



INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL CON ONDA SOLITARIA Y N-WAVES DE LA FORMA DEL PERFIL INICIAL DE LA ONDA DEL TSUNAMI OCURRIDO EN 1995 ENTRE LAS COSTAS DE JALISCO Y COLIMA

Juan Esteban Flores Álvarez
Dora Luz Ávila Arzani
José Miguel Montoya Rodríguez

Publicación Técnica No. 648
Sanfandila, Qro.
2020

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por los M. en C. Juan Esteban Flores Álvarez, M. en I. Dora Luz Ávila Arzani y el Dr. José Miguel Montoya Rodríguez.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-02/20: INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL CON ONDA SOLITARIA Y N-WAVES DE LA FORMA DEL PERFIL INICIAL DE LA ONDA DEL TSUNAMI OCURRIDO EN 1995 ENTRE LAS COSTAS DE JALISCO Y COLIMA.

Se agradece la colaboración al presente estudio de la Ing. Cindy Casas Valencia, investigadora de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera.

Contenido

	Página
Índice de figuras y gráficas.....	vii
Índice de tablas	xix
Sinopsis.....	xxi
Abstract	xxiii
Resumen ejecutivo.....	xxv
Introducción.....	1
1. ANTECEDENTES	3
1.1 Investigación bibliográfica del estado del arte de la onda solitaria y de la N-wave 3	
1.2 Características del tsunami	5
1.3 Análisis teóricos	6
1.3.1 Ascenso.....	7
1.4 Ascenso de onda solitaria no rompiente en playas.....	8
1.5 Ascenso de onda solitaria rompiente en playas.....	9
1.5.1 Punta de ola rota y dispersada.	9
1.5.2 Modelo numérico	10
1.5.3 Modelo de balance de energía	10
1.6 Ecuación de onda solitaria.....	10
1.7 Ecuación N-waves	11
1.8 Propagación.....	11
1.8.1 Transformación de las olas.....	12

1.8.2 Reducción del oleaje.....	12
1.8.3 Rompiente del oleaje	13
1.8.3.1 Características de la ola solitaria rompiente	13
1.8.3.2 Formación de Tsunamis y fisión de bloques de oleaje	14
1.8.4 Disipación de la energía	14
1.9 Métodos de diseño actuales	15
1.9.1 ASCE - Cargas y efectos del tsunami.....	15
1.10 Fuerzas de Tsunami de entrada sobre rompeolas	17
1.10.1 Fuerza hidrodinámica	17
1.10.2 Fuerza hidrostática	18
1.10.3 Altura del rompeolas	19
1.11 Dispersión de la rompiente de la onda solitaria en paredes verticales	19
2. MARCO ANALÍTICO.....	21
2.1 Revisión de las técnicas de generación de oleaje	21
2.2 Generación de oleaje con paleta tipo pistón	22
2.2.1 Analogía de la rompiente de la ola	23
2.2.2 Movimiento vertical de la superficie de la onda	23
2.2.3 Generación de ondas por volumen.....	24
2.2.4 Aplicación de los métodos	25
2.3 Resultados	27
2.3.1 Formas de onda.....	27
2.3.2 Parámetros de control.....	30
2.3.3 Series de tiempo de la elevación de la superficie	33
2.4 Ondas Sinusoidales	33
2.4.1 Ondas Solitarias	35

2.4.2 N-waves.....	37
2.4.3 Mareograma Realista.....	38
2.5 Conclusiones del tema.....	40
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
3.1 DEFINICION DE LA ESCALA DE LINEAS.....	41
3.2 Proyecto del modelo hidráulico.....	41
3.3 Adecuación del modelo hidráulico en tanque de olas menor.....	42
3.4 Programa de ensayos.....	46
3.5 Desarrollo experimental.....	46
3.6 Variantes para desarrollar onda solitaria	49
3.7 Resultados obtenidos	52
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. ...	105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	113

Índice de figuras y gráficas

Figura 1.1 Tsunami causado por un terremoto en la zona de subducción.	4
Figura 1.2 Esquema de diferentes formas de ondas.	5
Figura 1.3 Transformación del oleaje, desde la zona de generación hasta la playa.	12
Figura 1.4 Tipos de rompientes.	13
Figura 1.5 Relación de ascenso R/HT, en función de la pendiente media del parámetro de similitud de oleaje ξ_{100}	16
Figura 1.6 Método de energía para la profundidad y velocidad de inundación por tsunami.	17
Figura 2. 1 La serie temporal de elevación superficial no dimensional resultante depende de la variación del parámetro del generador, la línea gris representa la señal objetivo. Tipos de onda aplicados según la tabla 2: panel superior izquierdo - ID 8, panel superior derecho - ID 11, panel inferior izquierdo - ID 15, panel inferior derecho - ID 12.	32
Figura 2. 2 Comparación de las ondas sinusoidales generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \ g/d_0$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.	35
Figura 2. 3 Comparación de las formas de onda solitarias generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \ g/d_0$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.	37
Figura 2. 4 Comparación de las formas de onda N generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \ g/d_0$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.	39
Figura 2. 5 Ilustración del rendimiento del generador para una forma de onda prototipo deducida del modelado numérico para la ciudad de Padang (Goseberg y Schlurmann, 2009) con $T = 50.0$ s, $h_0 = 0.3$ m, $a_{tr} = 0.03$ m. y $a_{cr} = 0.06$ m., panel superior de la figura representa la elevación no	

dimensional de la superficie del agua η/d_0 de la señal del punto de ajuste y la variable de control con respecto al tiempo adimensional $t = t \sqrt{g/d_0}$, panel inferior muestra el residual estandarizado en el tiempo no dimensional. 39

Figura 3. 1 Retiro de material existente en tanque de olas menor del modelo anterior. 42

Figura 3. 2 Selección del material (granzón, grava y cubos ranurados) para 43

Figura 3. 3 Colocación de las ortogonales para la configuración del modelo hidráulico. 43

Figura 3. 4 Vaciado de grava para construcción de la pendiente del modelo hidráulico. 44

Figura 3. 5 Colocación y nivelación de elementos (cubos ranurados) para 44

Figura 3. 6 Colocación de sensores tipo capacitivo en el modelo hidráulico. 45

Figura 3. 7 Construcción de secciones a escala por construcción de pendiente .. 45

Figura 3. 8 Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje. 48

Figura 3. 9 Ubicación de los sensores de oleaje en el modelo. 48

Figura 3. 10 Programa Tsunami Wave Generation para la generación de onda solitaria de forma arbitraria. 49

Figura 3. 11 Programa N-waves Signal Generation para la generación de onda solitaria controlada. 49

Figura 3. 12 Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria con el programa Wave Signal Generation Software. 50

Figura 3. 13 Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria con el programa N-waves Signal Generation con la opción Leading Depression. 51

Figura 3. 14 Sección Tipo estudiada del rompeolas de Cuyutlán, Col. 52

Figura 3. 15 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 53

Figura 3. 16 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 53

Figura 3. 17 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 54

Figura 3. 18 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 54

Figura 3. 19 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 54

Figura 3. 20 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. 54

Figura 3. 21 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	55
Figura 3. 22 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	55
Figura 3. 23 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	58
Figura 3. 24 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	58
Figura 3. 25 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	59
Figura 3. 26 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	59
Figura 3. 27 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	59
Figura 3. 28 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	59
Figura 3. 29 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	60
Figura 3. 30 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	60
Figura 3. 31 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	63
Figura 3. 32 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	63
Figura 3. 33 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	64
Figura 3. 34 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	64
Figura 3. 35 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	64

Figura 3. 36 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	64
Figura 3. 37 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	65
Figura 3. 38 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	65
Figura 3. 39 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	70
Figura 3. 40 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	70
Figura 3. 41 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	71
Figura 3. 42 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	71
Figura 3. 43 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	71
Figura 3. 44 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	71
Figura 3. 45 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	72
Figura 3. 46 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	72
Figura 3. 47 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	75
Figura 3. 48 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	75
Figura 3. 49 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	76
Figura 3. 50 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	76

Figura 3. 51 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	76
Figura 3. 52 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	76
Figura 3. 53 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	77
Figura 3. 54 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	77
Figura 3. 55 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	80
Figura 3. 56 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	80
Figura 3. 57 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	81
Figura 3. 58 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	81
Figura 3. 59 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	81
Figura 3. 60 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	81
Figura 3. 61 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	82
Figura 3. 62 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	82
Figura 3. 63 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	87
Figura 3. 64 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	87
Figura 3. 65 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	88

Figura 3. 66 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	88
Figura 3. 67 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	88
Figura 3. 68 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	88
Figura 3. 69 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	89
Figura 3. 70 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	89
Figura 3. 71 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	92
Figura 3. 72 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	92
Figura 3. 73 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	93
Figura 3. 74 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	93
Figura 3. 75 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	93
Figura 3. 76 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	93
Figura 3. 77 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	94
Figura 3. 78 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	94
Figura 3. 79 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	97
Figura 3. 80 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.....	97

Figura 3. 81 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	98
Figura 3. 82 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	98
Figura 3. 83 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	98
Figura 3. 84 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	98
Figura 3. 85 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	99
Figura 3. 86 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.	99
Gráfica 3. 1 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.	53
Gráfica 3. 2 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	55
Gráfica 3. 3 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	56
Gráfica 3. 4 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.	56
Gráfica 3. 5 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.	57
Gráfica 3. 6 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.	58
Gráfica 3. 7 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	60
Gráfica 3. 8 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	61

Gráfica 3. 9	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.....	61
Gráfica 3. 10	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.....	62
Gráfica 3. 11	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.	63
Gráfica 3. 12	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.....	65
Gráfica 3. 13	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.....	66
Gráfica 3. 14	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.....	66
Gráfica 3. 15	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.....	67
Gráfica 3. 16	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.....	68
Gráfica 3. 17	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.....	68
Gráfica 3. 18	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.....	69
Gráfica 3. 19	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.....	69
Gráfica 3. 20	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.	70
Gráfica 3. 21	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	72
Gráfica 3. 22	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	73

Gráfica 3. 23	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.	73
Gráfica 3. 24	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.	74
Gráfica 3. 25	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.	75
Gráfica 3. 26	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	77
Gráfica 3. 27	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	78
Gráfica 3. 28	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.	78
Gráfica 3. 29	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.	79
Gráfica 3. 30	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.	80
Gráfica 3. 31	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	82
Gráfica 3. 32	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	83
Gráfica 3. 33	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.	83
Gráfica 3. 34	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.	84
Gráfica 3. 35	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.	84
Gráfica 3. 36	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.	85
Gráfica 3. 37	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.	85

Gráfica 3. 38	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.....	86
Gráfica 3. 39	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.	87
Gráfica 3. 40	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.	89
Gráfica 3. 41	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.	90
Gráfica 3. 42	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.	90
Gráfica 3. 43	Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.	91
Gráfica 3. 44	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.....	92
Gráfica 3. 45	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.....	94
Gráfica 3. 46	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.....	95
Gráfica 3. 47	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.....	95
Gráfica 3. 48	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.....	96
Gráfica 3. 49	Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.	97
Gráfica 3. 50	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.....	99
Gráfica 3. 51	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.....	100

Gráfica 3. 52	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.....	100
Gráfica 3. 53	Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.....	101
Gráfica 3. 54	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.....	101
Gráfica 3. 55	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.....	102
Gráfica 3. 56	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.....	102
Gráfica 3. 57	Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.....	103
Gráfica 4. 1	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.....	105
Gráfica 4. 2	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.....	106
Gráfica 4. 3	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.....	106
Gráfica 4. 4	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.....	107
Gráfica 4. 5	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.....	107
Gráfica 4. 6	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.....	108
Gráfica 4. 7	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.....	108
Gráfica 4. 8	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.....	109
Gráfica 4. 9	Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.....	109

- Gráfica 4. 10 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m..... 110
- Gráfica 4. 11 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m..... 110
- Gráfica 4. 12 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m..... 111

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Revisión de importantes configuraciones experimentales de generación de tsunamis, dimensiones, datos técnicos y geométricos, parámetros de olas y pendientes según disponibilidad.	24
Tabla 2. 2 Lista de experimentos y parámetros de onda, (*) denota los experimentos donde las mediciones del nivel del agua se realizaron a mitad de camino a través de la curva 180°, la no linealidad H/d expresa la no linealidad y L/d se interpreta como medida de la longitud relativa de onda. El número de Ursell (Ur) se define como $Ur = HL^2/d^3$	30
Tabla 2. 3 Parámetros de control utilizados para los experimentos, diagnósticos de precisión y respetabilidad.	34
Tabla 3. 1 Programa de ensayos de onda solitaria.	47
Tabla 5. 1 Valores de altura de ola (para Tsunami wave generation) y Amplitud de ola (para N-waves Leading Elevation y Leading Depression) por pendiente de fondo de modelo.	114

Sinopsis

En el presente estudio se analizaron tres diferentes formas de desarrollar en laboratorio un Tsunami, bajo la perspectiva de la variación del fondo (pendiente) que antecede a la estructura en análisis, la cual es una sección representativa de rompeolas de uno de los sitios de referencia de este estudio (Colima).

Para este estudio se analizó parte del estado del arte referente al tema en cuestión, donde se mencionan algunos de los investigadores del tema Tsunamis, sus hallazgos durante su investigación y la conclusión que obtuvieron, con respecto a las formas de las ondas de tsunami que reprodujeron en los laboratorios de ingeniería hidráulica de investigación.

Para concluir este estudio, se presentaron los resultados cuantitativos y cualitativos de la forma del perfil de los tsunamis medidos en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte, dando un panorama informativo de los resultados obtenidos derivados de esta investigación.

Abstract

The present research paper describes the essential shape of the tsunami profile according to the change of bottom slope where it develops with certain characteristics. This study gives a general view to understand how a tsunami is modified according to the final characteristics of the environment where it is developed, to provide a clear idea of its behavior, taking into account the prior knowledge of the causes that generate the tsunami, the environment in which it is developed and as a key aspect of study, the characteristics of the equipment, materials and facilities where the study is developed.

In chapter 1, a bibliographic investigation of research of the solitary wave made with the purpose of establishing the state of the art on the theme.

Chapter 2 established the analytical framework of the solitary wave and N-wave signals, highlighting the analytical expressions of the formulations used in the signals in the marine hydraulics laboratory wave generator in the Instituto Mexicano del Transporte.

Chapter 3 describes the experimental development of this study, which presents the characteristics of the environment where the research was made, the equipment and instrumentation and materials used, as well as the results obtained from the trials.

In chapter 4 lists the processing, analysis, and discussion of the experimental results, highlighting the aspects that were most relevant during the development of the experimental tests that were obtained in the hydraulic model.

Chapter 5 presents the conclusions and recommendations of this study, setting out the results according to the scope established at the beginning. Obtaining a methodology that allows having key points about what variants to take into account in studies of tsunami modeling.

Resumen ejecutivo

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo describir la forma esencial del perfil del tsunami de acuerdo al cambio de pendiente de fondo donde se desarrolla con ciertas características. Este estudio tiene como meta, visualizar y entender cómo se modifica un tsunami de acuerdo a las características finales del medio donde se desarrolla, para proporcionar una idea clara de su comportamiento, teniendo en cuenta el conocimiento previo de las causas que generan el tsunami, el medio en el cual se desarrolla y como aspecto clave de estudio, las características del equipo, materiales e instalaciones donde se desarrolla el estudio.

En el capítulo 1, se realizó una investigación bibliográfica del estado del arte de la onda solitaria con la finalidad de establecer el estado del arte sobre el tema.

El capítulo 2, se estableció el marco analítico de las señales de onda solitaria y N-wave, destacando las expresiones analíticas de las formulaciones utilizadas en las señales en el generador de oleaje del laboratorio de hidráulica marítima del IMT.

El capítulo 3, es el desarrollo experimental del presente estudio, donde se presentan las características del medio donde se llevó a cabo la investigación, el equipo e instrumentación y materiales utilizados, así como los resultados obtenidos de los ensayos.

En el capítulo 4, se realizó el procesamiento, análisis, y discusión de los resultados experimentales, destacando los aspectos que resultaron más relevantes durante el desarrollo de las pruebas experimentales que se llevaron a cabo en el modelo hidráulico.

El capítulo 5, presenta las conclusiones y recomendaciones del presente estudio, acotando los resultados de acuerdo a los alcances establecidos en un inicio. Obteniendo una metodología que permite tener puntos clave de que variantes tener en cuenta en estudios de modelación de tsunamis.

Introducción

El presente trabajo es el resultado de una investigación realizada de los fenómenos naturales denominados tsunamis, desde un punto de vista académico de los resultados de estudios realizados a lo largo de años en laboratorios de investigación al respecto del tema, en el cual se mencionan los resultados enfocándolos a el tópico de este estudio, el cual es la descripción del perfil de un tsunami de acuerdo a su forma física.

Teniendo en cuenta los medios, equipo e instrumentación para desarrollar experimentalmente los ensayos para generar tsunamis, el presente estudio hace referencia a las características en particular de cuatro alternativas de tsunami, desde el punto de vista cuantitativo, principalmente los que se encuentran en el rango de intensidad al medido en las costas de Jalisco y Colima, de la república Mexicana.

Con los resultados de las mediciones realizadas en los ensayos en el tanque de olas menor del laboratorio de Ingeniería Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte, se realizó una comparativa de los perfiles que se obtuvieron después de la generación de tsunamis con tres diferentes formas de desarrollo por parte del software utilizado en el estudio.

Finalmente se establecen las conclusiones y recomendaciones, que se desprenden del análisis experimental de este estudio, para así poder dar un primer enfoque en el conocimiento del desarrollo de los tsunamis de acuerdo al medio donde se propagan y la intensidad con la que se manifiestan.

1. ANTECEDENTES

1.1 Investigación bibliográfica del estado del arte de la onda solitaria y de la N-wave

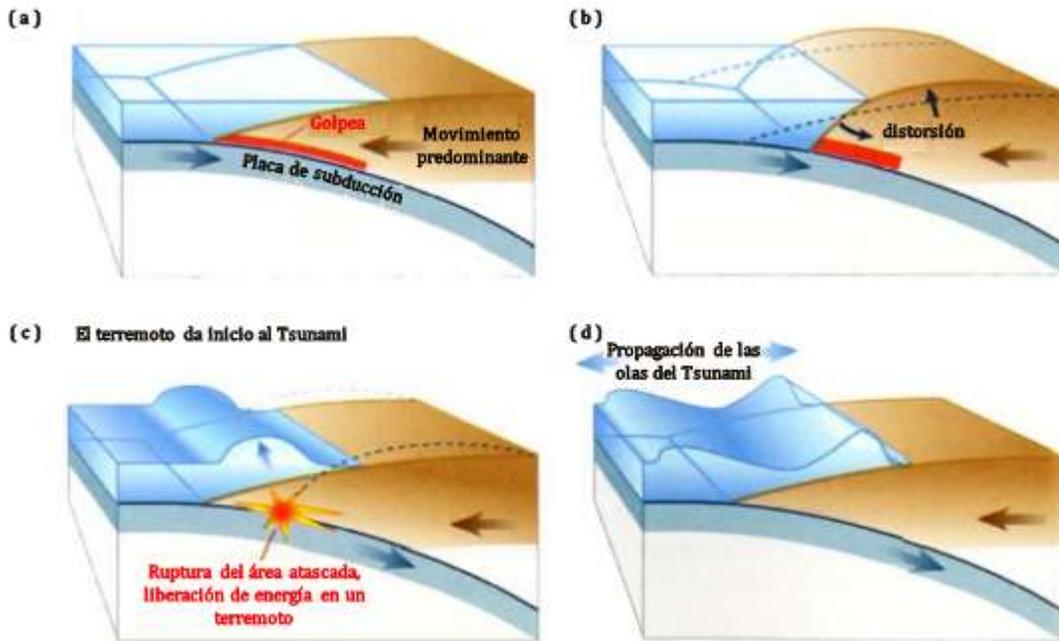
En vista de los recientes, trágicos y desastrosos tsunamis, como el tsunami del Océano Índico en 2004 y el tsunami de Tohoku-Oki en 2011, sigue siendo imperativo conocer los mecanismos que transforman los desastres naturales en acontecimientos que cambian la vida de quienes viven en regiones propensas de situación de riesgo. Desde la generación hasta la propagación, evolución y hasta la etapa final, donde un frente de olas se aproxima a una costa. Aunque muchos estudios se han centrado en los dos primeros aspectos de un tsunami, sigue siendo difícil evaluar el impacto inducido por las olas largas de las desastrosas ondas impulsadas cerca y en tierra. Recientemente, Fritz et al. (2012) presentaron hidrogramas y velocidades en la costa del tsunami de Tohoku-Oki en la bahía de Kesenuma, que ejemplifican la longitud realista y las escalas de tiempo durante una carrera hacia arriba y hacia abajo del tsunami. Se han hecho algunos intentos numéricos para modelar el comportamiento y la interacción de las olas largas con los desarrollos costeros (Hashimoto y Park, 2008; Xiao y Huang, 2008), pero a un costo computacional masivo.

Parece que, especialmente en la región cercana a la costa, donde existen estructuras de flujo complicadas junto con el flujo de escombros, el transporte de sedimentos y turbulencias complejas, los modelos tradicionales a escala física son esenciales. Por lo tanto, los modelos físicos podrían contribuir a comprender la naturaleza compleja de la propagación y el crecimiento de las ondas solitarias y sus diversos tipos de interacciones con el entorno de construcción. Esto podría ayudar a reducir las bajas mediante la mejora de los códigos de construcción y las medidas de defensa costera. Además, las técnicas robustas de modelado físico permiten la medición directa de la distribución de la presión y de las fuerzas expuestas a corrientes violentas inducidas por la aceleración.

Lo anterior, nos lleva a la definición de tsunami, que es una ola, o serie de olas, generadas por el desplazamiento vertical repentino de una columna de agua. El agua puede ser desplazada debido a la actividad sísmica, explosiones volcánicas, un deslizamiento de tierra sobre o debajo del agua, un impacto de asteroide o ciertos fenómenos meteorológicos. El término tsunami es japonés para una ola de puerto [Bryant, 2008].

Un tsunami se crea por el desplazamiento de una gran masa de agua. Un terremoto es en la mayoría de los casos la causa de este desplazamiento. El terremoto que induce el mayor tsunami es causado por una placa tectónica que se desliza debajo

de la placa adyacente. Esto se llama una "zona de subducción". Estas zonas de subducción generalmente se localizan en tierra, en aguas poco profundas o incluso en aguas profundas del océano. Este es, por ejemplo, el caso de Japón, donde el Océano Pacífico se encuentra a un lado y las islas de Japón al otro lado de la línea de fractura.



Fuente: Arcas y Segur., 2012.

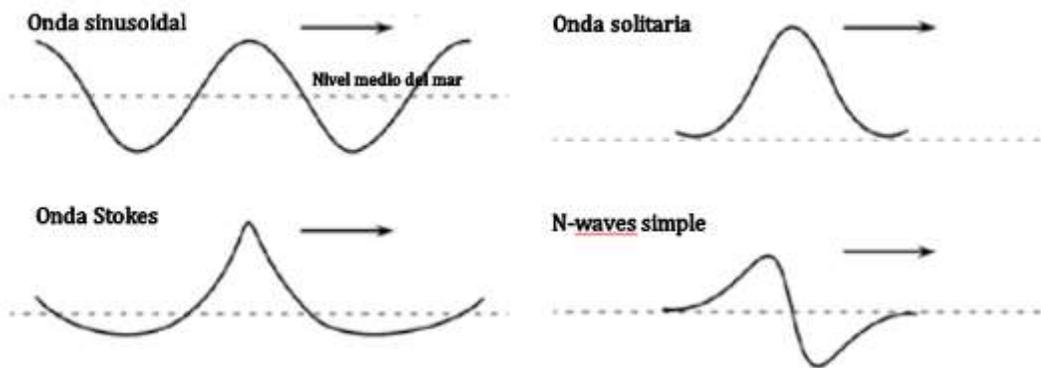
Figura 1.1 Tsunami causado por un terremoto en la zona de subducción.

La figura 1.1 muestra el mecanismo de un tsunami causado por una placa de subducción. En la figura 1.1.a La placa se desliza debajo de la placa adyacente hasta que las dos placas se atascan. En la figura 1.1.b el movimiento de las dos placas continúa, pero la placa de subducción tiende a arrastrar la placa superior hacia abajo. La placa superior se dobla y produce energía que puede acumularse durante décadas. En la figura 1.1.c la energía es demasiado grande para las dos placas atascadas y en la figura 1.1.d el Tsunami es causado por un terremoto en la zona de subducción [Arcas y Segur., 2012]. El movimiento del lecho marino genera una depresión que viaja hacia tierra y una elevación que viaja hacia el mar. Es por eso que la ola líder es principalmente una depresión en un evento de tsunami [Labeur et al., 2014].

1.2 Características del tsunami

Las olas de tsunami difieren mucho de las olas de tormenta u olas de oleaje. Las olas de tormenta o de oleaje disipan su energía principalmente en la zona de rompientes, mientras que los tsunamis pierden poca energía a medida que se acercan a la orilla y pueden subir mucho más que las olas de tormenta. Este comportamiento se debe principalmente a la longitud de onda que es de varios km. para los tsunamis. La longitud de la ola es del mismo orden que la longitud del área desplazada del terremoto y puede ser de 10 a 500 km. Otro parámetro importante de un tsunami es el período de la ola y generalmente varía de varios minutos a horas. Las olas con este período viajan a velocidades de 166 a 250 m/s en alta mar, de 28 a 83 m/s en la plataforma continental y de 10 m/s en la costa. [Bryant, 2008]

La forma de la ola experimenta una transformación de aguas profundas en alta mar a la costa poco profunda. En aguas profundas, la ola tiene una forma sinusoidal. Las crestas y los valles son de la misma altura. Cuando la ola cruza la plataforma continental, el pico de la ola se agudiza y la depresión (valle) se aplanan. Éste pico de la onda es matemáticamente descrito por la teoría de la onda de Stokes. Las partículas de agua en una onda de Stokes no siguen órbitas cerradas, y se produce un movimiento masivo de agua debido a la onda. A medida que la ola llega a la orilla, llega a su punto máximo y desaparece. La ola del tsunami se convierte en una onda solitaria. Aquí toda la masa de agua se mueve en la dirección de la ola. En muchas olas de tsunami hay un paso a través de la cresta de la ola de tsunami. Tales ondas están mejor descritas por las N-waves [Bryant, 2008]. Las N-waves no se basan en ninguna teoría, se basan matemáticamente para describir una onda que parece un tsunami con una depresión. La N-waves se crea multiplicando una onda solitaria con una línea recta inclinada.



Fuente: Bryant, 2008.

Figura 1.2 Esquema de diferentes formas de ondas.

1.3 Análisis teóricos

Se han utilizado varios modelos simplificados para describir el proceso del ascenso máximo de la ola, que es un fenómeno de onda fuertemente no lineal y dispersivo, por ejemplo, las ecuaciones de Boussinesq y las ecuaciones no lineales de olas en aguas poco profundas. En teoría, los efectos no lineales y los efectos dispersivos se pueden estimar mediante dos parámetros respectivamente:

$$a = \frac{H}{h} \quad \epsilon = \frac{h}{l} \quad [1.1]$$

Donde H es la altura de la ola aguas profundas, h es la profundidad y l es una longitud horizontal. Para la propagación de olas largas como tsunamis, el número Ursell, U, definido como:

$$U_r = \frac{a}{\epsilon^2} \quad [1.2]$$

Es importante en este proceso medir la importancia relativa de los efectos no lineales y la dispersión de frecuencia. Cuando $H/h \ll 1$ y $h/l \ll 1$, tanto los efectos no lineales como la dispersión de frecuencia pueden ser no estimados y las ecuaciones lineales en aguas someras pueden describir adecuadamente la propagación de las olas [Mei (1983)]. A medida que se acercan estas olas de largo periodo a la costa, la altura de las olas se incrementa y en algún momento los efectos de la no linealidad no pueden ser estimados. En ese caso, las ecuaciones de aguas someras totalmente no lineales son el modelo adecuado si no se pueden estimar los efectos de la dispersión de frecuencia.

[Keller y Keller (1964)] estudiaron la propagación periódica de ondas en una profundidad constante y con las olas incidiendo por una playa inclinada al unir las soluciones para la amplitud de onda y las velocidades de las ecuaciones lineales no dispersivas de aguas someras para ambas regiones en la punta de la playa; La predicción teórica del ascenso máximo de la ola en la pendiente se presentó. [Carrier y Greenspan (1958)] estudiaron las ecuaciones no lineales en aguas poco profundas y propusieron un método para transformar estas ecuaciones en un conjunto de ecuaciones lineales que pueden resolverse analíticamente. Sigue siendo uno de las pocas soluciones analíticas disponibles para la dinámica de onda no lineal. Ellos investigaron la ejecución de ondas periódicas con varias formas iniciales diferentes en una pendiente plana usando ésta teoría. [Tuck y Hwang (1972)] y [Spielvogel (1976)] extendieron la transformación de [Greenspan (1958)] y la usaron para resolver el ascenso de la onda de largo periodo también bajo configuraciones iniciales prescritas de la superficie del agua. [Tuck y Hwang (1972)] investigaron el problema de la generación de olas en una pendiente debido a una perturbación del fondo. [Spielvogel (1976)] extendió la transformación de [Carrier y Greenspan (1958)] y la usó inversamente para determinar las condiciones iniciales de las olas en aguas profundas desde la ejecución de la onda de largo

periodo asumiendo un perfil de superficie inicial logarítmico en la pendiente en el instante del ascenso máximo.

1.3.1 Ascenso

[Synolakis (1986, 1987)] simplificó la transformación de [Carrier y Greenspan (1958)], y lo aplicó al problema de una onda solitaria que se propaga en una profundidad constante y el ascenso por una playa simple plana. Sus resultados analíticos concuerdan bien con los experimentos de laboratorio para olas no rompientes en la pendiente. Basados en su simplificación, [Synolakis (1986)] llegó a la conclusión de que el ascenso máximo predicho por las ecuaciones lineales en aguas someras fueron las mismas que las predichas por las ecuaciones no lineales en aguas profundas, aunque el comportamiento de la ola en la pendiente como la amplitud de la ola y las velocidades de las partículas del agua fueron bastante diferentes. [Kanoglu y Synolakis (1998)] estudiaron la evolución de la onda de largo periodo y el ascenso en batimetrías en dos y tres dimensiones utilizando las ecuaciones lineales de aguas poco profundas. Además, ellos definieron los factores de amplificación de diferentes batimetrías oceánicas para estudiar la evolución de ondas solitarias sobre varias batimetrías.

Synolakis [1987] encontró una ley de ascenso que da una estimación del avance de las ondas solitarias no rompientes, ecuación [1.3.a]. No hay una ley previa para la rompiente de las olas solitarias. Hay una relación dada para el ascenso de la rompiente de las ondas solitarias por Synolakis [1987], ecuación [1.3.b].

$$\frac{R}{d_0} = 2.831(\cot \alpha_3)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{H}{d_0}\right)^{\frac{2}{3}} \quad [1.3. a]$$

$$\frac{R}{d_n} = 0.918 \left(\frac{H}{d_n}\right)^{0.606} \quad [1.3. b]$$

Donde [R] es el ascenso vertical, [d_0] es la profundidad del agua mar adentro, [α_3] es la pendiente lineal del fondo en tierra y [H] es la altura de la ola de tsunami [Synolakis, 1987]. Tadepalli y Synolakis [1994] encontraron una ley previa para las N-waves. No está claro qué onda es la más precisa [Okumura, 2016].

El problema de la aceleración tridimensional ha recibido relativamente menos atención. [Zhang (1996)] investigó el período previo asociado con una onda solitaria oblicuamente incidente a una playa plana. Se encontró una solución lineal para el avance tridimensional utilizando la síntesis de Fourier. [Zhang (1996)] también investigó tanto el problema no lineal y como el efecto de la dispersión de frecuencia. [Brocchini (1998)] investigó la no ruptura de las ondas solitarias que inciden y se reflejan en una playa plana inclinada por medio de una débil extensión tridimensional de la solución propuesta por [Synolakis (1986)].

Todos los modelos simplificados anteriores utilizan el ascenso de la onda solitaria no rompiente. Si La ola rompe durante el proceso de ascenso o descenso de la ola, la física básica del ascenso es complicada y está lejos de ser completamente

entendida. La mayor parte del trabajo anterior de la ruptura de la ola consiste en estudios experimentales o simulaciones numéricas. Eso se ha encontrado en estudios de campo y de laboratorio que después de que rompe una ola, la forma de la onda de propagación es similar a una onda de propagación en varias direcciones en términos de apariencia. Por lo tanto, el estudio del ascenso de la propagación de la onda en varias direcciones tal vez puede proporcionar información valiosa sobre el ascenso la ola rompiente. [Ho y Meyer (1962)] y [Shen y Meyer (1963)] propusieron una teoría analítica para el ascenso de la ola dispersada utilizando las ecuaciones lineales en aguas poco profundas. A partir de esta derivación, descubrieron que cuando la ola dispersa por la rompiente inicialmente llegó a la costa, la altura de la ola dispersa se hizo cero y, por lo tanto, la rompiente se dispersó en la orilla de la playa. Después de eso, el movimiento fluido entró en otra etapa en forma de una delgada lámina de agua que se propagó cuesta arriba. El ascenso máximo predicho por Shen y Meyer (1963) fue:

$$R_b = \frac{u^*2}{2g} \quad [1.4]$$

Esta ecuación (1.4) no considera la pendiente de la playa, y u^* es la velocidad horizontal de la ola dispersa en el instante en que llegó a la costa inicial. [Miller (1968)] experimentalmente midió el ascenso máximo de una ola después de romper en cuatro playas con diferentes ángulos y comparó esos resultados con la predicción del valor de la ecuación (1.4). Descubrió que la playa, el ángulo y la rugosidad del fondo de la pendiente fueron factores importantes para determinar el ascenso de la ola rota dispersa, y los resultados experimentales diferían de las predicciones teóricas significativamente. [Yeh (1991)] también investigó el tsunami parecido a una onda dispersa y el ascenso en el laboratorio e informó que el colapso del de la onda rota no se produjo en sus experimentos. El proceso de transición que tuvo lugar cuando la ola rompió y se acercó a la costa no fue más que un "intercambio de impulso" [(Yeh (1991))] entre incidente ola rota y la forma de cuña del agua que continuaba desplazándose estaba por delante de la onda rota desplazándose a lo largo de la orilla. Sin embargo, el ascenso máximo de la ola parecía predecirse a partir de la condición inicial en aguas profundas por la ecuación (1.4) reduciendo el valor de u^* . Por lo tanto, parece que el ascenso de la onda después de romper teórica puede dar información cualitativa sobre el proceso físico, y es una de pocas soluciones analíticas disponibles para describir el proceso de propagación del oleaje después de la rompiente.

1.4 Ascenso de onda solitaria no rompiente en playas

a). La teoría no lineal desarrollada aquí concuerda bien con los datos experimentales correspondientes a una pendiente relativamente suave (1: 2.08), así como en una pendiente más suave (1: 19.85). la correlación es acorde para las series de tiempo de la superficie del agua, los perfiles espaciales de la superficie

del agua y las velocidades horizontales de las de partículas que se obtuvieron en varios lugares durante el período del ascenso de la ola.

b). La presente teoría no lineal proporciona una predicción mejor en varios aspectos del proceso de ejecución que la teoría no lineal presentada anteriormente por [Synolakis (1986)]. La mejora en la precisión de esta predicción de la presente teoría no lineal en comparación con la teoría no lineal es del orden del 10% en función del límite de ruptura de la onda elegida. Esta indica que las suposiciones hechas por [Synolakis (1986)] en su aproximación en la teoría no lineal es razonablemente satisfactoria para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, especialmente para pequeñas pendientes donde la altura de la ola rompiente es significativamente menor que para pendientes escalonadas como las investigadas aquí.

c). Se desarrolló un arreglo experimental de videogravaciones de cámara de Figuradiodo láser en conexión con este estudio para medir las series de tiempo de la punta del recorrido de una ola solitaria no rompiente, a medida que avanzaba cuesta arriba. Los resultados obtenidos con este medidor de ejecución coincidieron bien con otras mediciones y proporcionó una manera simple y confiable de medir ensayos en tiempo de ejecución.

1.5 Ascenso de onda solitaria rompiente en playas

1.5.1 Punta de ola rota y dispersada.

a). la dispersión generada por la ola rompiente tiene la trayectoria de un simple chorro de agua en caída libre con la velocidad horizontal igual a la celeridad de la onda solitaria en la región donde la profundidad es constante.

b). El punto donde la punta de la ola toca la pendiente determina el resultado de la dispersión de la ola. Si la punta de la ola choca contra una pendiente seca, no se produce dispersión y la punta de la ola rompiente simplemente se desvanece. Si el punto de impacto se encuentra en la superficie libre por delante de la ola, se forma una disipación que incluye una onda reflejada que aumenta aún más la turbulencia y la disipación de energía asociada con la ola rompiente.

c). Los vórtices en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario pueden ser generados por la pendiente de la rompiente la ola y la onda disipada reflejada asociado con la dispersión cuando la pendiente de la rompiente incide en la cara frontal de una ola rompiente o en la superficie del agua sin movimiento.

d). La cinemática la dispersión del agua que es generada por la rompiente de una onda solitaria es similar a la rompiente de ondas periódicas.

1.5.2 Modelo numérico

- a). El método numérico desarrollado en este estudio para predecir el ascenso de la ola rompiente proporciona una predicción simple y razonablemente buena de varios aspectos del proceso del ascenso de la ola. Los resultados concuerdan con el método experimental para los datos correspondientes al ascenso en una pendiente relativamente suave (1: 2.08), así como en una pendiente más suave (1: 19.85).
- b). El método numérico es estable, fácil de implementar y requiere relativamente pequeños recursos computacionales.
- c). Los resultados numéricos para los "parámetros globales" del desarrollo de ondas solitarias tales como el máximo ascenso y el perfil de la onda, coinciden razonablemente bien con el experimento para ambas condiciones de ruptura de onda, es decir, ola rompiente con y sin rigurosas dispersiones.
- d). Las características detalladas del proceso de ruptura de la ola, de la dispersión de la rompiente y la inundación no puede describirse mediante el modelo numérico.

1.5.3 Modelo de balance de energía

- a). La disipación de energía asociada con la ruptura de la ola se estima utilizando el modelo numérico y esto fue verificado por la medición experimental del potencial de la energía al máximo, y la energía de onda incidente y reflejada.
- b). La energía de la ola reflejada resultante de la interacción ola-pendiente para la pendiente investigada es insignificanemente pequeña en comparación con la energía de la ola incidente asociado con la onda solitaria.
- c). la concordancia del modelo de balance de energía con los experimentos indica que, el modelo de agujero que se utiliza para describir la disipación de energía es razonable.
- d). El modelo de equilibrio de energía parece ser útil para predecir el período previo a la inmersión de la ola rompiente de las ondas solitarias.

1.6 Ecuación de onda solitaria

La onda solitaria fue descrita por Boussinesq en 1972. Munk [1947], Dean y Dalrymple [1984], Madsen [et al. 2008] y Horsten [2016] utilizaron la onda solitaria de Boussinesq en sus estudios. La serie temporal para el modelo SWASH para describir una onda solitaria se derivará de la siguiente fórmula [Schimmels et al., 2016]:

$$n(t) = H * \operatorname{sech}^2(k * c(t - t_0)) \quad [1.5]$$

Donde η es la elevación de la superficie, H es la amplitud de la onda, d es la profundidad inicial del agua y k es el número de onda. En todo el perfil de onda no hay η menor que cero. La H , por lo tanto, representa la altura de la ola. Para obtener una serie temporal de la ecuación 1.5, la velocidad de propagación y el número de onda son obligatorios y se dan en la ecuación 1.6.

$$k = \sqrt{\frac{3H}{4d^2}} \quad c = \sqrt{g(d + H)} \quad [1.6]$$

1.7 Ecuación N-waves

Una ola de tsunami es generalmente precedida por una depresión del agua. Esto no está representado en la onda solitaria. Una N-waves sería mejor si la depresión del agua se incluyera en el modelo. Sin embargo, la N-waves no tiene conexión matemática con una ola de tsunami real. La N-waves es una onda solitaria transformada para que parezca una ola de tsunami. La onda solitaria se manipula, multiplicándola linealmente, hasta que tenga la forma deseada. La ola puede tener una depresión principal o una cresta principal seguida de una depresión de agua, dependiendo de la pendiente de la línea lineal (Tadepali, 1994). Se puede encontrar una ecuación de la N-waves en el informe de Tadepali y Synolakis [1994] y se establece de la siguiente manera:

$$n(x, 0) = (\epsilon * H)(x - X_2) * \text{sech}^2(\gamma_s(x - X_1)) \quad [1.7]$$

Donde $\epsilon * H$ es una amplitud de N-waves escalada, la distancia $L = X_2 - X_1$, $L=0$ conduce a una ola con igual valle y cresta. Para obtener $[\gamma_s]$:

$$\gamma_s = \sqrt{\frac{3}{4} \cot H} \quad [1.8]$$

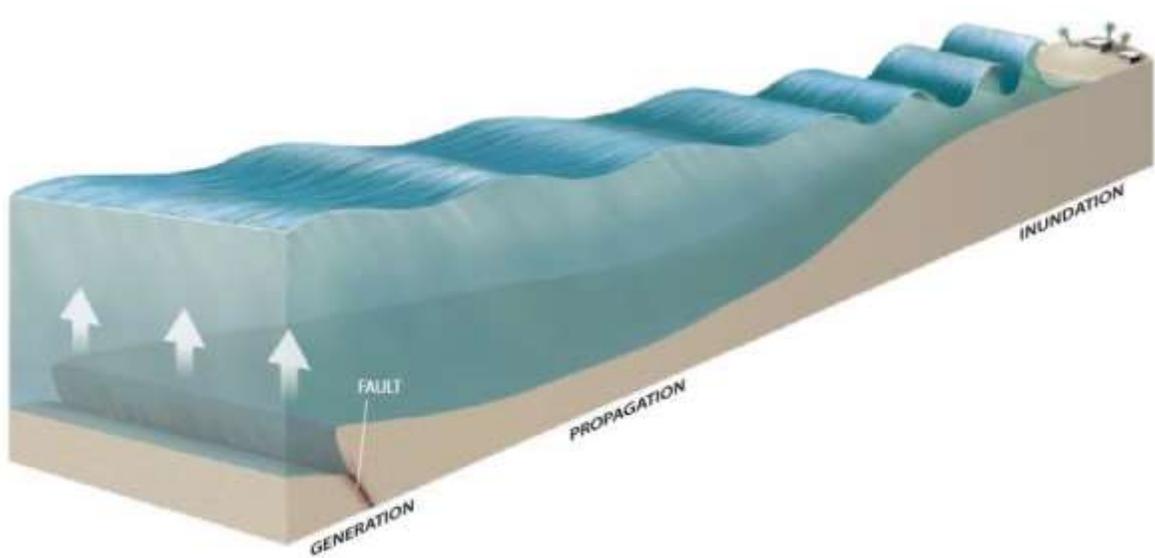
1.8 Propagación

Debido a la longitud de onda larga, la relación de la profundidad del agua sobre la longitud de onda es muy pequeña ($d/L < 0,05$). Esto significa que una ola de tsunami es una ola de aguas poco profundas, incluso en aguas profundas. La propagación de las olas se puede expresar como $c \approx \sqrt{gd}$ y, por lo tanto, está influenciada por la profundidad del agua [Battjes y Labeur, 2014]. Esta influencia de la profundidad del agua tiene efecto en cuatro procesos: el aumento de la amplitud de las olas debido a la disminución de la profundidad del agua cerca de la costa (Shoaling), el cambio en la dirección de las olas debido a la batimetría (Refracción), el cambio en la dirección de las olas y atenuación debido a islas y estructuras (Difracción), y el reflejo de las olas debido a la interacción con la costa o estructuras (Reflexión) [Jager et al., 2015]. Para modelar estos efectos se debe usar un modelo 2D.

1.8.1 Transformación de las olas

Un tsunami tiene cuatro etapas diferentes: la generación (ver antecedentes figura 1.1), la propagación en aguas relativamente profundas a la región costera, la deformación en el agua empujando hasta la zona de rompientes y el ascenso hacia la costa.

La propagación de la zona de generación a la región costera puede tardar varios minutos a varias horas, dependiendo de la distancia. En aguas profundas, las olas individuales en un tren de olas de tsunami tienen una gran longitud de ola de aproximadamente 100 km. Combinado con las alturas de ola moderada en el océano profundo, menos de un metro, da a las olas una pendiente muy baja. Esto hace que las olas puedan pasar desapercibidas por los barcos en el océano profundo [Battjes y Labeur, 2014].



Fuente: González, 1999.

Figura 1.3 Transformación del oleaje, desde la zona de generación hasta la playa.

1.8.2 Reducción del oleaje

Cuando un tsunami entra en agua de profundidad decreciente la velocidad de las olas disminuye, las longitudes de las olas se acortan y las olas comienzan a superponerse, disminuyendo la distancia entre ellas. La energía de las olas se concentrará en un volumen menor. Esta mayor densidad de energía empuja la ola y aumenta su altura y corrientes, posiblemente hasta el punto de romperse [González, 1999]. Este proceso se ilustra claramente en la Figura 1.3 [González, 1999]. Este proceso le da al tsunami la mayor parte de su poder destructivo. La relación entre la altura de la ola y la profundidad del agua se conoce como la ley de Green [Camfield, 1980].

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0.25} \quad [1.9]$$

1.8.3 Rompiente del oleaje

La mayoría de los tsunamis no resultan en una ola gigante. Más bien vienen como mareas muy fuertes y rápidas, es decir, fuertes oleadas y rápidos cambios en el nivel del mar. Entonces se causa mucho daño por los escombros flotantes y las fuertes corrientes. Cuando la ola llega a un punto durante la reducción del oleaje por fondo, donde la pendiente se vuelve demasiado grande, la ola romperá. La ola entonces forma a menudo una pared vertical de agua turbulenta llamada bore.

1.8.3.1 Características de la ola solitaria rompiente

Grilli y al. [1997] dan características de la rompiente para onda solitaria. Esto se puede describir con un número adimensional. El parámetro pendiente [S_0] se utiliza cuando [H_0] es la altura inicial de la ola, [α] es la pendiente, [d_0] la profundidad inicial del agua y [L_0] es la escala de longitud inicial de la onda.

$$S_0 = \frac{\tan \alpha \cdot L_0}{d_0} = 1.521 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_0}} \quad [1.10]$$

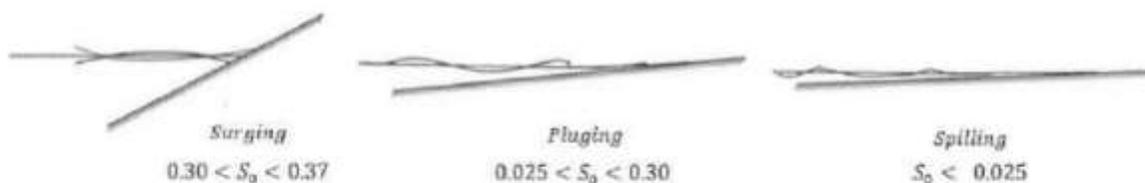
Este parámetro determina que tipo de rompiente ocurrida [Grilli y al. (1997)]. Este parámetro se describe en la figura 1.4.

- Rompiente surging: $0.30 < S_0 < 0.37$
- Rompiente Plunging: $0.25 < S_0 < 0.30$
- Rompiente spilling: $S_0 < 0.025$

También la profundidad de la rompiente puede calcularse con los parámetros de acuerdo a la siguiente relación [Grilli y al. (1997)]:

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.841 \exp 6.421 S_0 \quad [1.11]$$

Donde H_b es la altura de ola rompiente y h_b la profundidad en la rompiente.



Fuente: Bosboom y Steve, 2015.

Figura 1.4 Tipos de rompientes.

El parámetro de pendiente S_0 está relacionado con el número de Iribarren $[\xi]$ o el parámetro de ruptura [Iribarren y Nogales, 1949]. Ambos números adimensionales determinan qué tipo de rompiente ocurrirá. Usando la ecuación [1.10] y $\xi = \tan \alpha / \sqrt{L_0/H}$ de Battjes [1974] se deriva la relación entre el parámetro de pendiente y el número de Iribarren.

$$\xi = \sqrt{\frac{H}{h_0 \tan \alpha}} \sqrt{S_0} \quad \text{o} \quad \xi = \sqrt{\frac{HL_0}{h_0}} S_0 \quad [1.12]$$

1.8.3.2 Formación de Tsunamis y fisión de bloques de oleaje

Las ondas largas de tsunami pueden volverse en múltiples bloques de olas cortas, llamados fisión de solitón. Las ondas cortas se separaron del tsunami debido a la falta de linealidad y dispersión. En las profundidades oceánicas y en la plataforma continental la no linealidad es baja y no se forman solitones.

Durante los aumentos asimétricos del asomeramiento del oleaje y cerca de la playa la cara delantera puede llegar a ser demasiado escarpada y desintegrarse en una onda ondular [Madsen et al., 2008]. Si la onda undular avanza en profundidad decreciente, la interacción con el fondo resulta en la formación de una secuencia de bloques de olas aislados. Este tren de olas está unido y se propaga por delante de la onda [Ei et al., 2012]. Las transiciones de una onda de tsunami a un bloque de olas líder toman tiempo y por lo tanto rara vez ocurren debido a limitaciones geofísicas [Madsen et al., 2008]. Las ondas de período más grandes son más propensas a descomponerse que las ondas con períodos más pequeños e iguales [Matsuyama et al., 2007].

Según Madsen y al. [2008], estas ondas cortas en la ruptura del tsunami generalmente no son el tsunami en sí. Lo más probable es que el ascenso no esté realmente influenciado por la ruptura. Esto cuestiona la relevancia de la ruptura.

1.8.4 Disipación de la energía

Mientras que las ondas de viento pierden más energía en la zona de generación, la energía en los tsunamis permanece bastante constante. Esto conduce a grandes profundidades de inundación y a un ascenso de la ola más alto [Horsten, 2016].

Battjes [1986] derivó una fórmula de disipación [1.12] para ondas solitarias y pendientes suaves ($\alpha < 1:30$), que es una rompiente tipo spilling de acuerdo a la ecuación [1.6]. En lugar de ser una rompiente tipo spilling, usó una onda de la misma altura para estimar la disipación. La fórmula se deriva del balance de energía y se escribe en función de la condición de la rompiente [Battjes, 1986].

$$\bar{H}^{-9/2} = \left(1 - \frac{1}{3}K'\right) \bar{h}^{9/2} + \frac{1}{3}K' \bar{h}^{-9/2} \quad [1.13]$$

Donde $[K']$ es un factor de disipación, $[H]$ y $[h]$ son parámetros no dimensionales para la altura y profundidad de onda dependiendo de la altura de ola rompiente y la profundidad correspondiente.

$$\tilde{H} = H/H_b \quad \text{y} \quad \tilde{h} = d/d_b$$

Con $K'=32.4$ la fórmula es empíricamente un buen ajuste, en gran parte de la región de disipación, con datos para ondas solitarias rompiendo en una pendiente de 1:100 [Battjes, 1986]. El modelo de Battjes muestra que la energía es completamente disipada en la costa, sin embargo, debido a ascenso todavía hay energía en la costa. El modelo de Battjes no da una buena predicción en la costa, que es el área de estudio de artículo.

1.9 Métodos de diseño actuales

Las defensas contra inundaciones en Japón siempre se diseñaron sobre la base de los peores escenarios. En este enfoque no se tiene en cuenta el período de retorno. Después del tsunami de 2011, ha habido una mejora en el diseño de tsunamis. Se identificaron dos niveles basados en decisiones políticas, con la visión de ingenieros costeros, para eventos de tsunami [Shibayama et al., 2013]. Un evento de nivel 1 tiene un período de retorno de más de 100 años y un evento de nivel 2 tiene un período de retorno de unos 100 a unos 1000 años.

Las estructuras costeras tienen que proteger vidas humanas y propiedades contra eventos de nivel 1. El muro puede proporcionar más tiempo para la evacuación. Para los eventos de nivel 2 las medidas como edificios de evacuación y refugios son más importantes. También durante un evento de nivel 2 no puede ocurrir ningún daño estructural en la estructura costera, sin embargo, puede ocurrir un rebase. La evacuación sigue siendo necesaria durante un tsunami de cualquier nivel y, por lo tanto, no se proporciona información sobre la altura del tsunami.

Okumura [2016] utilizó un enfoque en el riesgo basado en los datos extrapolados de eventos históricos, y diseños según la probabilidad de fallo elegida [Okumura, 2016]. Este enfoque puede utilizarse si se dispone de suficientes datos históricos. La categorización de 2 niveles se utiliza principalmente debido a la baja frecuencia de ocurrencia.

1.9.1 ASCE - Cargas y efectos del tsunami

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles presenta un nuevo método de diseño de estructuras de defensa costera [ASCE, 2016]. El capítulo ASCE 7-16 Tsunami loads and effects proporciona cargas y otros requisitos para el tsunami y sus efectos. El estándar ASCE define los resultados de un Análisis Probabilístico de Riesgos de Tsunami (PTHA) incorporado en mapas de amplitud de tsunami fuera de costa. La PTHA genera grandes catálogos probabilísticos de formas de onda de tsunami desde la fuente hasta el régimen costero. Estos mapas se definen a una profundidad estandarizada de 100m y dan el período de tsunami en alta mar y la

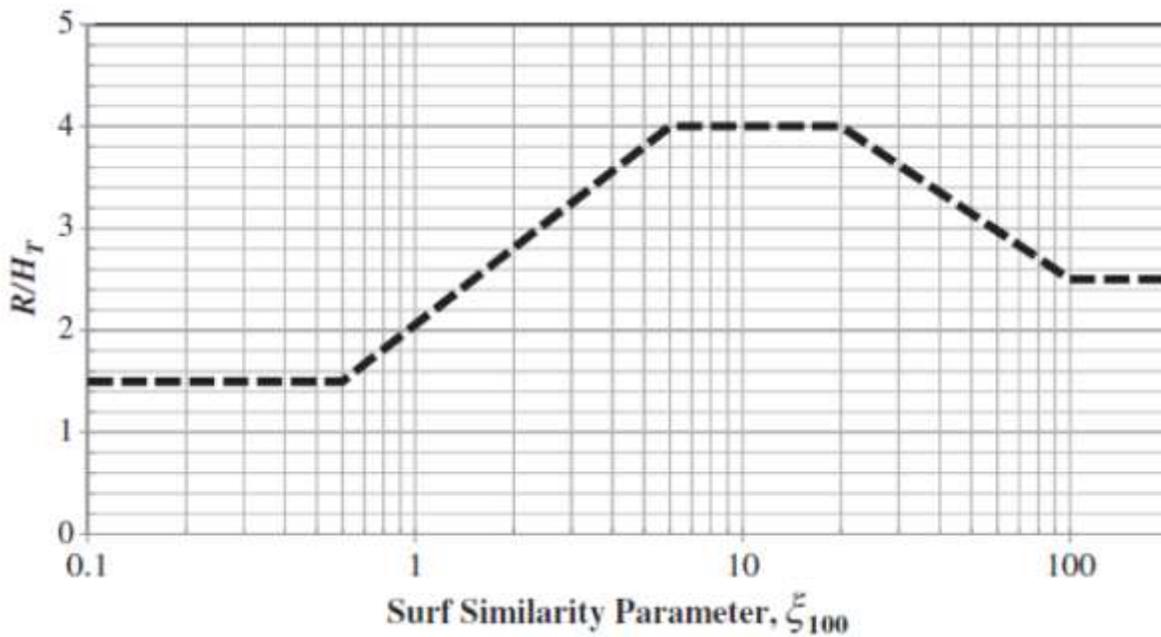
amplitud sobre el nivel del mar de un tsunami máximo probabilístico. Estos mapas son aplicables en cinco estados de los Estados Unidos. [Chock, 2016].

La ASCE [2016] también proporciona un método para calcular las cargas de tsunami en una estructura y las velocidades en la ubicación de una estructura.

Las velocidades de las ondas de tsunami que ascienden por la costa se calculan sobre la base del ascenso. Este ascenso se puede calcular con un parámetro de Similitud de Oleaje [ξ_{100}] calculado a partir del período de onda de tsunami predominante [TTSU] y la amplitud de tsunami fuera de la costa [HT] a 100 metros de profundidad. El parámetro de similitud de las olas se calcula con la ecuación [1.14].

$$\xi_{ASCE} = \frac{T_{TSU}}{\cot \phi} \sqrt{\frac{g}{2\pi H_T}} \quad [1.14]$$

Donde [Φ] es la pendiente media desde 100 metros de profundidad hasta el nivel medio del agua en la costa. Con la Figura 1.5 se puede encontrar la altura de ascenso [R].



Fuente: ASCE, 2016.

Figura 1.5 Relación de ascenso R/HT, en función de la pendiente media del parámetro de similitud de oleaje ξ_{100} .

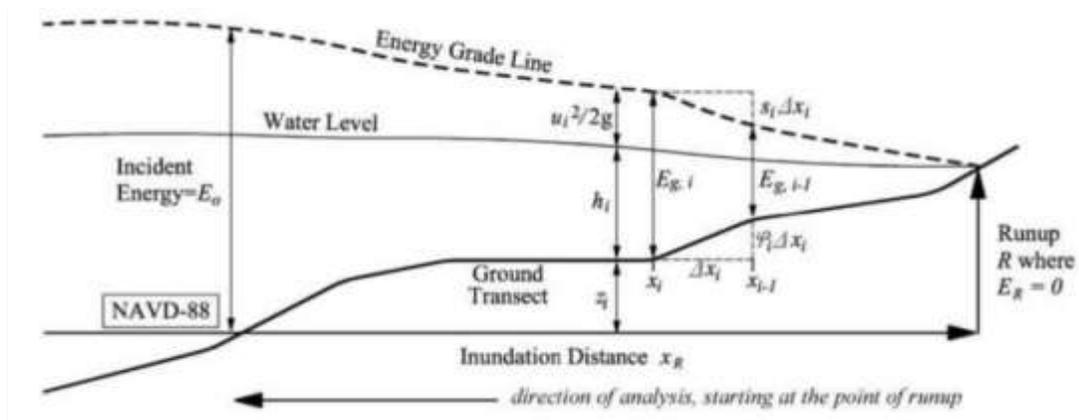
En la norma ASCE [2016], la velocidad máxima se calcula sobre la base del ascenso máximo y la profundidad de inundación. La velocidad de flujo calculada no puede ser inferior a 3.0 m/s ni superior a la menor de $1.5 \sqrt{gd}$ o 15.2 m/s.

La velocidad de flujo máxima [u_i] y la profundidad de inundación máxima [$H_{max.inun}$] a lo largo del perfil de elevación del suelo hasta el máximo ascenso se determinan utilizando el análisis de línea de grado energético. En este análisis, el transecto del suelo desde el punto máximo ascenso hasta la línea costera se divide en segmentos con distancia horizontal [Δx_i] y un coeficiente de Manning [n] correspondiente al segmento del terreno. La velocidad en cada segmento se calcula con la ecuación [1.15] a partir del punto de máxima aceleración.

$$E_{g,i} = E_{g,i-1} + (\phi_i + s_i)\Delta x_i = H_{max.inun} + \frac{u_i^2}{2g} = H_{max.inun} (1 + 0.5Fr_i^2) \quad [1.15]$$

Donde [$E_{g,i}$] es la cabeza hidráulica en el punto i , [$H_{max.inun}$] la profundidad de inundación en el punto i , [ϕ_i] es la pendiente media entre los puntos i y $i-1$. [Fr_i] es el número de Froude en el punto i y [s_i] es la pendiente de fricción de la línea de grado energético entre los puntos i e $i-1$ y depende del coeficiente de Manning y el número de Froude. En el punto de máxima aceleración, la cabeza hidráulica es cero. El número de Froude se calcula según $Fr_i = \alpha(1 - \frac{x}{x_R})^{0.5}$. Se utilizará un coeficiente de número de Froude [α_{Fr}] de 1.0 y para las ondas de tsunamis se utilizará un valor de 1.3. Según ASCE [2016], se considerarán las ondas de tsunamis cuando la pendiente batimétrica de la zona cercana a la costa sea 1:100 o más suave o cuando esté históricamente documentada.

Para estructuras con una categoría de alto riesgo es necesario realizar un Análisis Probabilístico del Riesgo de Tsunami (PTHA) específico del sitio [ASCE, 2016].



Fuente: ASCE, 2016.

Figura 1.6 Método de energía para la profundidad y velocidad de inundación por tsunami.

1.10 Fuerzas de Tsunami de entrada sobre rompeolas

1.10.1 Fuerza hidrodinámica

Aquí se citan tres teorías para calcular la fuerza, por metro de ancho, y la fuerza entrante en la pared. La primera teoría de Ramsden y Raichlen [1990] depende de

la altura [H_{bore}] del tsunami y se puede estimar en 7.5 veces la fuerza hidrostática de la altura del tsunami entrante [Ramsden y Raichlen, 1990].

$$F_{Ramsden} = 7.5 * \frac{1}{2} \rho_w g H_{bore}^2 \quad [1.16]$$

En los experimentos de Ramsden y Raichlen una onda solitaria es generada por una paleta de generadora y las fuerzas del tsunami que siguen son medidas. Este tsunami no es seguido por una gran ola como en un tsunami real. La altura del tsunami [H_{bore}] se define como la altura en el instante en que su punta golpea la pared. Esto todavía no es una altura clara y conduce a la confusión. La altura del tsunami es difícil de definir para un tsunami con esta teoría. La altura del tsunami para la que la teoría de Ramsden es válida no está clara. Sólo se afirma que es válido para grandes perforaciones.

La segunda teoría más reciente de FEMA [2012] depende del flujo de momento máximo por unidad de masa por metro de ancho [(Hu²)_{máx}] del tsunami entrante. Aquí no sólo la altura del tsunami es parte de la ecuación, sino también la velocidad [FEMA, 2012]. Tenga en cuenta que (Hu²)_{máx} no es igual a H_{max}U_{máx}². El valor de (Hu²)_{máx} proviene de la combinación más grande de h y u que ocurren al mismo tiempo durante el tsunami.

$$F_{FEMA} = 1.5 * \frac{1}{2} C_d \rho_w (Hu^2)_{max} \quad [1.17]$$

C_d es el coeficiente de arrastre y se recomienda que sea igual a 2. Hay una diferencia significativa en la magnitud de las dos teorías. Esto se debe a que la teoría de Ramsden sólo depende de la altura del tsunami, mientras que la teoría de FEMA también depende de la velocidad.

El ASCE [2016] también proporciona una fuerza de tsunami basada en la profundidad de inundación y la velocidad calculada con el análisis de la línea de grado energético en la sección 1.4.1. La teoría se parece a la teoría de FEMA aunque no es la misma. Esta teoría calcula el flujo de momento a máxima inundación y la velocidad máxima en la ubicación específica y no la combinación máxima de (Hu²)_{máx}. Las cargas de tsunami se calculan con la ecuación [1.18].

$$F_{ASCE} = \frac{3}{4} \rho_s I_{tsu} C_d (H_{imax.inun} u_i^2)_{bore} \quad [1.18]$$

El factor [I_{tsu}] es el factor de importancia y es 1.25 para una categoría de alto riesgo [ASCE,2016]. A partir de estas tres teorías está claro que la altura y la velocidad son los parámetros importantes para encontrar las fuerzas en un rompeolas.

1.10.2 Fuerza hidrostática

Otra gran fuerza en el rompeolas es la fuerza hidrostática cuando el nivel del agua es alto. El nivel de agua más alto es en la inundación máxima [H_{max,inun}], aunque la velocidad de flujo es baja en este momento. La fuerza hidrostática horizontal por

metro de ancho en la pared puede calcularse con la ecuación [1.16]. En la condición en que el flujo sobrepase la pared, $[H_{max,inun}]$ se sustituye por la altura del rompeolas $[h_{wall}]$ [ASCE, 2016].

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g H_{max,inun}^2 \quad [1.19]$$

1.10.3 Altura del rompeolas

Esteban y al. [2017] realizaron experimentos de laboratorio para encontrar la altura de diseño del rompeolas. Encontró que la cabeza de energía, ecuación [1.20], del tsunami entrante es muy importante para el rebase. Cabe mencionar que esta ecuación sólo se aplica al flujo estacionario, que no es el caso de un tsunami. La relación que se encuentra sigue siendo interesante. Para saber si la inundación se produce detrás de la estructura, también se debe considerar la energía y no sólo la altura del tsunami.

$$E_{g,i} = \frac{v_{front}^2}{2g} + H_i \quad [1.20]$$

Según los experimentos de Estebal y al. [2017] puede expresarse la relación entre la altura del tsunami entrante $[H_i]$ y la altura de inundación detrás del rompeolas $[H_{behind_wall}]$ con la siguiente relación empírica [1.21]:

$$H_{behind_wall}/H_i = \tanh\left(0.51 \frac{E_i}{h_{wall}} - 0.36\right) \quad [1.21]$$

Donde $[h_{wall}]$ es la altura del rompeolas. Esta ecuación debe considerarse válida entre $0.2 < H_i/h_{wall} < 1.3$.

1.11 Dispersión de la rompiente de la onda solitaria en paredes verticales

a). La posición de la pared vertical en la pendiente es de importancia crítica para el ascenso máximo en relación con la ubicación de la rompiente de la ola.

b). El enfoque numérico propuesto parece predecir las series de tiempo de la dispersión tanto para olas que no rompen como para olas que rompen hacia el mar localizadas en la pared.

c). La pendiente máxima de la cara frontal de la ola al chocar con la ola en la pared es importante para definir la máxima dispersión de la ola, así como la tendencia a la dispersión compuestas de gotas y rocío de agua.

2. MARCO ANALÍTICO

Hasta la fecha, existen pocas técnicas que permitan una generación adecuadamente escalada y una reproducción significativa y oportuna de un tsunami tectónico a escala de laboratorio controlable y manejable. Debido a las limitaciones de una técnica para generar una serie temporal de tsunamis tectónicos a una elevación de la superficie en instalaciones de laboratorio, los investigadores aplican regularmente ondas solitarias para imitar las ondas tectónicas de terremotos recientes de megaempuje. Las alturas de onda pueden ser modeladas razonablemente bien por el intento de onda solitaria. Sin embargo, la longitud, así como el período de una onda solitaria es teóricamente infinita. La elevación de la superficie del agua apunta hacia cero bastante rápido con la distancia x , y la longitud de onda cuasi se puede definir para un umbral de aproximadamente 1% de la altura de onda original. Una comparación de la longitud de onda del prototipo de tsunami en la costa con las ondas solitarias a escala de laboratorio revela una discrepancia de al menos un orden de magnitud. Esto puede causar una mala interpretación de los resultados experimentales al considerar las cantidades físicas tales como presión o velocidades cuya distribución temporal significativa es de gran interés. En el contexto de un tsunami de mega empuje, se encuentran formas de onda solitarias que se suman a las formas de onda globales que se montan en la parte superior de una ola mucho más larga (Shimozono et al., 2012). Las ondas solitarias también son capaces de aproximar las formas de onda de maremoto (Fritz et al., 2009), pero los tsunamis inducidos por deslizamientos de tierra están más allá del alcance de este artículo.

El llamado paradigma de la ola solitaria fue cuestionado por Madsen et al. (2008), quienes contradicen el uso de las ondas solitarias en instalaciones experimentales. Sin embargo, Madsen et al. (2008) recomiendan aprovechar una serie temporal de entradas en el límite cerca de la costa, que se toma de modelos numéricos o de mediciones en el sitio. Esto ha estimulado el desarrollo de un nuevo generador de olas capaz de tomar cualquier entrada externa sin limitar significativamente los períodos de onda de las ondas solitarias. Esta técnica de generación de olas intenta modelar el impacto del tsunami cerca de la costa a una profundidad del agua de 30 a 50 m hacia la región donde se produce la oleada y el flujo en tierra.

2.1 Revisión de las técnicas de generación de oleaje

El modelado físico de ondas solitarias en ambientes de laboratorio ha sido frecuentemente reportado en la literatura. Dependiendo de su fuente generativa (es decir, deslizamientos de tierra, terremotos suboceánicos e impactos tales como meteoritos, piroclásticos y erupciones volcánicas), estos tipos de ondas se generaron de manera diferente a escala de laboratorio (ver por ejemplo, Hughes,

1993). En el modelado físico, la elección de la longitud y las escalas de tiempo es muy importante. Debido a los efectos globales de los tsunamis, la elección no es fácil; los modelos que se centran en la región de origen o de destino a menudo se descomponen.

En Liu et al. (1991), Yeh et al. (1995) y Liu (2008) se informa de una revisión exhaustiva de los avances en el modelado físico de ondas solitarias. Se proporciona información técnica detallada sobre técnicas de modelado físico en Yalin (1971) y Hughes (1993). Los diferentes enfoques sobre la generación de ondas podrían determinarse a partir de la literatura. Las diferentes técnicas de generación de ondas, que se describen en las secciones siguientes, se clasifican principalmente según el mecanismo de generación. Aunque las ondas solitarias inducidas por deslizamientos de tierra importantes están excluidas por el momento, se pueden encontrar estudios importantes en la literatura (Fritz et al., 2004, 2009; Heinrich, 1992; Iwasaki, 1987; Synolakis y Kanoglu, 2009; Watts, 2000; Wiegel, 1955).

2.2 Generación de oleaje con paleta tipo pistón

A menudo, los científicos realizan experimentos de laboratorio sobre la base de generadores de olas de tipo pistón, que liberan energía de onda a la columna de agua moviendo horizontalmente una paleta de ondas generando ondas en primer o segundo orden (por ejemplo, Dean y Dalrymple, 1991; Schäffer, 1996). Se llevaron a cabo experimentos tempranos que abordaron la propagación de ondas solitarias como una representación probable de ondas solitarias. Para más información sobre la facilidad aplicada, ver tabla 1 (Synolakis, 1987). En este estudio, se generaron ondas solitarias utilizando la teoría del generador de olas de Goring (1979). Synolakis (1990) también informa sobre la generación de olas largas. Un requisito previo para la aplicación de la teoría de Goring era que el movimiento de la superficie tenía que ser pequeño, mientras que las condiciones de contorno tenían que especificarse sólo en la posición inicial de la superficie en lugar de en la posición instantánea. Synolakis (1990) amplió esta teoría para permitir ondas sin forma permanente, pero aquellas que evolucionan durante la propagación en el laboratorio. Concluyó que estos hallazgos facilitan la generación de ondas arbitrarias de amplitud finita a cualquier distancia del generador de oleaje.

Del mismo modo, Briggs et al. (1993) estudiaron el ascenso de olas solitarias en una pendiente más suave de una vertical a una playa horizontal de 1 a 30 para una gama de no linealidades (cp. también M.J. Briggs et al., 1995). Posteriormente, Liu et al. (1995); M. Briggs et al. (1995) y Yeh et al. (1994) realizaron de experimentos previos al tsunami en una isla cónica. En términos de apoplejía absoluta y longitud de onda máxima alcanzable, Moronkeji (2007) reportó una mejora significativa al realizar estudios experimentales sobre el ascenso y el descenso de olas solitarias y senoidales sobre una cama móvil en dos laderas de playa diferentes. En el O.H. Hinsdale Wave Research Laboratory, University of Oregon, (Moronkeji, 2007), los experimentos se llevaron a cabo utilizando placas de ondas eléctricas. Teng et al. (2000) informaron de una variación del principio del generador de olas de tipo pistón comúnmente utilizado. Las ondas solitarias fueron generadas usando una placa

vertical sujeta a un carro accionado con un motor de velocidad ajustable. Al variar la velocidad y la distancia entre el carro y la placa, se generaron ondas solitarias de diferente amplitud. Como una ventaja única, este método resolvió el problema relacionado con la limitación de la longitud de carrera de los generadores de olas de pistón comerciales y hechos a medida. Esto se debe a que la trayectoria del transporte podría especificarse de forma independiente. Esto marca un paso adelante en la generación de ondas solitarias arbitrarias, aunque su disposición de prueba era sólo parcialmente capaz de generar canales de onda, y las longitudes de onda típicas no se podían obtener debido a la longitud limitada del canal de onda. En otra investigación, Schmidt-Kopenhagen et al. (2007) reportaron un conjunto de experimentos hidráulicos en un canal de olas excepcionalmente grande en Hannover, Alemania, que investigó las ondas solitarias. El objetivo de los experimentos era modelar la distancia de propagación completa de una región fuente en aguas profundas hacia aguas poco profundas. Otros experimentos del canal de ondas grandes que buscan tipos de ondas solitarias y senoidales en otros tanques de ondas grandes se pueden encontrar en la literatura, pero no se enumeran aquí.

2.2.1 Analogía de la rompiente de la ola

Otro enfoque para generar ondas solitarias y flujo de oleaje en el laboratorio incorpora la analogía entre las perforaciones inducidas por rompiente de presas y el flujo de oleaje resultante de un tsunami cerca y en la costa (Hughes, 1993; Ippen, 1966; Lauber y Hager, 1998). Yeh et al. (1989) fueron de los primeros que presentaron un procedimiento experimental donde se generó un solo agujero levantando una puerta de placa de aluminio. La puerta, que inicialmente separaba el agua estancada de la playa del nivel de agua más alto detrás de la puerta, fue activada por un cilindro neumático. La apertura instantánea de la puerta generó perforaciones de una manera notablemente repetible. Chanson et al. (2003) presentaron una técnica en la que el agua era liberada de un tanque de agua al principio del canal de ondas por una puerta de orificio. Por este medio, la turbulencia se introduce en el modelo físico incluso antes de que cualquier propagación de onda o rompiente tuvo lugar en el prototipo. En la Tabla 1 se ofrecen más detalles. Asimismo, Gómez-Gesteira y Dalrymple (2004) citaron un experimento a pequeña escala realizado por Yeh y Petroff en la Universidad, de estructura rectangular de pie. Nistor et al. (2009) informaron de una técnica complementaria de generación de ondas en la que una puerta con bisagras libera un cuerpo de agua para que fluya hacia el dominio del modelo físico. Además, esta técnica también se benefició del hecho de que la cola del taladro inducido por la rompiente de la presa estaba apoyada y mantenida por dos bombas que descargaban en la parte posterior del volumen de agua que colapsaba.

2.2.2 Movimiento vertical de la superficie de la onda

Otro medio de generar movimiento de onda solitaria en un laboratorio fue descrito por Monaghan y Kos (2000), quienes usaron la idea de Scott Russell de una caja de hundimiento (Russell, 1844) para ilustrar la formación de una onda solitaria en un tanque rectangular largo. Desde entonces, los modelos numéricos habían sido

validados (cp. también Abadie et al., 2008) con la ayuda de los resultados obtenidos de los primeros hallazgos de laboratorio de Russell. En general, la metodología de generación presentada fue capaz de generar una ola solitaria. Sin embargo, en la región cerca del movimiento de la tabla de ondas vertical, vórtices y flujos turbulentos y sin dirección se generan en el cuerpo de agua. Se supone que estos efectos alteran adversamente la propagación de las ondas y su funcionamiento en el laboratorio. Aparte de generar ondas a través del movimiento del generador de olas dirigido hacia abajo Raichlen (1970) mencionó por primera vez la generación de ondas por arriba y hacia abajo del canal de olas en movimiento, que tenía como objetivo generar ondas solitarias de acuerdo con el movimiento de origen de los movimientos tectónicos de un fondo marino en los límites de las placas. Hammack (1973) y Segur (2007) presentaron una descripción de un estudio que aprovechaba un pistón en movimiento vertical. Ambos autores distinguieron entre una sección de generación y una sección aguas abajo de la evolución de las ondas en su experimento. Esto implica que la utilización de la técnica de generación de fondo móvil se asemeja a una estimulación sísmica y se puede utilizar en condiciones de aguas profundas.

Tabla 2. 1 Revisión de importantes configuraciones experimentales de generación de tsunamis, dimensiones, datos técnicos y geométricos, parámetros de olas y pendientes según disponibilidad.

Cita	Generador	Pendiente de la playa	Profundidad del agua	Longitud de ola/Periodo	Rompiente
Synolakis (1987)	tipo Pistón	1/19.85	6.3–38.3 cm.	H/d = 0.005–0.607 T $\sqrt{(gd)} = 0.98-11.32^a$	2.44 m.
M.J. Briggs y al. (1995 b)	tipo Pistón	1/30.0	0.32 m.	H/d = 0.01–0.05 L = 2.28-16-10 m. T = 2.07-15.81 s.	±0.15 m.
Liu y al. (1995)	tipo Pistón	-	-	L = 3.6-9.46 m. T = 3.41-8.03 s.	±0.15 m.
Moronkeji (2007) ^b	tipo Pistón	1/10, 1/15	1.0–1.1 m.	T = 0.5-10.0 s. L = 8.0-12.0 s.	2.1 m.
Schmidt-Koppenhagen y al. (2007) ^c	tipo Pistón	1/25	2.5 m.	≈20.0 s.	4.0 m.
Yeh y al. (1989)	tipo compuerta	1/7.6	$h_0 = 9.75$ cm.	-	-
Chanson y al. (2003)	tipo compuerta	1/5.92	0.0-0.2 m.	-	-
Raichlen y al. (1970)	desplazamiento vertical	1/∞	5.0-50.0 m.	-	-
(Rossetto y al., 2011)	entrada de volumen	1/20	0.45-0.65 m.	9.5-501.9 m.	-

^a Los rangos de parámetros de ondas adimensionales tabulados no se relacionan necesariamente entre sí, por lo que la conversión en valores dimensionales exige tablas originales.

^b Velocidad de oscilación: 2.0 m/s, un lecho móvil compuesto de arena natural de playa se había aplicado para estudiar la evolución de la playa inducida por las olas.

^c Sección longitudinal segmentada que consiste en una cuña de playa de arena con cama móvil, detalles se aplican a la sección de la costa.

2.2.3 Generación de ondas por volumen

Se ha informado de un novedoso enfoque de modelado en la generación de olas de tsunami (Reynolds, 1887; Wilkie y Young, 1992). El generador de olas neumáticas tuvo éxito en sus etapas de desarrollo, y, en ese momento, fue representado como un equipo versátil para una amplia gama de propósitos y escalas de modelos. La

generación de ondas de marea se realiza mediante una caja invertida en el extremo marino del modelo físico fijado al suelo del canal. El lado del cajón orientado hacia la parte trasera del canal terminó a una distancia por encima del fondo, formando un hueco de salida y permitiendo que el agua saliera o entrara en la cámara del canal, lo que dio lugar a un cambio de nivel de agua dependiente del tiempo (véase también Allen et al., 1992). Así, se había construido una versión modificada del antiguo principio de almacenar agua en un tanque y liberarla bajo el control de un sistema de válvula-bomba (Rossetto et al., 2011). El sistema de control y el equipo del generador de olas de marea se habían optimizado para adaptarse a un tsunami. Las demandas adicionales de la instalación debido a una longitud de onda más corta se cumplieron utilizando una bomba de vacío más silenciosa y de alta capacidad, algoritmos de control más rápidos, válvulas optimizadas y servomotores.

2.2.4 Aplicación de los métodos

Al modelar el impacto cercano a la costa de un tsunami desde una profundidad de agua de 30-50 m hasta el flujo en tierra y en tierra, existen preocupaciones sobre hasta qué punto son adecuados los métodos de generación de olas revisados anteriormente. Heitner y Housner (1970) mencionaron la necesidad de modelar un tsunami mediante la comparación de la inclinación de las olas, así como las suaves laderas de playa que imitan adecuadamente las condiciones naturales, porque existe un fuerte vínculo entre la alta vulnerabilidad de las grandes ciudades costeras y las condiciones topográficas ligeramente inclinadas. Hasta la fecha sólo unos pocos estudios se aplican a una pendiente de playa suave. Las laderas de la playa o de la costa anterior utilizadas en estos estudios oscilaron entre 1/10 y 1/30 cuando se consideraron las olas similares a un tsunami. La aplicación de los resultados de modelado a las laderas naturales de las playas, especialmente aquellas en regiones urbanizadas, es cuestionable.

El llamado "paradigma de la ola solitaria" ya no se aplica únicamente a las olas de tsunami que se acercan. El trabajo de Madsen et al. (2008, 2009) demostró que, a pesar de su utilización universal, las ondas solitarias carecen de comparabilidad con las escalas geofísicas cuando se reducen al tamaño de laboratorio. Los errores en el orden de una magnitud en la duración temporal y espacial ocurrirían cuando se aplican ondas solitarias, especialmente en las cercanías de la costa. Por lo tanto, se requiere una forma de onda alternativa con un período o longitud de onda más largo en estudios de laboratorio.

Según la bibliografía, es evidente que los modelos escalados en los que se aplica la generación de ondas de tipo pistón tienen un límite superior de 15 a 20 s. En comparación con los prototipos de duración de los tsunamis, estos períodos aplicados son demasiado cortos para modelar impactos de tsunami cerca de la costa. Las ondas solitarias arbitrarias no pueden ser generadas por los generadores de olas de tipo pistón debido a la correlación del ascenso del generador de olas y la longitud de onda. Uno puede asumir una onda sinusoidal periódica como el nivel más simple de modelar una serie de tiempo de tsunami con un período de $T_M = 90$ s y una amplitud de $H_M = 0.1$ m, lo que conduce a una longitud de onda de agua

poco profunda de $\lambda_M = 154.4$ m en una profundidad de agua de $d_M = 0.3$ m. Aquí, el subíndice M denota propiedades escaladas de ondas de laboratorio. Al asumir la similitud de Froude y una escala de longitud de $M_L = 1:100$, resulta en propiedades de onda prototipo de $T_P = 15$ min, $H_P = 10.0$ m y $\lambda_P = 15.44$ km en una profundidad de agua de $d_P = 30.0$ m con P que denota propiedades de prototipo. La escala temporal asciende a $M_T = 1:10$. Estos supuestos podrían verificarse mediante, por ejemplo, los informes de testigos presenciales de los sondeos de eco disponibles. La longitud de carrera requerida se puede determinar siguiendo la propuesta de Dean y Dalrymple (1991), la cual es un método para determinar la longitud del ascenso comparando el volumen total de agua desplazada por el ascenso completa S en la profundidad de agua d_M al volumen contenido por una cresta de onda de una onda sinusoidal. La Ec. [2.1d] integra la cresta de onda sinusoidal positiva de un senoide según la teoría de ondas Airy. Esto equivale al volumen de agua contenido en la cresta de la ola a la longitud del ascenso por la profundidad del agua. En escalas de laboratorio, se lee bajo el supuesto $t = 0$

$$V_{sd} \equiv V_{cr} \quad [2.1a]$$

$$V_{sd} = S \cdot d_M, \quad V_{cr} = \int_{-\lambda_M/4}^{\lambda_M/4} \eta(x, t) \, dx \quad [2.1b]$$

$$\eta(x, t) = a_M \cos(kx - \omega t) \quad [2.1c]$$

$$S = \frac{1}{d_M} \int_{-\lambda_M/4}^{\lambda_M/4} a_M \cos(kx) \, dx = 8.19 \, \text{m} \quad [2.1d]$$

$$\left(\frac{2a_M}{S} \right) = kd_M = 2\pi \left(\frac{d_M}{L_M} \right) \quad [2.1e]$$

donde V_{sd} = el volumen desplazado de la paleta, V_{cr} = volumen contenido en la cresta senoide de la onda, $\eta(x,t)$ es la elevación de la superficie del agua en función de x , t , $k = 2\pi/\lambda_M$ = número de onda angular, $\omega = 2\pi/T_M$ = frecuencia angular, y $a_M = H_M/2$ = amplitud de onda. El ascenso de $S = 8.19$ m necesaria para generar la onda sinusoidal supuesta demuestra la demanda de la carrera. La longitud de carrera requerida se vuelve excepcionalmente grande. Una alternativa para evitar una longitud de carrera tan grande sería hacer más modelado de laboratorio a una profundidad mayor asociada con flujos de onda más largos debido a ondas más largas en aguas más profundas. Por lo tanto, ni los generadores de olas con trazos enormes ni los modelos físicos a gran escala son preferibles ya sea financiera o prácticamente. Sin embargo, los generadores de olas de tipo pistón tienen la ventaja de ser capaces de generar ondas positivas y negativas, aproximándose a la elevación principal y liderando ondas de depresión en una carrera experimental.

Por otro lado, la generación de ondas tipo presa-rompiente utilizada para modelar formas de onda sinusoidales como se supone anteriormente funcionaría mal porque sólo las ondas positivas podrían generarse de esta manera. Por lo tanto, la generación de olas similares al rompimiento de presas sólo es una opción si las

propiedades de los taladros en tierra son el objetivo. Además, cuando se aplican métodos similares a la rompiente de presas, sólo se logra un control limitado de la onda generada porque la propagación de la onda sólo se controla por fuerza gravitatoria. La forma de onda resultante es fuertemente dependiente del volumen de agua y la diferencia de altura entre el cuerpo de agua inicial y el volumen de agua almacenado. Sin embargo, su utilización en el contexto de la investigación de las fuerzas de impacto a los elementos de construcción es indudable. Por otro lado, el movimiento vertical de la tabla de ondas es más aplicable a la región de origen de un tsunami tectónico.

Rossetto et al. (2011) también evaluaron la demanda de innovaciones en el contexto de la generación de tsunamis y adaptaron el generador de olas de marea para adaptarse a la generación de olas largas. La base de su generador de olas adaptado, el generador de olas neumáticas, destaca un extremo en el rango de frecuencia de las ondas de agua que podrían ser modeladas, mientras que las ondas cortas denotan el otro extremo. Aunque las pruebas globales con el generador de olas neumáticas son satisfactorias, es evidente que los historiales de tiempo de la elevación de la superficie del agua no siempre son suaves y continuos. Una razón para estos errores de generación podría ser el hecho de que dentro del proceso de generación se adopta el aire medio compresible para cambiar los niveles de agua dentro de la caja de generación, lo que deja espacio para mejoras adicionales.

2.3 Resultados

2.3.1 Formas de onda

Las elevaciones superficiales generadas por medio de la técnica de generación de ondas se analizan para una gama de diferentes formas de onda. El periodo de onda y la no linealidad son variados para evaluar el desempeño del generador de oleaje. La escala de longitud de los experimentos en la simulación de Froude es de 1:100 para todas las carreras, y la escala de tiempo es de 1:10.

Las ondas sinusoidales, según la Ec. [2.1c] con períodos entre 15 y 120 s, fueron probadas primero. Las ondas sinusoidales individuales de un período se utilizaron para aproximarse a la onda de depresión principal de un tsunami y la cresta de onda subsiguiente solamente. Debido a las limitaciones de tiempo, no se intentó generar un tren de olas de más de un canal seguido de una cresta. El rango de período inferior de las ondas sinusoidales probadas se elige en un punto donde las capacidades de los generadores de olas de tipo pistón convencionales se limitan generalmente a experimentos en aguas poco profundas. El límite del período superior se eligió arbitrariamente, pero los períodos más largos son principalmente posibles.

En segundo lugar, se generan formas de onda solitarias de cinco diferentes no linealidades para demostrar la capacidad del generador de olas para un tipo de forma de onda aplicada en muchos estudios sobre tsunamis. Las no linealidades en

el rango de $\epsilon = H/d = [0:066... 0:333]$ son generadas. La Ec. [2.2] da la elevación superficial de una onda solitaria de acuerdo a Wiegel (1964). Se lee

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}} (x - ct) \right] \quad [2.2]$$

donde la celeridad de la onda es dada por $C = \sqrt{gd} (1 + H/2d)$, donde d es profundidad de agua, y H es altura de onda. Recientemente, Madsen et al. (2008) cuestionaron la aplicabilidad de las ondas solitarias en estudios de laboratorio y argumentaron que, especialmente, la duración de las ondas solitarias restringe la comparación a un tsunami de campo. Por lo tanto, en este estudio, se eligió definir, alternativamente, una forma de onda que se asemeja a la forma sech de la forma original (Ec. [2.1]), pero que se prolongó en duración. La onda solitaria prolongada usada en este estudio es dada por la Ec. [2.3]

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}} \left(\frac{1}{10} ct - x \right) \right] \quad [2.3]$$

con variables idénticas a la Ec. [2.1]. Ambas ecuaciones difieren en un factor de escala (1/10 vinculado al tiempo t) que dirige la prolongación. La duración o período de una onda solitaria es teóricamente infinita. Sin embargo, los períodos de onda para las ondas solitarias que figuran en el cuadro 2 se definen limitando la duración de la onda hasta un punto en que la elevación superficial supere al menos el 1% de la elevación máxima de la superficie. Una longitud de onda aparente L se calcula sobre la base de la relación lineal $L = T C$ con c siendo celeridad de onda solitaria. Las series temporales de destino utilizadas para la generación son calculadas por la Ec. [2.2] con $x = 0.0$. Los períodos para la evaluación de las ondas generadas también se derivan de la definición anterior.

En tercer lugar, también se ha probado una variación de las N-waves porque se aplica en la literatura para modelar las principales formas de onda de tsunami. De acuerdo con Tadepalli y Synolakis (1994), las N-waves pueden tomar la forma de elevación principal y ondas de depresión líder. En este estudio, sólo se han generado las ondas de depresión principales con fines de prueba, aunque, en principio, también es posible modelar las ondas de elevación principales. La elevación superficial de una onda N viene dada por la Ec. [2.4]

$$\eta = \epsilon H (x - X_2) \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H}{4}} (x - \theta) \right) \quad [2.4]$$

donde $\theta = X_1 + ct$ y $L = X_1 - X_2$, ϵ es un parámetro de escala para definir una onda N de altura H , y para la comparación con una onda solitaria de la misma altura, c

representa de nuevo la celeridad de la onda para la onda solitaria. Aunque X_1 , X_2 y p_0 no han sido definidos explícitamente por Tadepalli y Synolakis (1994), parece que X_1 da la posición de una onda solitaria equivalente de igual altura de onda, y X_2 representa la posición horizontal del punto de inflexión en el perfil de onda. Similar a las N-waves propuestas por Tadepalli y Synolakis (1994), definimos una forma de onda prolongada para probar la facilidad del generador de olas mediante la superposición lineal de una onda solitaria positiva e inversa (onda de depresión única) con un cambio en la ubicación x (Ec. [2.2]). De forma similar a las ondas solitarias probadas, se logra una prolongación. Esta medida encuentra una solución para la duración efectiva de las olas, que son demasiado cortas en comparación con un prototipo de tsunami (por ejemplo, 2011 tsunami Tohoku). Las ondas probadas han sido encontradas iterativamente definiendo alturas de onda para la contribución solitaria positiva y negativa. La tabla 2 enumera los parámetros de onda encontrados en este estudio.

Por fin, se genera una serie temporal de tsunamis, que representa un prototipo de serie temporal de elevación superficial en una profundidad de agua de 30 m frente a la costa de Padang, Indonesia. Esta serie temporal se ha extraído de un modelo numérico y se ha reducido (en 1:100) para su uso en laboratorio. La serie temporal ha sido comprimida por un factor de dos con respecto al tiempo. La compresión fue elegida para demostrar la capacidad del generador de olas para generar formas de onda con gradientes superficiales pronunciados y devolución natural. Los gradientes pronunciados de la serie de tiempo objetivo son más desafiantes tanto para las bombas como para el generador PID. Las series temporales con mayor duración o gradientes superficiales planos son principalmente menos problemáticas ya que el generador y las bombas tienen más tiempo disponible para ajustar y reaccionar. El enfoque de modelado numérico del que procede la serie temporal extraída se describe en Goseberg y Schlurmann (2008, 2009). El escenario de ruptura elegido es aproximadamente $M_w = 8.8$ modelando un evento de tsunami probable (para detalles ver Schlurmann et al., 2010). Se ha aplicado el código ANUGA (Nielsen et al., 2005), que ha sido ampliamente validado en puntos de referencia sobre tsunamis como el caso de Okushiri y el tsunami del Océano Índico de 2004 (Jakeman et al., 2010). Se eligió una serie temporal de modelos numéricos en lugar de utilizar, por ejemplo, la grabación ecosonda del yate Mercator durante el tsunami del Océano Índico de 2004. En primer lugar, no se dispone de datos de elevación de la superficie del tsunami medidos para la profundidad del agua de 30 m correspondiente a la escala de longitud definida del modelado físico. En segundo lugar, independientemente del origen de la historia de las ondas de campo, ya sea numéricamente deducida o in situ, se demostró que el generador de olas propuesto tiene la capacidad de generar un tren de ondas de tsunami similar a la naturaleza.

La tabla 2 muestra las formas de onda probadas y sus variaciones. En total, se realizaron 116 experimentos. Se utilizó el método de cruce de cero hacia abajo para comprobar si los parámetros de onda generados son consistentes con la serie temporal de destino. Los períodos de las ondas sinusoidales (ID 1-11) que figuran en el cuadro 2 son períodos previstos. Las longitudes de onda de las ondas sinusoidales se calculan por la teoría de ondas lineales. La longitud de onda de las

ondas solitarias (ID 14-18) se calcula restringiendo el perfil de onda a una elevación de la superficie que es mayor o igual al 1% de toda la altura de onda. La misma definición se utiliza para las N-waves prolongadas.

Tabla 2. 2 Lista de experimentos y parámetros de onda, (*) denota los experimentos donde las mediciones del nivel del agua se realizaron a mitad de camino a través de la curva 180°, la no linealidad H/d expresa la no linealidad y L/d se interpreta como medida de la longitud relativa de onda. El número de Ursell (Ur) se define como $Ur = HL^2/d^3$.

Identificador ID	Tipo de Onda (-)	Prof. Agua d (m)	Periodo (s)	Amplitud a (m)	Altura de ola H (m)	Longitud de ola H (m)	H/d (-)	(L/d) (-)	Ur (-)	Repeticiones (-)
1	Sinusoidal	0.31	60.0	0.016	0.031	104.63	0.1000	337.52	11392.26	2
2	Sinusoidal	0.31	60.0	0.018	0.036	104.63	0.1161	337.52	13229.72	39
3	Sinusoidal	0.31	60.0	0.020	0.041	104.63	0.1323	337.52	15067.18	2
4	Sinusoidal	0.31	60.0	0.023	0.046	104.63	0.1484	337.52	16904.64	2
5	Sinusoidal	0.31	60.0	0.026	0.052	104.63	0.1677	337.52	19109.59	2
6	Sinusoidal	0.31	60.0	0.030	0.059	104.63	0.1903	337.52	21682.04	31
7	Sinusoidal	0.31	15.0	0.040	0.080	26.16	0.2581	84.38	1837.46	3
8	Sinusoidal	0.31	30.0	0.040	0.080	52.32	0.2581	168.76	7349.84	3
9	Sinusoidal	0.31	45.0	0.040	0.080	78.47	0.2581	253.14	16537.15	3
10	Sinusoidal	0.31	75.0	0.040	0.080	130.79	0.2581	421.91	45936.52	3
11*	Sinusoidal	0.31	120.0	0.040	0.080	209.26	0.2581	675.05	117597.5	5
12	N-wave	0.31	30.0	+0.047/- 0.033	0.080	52.32	0.2581	168.76	7349.84	3
13	N-wave	0.31	45.0	+0.048/- 0.032	0.080	78.47	0.2581	253.14	16537.15	4
14	Solitary	0.31	46.9	0.020	0.020	84.40	0.0645	272.27	4782.73	3
15	Solitary	0.31	32.2	0.040	0.040	59.76	0.1290	192.79	4795.79	3
16	Solitary	0.31	25.6	0.060	0.060	48.90	0.1935	157.74	4815.67	3
17	Solitary	0.31	21.6	0.080	0.080	42.46	0.2581	136.96	4840.69	3
18	Solitary	0.31	18.8	0.100	0.100	38.10	0.3226	122.89	4871.89	3
19	Realistic	0.31	55.0	-2.000	0.096	95.91	0.3097	309.40	29644.37	1
18	Solitary	0.31	18.8	0.100	0.100	38.10	0.3226	122.89	4871.89	3
19	Realistic	0.31	55.0	+0.064/- 0.032	0.096	95.91	0.3097	309.40	29644.37	1

En términos de exactitud y precisión, el rendimiento del generador de olas se determina inicialmente mediante el error cuadrático medio de la raíz (RMSE). Como medida de precisión, se ha calculado la raíz cuadrada de la varianza σ^2 para los vectores de elevación superficial resultantes de la prueba de rendimiento del generador de olas según la Ec. [2.4]

$$\sigma = \sqrt{\sum_k (x_k - \mu_k)^2 p_k} \quad [2.5]$$

con σ = desviación típica o error cuadrático medio de la raíz, μ_k = media aritmética y p_k^{-1} = longitud del vector. Para propósitos diagnósticos, cada serie temporal presentada en el siguiente diagrama se ha dado una gráfica complementaria que muestra los residuos estandarizados, que escalan los residuos definidos por la diferencia del objetivo y la elevación instantánea de la superficie con el RMSE.

2.3.2 Parámetros de control

El generador PID descrito en la sección 2.1 tuvo que ajustarse en un método de ensayo y error para cada onda individual para lograr un rendimiento óptimo del

fabricante de ondas. El rendimiento del generador depende de los parámetros descritos en la sección 2.1. Para mostrar cómo el ajuste de los parámetros influye en el rendimiento del generador de ondas, la Fig. 2.1 muestra las variaciones de la elevación de la superficie generada dependiendo de la configuración del generador.

El panel superior izquierdo de la Fig. 2.1 muestra la influencia de la ganancia proporcional K . Aquí se utiliza una onda sinusoidal de $T =$ período de 30 s. Se prueban cuatro valores diferentes de ganancia proporcional, mientras que todos los valores restantes se mantienen constantes. La ganancia proporcional relaciona linealmente la señal instantánea con el error presente. La desviación de la señal objetivo se mantiene sin cambios cuando se disminuye la ganancia proporcional. Sin embargo, los valores crecientes de K resultan en inestabilidades. Este efecto se observa cuando se prueban valores superiores a $K = 0.60$. El comportamiento inestable del generador ocurre especialmente alrededor del pico de la onda sinusoidal, mientras que la desviación de la señal objetivo es más o menos idéntica para todos los valores K .

La influencia del filtro medio móvil aplicado se delinea en el panel superior derecho de la Fig. 2.1. En el caso de la onda sinusoidal de $T = 120$ s, se han probado dos filtros diferentes. Filtrar la señal de entrada instantánea da como resultado una señal de datos más suave disponible para el proceso de control. Las ventanas de filtro muy cortas no pueden suavizar los movimientos de la superficie oscilante en la salida de la bomba. En contraste, las ventanas de filtro que son demasiado largas, resultan en desviaciones crecientes, y consecuentemente, se estimula la acción del generador. Se observó que especialmente las partes ascendentes de la serie temporal son propensas al comportamiento oscilante del generador. Por lo tanto, es obvio que el cambio en el tamaño de la ventana mayor que $twindow = 0.5$ promueve el rebasamiento del generador.

La influencia del tiempo derivado se presenta en el panel inferior izquierdo demostrado para una forma de onda solitaria. El rendimiento del generador se presenta para tres tiempos derivados diferentes. El tiempo derivado que explica la evolución del error en el futuro se reduce en dos pasos, mientras que todos los demás valores se mantienen constantes.

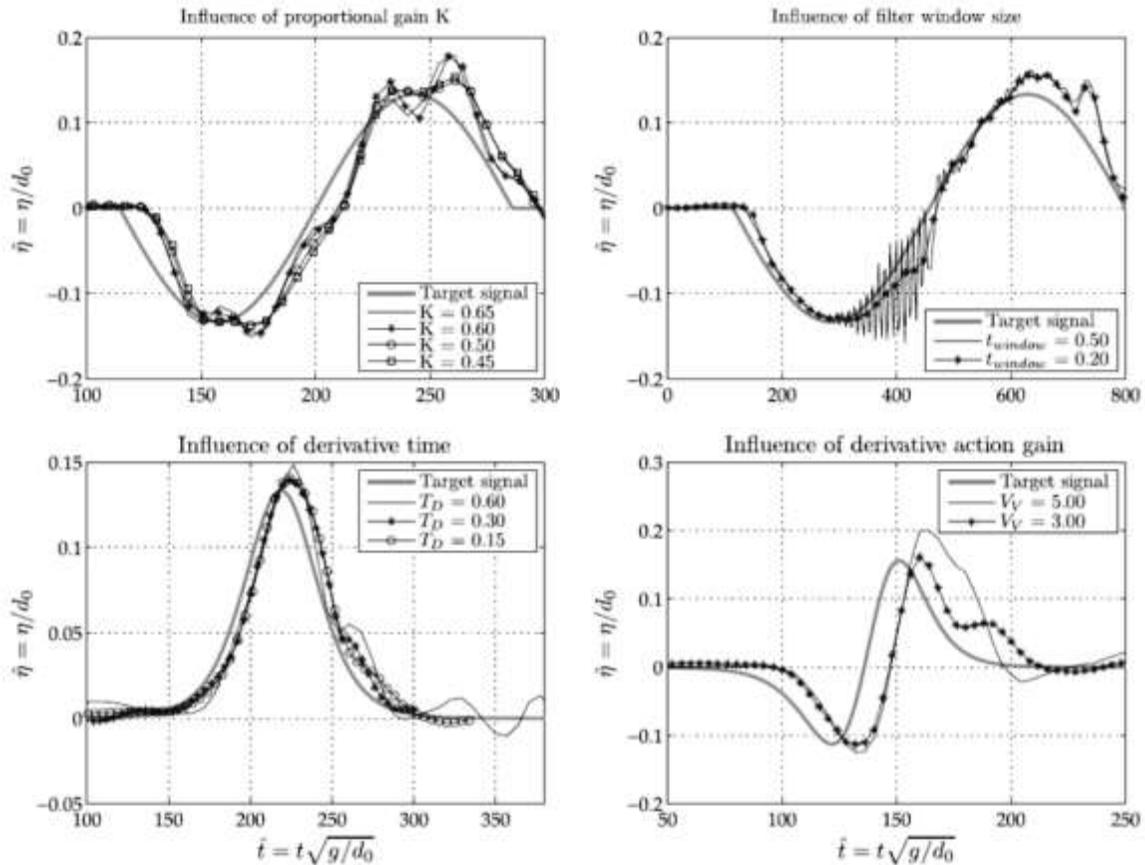


Figura 2. 1 La serie temporal de elevación superficial no dimensional resultante depende de la variación del parámetro del generador, la línea gris representa la señal objetivo. Tipos de onda aplicados según la tabla 2: panel superior izquierdo - ID 8, panel superior derecho - ID 11, panel inferior izquierdo - ID 15, panel inferior derecho - ID 12.

El cambio de tiempo de derivación $T_d = 0.6$ s a $T_d = 0.3$ s resulta en una salida de control más suave, especialmente en la cola de la ola solitaria, en la que los niveles de agua se reducen gradualmente a cero. Una nueva reducción del tiempo derivado, sin embargo, no mejora significativamente el rendimiento del generador. Además, un aspecto del generador puede ser resaltado por la Fig. 4.1. Al comienzo del proceso de generación de ondas ($\approx t = 100$ a 200), los registros de nivel de agua muestran valores no nulos potencialmente debido al movimiento de onda residual de anteriores carreras experimentales. Esto resulta en grandes errores y la respuesta posterior de la planta en una fase de control donde, teóricamente, no se requiere mucha acción de las bombas. Se observó repetidamente que esta diferencia al principio tenía la capacidad de estropear todo el proceso de control, dando lugar a una repetición a pesar de que los ajustes del generador están bien sintonizados. El aumento de la ganancia de acción derivada finalmente influye en el efecto de tiempo derivado por un factor lineal. El panel inferior derecho de la Fig. 2.1 muestra dos variaciones de ganancia de acción derivada, mientras que los parámetros restantes se mantienen constantes. Durante la primera onda del perfil de onda N, las diferencias entre las variaciones son pequeñas, pero en el curso

posterior, las diferencias crecen más grandes, lo que contribuye al carácter derivado del parámetro.

La Tabla 3 enumera los ajustes finales del generador para las formas de onda investigadas. Cabe señalar que sólo para los experimentos en los que se ha adoptado el generador digital se han determinado con precisión los ajustes. Las columnas 3 a 6 muestran los ajustes del generador, que se dan en ganancia adimensional. Parece que la ganancia proporcional K y el tiempo derivado T_d tuvieron que ser sintonizados para cada forma de onda; mientras que el tiempo integral T_i permanece en un nivel muy bajo para todas las formas de onda de prueba. Los valores del tiempo integral están en su nivel más bajo posible. La ganancia de acción derivada sólo se alteró lentamente. Los tamaños de las ventanas también se enumeran y se utilizan para el filtro medio móvil del sensor de presión con el fin de suavizar las altas frecuencias no deseadas. El ajuste del parámetro de filtro aumenta el rendimiento del generador.

Se dieron detalles del ajuste del control y los parámetros finales de control para examinar cómo se podía utilizar un generador para generar ondas solitarias. Sin embargo, se debe tener cuidado de tomar la configuración del generador para otro canal de olas porque el ajuste del generador siempre está relacionado con el carácter de respuesta de la planta controlada. Para los procedimientos estándar de ajuste del generador, se remite al lector a la información que figura en la sección 2.1.

2.3.3 Series de tiempo de la elevación de la superficie

La información sobre las series temporales de elevación superficial de las formas de onda investigadas se da como sigue. Las elevaciones superficiales se miden directamente en la salida de la bomba mediante un sensor de presión. El sensor de presión aplicado (por STS AG) tiene un rango de medición de 0...1.50 mH₂O con una precisión de 0.25% de la escala completa. El amplificador de medición, que se utiliza en combinación con el sensor de presión tiene la capacidad de filtrar datos en tiempo real. Como se describe en la sección 2.2, también se adoptan medidas de construcción que calman el flujo en la región de salida de la bomba.

2.4 Ondas Sinusoidales

En primer lugar, se generaron ondas sinusoidales individuales mediante el método de generación de ondas. Se aplicaron períodos entre $T = 15$ s y $T = 120$ s. Los parámetros de las ondas se enumeran en la Tabla 2. La no linealidad de las ondas generadas que se expresa en este documento por la altura de onda relativa H/d oscila entre 0,10 a 0,26 en una profundidad de agua de 0,31 m, mientras que los números asociados de Ursell (Ur) definido como la razón de la no linealidad y una medida de la longitud de onda relativa L/D que conduce a $Ur = HL^2/d^3$ rango entre $1.837e3$ a $1.176e5$. Los paneles de la columna izquierda en la Fig. 2.3 ilustran la elevación de la superficie adimensional sobre el tiempo adimensional para la serie de tiempo objetivo, así como para tres repeticiones registradas para cada forma de onda. Cada uno de los paneles dados en la columna derecha presenta un gráfico

de diagnóstico asociado con las series temporales adyacentes registradas. Los números de identificación relacionan las formas de onda con las tablas 2 y 3, respectivamente.

Las ondas generadas concuerdan bien con los perfiles de destino para todas las ondas probadas. Sin embargo, las diferencias en el rendimiento del generador de olas son detectables. El grado de concordancia generalmente depende de la cantidad de tiempo que pasó para ajustar el generador para cada forma de onda individual. Esto se puede demostrar para la onda ID 6, que fue elegido como un ejemplo para demostrar la ajustabilidad general del generador de olas. Mientras que el tiempo para ajustar la mayoría de las formas de onda fue de aproximadamente 2 a 3 h, se dedicó un tiempo significativamente más largo para el ajuste de la ID de onda 6. Como medida de diagnóstico en relación con el RMSE, el residual estandarizado se selecciona aquí. Los valores absolutos de RMSE se enumeran en la Tabla 2. Los residuos estandarizados parecen ser más grandes donde la inflexión o puntos de inflexión están presentes; mientras que las áreas monótonicamente crecientes o decrecientes tienden a resultar en desviaciones más pequeñas. La reproducibilidad de las carreras experimentales individuales no es totalmente satisfactoria, pero de nuevo, para ID de onda 6, se logra un rendimiento mucho mejor porque el generador PID está mejor ajustado. Una razón para el buen rendimiento de esta serie de pruebas fue también que las oscilaciones de largo período en el canal después de pruebas previamente realizadas se habían convertido en mínimo.

Tabla 2. 3 Parámetros de control utilizados para los experimentos, diagnósticos de precisión y respetabilidad.

Identificador ID	Tipo de Onda (-)	k (-)	T _i (s)	T _d (s)	V _v (-)	T _{ventana} (s)	σ		Repeticiones	
							(m)	(%)	(m)	(%)
1	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	5.33e-004	1.72	1.49e-005	0.05
2	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	5.77e-004	1.60	5.60e-004	1.56
3	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	5.90e-004	1.44	1.93e-005	0.05
4	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	7.95e-004	1.73	1.78e-005	0.04
5	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	5.59e-004	1.08	1.90e-005	0.04
6	Sinusoidal	na*	na	na	3.00E+00	0.5	8.90e-004	1.51	4.71e-004	0.80
7	Sinusoidal	0.40	0.0001	0.050	3.00E+00	0.2	4.80e-003	6.00	1.66e-003	2.08
8	Sinusoidal	0.45	0.0001	0.500	3.00E+00	0.2	4.60e-003	5.75	1.03e-003	1.29
9	Sinusoidal	0.45	0.0001	0.090	3.00E+00	0.1	4.80e-003	6.00	2.21e-003	2.76
10	Sinusoidal	0.45	0.0001	0.100	3.00E+00	0.1	3.80e-003	4.75	3.04e-003	3.80
11	Sinusoidal	0.35	0.0001	0.200	3.00E+00	0.1	3.50e-003	4.38	1.89e-003	2.36
12	N-wave	0.45	0.0001	0.300	3.00E+00	0.2	1.00e-002	12.50	2.65e-003	3.31
13	N-wave	0.45	0.0001	0.200	3.00E+00	0.1	9.49e-003	11.86	1.92e-003	2.40
14	Solitary	0.50	0.0001	0.005	3.00E+00	0.1	1.21e-003	6.05	6.30e-004	3.15
15	Solitary	0.50	0.0001	0.150	3.00E+00	0.1	1.86e-003	4.65	1.29e-003	3.22
16	Solitary	0.20	0.0001	0.100	3.00E+00	0.1	3.54e-003	5.90	4.80e-004	0.80
17	Solitary	0.35	0.0001	0.050	3.00E+00	0.2	5.79e-003	7.24	1.17e-003	1.46
18	Solitary	0.45	0.0001	0.050	3.00E+00	0.2	6.25e-003	6.25	5.07e-003	5.07
19	Realistic	na*	na	na	3.00E+00	0.5	1.80e-003	1.88	0.00E+00	0.00

* Denota los experimentos donde se ha adoptado un generador PID analógico que no permite la lectura precisa de parámetros, todos los otros experimentos se han ejecutado con un generador digital moderno, ganancia proporcional K, tiempo integral T_i, tiempo derivado T_d, ganancia de acción derivada V_v, tamaño de la ventana T_{ventana} en s, σ RMSE.

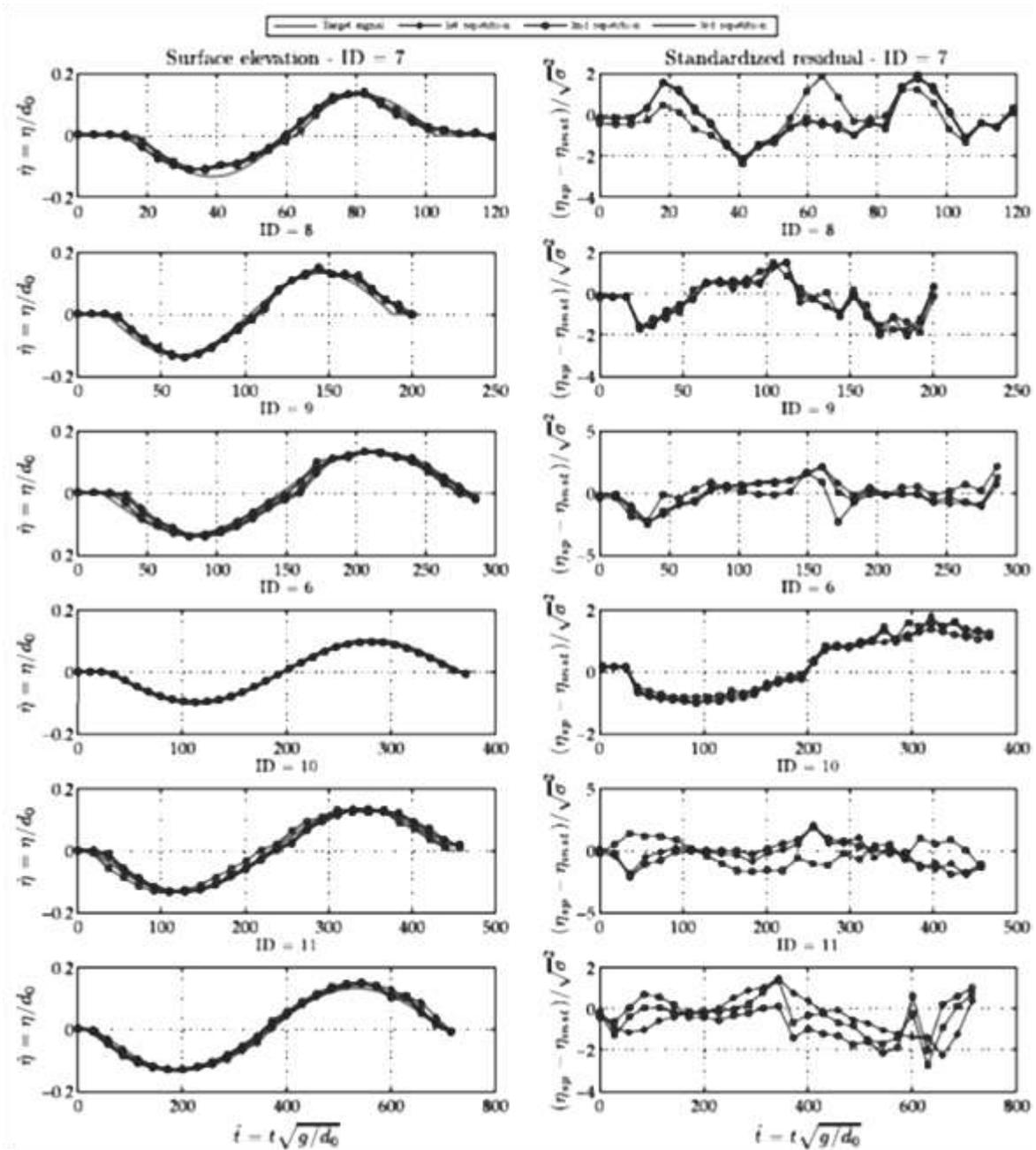


Figura 2. 2 Comparación de las ondas sinusoidales generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \sqrt{g/d_0}$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.

2.4.1 Ondas Solitarias

En segundo lugar, se probaron ondas solitarias con una duración prolongada. En la sección 2.1 se presenta una descripción de las series temporales objetivo. Fig. 2.3

presenta esas formas de onda objetivo, así como la generación repetida por medio del creador de onda. La columna izquierda de la Fig. 2.3 ilustra qué tan bien se reproducen las series temporales de destino y también muestra cómo funciona el mecanismo de generación de ondas reproducible. La columna derecha de la figura presenta algunos diagnósticos que se basan en el residual estandarizado.

Se hace evidente que las ondas solitarias prolongadas son generalmente bien generadas. La calidad creciente de la generación se encuentra con un aumento en la duración. La onda solitaria más corta (ID 18) tiene los valores más altos de residuos estandarizados, mientras que con una duración creciente los residuos estandarizados disminuyen en consecuencia. Además, las ondas probadas ID 16 y 17 revelan que los residuos estandarizados crecen más lentamente durante la generación del frente de onda, mientras que las diferencias crecientes se encuentran cuando los niveles superficiales monótonamente decrecientes tienen que ser generados. La disminución de los niveles de agua se combina con la rotación hacia atrás de las bombas de hélice. Aunque este patrón no se observa para todas las ondas solitarias probadas, se puede contribuir en parte a las características de la bomba de hélice aplicada cuya salida hidráulica depende del sentido de rotación, dando lugar a una mayor velocidad de rotación para un rendimiento hidráulico igual en comparación con una rotación hacia adelante. Esto, a su vez, resulta en una acción de control más fuerte. Durante las pruebas de capacidad de las bombas de hélice en condiciones estables, se estimaron diferencias entre la rotación hacia adelante y hacia atrás de hasta un 20%. Mientras que la repetibilidad de las ondas generadas es generalmente buena (por ejemplo, ID 16, 17), es obvio que algunas de las formas de onda de ID 15 y 18 muestran peores resultados. Una posible razón para este problema es que el proceso de generación de ondas se inició cuando el canal no se había recuperado completamente de pruebas anteriores. Los valores RMSE enumerados en la tabla 3 revelan que la calidad global de la generación de ondas solitarias es menos precisa que la de las ondas sinusoidales. Valores RMSE de las ondas sinusoidales generadas bajo el control del rango del generador PID analógico en el orden de 2% (ID 1-6). Las ondas sinusoidales generadas por el generador digital muestran valores RMSE ligeramente más pobres, que oscilan entre el 4 y el 5%, mientras que el rendimiento del generador para ondas solitarias obtiene valores RMSE de 4.5-7.3%.

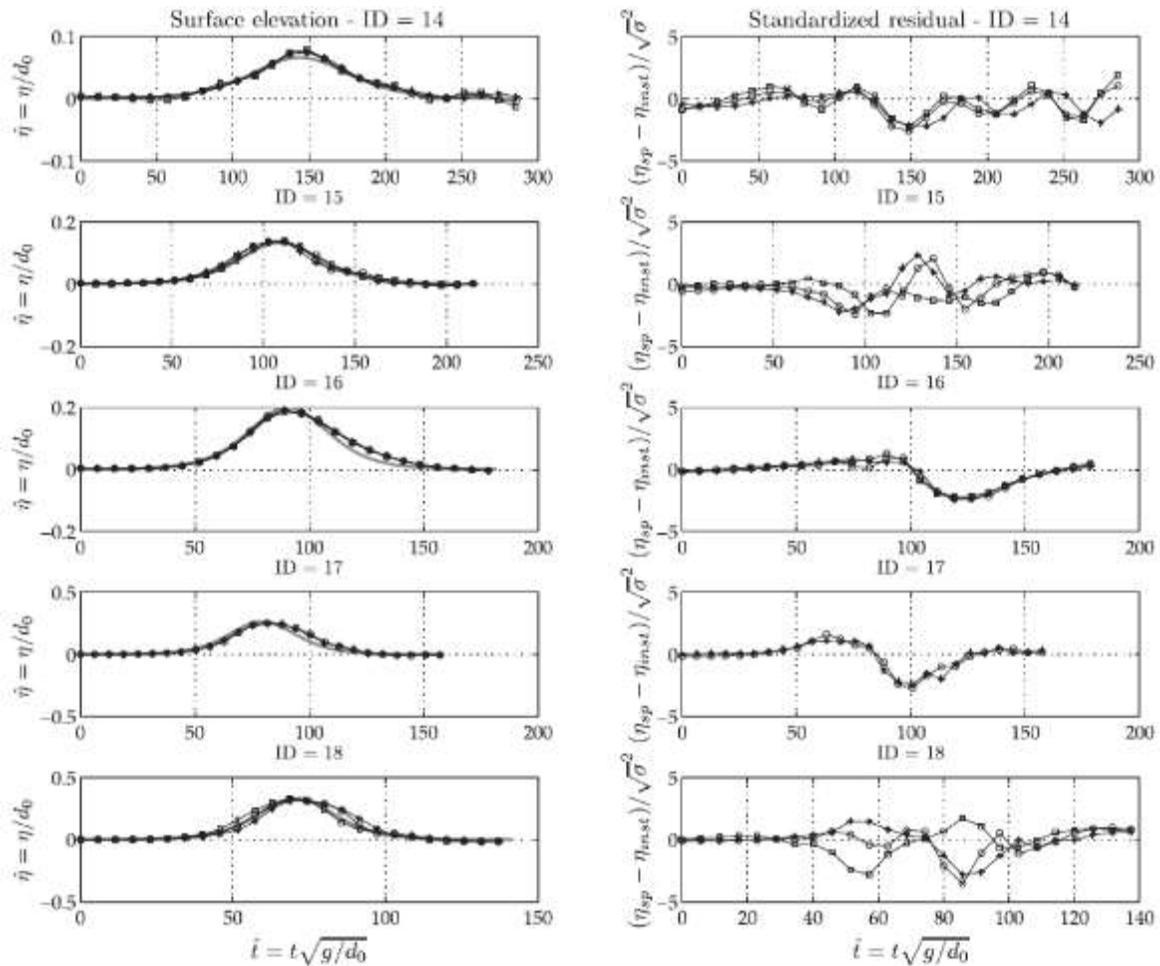


Figura 2. 3 Comparación de las formas de onda solitarias generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \sqrt{g/d_0}$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.

2.4.2 N-waves

En tercer lugar, se probaron dos N-waves prolongadas diferentes con depresión principal (ID 12, 13). Fig. 2.4 presenta la serie de tiempo de elevación de superficie adimensional resultante, así como las parcelas de diagnóstico. La columna izquierda de los paneles en la Fig. 2.4 ilustra la elevación de la superficie adimensional sobre el tiempo adimensional para la serie de tiempo objetivo, así como para tres repeticiones registradas para cada forma de onda. Cada uno de los paneles dados en la columna derecha presenta un gráfico de diagnóstico asociado con las series temporales adyacentes registradas. Los números de identificación relacionan las formas de onda con las tablas 2 y 3, respectivamente. El proceso de generación de las N-waves reproduce razonablemente bien la forma de onda total, aunque debe admitirse que sí aparecen desviaciones significativas entre la señal objetivo y las formas de onda generadas. Este hecho se destaca por los altos

valores de RMSE de 12.5% (ID 12) y 11.86% (ID 13), respectivamente. Dados los residuos estandarizados, todavía se pueden distinguir dos fases cualitativas del proceso de generación de ondas. Los residuos estandarizados permanecieron comparativamente pequeños durante la primera ola de depresión y el comienzo de la siguiente fase de onda positiva. Las desviaciones más altas se encuentran alrededor de la cresta de la ola y el descenso adyacente de la elevación de la superficie del agua alcanzando 3-3.5 veces los valores de RMSE. Este hecho es una indicación de las inestabilidades del generador derivadas de un ajuste insuficiente. Se comprobó que la mejora cualitativa del rendimiento del generador siempre era posible cuando se dedicaba más tiempo al ajuste basado en el ensayo y error.

2.4.3 Mareograma Realista

La Fig. 2.5 representa una configuración del generador PID que funciona bien sobre la base del equipo generador a mano. La forma de onda, que fue seleccionada, se origina a partir de un modelado numérico anterior de la dinámica de ondas solitarias cercanas a la costa en la ciudad de Padang. Como se muestra en la Fig. 2.5, la curva de punto de ajuste representa una onda solitaria con los siguientes parámetros de onda aproximada: $\omega = 2\pi/T = \pi/251/s$, $k = 2\pi/L = 0.0731$, $d_0 = 0.3$ m, $a_{tr} = 0.03$ m y $a_{cr} = 0.06$ m.

La forma de onda resultante, que concuerda con la señal objetivo, representa una onda solitaria caracterizada por una onda de depresión líder. En la fase inicial de la generación de olas, pequeñas fluctuaciones de la superficie del agua todavía ocurren probablemente debido a las restantes oscilaciones fundamentales de pasadas experimentales. Estos resultados comienzan en la acción del generador, y por lo tanto conducen a una reducción de los errores de control. Se puede ver que esos errores siguen siendo pequeños y un aumento de las oscilaciones se evita con éxito con la configuración del generador utilizado. Las desviaciones significativas surgen al principio del canal de olas monótonamente no creciente ($t = 80-100$). El residual estandarizado, que asciende a $3.5 * \sigma$, proviene de la variable de control que se queda atrás de la curva del punto de ajuste. Las oscilaciones, especialmente en el movimiento hacia abajo de la superficie del agua, siguen siendo pequeñas y la acción del generador resulta en un lapso de tiempo. La siguiente fase de meseta se caracteriza por desviaciones menores que muestran valores residuales estandarizados menores de $1.0 * \sigma$. Parece que el esquema generador rastrea la superficie del agua apenas por encima de la señal objetivo. Un error de control positivo surge tan pronto como la cresta de onda tiene que ser generada por el generador de oleaje. Siempre ha sido más difícil generar crestas de onda que canales de onda. El residuo estandarizado alcanza un pico positivo alrededor de la cresta de onda donde ocurren oscilaciones menores. Aunque estas oscilaciones no se incrementan, se amortiguan con éxito, lo que indica un comportamiento del generador bien sintonizado. El rendimiento satisfactorio del generador de olas se produce en la porción de disminución monótona de la cresta de onda. La apariencia general de la onda generada concuerda bien con la señal objetivo dada, lo que resulta en un error cuadrático medio de $\sigma = 0.0018$ m.

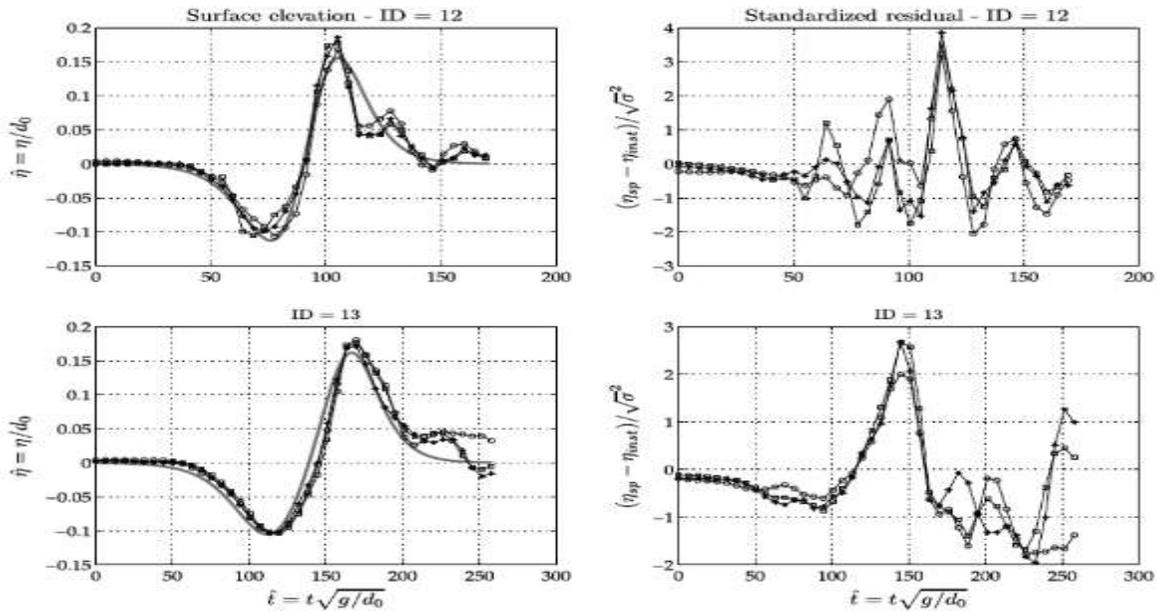


Figura 2. 4 Comparación de las formas de onda N generadas según la tabla 2 (línea sólida con marcadores que indican repeticiones) con las señales de destino correspondientes (línea gris sólida) en los paneles de la columna izquierda que trazan la elevación superficial normalizada η/d_0 sobre el tiempo no dimensional $t = t \sqrt{g/d_0}$, los paneles de la columna derecha muestran la evolución residual estandarizada sobre el tiempo no dimensional, los residuos son estandarizados por RMSE.

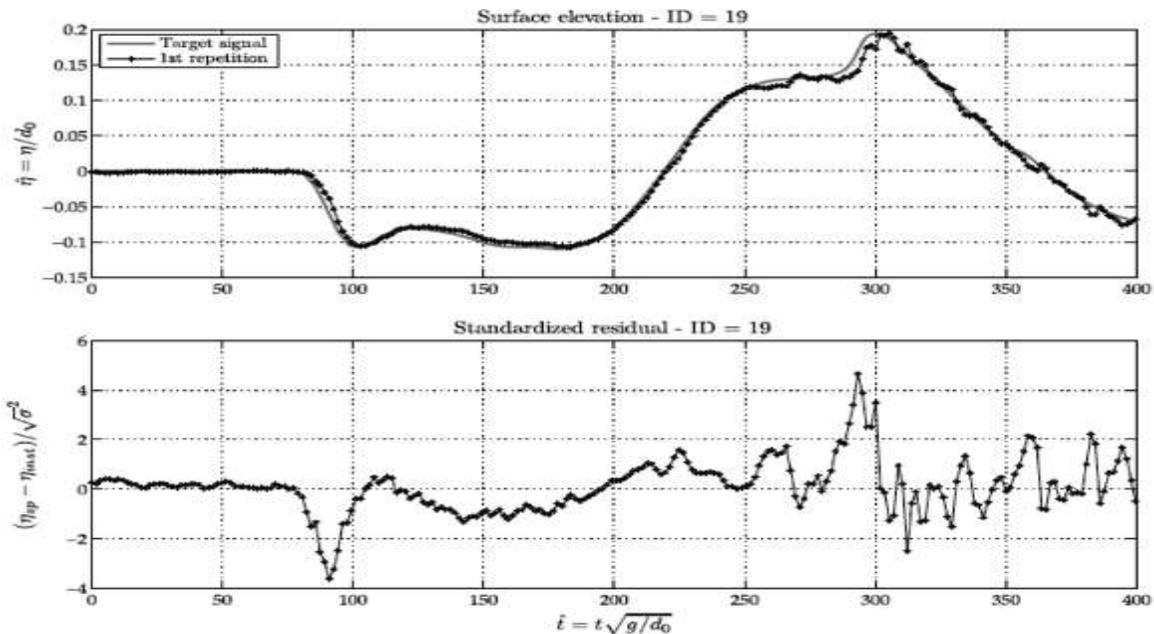


Figura 2. 5 Ilustración del rendimiento del generador para una forma de onda prototipo deducida del modelado numérico para la ciudad de Padang (Goseberg y Schlurmann, 2009) con $T = 50.0$ s, $h_0 = 0.3$ m, $a_{tr} = 0.03$ m. y $a_{cr} = 0.06$ m., panel superior de la figura representa la elevación no dimensional de la superficie del agua η/d_0 de la señal del punto de ajuste y la variable de control con respecto al tiempo adimensional $t = t \sqrt{g/d_0}$, panel inferior muestra el residual estandarizado en el tiempo no dimensional.

2.5 Conclusiones del tema

Una metodología para la generación de ondas solitarias arbitrarias se desarrolla y se aplica a las N-waves y sinusoidales únicas, prolongadas y solitarias. Funciona sobre la base de volúmenes de agua acelerados y desacelerados, que son impulsadas en instalaciones de generación de olas generando la onda solitaria. Esta metodología describe un enfoque alternativo para generar ondas solitarias en el laboratorio en comparación con generador de olas de tipo pistón, la analogía de la rompiente, o movimiento vertical de la superficie de la onda que permite la generación de períodos de onda largos entre $T = 15$ y 120 s.

La principal ventaja de la nueva metodología es la generación adecuada de ondas solitarias en modelos físicos a escala descendente, donde las instalaciones convencionales de generación de ondas no permiten la reproducción de los períodos o longitudes de onda previstos. Si bien los períodos de onda que son reproducibles por medio de técnicas convencionales encontradas en la literatura se encuentran mayormente en el rango hasta $T = 15$ a 20 s, se demostró que los períodos de onda generados por medio de la nueva metodología exceden los comúnmente generados hasta un orden de magnitud. Las ondas sinusoidales individuales se generaron inicialmente para ilustrar la funcionalidad del generador de ondas. Se reprodujeron N-waves y ondas solitarias prolongadas para demostrar que las formas de onda previamente aplicadas también podían generarse fácilmente. Una estimación de los límites del generador de olas revela que, además, tanto las ondas más cortas como las más largas de no linealidades variables son teóricamente posibles cuando se dan los prerrequisitos geométricos y técnicos. La metodología describe una herramienta adecuada en el campo de la ingeniería costera para estudiar el movimiento de las olas largas y la dinámica de ensayos en modelos físicos escalados.

Teniendo en cuenta los diversos estudios de tsunamis realizados en los años pasados en diferentes laboratorios del mundo, y observando principalmente los resultados obtenidos, en el presente estudio se pretende caracterizar la forma del tsunami, al desarrollarse por el medio de propagación, el cual, en este caso, fue un taque de olas con un generador de oleaje tipo compuerta, que se describirá en el siguiente capítulo. Teniendo en cuenta lo amplio que es el tema en sí, solo se abordara el aspecto más importante del tsunami, que es describir su forma durante su desarrollo.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 DEFINICION DE LA ESCALA DE LINEAS.

El IMT realizó la adecuación del modelo hidráulico, en el tanque de olas menor del Laboratorio de Hidráulica Fluvio-marítima, la cual fue: 1:34, acorde a las leyes de similitud que rigen las escalas en los estudios experimentales, como son la semejanza geométrica, la cinemática y la dinámica.

La relación entre las magnitudes del modelo y prototipo, se define con el número de Froude, que debe ser igual en modelo y prototipo.

$$\frac{V_r}{(g_r L_r)^{1/2}} = 1$$

La selección de las escalas del modelo se determinó en función de la magnitud de los pesos de los elementos de coraza (core loc) a representar en el modelo principalmente, por lo que, con las escalas anteriormente citadas, se observan las siguientes relaciones entre modelo y prototipo:

		donde:	
Longitud:	$L_m = L_p(1/E_L)$	L_m -	Longitud del modelo
		L_p -	Longitud del prototipo
		E_L -	Escala de líneas
Tiempo:	$T_m = T_p(1/E_L^{1/2})$	T_m -	Tiempo en modelo
		T_p -	Tiempo en prototipo

Este estudio se realizó utilizando una pendiente de la losa de fondo del 9% con una superficie total de 482 m². Como base, en los extremos del tanque se colocaron taludes absorbentes, a base de tezontle, para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje.

3.2 Proyecto del modelo hidráulico

El modelo hidráulico de generación de tsunamis tiene por objeto estudiar el perfil de la onda solitaria y sus efectos sobre la escollera del puerto de Cuyutlán, Col. Cabe mencionar que el proyecto del modelo hidráulico se realizó considerando las dimensiones y pesos de los elementos de coraza (cubos ranurados) disponibles en el IMT, de las condiciones de oleaje a estudiar en el modelo hidráulico, y de la capacidad de generación de tsunamis de los equipos.

3.3 Adecuación del modelo hidráulico en tanque de olas menor

El IMT definió la pendiente promedio de la zona de estudio tomando como base la información de los proyectos VE/-20/18 “Estudio en modelo hidráulico para adecuar el proyecto ejecutivo de reconstrucción del rompeolas que protege las instalaciones de PEMEX en el puerto de Manzanillo, Col.” y VE/-20/18 en Cuyutlán, que el IMT elaboró con anterioridad.

Tomando en cuenta la pendiente existente en el tanque de olas menor ($S=0.09$) y la pendiente promedio de la zona de proyecto ($S=0.034$) se determinó construir una pendiente a base de grava y tiras de acrílico de 1 m. de ancho por 2.40 m. de largo, delimitada por ortogonales, para construir la sección representativa de rompeolas. Aunado a esta pendiente, se construyeron dos pendientes más de 0.045 y 0.055.

Con la escala de líneas definida para la sección que compone la escollera del puerto de Cuyutlán, Col. y con la pendiente promedio de la zona de estudio de se realizó la adecuación de la pendiente a base de grava de 8 m. x 1.2 m. x 0.80 m. sobre la losa de fondo del tanque de olas menor ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Fluviomarítima.

Para realizar la adecuación del modelo hidráulico en el tanque de olas menor se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se revisó la pendiente de la losa de concreto existente en el canal y se verificó que dicha pendiente no era la requerida para el proyecto por lo que fue necesario realizar una pendiente a base de grava sobre la losa de concreto del tanque de olas menor.
- Se realizó el retiro de la sección existente en el tanque de olas menor.



Figura 3. 1 Retiro de material existente en tanque de olas menor del modelo anterior.

- Se realizó la selección de los materiales para la sección representada.



Figura 3. 2 Selección del material (granzón, grava y cubos ranurados) para la formación de las capas de la sección del modelo hidráulico.

- Se realizó la colocación de las ortogonales de acrílico para posteriormente construir la pendiente de grava y construir sobre ella, las secciones a ensayar en el tanque de olas menor.



Figura 3. 3 Colocación de las ortogonales para la configuración del modelo hidráulico.

- Construcción de tres pendientes a base de grava.



Figura 3. 4 Vaciado de grava para construcción de la pendiente del modelo hidráulico.

- Construcción de la sección de rompeolas a escala con elementos cubo ranurado como elementos de la capa coraza a escala 1:34.



Figura 3. 5 Colocación y nivelación de elementos (cubos ranurados) para capa de coraza del rompeolas del modelo hidráulico.

- Colocación los sensores de medición del oleaje correspondientes para cada una de las secciones estudiadas.



Figura 3. 6 Colocación de sensores tipo capacitivo en el modelo hidráulico.

- Construcción de las secciones estudiadas correspondientes al rompeolas de Cuyutlán Col. Y al rompeolas que protege a las instalaciones de PEMEX. en Manzanillo, Col.



Figura 3. 7 Construcción de secciones a escala por construcción de pendiente de fondo (0.034, 0.044 y 0.054) del modelo hidráulico.

3.4 Programa de ensayos

De acuerdo con los alcances establecidos para el presente estudio se realizó la programación de las pruebas en modelo hidráulico con señales iniciales del perfil del tsunami, con el software Tsunami Wave Generation (onda solitaria) y con N-waves signal generation, considerando diferentes alturas de ola y dos diferentes profundidades. En cada uno de los casos que se estudiaron se representó la escollera del puerto de Cuyutlán, Col.

3.5 Desarrollo experimental

El IMT realizó la operación del modelo hidráulico, de acuerdo al programa de ensayos definido en el punto anterior.

En el presente estudio se analizaron los efectos de la onda solitaria y de la N-wave, para ello, se ensayó la sección tipo que conforma el rompeolas representado de Cuyutlán, Col. (figura 3.7).

Para la operación del modelo hidráulico se utilizó una computadora PC en la cual se genera un archivo de señales digitales de oleaje (onda solitaria y N-waves) basadas en un espectro tipo Rayleigh, estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje con servomotor eléctrico, como se indica en la Figura. 4.4.

Tabla 3. 1 Programa de ensayos de onda solitaria.

Sección	Nivel a ensayar	Pendiente de fondo	Software	No. De Ensayo	Altura de ola tsunami (m)
CUERPO CUYUTLAN, COL.	N.B.M.I (0.00 m.)	0.034	Tsunami Wave Generation	ES01	1.08
				ES02	1.46
				ES03	2.58
				ES04	3.44
			N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES05	1.08
				ES06	1.46
				ES07	2.58
				ES08	3.44
			N-waves signal generation (Leading Depression)	ES09	1.08
				ES10	1.46
				ES11	2.58
				ES12	3.44
		0.044	Tsunami Wave Generation	ES13	1.08
				ES14	1.46
				ES15	2.58
				ES16	3.44
			N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES17	1.08
				ES18	1.46
				ES19	2.58
				ES20	3.44
			N-waves signal generation (Leading Depression)	ES21	1.08
				ES22	1.46
				ES23	2.58
				ES24	3.44
		0.054	Tsunami Wave Generation	ES25	1.08
				ES26	1.46
				ES27	2.58
				ES28	3.44
			N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES29	1.08
				ES30	1.46
				ES31	2.58
				ES32	3.44
			N-waves signal generation (Leading Depression)	ES33	1.08
				ES34	1.46
				ES35	2.58
				ES36	3.44



Figura 3. 8 Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje.

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico en el tanque de olas menor se utilizaron sensores de oleaje tipo resistivo de ± 5 volts de resolución, colocados equidistantemente a 3 m. entre cada uno de ellos y el generador de oleaje, y uno al pie de la estructura rompeolas con el objeto de medir la altura de la ola generada, como se indica en la siguiente Figura 3.2.

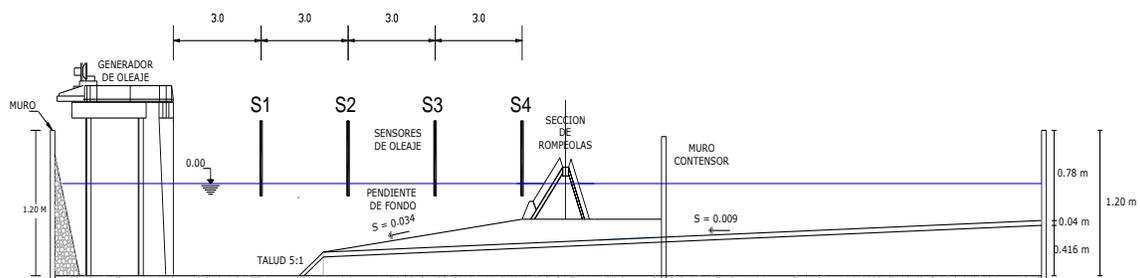


Figura 3. 9 Ubicación de los sensores de oleaje en el modelo.

3.6 Variantes para desarrollar onda solitaria

Dentro del software que se encuentra instalado en las computadoras del laboratorio de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera, se encuentran dos principales variantes del programa denominado Wave Signal Generation Software, las cuales son la de Tsunami Wave Generation (onda solitaria de forma arbitraria) (Figura 3.3) y la N-waves signal generation (onda solitaria N controlada) (Figura 3.4).

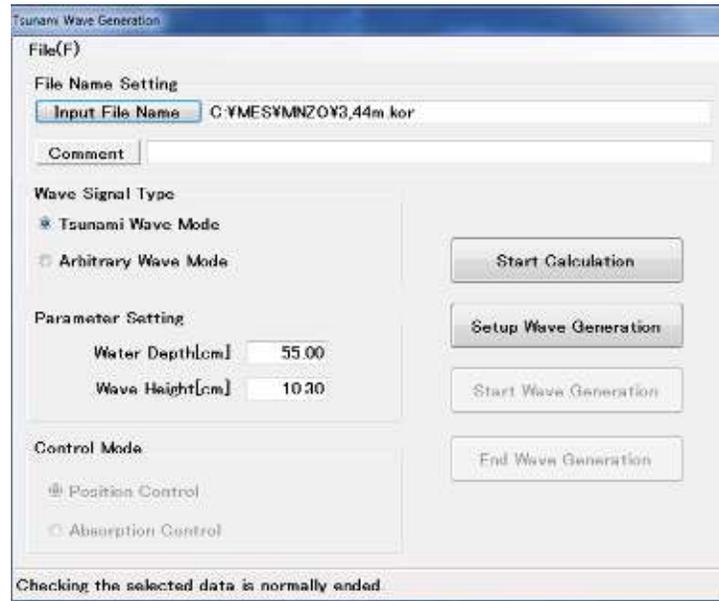


Figura 3. 10 Programa Tsunami Wave Generation para la generación de onda solitaria de forma arbitraria.

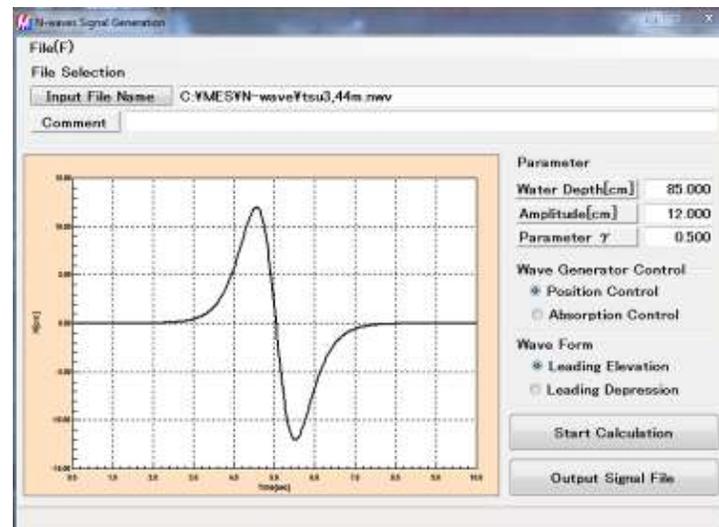


Figura 3. 11 Programa N-waves Signal Generation para la generación de onda solitaria controlada.

Con la primer variante (ver Figura 3.3) los parámetros necesarios para generar una onda solitaria son profundidad del agua (water depth) frente al generador de oleaje (Figura 3.2) y altura de ola (wave height) a generar, en centímetros (cm) ambos parámetros.

Con la variante N-waves (Figura 3.4) se registran dos formas de generar las ondas solitarias controladas, las cuales son: en primer término, Leading elevation y en segundo la de Leading Depression, para las cuales los principales parámetros para generar la onda solitaria son la profundidad del agua (water depth) frente al generador de oleaje (Figura 3.2) y amplitud de la onda en unidades de centímetros (cm) ambos parámetros.

A continuación, se describen los movimientos que realiza el generador de oleaje con respecto al control del software en turno utilizado para generar la onda solitaria.

Movimiento del generador de oleaje con el programa Wave Signal Generation Software

Con este movimiento la paleta del generador de oleaje se desplaza en primera forma hacia atrás (ver Figura 3.5) y queda totalmente en reposo para posteriormente dar paso al desplazamiento hacia adelante y generar de esta forma la onda solitaria.

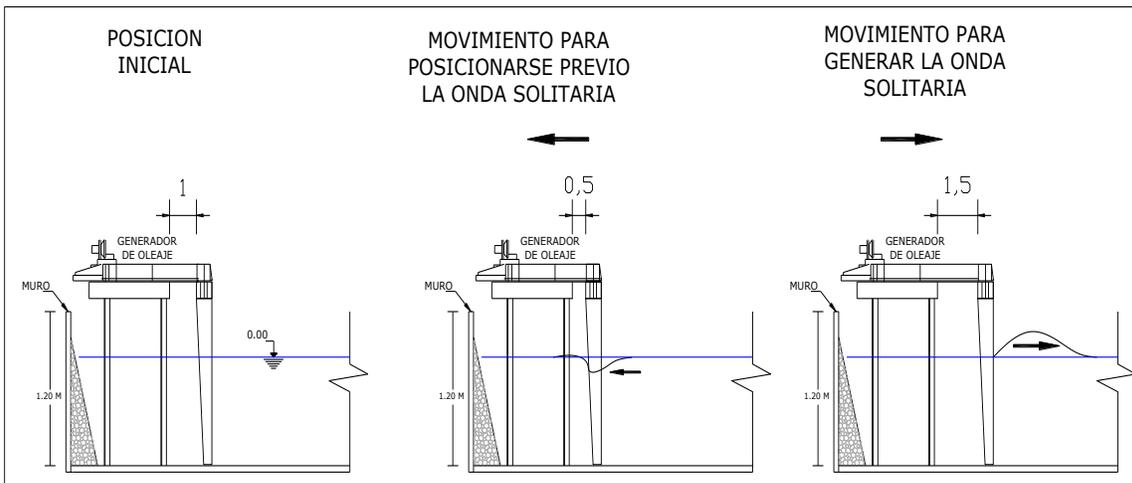


Figura 3. 12 Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria con el programa Wave Signal Generation Software.

Movimiento del generador de oleaje con el programa N-waves Signal Generation

Este software cuenta como ya se describió al inicio de este subtema, con dos formas de realizar la onda solitaria, la primera es la forma de Leading Elevation (o elevación frontal al inicio del desplazamiento), cuyo movimiento de la paleta del generador de oleaje es de la misma forma que el programa Wave Signal Generation Software (Figura 3.5). Con la segunda forma de generar la onda solitaria para este programa

tenemos la inversa denominada Leading Depression (o depresión frontal a la paleta del generador) (Figura 3.6), lo que genera una mayor acumulación de volumen de agua frente a la paleta del generador de oleaje y por lo tanto mas sobrelevación en la altura de ola registrada al llegar a tierra.

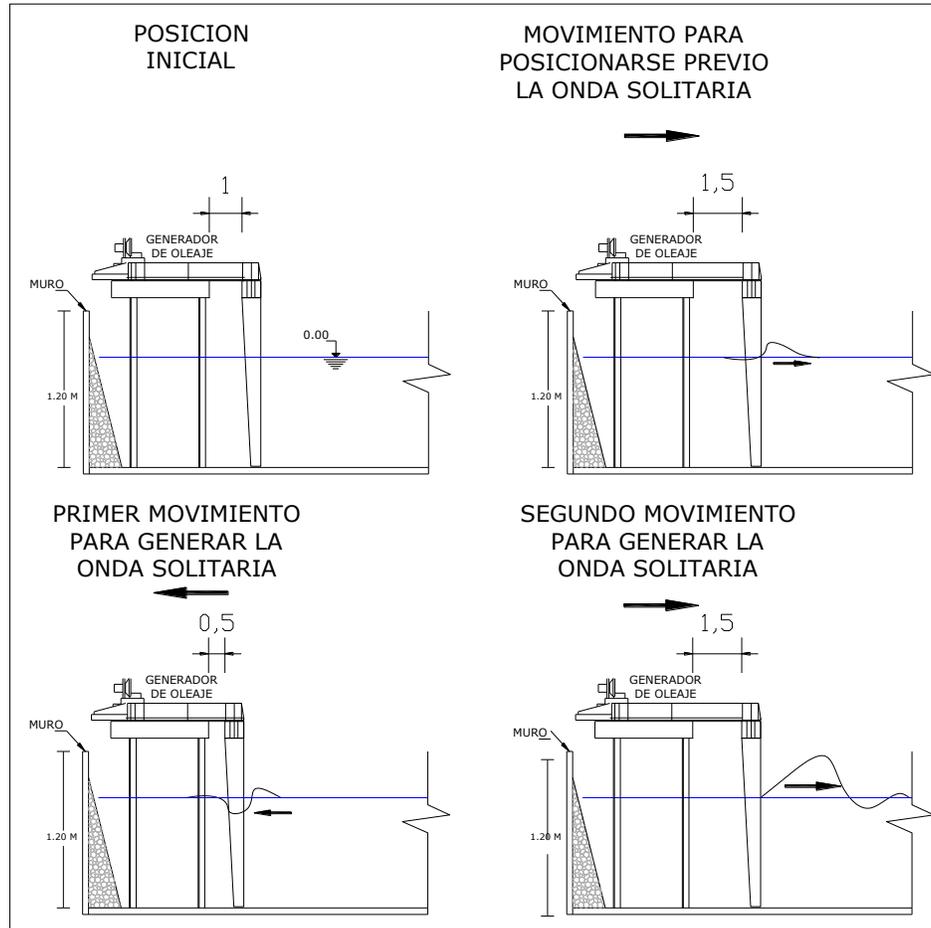


Figura 3. 13 Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria con el programa N-waves Signal Generation con la opción Leading Depression.

A continuación, se describe la sección ensayada, así como los resultados de los ensayos de estabilidad y medición de perfiles de tsunamis.

- Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.

Los ensayos de generación de tsunamis con onda solitaria y con N-Waves que se llevaron a cabo para la sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., se realizaron a escala 1:34; ésta escala se seleccionó de acuerdo con los pesos y dimensiones de los elementos existentes en el Laboratorio de Hidráulica Fluvio-marítima.

Los ensayos se realizaron con el sistema de generación de tsunamis de Onda Solitaria y con N-waves, considerando la elevación 0.00 respecto al Nivel de

Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.). En los extremos del tanque de olas menor se colocaron taludes absorbentes para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje.

SECCIÓN TIPO CUERPO (CADENAMIENTOS 0+065 AL 0+535)

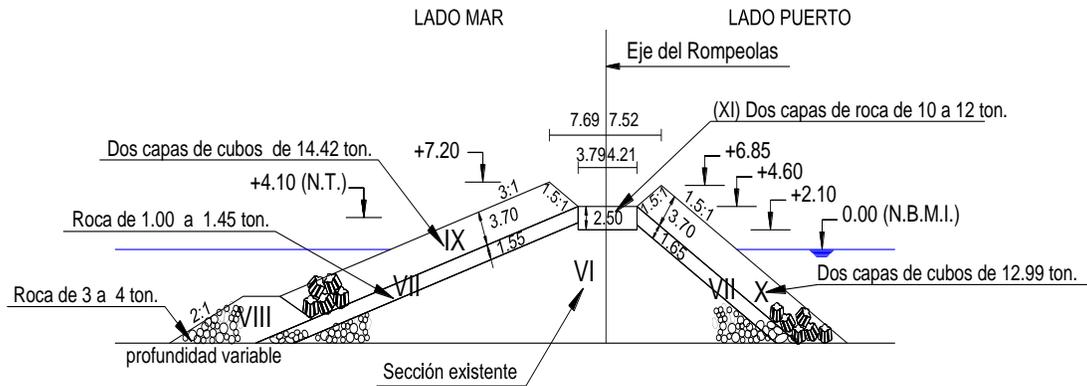
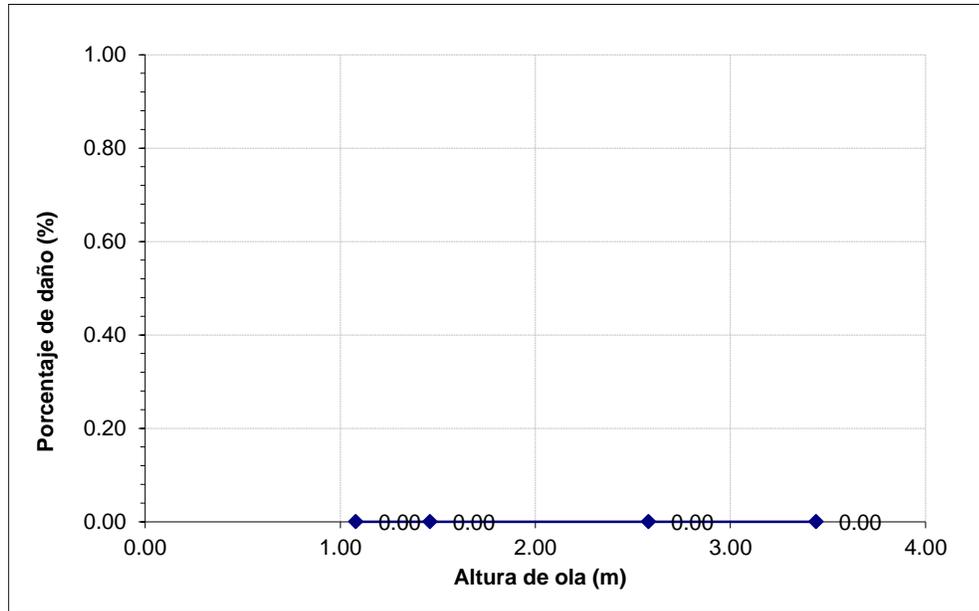


Figura 3. 14 Sección Tipo estudiada del rompeolas de Cuyutlán, Col.

3.7 Resultados obtenidos

1. A continuación se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de dichas pruebas para la sección Tipo cuerpo del rompeolas de Cuyutlán, Col., con pendiente de fondo de 0.034.
 - a) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 26 m. (en prototipo) con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis de Onda Solitaria.



Gráfica 3.1 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.



Figura 3.15 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3.16 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 17 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 18 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 19 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



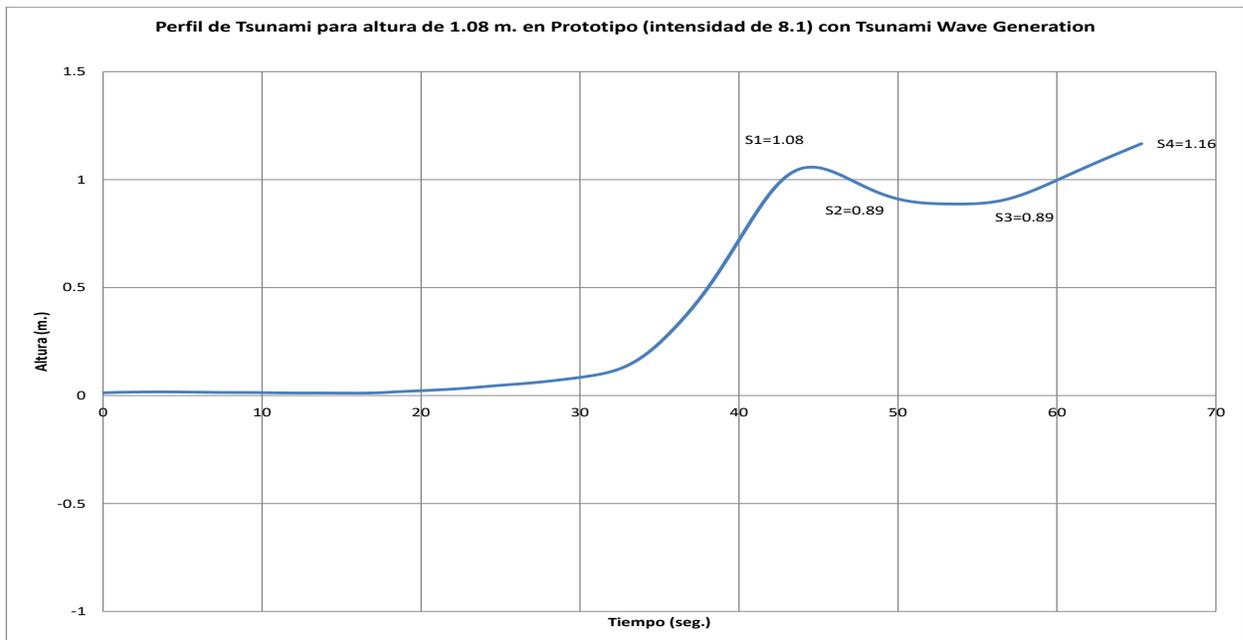
Figura 3. 20 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



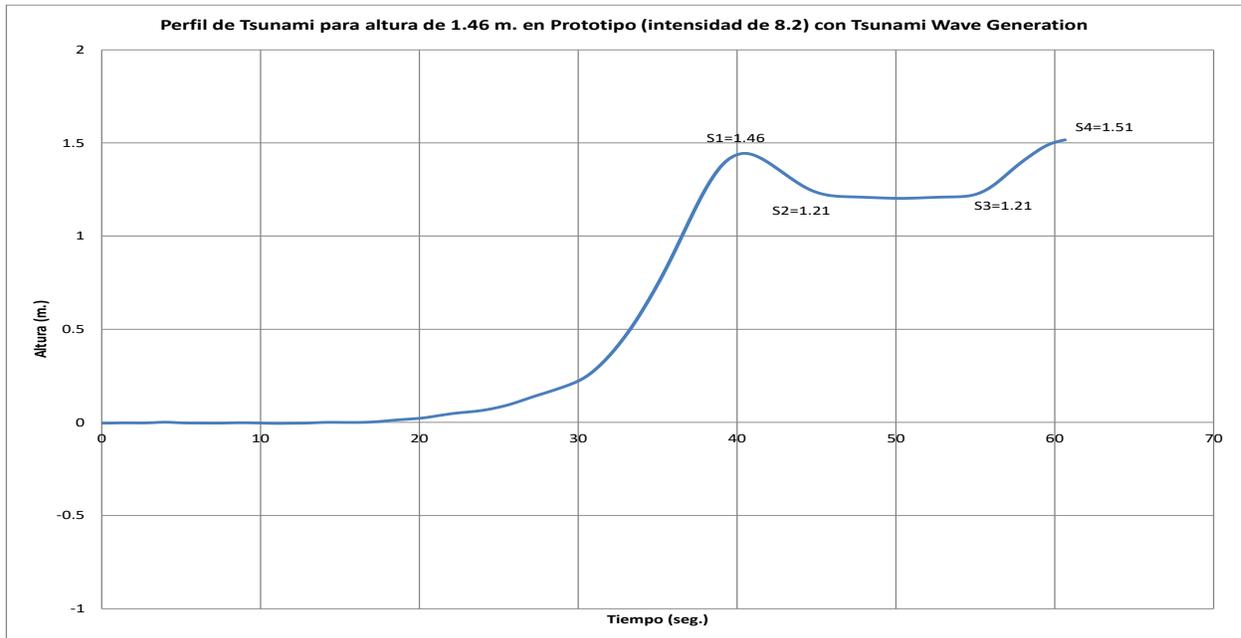
Figura 3. 21 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



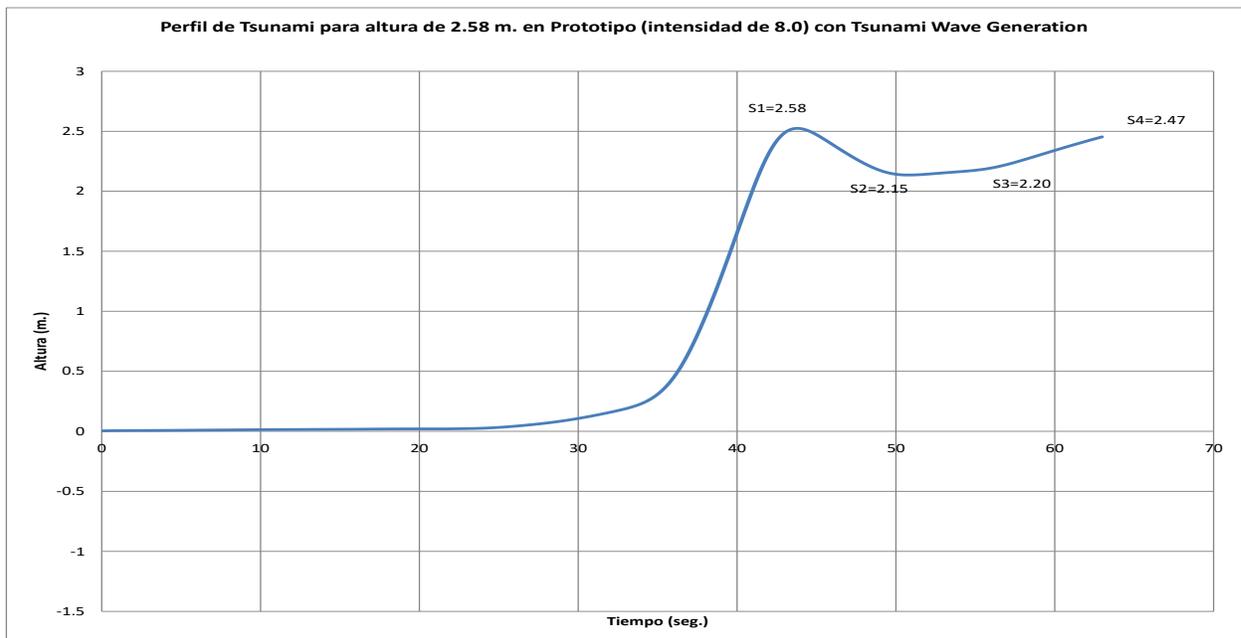
Figura 3. 22 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



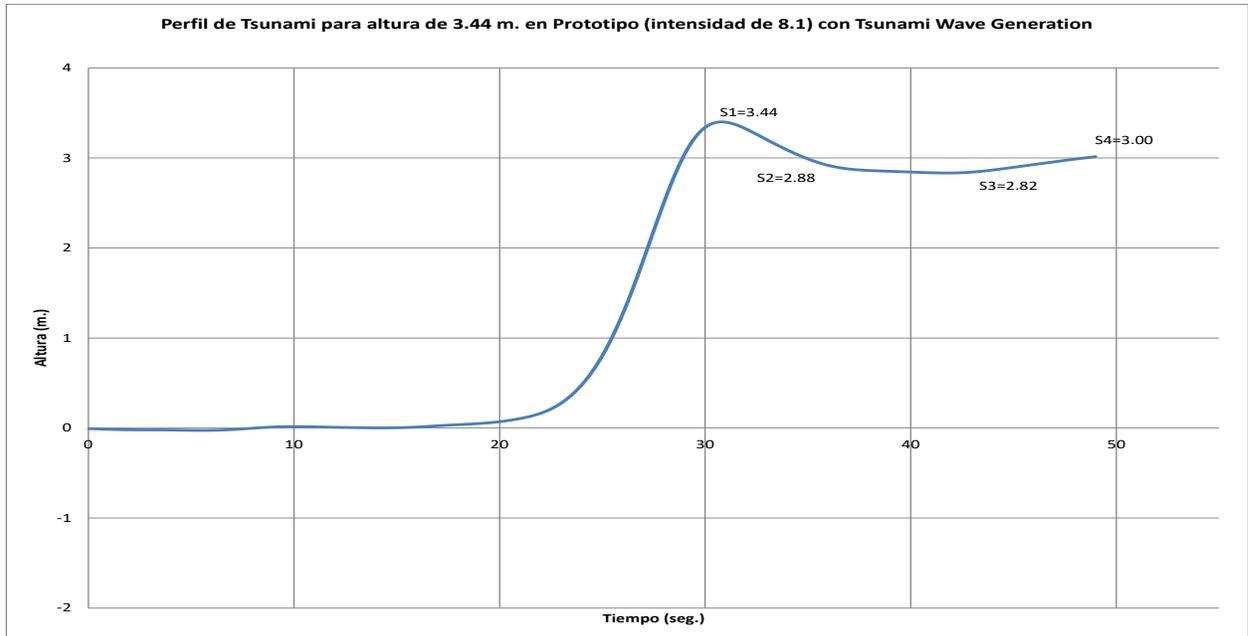
Gráfica 3. 2 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.3 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

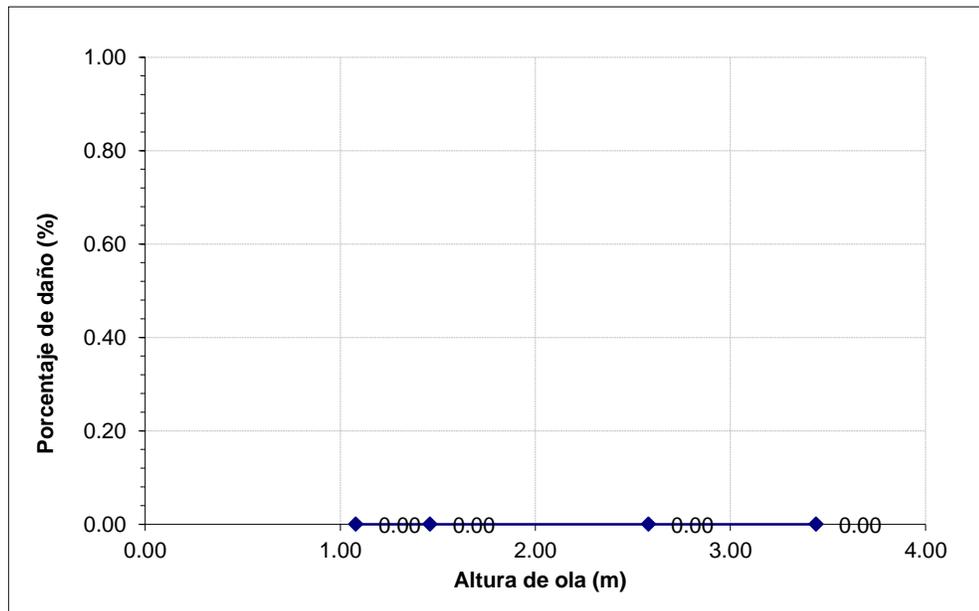


Gráfica 3.4 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 5 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- b) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 26 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Elevation (LE).



Gráfica 3. 6 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.



Figura 3. 23 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 24 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 25 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 26 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 27 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



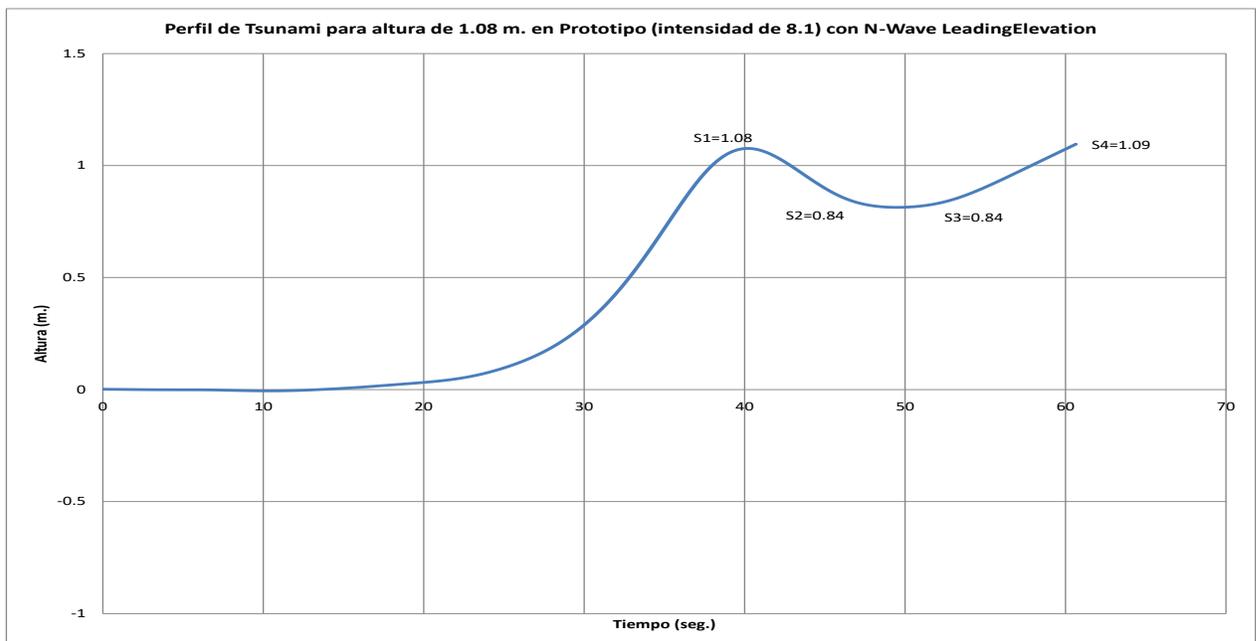
Figura 3. 28 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



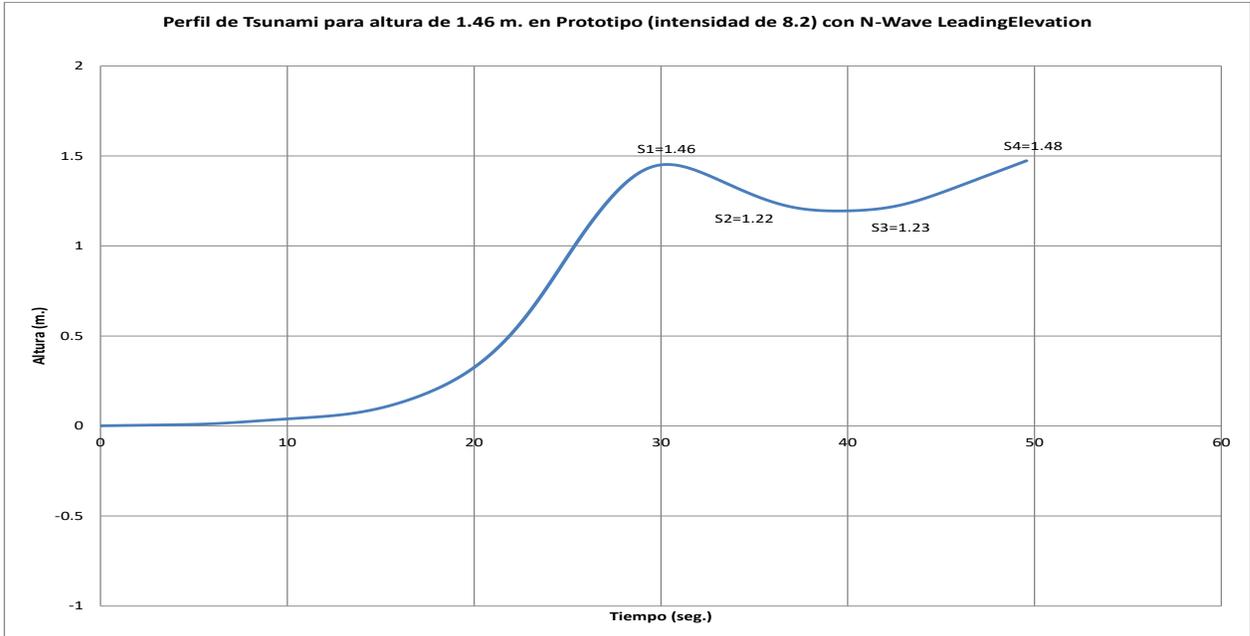
Figura 3. 29 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



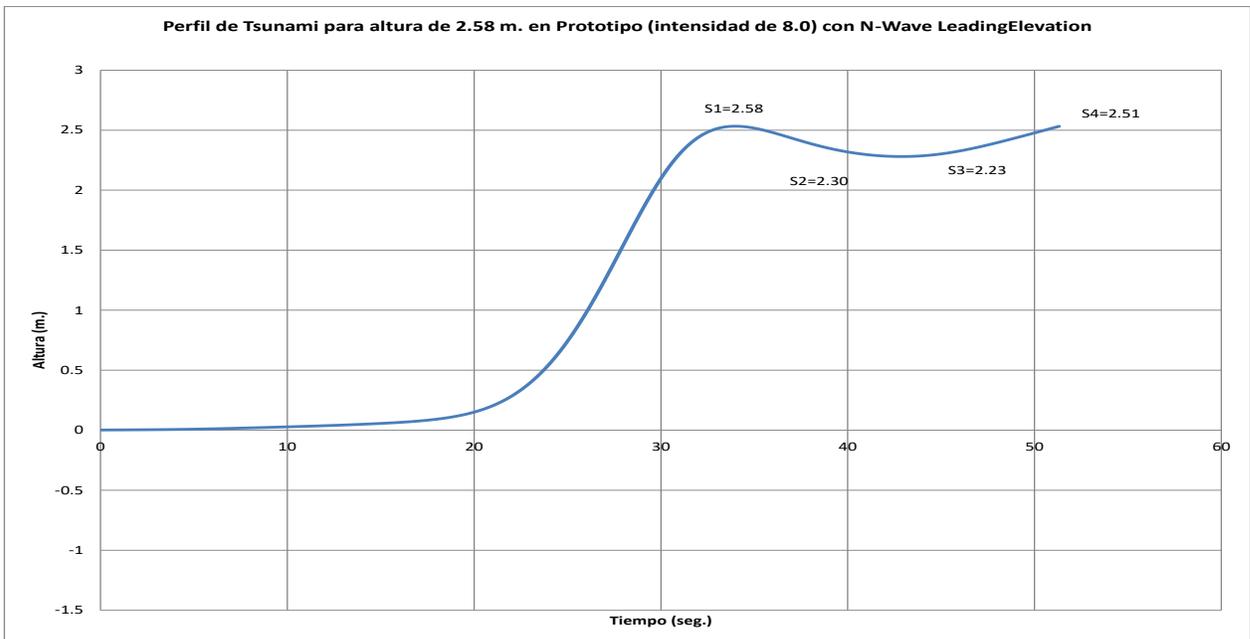
Figura 3. 30 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



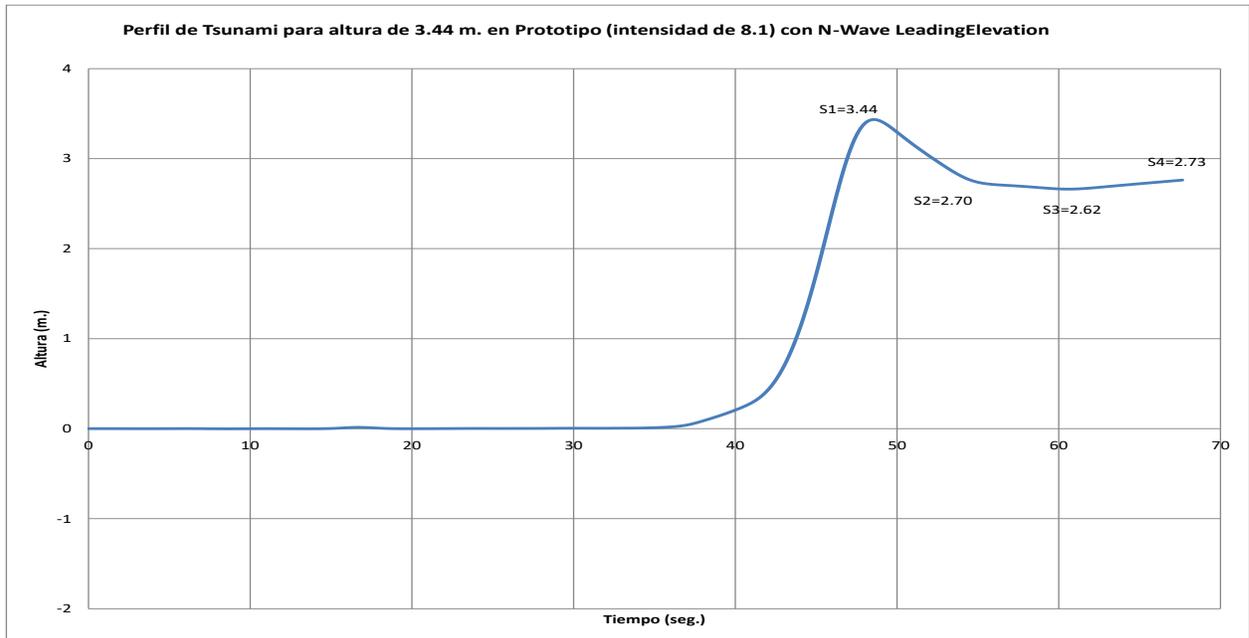
Gráfica 3. 7 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.8 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

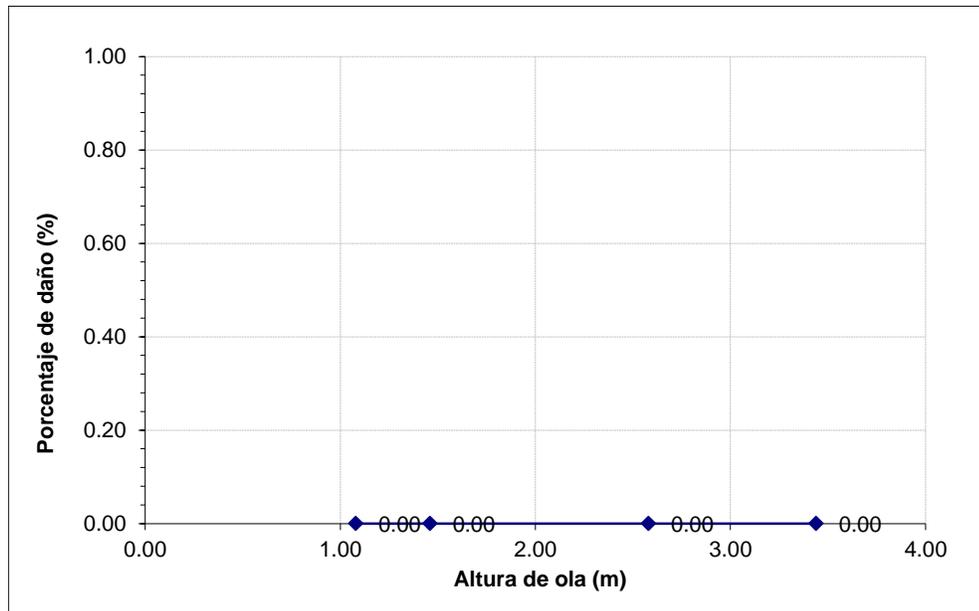


Gráfica 3.9 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 10 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- c) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 26 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Depression (LD).



Gráfica 3. 11 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.



Figura 3. 31 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 32 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 33 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 34 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 35 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



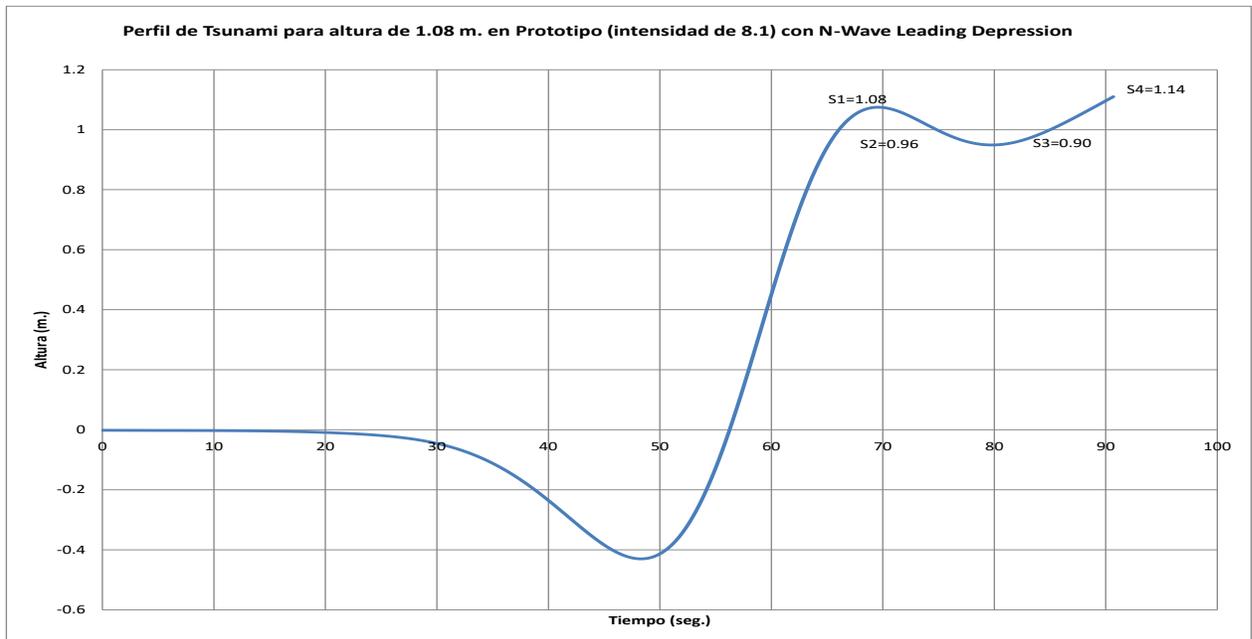
Figura 3. 36 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



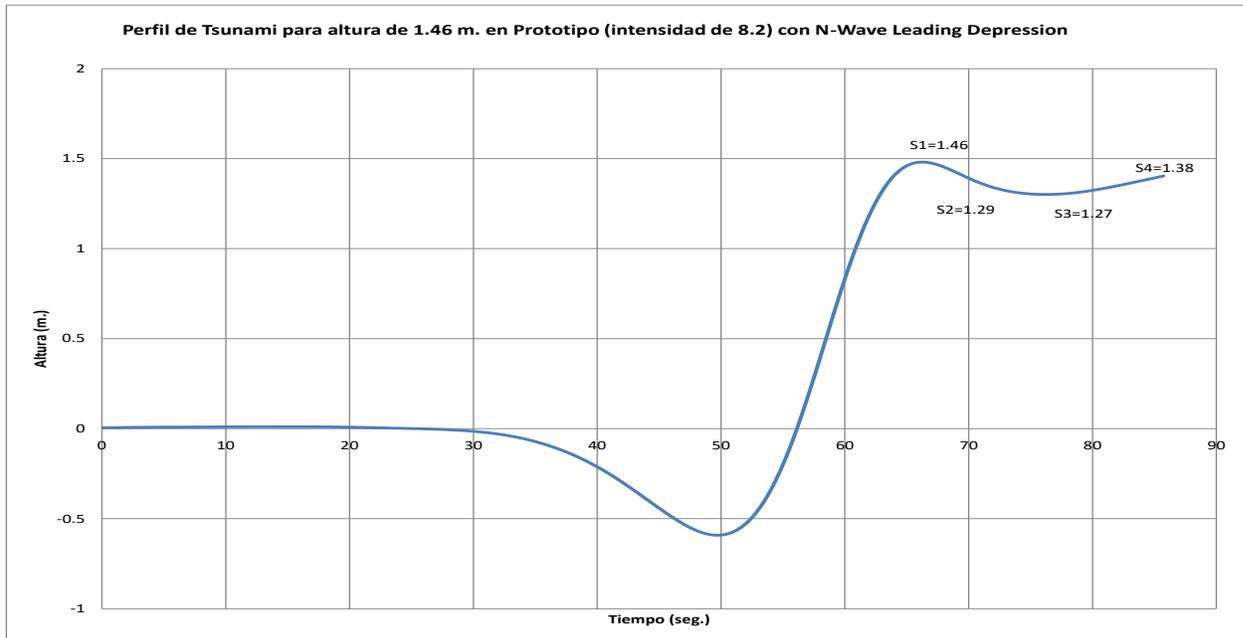
Figura 3. 37 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



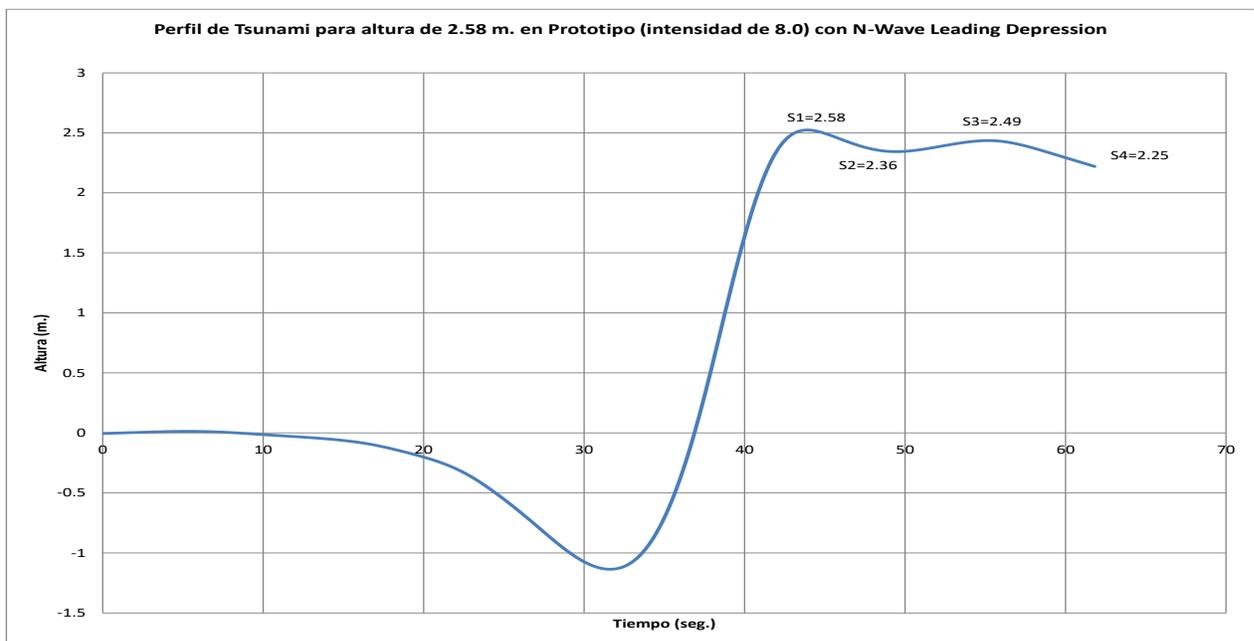
Figura 3. 38 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



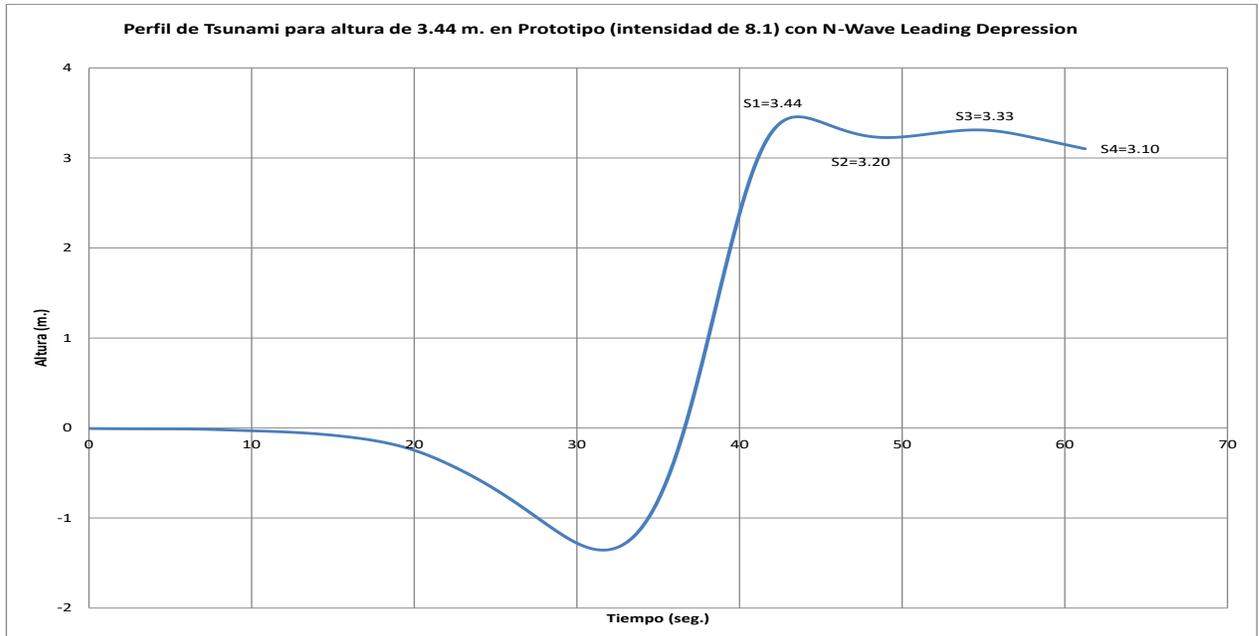
Gráfica 3. 12 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.13 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

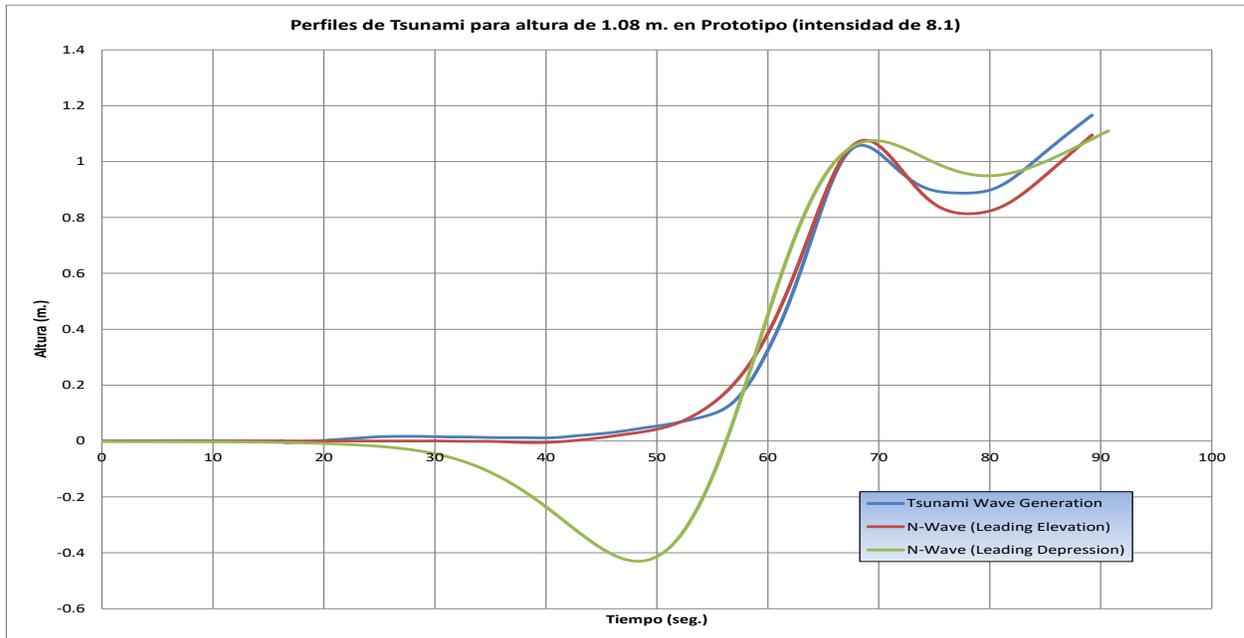


Gráfica 3.14 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.

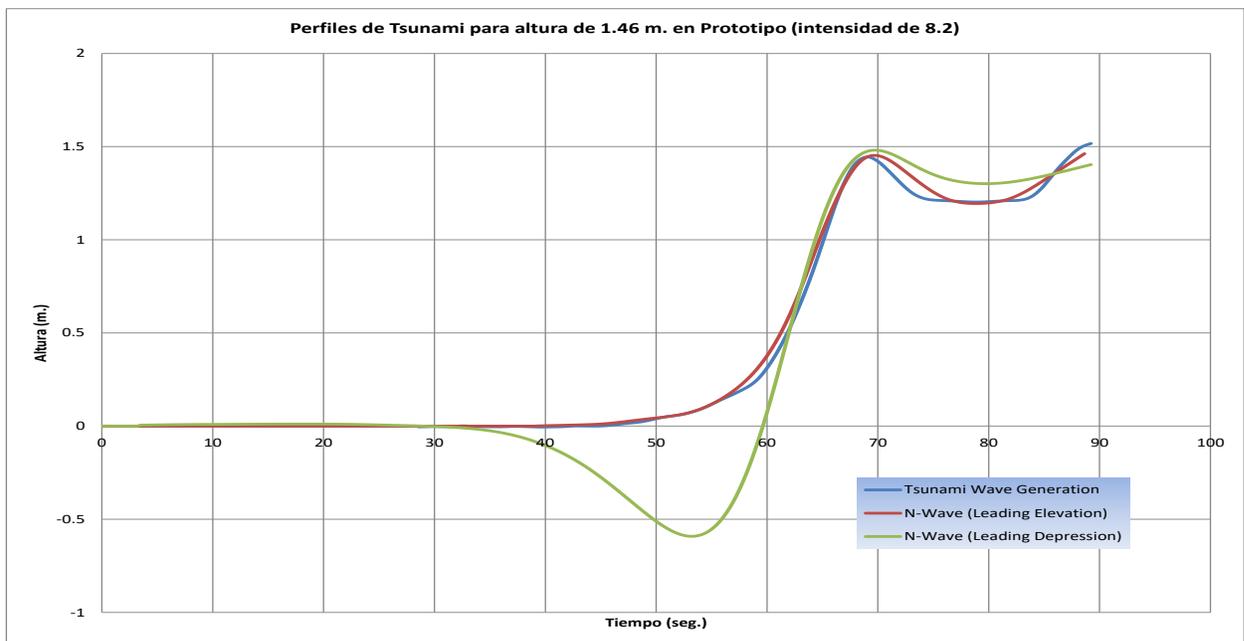


Gráfica 3. 15 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

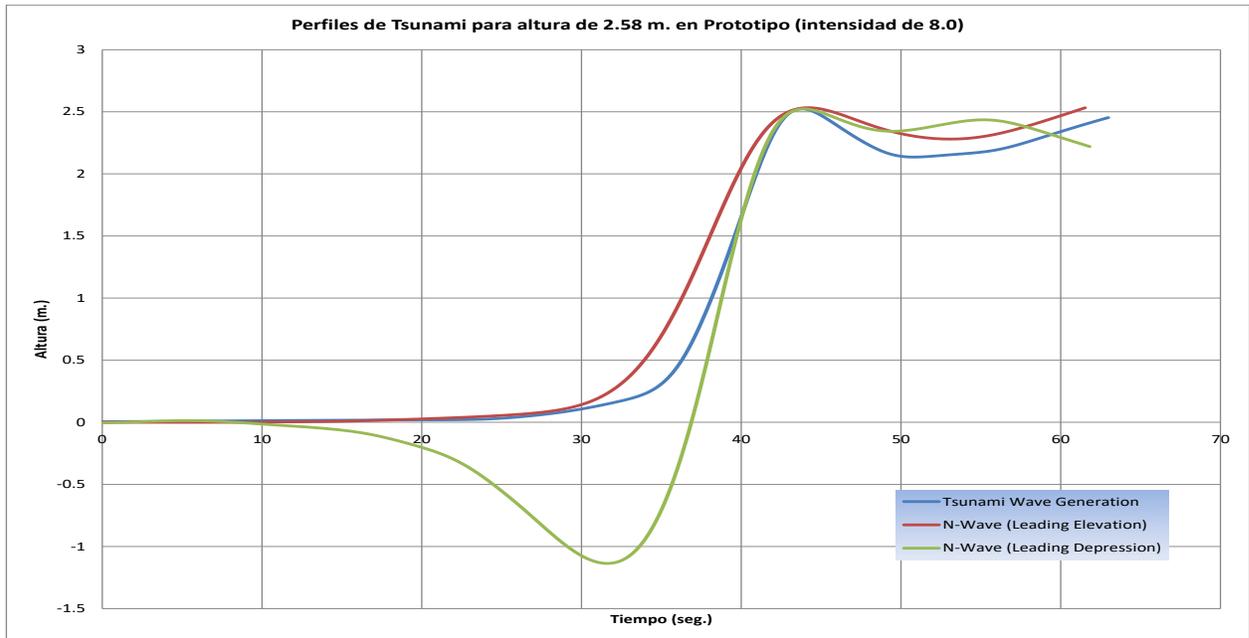
Finalmente se presentan los perfiles de tsunami obtenidos con los sistemas de generación los cuales son Onda solitaria, N-Wave Leading Elevation y Leading Depression, sobrepuestos en una sola gráfica.



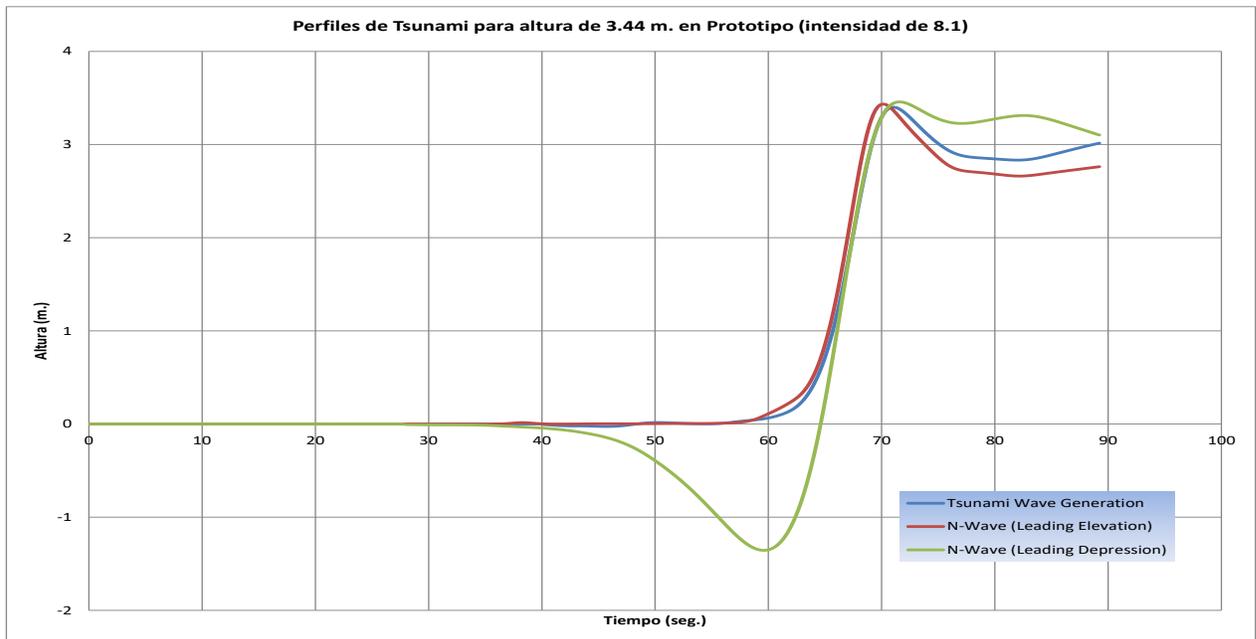
Gráfica 3.16 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.17 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.

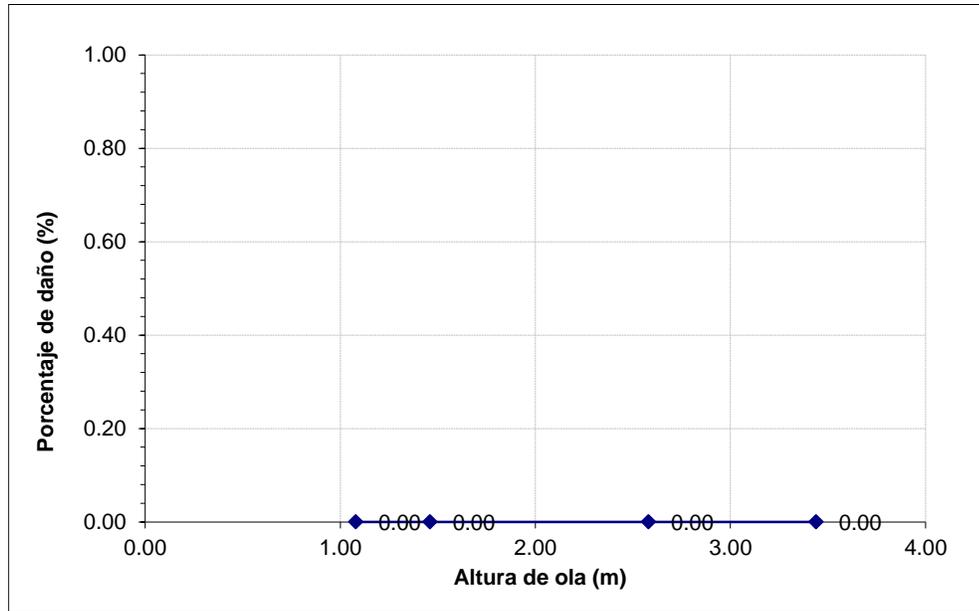


Gráfica 3. 18 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 19 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

2. A continuación se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de dichas pruebas para la sección Tipo cuerpo del rompeolas de Cuyutlán, Col., con pendiente de fondo de 0.044.
 - d) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 28 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis de Onda Solitaria.



Gráfica 3. 20 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.



Figura 3. 39 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 40 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 41 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 42 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 43 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



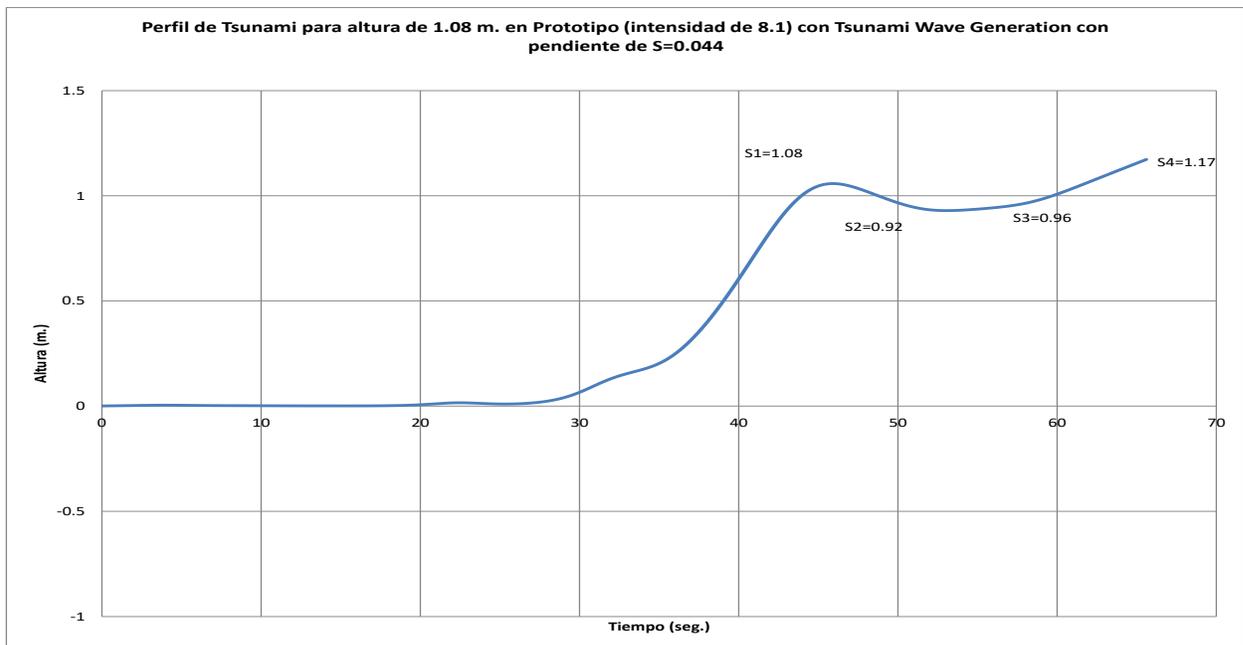
Figura 3. 44 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



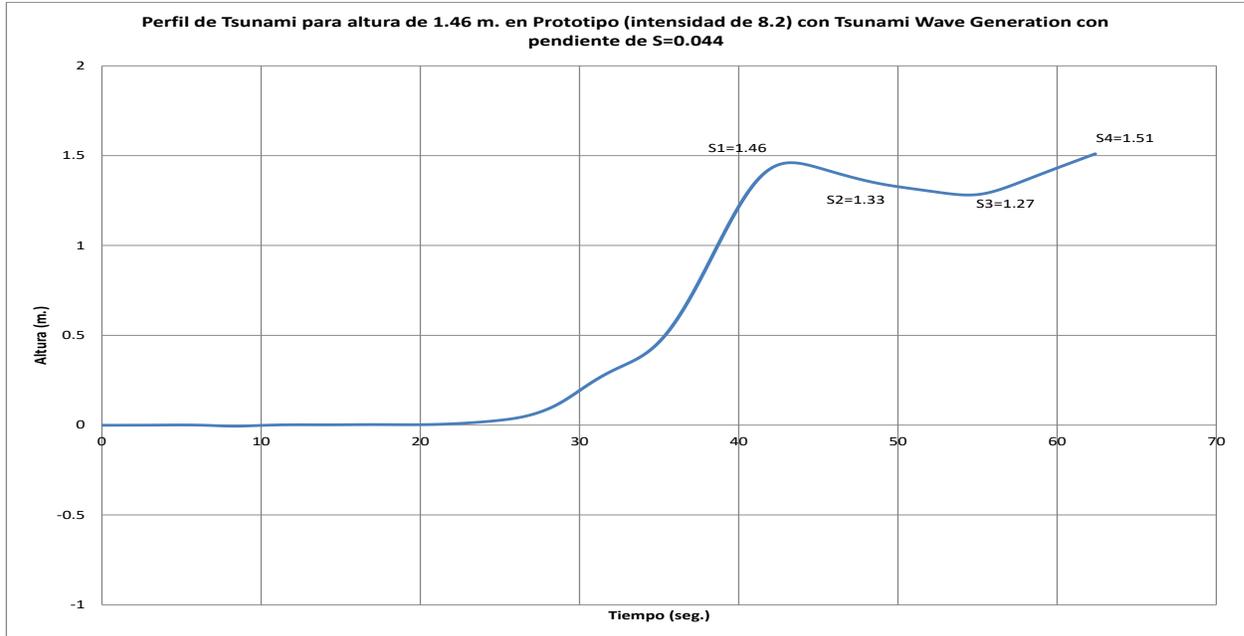
Figura 3. 45 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



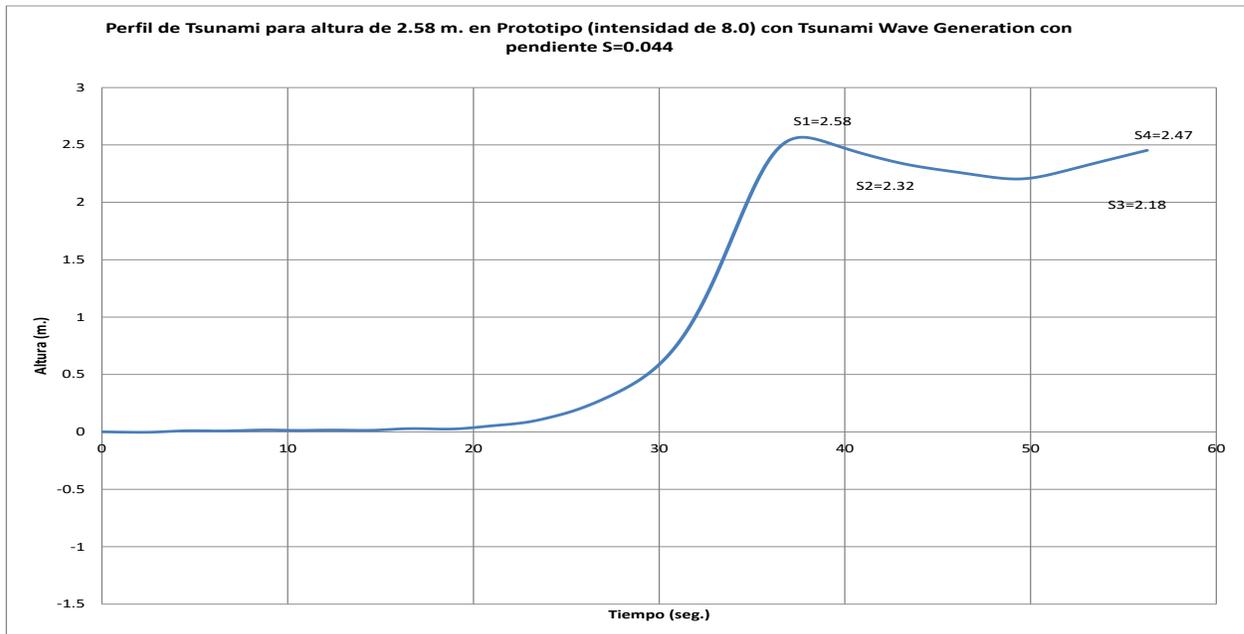
Figura 3. 46 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



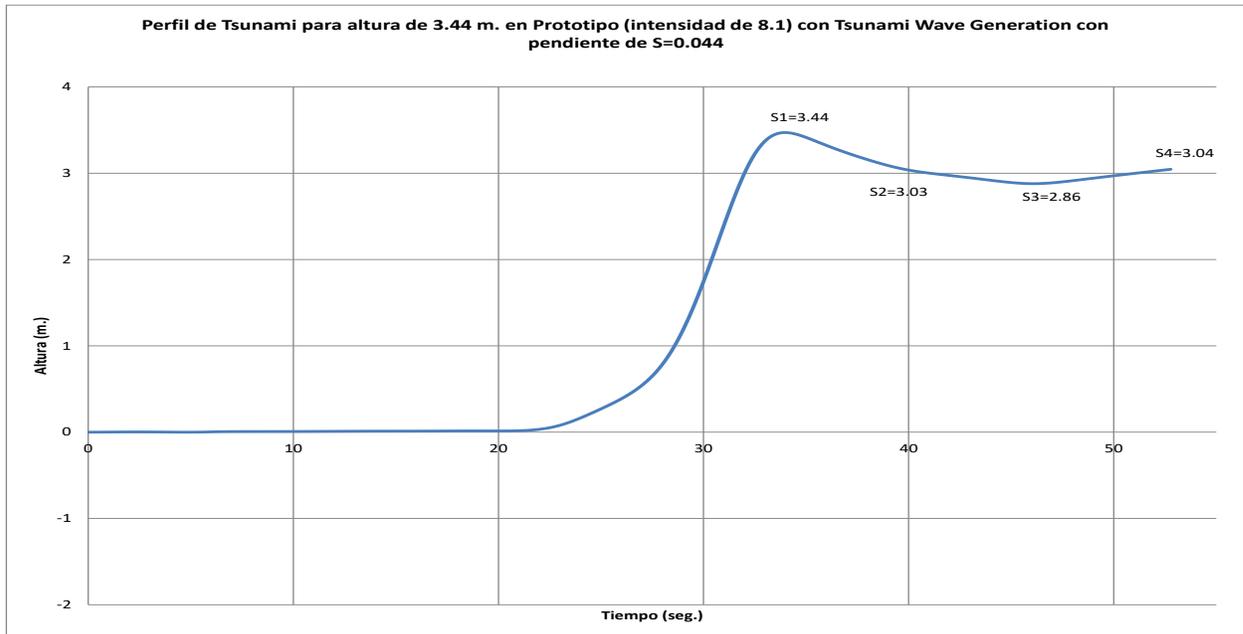
Gráfica 3. 21 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.22 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

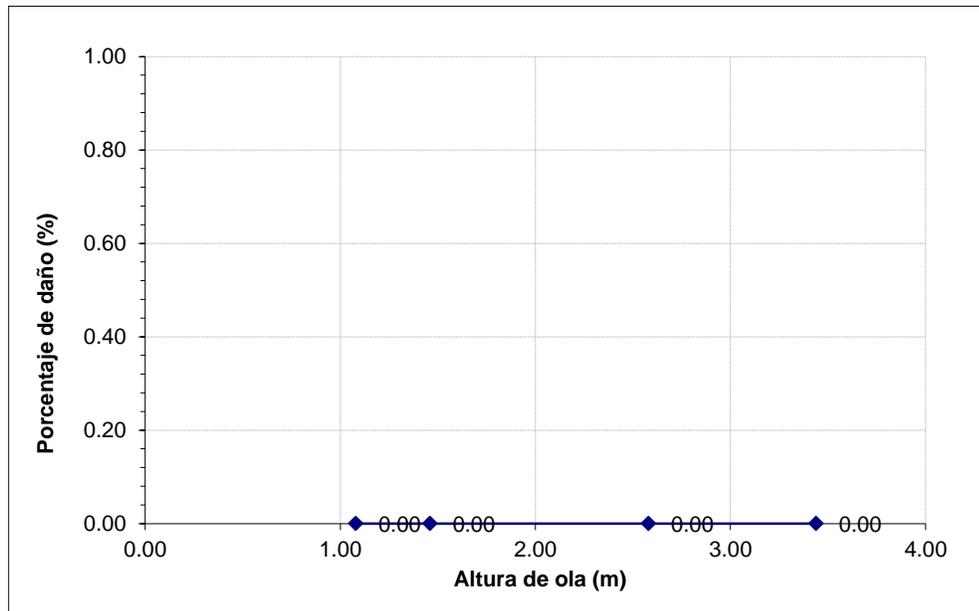


Gráfica 3.23 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 24 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- e) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 28 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Elevation (LE).



Gráfica 3. 25 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.



Figura 3. 47 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 48 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 49 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 50 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 51 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



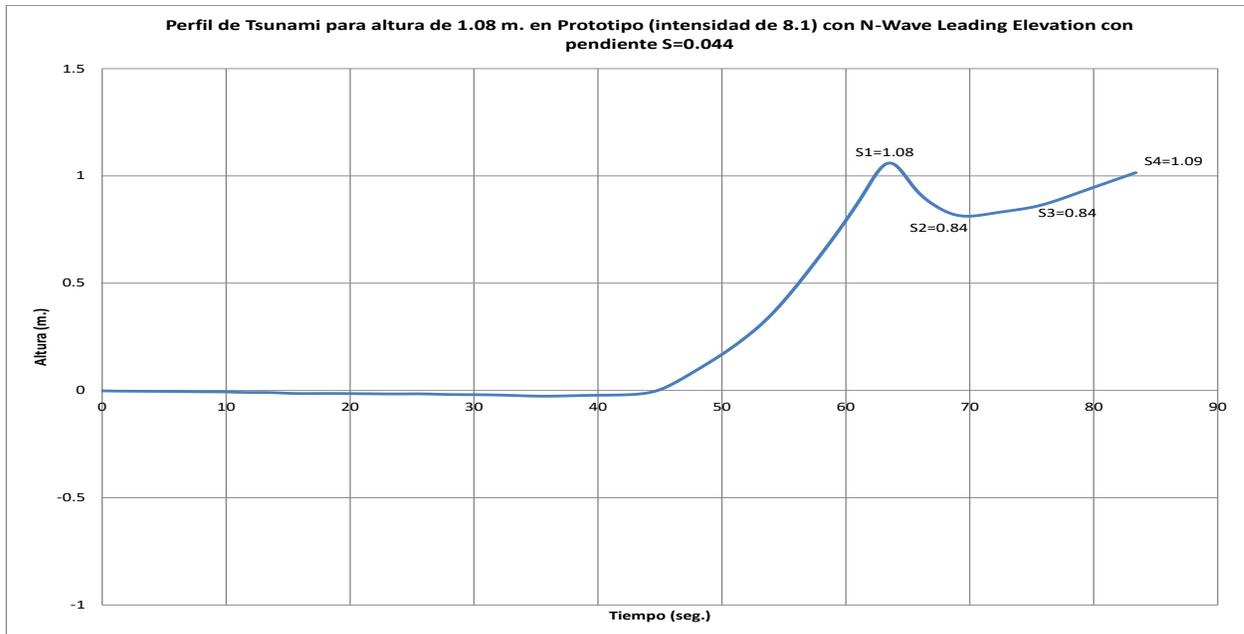
Figura 3. 52 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



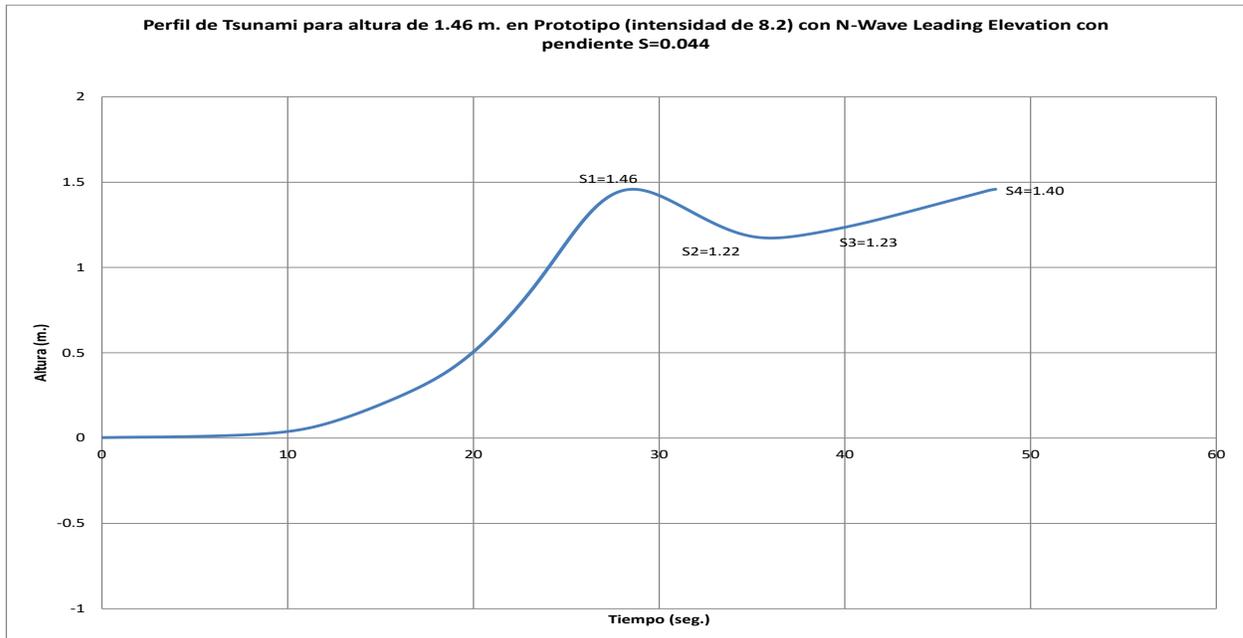
Figura 3. 53 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



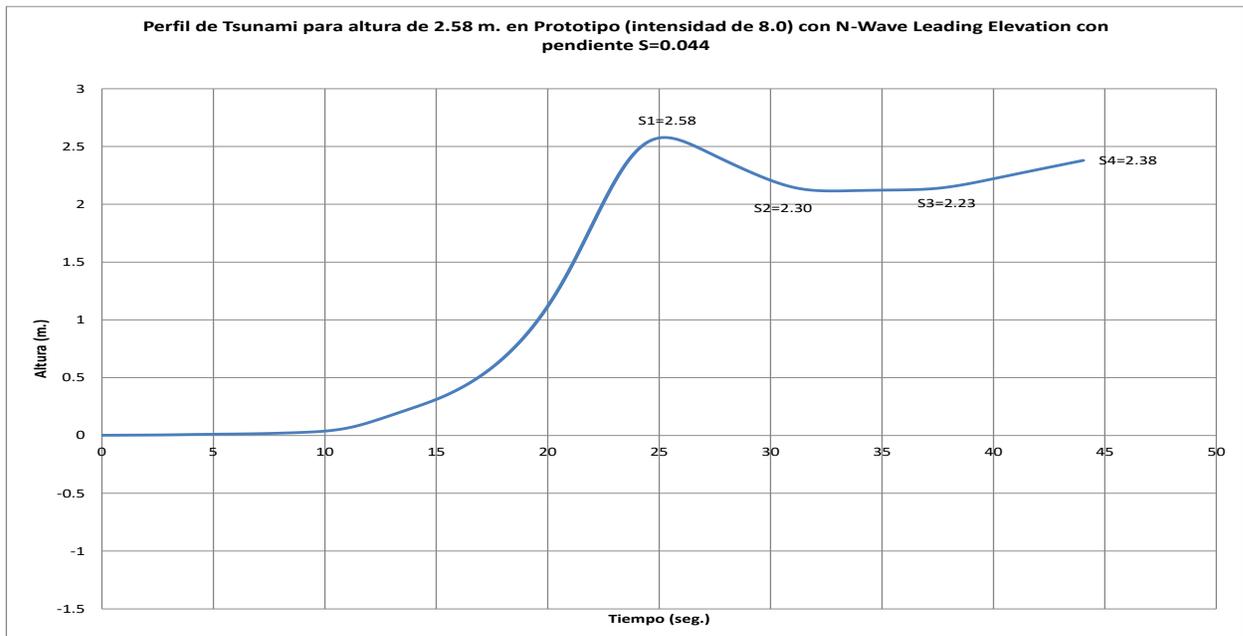
Figura 3. 54 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



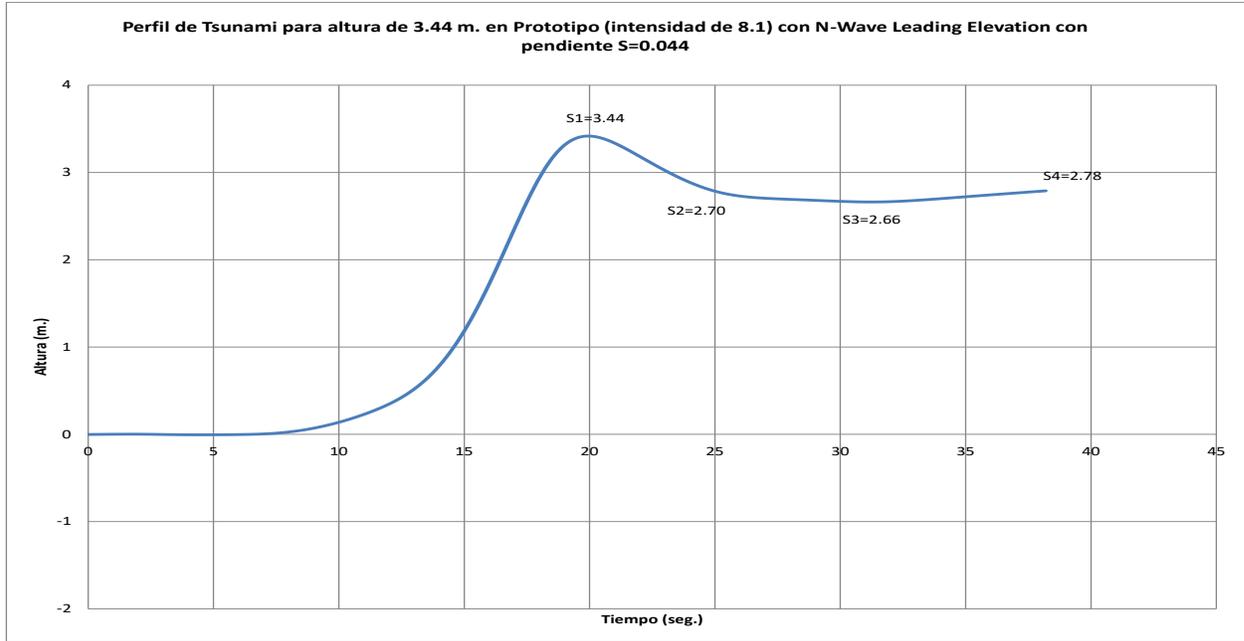
Gráfica 3. 26 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3. 27 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

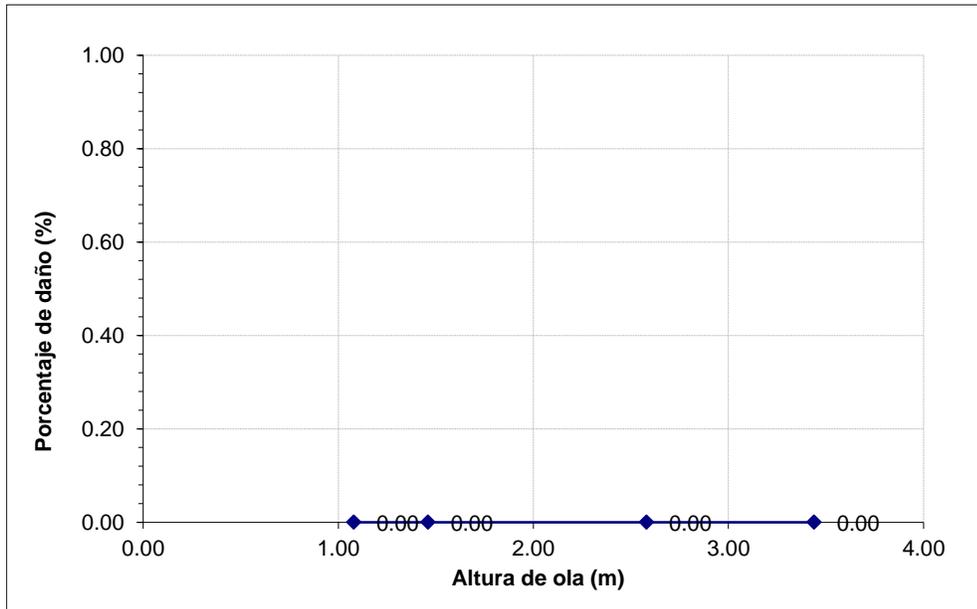


Gráfica 3. 28 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 29 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- f) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 28 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Depression (LD).



Gráfica 3. 30 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.



Figura 3. 55 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 56 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 57 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 58 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 59 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



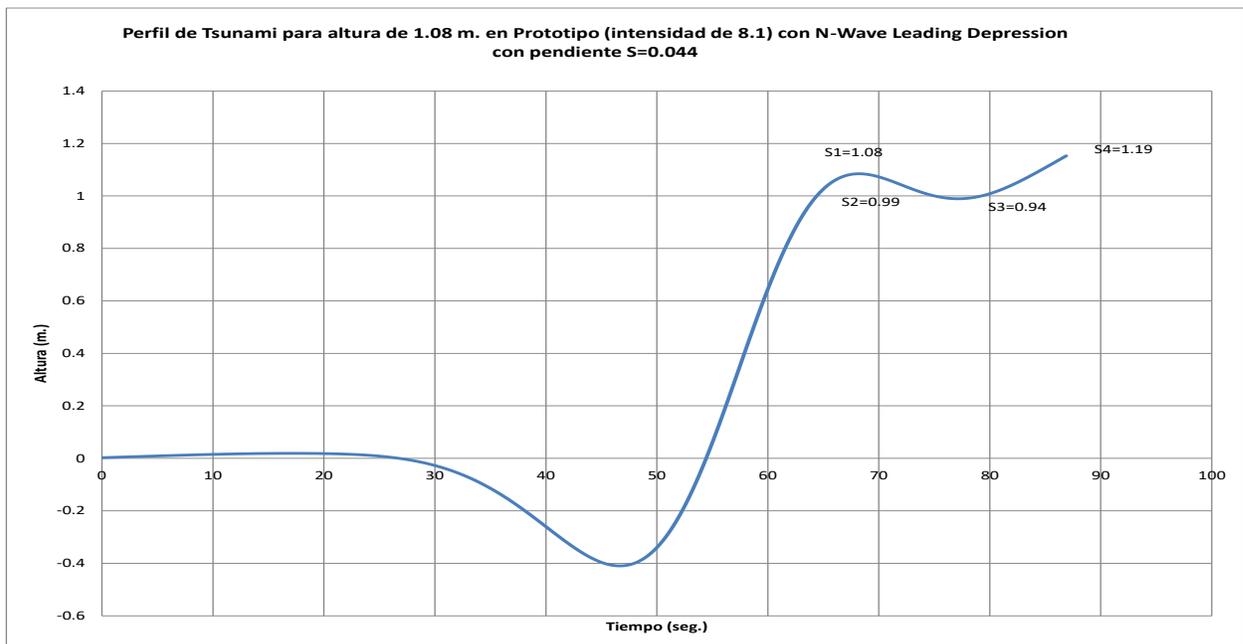
Figura 3. 60 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



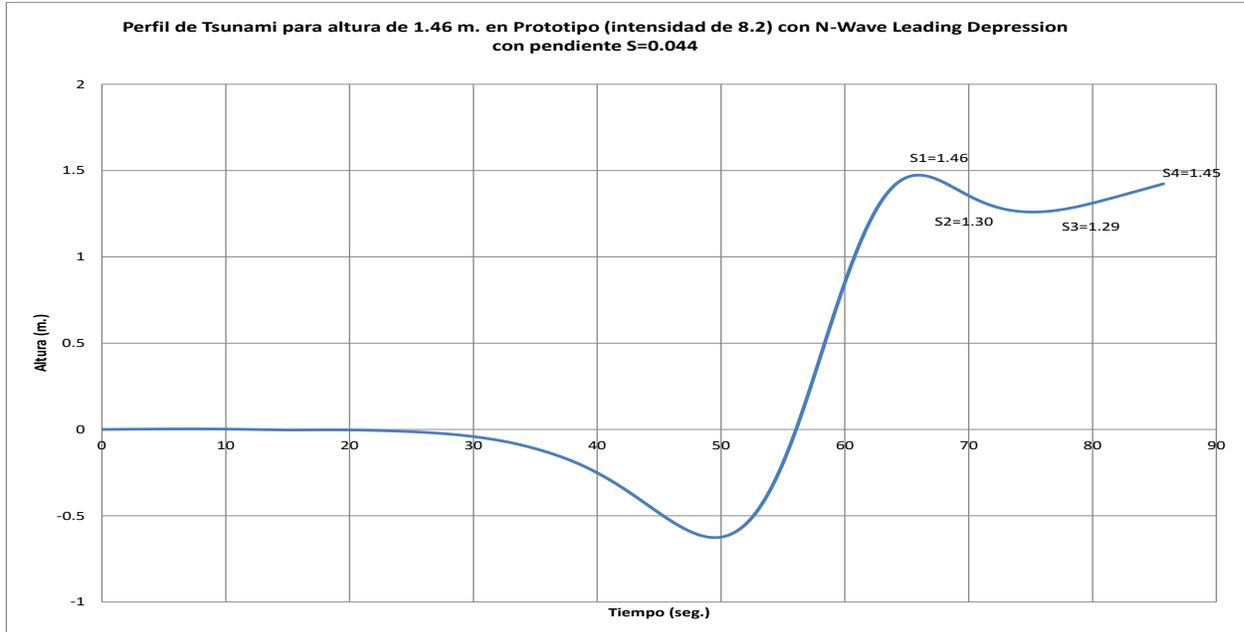
Figura 3. 61 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



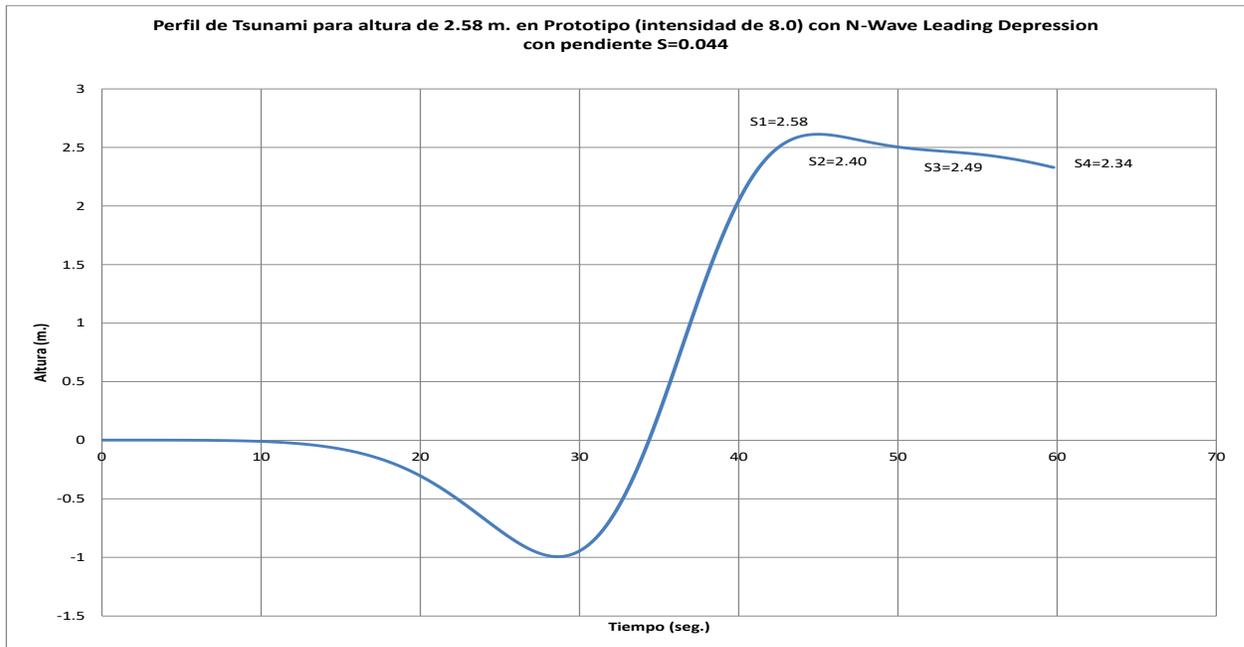
Figura 3. 62 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



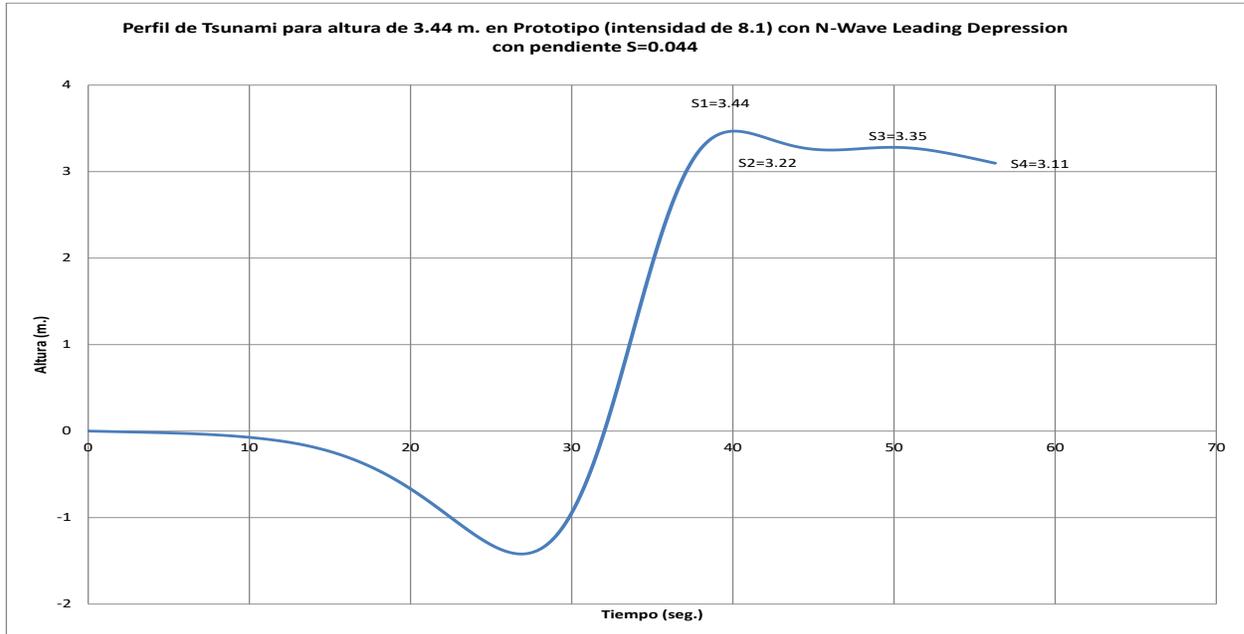
Gráfica 3. 31 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3. 32 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

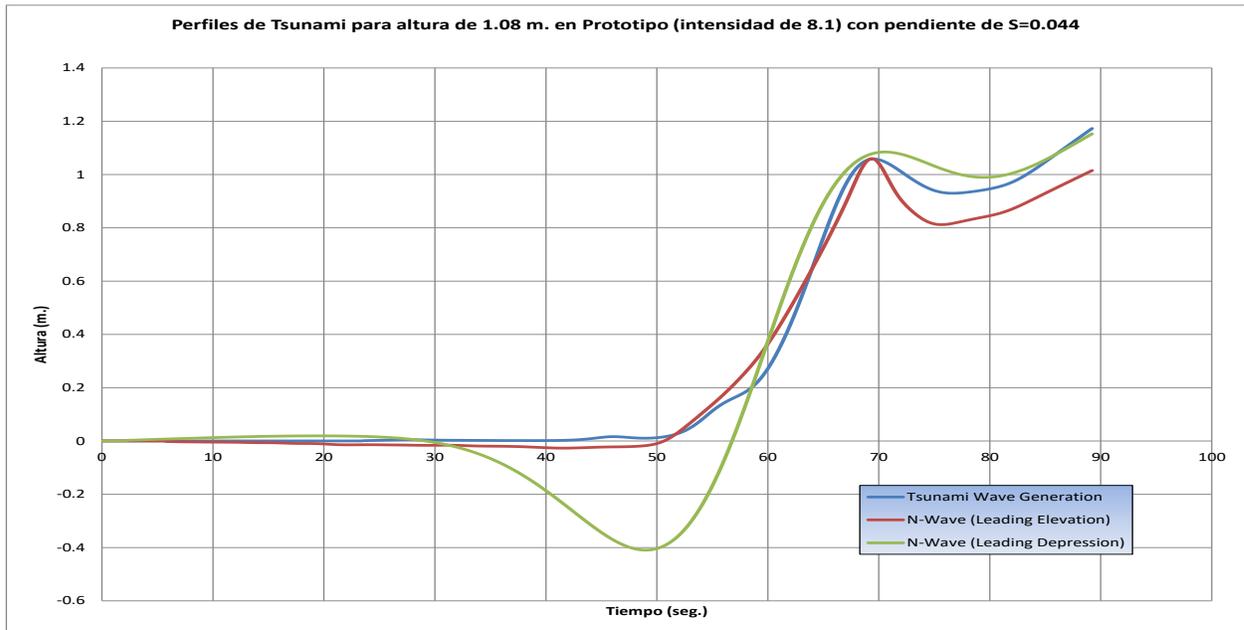


Gráfica 3. 33 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.

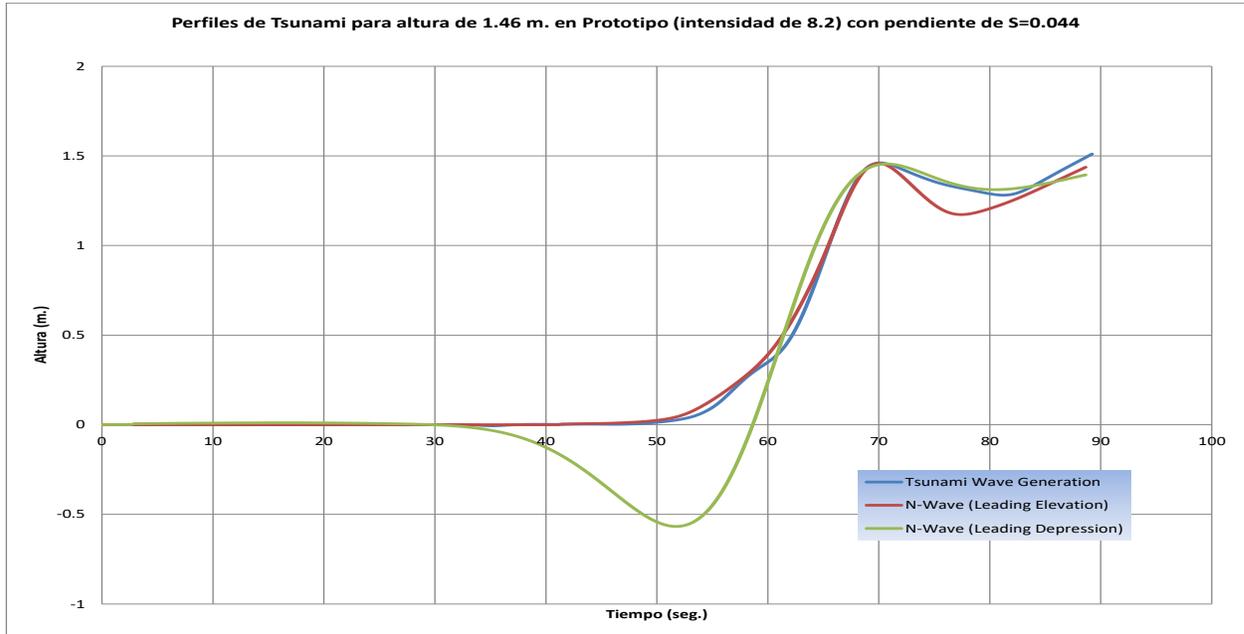


Gráfica 3. 34 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

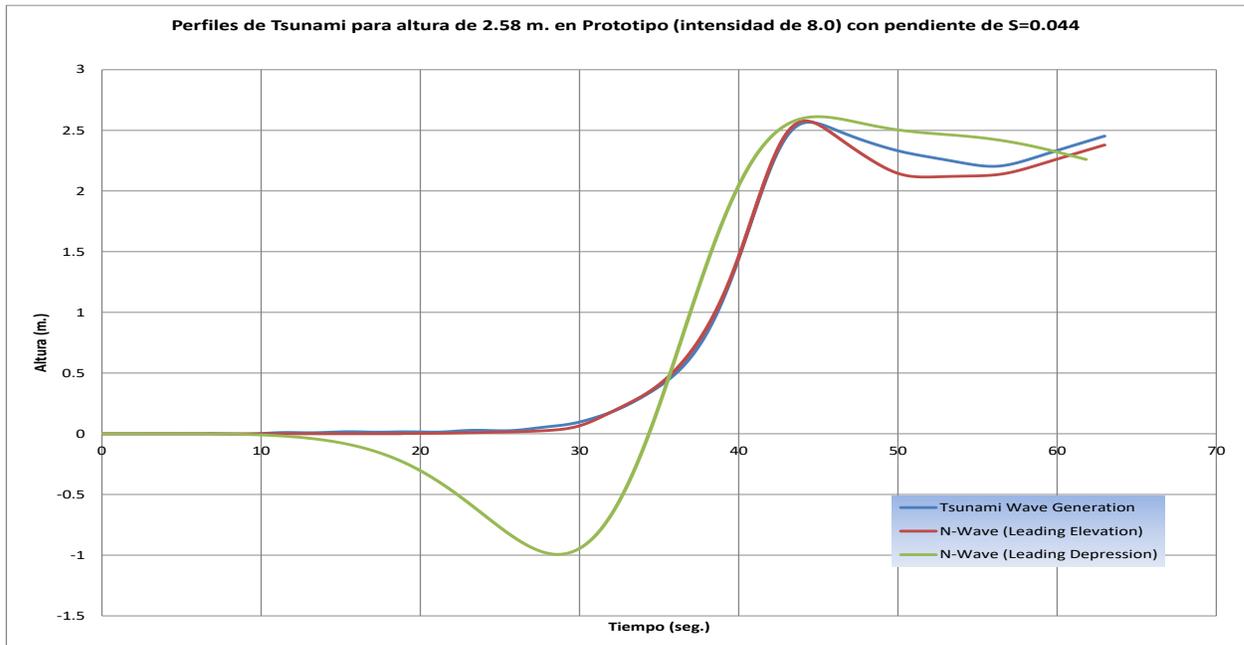
Finalmente se presentan los perfiles de tsunami obtenidos con los sistemas de generación los cuales son Onda solitaria, N-Wave Leading Elevation y Leading Depression, sobrepuestos en una sola gráfica.



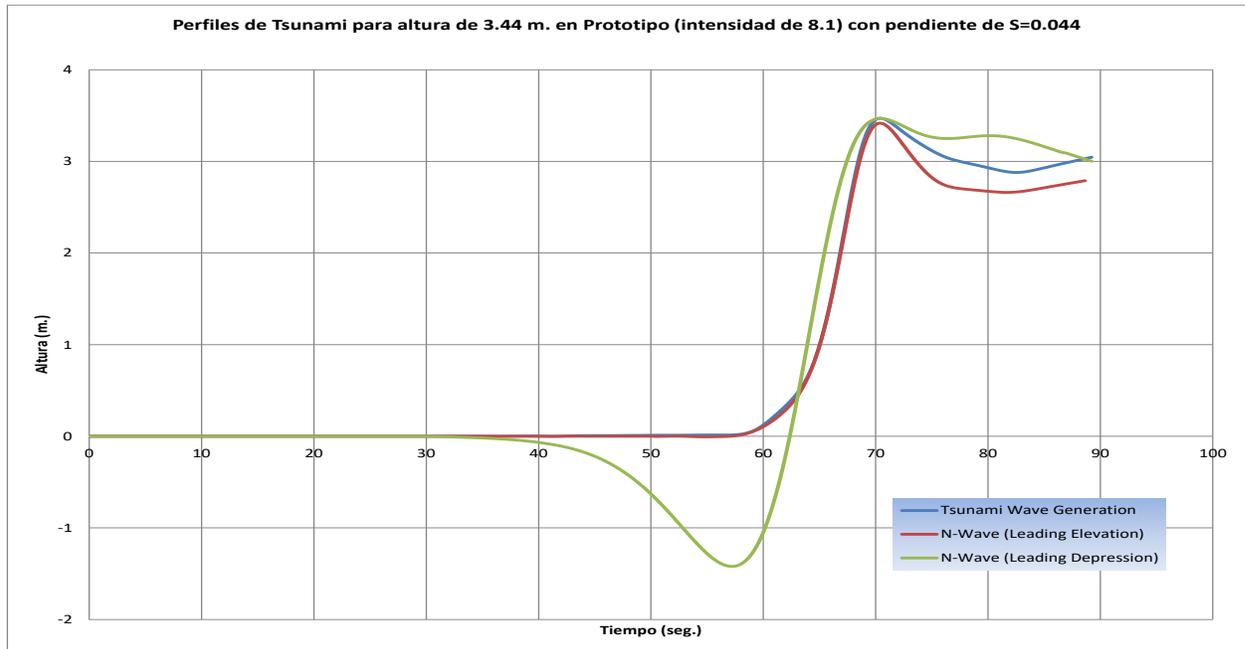
Gráfica 3.35 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.36 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.

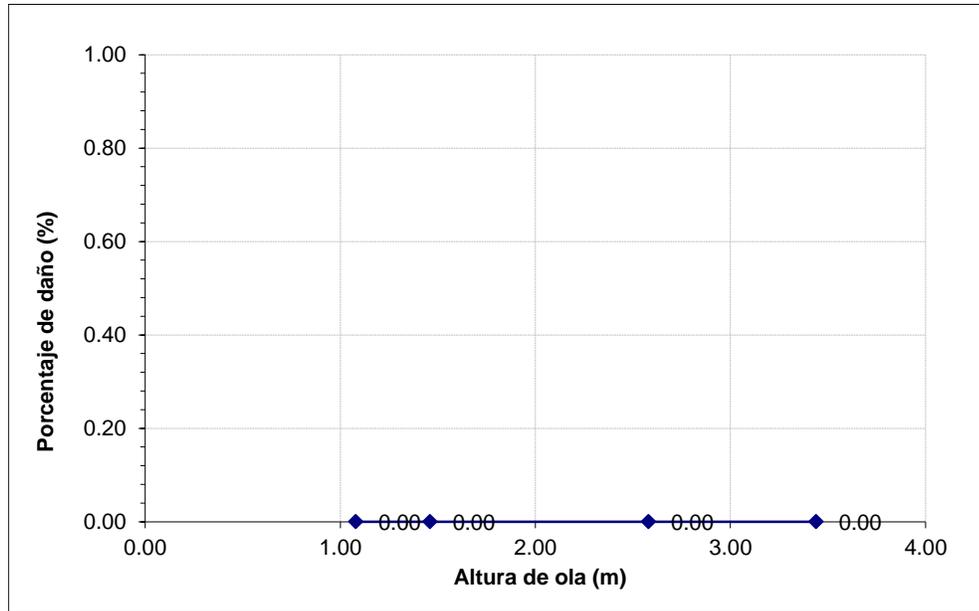


Gráfica 3.37 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3.38 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

3. A continuación se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de dichas pruebas para la sección Tipo cuerpo del rompeolas de Cuyutlán, Col., con pendiente de fondo de 0.054.
 - g) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 31 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis de Onda Solitaria.



Gráfica 3. 39 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con onda solitaria.



Figura 3. 63 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 64 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 65 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 66 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 67 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



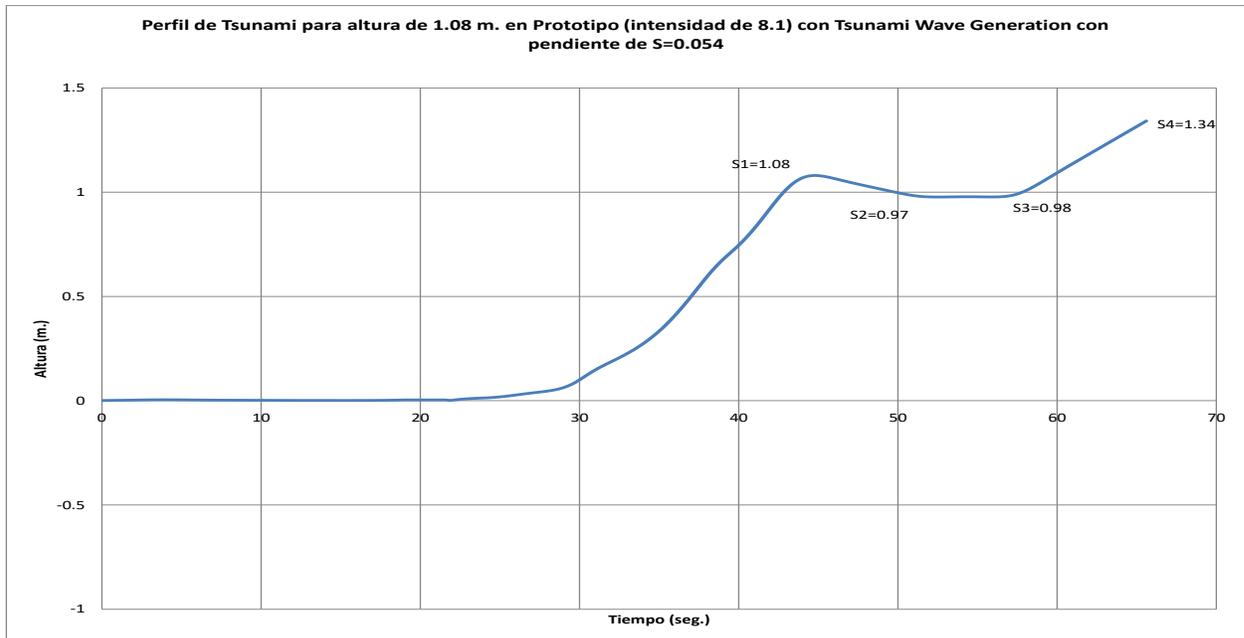
Figura 3. 68 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



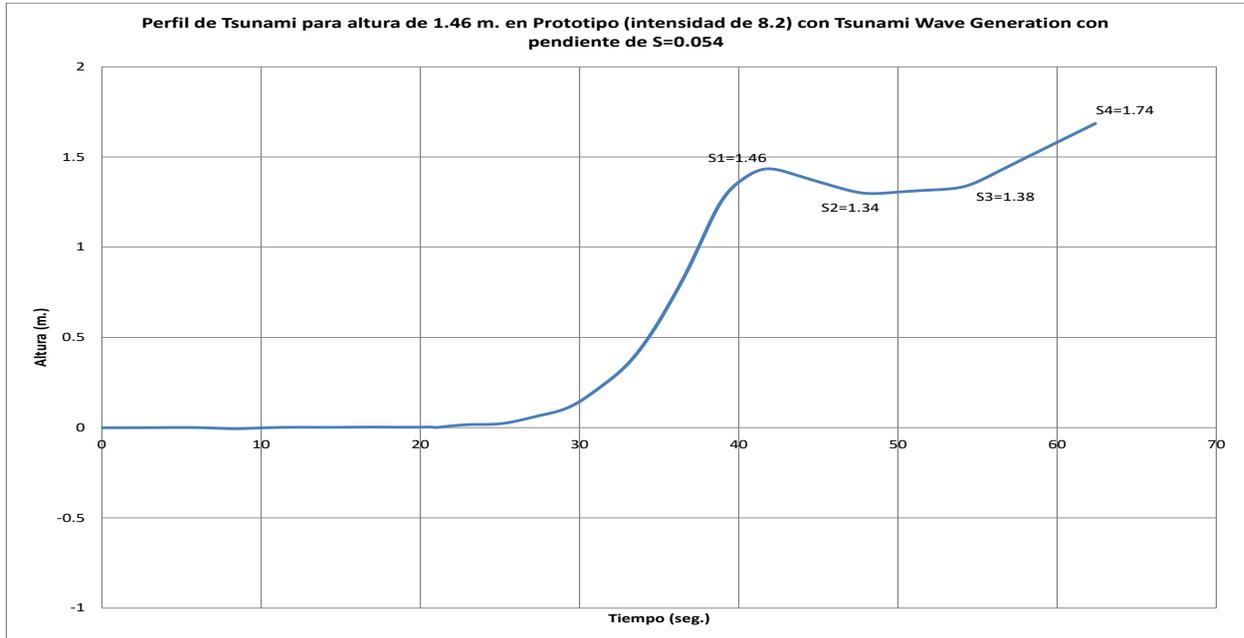
Figura 3. 69 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



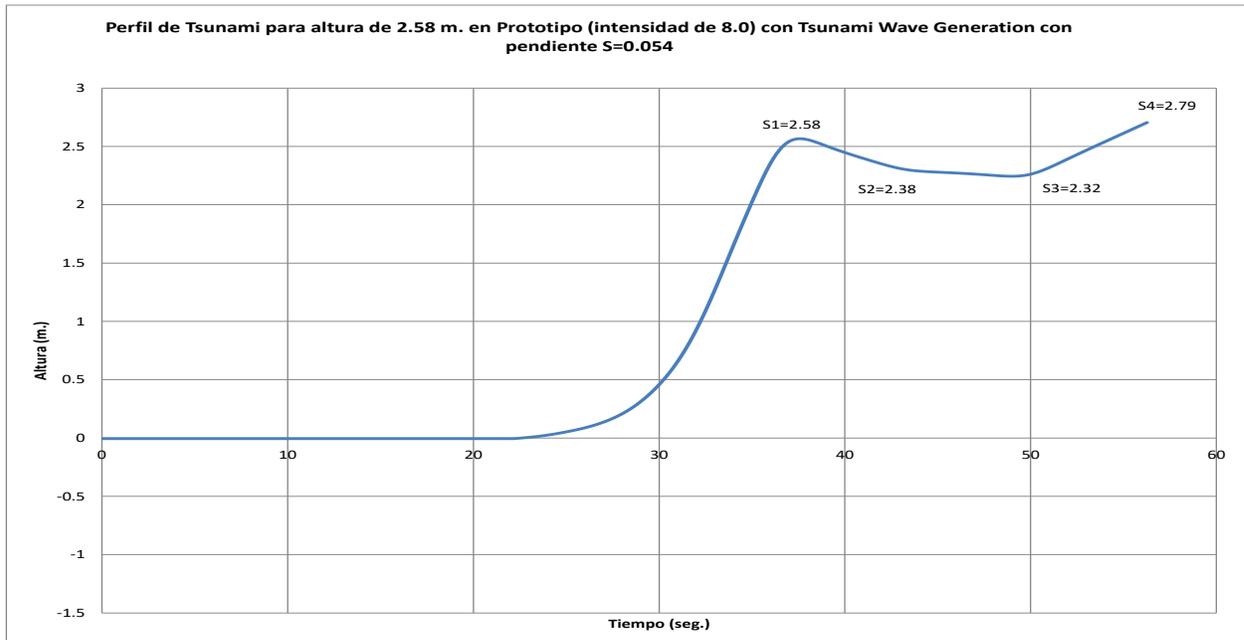
Figura 3. 70 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



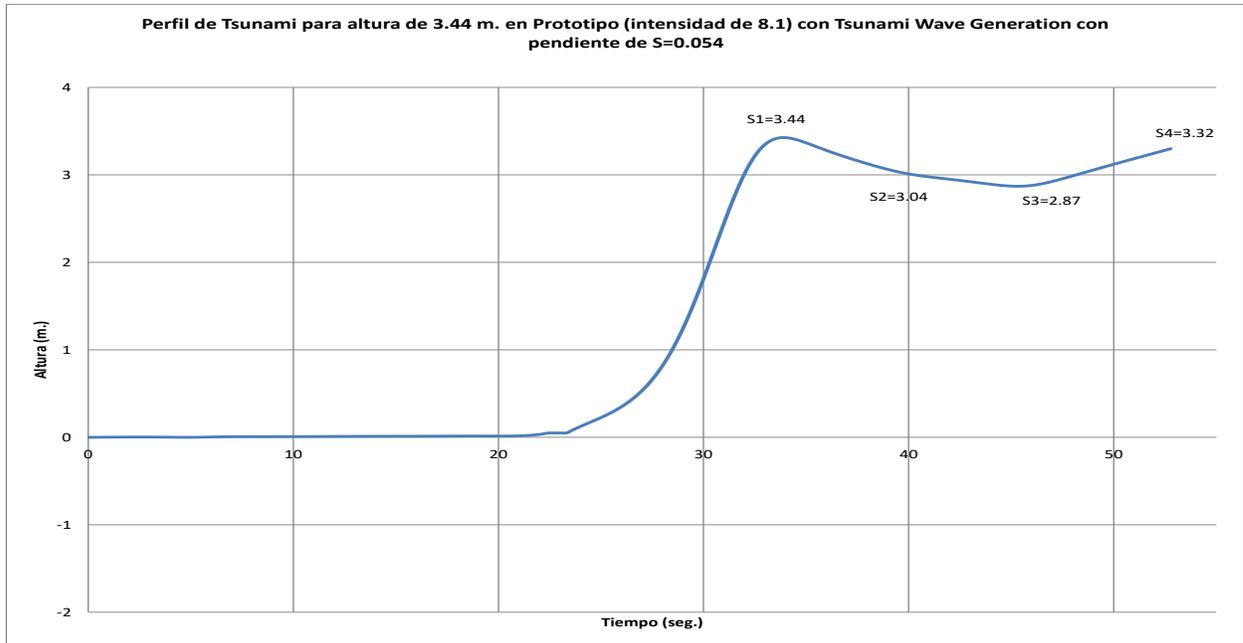
Gráfica 3. 40 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.41 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

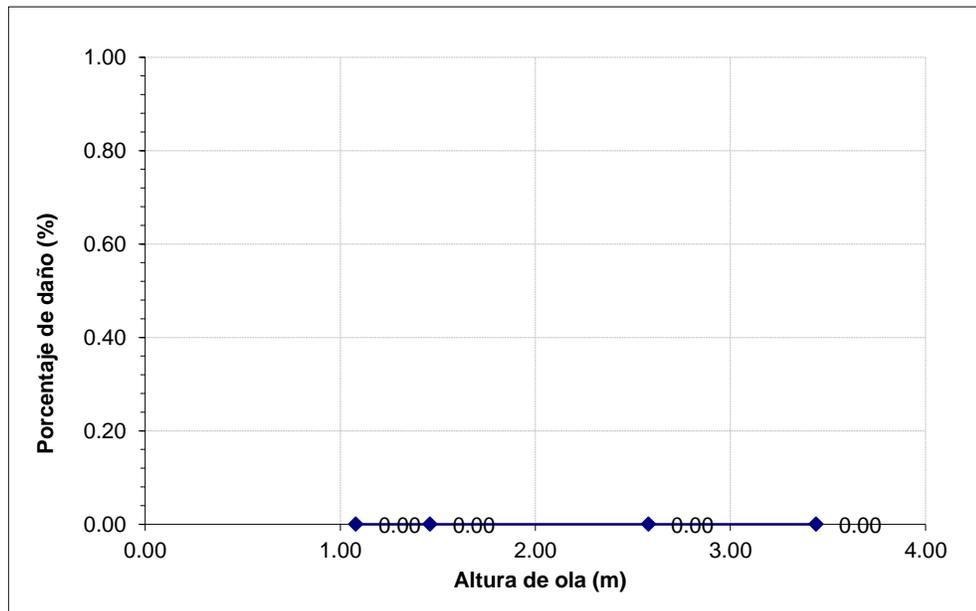


Gráfica 3.42 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 43 Perfil del tsunami generado con Onda Solitaria para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- h) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 31 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Elevation (LE).



Gráfica 3. 44 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Elevation.



Figura 3. 71 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 72 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 73 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 74 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 75 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



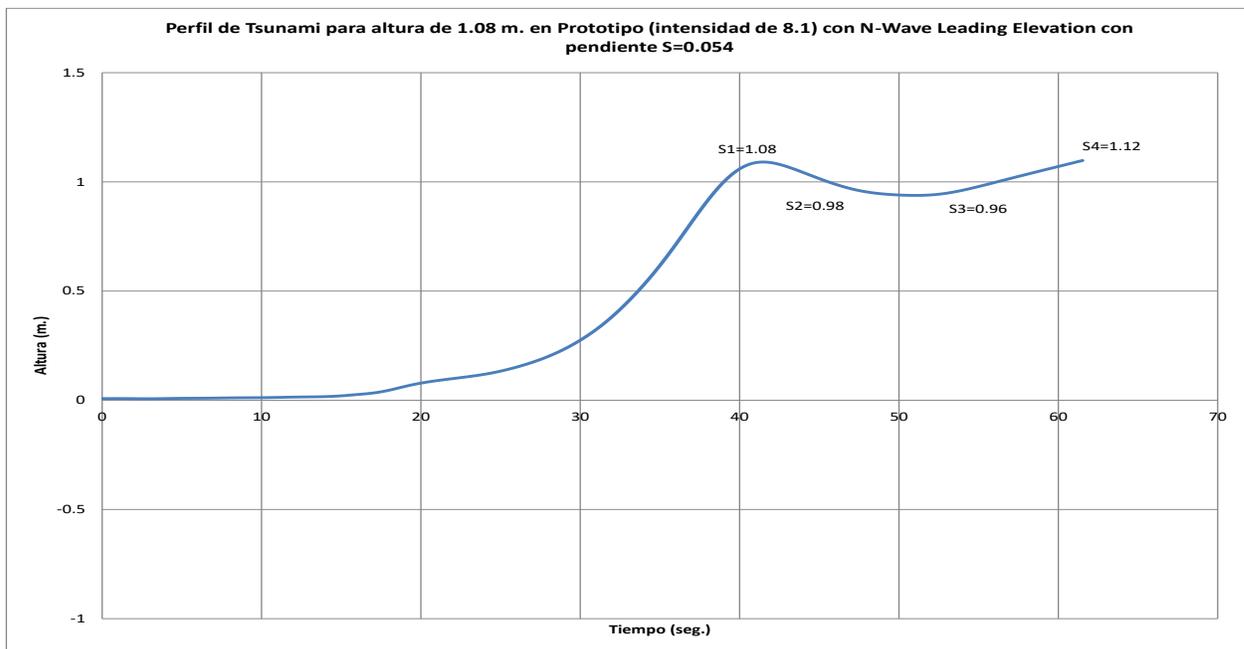
Figura 3. 76 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



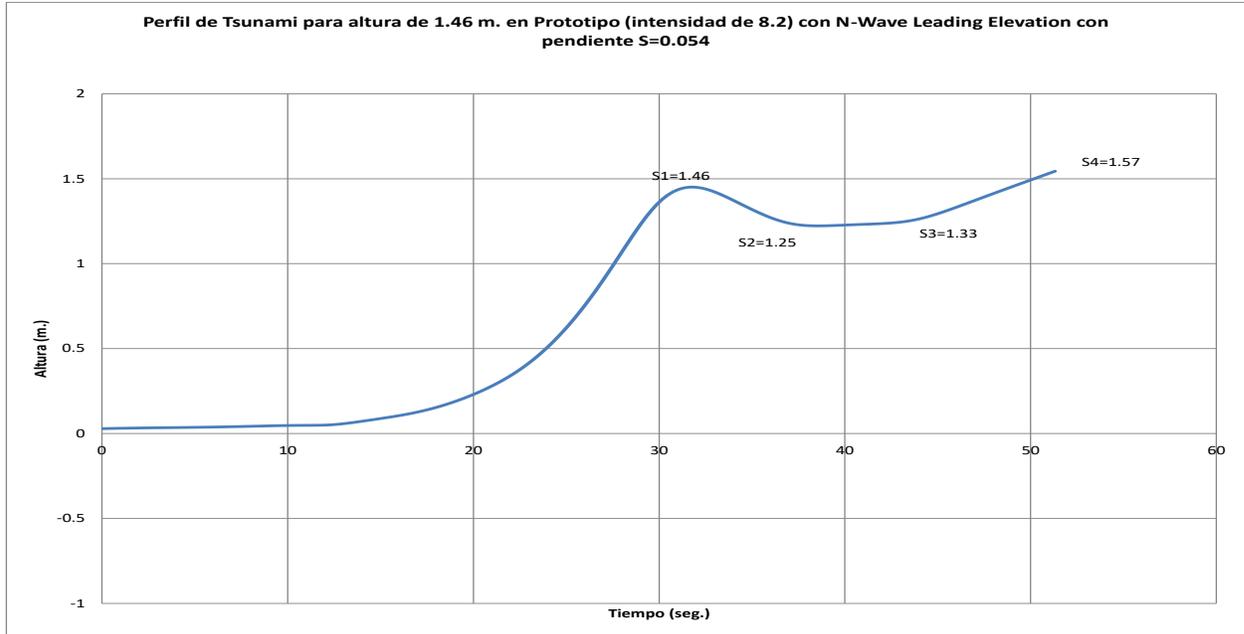
Figura 3. 77 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



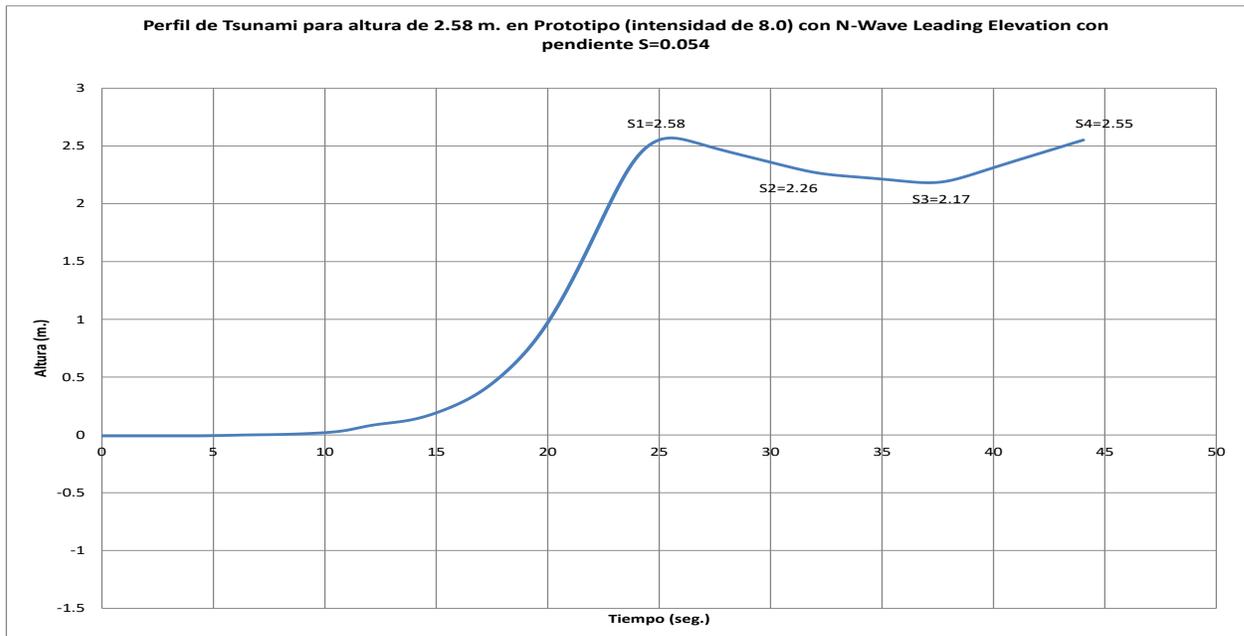
Figura 3. 78 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LE para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



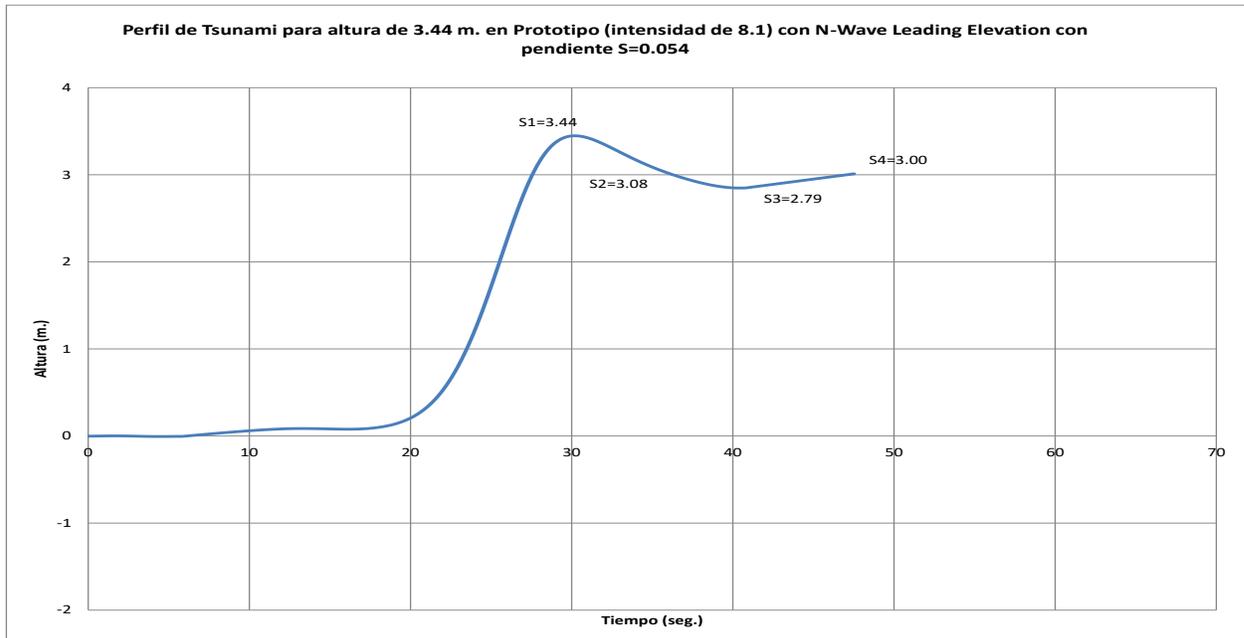
Gráfica 3. 45 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.46 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

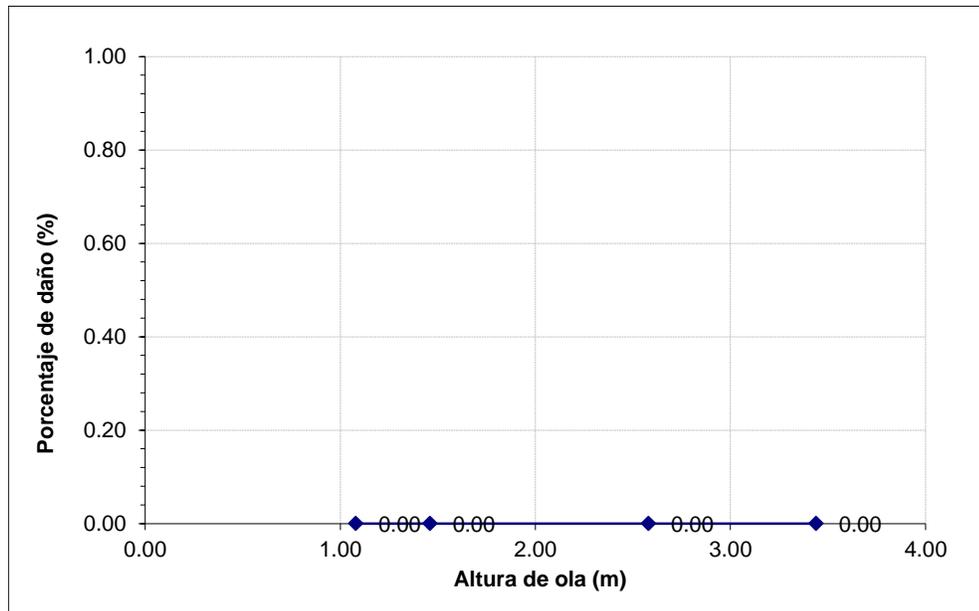


Gráfica 3.47 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.



Gráfica 3. 48 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Elevation para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

- i) Se realizaron las pruebas en el modelo hidráulico para una altura de ola del tsunami de 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. al pie del generador de oleaje, para la profundidad de 31 m. con respecto al Nivel Bajamar Medio Inferior (N.B.M.I) y con el sistemas de generación de tsunamis N-Wave con la modalidad Leading Depression (LD).



Gráfica 3. 49 Resultados de estabilidad estructural de la sección Cuerpo del rompeolas de Cuyutlan, Col. con alturas de ola 1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m. con 0 piezas desplazadas después de los ensayos de tsunami con N-Wave Leading Depression.



Figura 3. 79 Estructura antes de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 80 Estructura después de generar el tsunami de 1.08 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 81 Estructura antes de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 82 Estructura después de generar el tsunami de 1.46 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



Figura 3. 83 Estructura antes de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



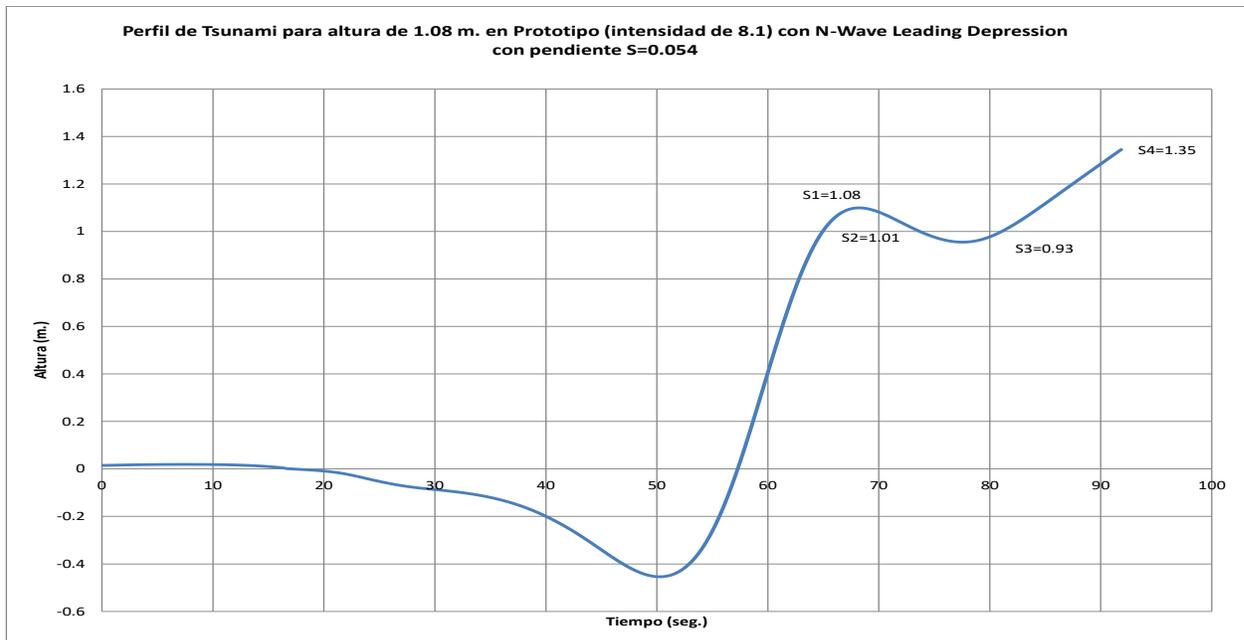
Figura 3. 84 Estructura después de generar el tsunami de 2.58 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



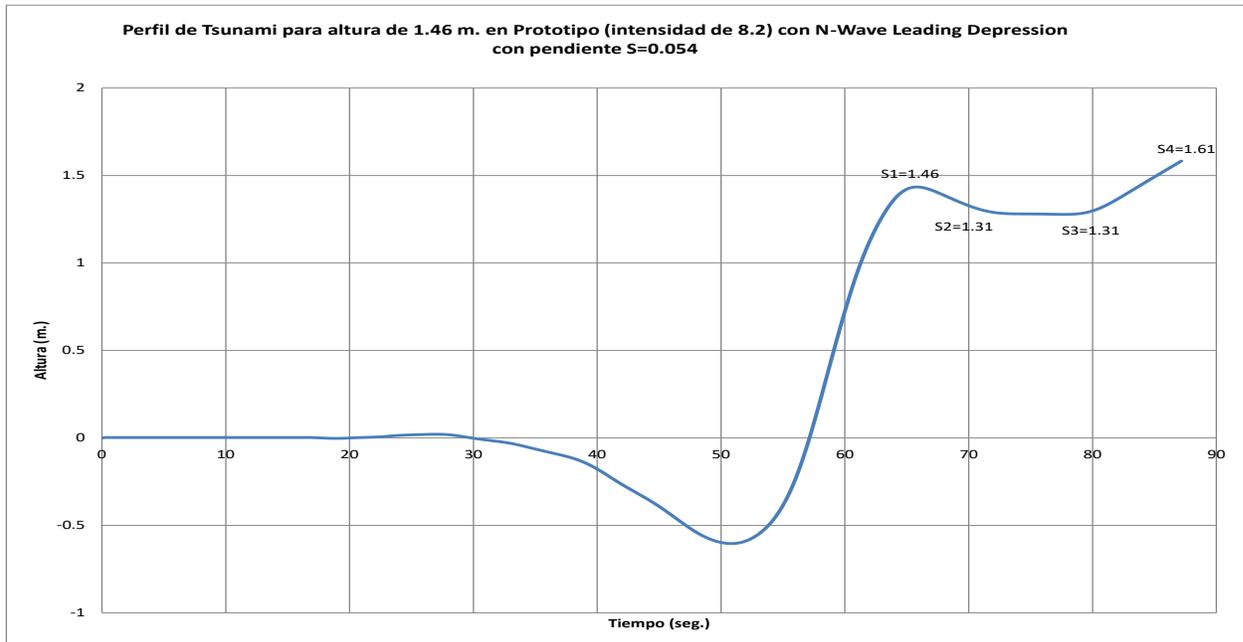
Figura 3. 85 Estructura antes de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



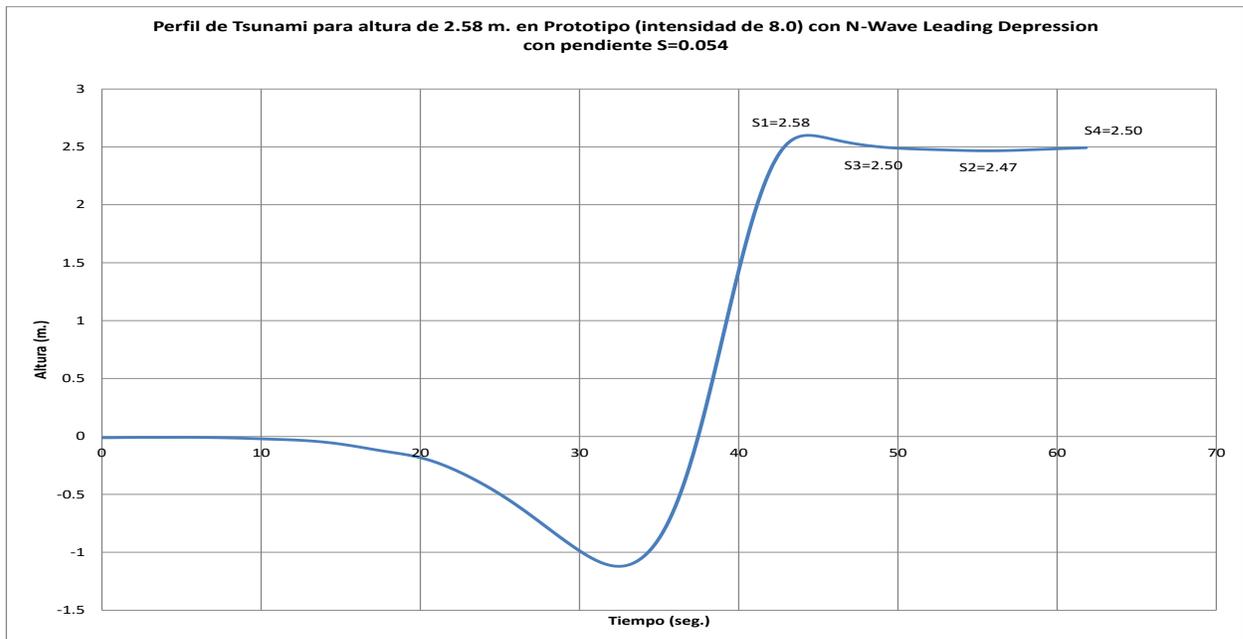
Figura 3. 86 Estructura después de generar el tsunami de 3.44 m. de altura con N-Wave LD para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col.



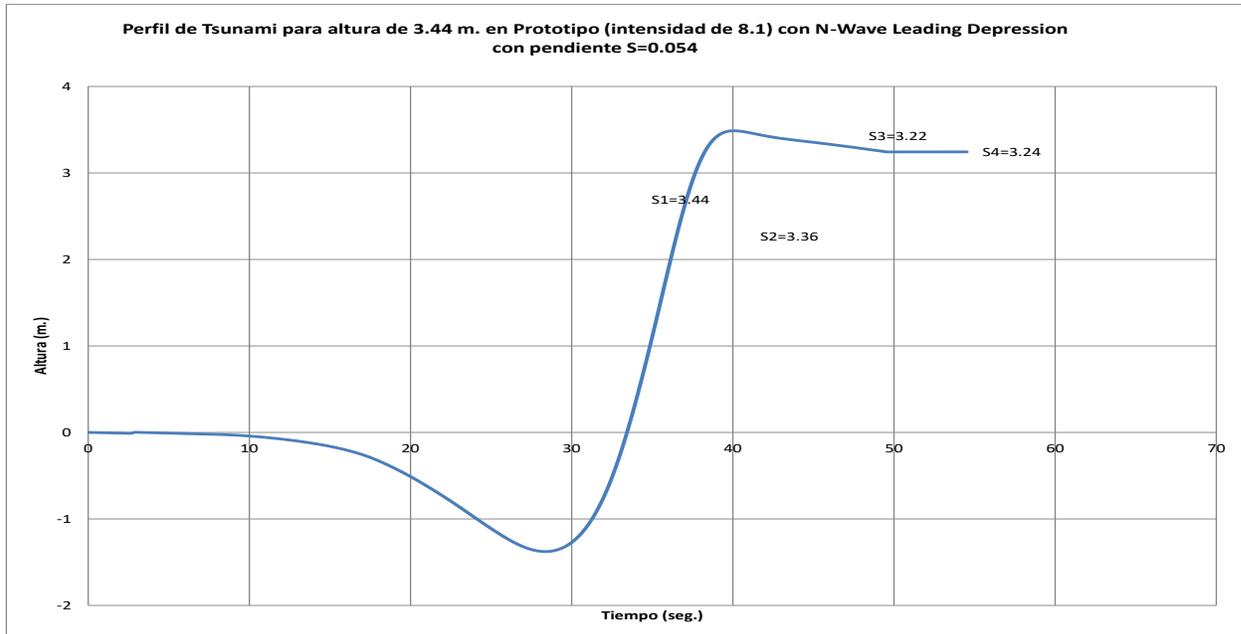
Gráfica 3. 50 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3. 51 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 1.46 m.

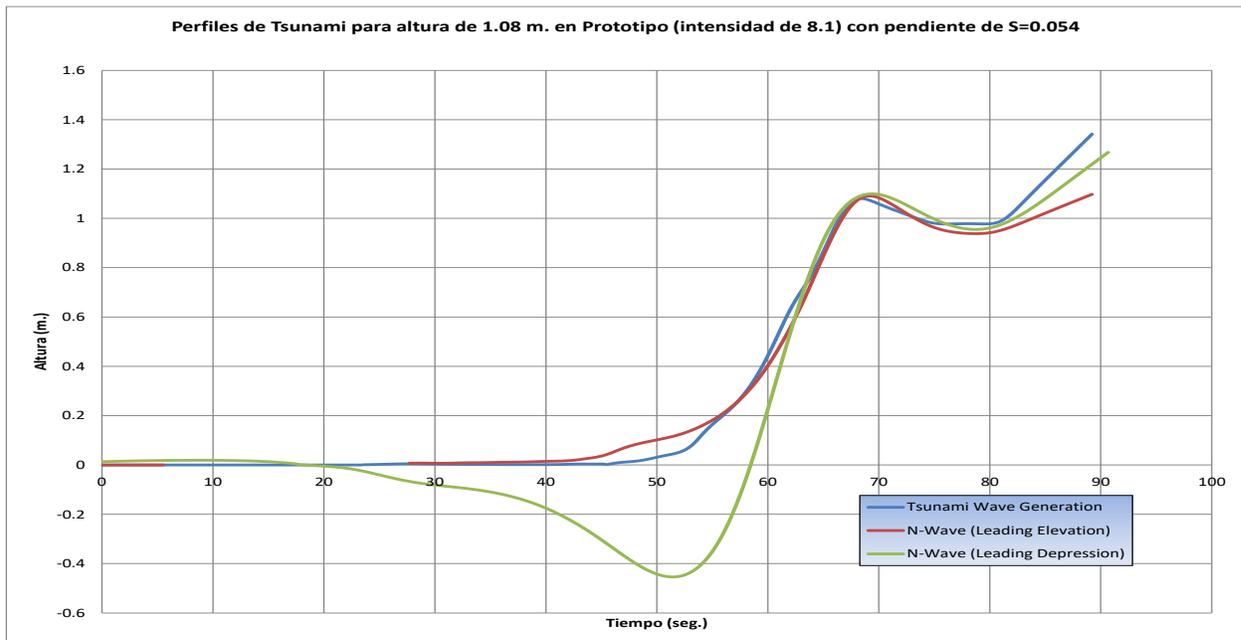


Gráfica 3. 52 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 2.58 m.

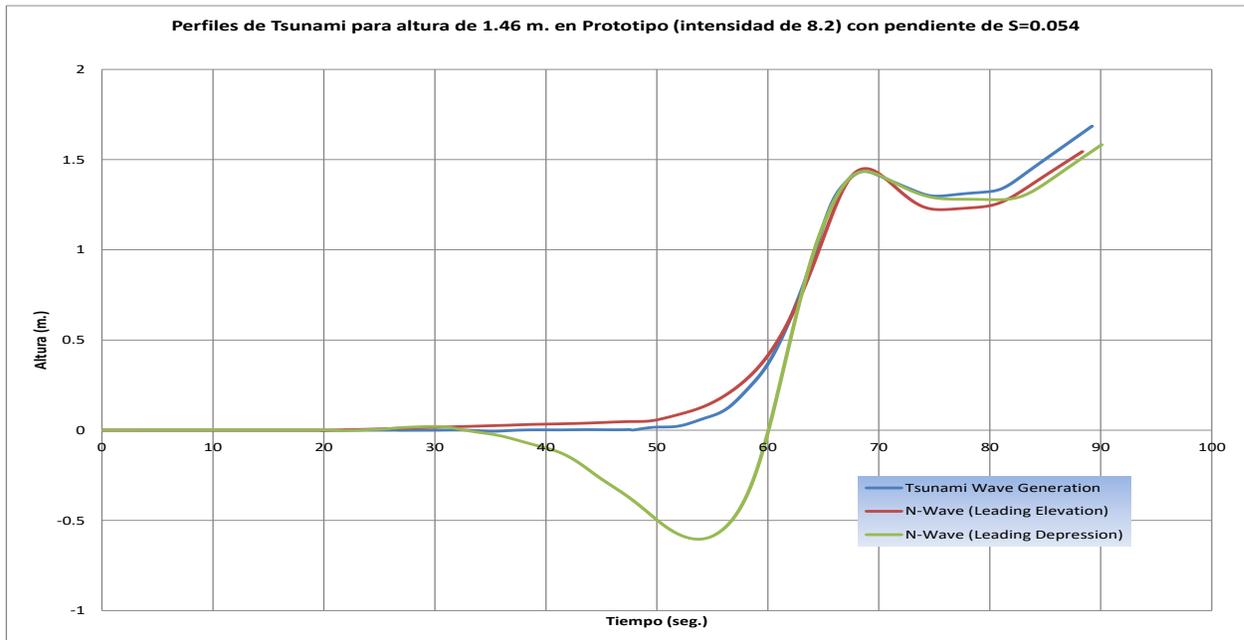


Gráfica 3.53 Perfil del tsunami generado con N-Wave Leading Depression para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col., para una altura de 3.44 m.

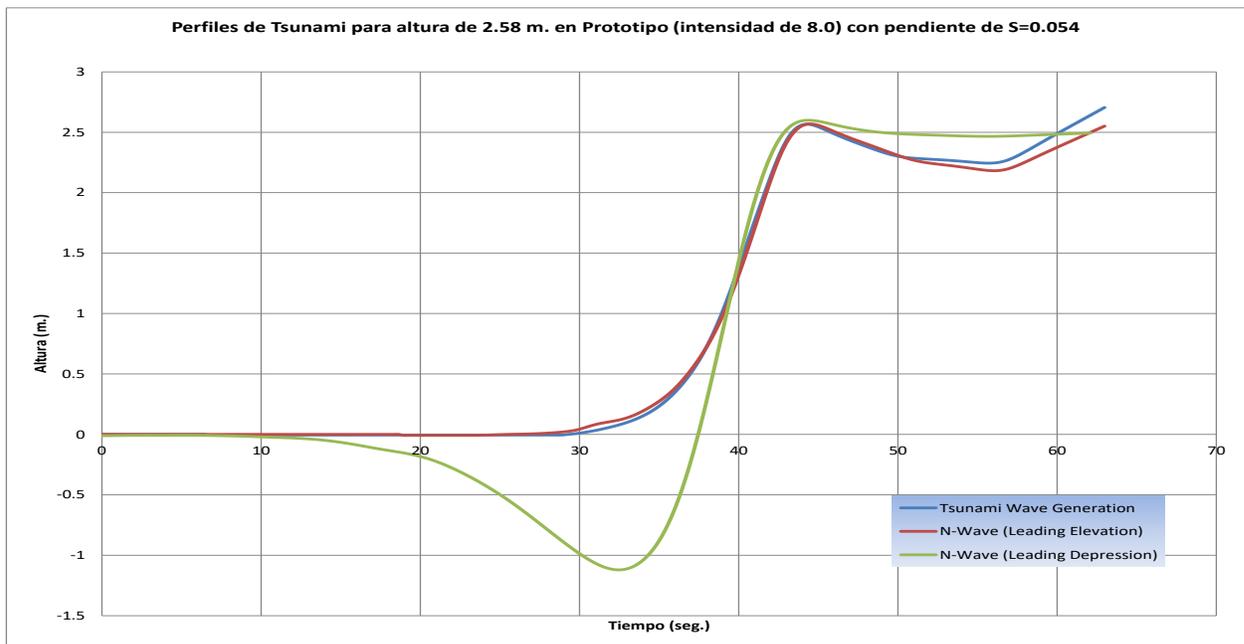
Finalmente se presentan los perfiles de tsunami obtenidos con los sistemas de generación los cuales son Onda solitaria, N-Wave Leading Elevation y Leading Depression, sobrepuestos en una sola gráfica.



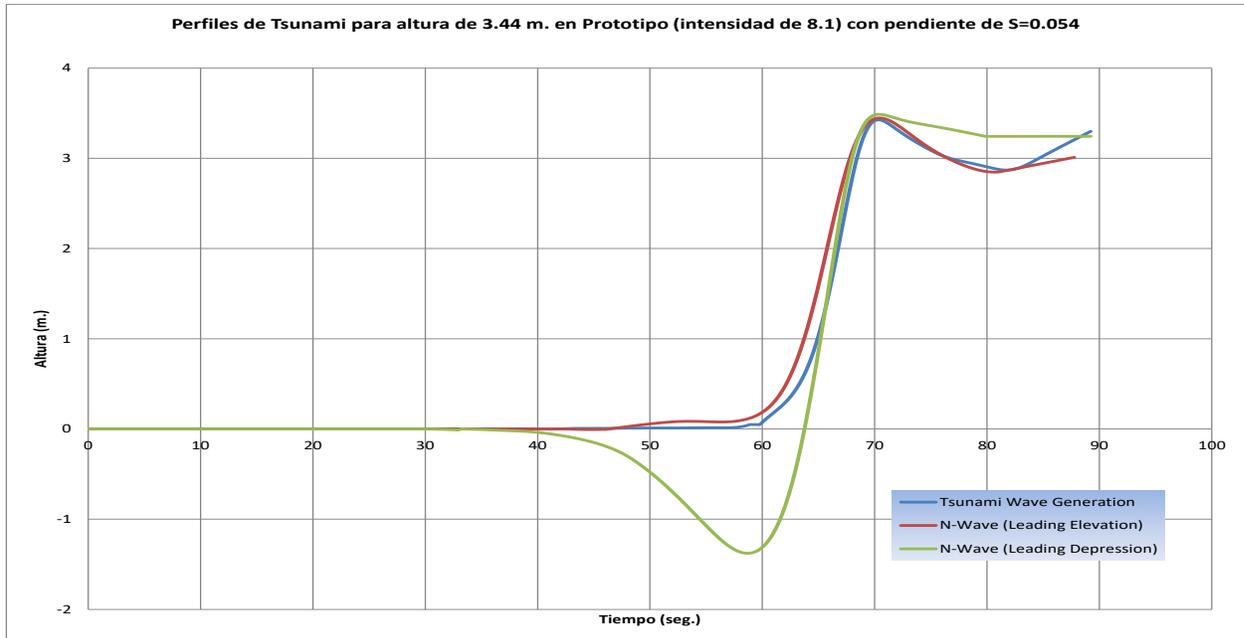
Gráfica 3.54 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 3.55 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompepuerto de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.



Gráfica 3.56 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompepuerto de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.

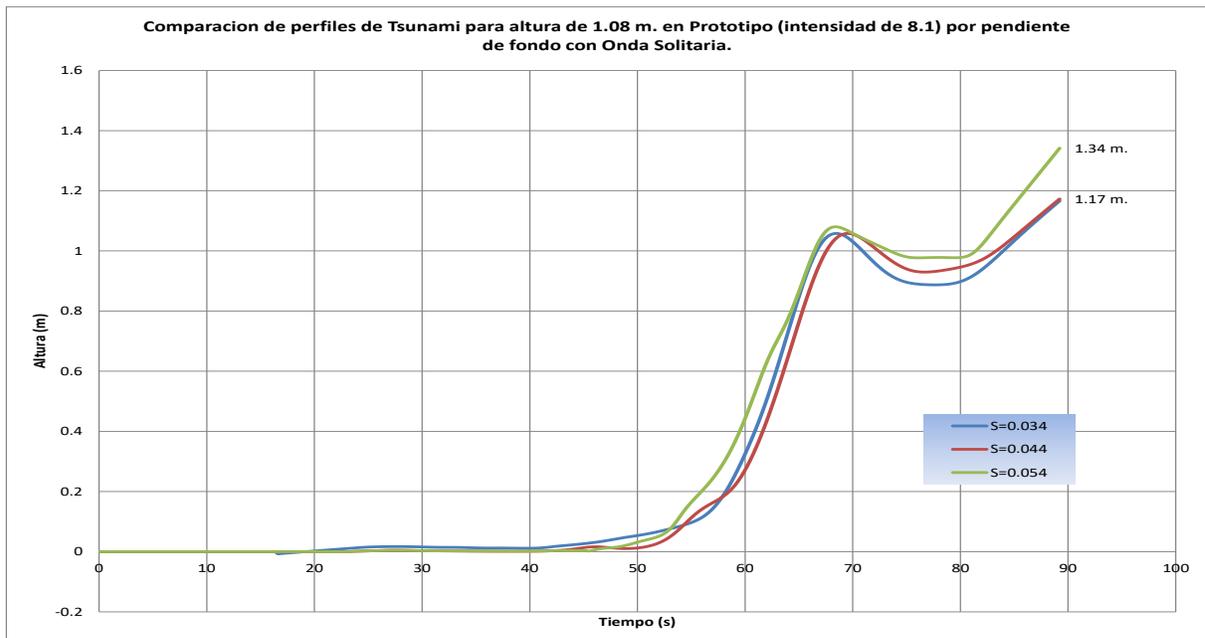


Gráfica 3. 57 Perfil del tsunami generado (comparación de los tres generados) para el N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

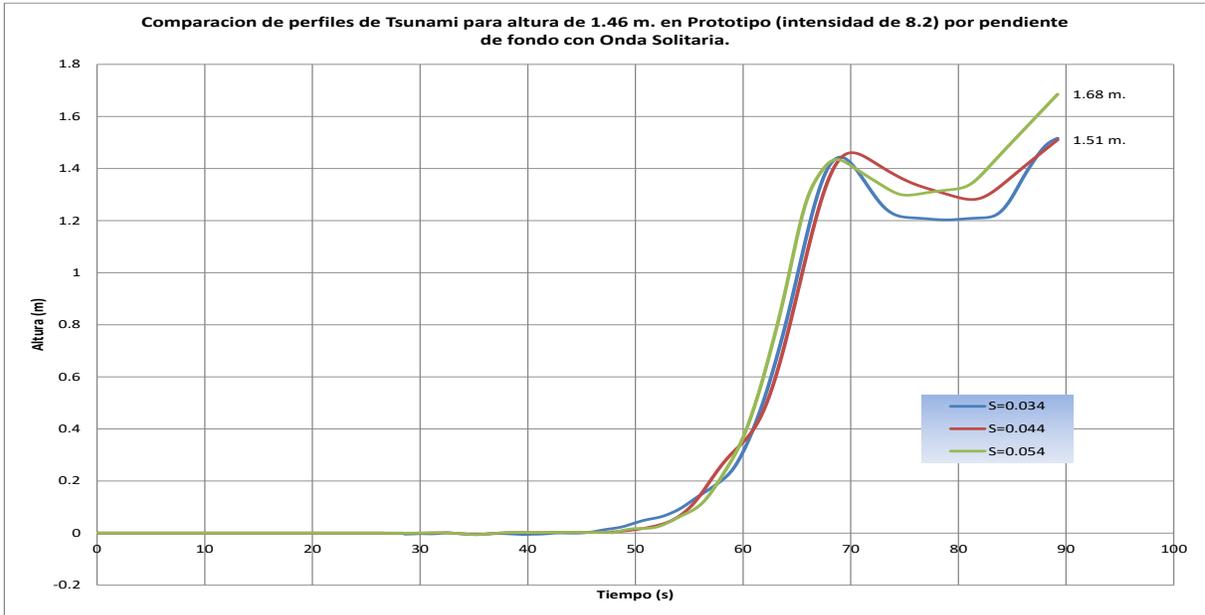
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Después de haber obtenido los perfiles de tsunami con las tres pendientes de fondo representadas en el modelo hidráulico (0.034, 0.044 y 0.054), se realizaron las siguientes gráficas comparativas de las alturas de tsunami (1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m.) por separado para observar el comportamiento de la onda solitaria.

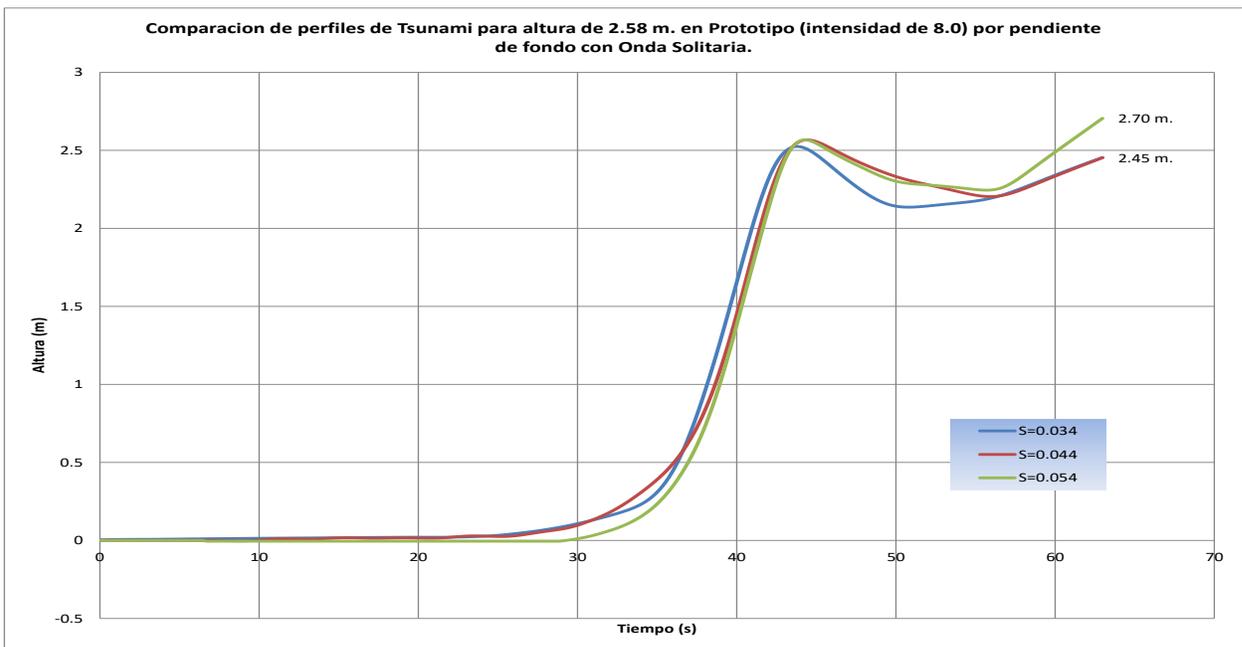
4.1 Gráficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software Onda Solitaria.



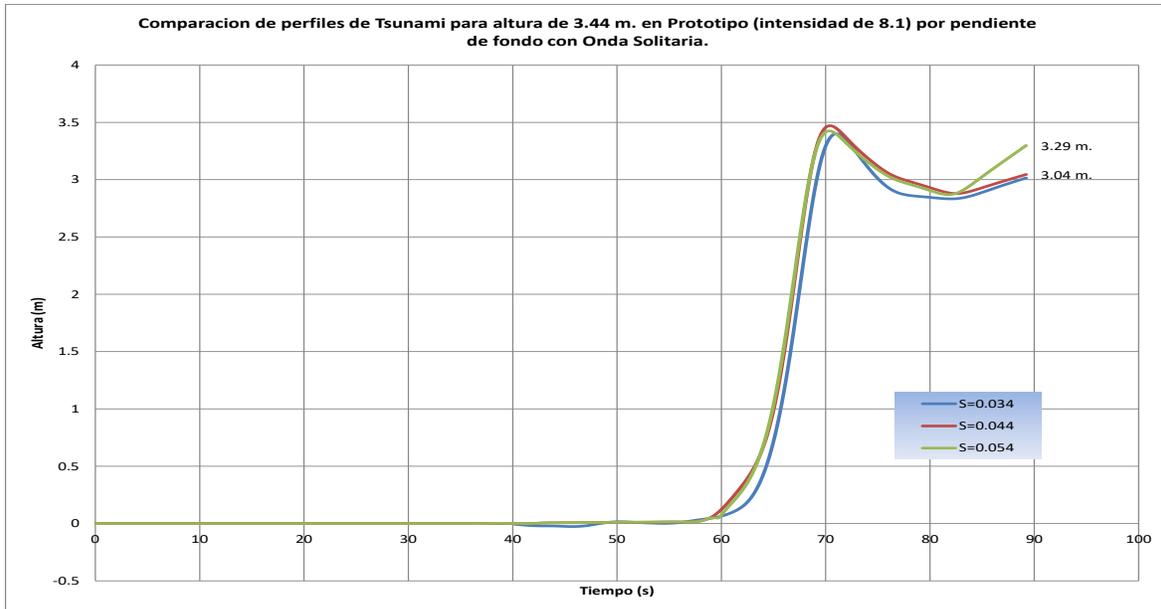
Gráfica 4. 1 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 4.2 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.

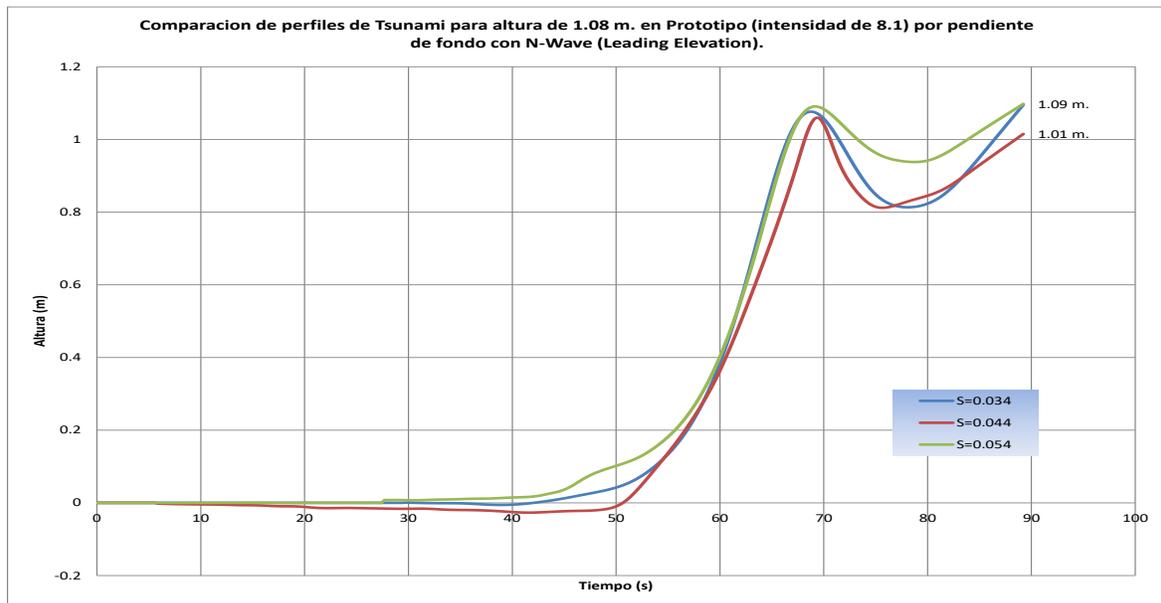


Gráfica 4.3 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.

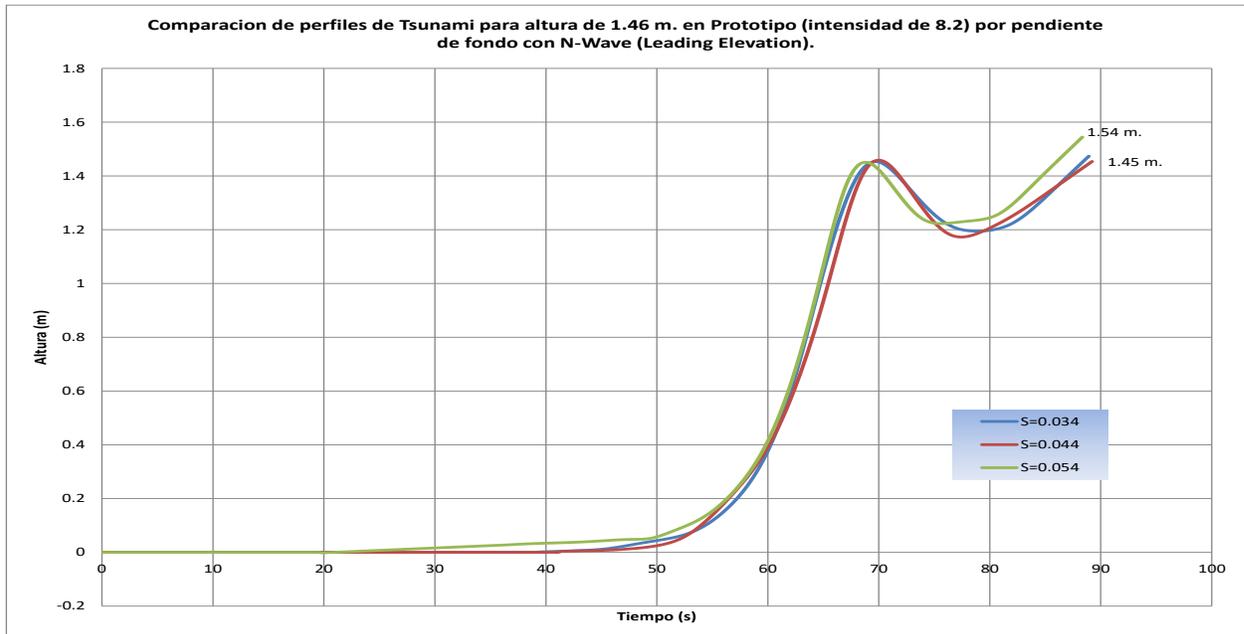


Gráfica 4.4 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

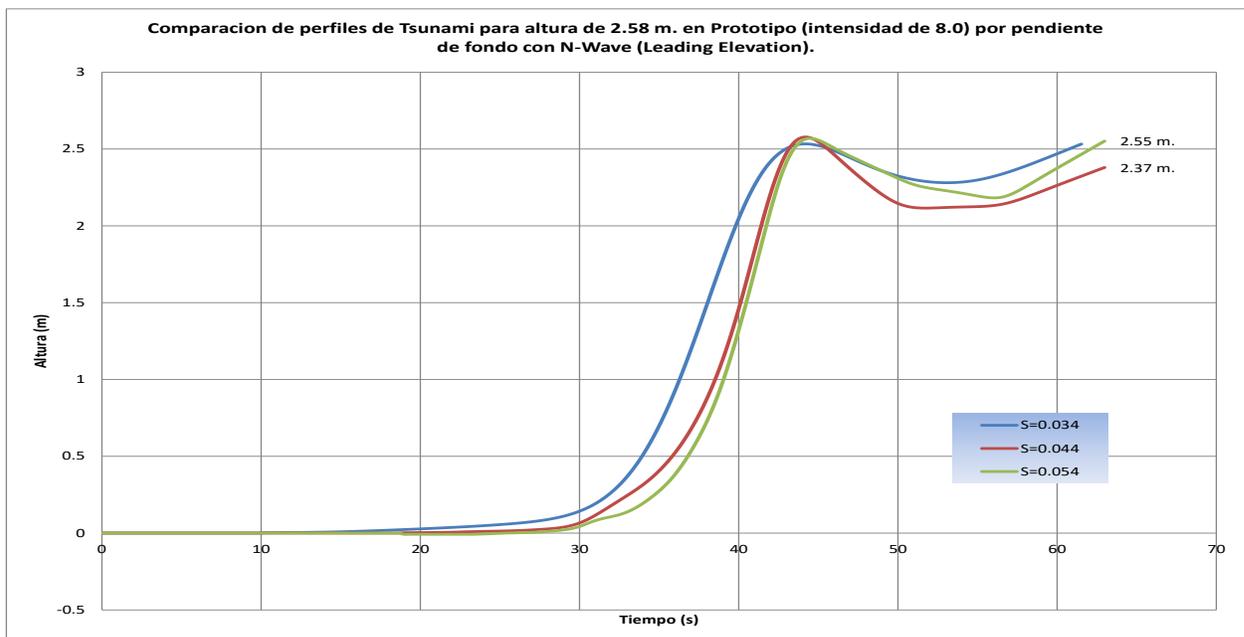
4.2 Graficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software N-Wave (Leading Elevation).



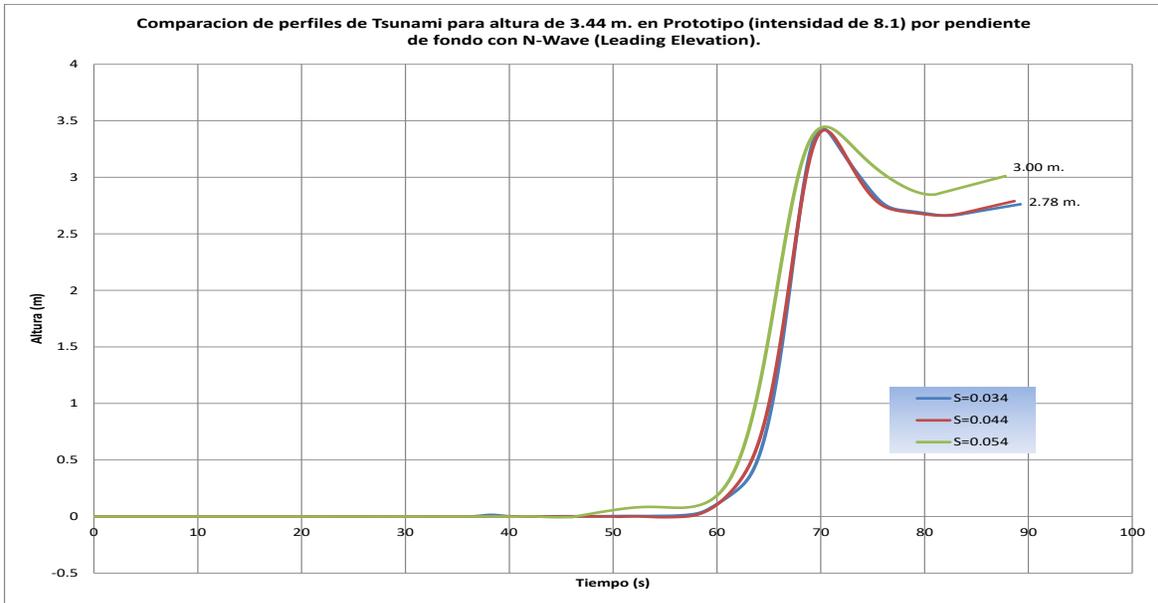
Gráfica 4.5 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 4.6 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.

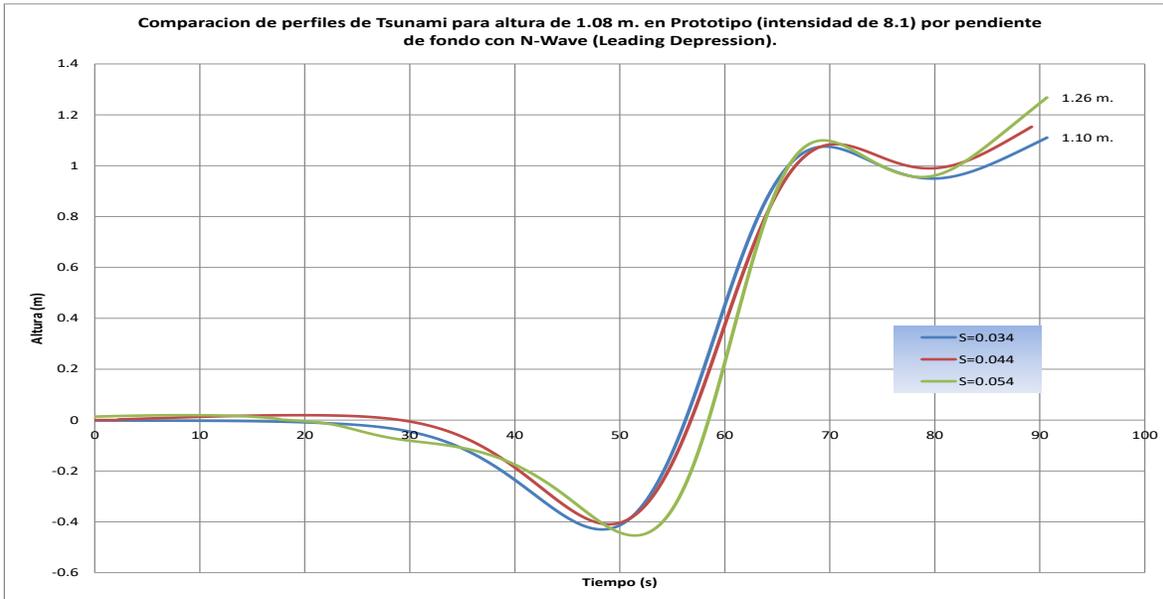


Gráfica 4.7 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.

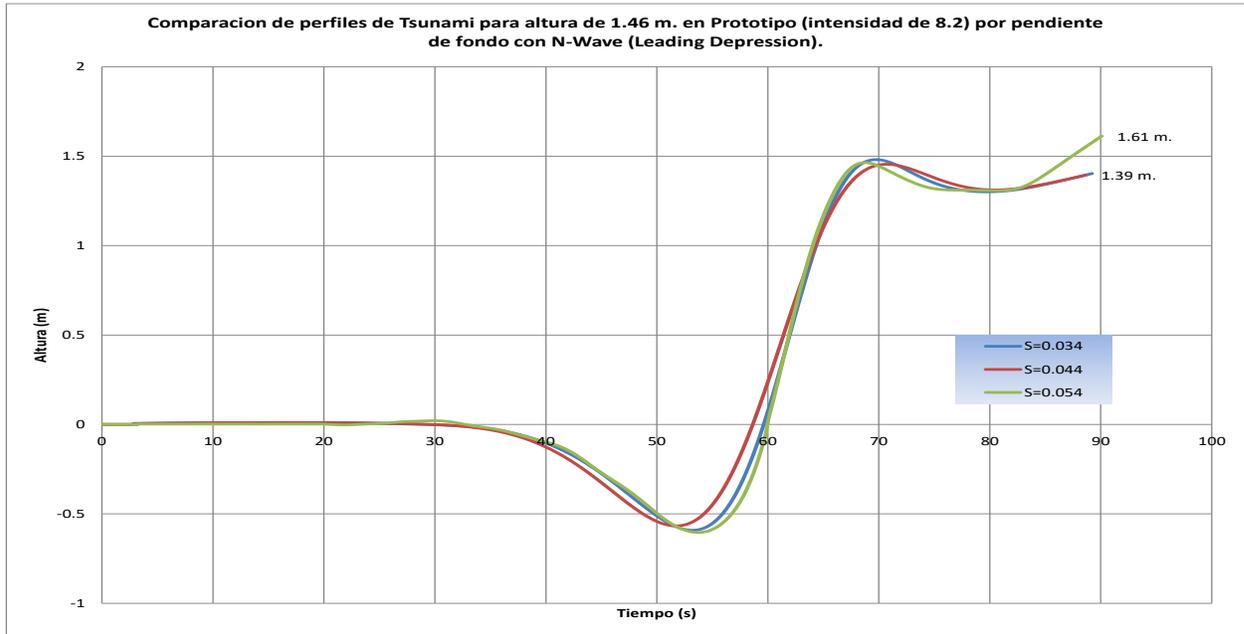


Gráfica 4.8 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

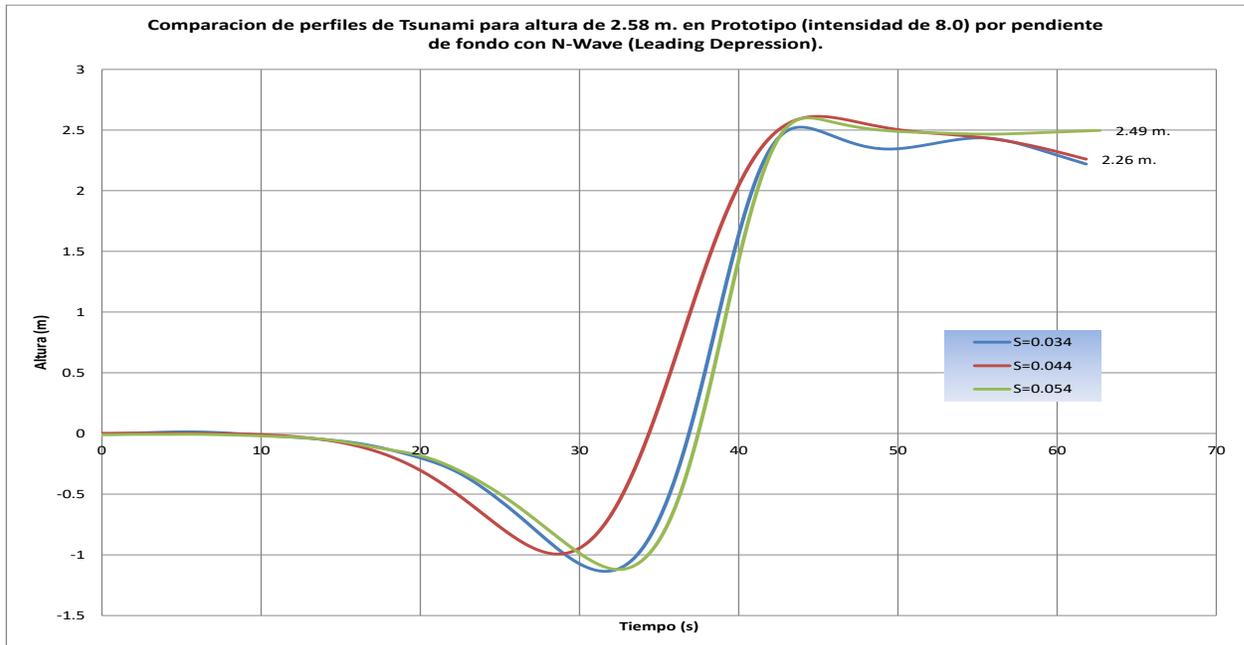
4.3 Graficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software N-Wave (Leading Depression).



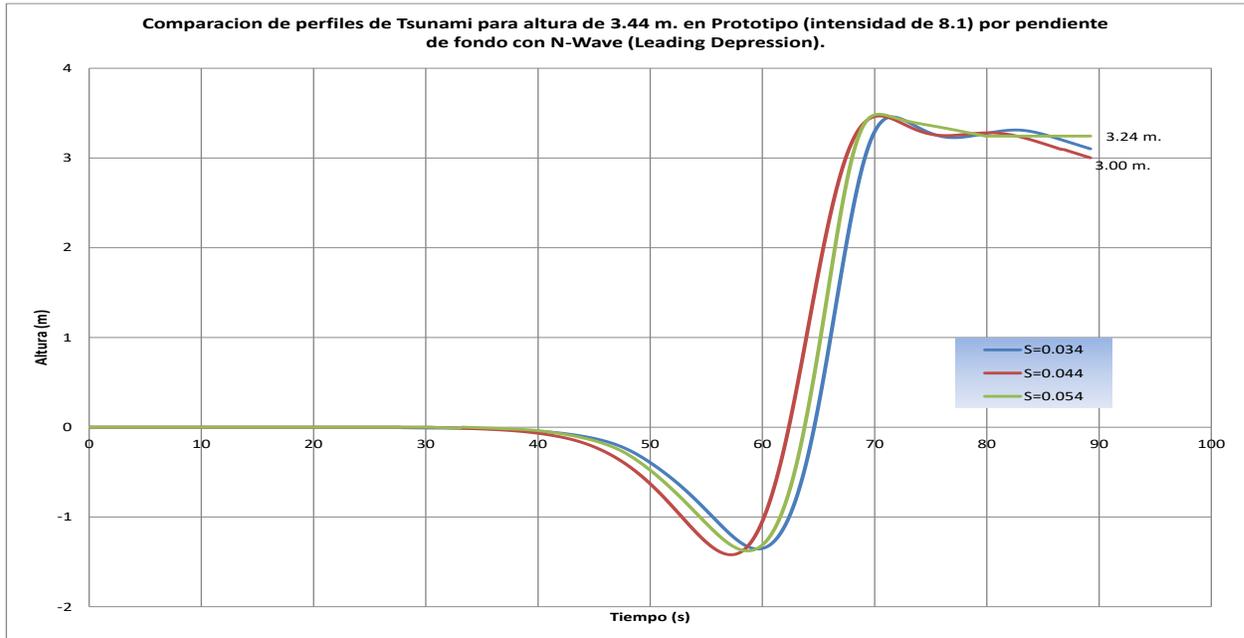
Gráfica 4.9 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.08 m.



Gráfica 4. 10 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 1.46 m.



Gráfica 4. 11 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 2.58 m.



Gráfica 4. 12 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) con N.B.M.I. de la Sección Tipo del rompeolas de Cuyutlán, Col. para una altura de 3.44 m.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En base a lo presentado en los resultados (perfiles) obtenidos de los ensayos y descritos gráficamente en las anteriores imágenes, se concluye lo siguiente:

- Onda solitaria: con base en las gráficas 4.1 a 4.4 del capítulo anterior, se observa que conforme la pendiente va aumentando de 0.34 a 0.54, el perfil de tsunami también va aumentando de acuerdo a la elevación del terreno, en un aumento de 0.17 m. en los dos primeros ensayos (1.08 y 1.46 m. de altura de ola de tsunami) a 0.25 m. en los dos últimos ensayos (2.58 y 3.44 m. de altura de ola de tsunami).
- N-Wave (Leading Elevation): con base a las gráficas presentadas (4.5 a 4.8) del capítulo anterior, se observa que, de acuerdo al incremento en la pendiente de fondo del modelo, los valores de la onda solitaria al llegar a la estructura en estudio, los valores también aumentan, en .08 m. para la altura de ola de tsunami de 1.08 m., 0.09 m. para la altura de ola de tsunami de 1.46 m., 0.18 m. para la altura de ola de tsunami de 2.58 m. y de 0.22 m. para la altura de ola de tsunami de 3.44 m.
- N-Wave (Leading Depression): de acuerdo a las gráficas 4.9 a 4.12, se observa que los valores de la sobrelevación de la ola de tsunami también se incrementan conforme la pendiente va aumentando, en 0.16 m. para la altura de tsunami de 1.08 m., 0.22 m. para el tsunami de 1.46 m., 0.23 m. para el tsunami de 2.58 m. y de 0.24 m. para el tsunami de 3.44 m.

Lo anterior descrito, nos hace observar que de acuerdo a las formas de reproducir un tsunami, la que arroja valores más altos es la forma de N-Wave (leading depression), la cual muestra un aumento de 7.4 % en la altura de ola en comparación a la registrada en aguas profundas frente al generador, esto se debe al mayor volumen de masa de agua movida por el tsunami, ya que el movimiento de la paleta del generador desplaza un mayor volumen de agua, al moverse en primera instancia hacia atrás y posterior mente hacia adelante, que se describió al inicio de este estudio.

Finalmente, para obtener los valores antes descritos se modificaron algunos valores de los parámetros, principalmente el de altura de ola en (cm) frente al generador de oleaje (para Tsunami wave generation) y de amplitud (de ola en cm., para N-waves signal generation con sus dos variantes), los cuales se resumen en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5. 1 Valores de altura de ola (para Tsunami wave generation) y Amplitud de ola (para N-waves Leading Elevation y Leading Depression) por pendiente de fondo de modelo.

Pendiente de fondo	Software	No. De Ensayo	PROTOTIPO	MODELO		
			Altura de ola tsunami (m)	Altura de ola (cm)	Profundidad frente al generador (cm)	Amplitud (cm)
0.034	Tsunami Wave Generation	ES01	1.08	3.10	76.10	--
		ES02	1.46	6.20	76.10	--
		ES03	2.58	9.00	76.10	--
		ES04	3.44	10.00	76.10	--
	N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES05	1.08	--	76.10	5.15
		ES06	1.46	--	76.10	6.80
		ES07	2.58	--	76.10	9.75
		ES08	3.44	--	76.10	11.30
	N-waves signal generation (Leading Depression)	ES09	1.08	--	76.10	3.00
		ES10	1.46	--	76.10	3.70
		ES11	2.58	--	76.10	5.15
		ES12	3.44	--	76.10	7.00
0.044	Tsunami Wave Generation	ES13	1.08	3.10	84.00	--
		ES14	1.46	6.20	84.00	--
		ES15	2.58	9.00	84.00	--
		ES16	3.44	10.00	84.00	--
	N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES17	1.08	--	84.00	5.15
		ES18	1.46	--	84.00	6.80
		ES19	2.58	--	84.00	9.75
		ES20	3.44	--	84.00	11.30
	N-waves signal generation (Leading Depression)	ES21	1.08	--	84.00	3.00
		ES22	1.46	--	84.00	3.70
		ES23	2.58	--	84.00	5.15
		ES24	3.44	--	84.00	7.00
0.054	Tsunami Wave Generation	ES25	1.08	3.50	92.00	--
		ES26	1.46	6.70	92.00	--
		ES27	2.58	9.80	92.00	--
		ES28	3.44	10.30	92.00	--
	N-waves signal generation (Leading Elevation)	ES29	1.08	--	92.00	5.15
		ES30	1.46	--	92.00	6.80
		ES31	2.58	--	92.00	10.20
		ES32	3.44	--	92.00	12.00
	N-waves signal generation (Leading Depression)	ES33	1.08	--	92.00	3.00
		ES34	1.46	--	92.00	3.70
		ES35	2.58	--	92.00	5.30
		ES36	3.44	--	92.00	7.10

Resumidos los resultados en la tabla anterior, permite concluir que, de acuerdo a la variación de la pendiente de fondo del modelo, es necesario también variar los parámetros para generar las alturas de ola requeridas independientemente del programa para realizar la onda solitaria, de igual forma verificar la profundidad de agua al frente del generador, para obtener valores y perfiles de tsunami con mayor gama de resultados.

Bibliografía

Borreo et al., (1997): field Survey of Mexican Tsunami Produces New Data, Unusual Photos, Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 78, No. 8, pp 85-92

Dziewonski A. M., Chou T.-*A., Woodhouse J. H. (1981): Determination of earthquake source parameters from wave form data of studies of global and regional seismicity, J. Geophys Res., 86, 2825-2852.

Glasbergen, T. (2018): Characterization of incoming tsunamis for the design of coastal structures, A numerical study using the SWASH model, Delf University of technology, pp 15-24

<https://repository.tudelft.nl> › OBJ

Goseberg, N., Wurpts, A. and Schlurmann, T. (2013): Laboratory-scale generation of tsunami and long waves, Coastal Engineering, Journal, VI. 79, pp 2-4, 9-18

https://www.researchgate.net/publication/257211525_Laboratory-scale_generation_of_tsunami_and_long_waves

Imamura, F. and N. Shuto (1990): Tsunami propagation by of numerical dispersion, Proc. Of Int. Sym. Comp. Fluid Dynamics, Nagoya, pp 390 -395.

Li, Ying and Raichlen, Fredric (2000): Tsunamis: Non-Breaking and Breaking solitary Wave Run-Up, W. M. Keck Laboratory of Hidraulics and Water Resources, California Institute of Technology, pp 29-40, 230-234

<https://core.ac.uk/download/pdf/4890953.pdf>

Manshina, L. and Smylie, D. (1971): The displacement Fields of inclined Faults: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 61, no. 5, pp 1433-1440.

Sing, S. K., Astiz, L., and Havskov, J. (1981): Seismic Gaps and Recurrence Periods of Lrge Earthquakes along the Mexican subduction zone: a Reexamination, Bull. Seis. Soc. Am. 71, pp 827-843.

Yen (2008): Evaluation of ertquake potential and Surface deformation by Differential Interferometry Jiun-Yee Yena.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>