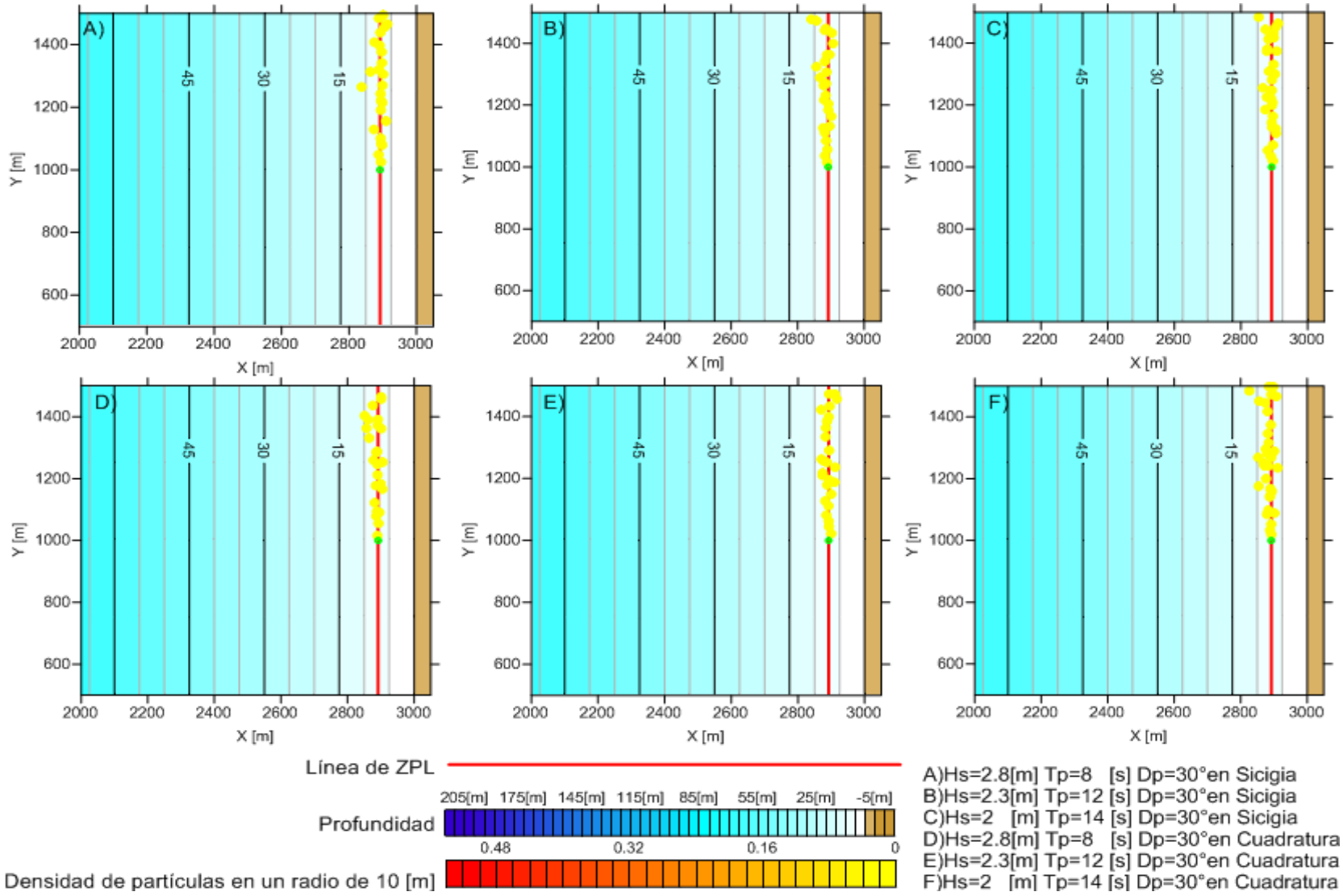


Figura 7-8: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)

7.3.2 ANÁLISIS DE LA POSICIÓN FINAL DE LAS PARTÍCULAS PARA LA PENDIENTE 0,1

1. Dirección de incidencia 0°: Las partículas son transportadas de manera transversal a la costa, entrando en su gran mayoría a la ZPL, ya sea con 8,12 o 16 segundos de periodo. La mayor densidad de partículas es de 0,4 y se ubican en el centro de la playa, sobre todo cuando la condición de marea es cuadratura (ver Figura 7-9).

2. Dirección de incidencia ±15°: Las partículas fueron arrastradas por la corriente longitudinal generada por un oleaje oblicuo, saliendo al poco tiempo del dominio numérico. Además, no se logró observar concentración de partículas por lo mismo. Pocas partículas fueron arrastradas hasta la línea de costa (ver Figura 7-10).

3. Dirección de incidencia ±30°: El fenómeno fue similar al observado con dirección de incidencia del oleaje ±15°, pero con mayor intensidad en las corrientes, manteniéndose en el dominio numérico menos tiempo. No se pueden apreciar diferencias entre condición de marea sicigia o cuadratura. La trayectoria de las partículas fue paralelo a la línea de la ZPL, ingresando levemente en ocasiones aleatorias (ver Figura 7-11).

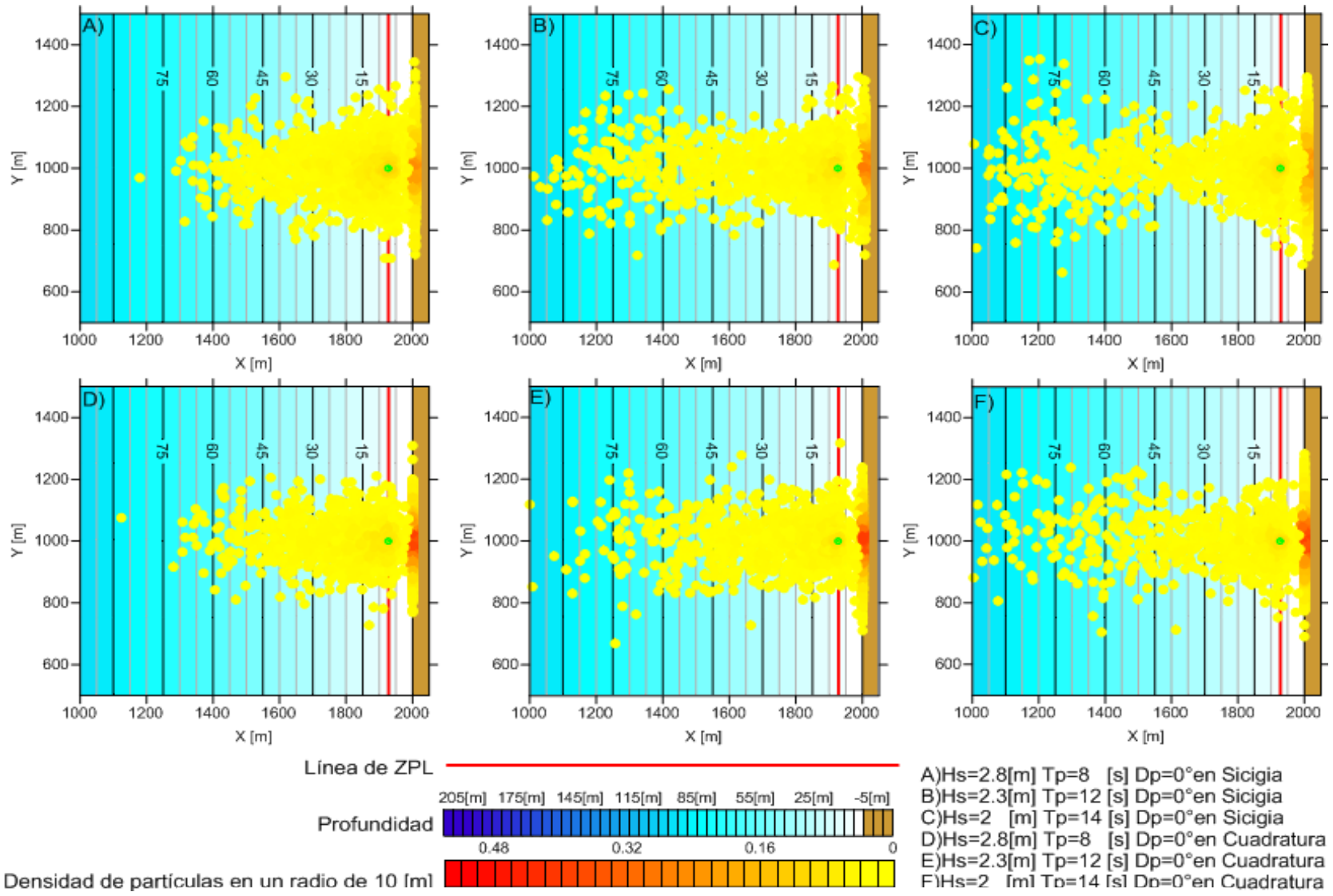
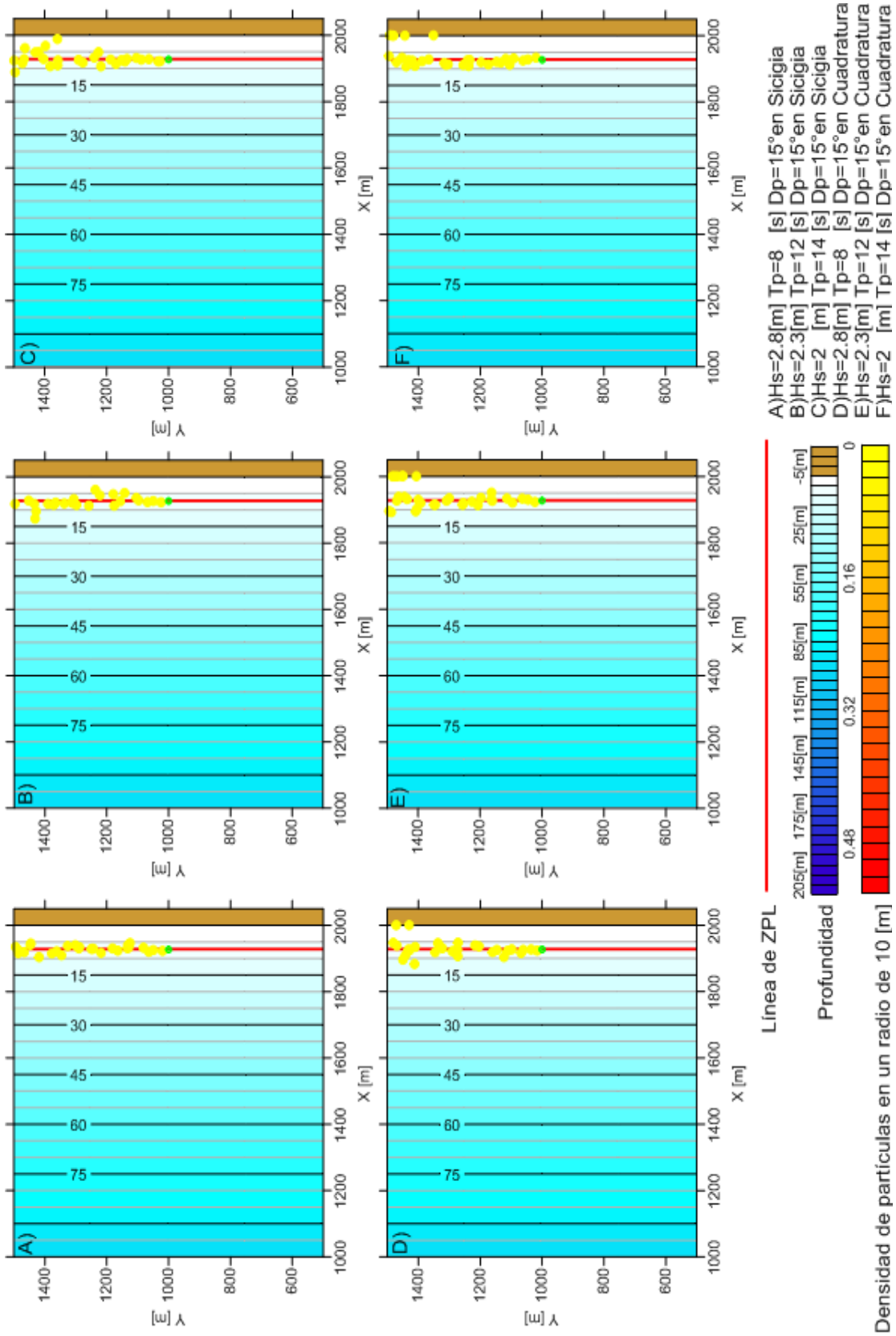


Figura 7-9: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)



Densidad de partículas en un radio de 10 [m]

Figura 7-10: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)

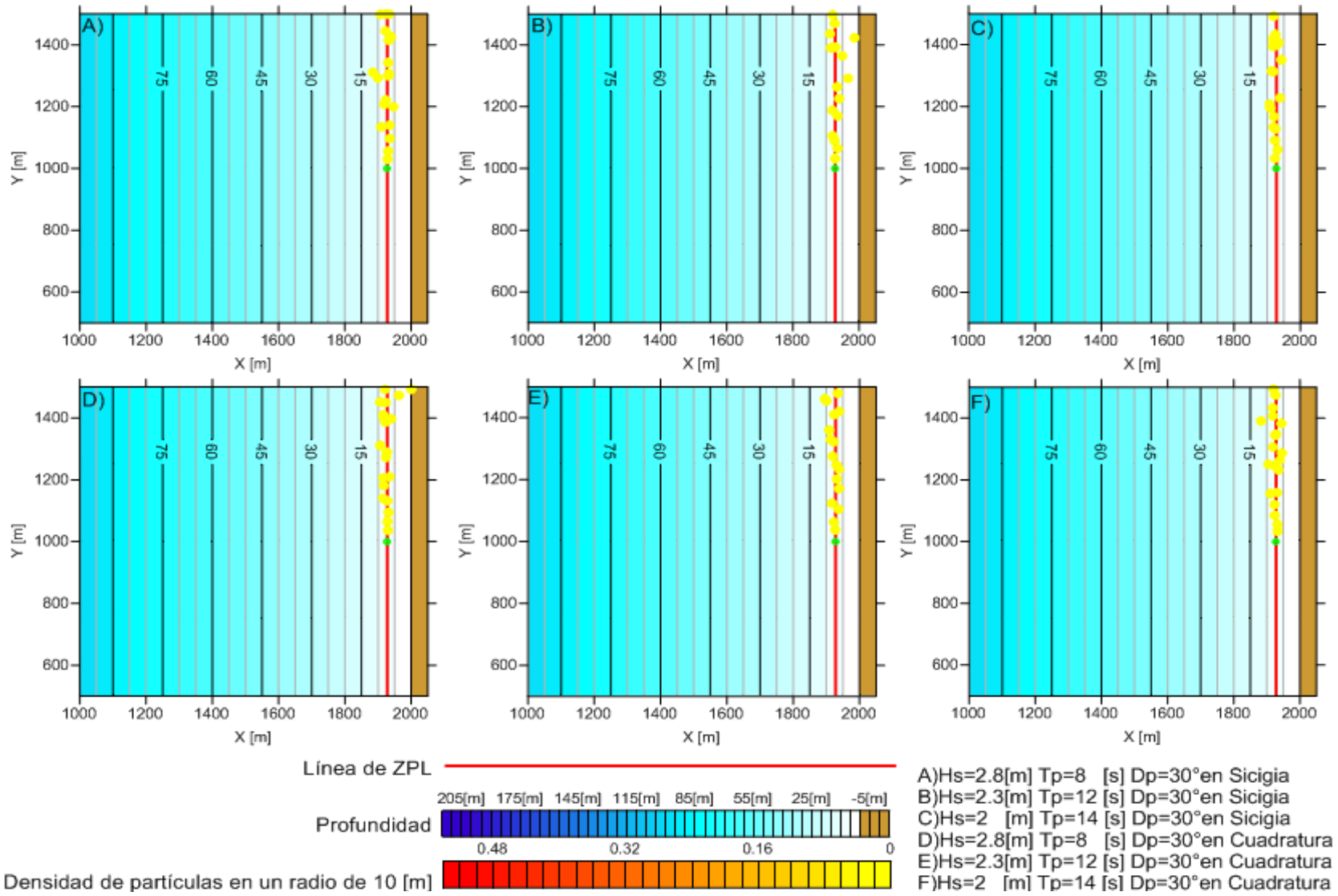


Figura 7-11: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)

7.3.3 ANÁLISIS DE LA POSICIÓN FINAL DE LAS PARTÍCULAS PARA LA PENDIENTE 0,44

1. Dirección de incidencia 0°: Las partículas son transportadas de manera transversal a la costa, con una ZPL mucho más pequeña, el transporte es casi total hacia la costa, encontrándose la mayor densidad de partículas en el borde costero de todas las simulaciones, la zona roja indica valores superiores a 0,5 de densidad de las partículas. (ver Figura 7-12)

2. Dirección de incidencia ±15°: Las partículas fueron arrastradas por la corriente longitudinal generada por un oleaje oblicuo, sin embargo, al ser una pendiente fuerte las partículas fueron depositadas en la costa por el oleaje, a diferencia de los modelos anteriores para oleaje oblicuo. Se observó valores de densidad de partículas cercanos a 0,35 en el borde costero. (ver Figura 7-13)

3. Dirección de incidencia ±30°: Se observaron valores de densidad de partículas aproximadamente de 0,2, ya que al tener mayor intensidad de corrientes longitudinales las partículas no se agrupan en el borde costero como en el caso anterior (±15°). (ver Figura 7-14)

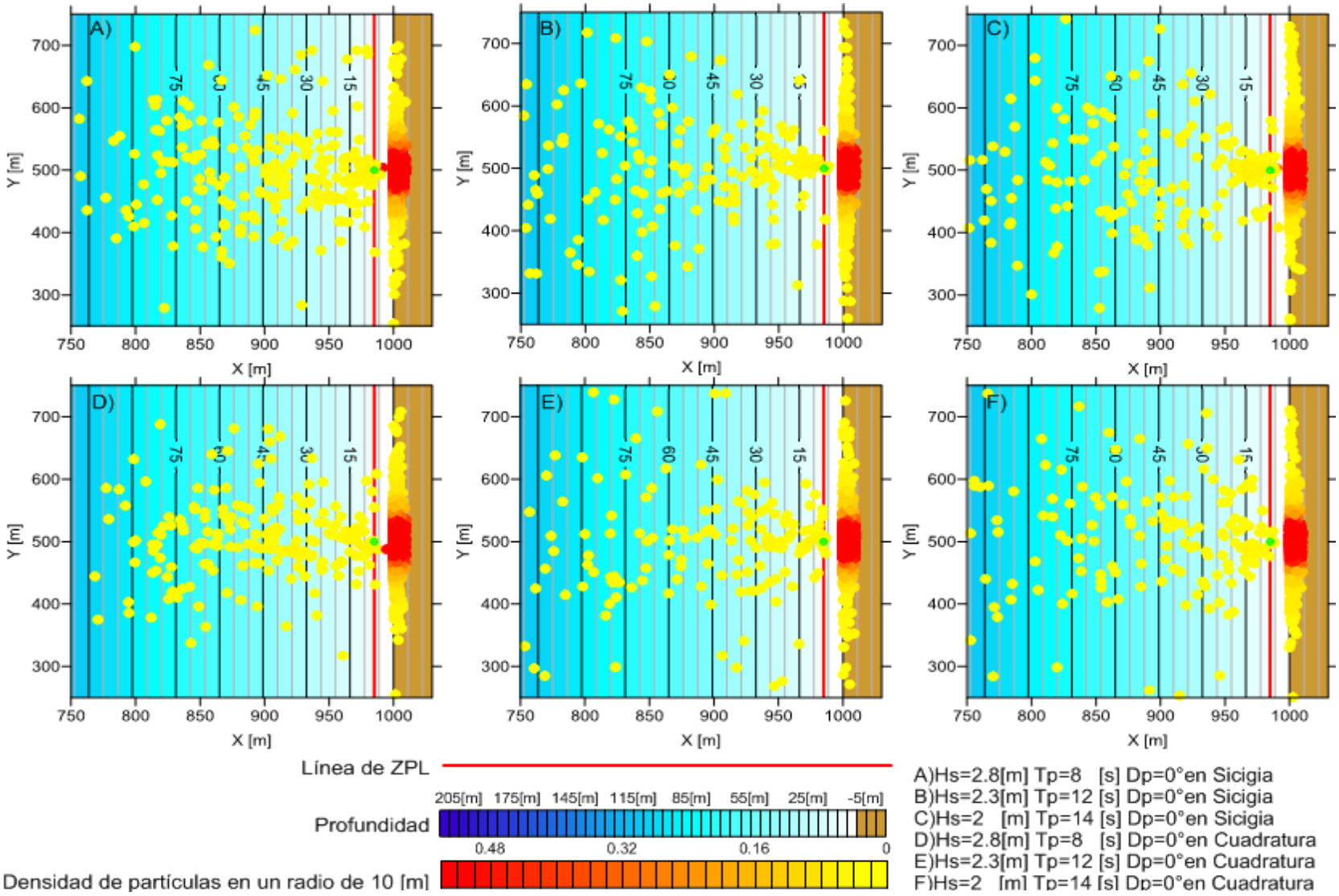


Figura 7-12: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)

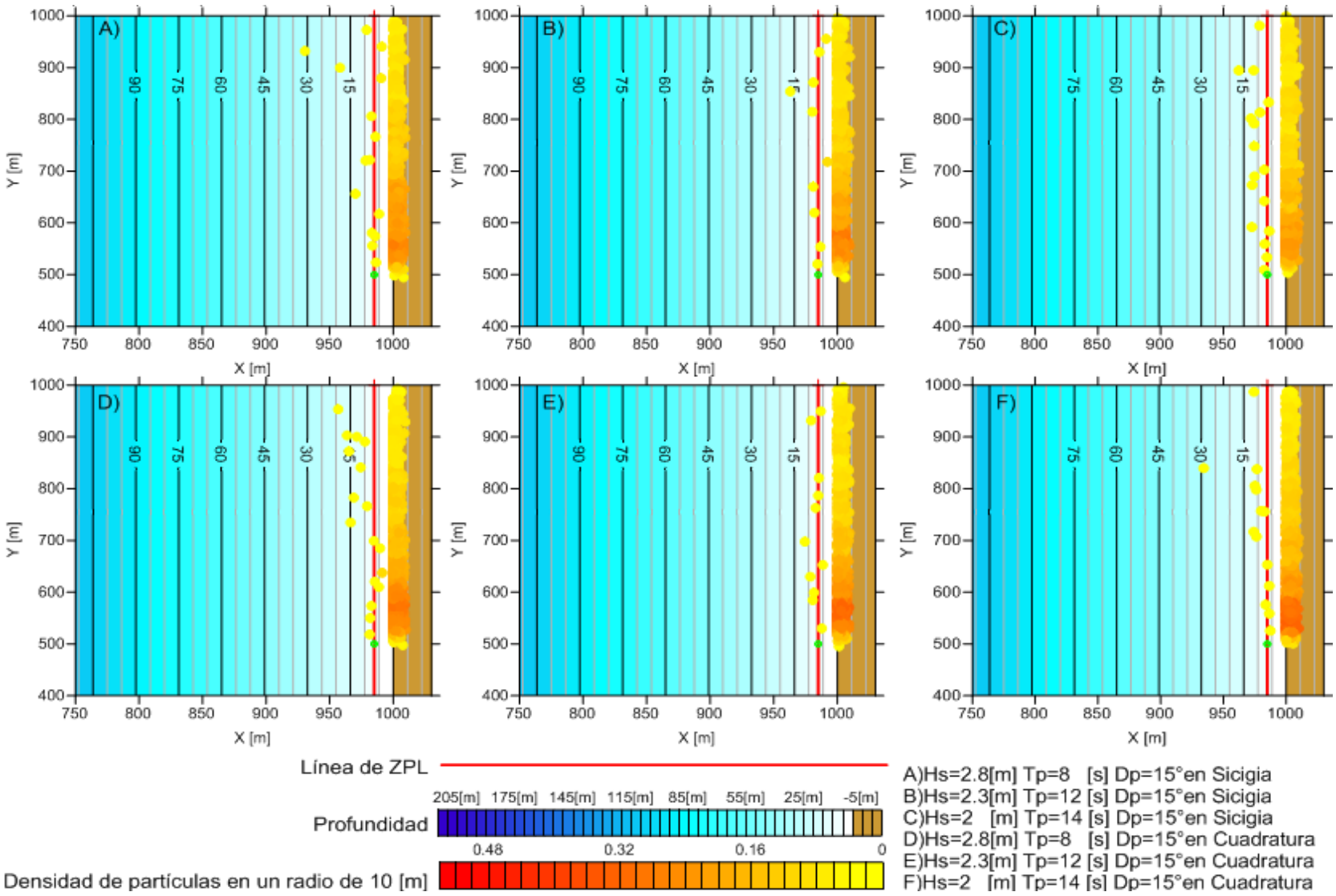


Figura 7-13: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)

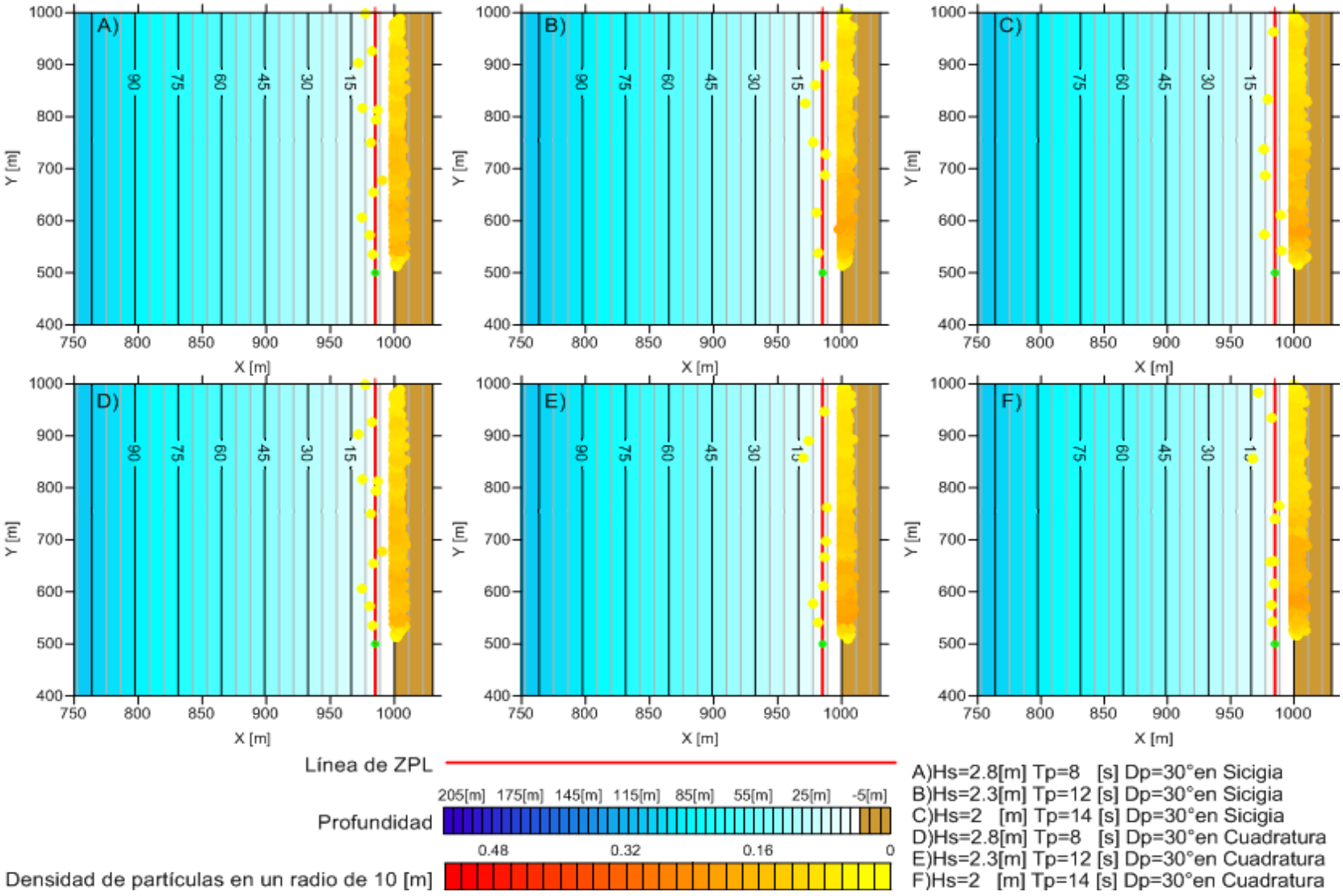


Figura 7-14: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1 RELACIÓN ENTRE LA ZPL Y EL AZR.

Al encontrar la relación entre el AZR y ZPL, se pudo determinar que la ZPL es igual al AZR promedio multiplicada por 1,6. Lo anterior indica, que el 1,6 es un factor de seguridad que busca alejar la línea imaginaria que define actualmente la ZPL de la zona de rotura, ya que, en esa zona es donde se producen de manera intensa las corrientes litorales que pueden "arrastrar" los contaminantes hacia el borde costero. Sin embargo, el porcentaje de excedencia demostró que entre 0,9% y 2% de las veces (dependiendo de la latitud), el AZR superaba la ZPL, entonces, si se coloca una descarga en el borde de la ZPL, el 2% (caso más extremo) de tiempo se estará descargando partículas contaminantes dentro de la zona de rotura que no tienen otra opción que ser trasladadas directamente hacia el borde costero.

El porcentaje de excedencia no cambió para ningún nodo al variar la pendiente; esto implica que el factor fundamental para la variación del porcentaje excedencia es la forma en que se distribuyen las alturas significativas dentro de la data de oleaje a utilizar.

Debido a esta sospecha, se realizó una comparación de los porcentajes de excedencia que representa la ZPL dentro de una curva de distribución de AZR con datos de oleaje extraídos del modelo WaveWatch III de la NOAA y ERA-Interim. Los años comprendidos para la comparación fueron desde 1997 hasta 2010.

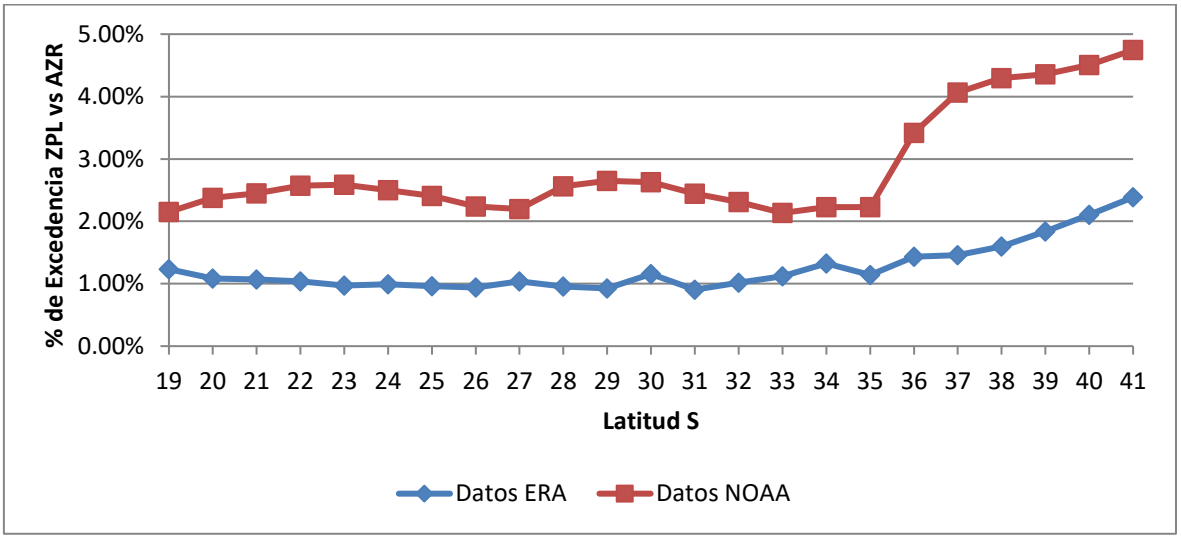


Figura 8-1: Comparación % de excedencia datos ERA v/s NOAA. (Fuente: Elaboración propia)

Como se pude observar en la Figura 8-1 existe una diferencia entre los porcentajes de excedencia de ambas bases de datos. Además, los porcentajes de excedencia son mayores en la data de NOAA, esto pudiese estar ocurriendo debido a que el modelo de la NOAA podría estar sobrestimando las alturas de olas para para eventos extremos. La Figura 8-2 da muestra de lo anteriormente mencionado para el nodo 19S.

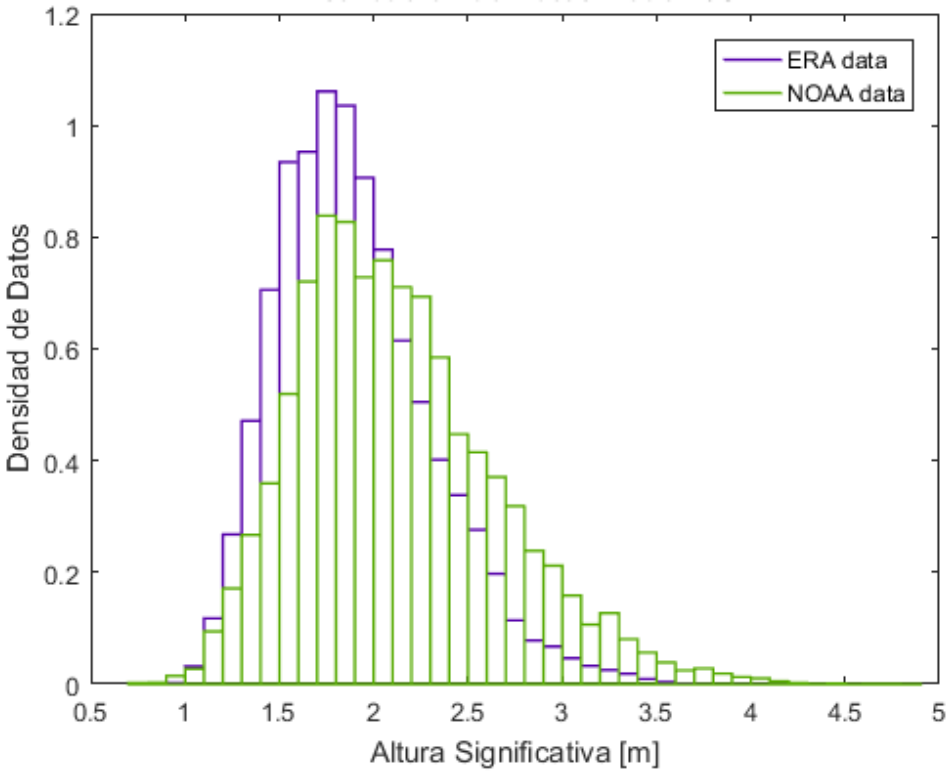


Figura 8-2: Comparación de distribución de alturas significativas ERA vs NOAA. (Fuente: Elaboración propia)

Las alturas significativas superiores a 2,5[m] son más frecuentes en los datos de la NOAA.

Finalmente, los porcentajes de excedencia para las dos bases de datos aumentaron a medida que se avanza hacia el sur de Chile.

8.2 INFLUENCIA DEL COEFICIENTE P

Como se ve demostrado en la Figura 7-3 al calcular la ZPL con el coeficiente P, se obtiene un valor más conservador que el calculado sin el coeficiente P. Esto también se puede visualizar en la Tabla 7-1 la que indica que el valor de la ZPL es sobrestimado, cuando se considera el coeficiente P. Los valores de la ZPL van creciendo, junto con la sobrestimación a medida que se avanza hacia el sur de Chile.

8.2.1 INTERPOLACIÓN LINEAL Y APLICACIÓN DE *SPLINE* CÚBICO

La circular A53/004 indica que para latitudes intermedias tabuladas se debe interpolar linealmente, al momento de calcular la ZPL utilizando el coeficiente P. El efecto que tiene ocupar ese tipo de interpolación u otra, demostró que las diferencias entre ambos métodos son mínimas. Por lo que se puede inferir que no es necesario aplicar otra interpolación a la recomendada en la circular A53/004.

8.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO AL COEFICIENTE P.

Base de datos ERA:

Los resultados indican que en los nodos 20S, 24S, 27S, 33S y 37S el umbral para definir valores atípicos (promedio de la serie más 3 veces la desviación estándar) es muy cercano al valor del coeficiente P de la circular. En la Tabla 8-1 se detalla la diferencia para cada uno de los nodos que existe entre el coeficiente P facilitado en la circular y el promedio de la serie de tiempo de P, el valor umbral, promedio de los valores atípicos (sobre el umbral), percentil 95% y percentil 97,5%.

Tabla 8-1: Tabla resumen de diferencias ERA.

		Diferencia con el Coeficiente P				
Nodos	Coeficiente P	Promedio de P	Valor Umbral	Promedio V.A.	Percentil 95%	Percentil 97,5%
20S	7,79	-3,05	-0,16	0,40	-1,26	-0,81
24S	7,95	-3,03	-0,08	0,49	-1,22	-0,76
27S	8,27	-3,32	-0,30	0,30	-1,47	-1,03
30S	9,07	-4,73	-2,01	-1,42	-3,08	-2,68
33S	9,57	-4,05	-0,46	0,22	-1,91	-1,39
35S	10,50	-4,83	-1,07	-0,36	-2,60	-2,06
37S	10,74	-4,49	-0,18	0,63	-1,89	-1,25

(Fuente: Elaboración propia)

Las celdas de color azul indican menores diferencias entre el coeficiente P y los valores estadísticos. A medida que la diferencia se acrecienta el color de la celda se torna blanco.

Base de datos NOAA:

A diferencia de los resultados anteriores, la Tabla 8-2 indica que el coeficiente P se acerca más a los percentiles 95% y 97,5%, para la mayoría de los nodos exceptuando el 35S que las menores diferencias se encuentran hacia el valor umbral y el promedio de los valores atípicos.

Tabla 8-2: Tabla resumen de diferencias NOAA

		Diferencia con el Coeficiente P				
Nodos	Coeficiente P	Promedio de P	Valor Umbral	Promedio V.A.	Percentil 95%	Percentil 97,5%
20S	7,79	-2,20	1,76	2,33	0,22	0,76
24S	7,95	-2,14	2,00	2,66	0,37	0,96
27S	8,27	-2,94	0,83	1,46	-0,69	-0,13
30S	9,07	-2,64	2,10	2,83	0,27	0,85
33S	9,57	-3,53	0,98	1,78	-0,85	-0,23
35S	10,5	-4,79	-0,46	0,41	-2,22	-1,61
37S	10,74	-3,67	2,05	3,11	-0,11	0,68

(Fuente: Elaboración propia)

Las celdas de color azul indican menores diferencias entre el coeficiente P y los valores estadísticos. A medida que la diferencia se acrecienta el color de la celda se torna blanco.

8.3 MODELACIÓN CON CMS-WAVE, CMS-FLOW Y PTM

Los modelos numéricos permitieron determinar que las partículas ingresan a la ZPL, bajo distintas circunstancias. Cuando la dirección de incidencia del oleaje es cercana a 0° las partículas son depositadas en la costa, logrando así mayor cantidad de partículas por área (densidad de la cantidad de partículas), además esta cantidad aumenta al incrementar la pendiente del fondo.

Para circunstancias donde el oleaje incide en la costa con una dirección superior a 0° se forma un flujo longitudinal en la costa llamada corriente longitudinal, esta aumenta su intensidad cuando el ángulo de incidencia del oleaje aumenta. Es por este motivo que las partículas no se acumularon en la orilla de la playa en los modelos con dirección de incidencia del oleaje ±15° y ±30° dentro del dominio numérico. Sin embargo, para el modelo con mayor pendiente (0,44) las partículas se acumularon en la orilla de la playa, debido a que, la ZPL era muy pequeña y cercana a la zona de rotura, ya que, con el cambio de marea, el punto de rotura del oleaje se acercaba al punto de descarga por la disminución del nivel del mar, sobre todo en bajamar de la condición de marea sicigia. Además, la mayoría las partículas depositadas en la playa no reingresaron al sistema de circulación.

9 CONCLUSIONES

Una de las primeras conclusiones que se pueden despender es que la ZPL está asociada al AZR.

El AZR es una relación trigonométrica entre la pendiente del fondo marino y la altura de la ola rompiente. La relación entre la altura de la ola rompiente y la profundidad donde ocurre la rotura es determinada por McCowan en 1897.

La ZPL es igual al AZR multiplicada por 1,6, entonces la ZPL busca ser mayor AZR en cualquier condición de oleaje. El problema está en que la ZPL se calcula en base al promedio de las alturas de ola rompiente y luego es multiplica por 1,6, entonces existen ocasiones donde AZR supera la ZPL por lo que las descargas realizadas en un punto próximo al borde exterior de la ZPL serán transportadas directamente hacia el borde costero. Esto puede provocar que los contaminantes ingresen a la ZPL con concentraciones que superan los límites aceptables dentro de la ZPL.

Otro punto importante derivado de la relación entre ZPL y AZR, es que permite de forma anticipada a cualquier estudio de dinámica costera, obtener una aproximación empírica en terreno de la ZPL.

Según las instrucciones oceanográficas N°1 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile en su publicación 3201, indica que se debe realizar un estudio de *hindcast* de oleaje de a lo menos 20 años. Por lo que la distribución de los AZR dependerá de la distribución del oleaje que se obtenga en base de datos del modelo de *hindcast* de segunda o tercera generación. Esto quedó demostrado al calcular la ZPL con la base de datos de oleaje de ERA y NOAA. Por esto, la norma de emisiones debiera considerar estas variaciones en la ZPL, al ocupar modelos de *hindcast* diferentes.

Al utilizar el coeficiente P para calcular la ZPL, se logran resultados mucho más conservadores que los calculados sin considerar este coeficiente, esto implica que la ZPL nunca se ve superada por el AZR, por ende, el objetivo de la norma de asegurar la calidad del agua para los diversos usos y actividades que se desarrollan dentro de la ZPL se cumple.

Cuando se ocupa el coeficiente P, los valores vienen determinados en la Tabla 5-4: Tabulación del Coeficiente P. que indica su valor según latitud. Cuando esta latitud no se encuentra tabulada, el coeficiente P se debe determinar a partir de una interpolación lineal. Se determinó si la interpolación lineal era la mejor forma de interpolar o si al realizar la interpolación con un método distinto se podrían encontrar diferencias en los resultados. Sin embargo, no se encontraron diferencias de consideración (-1,5% a 0,6%) entre los valores de ZPL. Por lo tanto, no debiese existir algún inconveniente al interpolar linealmente los valores del coeficiente P para calcular la ZPL.

La Autoridad Marítima debería señalizar de qué forma obtuvieron el coeficiente P que entregan tabulado en la circular, ya que, según lo analizado, este valor puede apuntar a distintos términos estadísticos dependiendo de la base de datos a utilizar. Lo ideal sería definir el coeficiente P, con un valor umbral o un percentil, y no entregar una tabla sin información anexa de cómo se realizaron los cálculos o que métodos siguieron para obtener el coeficiente para cada uno de los nodos.

Las modelaciones determinaron que las partículas liberadas en un punto próximo a la ZPL, ingresaban a esta, bajo distintas condiciones de oleaje, pendiente del fondo marino y marea. El caso donde más partículas se acumularon en la costa es cuando el oleaje incide de forma perpendicular a la línea de costa para todas las condiciones de pendiente y marea. Además, cuanto más inclinada es la pendiente del fondo marino más partículas se depositan en la línea de costa.

Cabe recordar que las modelaciones se focalizaron en ver el comportamiento lagrangiano de las partículas, desde el enfoque de campo lejano. El modelo PTM está enfocado en determinar el trayecto de partículas de sedimento en un campo hidrodinámico, y no en el análisis de concentraciones de algún contaminante.

Para futuros estudios de descargas de contaminantes se recomienda utilizar otros modelos que permitan observar la concentración de un contaminante vertido en un medio marino, ya que, la norma utiliza parámetros de concentración para poder determinar si el medio ambiente está siendo contaminado o no.

Al calcular la ZPL solo se utilizan datos oceanográficos de oleaje aguas profundas, sería interesante determinar por qué la norma solo considera fenómenos de asomeramiento y no refracción y difracción. Además, no considera el comportamiento de las mareas que en ciertas zonas de Chile donde se producen fuertes corrientes podrían hacer ingresar un contaminante dentro de la ZPL.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

A-53/004, D. G. d. T. M. y. d. M. M., 2012. *CIRCULAR D.G.T.M. Y M.M. ORDINARIA N° A-53/004.* Valparaíso: Armada de Chile.

Ahrens, J. & Titus, M., 1981. *Laboratory data report: irregular wave runup on plane smooth slopes.* Vicksburg, MS: Coastal Engineering Research Center unpublished Laboratory Report.

Battjes, J., 1972. *Set-up due to irregular waves.* s.l.:s.n.

Battjes, J. & Janssen, J., 1978. *Energy loss and set-up due to breaking of random waves..* s.l.:s.n.

Berrisford, P. y otros, 2011. *The ERA-Interim archive, Version 2.0..* s.l.:s.n.

Booij, N., Ris, R. & Holthuijsen, L. H., 1999. *A third- generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation.* s.l.:s.n.

Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W. & Vincent, C., 1985. *Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, Part-I-Spectral form.* s.l.:s.n.

Bowen, A., 1969. *The generation of longshore currents on a plane beach.* 27 ed. s.l.:Journal of Marine Research.

Buttolph, A. y otros, 2006. *Two-Dimensional Depth-Averaged Circulation Model CMS-M2D: Version 3.0, Report 2, Sediment Transport and Morphology Change..* s.l.:Coastal Inlets Research Program.

Chawla, A. & Kirby, J., 2002. *Monochromatic and random wave breaking at blocking points..* s.l.:s.n.

Cifuentes, J., Torres-García, P. & Frías, M., 1991. *El océano y sus recursos..* s.l.:s.n.

D.S. n°90, D. G. d. T. M. y. M. M., 2003. *Circular DGTM y MM Ordinario A-53/004 "Establece Disposiciones y Procedimiento Científico Técnicos para Fijar el Ancho de la Zona de Protección Litoral".* s.l.:Armada de Chile.

Dally, W. R. & Dean, R. G., 1984. *Suspended Sediment Transport and Beach profile evolution.* s.l.:s.n.

Dean, R. & Dalrymple, R., 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists.* Singapore: World Scientific Publishing.

Dean, R. & Darlymple, R., 2001. *Coastal Processes with Engineering Applications.* s.l.:s.n.

Demirbilek, Z., Lin, L. & Zundel, A., 2007. *WABED model in the SMS: Part 2. Graphical interface.* Vicksburg, MS.: s.n.

Demirbilek, Z. & Rosati, J., 2011. *Verification and Validation of the Coastal Modeling System.* s.l.:Coastal Inlets Research Program.

Dyhr-Nielsen, M. & Sorensen, T., 1970. *Some Sand Transport Phenomena on Coasts with Bars.* s.l.:s.n.

Egbert, G. & Erofeeva, S., 2001. *Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides.* s.l.:s.n.

Fisher, H. y otros, 1979. *Mixing in inland and coastal waters..* s.l.:s.n.

Galvin, C., 1968. *Breaker type classification on three laboratory beaches.* s.l.:Journal of geophysical research.

Goda, Y., 1970. *A synthesis of breaker indices..* s.l.:s.n.

Goda, Y., 1985. *Random seas and design of maritime structures.* Tokyo: University of Tokyo Press.

Goda, Y., 2006. *Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves..* s.l.:s.n.

Hansen, J. B. & Svendsen, I. A., 1984. *A Theoretical and Experimental Study of Undertow.* s.l.:s.n.

Hasselman, K., Barnett , T., Bouws, E. & Carlson, H., 1973. *Measurement of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP).* Hamburg: s.n.

Holthuijsen, L. H., 2007. *Wave in oceanic and coastal waters.* New York: Cambridge University Press.

Kamphuis, 2000. *Introduction to Coastal Engineering and Management..* Queen´s University,Canada.: s.n.

Kinsman, B., 1965. *Wind waves.* s.l.:s.n.

Kitaigorodskii, S., Krasitskii, V. & Zaslavskii, M., 1975. *On phillips theory of equilibrium range in the spectra of wind-generated gravity waves.* s.l.:s.n.

Komar & Gaughan, 1972. *Airy wave theory and breaker height prediction.* s.l.:s.n.

Komar, P., 1976. *Beach processes and sedimentation.* Englewood cliffs: Pretice-Hall.

Komel, G., Hasselmann, S. & Hasselmann, K., 1984. *On the existenceof a fully developed wind-sea spectrum.* s.l.:s.n.

Lackey, T. & MacDonald, N., 2007. *The particle tracking model: Description and processes..* s.l.:s.n.

Le Méhauté, B., 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves..* s.l.:Springer-Verlag.

Lin, L., Demirbilek, Z., Mase, H. & Zheng, J., 2008. *CMS-Wave: A Nearshore Spectral Wave Processes Model for Coastal Inlets and Navigation Projects..* s.l.:Coastal Inlets Research Program.

Lin, L., Lin, R. & Maa., J. P.-Y., 2006a. *Numerical simulation of wind wave field. 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Prediction..* Victoria, British Columbia: s.n.

Lin, L., Mase, H., Yamada, F. & Demirbilek, Z., 2006b. *Wave-action balance equation diffraction (WABED) model: Tests of wave diffraction and reflection at inlets..* Vicksburg: s.n.

Liu, Z. & Frigaard, P., 2001. *Generation and Analysis of Random Waves.* Aalborg Universitet: s.n.

Longuet-Higgins , M., 1970. *Longshore currents generated by obliquely incident sea waves 1.* Primera ed. Corvallis: Journal of Geophysical research.

MacDonald, N., Davies, M. & Zundel, A., 2006. *Particle Tracking Model (PTM).* s.l.:s.n.

Mase, H., 2001. *Multi-direccional random wave transformation model based on energy balance equation.* s.l.:s.n.

Mase, H., Amamori, H. & Takayama, T., 2005a. *Wave prediction model in wave-current coexisting field..* s.l.:s.n.

Mase, H. & Iwagati, Y., 1984. *Runup of random waves on gentle splopes.* s.l.:s.n.

Mase, H. & Kitano, T., 2000. *Spectrum-based prediction model for random wave transformation over arbitrary bottom topography.* s.l.:s.n.

Mase, H., Oki, K., Hedges, T. & Li, H., 2005b. *Extended energy-balance-equation wave model for multidirectional random wave transformation..* s.l.:s.n.

McCormick, M., 2010. *Ocean Engineering Mechanics with applications.* s.l.:s.n.

McCowan, J., 1894. *On the highest wave of permanent type.* s.l.:Philosophic Magazine.

Méhauté, L., 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves..* s.l.:Springer-Verlag.

Mercante, D. G. d. T. M. y. M., 2003. *Circular DGTM y MM Ordinario A-53/004 "Establece Disposiciones y Procedimiento Científico Técnicos para Fijar el Ancho de la Zona de Protección Litoral".* s.l.:Armada de Chile..

Militello, A., Reed, C. W., Zundel, A. K. & Kraus, N. C., 2004. *Two-dimensional depth-averaged circulation model M2D: Version 2.0, Report 1: Documentation and user's guide..* s.l.:s.n.

NOAA, N. O. a. A. A., 2005b. *Rip Current Safety.* s.l.:s.n.

Pierson, W. & Moskowitz, L., 1964. *A proposed spectral form for fully developed winds seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii.* s.l.:s.n.

Pugh, D. T., 1987. *Tides, surges and mean sea-level.* Swindon: s.n.

Rattanapitikon & Shibayama, 2000. *Verification and Modification of Breaker Height Formulas.* s.l.:s.n.

Sakai, S., Kobayashi, N. & Koike, K., 1989. *Wave breaking criterion with opposing current on sloping bottom: an extension of Goda´s breaker index..* s.l.:s.n.

Sánchez, A. y otros, 2014. *Coastal Modeling System: Mathematical formulations and numerical methods..* s.l.:s.n.

Shen, H., Yapa, P., Wang, D. & Yang, X., 1993. *A mathematical model for oil slick transport and mixing in rivers..* s.l.:s.n.

Silva, R., 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje.* s.l.:s.n.

Stive, M. J. F. & Wind, H. F., 1986. *Cross-shore Mean Flow in the Surf Zone.* s.l.:s.n.

Suzuki, Y. & Isozaki, I., 1994. *On the development of global ocean wave model JWA3G.* s.l.:s.n.

Svendsen, I. A., 2006. *Introduction to nearshore hydrodynamics..* s.l.:s.n.

Svendsen, I. A., Schäffer, H. A. & Hansen, J. B., 1987. *The Interaction Between the Undertow and the Boundary Layer Flow on a Beach.* s.l.:s.n.

Svensen, I. A., 1984. *Introduction to nearshore hydrodynamics.* s.l.:s.n.

Thorton, E., 1970. *Variation of longshore current acrros the surf zone.* Washington D.C.: American society of civil engineers.

Tolman, H. L., 1989. *The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas.* s.l.:s.n.

Tolman, H. L., 2002. *User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III.* s.l.:s.n.

U.S. Army Corps of Engenieers, 2002. *Coastal Engineering Manual.* Primera ed. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engenieers.

Ueno, K. & Ishizaka, M., 1997. *Efficient computationalscheme of non linear energy transfer of wind waves.* s.l.:s.n.

Universidad de Cantabria, 2000. *Documentos de referencia Volumen I: Dinámicas.* s.l.:s.n.

WAMDI Group, .., 1988. *The WAM model. A third generation ocean wave prediction model..* s.l.:s.n.

Wiegel, R., 1962. *Diffraction of waves by a semi-infinite breakwater.* s.l.:Journal of the Hydraulics Division.

11 ANEXOS

11.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL COEFICIENTE P

Resultados ERA:

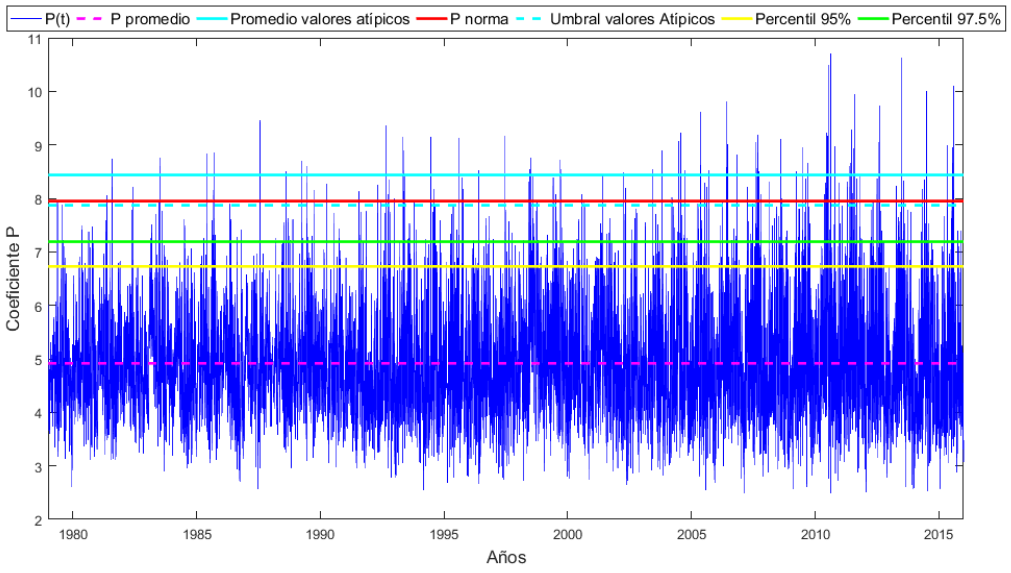


Figura 11-1:Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia).

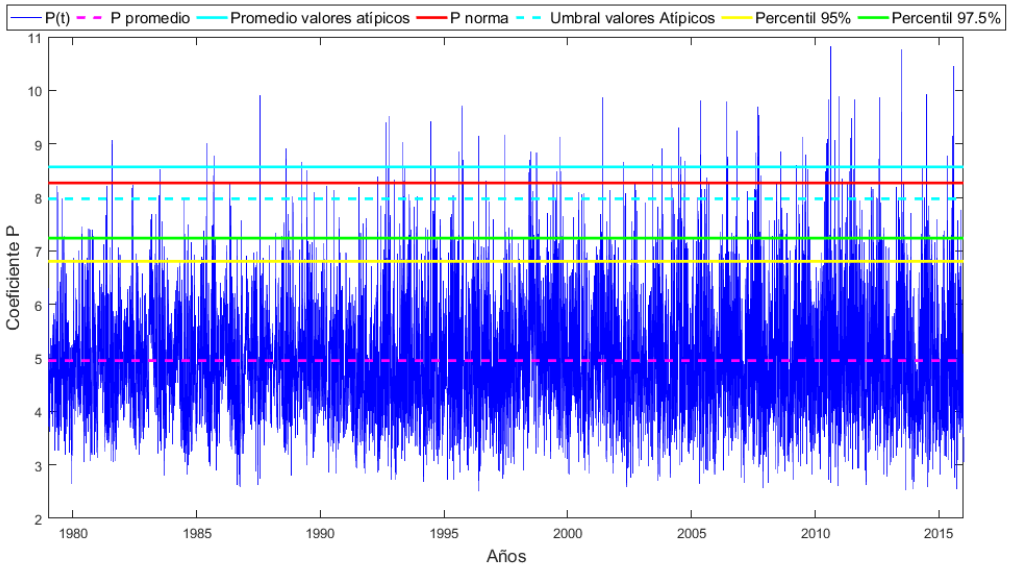


Figura 11-2 Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia).

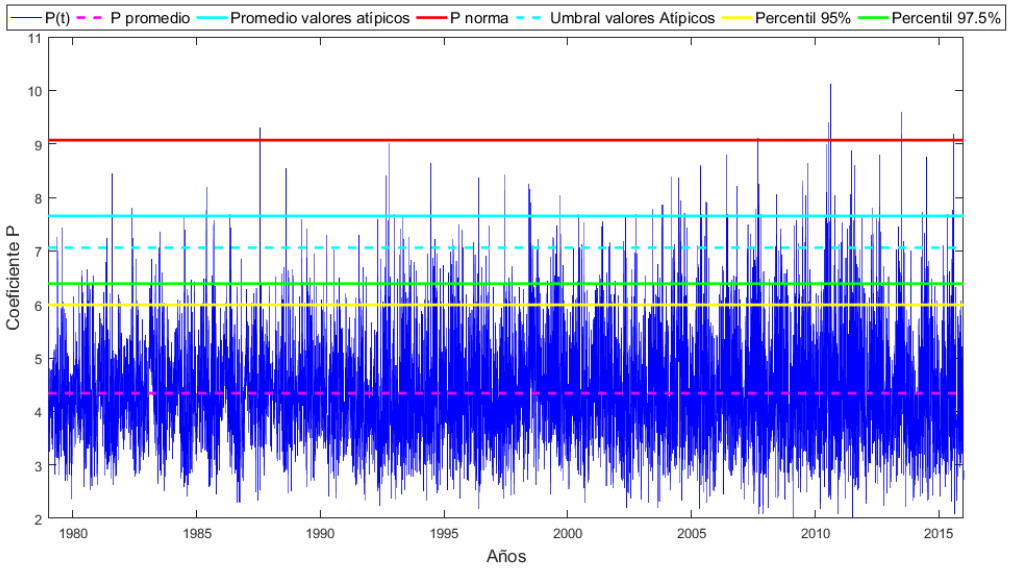


Figura 11-3: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia).

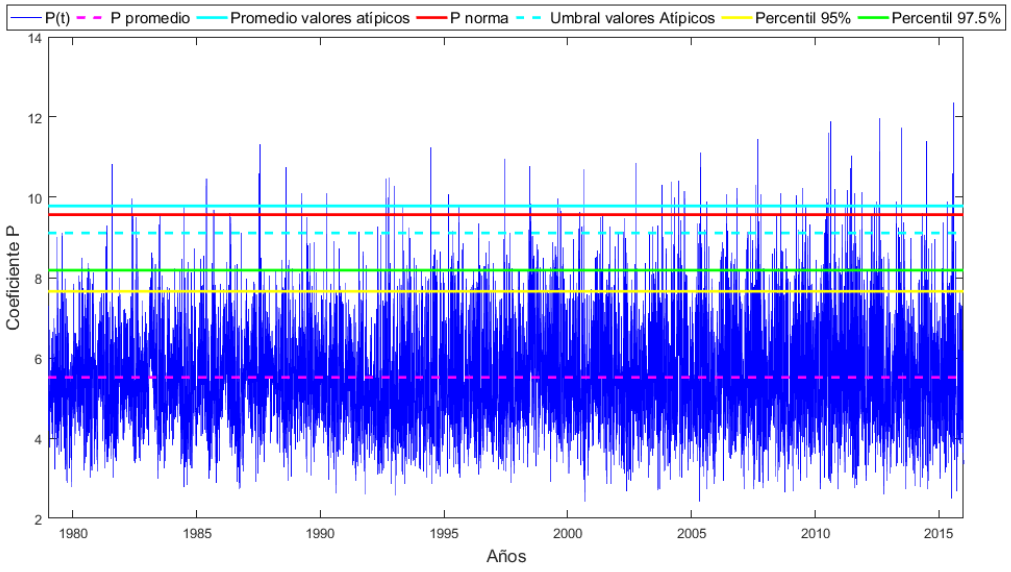


Figura 11-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia).

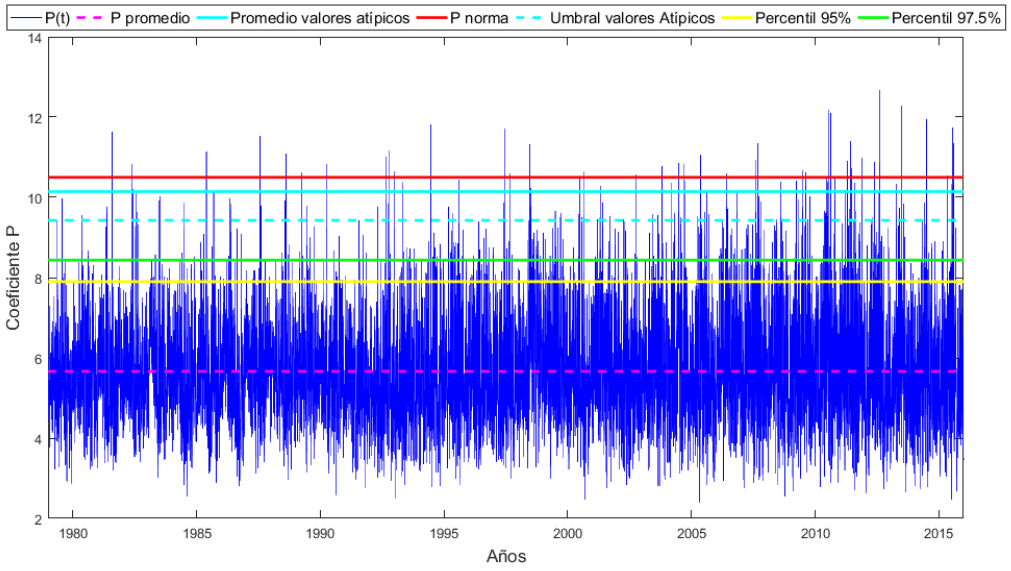


Figura 11-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia).

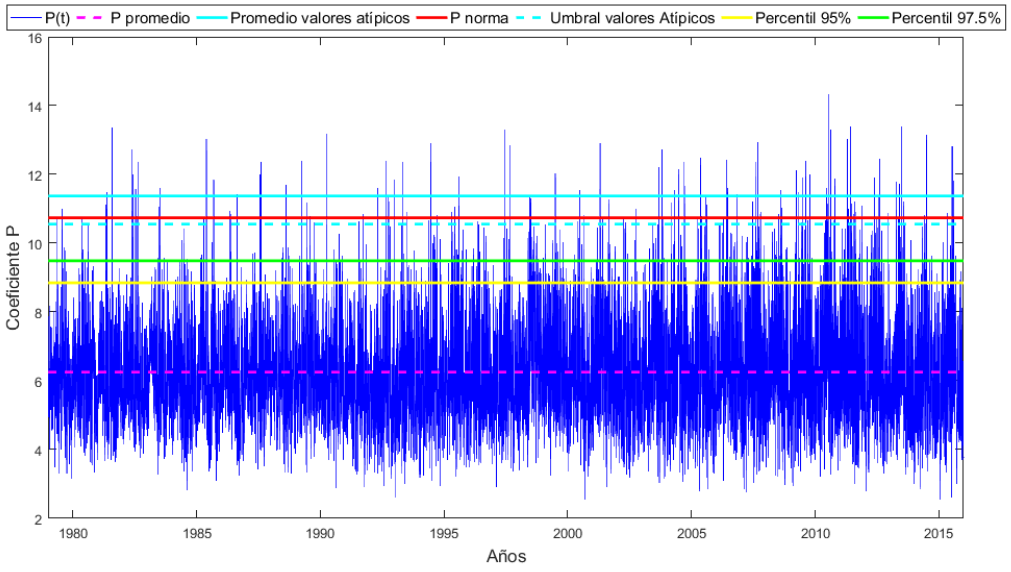


Figura 11-6: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia).

Resultados NOAA:

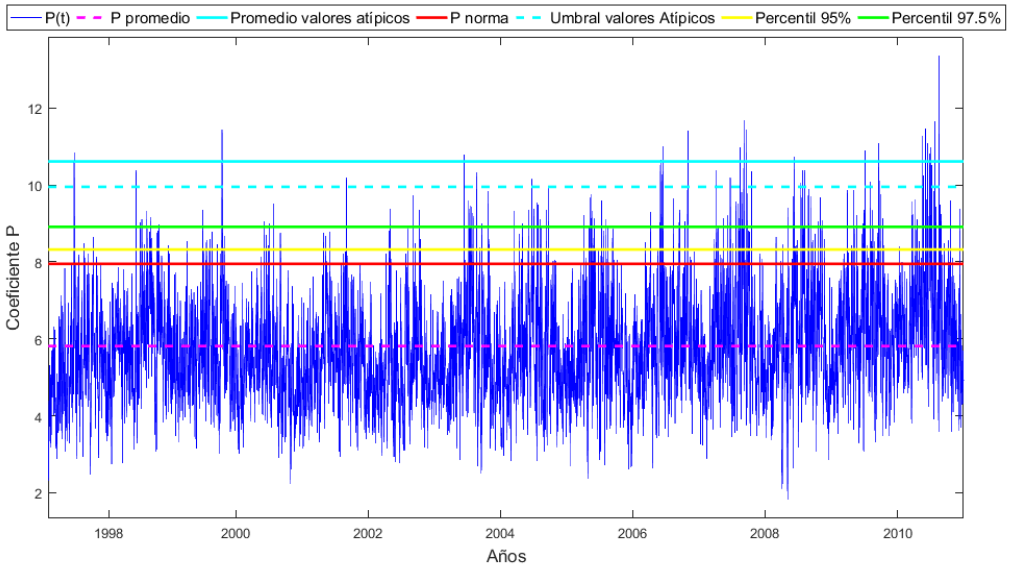


Figura 11-7: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia).

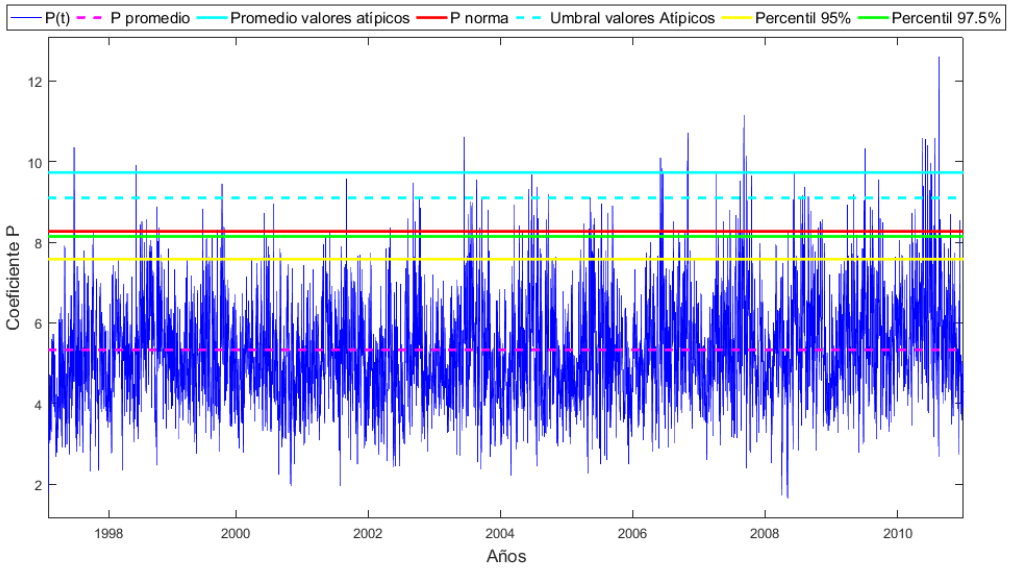


Figura 11-8: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia).

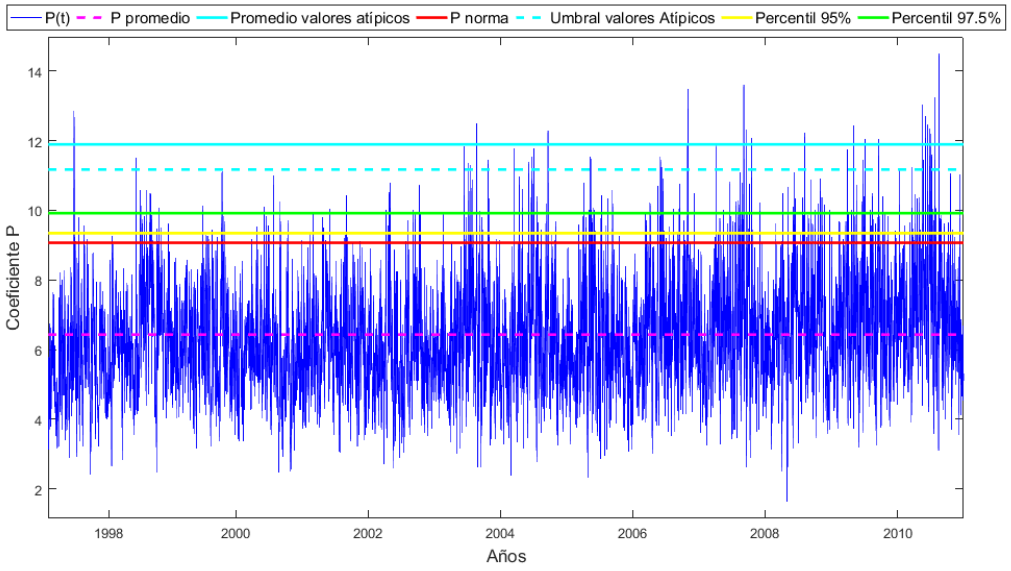


Figura 11-9: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia).

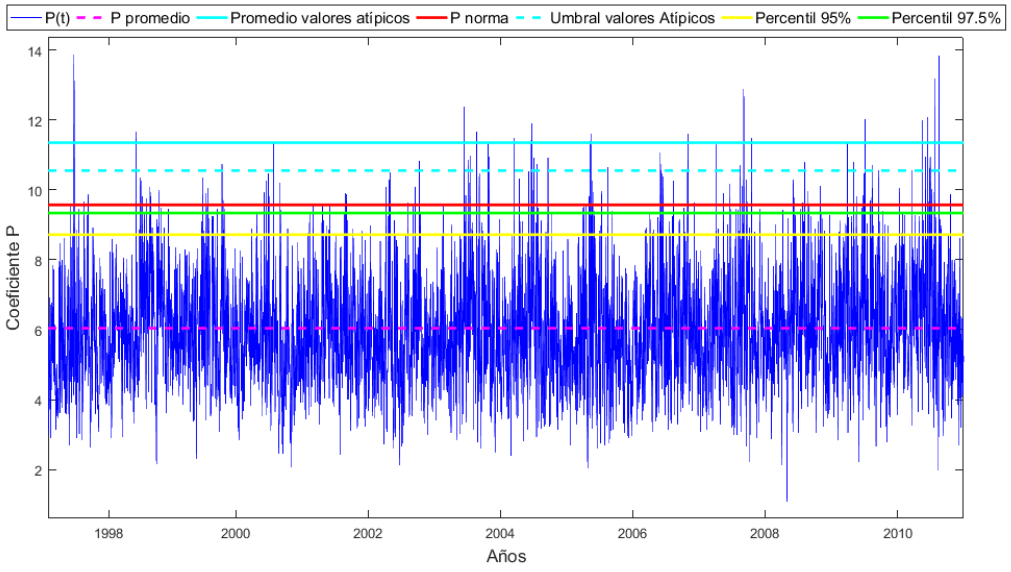


Figura 11-10: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia).

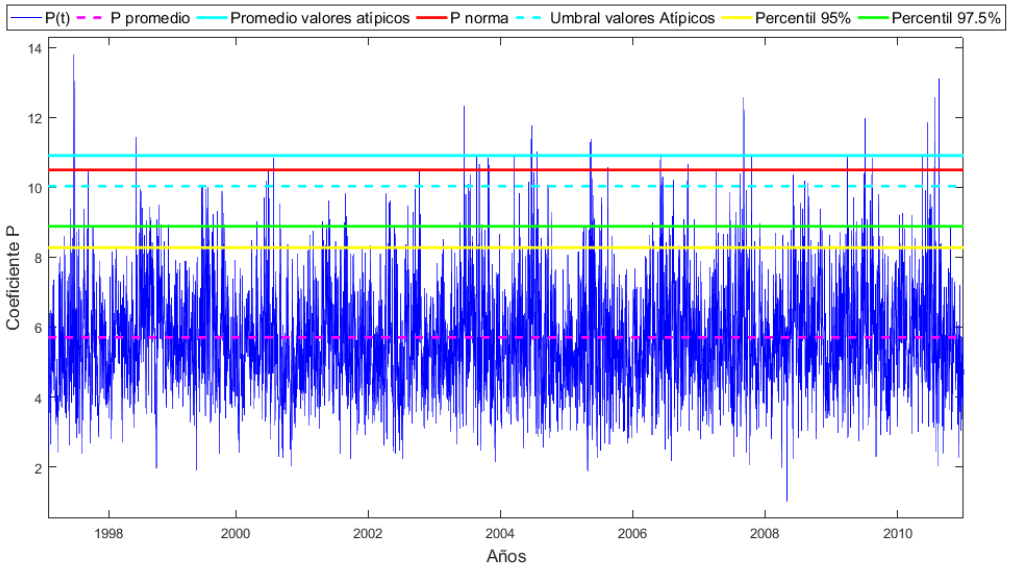


Figura 11-11: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia).

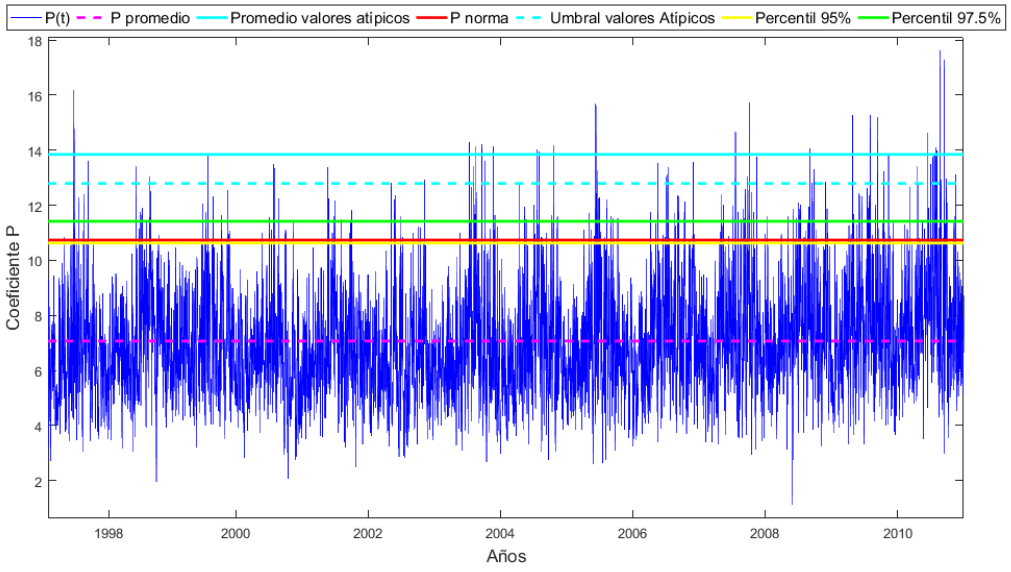


Figura 11-12: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia).

11.2 GRAFICOS DEL PORCENTAJE DE EXCEDENCIA POR NODO

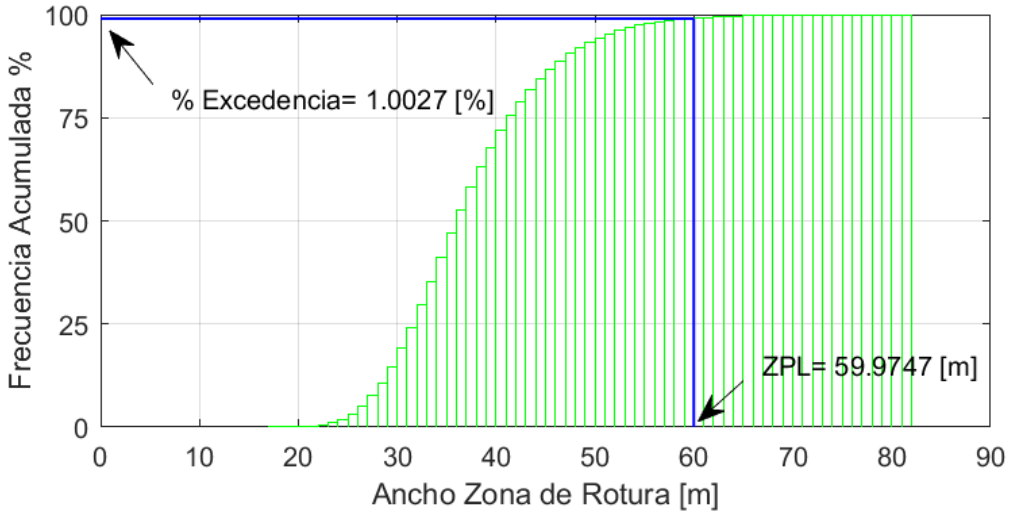


Figura 11-13: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 20S (Fuente: Elaboración propia)

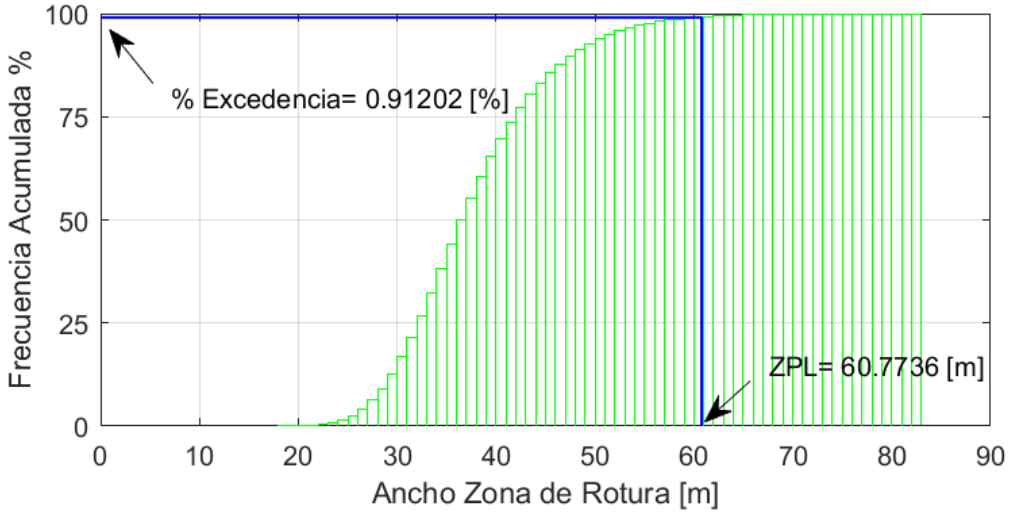


Figura 11-14: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 21S (Fuente: Elaboración propia)

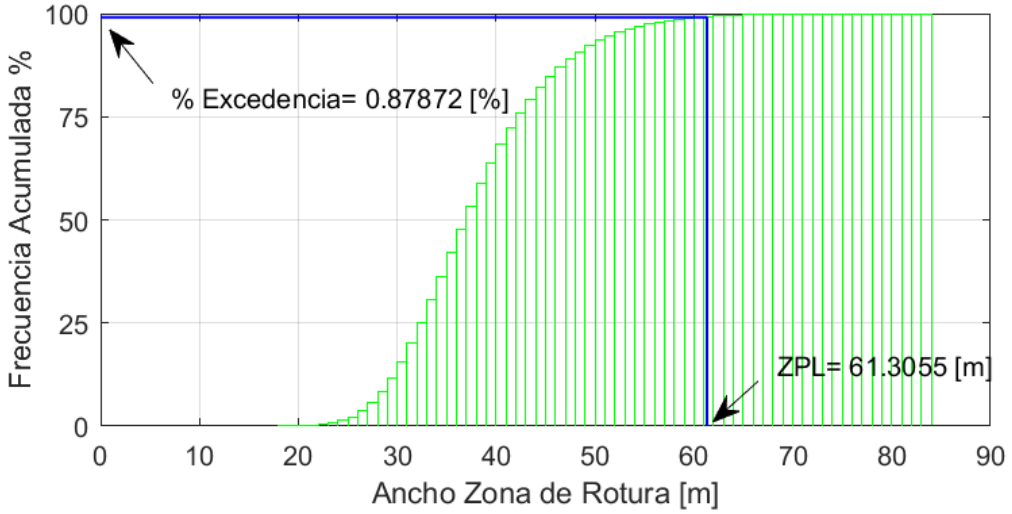


Figura 11-15: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 22S (Fuente: Elaboración propia)

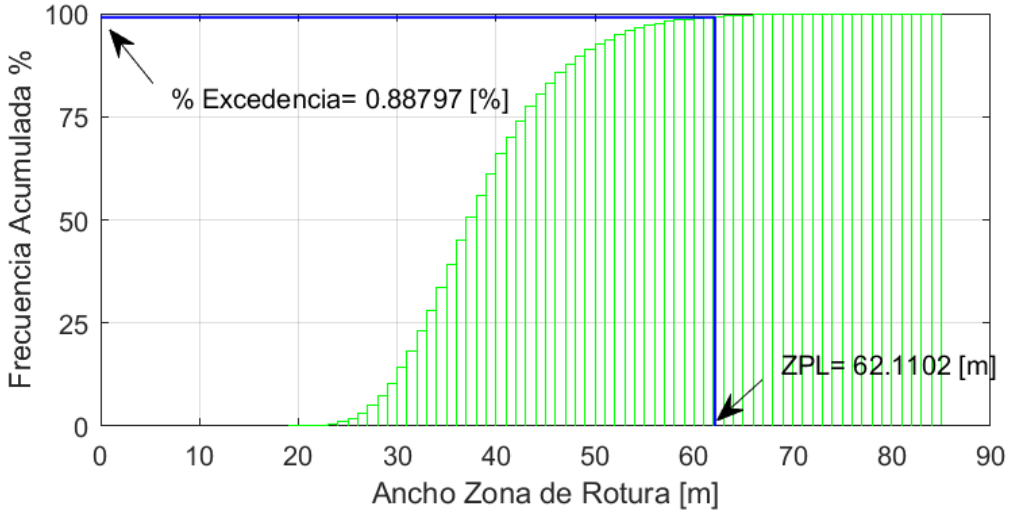


Figura 11-16: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 23S (Fuente: Elaboración propia)

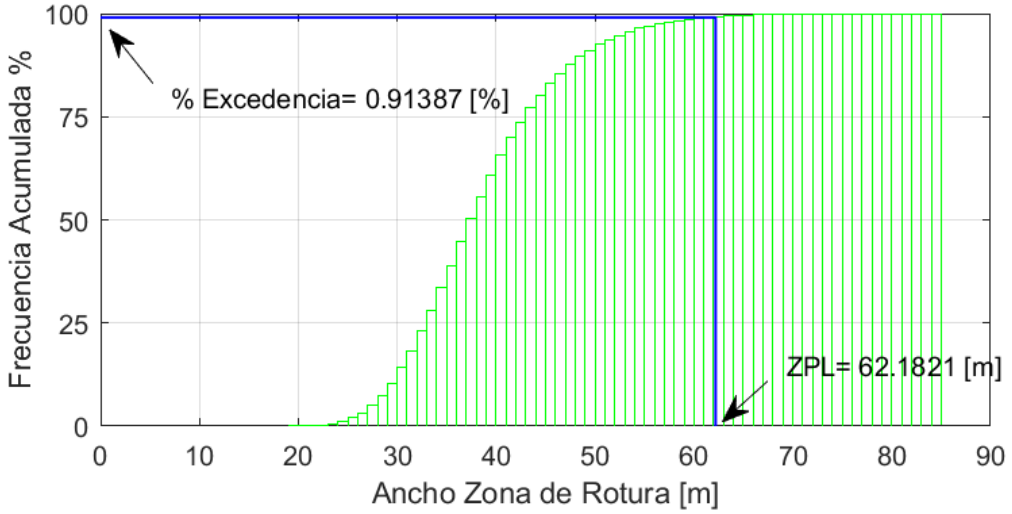


Figura 11-17: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 24S (Fuente: Elaboración propia)

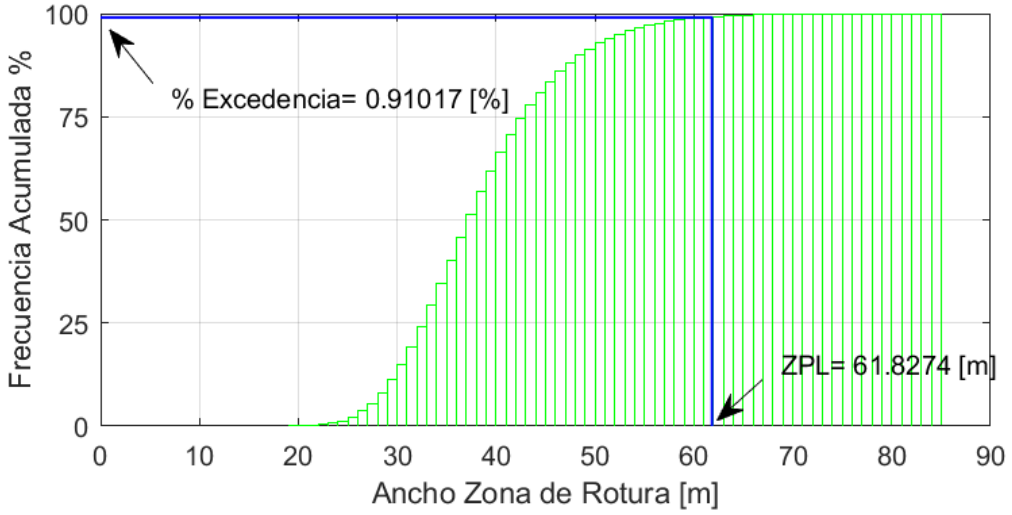


Figura 11-18: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 25S (Fuente: Elaboración propia)

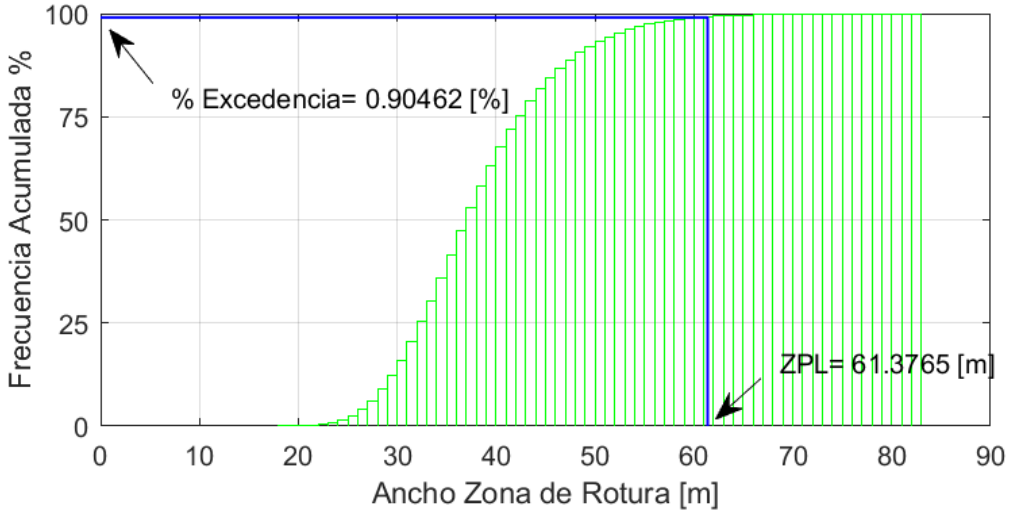


Figura 11-19: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 26S (Fuente: Elaboración propia)

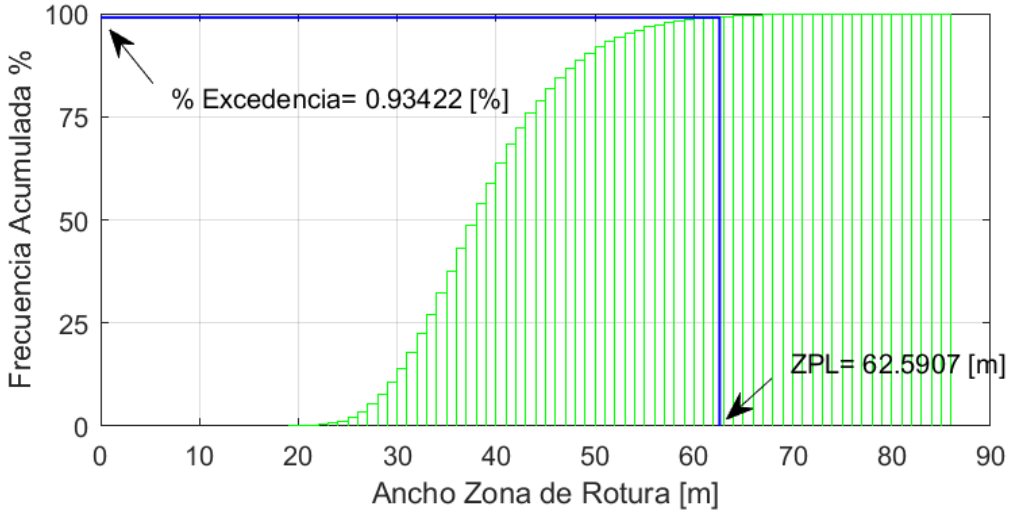


Figura 11-20: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 27S (Fuente: Elaboración propia)

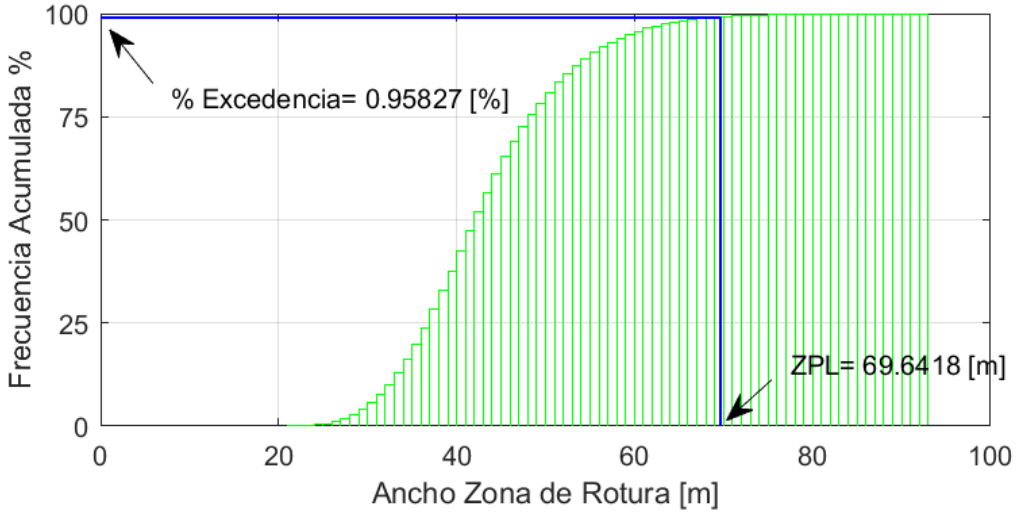


Figura 11-21: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 28S (Fuente: Elaboración propia)

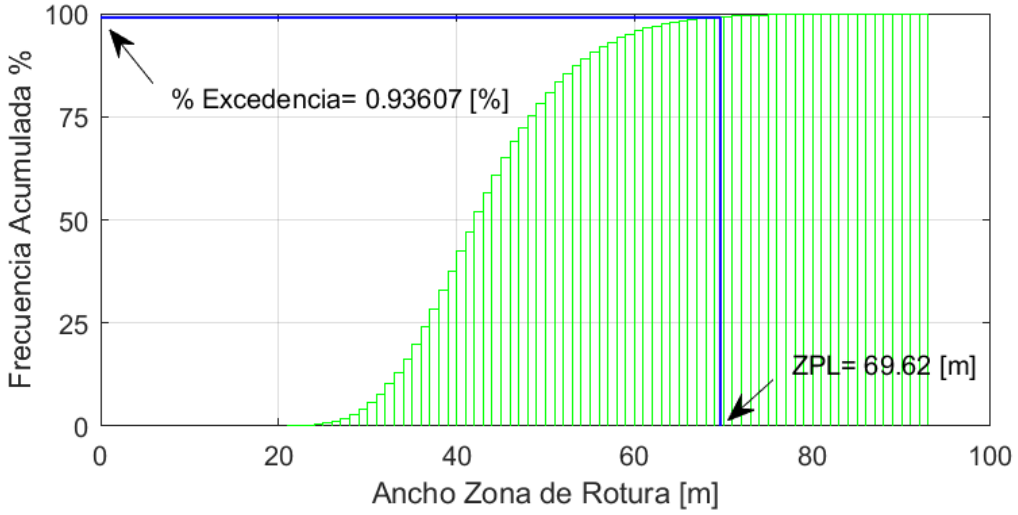


Figura 11-22: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 29S (Fuente: Elaboración propia)

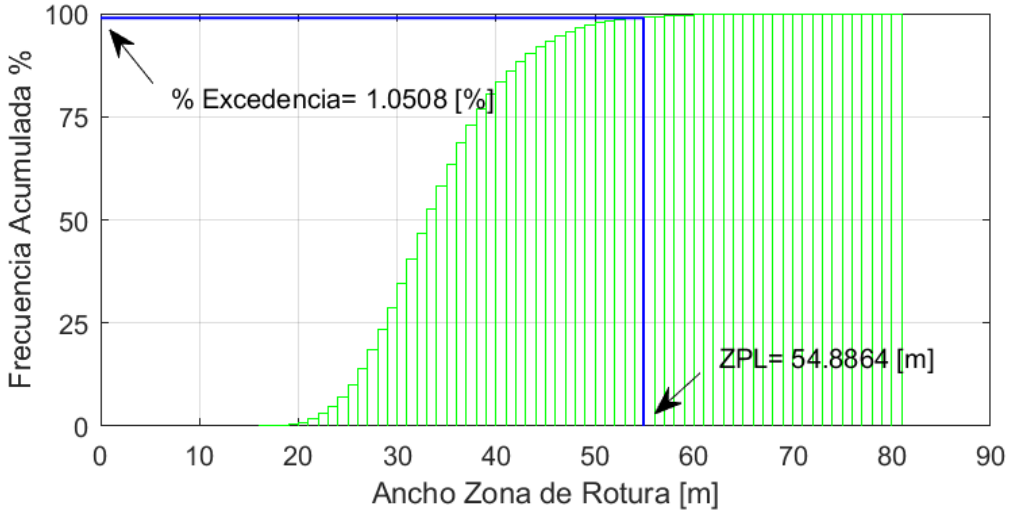


Figura 11-23: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 30S (Fuente: Elaboración propia)

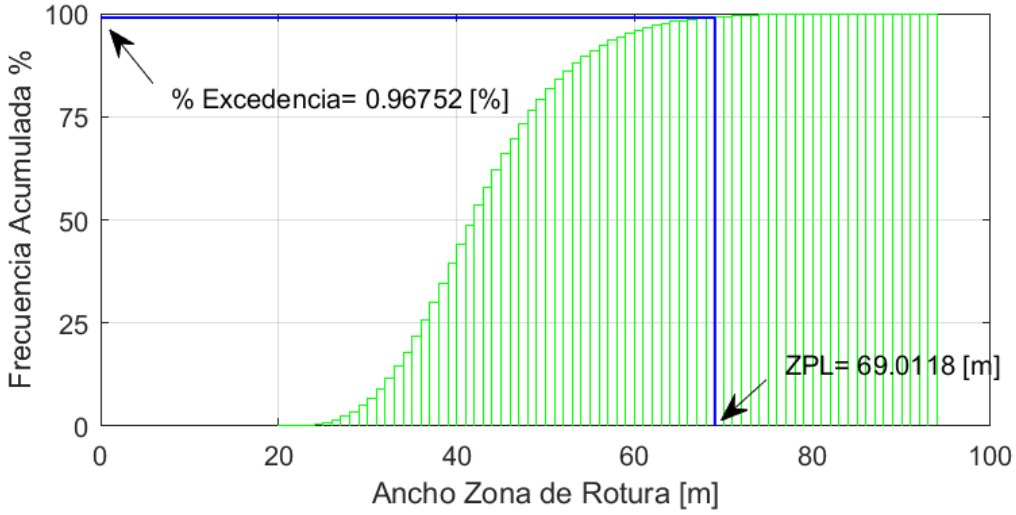


Figura 11-24: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 31S (Fuente: Elaboración propia)

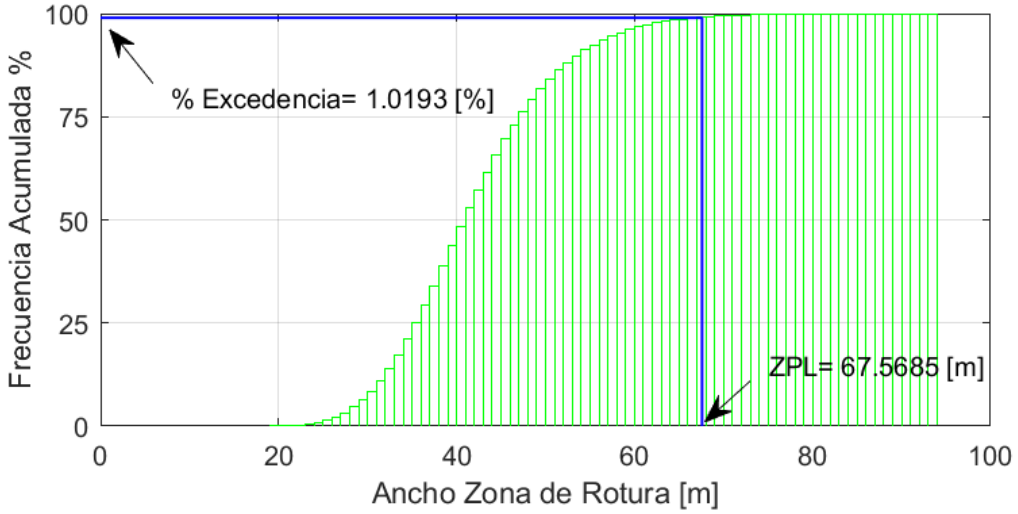


Figura 11-25: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 32S (Fuente: Elaboración propia)

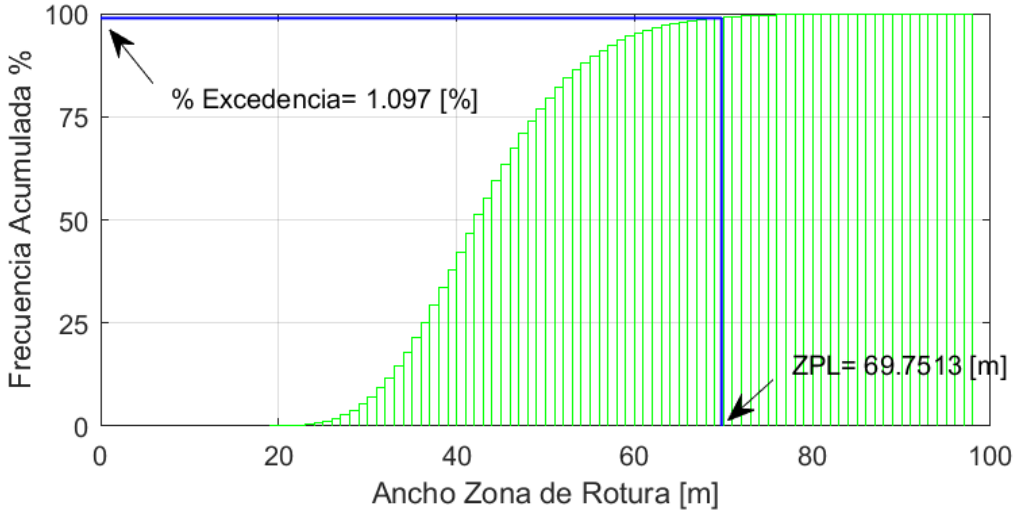


Figura 11-26: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 33S (Fuente: Elaboración propia)

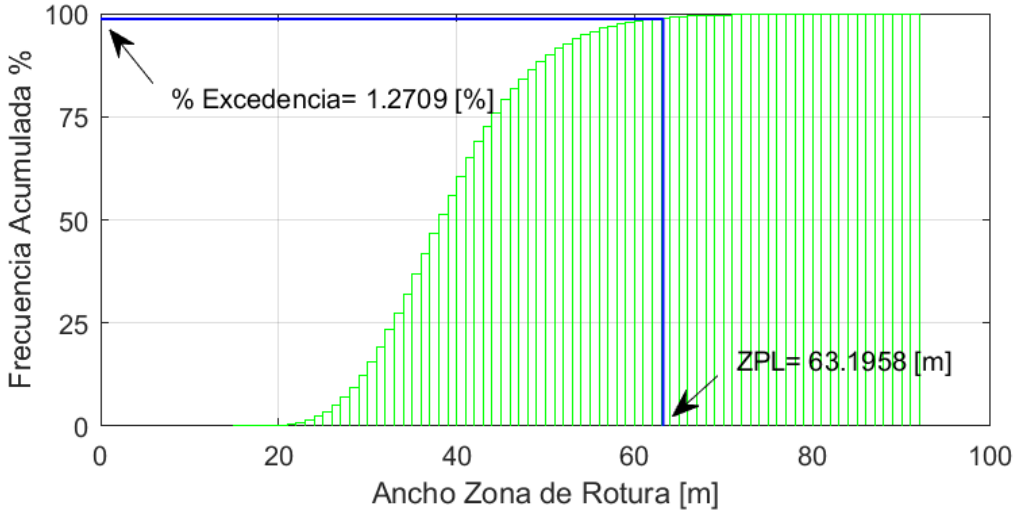


Figura 11-27: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 34S (Fuente: Elaboración propia)

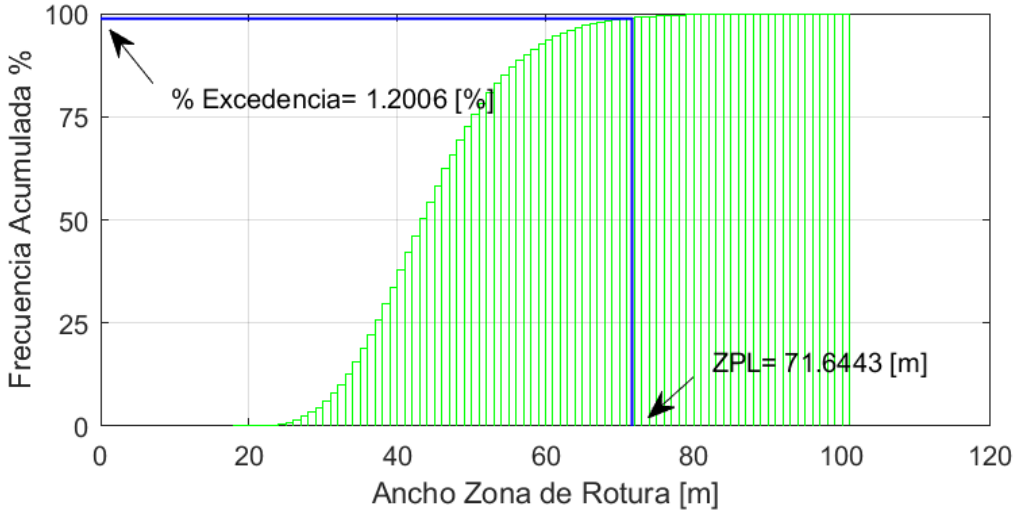


Figura 11-28: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 35S (Fuente: Elaboración propia)

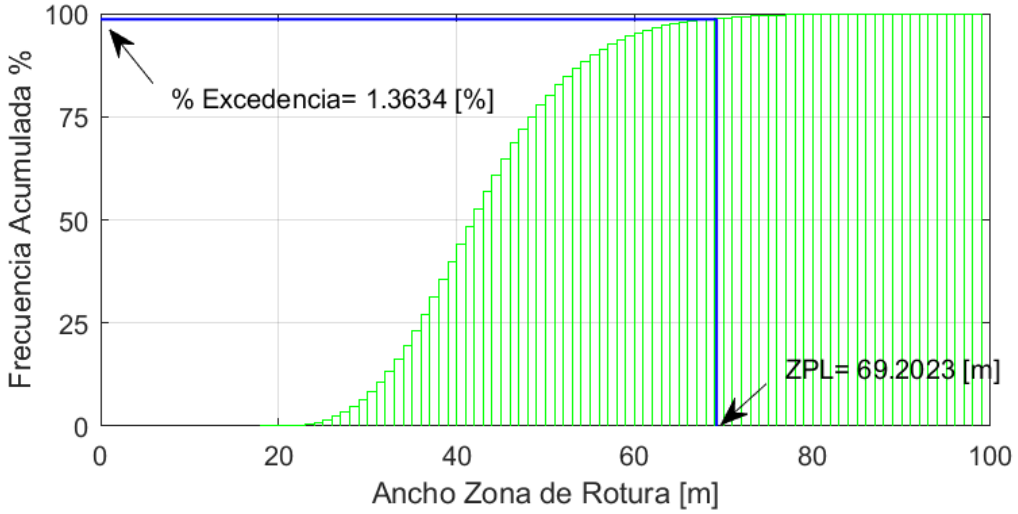


Figura 11-29: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 36S (Fuente: Elaboración propia)

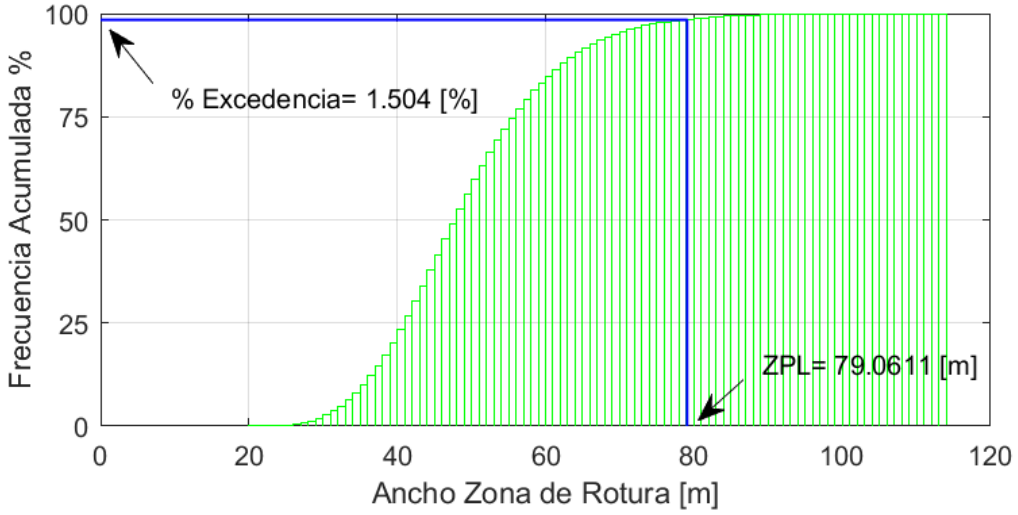


Figura 11-30: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 37S (Fuente: Elaboración propia)

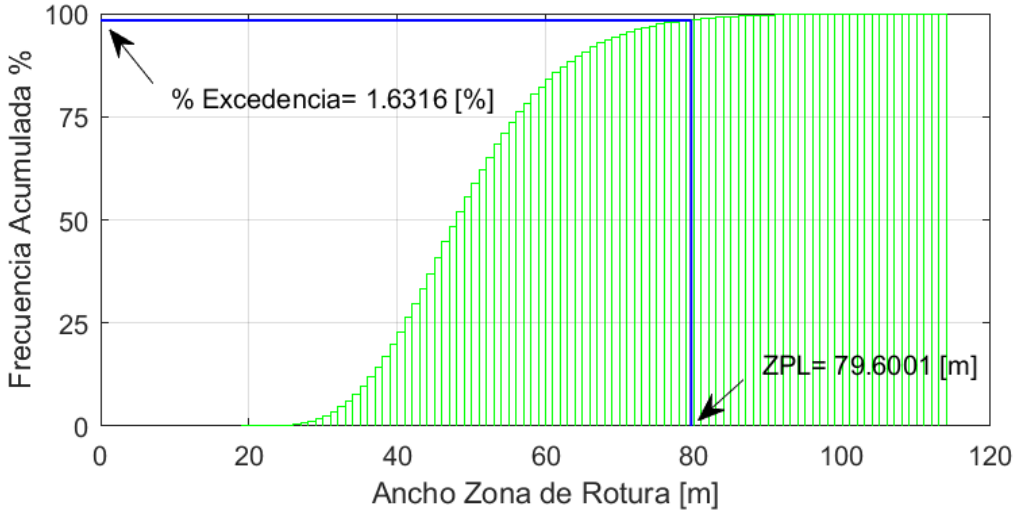


Figura 11-31: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 38S (Fuente: Elaboración propia)

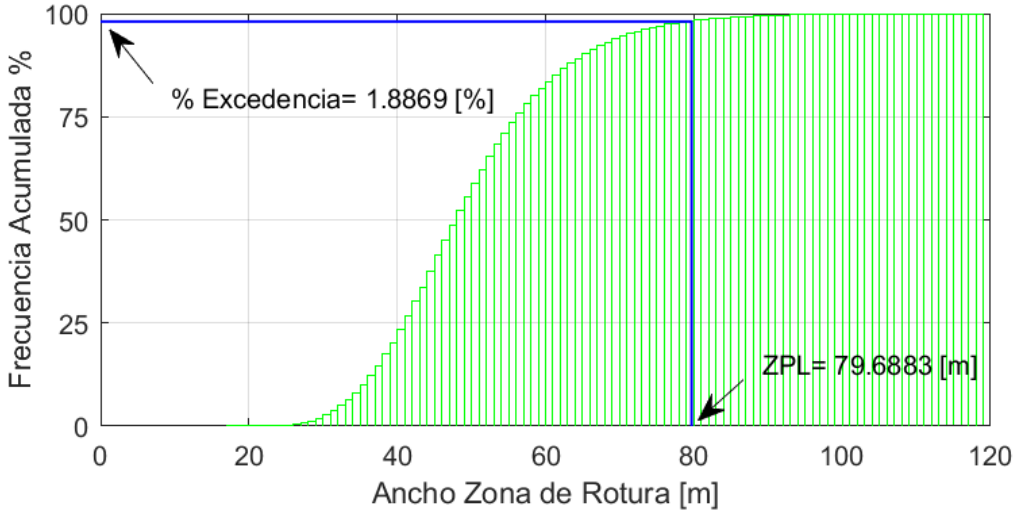


Figura 11-32: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 39S (Fuente: Elaboración propia)

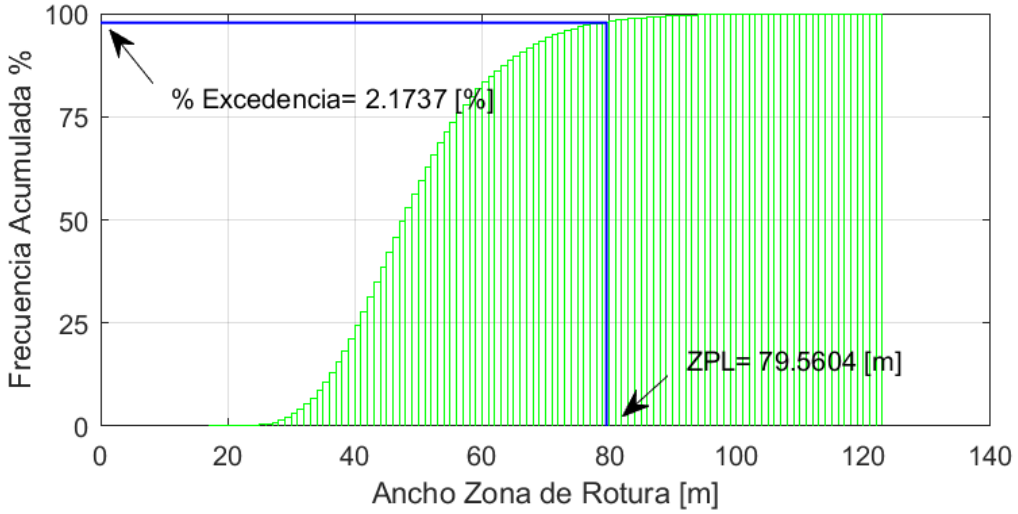


Figura 11-33: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 40S (Fuente: Elaboración propia)

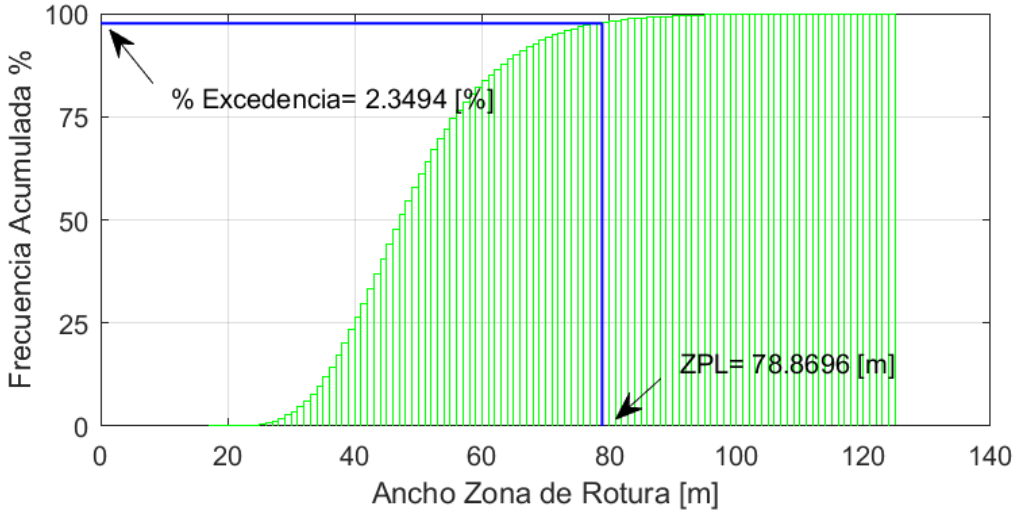


Figura 11-34: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 41S (Fuente: Elaboración propia)

11.3 RESULTADOS DE LAS MODELACIONES CON SMS

11.3.1 PARA LA PENDIENTE 0,07

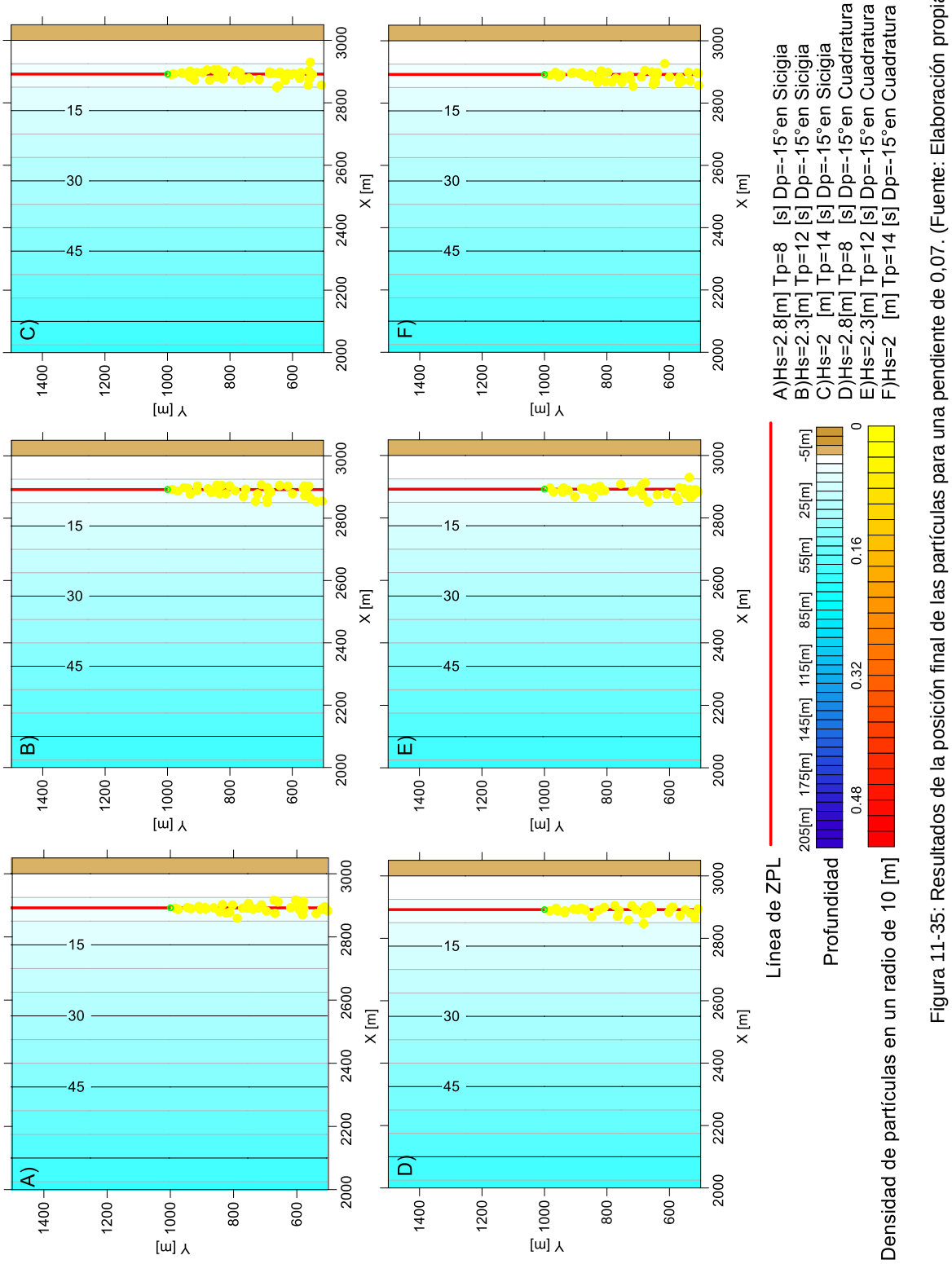


Figura 11-35: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)

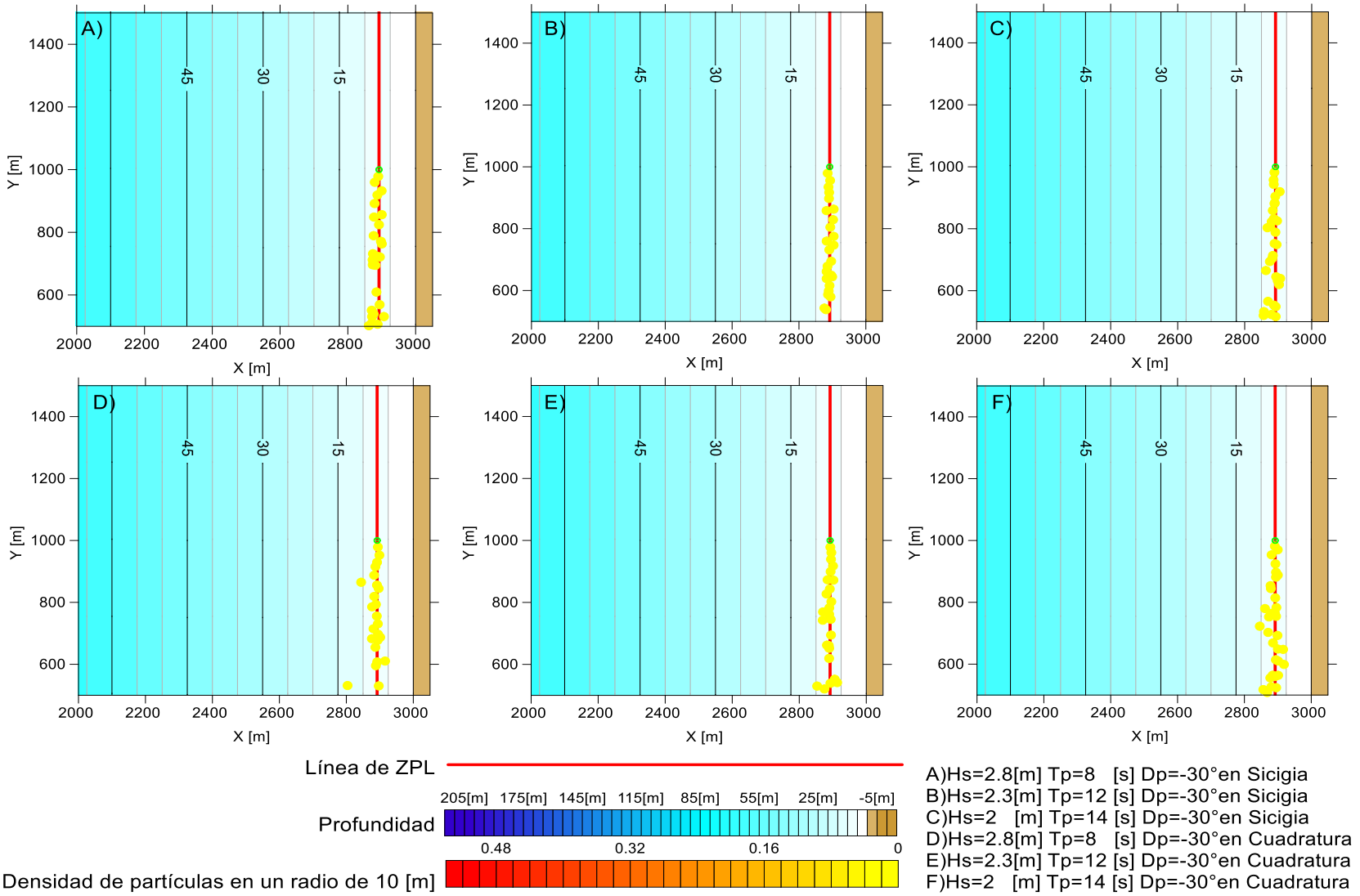


Figura 11-36: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)

11.3.2 PARA LA PENDIENTE 0,1

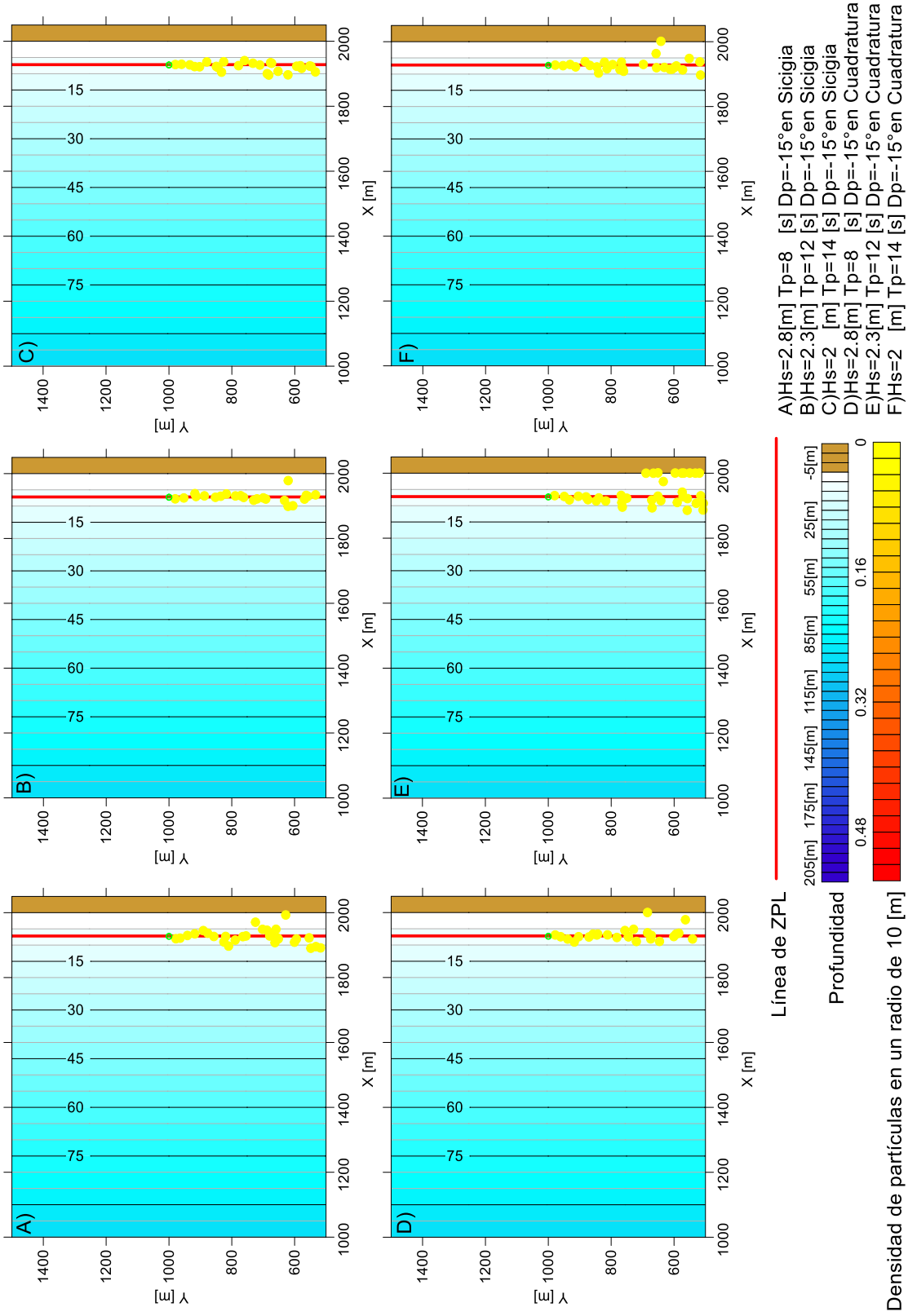


Figura 11-37: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia)

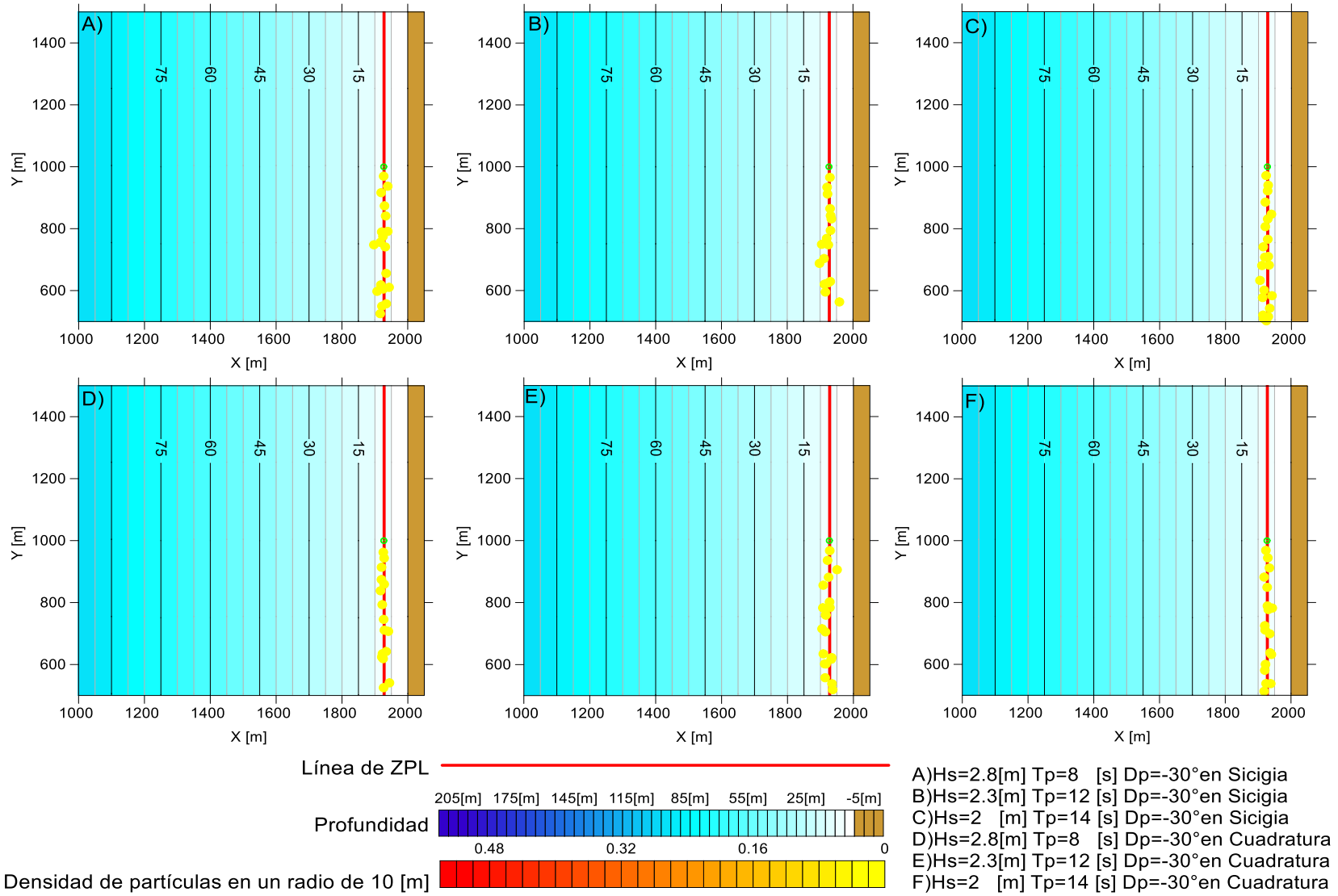


Figura 11-38: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia)

11.3.3 PARA LA PENDIENTE 0,44

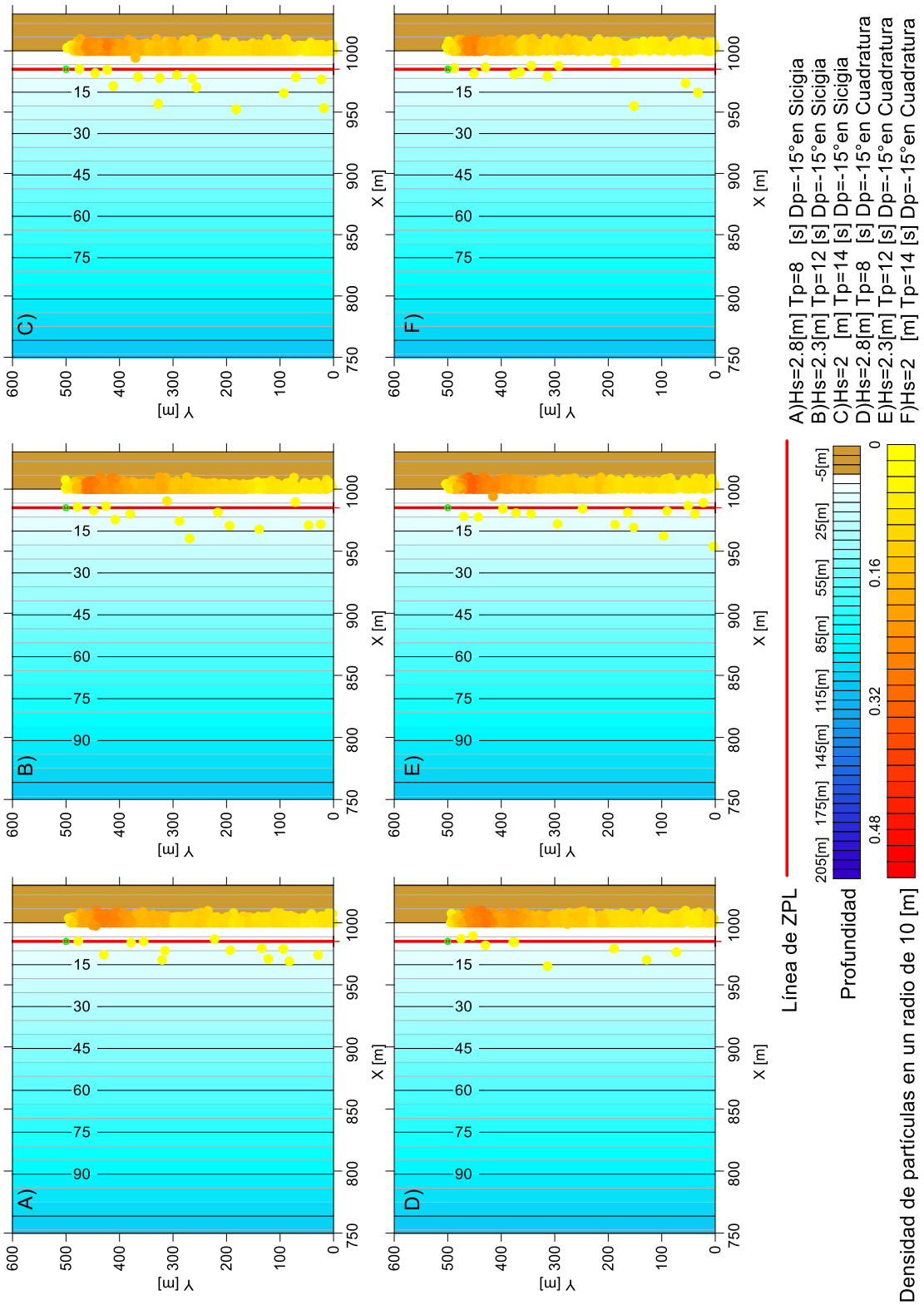


Figura 11-39: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia)

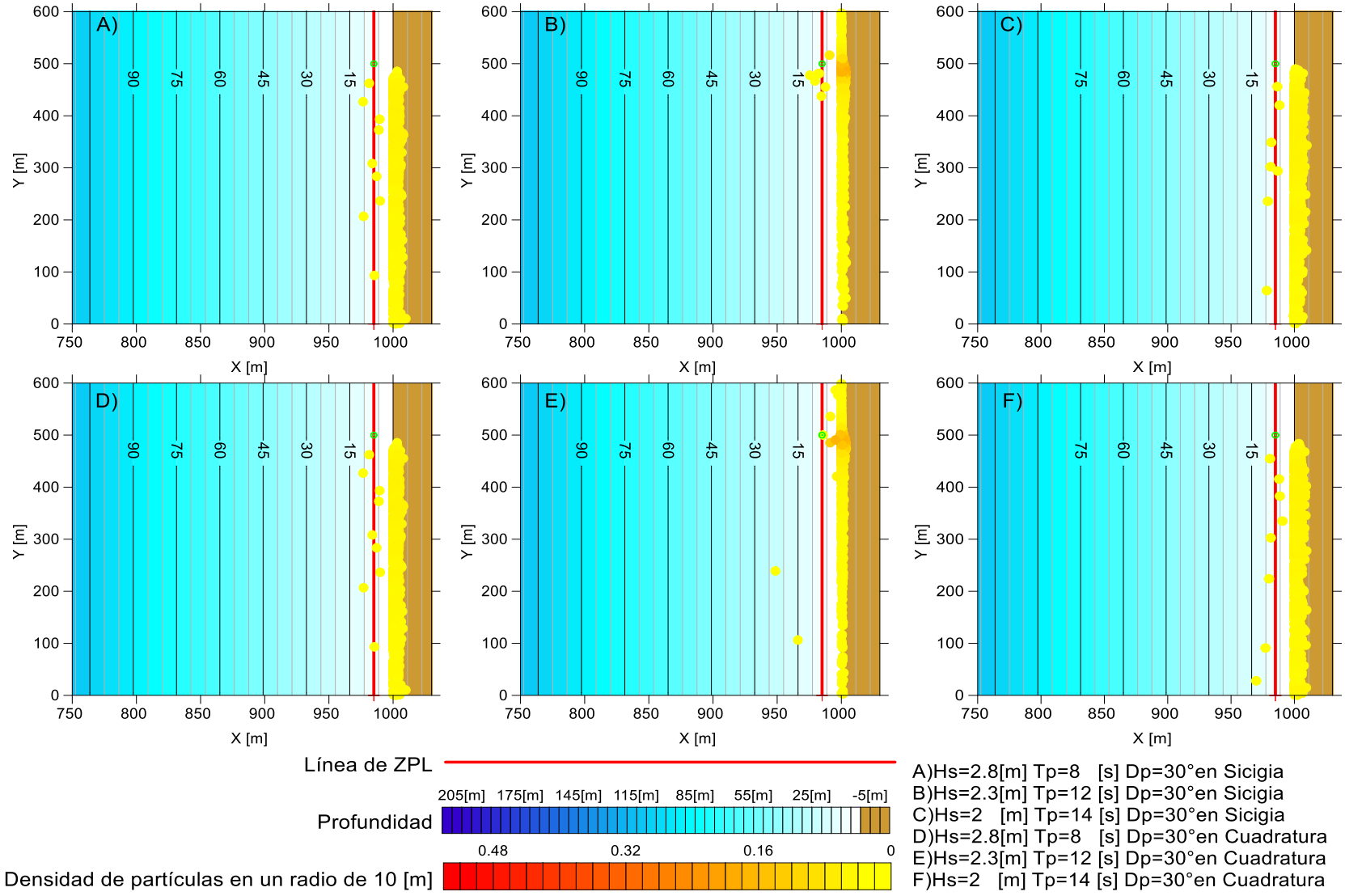


Figura 11-40: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia)