



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería
Facultad de Ingeniería

Acoplamiento de modelos eulerianos-lagrangeanos
para el estudio del transporte de sedimentos en la
interacción océano-continente. Aplicación a regiones
costeras del Golfo de México

T E S I S

Que para obtener el grado de:
DOCTOR EN INGENIERÍA
Ingeniería Civil - Hidráulica

Presenta:

Israel Enrique Herrera Díaz

Tutor:

Dr. Hermilo Ramírez León



México D.F. Junio de 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario: Dr. Moisés Berezowsky Verduzco
Vocal: Dr. Hermilo Ramírez León
1er Suplente: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval
2do Suplente: Dr. Jesús Gracia Sánchez

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)

Tutor de la Tesis:

Dr. Hermilo Ramírez León

A mi hijo *RODRIGO* ...
porque has sido el
mayor logro de mi vida
y me has demostrado
salir adelante a pesar
de tu corta edad de
los problemas más
grandes que un adulto
se puede imaginar

A mi esposa *LAURA* ...
a la cual considero una
mujer extraordinaria
a la que respeto y admiro
por su amor, paciencia
y apoyo incondicional
en la realización de mis
estudios

A mis padres
DIVINA y ENRIQUE
a mi hermano
DITHER ...
por su amor y
su apoyo para
conmigo y mi familia

Agradecimientos

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, que me ha brindado la valiosa oportunidad de pertenecer a ella.

A la *División de Estudios de Posgrado (DGEP)* por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios.

Al *Instituto Mexicano del Petróleo*, por permitirme elaborar mi trabajo de investigación en sus instalaciones.

Al *Dr. Hermilo Ramírez León*, apreciable amigo y mentor, que ante todas sus ocupaciones dispone de tiempo para compartir sus opiniones sobre este trabajo, así como de sus conocimientos para complementar nuestro desarrollo y sobre todo de brindarnos su confianza y compañía en reuniones familiares y de recreación.

Al *Dr. Carlos Couder Castañeda*, compadre y amigo, por apoyarme siempre en temas de investigación y de innovación tecnológica que son de interés mutuo y por tener el placer de convivir con Usted y su apreciable familia.

A mis amigos, *Dr. Clemente Rodríguez Cuevas*, al *Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano*, al *Dr. Héctor Alfonso Barrios Piña*, al *M. en I. Ricardo González López*, al *M. en C. Raúl González Santamaria* y al *Ing. Carlos Ricardo Bautista Romero* por su apoyo, colaboración, ayuda y por el placer de permitirme gozar de su amistad y compañía en todos estos años.

Al *Ing. Eduardo Saucedo* de Consultoría Técnica S.C., por brindarme la oportunidad de colaborar y de retroalimentarme en aspectos técnicos y con su experiencia profesional para la adecuación e implementación de mejoras al modelo de oleaje desarrollado en este trabajo.

A mi comité doctoral, al *Dr. Moisés Berezowsky Verduzco*, al *Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles*, al *Dr. Jesús Gracia Sánchez* y al *Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval* por sus comentarios y opiniones acerca del desarrollo de este trabajo en la duración de mis estudios.

Índice general

Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de cuadros	XVII
Resumen	XIX
Abstract	XXI
1. Aspectos Generales y Teóricos de la Modelación de Sedimentos	5
1.1. Transporte de sedimentos en zonas costeras	5
1.1.1. Modelos Lagrangeanos	7
1.2. Tendencias y trabajos actuales sobre la modelación lagrangeana del transporte de sedimentos	8
1.2.1. Modelos existentes	10
2. Acoplamiento lagrangeano para los términos advectivos de las ecuaciones de movimiento del modelo hidrodinámico	13
2.1. Ecuaciones gobernantes del modelo hidrodinámico	14
2.1.1. Ecuaciones para las velocidades y superficie libre	14
2.1.2. Ecuación para la temperatura	17
2.1.3. Ecuación para la salinidad	17
2.1.4. Ecuación de estado para la densidad	18
2.2. Método lagrangeano de las características para los términos advectivos de las ecuaciones de movimiento	20
2.3. Incorporación del módulo de oleaje al modelo hidrodinámico . . .	24
2.3.1. Ecuación de la pendiente suave (mild-slope-equation) . . .	25
3. Modelo lagrangeano del transporte de partículas de sedimentos	39
3.1. Distribución de partículas de sedimentos	39
3.1.1. Movimiento de las partículas	40

3.1.2.	Velocidad de caída de las partículas	44
3.1.3.	Efecto de la concentración de partículas de sedimentos . . .	45
3.2.	Desarrollo del modelo lagrangeano de transporte de partículas . .	45
3.2.1.	Esquema computacional	46
3.2.2.	Validación del modelo	50
3.2.3.	Caso de aplicación teórico	52
4.	Caso de aplicación en una zona costera de Sonda de Campeche	57
4.1.	Antecedentes y descripción de la zona de estudio	57
4.2.	Información y metodología empleada para la simulación numérica	59
4.2.1.	Datos de mareas y nivel del mar	59
4.2.2.	Datos de descargas de los ríos	61
4.2.3.	Datos de corrientes	62
4.2.4.	Datos de viento	62
4.3.	Simulación de la hidrodinámica en 2D de la región de estudio . . .	63
4.3.1.	Malla numérica de la región de estudio	63
4.3.2.	Resultados de la simulación hidrodinámica de la región de estudio	65
4.4.	Simulación de la hidrodinámica en 3D de la zona de estudio . . .	68
4.4.1.	Malla numérica de la zona de estudio	69
4.4.2.	Resultados de la simulación hidrodinámica y del oleaje en la zona de estudio	71
4.5.	Modelación del transporte de partículas de sedimentos en la zona de estudio	81
4.5.1.	Resultados de la simulación del transporte de partículas . . .	81
4.5.2.	Comparación de perfiles antes y después de la tubería . . .	92
4.6.	Modelación del transporte de partículas en zonas aledañas al obstáculo	95
4.6.1.	Simulación con sedimentación al 25 % de cobertura de la tubería	95
4.6.2.	Simulación con sedimentación al 50 % de cobertura de la tubería	97
4.6.3.	Simulación con sedimentación al 75 % de cobertura de la tubería	98
	Conclusiones	101
	Bibliografía	105

A. Aplicación del módulo de oleaje a las obras de protección de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Edo. de Veracruz, México	113
A.1. Problemática principal	114
A.2. Resultados de la simulación	114
A.2.1. Simulaciones dentro de las obras de protección	115
B. Vulnerabilidad actual en la zona costera de Tabasco y Campeche debido a las anomalías climáticas actuales	119
B.1. Procesos de erosión y acreción de zonas costeras	120
B.1.1. Evolución histórica de la línea de costa	120
B.1.2. Zonas con erosión continua (transgresión marina)	123
B.1.3. Tasas de erosión	126
B.2. Vulnerabilidad por elevación del nivel del mar en la zonas costeras	129
B.3. Ejemplo de erosión: Instalaciones de los pozos Tizón 222, 231 y 236 de PEMEX	131

Índice de figuras

1.1. Perfiles de velocidad y concentración de sedimento en la zona costera	6
2.1. Concentración sobre una malla unidimensional	21
2.2. Generalización del método de las características para cualquier número de Courant	22
2.3. Notación de una celda Staggeredd Cell en 2D y 3D	27
2.4. Esquema de cálculo del oleaje para la fase en X	28
2.5. Esquema de cálculo del oleaje para la fase en Y	29
2.6. Esquema de cálculo para la superficie libre	30
2.7. Geometría del puerto	32
2.8. Solución presentada por Maa <i>et al.</i> (1997)	33
2.9. Resultados de la simulación numérica	33
2.10. Comparación entre distintas soluciones del análisis de resonancia del puerto	34
2.11. Geometría del puerto	35
2.12. Geometría y contorno de alturas de ola dentro del puerto, Sato <i>et al.</i> (1990)	36
2.13. Resultados de la simulación numérica	37
3.1. Ubicación en el espacio tridimensional de la partícula y sus velocidades asociadas	41
3.2. Esfuerzo cortante actuante sobre las partículas que se mueven en flujos a superficie libre	43
3.3. Diagrama de flujo del modelo de partículas	47
3.4. Condición de frontera para el movimiento de las partículas en la subcapa laminar	49
3.5. Simulación de la difusión de la concentración analítica vs método PIC	50
3.6. Validación del modelo, perfiles analítico vs método PIC	51
3.7. Validación del modelo, perfiles con descarga continua	51
3.8. Dominio de aplicación teórico cualitativo	53

3.9. Perspectiva 3D del campo de velocidades	53
3.10. Campo de velocidades resultante	54
3.11. Propagación del oleaje en el dominio de estudio	54
3.12. Contornos de las alturas de ola al final de la simulación	55
3.13. Transporte de partículas de sedimento a 170 segundos de simulación	55
3.14. Transporte de partículas de sedimento a 170 segundos de simulación con la opción de trazado	56
4.1. Golfo de México y ubicación de la Región Marina de Sonda de Campeche	58
4.2. Batimetría de la Sonda de Campeche	59
4.3. Registros de marea en las estaciones de Frontera Tab.	60
4.4. Registros de marea en las estaciones de Cd. del Carmen Camp. . .	60
4.5. Hidrograma medio del río Grijalva	61
4.6. Rosa de Corrientes para las épocas de secas, lluvias y nortes . . .	62
4.7. Porcentajes de vientos dominantes para las épocas de secas, lluvias y nortes	63
4.8. Malla en diferencias finitas para el dominio de Sonda de Campeche	64
4.9. Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de secas (Abril)	65
4.10. Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de secas (Abril)	66
4.11. Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de lluvias (Agosto)	66
4.12. Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de lluvias (Agosto)	67
4.13. Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de lluvias (Noviembre) . . .	67
4.14. Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de nortes (Noviembre)	68
4.15. Localización de la zona refinada de estudio	69
4.16. Malla numérica de la zona refinada de estudio	70
4.17. Malla numérica de la zona refinada de estudio con tubería de 50 cm	71
4.18. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de secas sin presencia de tubería	72
4.19. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de secas sin presencia de tubería	72
4.20. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de secas con presencia de tubería	73
4.21. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de secas con presencia de tubería	73

4.22. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de secas sin tubería	74
4.23. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de secas con tubería	74
4.24. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de lluvias sin presencia de tubería	75
4.25. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de lluvias sin presencia de tubería	75
4.26. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de lluvias con presencia de tubería	76
4.27. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de lluvias con presencia de tubería	76
4.28. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de lluvias sin tubería	77
4.29. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de lluvias con tubería	77
4.30. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de nortes sin presencia de tubería	78
4.31. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de nortes sin presencia de tubería	78
4.32. Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de nortes con presencia de tubería	79
4.33. Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de nortes con presencia de tubería	79
4.34. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de nortes sin tubería	80
4.35. Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de nortes con tubería	80
4.36. Localización de los perfiles de concentración en columna de agua en e dominio de estudio	82
4.37. Condiciones iniciales de las partículas en el fondo y de la concentración puntual de descarga (sin tubería)	83
4.38. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de secas (Abril) sin tubería	83
4.39. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de lluvias (Agosto) sin tubería	84
4.40. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de nortes (Noviembre) sin tubería	84
4.41. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de secas (Abril) sin tubería	85

4.42. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de lluvias (Agosto) sin tubería	86
4.43. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de nortes (Noviembre) sin tubería	87
4.44. Condiciones iniciales de las partículas en el fondo y de la concentración puntual de descarga (con tubería)	88
4.45. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de secas (Abril) con tubería	88
4.46. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de lluvias (Agosto) con tubería	89
4.47. Transporte de partículas al final de la simulación para la época de nortes (Noviembre) con tubería	89
4.48. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de secas (Abril) con tubería	90
4.49. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de lluvias (Agosto) con tubería	91
4.50. Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de nortes (Noviembre) con tubería	92
4.51. Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de secas (Abril) con y sin tubería	93
4.52. Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de lluvias (Agosto) con y sin tubería	94
4.53. Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de nortes (Noviembre) con y sin tubería	94
4.54. Zonas de erosión y depósito con 25 por ciento de sedimentación en las primeras 12 horas	96
4.55. Conteo de partículas en la sección transversal con 25 por ciento de sedimentación	96
4.56. Curvas de sedimentación en la sección transversal con 25 por ciento de sedimentación	97
4.57. Zonas de erosión y depósito con 50 por ciento de sedimentación en las primeras 12 horas	97
4.58. Conteo de partículas en la sección transversal con 50 por ciento de sedimentación	98
4.59. Curvas de sedimentación en la sección transversal con 50 por ciento de sedimentación	98
4.60. Zonas de erosión y depósito con 75 por ciento de sedimentación en las primeras 12 horas	99
4.61. Conteo de partículas en la sección transversal con 75 por ciento de sedimentación	99

4.62. Curvas de sedimentación en la sección transversal con 75 por ciento de sedimentación	100
A.1. Localización de la Central	113
A.2. Malla y batimetría de la zona costera de la CNLV	114
A.3. Simulación del oleaje con dirección de incidencia de NE	115
A.4. Malla y batimetría de las obras de protección de la CNLV	116
A.5. Simulación del oleaje incidente sobre las estructuras de protección idealizadas de CNLV	116
A.6. Simulación del oleaje incidente sobre las estructuras en diferentes instantes de tiempo	117
A.7. Simulación del oleaje dentro de las obras de protección de la CNLV	117
A.8. Alturas de ola dentro de las obras de protección de la CNLV	118
B.1. Imagen de satélite de la zona de estudio que abarca las costas de los Estados de Tabasco y Campeche	121
B.2. Ubicación de las playas donde se efectúan los estudios y mediciones de erosión/acresión en los Estados de Tabasco y Campeche	121
B.3. Ubicación de las zonas o playas de estudio de erosión/acresión a detalle	123
B.4. Reconstrucción de la línea de costa de 1974 y su ubicación con respecto a la costa de 2008 de la Península de Atasta	124
B.5. Erosión en Punta Disciplina, Campeche	124
B.6. Proceso de erosión continua de 1974 a 2008 en la zona de Atasta. Obsérvese el borde irregular de la zona costera	125
B.7. Erosión en la zona de Atasta	125
B.8. Balance de sedimentos en los sitios de estudio (Torres <i>et al</i> , 2010)	126
B.9. Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de lluvias 2005	127
B.10. Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de secas 2006	127
B.11. Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de lluvias 2006	128
B.12. Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de nortes 2006	128
B.13. Incrementos del nivel del mar para las costas de Tabasco y Campeche	129
B.14. Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche en el año 2001	129
B.15. Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche con aumento de 30 cm (Zavala <i>et al</i> , 2010)	130
B.16. Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche con aumento de 60 cm (Zavala <i>et al</i> , 2010)	130

B.17. Problemática de erosión en la zona de los pozos Tizón 222, 231 y 236	131
B.18. Localización de los pozos Tizón 222 y 231	132
B.19. Distancia de los pozos Tizón hacia la línea de costa	132
B.20. Esquema de solución al construir un muro vertical para detener el proceso de erosión de la línea de costa	133
B.21. Esquema de localización de los pozos Tizón, zonas de erosión y localización del muro vertical en la línea de costa	133
B.22. Imagen de la zona de erosión en las cercanías de los pozos Tizón .	134
B.23. Comienzo de los trabajos para levantamiento del muro a base de placas metálicas y perfiles tubulares	134
B.24. Avance de la construcción del muro de protección en la zona de erosión	135
B.25. Sección del muro de protección terminado	135

Índice de cuadros

1.1. Modelos hidrodinámicos e hidrodinámicos con transporte de sedimentos existentes	11
1.2. Continuación	12
2.1. Parámetros usados para la validación del modulo de oleaje, CASO 1	32
2.2. Parámetros usados para la validación del modulo de oleaje CASO 2	35
3.1. Parámetros para la simulación del campo hidrodinámico para el transporte de partículas	52
4.1. Condiciones iniciales o forzantes para la simulación del transporte lagrangeano de sedimentos	81
B.1. Desplazamiento neto de la línea de costa en localidades del Estado de Campeche durante el periodo 1974 a 2008 (Torres <i>et al</i> , 2010) .	122
B.2. Tasa de erosión costera en el Estado de Campeche, periodo 1974 a 2008 (Torres <i>et al</i> , 2010)	122

Resumen

El propósito de este trabajo es el de desarrollar un modelo de transporte con un esquema lagrangiano de respuesta rápida aplicado al movimiento y seguimiento de partículas, las cuales pueden ser asociadas desde un contaminante pasivo hasta partículas de sedimentos. Se pone principal atención en el acoplamiento del modelo lagrangiano con un modelo hidrodinámico existente. Se enfatiza la simulación de una concentración o cantidad finita de partículas de diferentes diámetros cuya fuente de emisión es puntual y constante en el tiempo y de dimensión de orden de magnitud menor que el dominio computacional donde se determinan las componentes advectivas del flujo. Se proponen salidas gráficas en 3D, perfiles adimensionales en columna de agua y secciones transversales donde se realizan conteos de partículas en determinados lapsos de tiempo. El desarrollo del modelo lagrangiano tiene carácter teórico-académico, sin embargo puede ser aplicado a problemas controlados. Para probar la capacidad del modelo de transporte, se realiza un ejercicio de aplicación con enfoque académico en una zona costera en la región de Sonda de Campeche.

Abstract

The purpose of this study is to develop a transport model with a lagrangian scheme implemented rapid response and monitoring the movement of particles, which can be associated from a passive contaminant to sediment particles. Main attention is placed on the coupling lagrangian model with a hydrodynamic model exists. We emphasize the simulation of a finite quantity or concentration of particles of different diameters whose emission source is punctual and constant in time and scale of order of magnitude smaller than the computational domain where the advective components of flow are determined. Proposed 3D graphics output, dimensionless profiles in water column and cross sections where particle counts are made in certain periods of time. Lagrangian model development is a theoretical-academic, but it can be applied to problems under control. To test the ability of the transport model is an exercise of academic focus application in a coastal area in the region of Sonda de Campeche.

Nomenclatura

Letras latinas

a ,	número de Courant con respecto a la velocidad U , Adimensional.
A ,	coeficiente de fricción lateral, en m^2/s .
b ,	número de Courant con respecto a la velocidad V , Adimensional.
B ,	término baroclínico
c ,	número de Courant con respecto a la velocidad W , Adimensional.
C_d ,	coeficiente de fricción de fondo, Adimensional.
C_{smag} ,	constante de Smagorinsky, Adimensional.
C_Z ,	coeficiente de Chezy, Adimensional.
C_μ ,	coeficiente experimental que se determina a partir de la hipótesis de equilibrio producción=disipación.
C_ω ,	coeficiente de arrastre por viento, Adimensional.
d ,	profundidad respecto al nivel medio, en m.
f ,	parámetro de Coriolis, en s^{-1} .
f_β ,	parámetro de Coriolis con aproximación en Plano Beta, en s^{-1}
g ,	aceleración de la gravedad, en m/s^2
h ,	profundidad total, en m.
k ,	constante de von Kármán.
K_T ,	coeficiente de difusión de temperatura, en m^2/s
K_C ,	coeficiente de difusión de concentración, en m^2/s
K_S ,	coeficiente de difusión de salinidad, en m^2/s
l_m ,	longitud de mezclado, en m.

l_h ,	longitud de mezclado horizontal, en m.
l_v ,	longitud de mezclado vertical, en m.
n ,	tiempo discreto.
p' ,	fluctuación turbulenta de la presión, en kg/m ²
P ,	presión hidrostática, en kg/m ²
P_{atm} ,	presión atmosférica, en kg/m ²
\bar{P} ,	presión hidrostática media, en kg/m ²
q ,	escala de velocidad de la turbulencia, en m/s
q^2 ,	en el modelo de turbulencia de Mellor y Yamada representa la energía cinética de la turbulencia, en N·m.
R_c ,	número de Reynolds local.
R_T ,	radio terrestre, aproximadamente igual a 6,371 km.
S ,	concentración de salinidad del agua, en ups.
\bar{S} ,	concentración media de salinidad del agua, en ups.
t ,	tiempo, en s.
T ,	temperatura del agua en °C.
\bar{T} ,	temperatura media del agua, °C.
u' ,	fluctuación turbulenta de la velocidad en la dirección x , en m/s.
v' ,	fluctuación turbulenta de la velocidad en la dirección y , en m/s.
w' ,	fluctuación turbulenta de la velocidad en la dirección z , en m/s.
$\overline{u'u'}$,	correlaciones dobles de Reynolds ($\overline{v'v'}$, $\overline{w'w'}$), en m ² /s ² .
U	magnitud del componente de velocidad en la dirección x , en m/s.
\bar{U}	magnitud del componente de velocidad media en la dirección x ($U = \bar{U} + u'$), en m/s.
V	magnitud del componente de velocidad en la dirección y , en m/s.
\bar{V}	magnitud del componente de velocidad media en la dirección y ($V = \bar{V} + v'$), en m/s.
W	magnitud del componente de velocidad en la dirección z , en m/s.
\bar{W}	magnitud del componente de velocidad media en la dirección z ($W = \bar{W} + w'$), en m/s.

\overline{W}_d	magnitud de la componente vertical de velocidad media de fondo, en m/s.
\overline{W}_η	magnitud de la componente vertical de velocidad media de superficie, en m/s.
x, y, z	plano cartesiano de referencia.
z_b	distancia vertical desde el fondo hasta un punto cualquiera dentro del cuerpo de agua, en m.

Letras griegas

β ,	coeficiente de expansión volumétrica.
β_f ,	coeficiente de ajuste geostrófico a coordenadas cartesianas del parámetro de Coriolis.
δ_{ij} ,	delta de Kronecker.
ϵ ,	disipación de la energía cinética de la turbulencia, en m^2/s .
ε	rugosidad media del fondo, en m.
η	variación de la superficie libre respecto al nivel medio, en m.
$\bar{\eta}$	variación media de la superficie libre respecto al nivel medio, en m.
$\bar{\eta}$,	variación media de la superficie libre respecto al nivel medio, en m.
θ ,	fluctuación de la temperatura, en $^\circ\text{C}$.
κ ,	energía cinética de la turbulencia, en m.
λ ,	constante experimental que toma el valor de 0.09.
ν_N ,	viscosidad cinemática, en m^2/s .
ν_T ,	coeficiente de viscosidad turbulenta, en m^2/s .
ν_{TH} ,	coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal, en m^2/s .
ν_{TV}	coeficiente de viscosidad turbulenta vertical, en m^2/s .
ν_{Tx}	coeficiente de viscosidad turbulenta en la dirección x .
ν_{Ty}	coeficiente de viscosidad turbulenta en la dirección y , en m^2/s .
ν_{Tz}	coeficiente de viscosidad turbulenta en la dirección z , en m^2/s .
$\Delta\rho$,	variación de la densidad, en kg/m^3 .
Δt ,	incremento en el tiempo, en s .

Δx ,	ancho de celda en la dimensión x , en m.
Δy ,	ancho de celda en la dimensión y , en m.
Δz ,	ancho de celda en la dimensión z , en m.
ρ ,	densidad del agua <i>in situ</i> , en kg/m ³ .
ρ_0 ,	densidad de referencia, en kg/m ³ .
ρ' ,	densidad anómala, en kg/m ³ .
ρ_w ,	densidad del agua pura, en kg/m ³ .
ρ_ω ,	densidad del aire, en kg/m ³ .
τ_b ,	esfuerzo cortante turbulento debido a la fricción del fondo, en m/s ² .
τ_ω ,	esfuerzo cortante turbulento debido a la fricción producida por el viento sobre la superficie libre, en m/s ² .
φ ,	indica cualquier magnitud escalar, S , T y ρ .
ω ,	magnitud del vector de velocidad del viento a 10 m sobre la superficie libre, en m/s.
$\underline{\Omega}$,	vector de la velocidad de rotación de la tierra, equivale a 7.29×10^{-5} rad/s.

Introducción

Para simular el movimiento de contaminantes pasivos en cuerpos de agua, generalmente se emplean dos modelos: para la circulación un modelo hidrodinámico que simula el campo de velocidades del cuerpo de agua y un modelo de calidad del agua que simula el movimiento, transformación e interacción del contaminante con el agua. Si realizamos simplificaciones para hacer mas simple el cálculo del movimiento de un contaminante, su advección, su difusión turbulenta, etc., se emplea un tercer modelo llamado de transporte; este modelo tiene la tarea de hacer mas eficiente el acoplamiento entre los modelos hidrodinámicos y los de calidad del agua.

El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo de transporte con un esquema lagrangeano para el movimiento de partículas que pueden ser asociadas a contaminantes, sedimentos, etc., que cumpla los requisitos de modelación de transporte en aguas someras de una manera eficiente y eficaz y acoplar este a un modelo hidrodinámico existente.

El desarrollo del modelo de transporte lagrangeano, se centran en dos cuestiones principales, que constituyen las características del transporte de partículas:

- la simulación numérica de flujos altamente advectivos
- la simulación numérica de un determinado número de partículas cuya extensión de distribución es pequeña comparada con la escala del dominio de estudio

El acoplamiento entre el modelo lagrangeano de transporte y el modelo hidrodinámico está relacionado principalmente con el paso de tiempo que utiliza el modelo hidrodinámico pues es mayor que el empleado por el lagrangeano, esto debido a requerimientos de estabilidad. Además el acoplamiento contempla los siguientes puntos:

- la alta capacidad de almacenamiento de la información de las partículas
- la necesidad de la incorporación de velocidades en un paso de tiempo corto, así como la salida del coeficiente de viscosidad turbulenta del modelo hidrodinámico para el modelo de transporte lagrangeano

La estrategia computacional empleada para la simulación de pequeñas concentraciones de partículas puede resumirse como sigue:

Se realiza la simulación de la hidrodinámica del dominio de estudio a gran escala en 2D en diferentes épocas del año con la finalidad de decidir el escenario mas significativo para una simulación a detalle, posteriormente, se obtienen los campos de velocidades para cada intervalo de tiempo para cada nodo del dominio a gran escala, estas se emplean como forzantes para una nueva simulación en un dominio detallado en 3D que a su vez incorpora procesos como el oleaje local el cual modifica los términos advectivos, posteriormente se da alimentación al modelo de transporte lagrangeano, ubicando la descarga o concentración inicial de partículas y dar el seguimiento a cada una obteniendo el número y posición de cada una en determinada celda dentro del dominio.

Estos cálculos que se realizan para cada intervalo de tiempo al ser incorporados a dominios mas pequeños y con pasos de tiempo menores, generan errores numéricos, la precisión y exactitud del modelo de transporte lagrangeano radica en la minimización de estos errores. El problema numérico radica en la selección de la función de interpolación para las magnitudes advectivas y el método de transformación discreto a continuo y viceversa.

La interfaz de salida del módulo lagrangeano es interesante, se aborda desde dos puntos de vista: como un problema general de partículas donde interesa conocer en un dominio en 3D la posición final de cada una de ellas al finalizar la simulación, esto aplicado a un dominio detallado, para lo cual en el trabajo se presentan al término de un determinado tiempo de simulación observando entre patrones de 2 colores posibles zonas de mayor movimiento de partículas. El segundo, esta relacionado al conteo de partículas, ya sea en columna de agua mediante perfiles adimensionales de concentración en diferentes puntos del dominio o en una sección transversal donde se observe el seguimiento de un determinado número de partículas y su conteo final para realizar un balance entre partículas iniciales y finales.

Como una aportación al modelo hidrodinámico que se emplea para la obtención del campo de velocidades, se desarrolla un módulo de oleaje que complementa al modelo hidrodinámico con términos advectivos de alta frecuencia y con los fenómenos del oleaje que se observan en la superficie libre; este módulo se comparó con problemas académicos y de laboratorio y se aplicó de forma teórica en un caso de aplicación.

Justificación

La técnica de trayectoria de partículas es empleada para la simulación del movimiento de contaminantes o fuentes de contaminación ya sean puntuales o difusas así como el transporte de partículas de sedimentos. La aproximación euleriana-lagrangeana es justificada por dos razones: en primer lugar porque el modelado de flujos a superficie libre son considerados altamente advectivos y generalmente están regulados por el número de Courant. Los modelos euleriano-lagrangeanos se basan en separar los términos advectivos y difusivos, el componente advectivo es resuelto con el método de las características que permite números de Courant mayores que la unidad, mientras que los términos difusivos dan un sistema simétrico diagonalmente dominante, que puede ser resuelto fácilmente. La segunda justificación, parte de que el uso del método de las características es el ideal para el acoplamiento entre el modelo lagrangeano de transporte y el modelo hidrodinámico; el tratamiento por separado de los términos advectivos y difusivos en el modelo permite el cálculo de manera eficiente de los procesos como el movimiento, distribución y transporte de partículas en diferentes escalas de tiempo.

Objetivo general

Mediante el desarrollo, aplicación y validación de técnicas computacionales modernas, acoplar modelos euleriano-lagrangeanos para el movimiento de partículas a un modelo hidrodinámico existente.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de oleaje y sus procesos asociados que complemente el modelo hidrodinámico existente.
- Desarrollar y aplicar el modelo lagrangeano de partículas a casos controlados obtenidos de la literatura.
- Aplicar el modelo lagrangeano a una zona costera del Golfo de México.
- Estimar en una sección previamente definida de la zona costera el comportamiento de las partículas (conteo, posición, velocidad, etc.)
- Reportar los resultados obtenidos parciales y totales en artículos, congresos y publicaciones de divulgación académica.

Organización del trabajo

El trabajo consta de 4 capítulos, en el primero se aborda el marco teórico de la modelación del transporte de partículas de sedimentos así como los modelos existentes, se describen algunos que por sus características son más afines al trabajo que se realiza mencionando ventajas y desventajas de ellos; en el segundo capítulo, se presenta la constitución del acoplamiento del campo de velocidades producto del modelo hidrodinámico con el esquema euleriano-lagrangeano, se explica el desarrollo del modelo de oleaje que retoma el campo de velocidades antes mencionado para posteriormente calcular el transporte de partículas; el tercer capítulo explica el desarrollo del modelo lagrangeano de partículas, enfatizando las características de distribución, de dispersión y condiciones de frontera así como el esquema computacional y ejemplos de validación; en el cuarto capítulo se presenta la aplicación del modelo a una zona costera ubicada en la Sonda de Campeche dentro del Golfo de México, esta aplicación se hace desde el punto de vista académico, debido a la falta de datos y a las limitantes en capacidad de cómputo. Se incluyen Finalmente, se incluye un anexo donde se presentan las problemáticas de la erosión del sedimento en las zonas costeras de los Estados de Tabasco y Campeche, donde se puede aplicar con mayor detalle este trabajo contando con los recursos necesarios.

Capítulo 1

Aspectos Generales y Teóricos de la Modelación de Sedimentos

En este capítulo se presenta una recopilación de los modelos, métodos y conceptos teóricos que involucran el transporte de sedimentos en cuerpos continentales como los ríos y su interacción con el océano.

De forma particular, los ecosistemas costeros presentan diferentes procesos físicos, químicos, biológicos y ecológicos; los que interesan en este trabajo son los hidrodinámicos y el transporte de partículas que son asociadas a los sedimentos. El fenómeno del transporte de sedimentos es uno de los más difíciles dentro del campo de investigación costera, debido a los numerosos parámetros y diversas interacciones que intervienen en los procesos que los rigen; por tal motivo, para observar la interacción entre las variables hidrodinámicas y del transporte de partículas asociadas a los sedimentos, se emplea como herramienta la modelación numérica para determinar su posición inicial y final (técnica de trazador), el número de partículas, sus velocidades y su distribución en el espacio.

1.1. Transporte de sedimentos en zonas costeras

El movimiento de sedimentos que se produce en la zona costera se realiza generalmente en dos zonas que son: la parte continental (estuario y desembocadura del río) y la parte propiamente costera (fig.1.1).

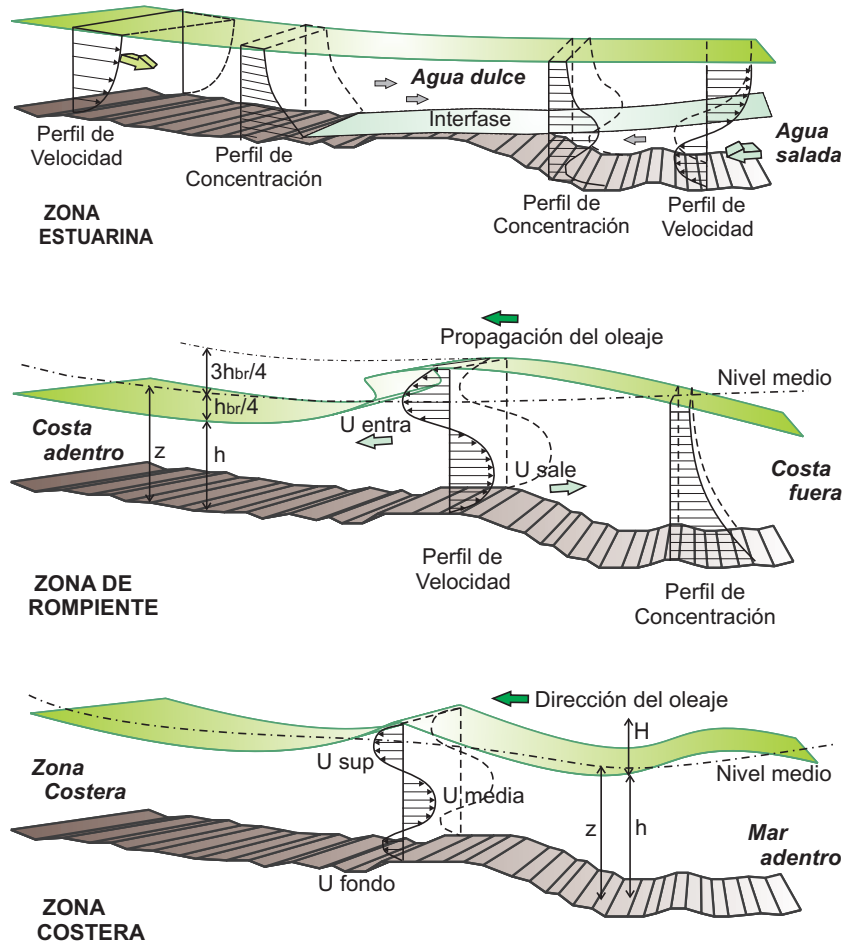


Figura 1.1: Perfiles de velocidad y concentración de sedimento en la zona costera

Paralelamente, tomando en cuenta el sentido del movimiento de los sedimentos bajo la acción del oleaje se tiene dos tipos: transversal y longitudinal. El movimiento longitudinal, conocido como transporte litoral, es más importante que el transversal, debido a que las corrientes dentro de la zona de rompientes, son usualmente más importantes que las corrientes transversales o corrientes de retorno y, consecuentemente, tienen una mayor capacidad para transportar sedimentos.

Bajo la acción del oleaje, los sedimentos están sometidos a diferentes fuerzas: unas provienen directamente del movimiento orbital de las partículas de agua en las cercanías del fondo, otras de las corrientes en la capa límite y de las corrientes de compensación.

El transporte litoral se efectúa principalmente siguiendo dos procesos:

1. Por el efecto de la ola al precipitarse sobre la parte alta de la playa; esto es que la ola ascendente transporta sedimentos en dirección de la ola y desciende por la línea de mayor pendiente produciendo un transporte que tiende a ser en zig-zag.
2. Debido al rompimiento de la ola y a la corriente longitudinal; esto es que el sedimento en esta zona de rompiente sigue un camino análogo al que se tiene en lo alto de la playa y la corriente longitudinal acarrea los sedimentos como si fuera una corriente permanente a la que se le ha dado el nombre de corriente en la rompiente.

Los modelos utilizados para simular el transporte de sedimentos en el mar consiste de modelos en elemento finito o diferencias finitas que resuelven las ecuaciones que describen la hidrodinámica junto con la ecuación de transporte aplicada a los sedimentos en 2 ó 3 dimensiones (Periáñez *et al*, 2002) [PE02].

La ecuación de transporte para modelar el material en suspensión debe incluir las propiedades de las partículas (velocidad de caída, la densidad del sedimento, granulometría etc.), esta ecuación debe ser resuelta para cada intervalo espacial y temporal lo que implica el uso de esquemas numéricos de solución, el esquema empleado en este trabajo es el método de las características para la parte advectiva y diferencias centradas para la parte difusiva enmarcadas dentro del concepto de la distribución espacial de la celda Arakawa o MAC.

Para calcular el transporte de sedimentos deben de resolverse las ecuaciones de Navier-Stokes, la ecuación de continuidad y la ecuación de transporte. Es decir, para resolver el problema sería preciso que se cumplieran simultáneamente los balances de materia, energía y cantidad de movimiento. Sin embargo, y circunscribiendo el problema al fenómeno que nos ocupa, dado que el transporte de sedimentos presenta concentraciones variables en columna de agua se parte del supuesto que la concentración del sedimento no afecta la hidrodinámica del flujo.

1.1.1. Modelos Lagrangeanos

Estos modelos sirven para representar descargas en forma de pulsos o segmentadas y emisiones puntuales de partículas, es decir cuando se trata de emisiones

instantáneas no continuas. Para la simulación de la dinámica del movimiento de partículas que se transportan sobre un flujo se consideran las siguientes hipótesis:

- Propiedades densimétricas (peso, tamaño, forma, diámetro)
- Indeformabilidad
- Son elementos pasivos, es decir que no reaccionan entre ellas, ni con el fluido que las transporta
- Se presentan choques inelásticos entre partículas
- No existe adhesión entre partículas

Para el movimiento de partículas que representen al sedimento, está promovida por el empleo de un componente advectivo y un componente dispersivo (turbulento); el componente dispersivo emplea un campo de viscosidad turbulenta afectado a la vez por una función aleatoria (Robinson, 2007)[RMM07]. Esta representación numérica de la dispersión es muy natural, en el sentido de que trata de representar las fluctuaciones turbulentas como movimientos aleatorios de las partículas.

La distribución gaussiana permite una serie de simplificaciones matemáticas, que no podrían ser posibles si se emplearan otros tipos de distribuciones. La utilización de otras distribuciones más complejas que la gaussiana no garantiza una mejor aproximación (Robinson, 2007) [RMM07].

1.2. Tendencias y trabajos actuales sobre la modelación lagrangeana del transporte de sedimentos

En la literatura consultada aparecen varios modelos comerciales cuyo fundamento son modelos lagrangeanos; dentro de ellos se encuentra un programa o módulo llamando “PTM” (Particle Tracking Model) elaborado por el cuerpo de ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (Demirbilek *et al*, 2005)[DSZ⁺05], tiene como finalidad conocer y/o predecir el lugar donde las partículas de sedimento puestas en suspensión por actividades de dragado se depositarán en el medio

marino para así estimar los lugares de azolve, este módulo se anexa al modelo “SMS” (Shoreline Modeling System), este modelo calcula la evolución de la línea de costa y el transporte de sedimentos litoral en conjunto con la hidrodinámica del cuerpo en estudio.

El PTM esta diseñado para los procesos y necesidades siguientes:

- Movilidad o trayectorias del sedimento.
- La posición final del sedimento puesto en suspensión.
- Fuente del origen de material en áreas que experimentan sedimentación.
- Efectos de actividad antropogénica en trayectorias del sedimento.

El modelo requiere conocer previamente los campos de velocidades (circulación) de los escenarios de estudio para posteriormente ejecutar la aplicación PTM.

Existen otros métodos para la modelación de partículas: el método de la hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) por sus siglas en inglés (Gingold y Monaghan, 1977; Lucy 1997)[GM77], [Luc77] y el método semi-implícito de movimiento de partículas (MPS) que al igual es por sus siglas en inglés (Koshizuka y Oka, 1996)[KO96]. El método de SPH fue desarrollado como un resolovedor de flujos compresibles para modelos dinámicos de galáxias en astrofísica, posteriormente, la versión de compresibilidad baja (WCSPH) fue propuesta por Monaghan (1994)[Mon94] para el análisis del flujo de fluidos incompresibles a superficie libre.

El método MPS fue desarrollado para simular el flujo de fluidos incompresibles; existen dos diferencias fundamentales entre los métodos SPH y MPS, el primero emplea una función de integración local para las partículas, mientras que el segundo es un esquema computacional.

De forma general en los métodos de modelación de partículas, los operadores vectoriales como el gradiente, divergencia y el laplaciano son modelados por la integración local de las propiedades físicas de las partículas y el empleo de una función radial para su movimiento (Gotoh, 2009)[Pro09]. En el método SPH, los operadores vectoriales diferenciales son calculados por una función diferenciable específica, mientras que en el método MPS, todos los operadores vectoriales son

calculados o modelados uno por uno con una función en especial que juega un papel de función de peso.

En los métodos de SPH y WCSPH, los esquemas explícitos son usados generalmente para la solución computacional, mientras que el método MPS, el campo de presión es calculado empleando un esquema implícito. Shao y Lo (2003)[SL03] propusieron un método incompresible para el SPH el cual se le conoce como (ISPH), que consiste en el empleo de un esquema implícito similar al método MPS para la ecuación de presión de Poisson (PPE) en conjunto con una función para las operaciones diferenciales.

1.2.1. Modelos existentes

A continuación se resume en los cuadros (1.1 y 1.2) algunas de las características de los modelos hidrodinámicos con o sin transporte de sedimentos que se encuentran en la literatura.

Modelo	Código fuente	Modelo de turbulencia vertical	Mezclado horizontal	Sedimentos	Morfología	Estratigrafía	Inundado y/o seco	Lenguaje	Discretización horizontal	Mallado horizontal	Mallado vertical	Procesamiento Paralelo	Oleaje	Transporte de fondo	Transporte en suspensión	Erosión y/o depósito
ADCIRC3D									EF							
CH3D	P	ARAP	Si				Si	F90		C,I	S,Z	Si	Si			
CH3D-IMS	P	ARAP	Si				Si	F90		C,I	S,Z	Si	Si			
CH3D-WES	PDL	KE	Si							C	S,Z					
COHERENS	PD	MY25,KE	Si	Limitado	No	No	Si	F77	DF	R,S	S	No	No	No	No	No
DELFT3D	P	KE	Si	A	Si	Limitado	Si	F77	DF	R,C	S,Z	No	Si	Si	Beta	
ECOMSED	PD	MY25	Si	A	No	Si	No	F77	DF	R,C	S	No	No	No	No	Externo
EFDC	PD	MY25	Si	A	Si	Si	Si	F77	DF	C	S	Cray, MPI	Si	Si	Si	Si
GETM	O	KE	Si	Nc			Si	F90/95	DF	C	S	Si				
HAMSON	P							F90			Z					
HYDRO3D/SED3D																
MECO	C	MY25,KE	Si	Si		Si	Si	C	DF	C	Z					
MIKE3D	P	KE		NA												
MOHID																
NCOM	PDL	MY25	Si	Beta	No	No	No	F90	DF	C	M	Si	No	No	No	No
POLCOMS	PDL	MY25	Si	Si	No	No	No	F10	DF	B	S	Si	No	No	No	Si
POM2K,OZPOM	PD	MY25	Si	Nc	No	No	No	F77	DF	C	S	Si	No	No	No	No
QUODDY4	PD	MY25		Nc			No	F77/C	EF	Z	S	Si	No	No	No	
RMA10-11		MY25														
ROMS	C	MY25,GLS,KW		A	Si	Limitado	No	F77	DF	C	S	Si	No	No	Si	No
SHORECIRC	PDL			Nc	Si				DF				Si	Si	No	No
SYMPHONIE	PDL	KE	Si	C		No	No	F77	DF	R	S	No	No	No	No	No
TELEMAC-3D	P						Si									
UnTRIM	P															

NOTAS: Código fuente: (P)Privado, (C)Derechos Reservados, (O)Abierto, (PD)Dominio Público, (PDL)Dominio Público Distribución Limitada
 Modelo Turbulencia: (MY25)Mellor y Yamada 2.5, (GLS)Longitud de mezclado, (KE)K-Epsilon, (KW)K-Omega, (ARAP)Aeronautica Princeton
 Sedimentos: (Nc)No cohesivos, (C)Cohesivos, (A)Ambos, (NA)Ninguno
 Mallado Horizontal: (R)Rectangular, (C)Curvilíneo, (S)Esférico, (I)Irregular, (Z)Coordenadas Z, (M)Múltiples

Cuadro 1.1: Modelos hidrodinámicos e hidrodinámicos con transporte de sedimentos existentes

Modelo	Lugar de Desarrollo	Página de internet	Referencias
ADCIRC3D	ERDC	http://www.nd.edu/~adeirc/	Luetlich, Rick et al (2004)
CH3D	Universidad de Florida	http://www.coastal.ufl.edu	Sheng, Peter (1986)
CH3D-IMS	Universidad de Florida	http://www.coastal.ufl.edu	Sheng et al. (2003)
CH3D-WES	Cuerpo de Ingenieros Ejército de los Estados Unidos (USACE)	http://smig.usgs.gov	Chapman, Johnson y Vemulakonda (1996)
COHERENS	Proudman Ocean Laboratory; Universidad de Napier; Unidad de Modelos Matemáticos de la Universidad de Bruselas	http://www.mummm.ac.be	
DELFT3D	Delft Hydraulics	http://www.nec.coast.nl/tools/rikz/delft3d.htm	Lesser et al (2000)
ECOMSED	USGS, HydroQual	www.hydroqual.com	Blumberg y Mellor (1980, 1987), HydroQual (2000)
EFDC	Tetratech	Email John.Hamrick@tetratech-ffx.com	
GETM	Centro de Investigación, Universidad de Hamburgo	http://www.getm.eu	Burchard y Bolding (2002)
HAMSON	Universidad de Hamburgo	http://www.ifm.uni-hamburg.de	
HYDRO3D/SED3D	USF	http://www.epa.gov/epa_ream	
MECO	CSIRO	http://www.marine.csiro.au	
MIKE3D	DHI Software	http://www.dhisoftware.com	
MOHID	Inst. Superior Técnico, Universidad de Lisboa	http://www.mohid.com	Martins et al. (1998)
NCOM	NRL, VIMS	http://www7320.nrlssc.navy.mil/global_ncom	Martin (2000)
POLCOMS	Proudman Ocean Laboratory	http://www.pol.ac.uk/home/research	Holt y James (2001)
POM2K.OZPOM	Universidad de Princeton	http://www.aos.princeton.edu	
QUODDY4	Dartmouth College, Canada	http://www.opnml.unc.edu	Greenberg (1979) y (Naimie, 1996)
RMA10-11	Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL), USACE	http://smig.usgs.gov/cgi-bin/SMIC/model_home_pages	King (1982)
ROMS	Rutgers, UCLA, USGS	http://www.ocean-modeling.org	
SHORECIRC	Universidad de Delaware	http://chinaocat.coastal.udel.edu/programs	Uday Putrevu (1992)
SYMPHONIE	Observatoire Midi-Pyrenees, Francia	http://poc.obs-mip.fr	Marsaleix et al (2008)
TELEMAC-3D	Laboratorio de Hidráulica y Electricidad de Francia	http://www.telemacsystem.com	
UnTRIM	Universidad de Trento, Italia	http://sfports.wr.usgs.gov/rtcheng	Casulli y Cheng (1992)

Cuadro 1.2: Continuación

Capítulo 2

Acoplamiento lagrangeano para los términos advectivos de las ecuaciones de movimiento del modelo hidrodinámico

Dentro de la modelación de fenómenos o procesos físicos en el área de la dinámica de fluidos como son los problemas de difusión, advección pura, difusión-reacción y la combinación de ellos, es posible emplear coordenadas eulerianas o lagrangeanas para la construcción de modelos matemáticos de flujo de fluidos. En modelo euleriano el cálculo de las variables físicas de interés es mediante un arreglo de puntos, los cuales pueden ser distribuidos en el espacio de tal forma que la optimización de los cálculos esté referido a la velocidad y precisión con que son llevados a cabo.

En un modelo lagrangeano, las variables o cantidades físicas están calculadas en un conjunto de puntos en movimiento con el fluido (partículas del fluido). En un estado inicial (tiempo cero), estos puntos pueden ser distribuidos en un arreglo razonablemente bien distribuido, pero este se va gradualmente distorsionado conforme pasa el tiempo y/o curso del movimiento de las partículas del flujo (Abbott *et al*, 1982)[AC82]. Los valores nuevos de las variables son calculadas a partir de los arreglos de puntos en el tiempo anterior con la ayuda de procesos de interpolación sofisticados.

2.1. Ecuaciones gobernantes del modelo hidrodinámico

2.1.1. Ecuaciones para las velocidades y superficie libre

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones generales que pueden ser usadas para modelar el movimiento de fluidos. Sin embargo cuando se considera un problema específico; tal como el flujo en aguas someras, en donde las escalas horizontales son mucho más grandes que la escala vertical.

Las ecuaciones que describen el movimiento del flujo son:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + f\bar{V} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} - f\bar{U} \quad (2.2)$$

El gradiente de presión:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = -\rho g \quad (2.3)$$

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

donde:

$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$	Componentes de velocidad media en el tiempo t en las direcciones x, y, z respectivamente	(m/s)
f	Componente de la fuerza de Coriolis por unidad masa	(s ⁻¹)
g	Aceleración de la gravedad	(m/s ²)
\bar{P}	Término de presión promediada	(kg/m ²)
ρ_0	Densidad de referencia	(kg/m ³)
ρ	Densidad	(kg/m ³)

Las ecuaciones (2.1 y 2.2) son conocidas como ecuaciones promediadas de Navier-Stokes-Reynolds o ecuaciones de Reynolds. Las correlaciones dobles $\bar{u}u, \bar{u}v, \bar{u}w, \dots, \bar{w}w$ son las causantes de la pérdida de movimiento en la dirección del flujo medio, es

por esa razón que son consideradas en el termino de los esfuerzos del fluido. Dichas correlaciones se conocen como los esfuerzos de Reynolds y son de mucho mayor magnitud que los esfuerzos viscosos, por lo que generalmente estos últimos pueden ser despreciados.

En lo que se refiere al término de presión de las ecuaciones (2.1 y 2.2), éstos se reducen a una distribución de presión hidrostática de la siguiente manera:

Integrando la ecuación (2.3) se obtiene:

$$\bar{P}(x, y, z, t) = g \int_z^\eta \rho dz + P_{atm} \quad (2.5)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} \eta(x, y) & \text{Nivel de la superficie libre referido al plano } z = 0 \quad (m) \\ P_{atm} & \text{Término de presión atmosférica} \quad (kg/m^2) \end{array}$$

Sustituyendo este resultado en el término de la presión de la ecuación (2.1) y aplicando la regla de integración de Leibnitz, se obtiene:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} \quad (2.6)$$

El gradiente de presión horizontal es descrito por la diferencia del nivel de la superficie libre del agua a través del término barotrópico (primer término del lado derecho de la ecuación) y por la diferencia de densidades en la dirección horizontal a través del término baroclínico (segundo término del lado derecho de la ecuación), (ρ') es la diferencia entre la densidad (ρ) y la densidad de referencia (ρ_0) , conocido también como anomalía de la densidad. El tercer término del lado derecho de la ecuación describe la contribución de la presión atmosférica. De manera similar se deduce la ecuación del gradiente de presión horizontal respecto de (y) .

Si se sustituyen los términos de presión de las ecuaciones (2.1) y (2.2) las ecuaciones (2.6) y (??), se obtienen las ecuaciones de movimiento para las velocidades del plano horizontal, considerando un sistema coordenado cartesiano, donde la superficie libre se localiza en $z = \eta(x, y)$ y el fondo en $z = -H(x, y)$.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} + f\bar{V} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_{atm}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} - f\bar{U} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9), corresponden a las ecuaciones para aguas someras. Estas ecuaciones forman un sistema de tres ecuaciones, con cuatro variables desconocidas, las componentes de velocidad \bar{U} , \bar{V} , \bar{W} , y una frontera libre (superficie libre del agua η). Por ello es necesario obtener una cuarta ecuación para poder resolver el sistema.

Para deducir la ecuación faltante, se integra la ecuación (2.9) a lo largo del eje vertical, de esta manera se obtiene:

$$\bar{W}(x, y, \eta, t) - \bar{W}(x, y, d, t) = -\int_{-d}^\eta \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} dz - \int_{-d}^\eta \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} dz \quad (2.10)$$

donde $d=d(x, y)$ es la profundidad del agua por debajo del plano de referencia ($z = \theta$). Los cambios morfológicos del fondo debido al flujo del agua son en general muy pequeños y por lo tanto despreciables. De esta manera “ d ” no depende del tiempo, por lo cual \bar{W} en la superficie libre se puede escribir de la siguiente manera:

$$\bar{W} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.11)$$

de la misma forma \bar{W} para el fondo está dado por:

$$\bar{W} = -\bar{U} \frac{\partial d}{\partial x} - \bar{V} \frac{\partial d}{\partial y} \quad (2.12)$$

sustituyendo las ecuaciones (2.11) y (2.12) en la ecuación (2.10) y utilizando la regla de integración de Leibnitz, se obtiene la ecuación para la superficie libre, que es la cuarta ecuación para el sistema:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-d}^{\eta} \bar{U} dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-d}^{\eta} \bar{V} dz \right) \quad (2.13)$$

Dentro de las ecuaciones para las aguas someras que posee el modelo hidrodinámico aparecen los términos de densidad, que se pueden expresar en función de la temperatura, salinidad y presión. Empleando un esquema euleriano se puede establecer su solución numérica.

2.1.2. Ecuación para la temperatura

Existen situaciones, en las que los gradientes de temperatura son importantes, y para los cuales se requiere la ecuación de transporte para la temperatura:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \pm [Q] \quad (2.14)$$

donde:

T	Valor promedio de la temperatura	($^{\circ}C$)
K	Coefficiente de difusividad térmica en las direcciones x, y, z	(m^2/s)
Q	Flujo de calor en la superficie	($^{\circ}C/s$)

2.1.3. Ecuación para la salinidad

De forma similar a la ecuación para la temperatura, se considera la siguiente ecuación media de transporte para la salinidad:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (2.15)$$

donde:

S	Valor promedio de la salinidad	(ups)
K	Coefficiente de difusividad en las direcciones x, y, z	(m^2/s)

2.1.4. Ecuación de estado para la densidad

Los flujos de calor, evaporación, lluvia, descargas de ríos y zonas polares (hielo), influyen en la distribución de la temperatura y la salinidad en la superficie y a lo largo de la columna vertical de agua en las zonas costeras. Los cambios de dichas propiedades pueden incrementar o disminuir la densidad del agua. Así, conjuntamente la temperatura, la salinidad y la presión, son utilizadas para estimar la variación de la densidad. La distribución de la densidad en el mar es directamente proporcional a la distribución de los gradientes de presión horizontales y a las corrientes oceánicas.

La ecuación de la densidad se obtiene de una serie de pasos. Primeramente, es necesario calcular la densidad del agua pura, (ρ_w) , es decir con salinidad cero; y en segundo lugar, se calcula la densidad de referencia, (ρ_0) , que es la densidad a una atmósfera estándar y que participa dentro del término baroclínico. La densidad del agua pura es función de la temperatura y se estima con la ecuación (2.16), ([UNE81b] y [UNE81a]):

$$\begin{aligned} \rho_w = & 999,842549 + 6,793952 \times 10^{-2}T + 9,095290 \times 10^{-3}T^2 \\ & + 1,001685 \times 10^{-4}T^3 - 1,120083 \times 10^{-6}T^4 + 6,536332 \times 10^{-9}T^5 \end{aligned} \quad (2.16)$$

La densidad de referencia se estima mediante la ecuación de estado a una atmósfera estándar del agua marina, aceptada internacionalmente ([UNE81b] y [UNE81a]). La forma de esta ecuación es:

$$\rho_0 = \rho_w + AS + BS^{3/2} + CS^2 \quad (2.17)$$

donde los coeficientes A, B y C son funciones de la temperatura (T) y la salinidad (S), cuyos valores son:

$$\begin{aligned} A = & -0,824493 - 4,0899 \times 10^{-3}T + 7,6438 \times 10^{-5}T^2 \\ & - 8,2467 \times 10^{-7}T^3 + 5,3875 \times 10^{-9}T^4 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$B = -5,7246 \times 10^{-3} + 1,0227 \times 10^{-4}T - 1,6546 \times 10^2 \quad (2.19)$$

$$C = 4,8314 \times 10^{-4} \quad (2.20)$$

Así, la densidad (ρ) para una presión (P) cualquiera, es calculada con la ecuación de estado definida por Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards ([UNE81b]), de esta forma, se obtiene la densidad en (kg/m^3), en función de la presión en (*bares*), de la temperatura en ($^{\circ}C$) y de la salinidad en (*ups*):

$$\rho(S, T, P) = \frac{\rho_0}{\left(1 - \frac{P}{k_p}\right)} \quad (2.21)$$

donde $k_p = (S, T, P)$ es una constante ajustada en módulos evaluados como sigue: la (k_w) para agua pura es:

$$k_w = 19652,21 + 148,4206T - 2,327T^2 + 1,360477 \times 10^{-2}T^3 - 5,155288 \times 10^{-5}T^4 \quad (2.22)$$

de igual manera, la $k_0 = (S, T, 0)$ para una atmósfera estándar es:

$$k_0 = k_w + S (54,6746 - 0,603459T + 1,09987 \times 10^{-2}T^2 - 6,167 \times 10^{-3}T^3) + S^{3/2} (7,944 \times 10^{-2} + 1,6483 \times 10^{-2}T - 5,3009 \times 10^{-4}T^2) \quad (2.23)$$

y finalmente, la constante (k_p) se ajusta con la expresión siguiente:

$$k_p = k_0(S, T, 0) + p (3,239908 + 1,43713 \times 10^{-3}T + 1,16092 \times 10^{-4}T^2 - 5,77905 \times 10^{-7}T^3) + pS (2,2838 \times 10^{-3} + 1,0981 \times 10^{-5}T - 1,16078 \times 10^{-6}T^2 - 1,91075 \times 10^{-4}pS^{3/2}) + p^2 (8,50935 \times 10^{-5} - 6,12293 \times 10^{-6}T + 5,2787 \times 10^{-8}T^2) + p^2S (-9,9348 \times 10^{-7} + 2,0816 \times 10^{-8}T + 9,1697 \times 10^{-10}T^2) \quad (2.24)$$

2.2. Método lagrangeano de las características para los términos advectivos de las ecuaciones de movimiento

El método de discretización utilizado en el modelo hidrodinámico para resolver las ecuaciones de transporte, se conoce como “euleriano-lagrangeano”, el cual consiste en separar la ecuación en sus partes advectiva y difusiva. La parte advectiva se resuelve por el método de las características (lagrangeano), mientras que la parte difusiva se resuelve utilizando un método semi-implícito (euleriano).

Los términos advectivos de las ecuaciones de movimiento y de transporte no son simples de resolver numericamente, el sistema es hiperbólico y el interés se centra en la discontinuidad de las soluciones lo cual es notoriamente difícil de manejar en los esquemas numéricos. Se emplea el método de las características debido a que los términos advectivos son no lineales y tienen la característica de introducir oscilaciones en los resultados.

El método consiste en conocer la velocidad o una concentración de una partícula dentro del dominio en el tiempo t . Posteriormente se localiza su nueva velocidad o concentración en el tiempo $t + 1$ ó en el mismo tiempo t , por medio de la interpolación de los valores adyacentes a través de un valor característico, en este caso el número de Courant.

Ejemplificando el método para una dimensión se tiene:

Supongamos que tenemos un valor de concentración C en el punto P , para conocer el valor de la concentración nos podemos ayudar de los valores de la concentraciones C_{i-1}^m, C_i^m de los puntos adyacentes x_0 y x_1 respectivamente (fig. 2.1).

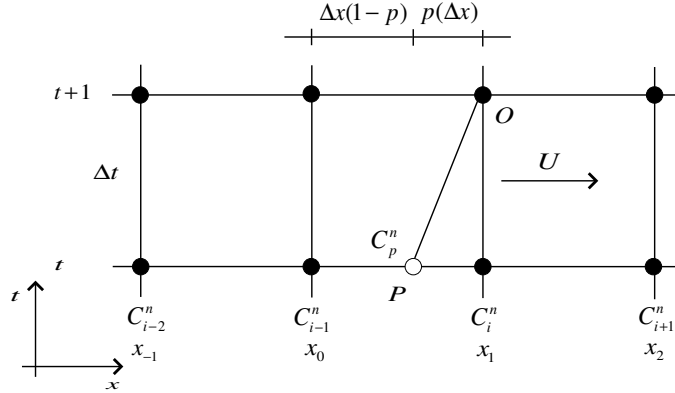


Figura 2.1: Concentración sobre una malla unidimensional

Como se puede observar en la figura (2.1), una partícula en el punto P viajando a una velocidad constante U se desplazará a una distancia $x + U\Delta t$ en un tiempo $t + \Delta t$, por lo que se obtiene:

$$C(x, t) = C(x + u\Delta t, t + \Delta t) = C(x + p\Delta x, t + \Delta t),$$

si se aplica la fórmula de interpolación de Gregory-Newton modificada (Wylie *et al*, 1985)[WB85]:

$$f(P) \equiv f(x + p\Delta x) = f_1 - p[f_1 - f_0] + \frac{p(p-1)}{2!} [f_2 - 2f_1 + f_0] - \dots$$

donde $f(P)$, f_0 , f_1 y f_2 son las concentraciones en los puntos P , x_0 , x_1 y x_2 respectivamente, p es un coeficiente de peso que posiciona al punto P con respecto a C_{i-1}^n y C_i^n . Puesto que el polinomio es de primer grado en la interpolación lineal, solo se utilizan los dos primeros términos de la ecuación anterior. Si se sustituye los valores conocidos para los dos puntos:

$$C_p^n = C_i^n - p(C_i^n - C_{i-1}^n). \quad (2.25)$$

Se puede demostrar que si se requiere conocer la concentración en el punto P en una malla en tres dimensiones la fórmula a utilizar es la siguiente (Wylie *et al*, 1985)[WB85]:

$$C_p^n = (1-r) \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) C_{i,j,k}^n + qC_{i,j-1,k}] + \\ p [(1-q) C_{i-1,j,k}^n + qC_{i-1,j-1,k}^n] \end{array} \right\} + r \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) C_{i,j,k-1}^n + qC_{i,j-1,k-1}^n] + \\ p [(1-q) C_{i-1,j,k-1}^n + qC_{i-1,j-1,k-1}^n] \end{array} \right\} \quad (2.26)$$

donde r , p y q , son los números de Courant en las direcciones z , x y y respectivamente, con $(r, p \text{ y } q) \leq 1$.

Podemos simplificar la notación a un esquema más flexible en cuanto a la restricción de Courant-Frederich-Lewy (CFL); puede demostrarse que cuando se utiliza el método lagrangeano la condición de estabilidad de CFL es menos restrictiva y permite que una partícula (de fluido o de un escalar) pueda recorrer más de un incremento espacial Δx por un incremento de tiempo Δt ; o incrementar el Δt para un Δx fijo; o bien ambos (Casulli *et al*, 1992)[CC92]. En la figura (2.2) se ilustra el caso unidimensional para la dirección en x y cuya expresión de extrapolación se escribe como:

$$C_p = C_{i-a}^n = C_{i-s}^n - p(C_{i-s}^n - C_{i-s-1}^n) \quad (2.27)$$

donde a es el número de Courant en la dirección x , s es la parte entera y p la fraccionaria del mismo, por lo que $a = s + p$. En la figura (2.2), s es el número de nodos que recorre la curva característica de la partícula y p es la fracción de Δx entre los nodos $(i - s)$ e $(i - s - 1)$.

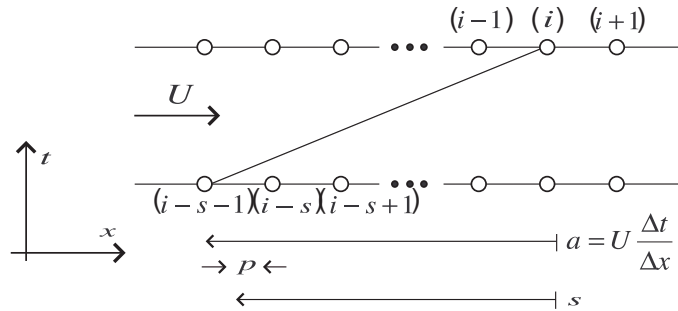


Figura 2.2: Generalización del método de las características para cualquier número de Courant

Con la fórmula anterior de interpolación es posible que el número de Courant sea mayor a uno, lo cual es ventaja sobre los esquemas de diferencias finitas comunes, sin embargo cuando se acopla a esquemas eulerianos, es recomendable que el número de Courant sea menor que uno.

Para el caso en tres dimensiones se tiene que a , b , c , son los números de Courant, calculados de las velocidades U , V , y W , respectivamente, estas velocidades siguen siendo velocidades medias pero por simplicidad se omite la tilde

en adelante; l, m, n son las partes enteras de los números de Courant, y p, q, r sus correspondientes partes decimales, de tal forma que $a = l + p, b = q + m$ y $c = n + r$, entonces $C_{i-a,j-b,k-d}^n$ es aproximado por:

$$C_{i-a,j-b,k-d}^n = (1-r) \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) C_{i-l,j-m,k-n}^n + qC_{i-l,j-m-1,k-n}^n] + \\ p [(1-q) C_{i-l-1,j-m,k-n}^n + qC_{i-l-1,j-m-1,k-n}^n] \end{array} \right\} + r \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) C_{i-l,j-m,k-n-1}^n + qC_{i-l,j-m-1,k-n-1}^n] + \\ p [(1-q) C_{i-l-1,j-m,k-n-1}^n + qC_{i-l-1,j-m-1,k-n-1}^n] \end{array} \right\}. \quad (2.28)$$

Además puede demostrarse que cuando se utiliza una interpolación trilineal, el esquema euleriano-lagrangiano esta libre de falsas oscilaciones (Casulli *et al*, 1992)[CC92].

Aplicado el esquema anterior a las ecuaciones de movimiento (2.7) y (2.8) en sus términos advectivos, se tiene para la velocidad U^n calculada por medio del método de las características de primer orden, de la siguiente forma:

$$U_{i-a,j-b,k-d}^n = (1-r) \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) U_{i-l,j-m,k-n}^n + qU_{i-l,j-m-1,k-n}^n] \\ + p [(1-q) U_{i-l-1,j-m,k-n}^n + qU_{i-l-1,j-m-1,k-n}^n] \end{array} \right\} + r \left\{ \begin{array}{l} (1-p) [(1-q) U_{i-l,j-m,k-n-1}^n + qU_{i-l,j-m-1,k-n-1}^n] \\ + p [(1-q) U_{i-l-1,j-m,k-n-1}^n + qU_{i-l-1,j-m-1,k-n-1}^n] \end{array} \right\},$$

La interpolación de primer grado es altamente difusiva; por lo tanto se propone una interpolación de segundo orden que es menos difusiva (Rodríguez, 2007)[Rod07], la cual se muestra a continuación:

$$U_{i-a,j-b,k-d}^n = (1-r^2) \left\{ \begin{array}{l} (1-p^2) \left[\begin{array}{l} (1-q^2) U_{i,j,k}^n + \\ (0,5q^2 + 0,5q) U_{i,j-1,k}^n + \\ (0,5q^2 - 0,5q) U_{i,j+1,k}^n \end{array} \right] + \\ + (0,5p^2 + 0,5p) \left[\begin{array}{l} (1-q^2) U_{i-1,j,k}^n + \\ (0,5q^2 + 0,5q) U_{i-1,j-1,k}^n + \\ (0,5q^2 - 0,5q) U_{i+1,j+1,k}^n \end{array} \right] + \\ + (0,5p^2 - 0,5p) \left[\begin{array}{l} (1-q^2) U_{i+1,j,k}^n + \\ (0,5q^2 + 0,5q) U_{i+1,j-1,k}^n + \\ (0,5q^2 - 0,5q) U_{i+1,j+1,k}^n \end{array} \right] \end{array} \right\} +$$

$$\begin{aligned}
 & + (0,5r^2 + 0,5r) \left\{ \begin{aligned} & (1 - p^2) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q) U_{i,j-1,k}^n \\ & + (0,5q^2 - 0,5q) U_{i,j+1,k}^n \end{aligned} \right] + \\ & + (0,5p^2 + 0,5p) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i-1,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q) U_{i-1,j-1,k}^n + \\ & (0,5q^2 - 0,5q) U_{i-1,j+1,k}^n \end{aligned} \right] + \\ & + (0,5p^2 - 0,5p) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i+1,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q) U_{i+1,j-1,k}^n + \\ & (0,5q^2 - 0,5q) U_{i+1,j+1,k}^n \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} + \\
 & + (0,5r^2 - 0,5r) \left\{ \begin{aligned} & (1 - p^2) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q^2) U_{i,j-1,k}^n + \\ & (0,5q^2 - 0,5q^2) U_{i,j+1,k}^n \end{aligned} \right] + \\ & + (0,5p^2 + 0,5p) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i-1,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q^2) U_{i-1,j-1,k}^n + \\ & (0,5q^2 - 0,5q^2) U_{i-1,j+1,k}^n \end{aligned} \right] + \\ & + (0,5p^2 - 0,5p) \left[\begin{aligned} & (1 - q^2) U_{i+1,j,k}^n + \\ & (0,5q^2 + 0,5q^2) U_{i+1,j-1,k}^n + \\ & (0,5q^2 - 0,5q^2) U_{i+1,j+1,k}^n \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

de forma análoga, se pueden expresar los términos advectivos para la velocidad V^n los cuales son escritos por (Rodríguez, 2007)[Rod07].

2.3. Incorporación del módulo de oleaje al modelo hidrodinámico

El módulo de oleaje desarrollado, retoma la ecuación de la pendiente suave desarrollada por Berhkoff (1971) [Ber72] en su forma elíptica para profundidades indefinidas y análogamente para zonas someras considerando la celeridad de grupo de ola en función de la profundidad y de la aceleración de la gravedad. La ecuación se ha subdividido en tres ecuaciones para calcular de forma simultánea la dirección, altura de ola y fase de la ola (Fuentes,1996)[Fue96]; la solución del sistema de

ecuaciones es por un método numérico determinado con un algoritmo de relajación para el cálculo de la fase de la ola. Se emplea un esquema de volumen finito con aproximación elíptica y un mallado tipo stargedd-celd con la opción de tener un refinado de malla en zonas donde se encuentren obras de protección o estructuras que modifique el oleaje para su estudio. Los procesos de transformación del oleaje que el módulo permite reproducir son: variación de la altura de ola, dirección de propagación (refracción, difracción, reflexión) y la rompiente mediante una condición de disipación de energía.

2.3.1. Ecuación de la pendiente suave (mild-slope-equation)

La ecuación desarrollada por Berkhoff (1972)[Ber72] conocida también como la ecuación de la pendiente suave, que es una de las ecuaciones que funciona muy bien para simular los fenómenos de refracción-difracción-reflexión, en lugares donde la irregularidad del fondo provocaría concentración de energía durante el avance del frente de ola. Para entender esta ecuación se presenta en su forma general definiendo cada una de sus partes como sigue:

$$\underbrace{\frac{\partial E(x, y, t, f, \theta)}{\partial t}}_1 + \underbrace{\nabla \cdot [C_g(x, y, f) * E(x, y, t, f, \theta)]}_2 = \underbrace{S_W}_3 + \underbrace{S_M}_4 + \underbrace{S_D}_5 + \underbrace{S_F}_6 + \underbrace{S_P}_7 \quad (2.30)$$

donde el primer termino representa el índice del cambio temporal del espectro, el segundo término representa la propagación de la energía de la onda, el tercer término representa entradas del viento, el cuarto término representa la redistribución de la energía de la onda entre diversos componentes no lineales que se presenten, el quinto término representa la disipación debido a la rompiente, el sexto término representa las pérdidas debido a la fricción, y el séptimo término representa las pérdidas debido a la filtración.

Se emplea la modelación numérica para resolver la ecuación (2.30) en una aproximación elíptica (ec.2.31) conocida como de Berkhoff que describe la propagación de una onda en la superficie libre periódica y de amplitud finita sobre batimetrías complejas, donde su deformación al aproximarse a zonas de baja profundidad y obstáculos presenta los fenómenos de refracción, difracción y reflexión (Panchang *et al*, 1991)[PP91].

$$\nabla (C c_g \nabla \eta) - \frac{c_g}{C} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2.31)$$

donde:

$\eta(x, y)$	Nivel o elevación de la superficie libre	(m)
$C(x, y)$	Celeridad ó velocidad de fase	(m/s)
$c_g(x, y)$	Celeridad de grupo	(m/s)

La solución de la ecuación de Berkhoff es trabajada y expresada en función de la razón de flujo del oleaje en sus componentes x e y (Fuentes, 1996)[Fue96], esto mediante un esquema implícito en el tiempo por medio de las siguientes ecuaciones en diferencias finitas.

$$c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{\partial Q_x}{\partial t} \quad (2.32)$$

$$c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} = - \frac{\partial Q_y}{\partial t} \quad (2.33)$$

donde:

$Q(x, y)$	Razon del flujo en el plano horizontal	(m/s)
-----------	--	---------

Para la solución de la ecuación de la variación de la superficie libre debido al oleaje en función de las razones de flujo antes mencionadas se tiene:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{n} \left[\frac{\partial}{\partial x} (n Q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (n Q_y) \right] \quad (2.34)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.35)$$

donde:

$n(x, y)$	Factor de grupo
$k(x, y)$	Número de onda $(2\pi/L)$
$h(x, y)$	Profundidad (m)

Este tipo de ecuaciones tienen la ventaja de disponer de los valores de las razones del flujo y que permiten encontrar la dirección del oleaje y plantear la presencia de obstáculo de una forma sencilla.

Solución numérica para las ecuaciones de razón de flujo y superficie libre

La solución numérica de las ecuaciones (2.32 a 2.34) es mediante el empleo de una malla tipo Staggeredd-Cell también conocida como de Arakawa tipo Ç con una discretización en diferencias finitas donde los valores de las razones de flujo, celeridades y otras variables están ubicadas en las caras y el valor de la superficie libre se localiza en el centro de la celda (fig. 2.3).

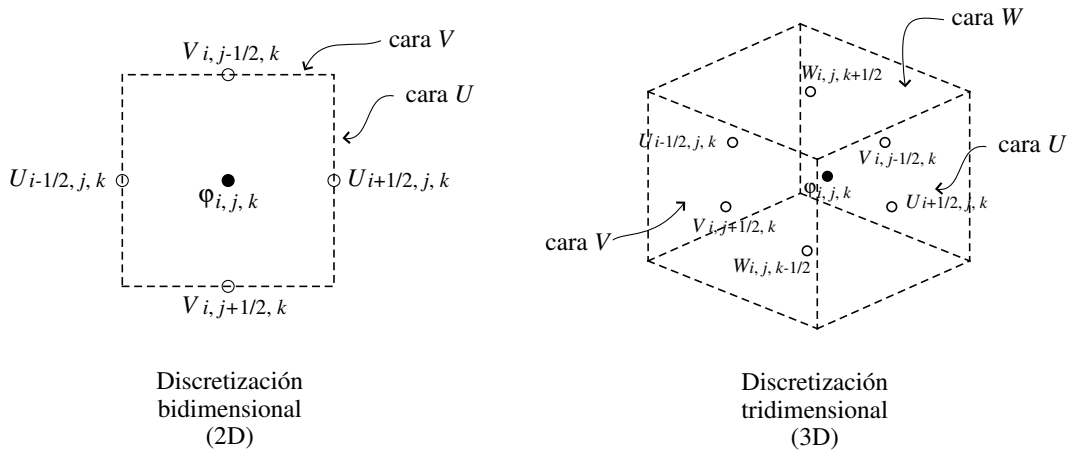


Figura 2.3: Notación de una celda Staggeredd Cell en 2D y 3D

La discretización de las ecuaciones de la razón de flujo y de la superficie libre del oleaje fueron estudiadas y escritas por Fuentes (1996)[Fue96], la cual para la fase del oleaje en la dirección “x” (ec. 2.32) se escribe como:

$$\frac{1}{c_{i-1,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{t+1} + \frac{22}{c_{i,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+1} + \frac{1}{c_{i+1,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{t+1} = \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{c_{i-1,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i-1,j+\frac{1}{2}}^t + \frac{22}{c_{i,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i,j+\frac{1}{2}}^t + \frac{1}{c_{i+1,j+\frac{1}{2}}^2} Qx_{i+1,j+\frac{1}{2}}^t - \frac{24}{\Delta x} \left(\eta_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t - \eta_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t \right)$$

para los valores en las fronteras del dominio ($i = 1$) e ($i = ni$) sobre la línea ($y = j + \frac{1}{2}$) se resuelven las siguientes ecuaciones:

$$Qx_{1,j+\frac{1}{2}}^{t+1} = Qx_{1,j+\frac{1}{2}}^t - \frac{c_{1,j+\frac{1}{2}}^2 \Delta t}{\Delta x} \left(\eta_{\frac{5}{2},j+\frac{1}{2}}^t - \eta_{\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}}^t \right)$$

$$Qx_{ni,j+\frac{1}{2}}^{t+1} = Qx_{ni,j+\frac{1}{2}}^t - \frac{c_{ni,j+\frac{1}{2}}^2 \Delta t}{\Delta x} \left(\eta_{ni,j+\frac{1}{2}}^t - \eta_{ni-1,j+\frac{1}{2}}^t \right)$$

La aplicación de las ecuaciones antes mencionadas para cada “j” da lugar a un sistema de ecuaciones lineales tridiagonal (fig. 2.4), cuya solución se realiza por un método iterativo; en el presente trabajo se utiliza el algoritmo de Thomas (Moreles *et al*, 2007)[MB07]. Los valores iniciales de la superficie libre en las fronteras se da por conocido y las celeridades en todo el dominio se determinan previamente.

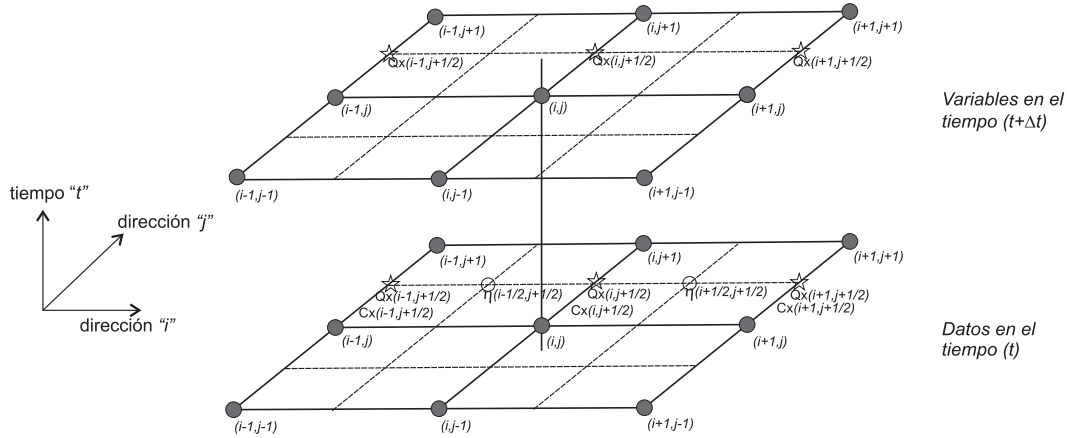


Figura 2.4: Esquema de cálculo del oleaje para la fase en X

De manera similar se trabaja la fase del oleaje en la dirección “y” (ec. 2.33) obteniendo:

$$\frac{1}{c_{i+\frac{1}{2},j-1}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j-1}^{t+1} + \frac{22}{c_{i+\frac{1}{2},j}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j}^{t+1} + \frac{1}{c_{i+\frac{1}{2},j+1}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j+1}^{t+1} = \quad (2.37)$$

$$\frac{1}{c_{i+\frac{1}{2},j-1}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j-1}^t + \frac{22}{c_{i+\frac{1}{2},j}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j}^t + \frac{1}{c_{i+\frac{1}{2},j+1}^2} Qy_{i+\frac{1}{2},j+1}^t - \frac{24}{\Delta y} \left(\eta_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t - \eta_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^t \right)$$

para los valores en las fronteras del dominio ($j = 1$) e ($j = n_j$) sobre la línea ($x = i + \frac{1}{2}$) se proponen las siguientes ecuaciones:

$$Qy_{i+\frac{1}{2},1}^{t+1} = Qy_{i+\frac{1}{2},1}^t - \frac{c_{i+\frac{1}{2},1}^2 \Delta t}{\Delta y} \left(\eta_{i+\frac{1}{2},\frac{5}{2}}^t - \eta_{i+\frac{1}{2},\frac{3}{2}}^t \right)$$

$$Qy_{i+\frac{1}{2},n_j}^{t+1} = Qy_{i+\frac{1}{2},n_j}^t - \frac{c_{i+\frac{1}{2},n_j}^2 \Delta t}{\Delta y} \left(\eta_{i+\frac{1}{2},n_j}^t - \eta_{i+\frac{1}{2},n_j-1}^t \right)$$

La aplicación de las ecuaciones antes mencionadas para cada “ i ” da lugar a un sistema de ecuaciones lineales tridiagonal (fig. 2.5), cuya solución al igual que la fase “ x ” se realiza por el método de Thomas.

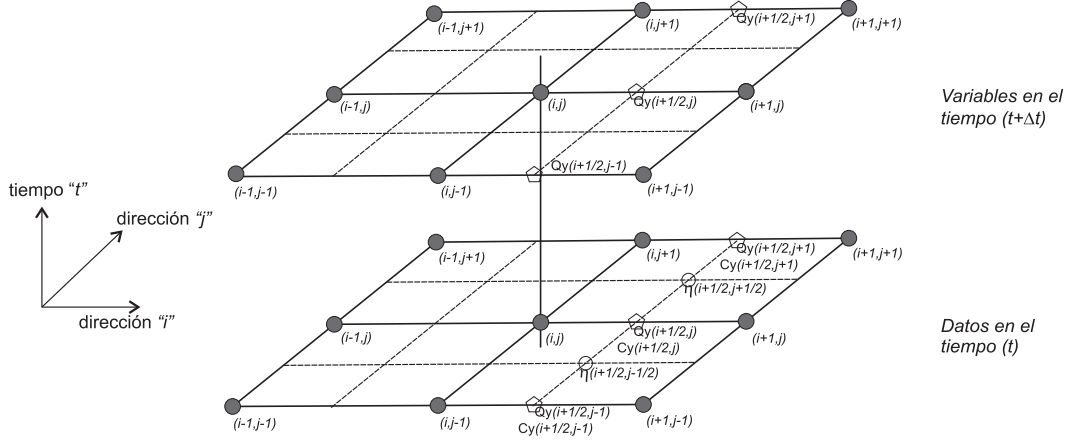


Figura 2.5: Esquema de cálculo del oleaje para la fase en Y

Por consiguiente la aproximación en diferencias finitas para la variación de la superficie libre por el oleaje (ec. 2.34) se escribe como:

$$\begin{aligned}
 & \left(n_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^{t+1} \right) + \left(n_{i+\frac{3}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{3}{2}, j+\frac{1}{2}}^{t+1} \right) + \left(n_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}}^{t+1} \right) + \quad (2.38) \\
 & \left(n_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{3}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{3}{2}}^{t+1} \right) + \left(20n_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^{t+1} \right) = \\
 & \left(n_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^t \right) + \left(n_{i+\frac{3}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{3}{2}, j+\frac{1}{2}}^t \right) + \left(n_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}}^t \right) + \\
 & \left(n_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{3}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{3}{2}}^t \right) + \left(20n_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \eta_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^t \right) - \\
 & \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \left(n_{i+1, j-\frac{1}{2}} Qx_{i+1, j-\frac{1}{2}}^{t+1} - n_{i, j-\frac{1}{2}} Qx_{i, j-\frac{1}{2}}^{t+1} + n_{i+1, j+\frac{3}{2}} Qx_{i+1, j+\frac{3}{2}}^{t+1} - n_{i, j+\frac{3}{2}} Qx_{i, j+\frac{3}{2}}^{t+1} \right) - \\
 & \left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right) \left(n_{i-\frac{1}{2}, j+1} Qy_{i-\frac{1}{2}, j+1}^{t+1} - n_{i-\frac{1}{2}, j} Qy_{i-\frac{1}{2}, j}^{t+1} + n_{i+\frac{3}{2}, j+1} Qy_{i+\frac{3}{2}, j+1}^{t+1} - n_{i+\frac{3}{2}, j} Qy_{i+\frac{3}{2}, j}^{t+1} \right) - \\
 & 22 \left(n_{i+1, j+\frac{1}{2}} Qx_{i+1, j+\frac{1}{2}}^{t+1} - n_{i, j+\frac{1}{2}} Qx_{i, j+\frac{1}{2}}^{t+1} + n_{i+\frac{1}{2}, j+1} Qy_{i+\frac{1}{2}, j+1}^{t+1} - n_{i+\frac{1}{2}, j} Qy_{i+\frac{1}{2}, j}^{t+1} \right)
 \end{aligned}$$

Los coeficientes que aparecen en las ecuaciones anteriores se tomaron del trabajo realizado por Fuentes (1996)[Fue96], el cual empleó series de Taylor de 4to y 5to orden con error de truncamiento mínimo. La aplicación de la ecuación (2.38) es sobre los puntos interiores del dominio (fig. 2.6), el cual da lugar a resolver un

sistema pentadiagonal lineal bandeado. Dicho sistema está en función de las fases en el plano antes calculadas y de las elevaciones en el tiempo correspondiente; se emplea un método iterativo para dar la solución al sistema, donde se sabe de antemano los valores de las variables η , Q_x , Q_y en el tiempo (t) que pueden ser iguales a cero salvo en la frontera donde incide el oleaje en la zona, con la finalidad de determinar los valores correspondientes en el tiempo ($t + 1$).

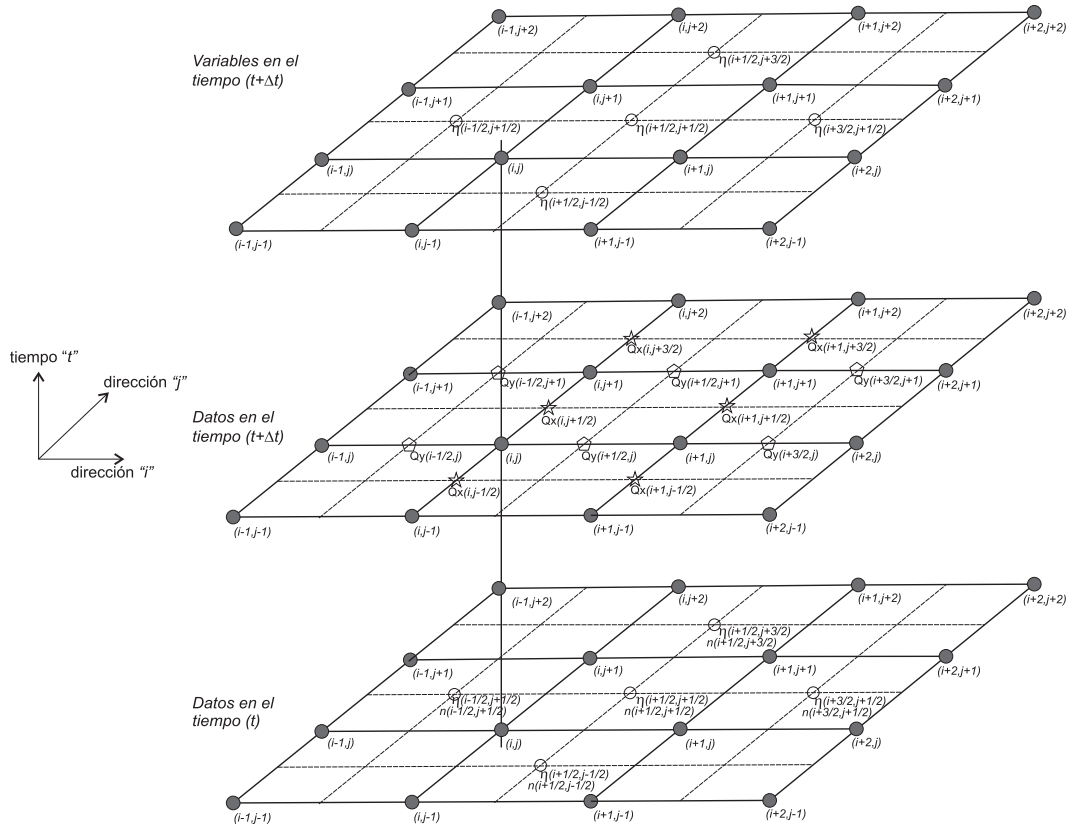


Figura 2.6: Esquema de cálculo para la superficie libre

Condiciones de frontera

Para obtener la propagación del oleaje en las fronteras libres, se aplica la ley de Snell, la cual permite que el oleaje salga del dominio de estudio sin modificar su dirección ni magnitud; a los obstáculos o estructuras dentro del dominio se le consideran fronteras sólidas, por lo que estas se proponen como una pared totalmente vertical, esta pared presenta 3 condiciones de reflexión las cuales se manifiestan con un coeficiente de (K_L), cuyo valor está limitado entre 0 y 1 (0

para una estructura que no presenta reflexión, 0.5 para una parcialmente reflejante y 1 para una condición totalmente reflejante). Lo anterior, se aplica en todo el perímetro de las estructuras.

Para la obtención de la elevación de la superficie libre en los extremos de cualquier obstáculo se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\eta_0^{n+1} = (1 + K_L) * \eta_{\left(\frac{c\Delta t}{\Delta x}\right)}^n - K_L \eta_0^{n-1} \quad (2.39)$$

$$\eta_L^{n+1} = (1 + K_L) * \eta_{\left(L - \frac{c\Delta t}{\Delta x}\right)}^n - K_L \eta_0^{n-1} \quad (2.40)$$

La ecuación (2.39) es empleada para el inicio de obstáculo con longitud infinita, y la ecuación (2.40) es utilizada para el final del obstáculo. Para el cálculo de una onda cuasi-oscilatoria resulta de la superposición de una ola incidente con altura (H_i) y una onda viajando en sentido opuesto con una altura menor (H_r). Esta reducción en la altura de la ola y el desfase entre incidente y reflejada están asociados y la superficie resultante puede expresarse:

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \frac{H_{i,j}}{2} \cos \left[(Kx_{i,j}X_{i,j} \cos(\theta_{i,j})) + (Ky_{i,j}Y_{i,j} \sin(\theta_{i,j})) - \frac{2\pi}{T} * t \right] \quad (2.41)$$

donde se considera que el oleaje reflejado por cualquier obstáculo sale de la región de estudio. Por último, el ángulo o dirección del oleaje puede ser estimado por la relación entre las fases (Qx^{n+1}) y (Qy^{n+1}):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Qy^{n+1}}{Qx^{n+1}} \right) \quad (2.42)$$

Casos de validación del módulo de oleaje

Para efectuar la validación del módulo de oleaje, se diseñaron dominios similares a los ejemplos teóricos de la literatura, con la finalidad de reproducir los fenómenos de refracción, difracción y reflexión, determinando alturas de ola, ángulos de incidencia y comparaciones entre las soluciones analíticas y los resultados de la modelación.

Caso 1. Resonancia en un puerto rectangular Como primer caso de validación se tomó el problema de resonancia en un puerto rectangular (fig. 2.7), cuya solución analítica fue presentada por Unluate *et al* (1973)[UM73] y las soluciones numéricas presentadas por Maa *et al* (1997)[MMLH97] y Lee (1971)[Lee71]. La geometría del puerto es de 0.3212m de longitud por 0.0605m de ancho y una profundidad de 0.2576m; el ángulo de incidencia del oleaje es de cero grados y la altura de ola es de 0.01m; los parámetros de la modelación se pueden observar en el cuadro (2.1).

Cuadro 2.1: Parámetros usados para la validación del modulo de oleaje, CASO 1

<i>Parámetro</i>	<i>Caso 1</i>
$H(m)$	0.01
$T(s)$	varia
θ (grados)	0.00
$h(m)$	0.2576
$\Delta x (m)$	0.10
$\Delta y (m)$	0.10
W x L (m)	4.497 x 1.845
MP x NP	45 x 20
Tiempo de Computo (s)	41

W, L son el ancho y largo del dominio de estudio
 MP, NP son los números de celdas en la dirección
 “x” y “y” respectivamente

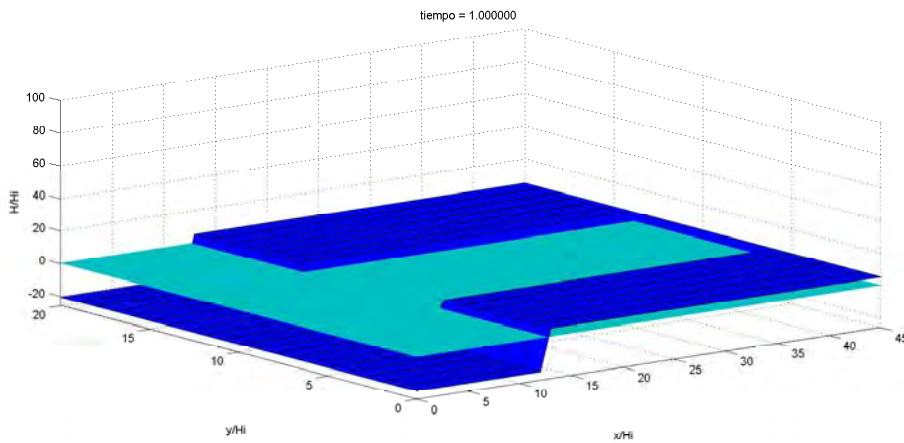


Figura 2.7: Geometría del puerto

El dominio se diseñó con 45 x 20 celdas utilizando $\Delta x = \Delta y = 0,1$ se comparó con la solución obtenida por Maa *et al* (1997)[MMLH97], la cual se presenta en la figura (2.8) las alturas de ola normalizadas.

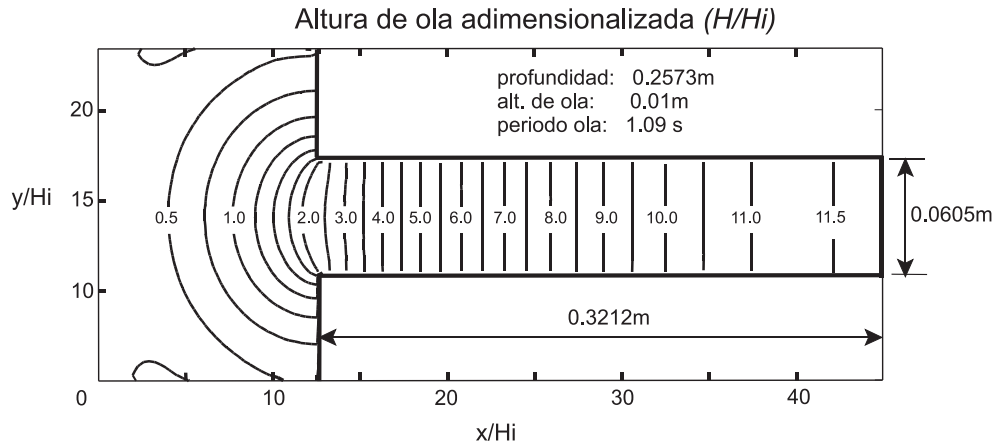


Figura 2.8: Solución presentada por Maa *et al.* (1997)

En la figura (2.9) se presenta el resultado obtenido por el modelo numérico desarrollado, donde se consideró que en todas las paredes se presentan un coeficiente de reflexión igual a 1.0 que es una condición totalmente reflejante.

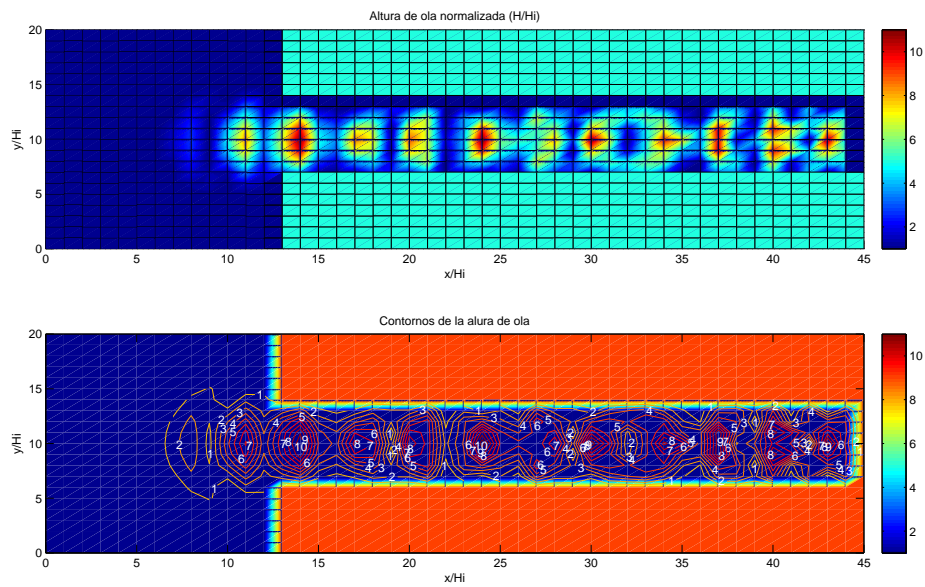


Figura 2.9: Resultados de la simulación numérica

Posteriormente se realizó una comparación cuantitativa entre las soluciones obtenidas por Lee (1971)[Lee71] y Maa *et al* (1997)[MMLH97], con coeficientes de reflexión de 0 a 4 de la resonancia que presenta el puerto con diversos periodos de oleaje incidente. La figura (2.10) muestra los resultados del modelo con un error relativo porcentual entre valores de la solución analítica y los valores promedio calculados de 8.75 %, esto debido a que se considera la reflexión en las caras perpendiculares al sentido del oleaje, lo cual presenta una pequeña agitación y que es más apegado a la realidad.

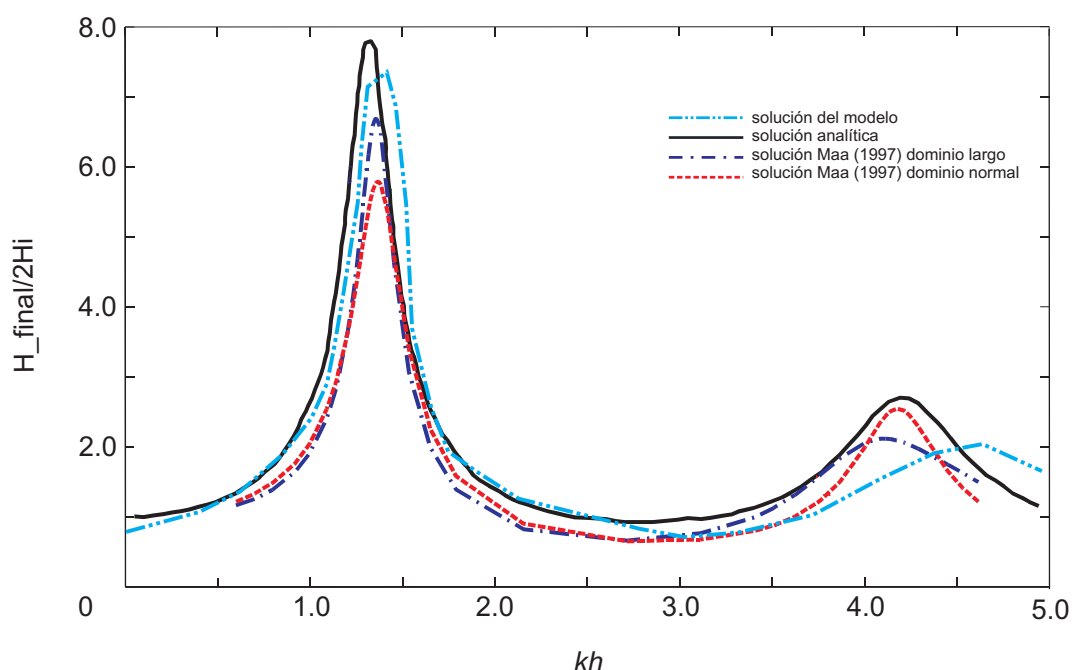


Figura 2.10: Comparación entre distintas soluciones del análisis de resonancia del puerto

Caso 2. Estudio de un pequeño puerto Se presentan los resultados obtenidos por Sato *et al* (1990)[SII90] acerca de la altura de ola en el estudio de un modelo físico de un puerto (fig. 2.11) donde la geometría del mismo presenta condiciones de frontera complicadas que se asemejan más a la realidad de un puerto.

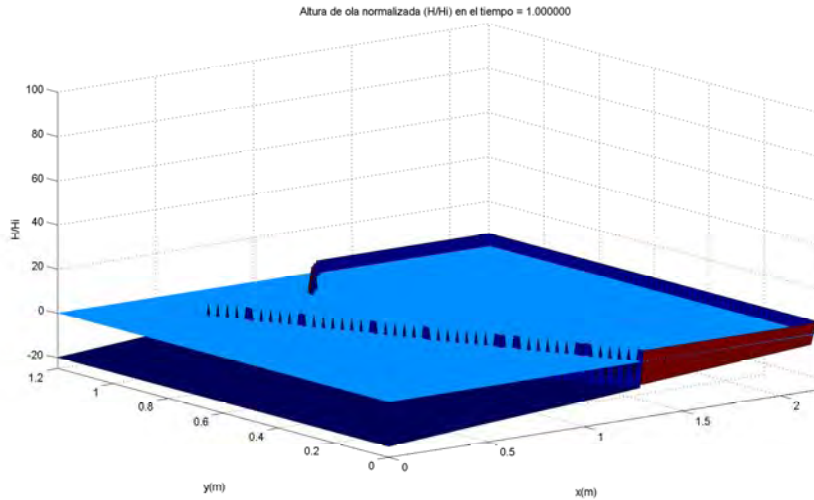


Figura 2.11: Geometría del puerto

El periodo incidente reportado en los experimentos fue de 0.73 s con un ángulo de incidencia del oleaje de 0 grados con respecto al eje Y_m de la figura (2.11), además de considerar que los rompeolas poseen un coeficiente de reflexión es de 0.8 que representa casi un paso nulo del oleaje sobre el rompeolas y un coeficiente de 1 para las fronteras abiertas (paso total del oleaje). Las dimensiones y aspectos de la construcción del dominio se presentan en el cuadro (2.2) y los resultados obtenidos por Sato *et al* (1990)[SII90] se presentan en la (fig. 2.12).

Cuadro 2.2: Parámetros usados para la validación del modulo de oleaje CASO 2

<i>Parámetro</i>	<i>Caso 2</i>
$H(m)$	0.01
$T(s)$	0.73
θ (grados)	0.00
$h(m)$	0.25 - 0.102
$\Delta x (m)$	0.02
$\Delta y (m)$	0.02
W x L (m)	2.2 x 1.2
MP x NP	111 x 61
Tiempo de Computo (s)	24

W, L son el ancho y largo del dominio de estudio

MP, NP son los números de celdas en la dirección “x” y “y” respectivamente

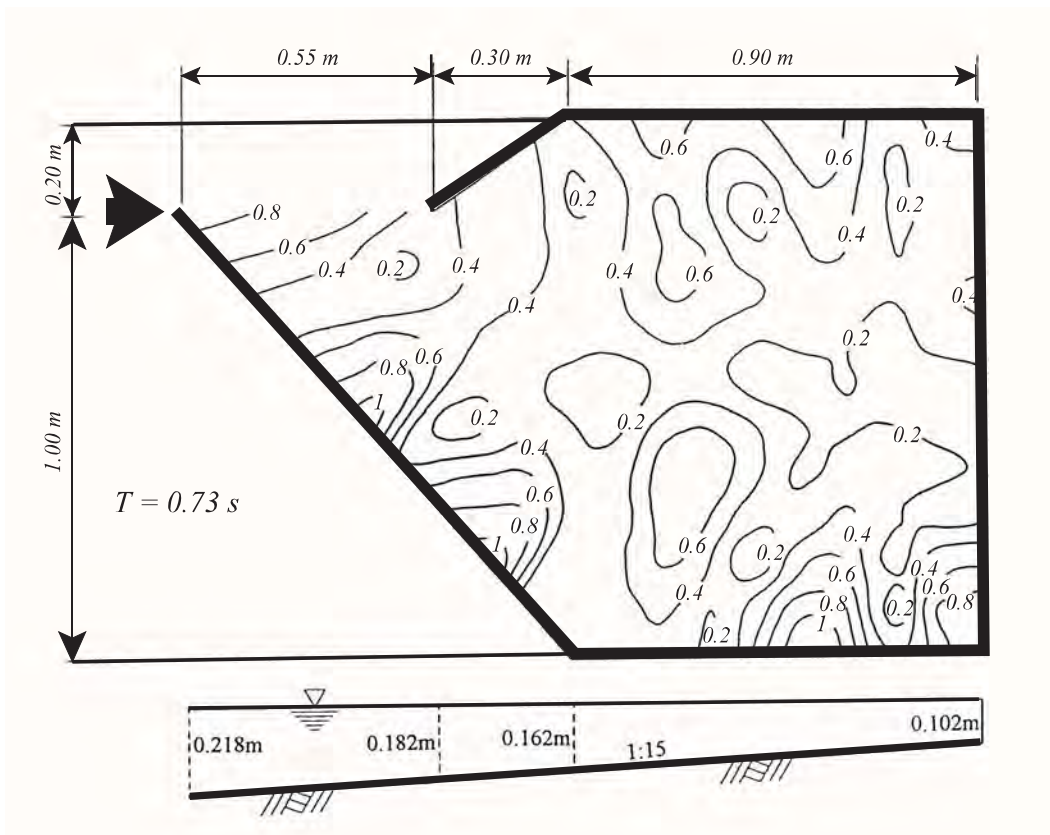


Figura 2.12: Geometría y contorno de alturas de ola dentro del puerto, Sato *et al.* (1990)

Se realiza una comparación de tipo cualitativo de los resultados obtenidos de la modelación (fig. 2.13) con la figura (2.12); analizando los valores resultantes del modelo de las longitudes de ola, estas presentan una disminución del 15% en comparación con las presentadas originalmente por Sato (1990), la razón fue que se empleó un coeficiente de 1 por que las alturas con el coeficiente sugerido arrojaban valores muy pequeños a las presentadas por este autor, posteriormente se probaron otros coeficientes de reflexión distintos a los empleados originalmente para comprobar el comportamiento del modelo bajo diferentes condiciones de reflexión arrojando valores totalmente diferentes a los originales, a lo que concluimos que es por el empleo de diferentes computadoras. Por último, el tiempo de cómputo necesario para obtener la solución fue de 121 s para obtener una buena aproximación.

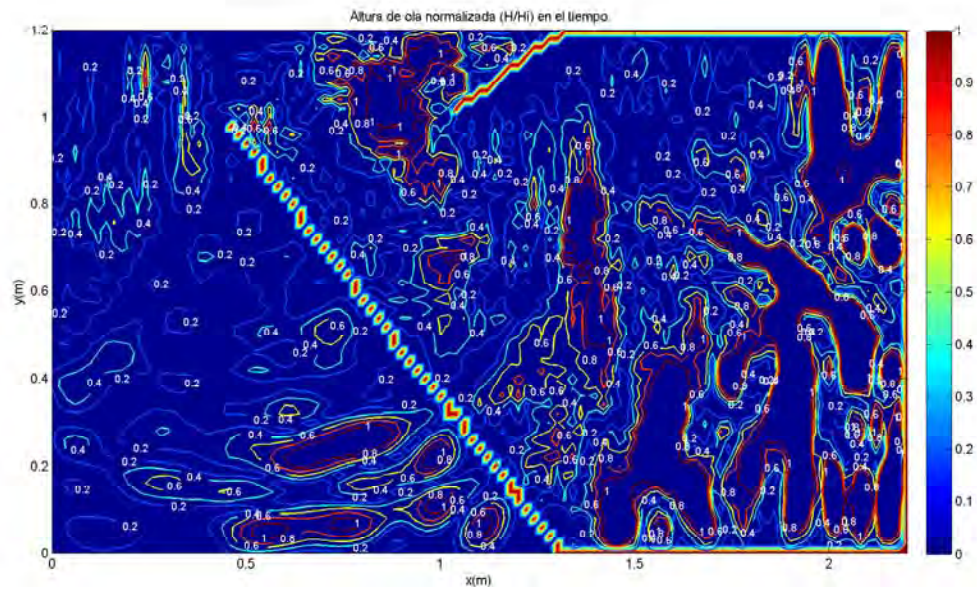


Figura 2.13: Resultados de la simulación numérica

Capítulo 3

Modelo lagrangeano del transporte de partículas de sedimentos

Para modelar el transporte de partículas de sedimentos en zonas costeras donde generalmente se encuentran obras de protección (rompeolas, espigones, escolleras, etc.) así como infraestructura para el desarrollo industrial (tuberías, boyas, etc.), es necesario realizar el cálculo de la hidrodinámica identificando el campo de velocidades tridimensional que en conjunto con la propagación del oleaje y sus fenómenos asociados (difracción y reflexión) permiten el transporte de partículas en cualquier dirección en el espacio provocado por el campo de velocidades y la dispersión turbulenta (movimiento aleatorio de tipo Browniano). Los mecanismos de dispersión y resuspensión de partículas están representados por modelos estocásticos, los cuales describen el movimiento por medio de una función de probabilidad y se presentan a continuación.

3.1. Distribución de partículas de sedimentos

El modelo numérico computacional desarrollado para el transporte de las partículas, está dado bajo un enfoque lagrangeano; las partículas son sembradas o colocadas siguiendo una ley exponencial de concentraciones o mediante una posición inicial en el espacio tridimensional. Para el movimiento de partículas se considera el peso específico de cada partícula así como de la velocidad de caída de la misma, el análisis toma especial interés sobre las partículas en suspensión.

El movimiento de las partículas es dependiente del fluido, esto nos lleva a establecer condiciones de frontera diferentes; las partículas sólidas se mueven primero y luego se le verifica si está dentro del dominio de estudio, las fronteras de las partículas están compuestas por:

- Frontera rígida lateral
- Superficie libre
- Fondo del canal o dominio en estudio

La frontera de fondo determina si la partícula es depositada o resuspendida, esto se hace revisando los esfuerzos cortantes actuantes y el esfuerzo cortante crítico para el inicio del movimiento. Las fronteras para las paredes laterales y la superficie libre, se consideran como un espejo, es decir, si una partícula llega a la frontera, ésta rebota a la misma velocidad pero en dirección opuesta, despreciando cualquier tipo de pérdida de energía.

3.1.1. Movimiento de las partículas

Los mecanismos de dispersión y resuspensión tienen un carácter aleatorio, cuyo comportamiento puede ser representado por el empleo de modelos estocásticos, los cuales describen el movimiento de las partículas sólidas por medio de una función de probabilidad (Hernández, 2003)([Her03]). El proceso físico corresponde al seguimiento de muchas partículas, empleando un campo hidrodinámico así como también un campo de viscosidades turbulentas que representarían la intensidad de la turbulencia sobre todo el dominio de la simulación, permitiéndonos así obtener la ubicación o existencia de una partícula en un cierto punto.

Un modelo estocástico y discretizado en tres dimensiones para el movimiento de un sólido suspendido (fig. 3.1), esta dado por componentes de velocidades estocásticas y determinísticas. Para un único paso de tiempo (Δt) de (n) a ($n + 1$) está dada por:

$$\begin{aligned}
 x_i^{n+1} &= x_i^n + U_{i,j,k} \times \Delta t \pm (2\text{ran}(iseed) - 0,5) \sqrt{2 \times v_{T(i,j,k)} \times \Delta t} \\
 y_i^{n+1} &= y_i^n + V_{i,j,k} \times \Delta t \pm (2\text{ran}(iseed) - 0,5) \sqrt{2 \times v_{T(i,j,k)} \times \Delta t} \\
 z_i^{n+1} &= z_i^n + W_{i,j,k} \times \Delta t \pm (2\text{ran}(iseed) - 0,5) \sqrt{2 \times v_{T(i,j,k)} \times \Delta t} - w_s \times \Delta t
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde:

x_i^n, y_i^n, z_i^n	Posición de la partícula en (x,y,z,t)	(m)
$x_i^{n+1}, y_i^{n+1}, z_i^{n+1}$	Posición de la partícula en $(x,y,z,t+\Delta t)$	(m)
$U_{i,j,k}, V_{i,j,k}, W_{i,j,k}$	Velocidades medias	(m/s)
$\nu_{T(i,j,k)}$	Coefficiente de viscosidad turbulenta	(m^2/s)
Δt	Paso de tiempo lagrangeano	(s)
w_s	Velocidad de caída de las partículas	(m/s)

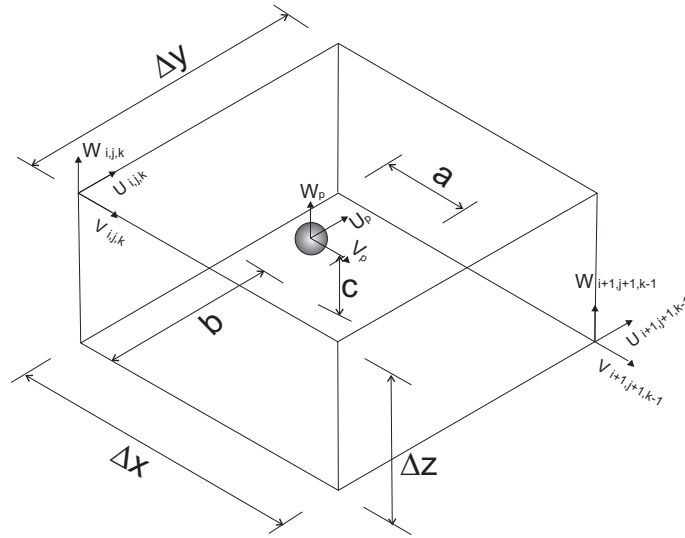


Figura 3.1: Ubicación en el espacio tridimensional de la partícula y sus velocidades asociadas

El seguimiento de las partículas es simulado empleando las ecuaciones lagrangeanas (ec. 3.1), por lo tanto cada partícula está sujeta a un desplazamiento espacial de magnitud $\pm (2\text{ran}(iseed) - 0,5) \sqrt{2 \times \nu_{T(i,j,k)} \times \Delta t}$, en cualquiera de las direcciones del dominio en estudio, el signo es positivo o negativo dependiendo del sentido de su ubicación. En ese instante de tiempo el campo de velocidades actúa sobre la partícula, de esta forma el movimiento tiene un sentido en función del movimiento principal, dado por los campos de velocidades. El término $(\nu_{T(i,j,k)})$ se encuentra sobre todo el dominio, representado por un campo de escalares positivos, que posee la información de las intensidades turbulentas. Lo anteriormente descrito permite que las partículas se muevan independientemente en cualquiera de las direcciones x, y ó z, simulando un movimiento provocado por los campos de velocidades y la dispersión turbulenta (movimiento Browniano de las partículas).

La edad de cada partícula es igual al tiempo transcurrido desde que la partícula fue liberada de su posición original, hasta el instante en que la partícula deja de moverse, y se calcula de forma conjunta con las coordenadas de la partícula al final de cada paso de tiempo lagrangeano Δt .

El movimiento de las partículas, que subsecuentemente están experimentando desplazamientos, se divide en una parte determinística (advectivo) y una parte estocástica (dispersivo o aleatorio). El modelo de transporte desarrollado en este trabajo incluye algunos subprocesos del movimiento, como son el inicio del movimiento (resuspensión) y la detención del movimiento (sedimentación).

La simulación se divide en dos partes:

- Solución de las ecuaciones hidrodinámicas para obtener los campos tridimensionales de velocidades y los parámetros turbulentos
($v_T, \kappa, \epsilon, \overline{uu}, \overline{vv}, \overline{ww}, \overline{uv}, \overline{uw}, \overline{vw}$)
- Simulación del transporte de las partículas para campos de flujos estacionarios (proporcionados por el modelo hidrodinámico), sobre pasos de tiempo lagrangeanos Δt

De acuerdo al procedimiento de Reynolds, los esfuerzos cortantes en un flujo turbulento (fig. 3.2), a lo largo de su profundidad (z), puede escribirse como:

$$\tau_i = \rho\nu \frac{dU}{dz} - \rho\overline{u_i w} \quad (3.2)$$

donde:

τ_i	Esfuerzo cortante de fondo	(N/m^2)
ρ	Densidad del fluido	(kg/m^3)
ν	Coefficiente de viscosidad cinemática	(s/m^2)
U	Velocidad media del fluido	(m/s)
$\overline{u_i w}$	Correlaciones dobles en el fondo	(m^2/s^2)

En la ecuación (3.2), el término $(\rho\nu \frac{dU}{dz})$ es el esfuerzo cortante viscoso (τ_v) y $(-\rho\overline{u_i w})$ es el esfuerzo cortante turbulento (τ_T), ambos producidos en el nivel de referencia (z).

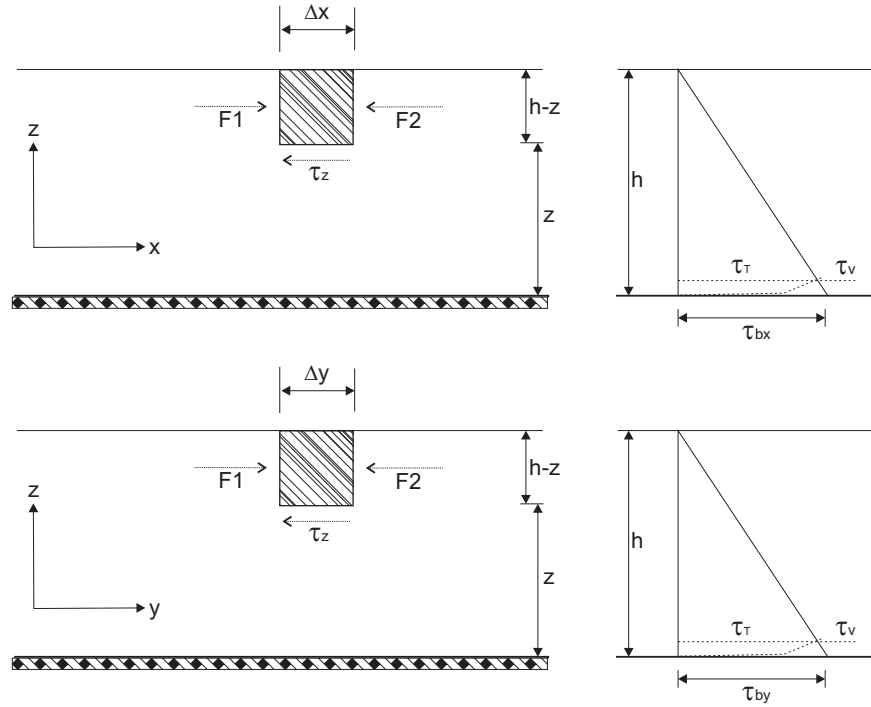


Figura 3.2: Esfuerzo cortante actuante sobre las partículas que se mueven en flujos a superficie libre

Asumiendo que el esfuerzo cortante en el fondo, dado por la ecuación (3.2) es el mismo que actúa sobre las partículas, la condición de frontera sobre la subcapa laminar, se determina comparando el esfuerzo cortante actuante con el esfuerzo cortante crítico para el movimiento de la partícula; en las ecuaciones (3.3) y (3.4) se presentan las ecuaciones de esfuerzos actuantes sobre las partículas que llegan a la frontera del fondo (subcapa laminar), para la dirección (x) y (y) respectivamente.

$$\tau_x = \rho\nu \frac{dU}{dz} - \rho\overline{uw} \quad (3.3)$$

$$\tau_y = \rho\nu \frac{dU}{dz} - \rho\overline{vw} \quad (3.4)$$

El esfuerzo cortante crítico que actúa sobre las partículas, según (Hernández, 2003)([Her03]), se escribe:

$$\tau_{critico} = 0,03 (\rho_s - \rho) g d_{50} \quad (3.5)$$

donde:

ρ_s	Densidad del sólido	(kg/m^3)
ρ	Densidad del agua	(kg/m^3)
g	Aceleración de la gravedad	(m/s^2)
d_{50}	Diámetro de la partícula para el cual pasa el 50 %	(m)

La función de probabilidad para la deposición de las partículas se puede escribir así:

$$P_{dep} = \begin{cases} 0 & \tau_{x,y} \geq \tau_{critico} \\ \left(1 - \frac{\tau_{x,y}}{\tau_{critico}}\right) & \tau_{x,y} < \tau_{critico} \end{cases} \quad (3.6)$$

Y la función de probabilidad para la resuspensión de las partículas se escribe:

$$P_{susp} = \begin{cases} 0 & \tau_{x,y} \leq \tau_{critico} \\ \left(1 - \frac{\tau_{critico}}{\tau_{x,y}}\right) & \tau_{x,y} > \tau_{critico} \end{cases} \quad (3.7)$$

3.1.2. Velocidad de caída de las partículas

Los sedimentos naturales son partículas no esféricas. El efecto de las formas influyen bastante en partículas relativamente grandes ($> 300\mu m$), los experimentos muestran que existen diferencias del orden del 30 % en la velocidad de caída, cuando se comparan las ecuaciones para cada diámetro, que se dan por las ecuaciones (3.8 a 3.10).

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18v}; 1 < d \leq 100\mu m \quad (3.8)$$

$$w_s = \frac{10v}{d} \left[\left(1 + 0,01 \frac{(s-1)gd^3}{v^2}\right)^{0,5} - 1 \right]; 100 < d < 1000\mu m \quad (3.9)$$

$$w_s = 1,1 [(s-1)gd]^{0,5}; d \geq 1000\mu m \quad (3.10)$$

donde:

d	Diámetro de la criba	(m)
s	Gravedad específica	(2.65)
v	Coeficiente de la viscosidad cinemática	(s^2/m)
g	Aceleración de la gravedad	(m/s^2)

3.1.3. Efecto de la concentración de partículas de sedimentos

La velocidad de caída de una sola partícula es alterada por la presencia de otras partículas, el efecto de las otras partículas hace que la velocidad de caída sea mayor, en cuanto mayor sea la concentración. Para corregir ese efecto se propone la ecuación (3.11) (Hernández, 2003)([Her03]).

$$w_{s,m} = (1 - c)^\gamma w_s \quad (3.11)$$

donde:

$w_{s,m}$	Velocidad de caída de la partícula en suspensión	(m/s)
w_s	Velocidad de caída de la partícula en líquido limpio	(m/s)
c	Concentración volumétrica de sedimentos	(gr/m^3)
γ	Coef. adimensional (4 a 5, partículas de $50\mu m - 500\mu m$)	

3.2. Desarrollo del modelo lagrangeano de transporte de partículas

El modelo lagrangeano desarrollado para el transporte de sólidos en suspensión tiene la capacidad de emplear el cálculo previo de la hidrodinámica del flujo del dominio de estudio, o de forma integrada al cálculo hidrodinámico, de preferencia se desarrolla y modela por separado, esto por conveniencia computacional. Los resultados del cálculo hidrodinámico corresponden a un campo estable en el tiempo, lo que indica que los campos de velocidades y sus parámetros turbulentos, se pueden asumir como constantes, pero con una variación espacial importante, de este modo la simulación del transporte de partículas se realiza para tiempos mayores a los obtenidos en la simulación hidrodinámica. Por lo tanto, para el transporte de partículas se puede usar repetidamente un mismo campo hidrodinámico, para todos los intervalos de tiempo (Δt), tantas veces como se requiera, hasta completar el periodo de simulación. Las velocidades que mueven a las partículas, se obtienen de interpolar linealmente, las velocidades que se encuentran sobre una malla tridimensional alrededor de la partícula.

El hecho de separar la simulación hidrodinámica de la simulación del movimiento de partículas, nos permite desarrollar grandes números de simulaciones de transporte, de este modo podemos simular movimientos de partículas con: diferentes ubicaciones y tipos de fuentes, varias duraciones de simulación, distintos parámetros de transporte y distintas propiedades físicas de las partículas (peso específico y diámetro), todo esto sobre la base de una simulación hidrodinámica del flujo.

3.2.1. Esquema computacional

El desarrollo del modelo euleriano-lagrangeano de partículas permite incorporar el cálculo de la parte lagrangeana de las ecuaciones de movimiento (advección) con la parte euleriana (difusión molecular y turbulenta) del fluido, para determinar en conjunto con la ecuación de transporte el movimiento de los sedimentos en un esquema continuo dentro del flujo, es decir, el movimiento de un escalar con una concentración inicial y una final la cual involucra los procesos de suspensión, sedimentación y resuspensión en columna de agua.

El modelo de partículas cuyo diagrama de flujo se presenta en la figura (3.3) realiza las siguientes operaciones:

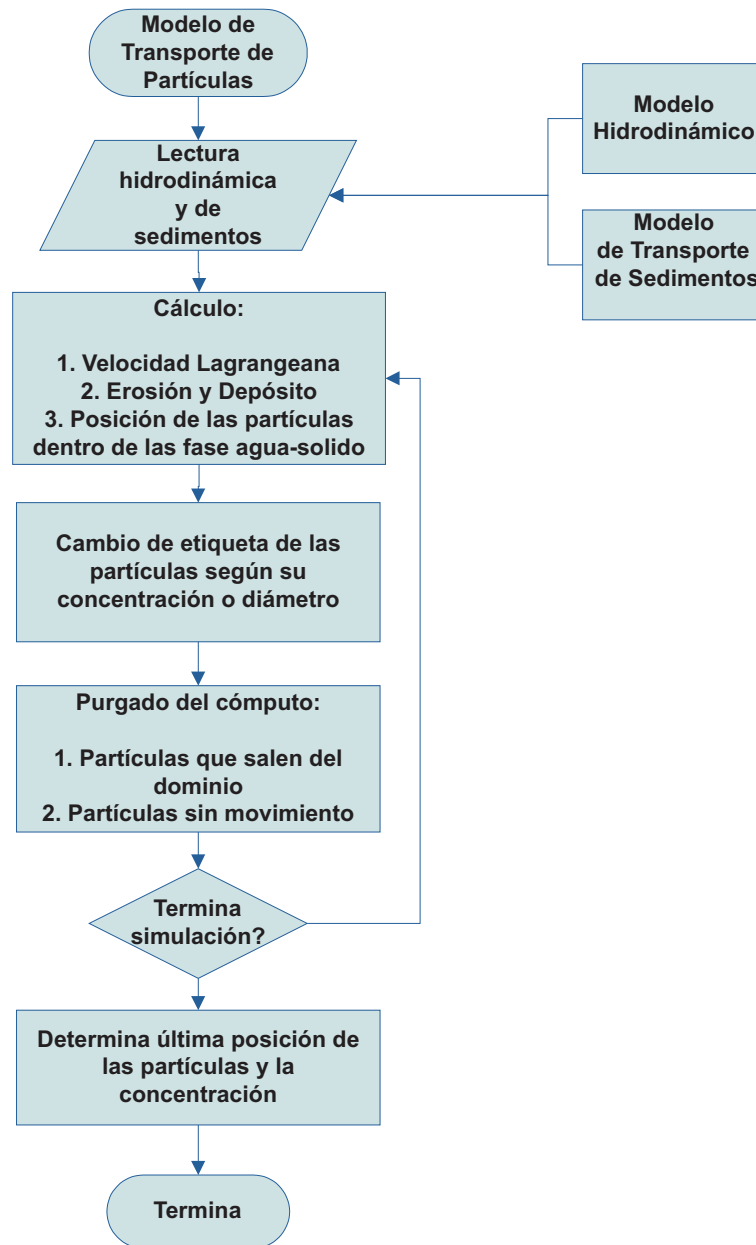


Figura 3.3: Diagrama de flujo del modelo de partículas

- Lee los campos de velocidad del modelo hidrodinámico que puede ser en 2D ó 3D
- Lee las características del sedimento, velocidad de caída y coeficientes de dispersión y mezclado, esto proporcionado por el modelo de sedimentos dentro del modelo hidrodinámico.

- Determina el transporte advectivo proveniente del campo de velocidades para cada partícula.
- Determina mediante la evaluación de esfuerzos cortantes los parámetros de erosión y depósito.
- Calcula la posición de cada partícula en el dominio de estudio para cada intervalo de tiempo.
- Asigna la concentración en columna de agua para cada intervalo de tiempo con el número parcial de partículas en cada celda.
- Determina cuantas partículas abandonan el dominio de estudio y cuantas no presentan movimiento por estar en el fondo.
- Establece la posición final de las partículas al término de la simulación así como la concentración parcial en columna de agua.

Uno de los trabajos que se está realizando es el refinamiento de las condiciones de frontera para las partículas, ya que estas deben de interactuar con las estructuras de forma similar que lo hace el flujo en el campo de velocidades.

Transformación discreta-contínua

Los esquemas de transformación empleados para obtener el campo de concentración del sedimento a partir del modelado lagrangeano de las partículas puede resumirse a continuación:

- Método (PIC) por sus siglas en ingles (particle-in-cell), en donde la concentración en un celda es obtenida dividiendo la masa total de las partículas contenidas en la celda por el volumen contenido en la misma.
- Hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH) por sus siglas en ingles; basado en la hipótesis que cada partícula puede ser remplazada por una distribución de densidad suavizada (Wf); la concentración en un punto es calculada por la suma de todas las partículas en la celda.

- Método (kPIC) que es un método híbrido con referencia al primero antes descrito (Sierra, 2002)([SMRA02]) pero en este, la masa de una partícula es repartida en la celda que la contiene y tantas celdas vecinas necesarias acorde a una función de distribución de masa predefinida.

El modelo actualmente tiene el método PIC para determinar la concentración de las partículas en cada celda de todo el dominio de estudio. La concentración resultante de esta transformación puede ser comparada con el modelo euleriano-lagrangeano descrito en el capítulo 2.3.1; a su vez, tanto el modelo lagrangeano como el modelo euleriano-lagrangeano pueden ser ejecutados al mismo tiempo o por separado para un campo hidrodinámico en común.

Condición de frontera para el movimiento de partículas

Los efectos de la frontera en el fondo del canal, implican que la concentración debe de incrementarse por que las partículas tienden a afirmarse en el fondo. Los vórtices turbulentos provocan que los sedimentos sean resuspendidos desde la capa de altas concentraciones hasta una capa de menor concentración, al que también contribuye nuestro campo de velocidades en la vertical.

La frontera para la sedimentación se ubica sobre la subcapa laminar (fig. 3.4), en esta zona se decide probabilísticamente, cuales son las partículas que se resuspenden y cuáles son las que se sedimentan; la función de probabilidad hace que el 90% de las partículas que llegan a la subcapa laminar se resuspendan, esto se cumple por igual para las partículas que estén en un rango de sedimentos en suspensión y para las partículas que tienen características de sedimentables.

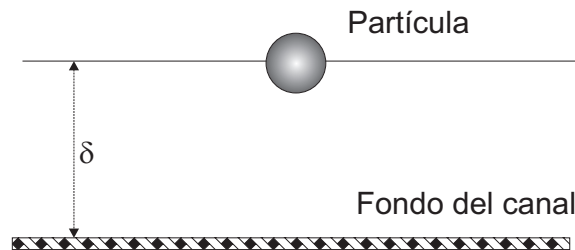


Figura 3.4: Condición de frontera para el movimiento de las partículas en la subcapa laminar

donde:

δ Espesor de la subcapa laminar de fondo

3.2.2. Validación del modelo

El modelo se verificó con dos casos con solución numérica conocida; el primer caso consiste en una descarga instantánea de una sustancia o contaminante conservativo en un dominio controlado en el cual la masa es transportada exclusivamente por difusión. La solución analítica en tres dimensiones esta dado por:

$$C(x, y, z, t) = \frac{C_0}{(4\pi K_x K_y K_z t)^{3/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4K_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4K_y t} - \frac{(z-z_0)^2}{4K_z t}} \quad (3.12)$$

La distribución de concentración resultante fue obtenida empleando un tiempo de simulación por difusión de 15 s. empleando el método PIC con una masa inicial de 1500 partículas con el mismo diámetro y características donde los resultados se muestran en las figuras (3.5) y (3.6) obteniendo un promediado del error relativo porcentual en comparación con la solución analítica de 9.76 %.

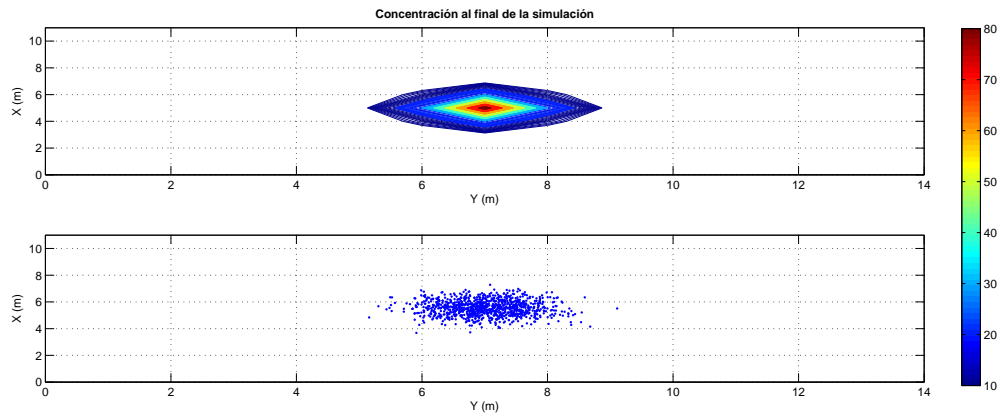


Figura 3.5: Simulación de la difusión de la concentración analítica vs método PIC

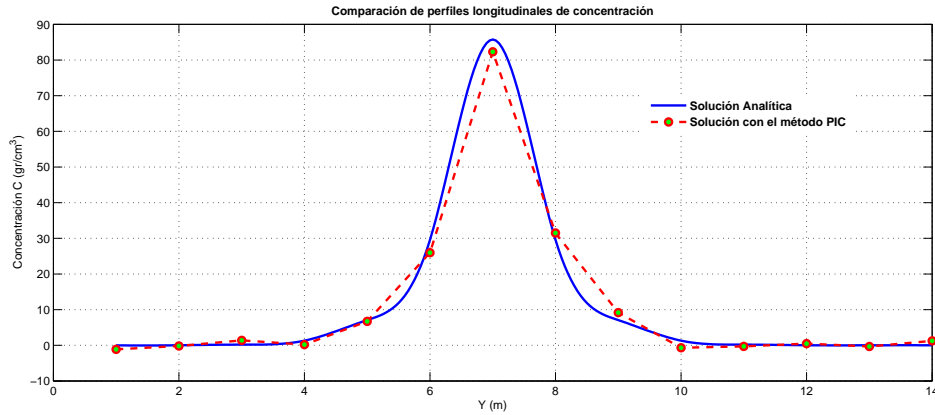


Figura 3.6: Validación del modelo, perfiles analítico vs método PIC

El segundo caso de validación, corresponde a una descarga continua de duración infinita donde la solución analítica en 1D corresponde a una sustancia conservativa la cual se expresa como:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x + ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \right] \quad (3.13)$$

donde erfc es la función de error complementaria. Para este caso se descargaron 17 partículas cada 0.05 s. durante un periodo de 30 s. Los resultados de la simulación son presentados en la figura (3.7) donde se aprecia una error relativo promedio con respecto a la solución analítica de 6.23 %.

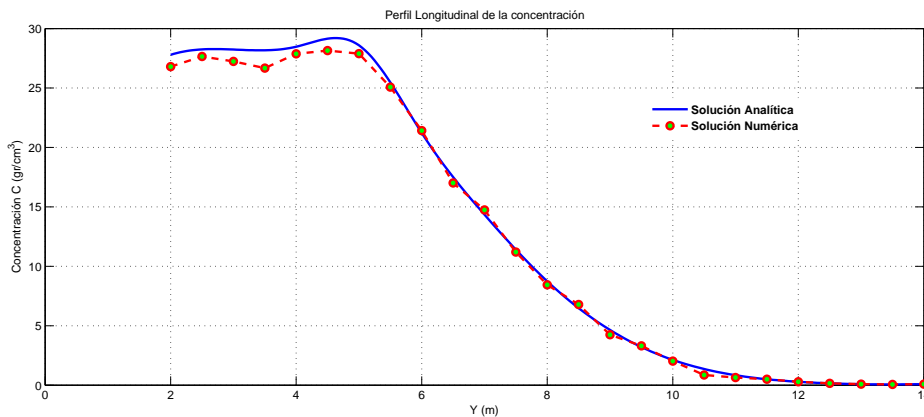


Figura 3.7: Validación del modelo, perfiles con descarga continua

3.2.3. Caso de aplicación teórico

Retomando un ejemplo de aplicación teórico cualitativo de la influencia del oleaje sobre una estructura; se determina el campo hidrodinámico bajo condiciones controladas las cuales se describen en el cuadro (3.1), para determinar el transporte de 3 diámetros distintos de partículas de sedimento.

Cuadro 3.1: Parámetros para la simulación del campo hidrodinámico para el transporte de partículas

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Altura ola H (m)	1.00
Periodo T (s)	1.00
Angulo θ (<i>grados</i>)	90.00
Profundidad h (m)	3.00
Δx (m)	1.00
Δy (m)	1.00
Longitud x (m)	30.00
Longitud y (m)	20.00
Diámetro Partícula 1 (mm)	0.0370
Diámetro Partícula 2 (mm)	0.1820
Diámetro Partícula 3 (mm)	0.0040

El dominio de estudio se presenta en la figura (3.8), donde existen dos estructuras (rompeolas) con longitud infinita y el nivel de la superficie libre se encuentra en el cero.

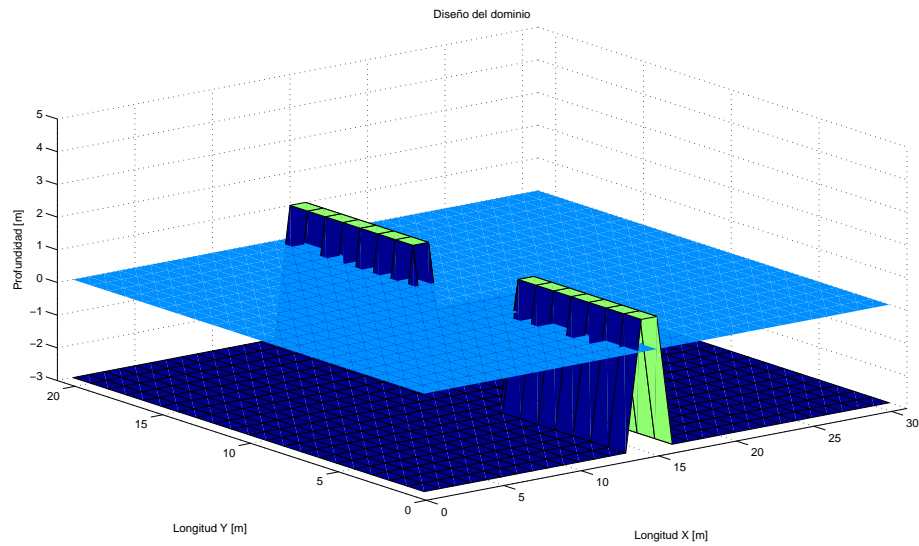


Figura 3.8: Dominio de aplicación teórico cualitativo

Se determina priméramente el campo hidrodinámico integrado en la vertical con una amplitud de ola inicial de 1 m. con duración de simulación de 200 s. tal como se muestra en las figuras (3.9 y 3.10).

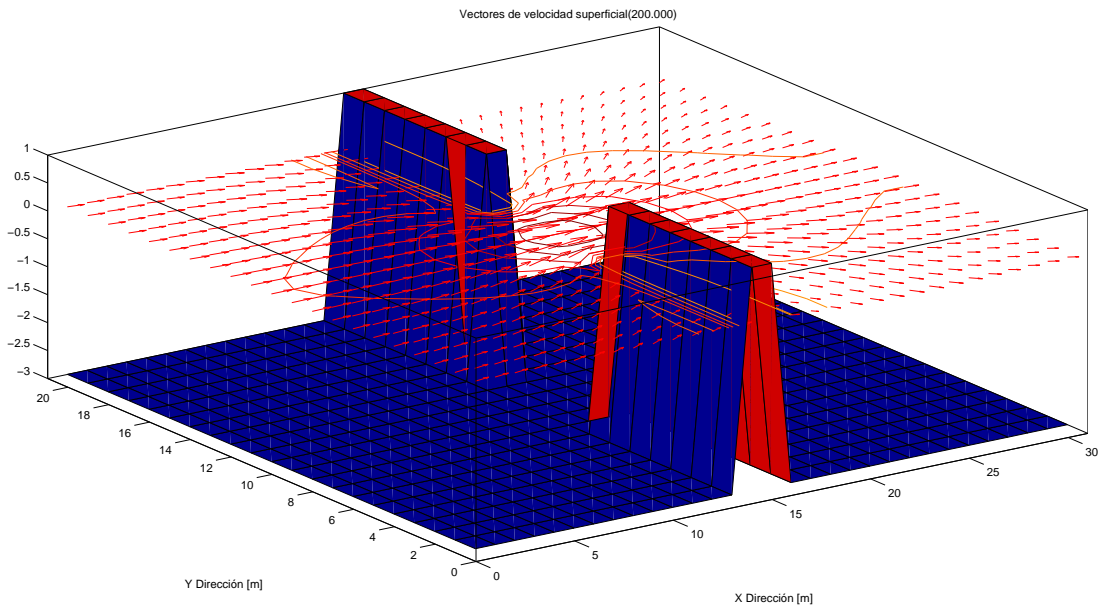


Figura 3.9: Perspectiva 3D del campo de velocidades

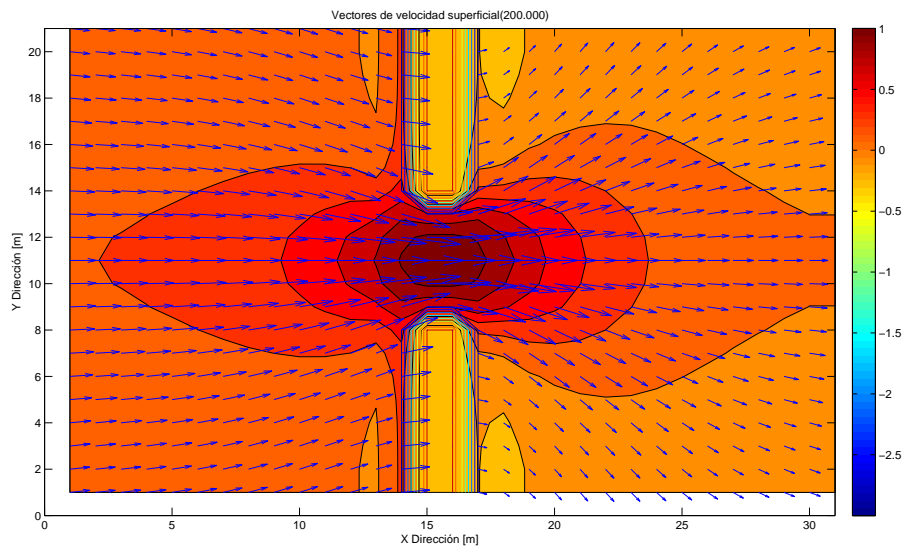


Figura 3.10: Campo de velocidades resultante

El campo de velocidades incluye los fenómenos del oleaje, en este caso se presentan los fenómenos del difracción y reflexión por separado en la figura (3.11) para una mejor apreciación y en la figura (3.12) se muestran los contornos de las alturas de ola.

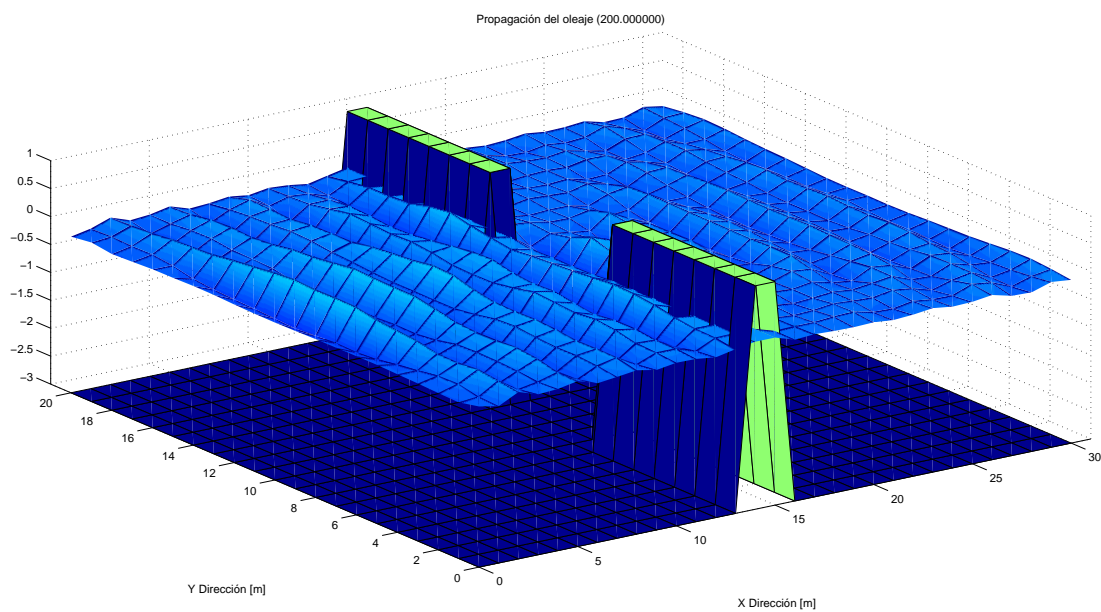


Figura 3.11: Propagación del oleaje en el dominio de estudio

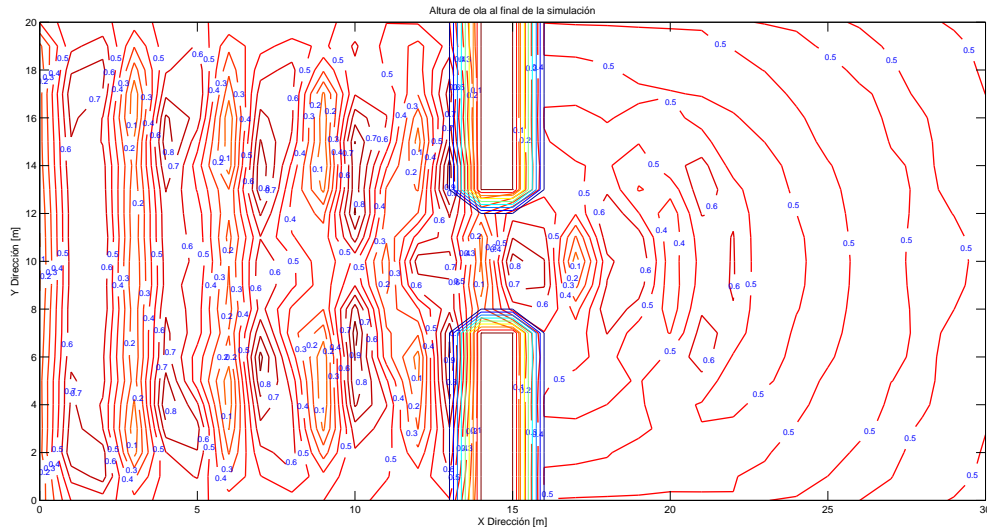


Figura 3.12: Contornos de las alturas de ola al final de la simulación

El movimiento de las partículas bajo la influencia del campo de velocidades se presenta en la figura (3.13), se inicializa la descarga en un instante de tiempo inicial de 3 diámetros de sedimento (50 partículas con diámetro de 0.00028 m en color azul, 10 partículas con diámetro de 0.00050 m en color verde y 5 partículas con diámetro de 0.00010 m en color rojo); se observa que las partículas con diámetro mayor presentan una precipitación al fondo influido por la velocidad de caída.

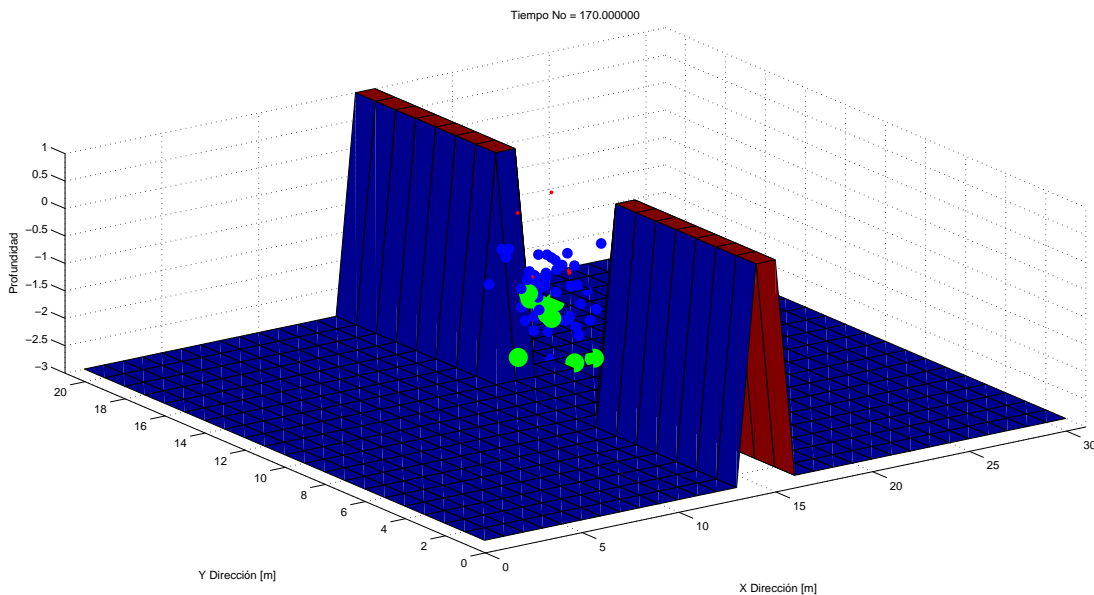


Figura 3.13: Transporte de partículas de sedimento a 170 segundos de simulación

Las partículas siguen las líneas de corriente del campo hidrodinámico, presentando cambios en la posición de cada partícula en el espacio en función de la ecuación (3.1); en la figura (3.14) se presenta el transporte de las partículas con la opción de trazador.

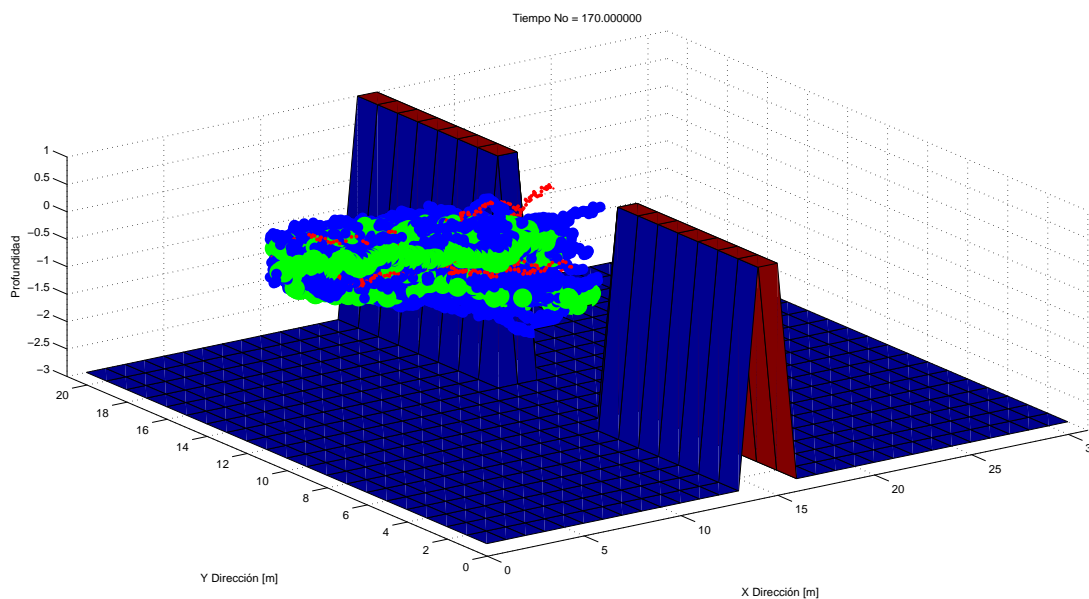


Figura 3.14: Transporte de partículas de sedimento a 170 segundos de simulación con la opción de trazado

De tal forma que al final de la simulación se pueden obtener las coordenadas (x, y, z) de las partículas deseadas, para posteriormente determinar la concentración en cada celda del dominio de estudio en relación al número de partículas contenidas.

Capítulo 4

Caso de aplicación en una zona costera de Sonda de Campeche

En esta sección se presenta la aplicación del modelo de transporte lagrangeano de partículas a una zona costera, esta ubicación se caracteriza debido a que presenta un movimiento considerable de material sedimentario (ver Anexo 1); las limitantes en la información recopilada y el tiempo de simulación dan un enfoque de aplicación de carácter académico, sin embargo, la metodología empleada y los resultados de las simulaciones hidrodinámicas y del movimiento de partículas brindan una idea clara de la capacidad del modelo lagrangeano como trazador, así como de otras posibles aplicaciones al transporte de contaminantes.

4.1. Antecedentes y descripción de la zona de estudio

La Sonda de Campeche se localiza en la parte sur del Golfo de México (fig. 4.1 izquierda), que se extiende en un área de aproximadamente 8,000 km² desde los 200 m de profundidad hasta la línea de playa. La zona de interés se ubica entre los 19°00' y 20°15'N y los 91°00' y 92°30'W (fig. 4.1 derecha), cuenta con el 90 % de las instalaciones para la extracción y el procesamiento del petróleo crudo y gas natural que hay en las costas del Suroeste del Golfo de México: un total de 200 instalaciones para diferentes propósitos y que incluyen, dentro de nueve campos petroleros principales, 185 plataformas de producción.

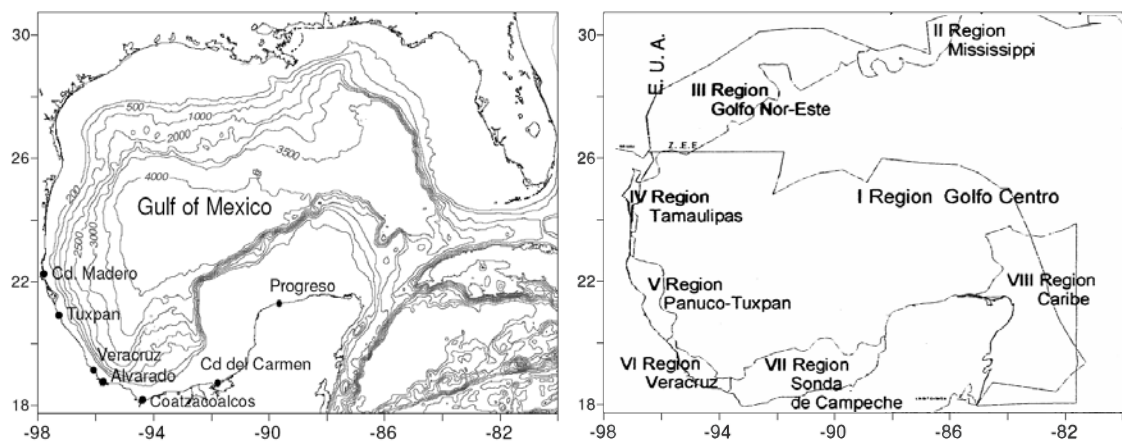


Figura 4.1: Golfo de México y ubicación de la Región Marina de Sonda de Campeche

Sus características de mayor importancia ecológica son la circulación litoral, el intercambio de aguas oceánicas y costeras, la descarga fluvial, y la transición de materiales sedimentarios provenientes de la zona marina y la continental. El clima dominante es cálido subhúmedo con lluvia en verano, temperatura media anual alrededor de 26°C y la precipitación promedio oscila entre 1,100 y 2,000 mm. Los patrones de circulación oceánica se establecen con base a una rama de la Corriente de Lazo, la cual forma un giro ciclónico dentro de la Sonda de Campeche. Las corrientes, a una distancia no mayor de 180 km mar adentro, están influenciadas por los vientos dominantes: en verano (octubre a febrero) se dirigen al Noroeste y en invierno cambian hacia el Este (marzo-abril hasta agosto). Este cambio se ve influenciado por el flujo de agua proveniente de la Corriente de Lazo, que al mezclarse con el giro ciclónico lo desvía hacia el Este (García, 2004)[GAHL04]. En la parte sur de la plataforma las interacciones frontales ocurren entre las descargas de los ríos (principalmente el Grijalva y San Pedro San Pablo por su cercanía a la zona) y el agua oceánica.

Referente a un sitio más específico el cual obedece el interés de este trabajo dentro de la Sonda de Campeche, hacemos énfasis en las costas de Atasta en el Estado de Tabasco y su vecindad con el Estado de Campeche; Atasta presenta el fenómeno de erosión de la línea de costa, esta zona es objeto de estudios e investigaciones en el área de transporte de sedimentos con la finalidad de establecer alternativas para detener o mitigar este proceso de erosión.

4.2. Información y metodología empleada para la simulación numérica

Se comienza con la delimitación del área de estudio dentro de la región marina de Sonda de Campeche, se tomo primeramente un dominio de estudio de escala considerable hasta una profundidad de 400 m como se muestra en la figura (4.2).

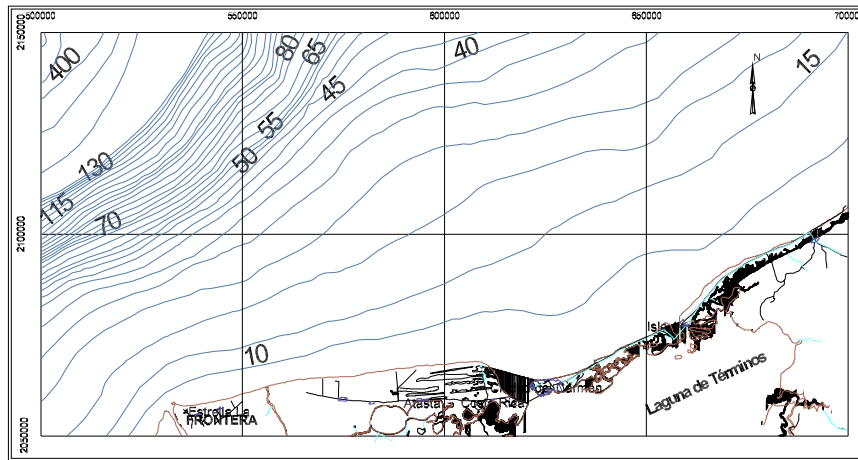


Figura 4.2: Batimetría de la Sonda de Campeche

Posteriormente, se recopila la información de las bases de datos del proyecto Sonda de Campeche (Salas, 2005)[SMV⁺05]; estas bases de datos se trabajaron para obtener las condiciones promedio de temperatura, salinidad y densidad de la región, mediante el empleo de métodos estadísticos, de interpolación y de ajuste de curvas para el pronóstico en el año 2010 en determinadas épocas del año como son secas, lluvias y nortes.

4.2.1. Datos de mareas y nivel del mar

De información publicada por el Servicio Mareográfico Nacional con sede en el Instituto de Geofísica del la UNAM y de la Dirección General de Oceanografía de la Secretaría de Marina de México, se obtuvieron los registros de marea para zona de estudio (figs. 4.3 y 4.4).

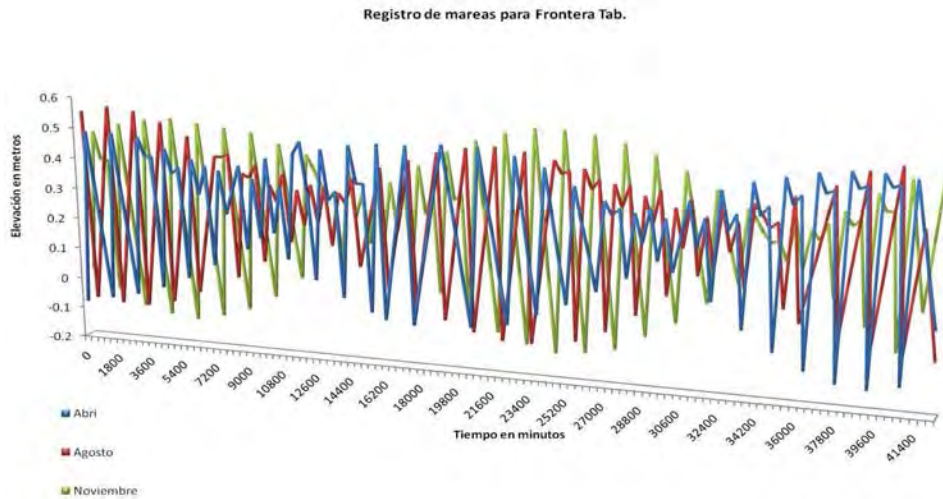


Figura 4.3: Registros de marea en las estaciones de Frontera Tab.

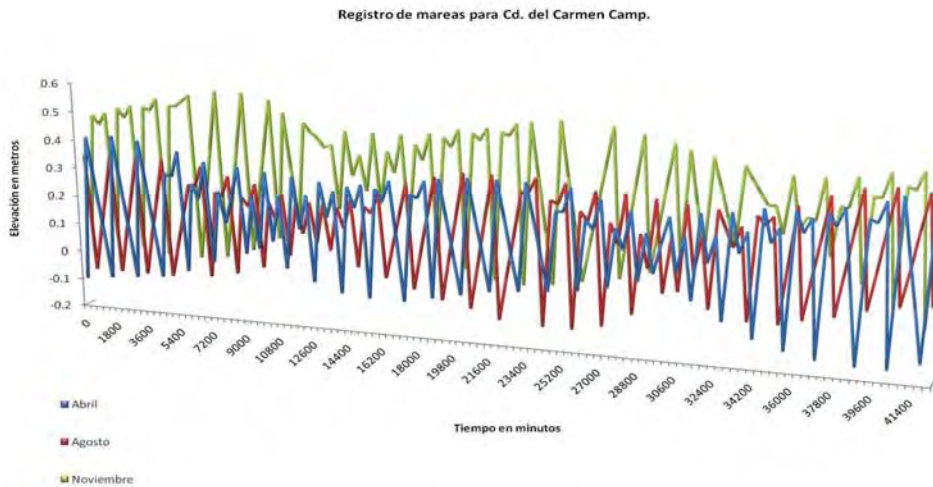


Figura 4.4: Registros de marea en las estaciones de Cd. del Carmen Camp.

Se obtuvo la tendencia de las series aplicando un filtro para quitar las oscilaciones con períodos menores a un día. Los resultados se restaron de las series originales y se obtuvieron las anomalías y las tendencias. Finalmente se determinaron los espectros mediante la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés).

4.2.2. Datos de descargas de los ríos

Se analizaron series de tiempo de la descarga del río Grijalva publicadas por la Comisión Nacional del Agua de México (CNA), que cumplieron con las siguientes características:

- Datos de estaciones próximas a las desembocadura del río Grijalva.
- Series con 10 años de longitud como mínimo para estimar variaciones de tipo climático, de acuerdo a lo considerado como variabilidad climática.
- Series continuas, que no presentaran huecos en la información.

Las series se procesaron sometiéndolas a un análisis estadístico exploratorio, mediante el cual se obtuvo, el número total de datos válidos, promedio, mediana, varianza, desviación estándar, el mínimo, máximo y el rango. Se calcularon los promedios y varianzas por años y se obtuvo el hidrograma medio para todo el año 2010 del río Grijalva (fig. 4.5).

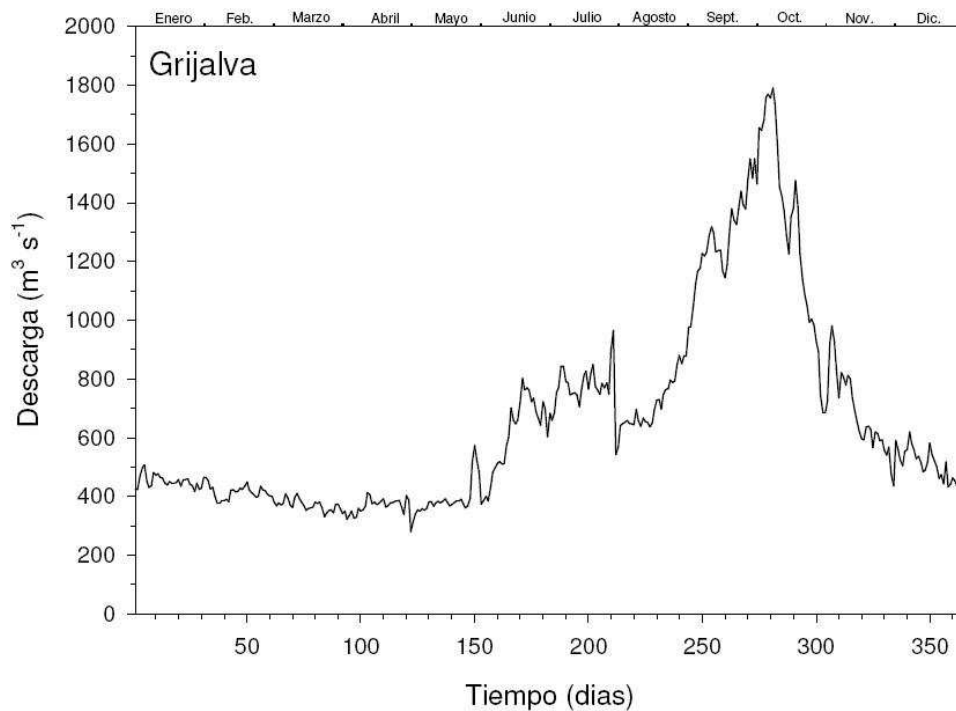


Figura 4.5: Hidrograma medio del río Grijalva

Se construyeron posteriormente gráficos de las descargas diarias, promedios y varianzas anuales y la evolución de las descargas para todo el año.

4.2.3. Datos de corrientes

Se analizaron datos de corrientes en la zona de estudio y datos de mediciones de corrientes con ADCP que se generaron durante el proyecto Sonda I (Salas, 2005)[SMV+05].

Posteriormente, se construyeron las rosas de corrientes para los meses de interés los cuales se presentan en la figura (4.6).

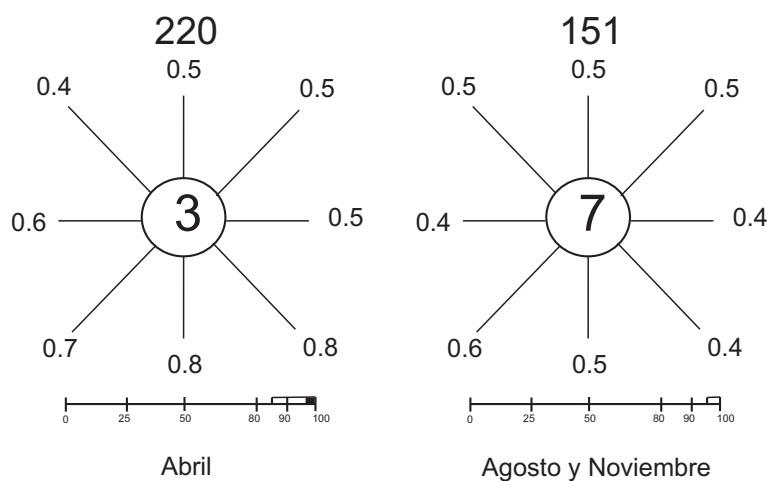


Figura 4.6: Rosa de Corrientes para las épocas de secas, lluvias y nortes

4.2.4. Datos de viento

Los campos de vientos fueron obtenidos de la información publicada por el Servicio Meteorológico Nacional de México. Se obtuvieron las rosas de viento reinante y dominante (fig. 4.7) con las oscilaciones características más importantes sobre la zona de estudio.

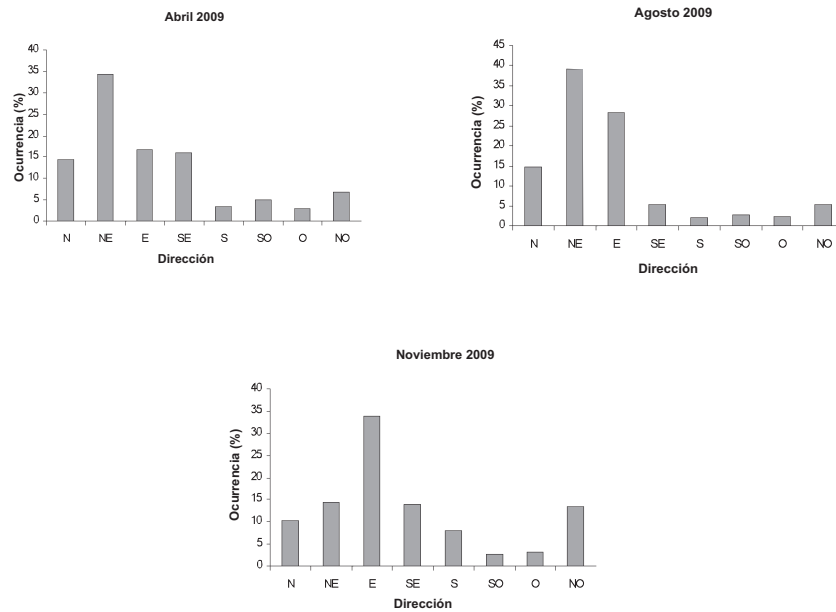


Figura 4.7: Porcentajes de vientos dominantes para las épocas de secas, lluvias y nortes

4.3. Simulación de la hidrodinámica en 2D de la región de estudio

El segundo paso es obtener del modelo hidrodinámico los campos de corrientes bajo diferentes escenarios, se proponen 3, época de secas (abril), época de lluvias (agosto) y épocas de nortes (noviembre). Para esto se necesita conocer las forzantes que van a alimentar al modelo, que en este caso son los datos antes recopilados y cuyos resultados para estos escenarios se presentan a continuación.

4.3.1. Malla numérica de la región de estudio

El dominio numérico considera profundidades reales hasta los 400 m, después de esta isóbata se considera que las profundidades se mantienen constantes. Esto significa que sólo se considera la batimetría real a lo largo de la plataforma continental. Para evitar inestabilidades en los gradientes de presión, la batimetría se suavizó cuidando que no pierda sus características principales. La malla numérica está diseñada en coordenadas cartesianas con el eje “x” orientado hacia el Este y el eje “y” orientado hacia el Norte. El tamaño del paso en la malla es homogéneo

tanto en la dirección “x” como en la dirección “y”. La malla contiene 99 celdas en la dirección “x” y 49 en la dirección perpendicular con $(\Delta x = \Delta y = 2000m)$. El dominio numérico es mostrado en la figura (4.8). Se emplea el modelo 2D integrado en la vertical.

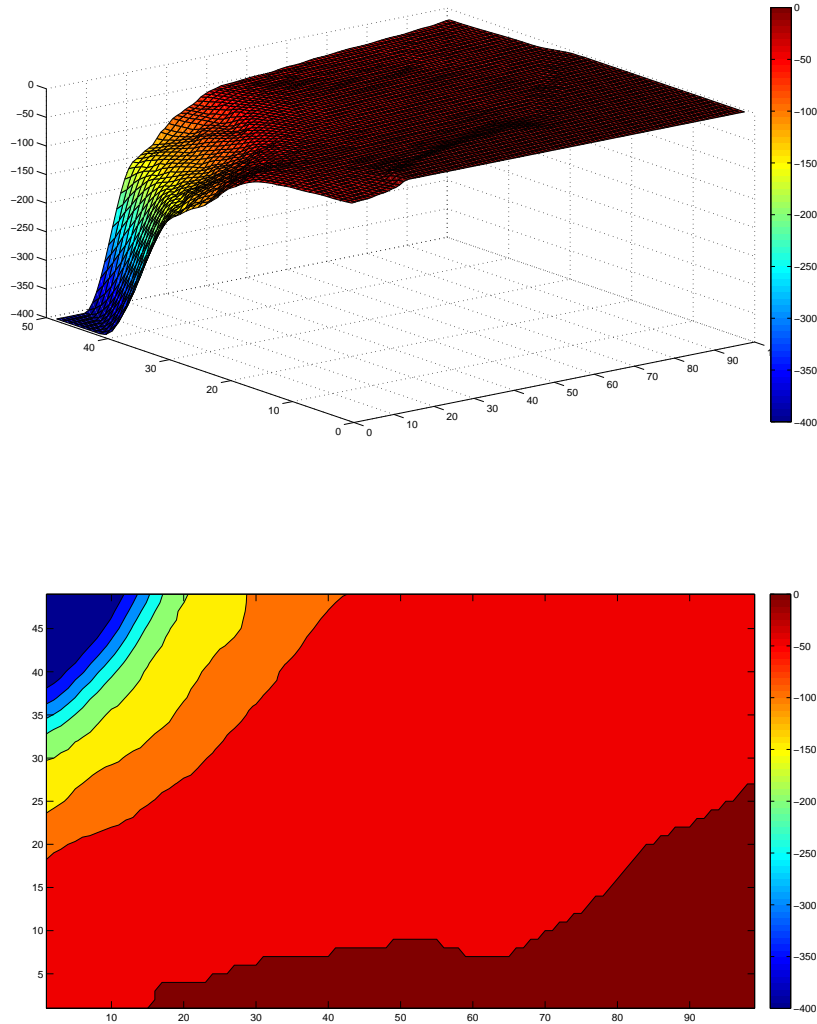


Figura 4.8: Malla en diferencias finitas para el dominio de Sonda de Campeche

El tamaño de paso temporal, el más limitante numéricamente, obedece a la condición establecida por el número de Courant. En todos los escenarios el paso temporal fue de 1 s con una duración total de simulación de 30 días.

Como condiciones iniciales se consideran las entradas de corrientes litorales y la fluctuación de la superficie por la influencia de la marea en las fronteras Este y Oeste; se considera que la temperatura en la región central de la Bahía de Campeche es constante en todo el dominio así como la salinidad con un valor de 36. El viento interactúa con la superficie libre a partir del día 15 hasta el día 30 en todo el dominio de estudio.

4.3.2. Resultados de la simulación hidrodinámica de la región de estudio

Se muestran los resultados de la simulación del campo de velocidades obtenidos del proyecto Sonda I (Salas, 2005)[SMV⁺05], para las épocas de secas (abril), lluvias (Agosto) y nortes (Noviembre) en la zona de estudio esta identificada por el recuadro en la figuras (4.9, 4.11 y 4.13) e inmediatamente su comparación cuantitativa con el modelo hidrodinámico empleado (figs. 4.10, 4.12 y 4.14).

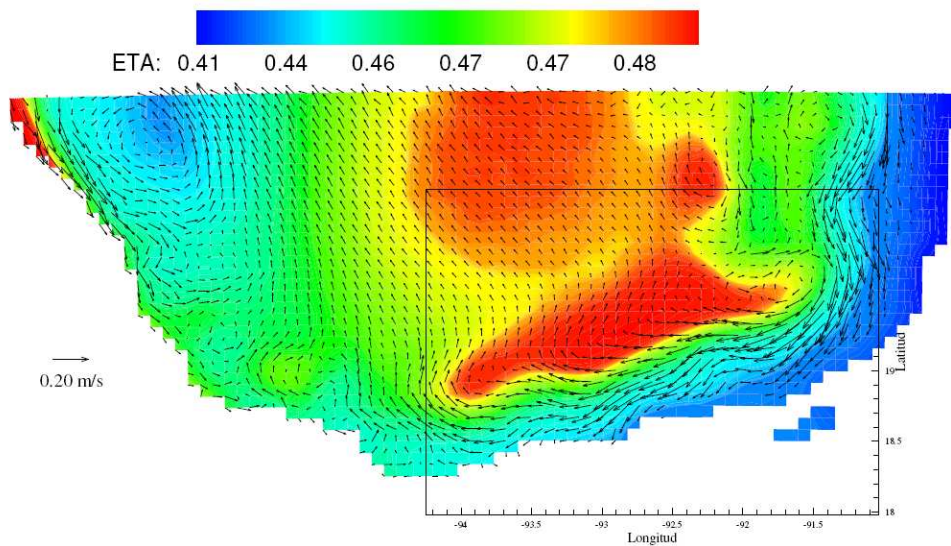


Figura 4.9: Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de secas (Abril)

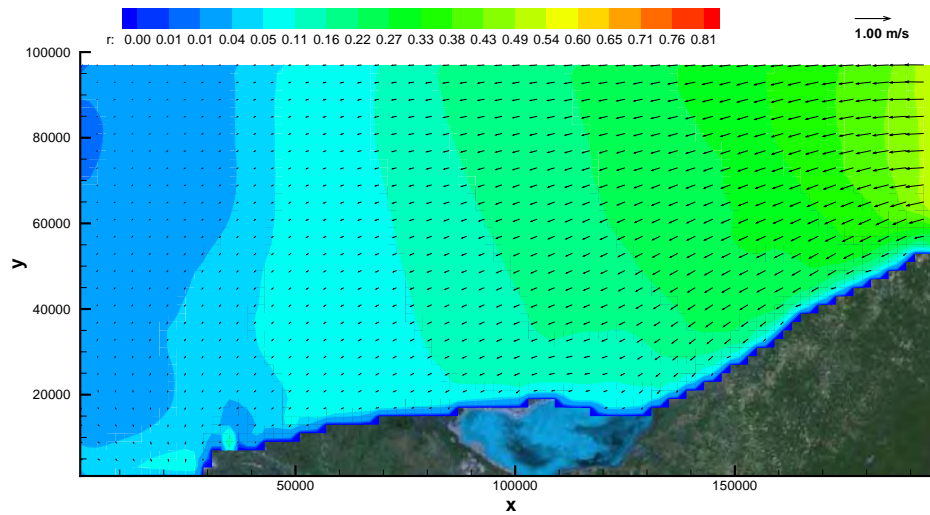


Figura 4.10: Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de secas (Abril)

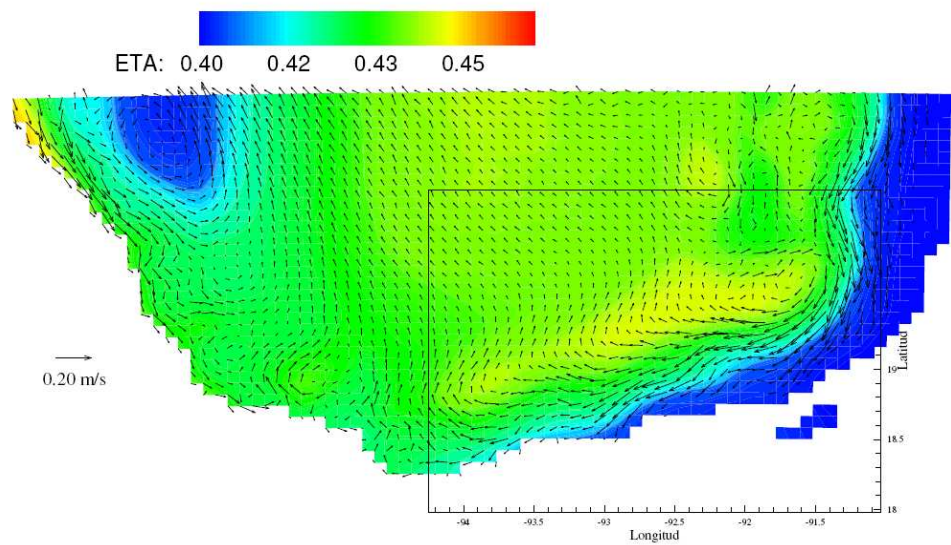


Figura 4.11: Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de lluvias (Agosto)

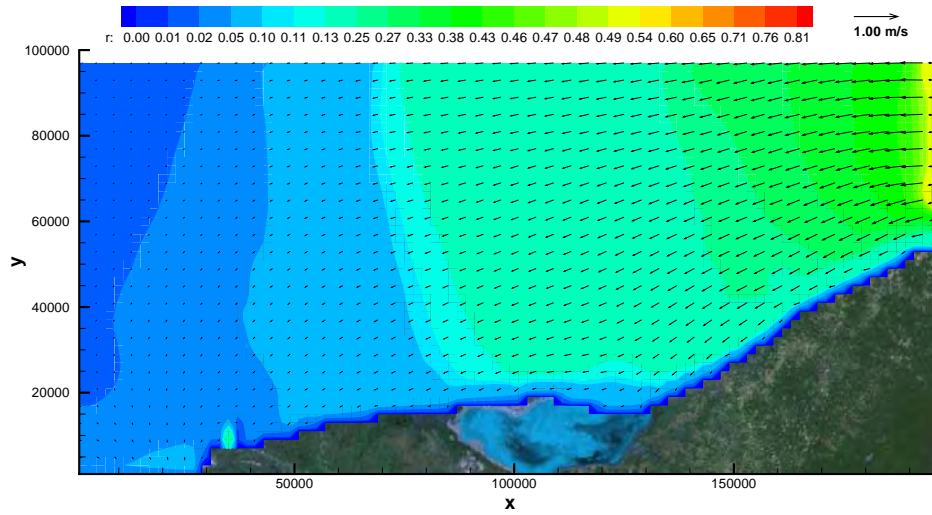


Figura 4.12: Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de lluvias (Agosto)

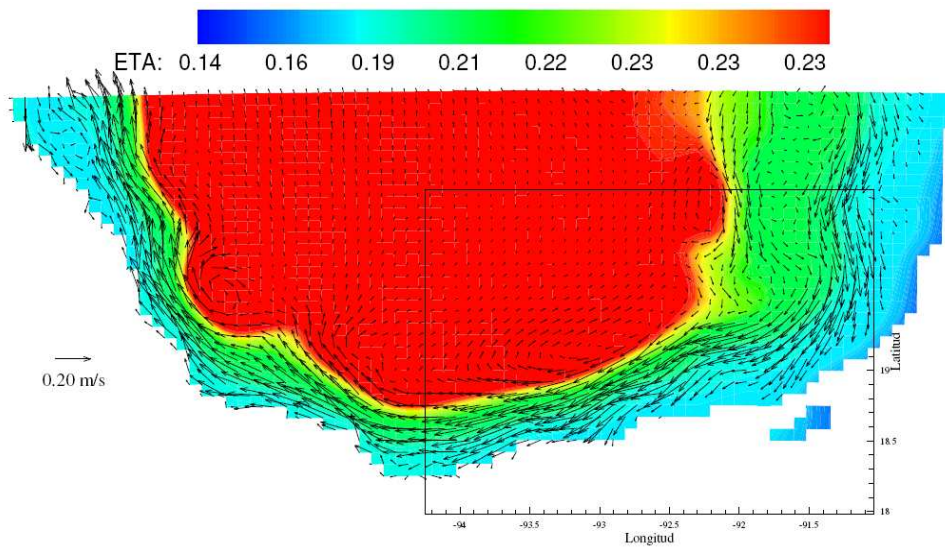


Figura 4.13: Elevación de la superficie libre y campo de velocidades en la región sur del Golfo de México para la época de lluvias (Noviembre)

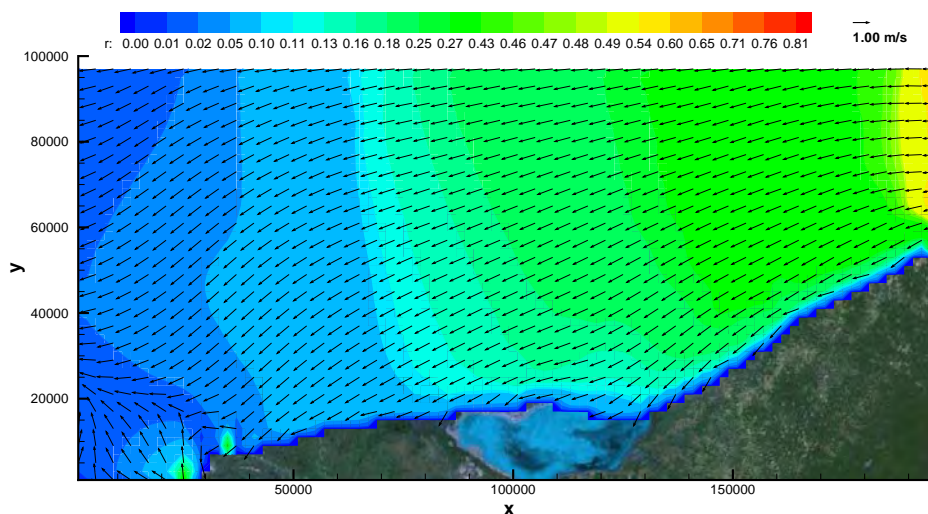


Figura 4.14: Campo de velocidades en la región de Sonda de Campeche para la época de nortes (Noviembre)

Los resultados de las 3 épocas presentan el mismo comportamiento en el campo de velocidades, con diferencia de la magnitud de la elevación de la superficie libre para el escenario de nortes, debido principalmente por el viento en la región (Salas, 2005)[SMV⁺05].

Por lo tanto, el modelo hidrodinámico empleado representa el patrón de circulación reportado en el proyecto Sonda I para las diferentes épocas, estos campos de velocidades será empleados para alimentar la zona de estudio la cual se describe a continuación.

4.4. Simulación de la hidrodinámica en 3D de la zona de estudio

Como tercer paso, una vez obtendios los campos hidrodinámicos de la región de Sonda de Campeche, se extraen las matices que circundan la zona de interés

conocida como Atasta mencionada al principio de este capítulo, estas matrices serán las forzantes del modelo de sub malla para generar campos hidrodinámicos mas refinados. Se incorpora además el módulo de oleaje que complementa al modelo hidrodinámico, cabe mencionar que ahora se efectura la simulación en 3D para este sitio que presenta una batimetría suave y poco accidentada; la zona que estamos estudiando tiene una extensión de 16 km^2 aproximadamente la cual se puede apreciar en la figura (4.15).

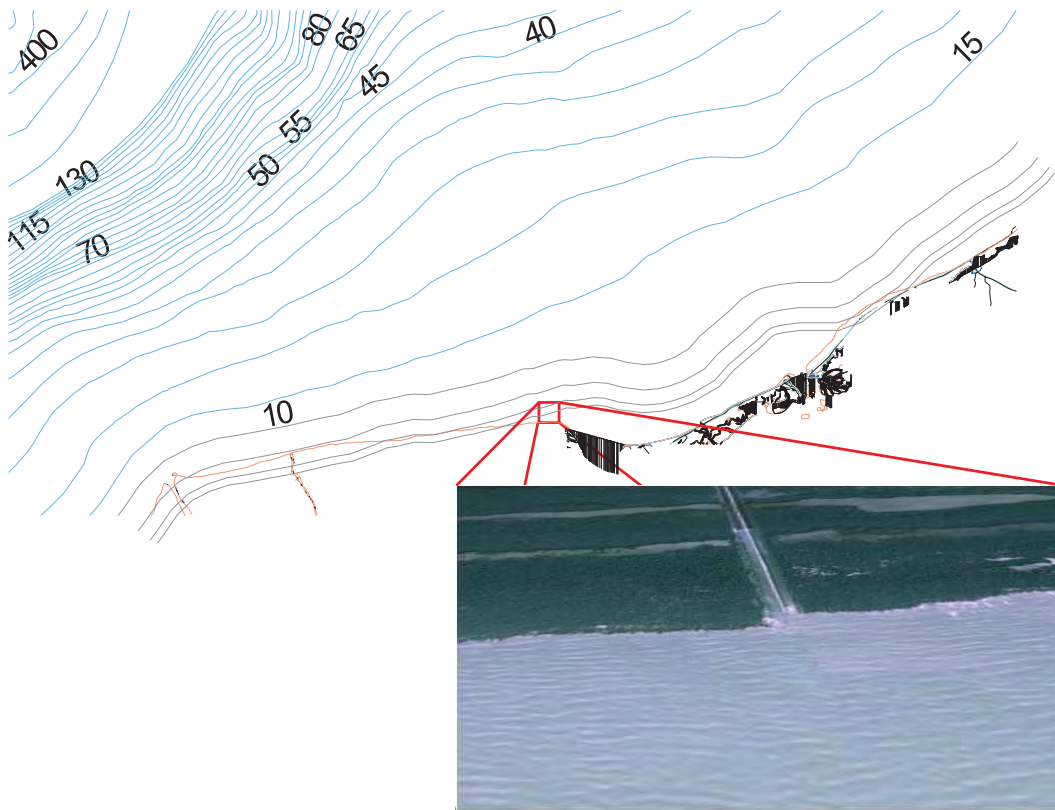


Figura 4.15: Localización de la zona refinada de estudio

4.4.1. Malla numérica de la zona de estudio

El diseño de la zona de estudio refinada se considera totalmente tridimensional, con espaciamiento en la vertical ($\Delta z = 0,5 \text{ m}$) formando 7 celdas que en total representa una profundidad máxima de 3.5 m, para el plano horizontal se tiene un espaciamiento de ($\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$). La malla numérica esta formada por 81 celdas en la dirección “x” y el mismo número de celdas en la dirección “y” tal

como se aprecia en la figura (4.16).

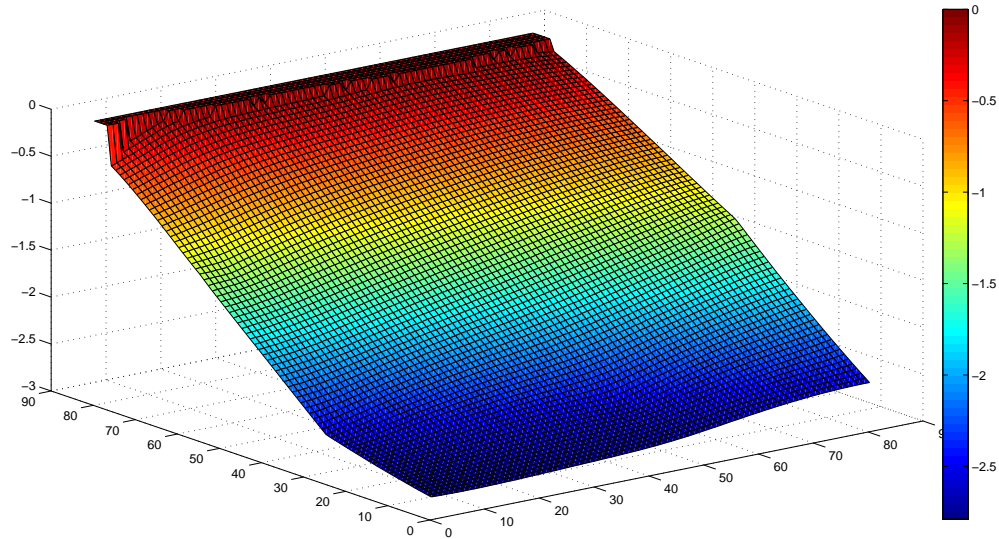


Figura 4.16: Malla numérica de la zona refinada de estudio

Como condiciones iniciales se consideran las entradas de corrientes litorales y la fluctuación de la superficie por la influencia de la marea, la temperatura, la salinidad, la influencia del viento que interactúa con la superficie libre en todo el dominio de estudio; todos estos datos son provenientes de la simulación hidrodinámica en 2D de la Sonda de Campeche.

Se considera dos mallas numéricas, el primer caso es que no existe ninguna tubería sobre el fondo como se presentó en la figura (4.16), con la finalidad de observar el patrón hidrodinámico y del movimiento de partículas de sedimentos en estado natural de la zona para realizar una comparación de forma cualitativa con la malla de la figura (4.17) la cual presenta un obstáculo al cual lo asociamos a una tubería de diámetro de 0.50 metros tendida en el fondo.

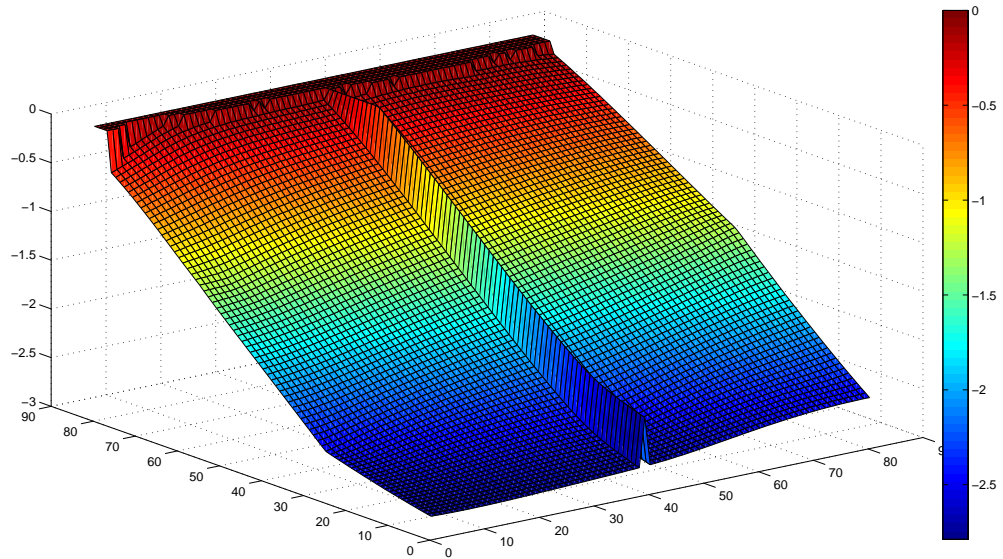


Figura 4.17: Malla numérica de la zona refinada de estudio con tubería de 50 cm

4.4.2. Resultados de la simulación hidrodinámica y del oleaje en la zona de estudio

Para expresar adecuadamente los resultados de la simulación numérica se ha colocado de forma conjunta el campo de velocidades antes y después de colocarse la tubería en la zona de estudio, de esta forma consideramos que la comparación y visualización de la hidrodinámica es la más adecuada, esto se repite para los escenarios antes mencionados.

El campo de velocidades obtenido en condiciones normales (antes de colocarse la tubería) se puede apreciar para la época de secas en la figuras (4.18 y 4.19).

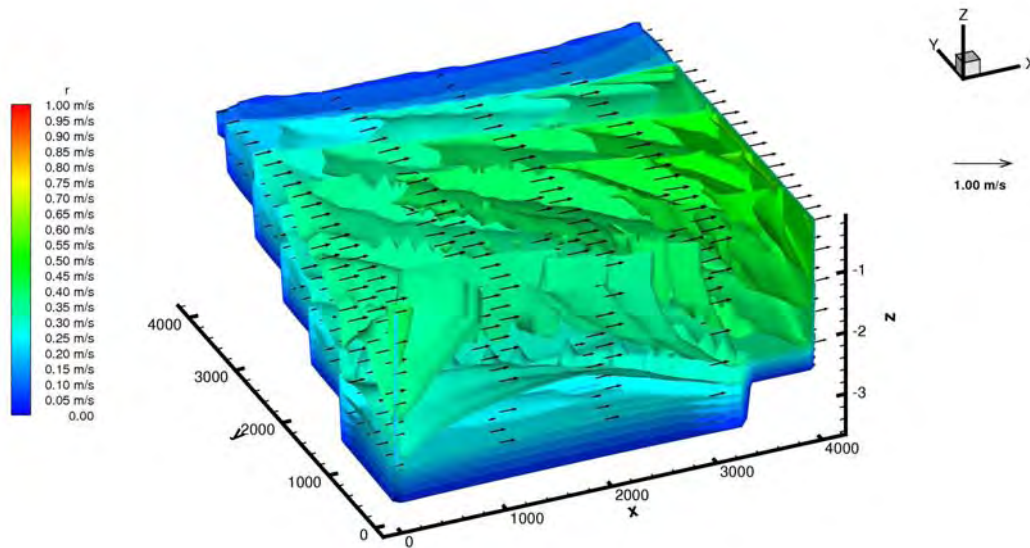


Figura 4.18: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de secas sin presencia de tubería

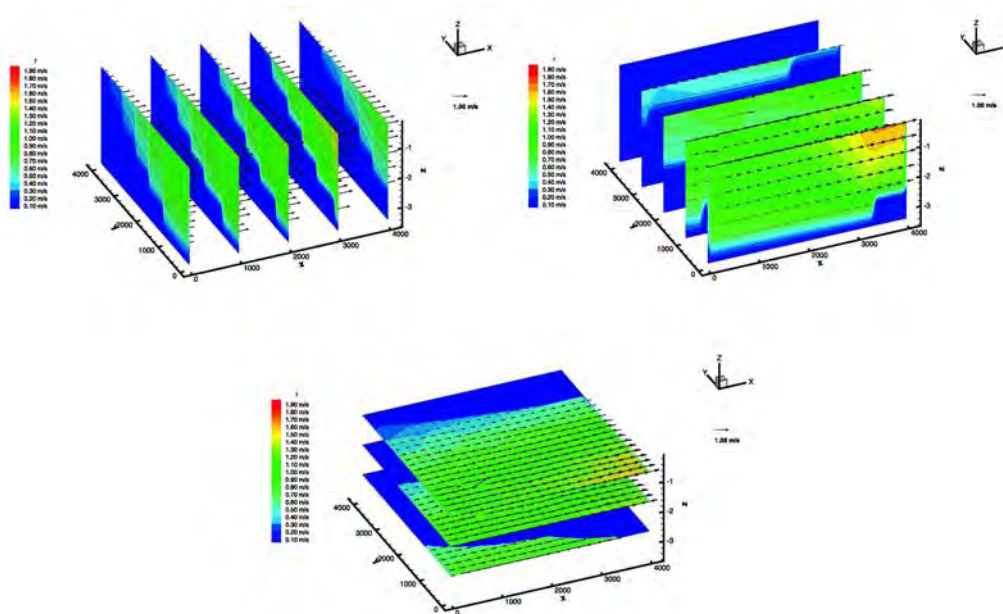


Figura 4.19: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de secas sin presencia de tubería

Posteriormente se presenta en la figura (4.20) el resultado de la hidrodinámica de la zona una vez colocada la tubería y de forma similar, en la figura (4.21) el

campo de velocidades en los planos “x”, “y” y “z”.

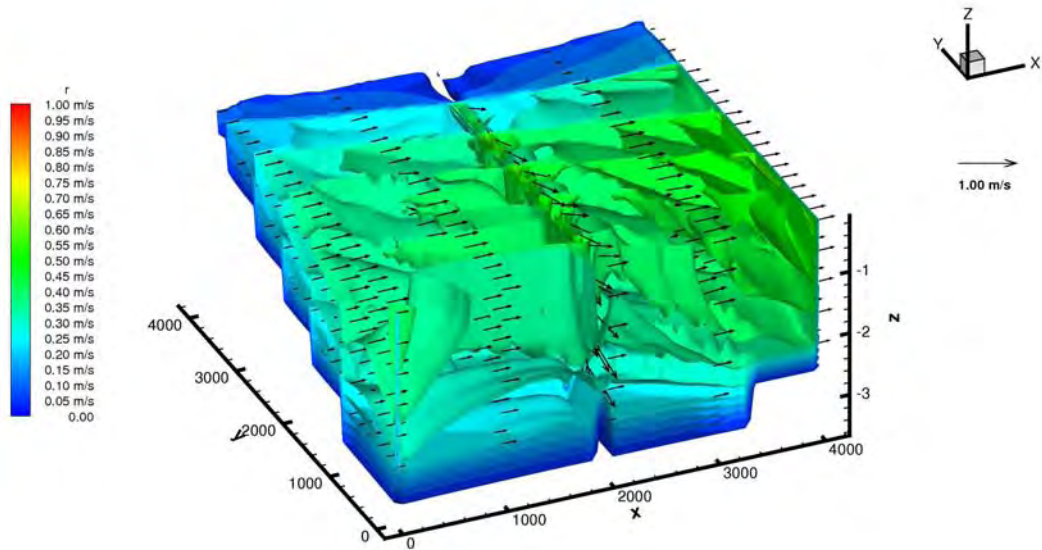


Figura 4.20: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de secas con presencia de tubería

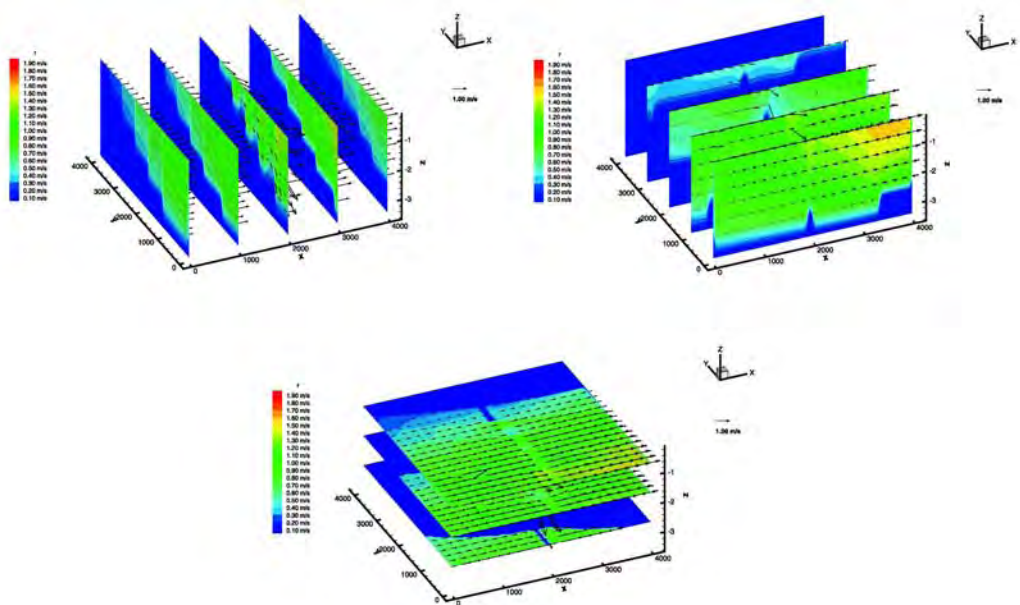


Figura 4.21: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de secas con presencia de tubería

Se muestra la superficie libre sin tubería en la figura (4.22) y con tubería (fig. 4.23), donde se observa una ligera modificación a causa de la tubería.

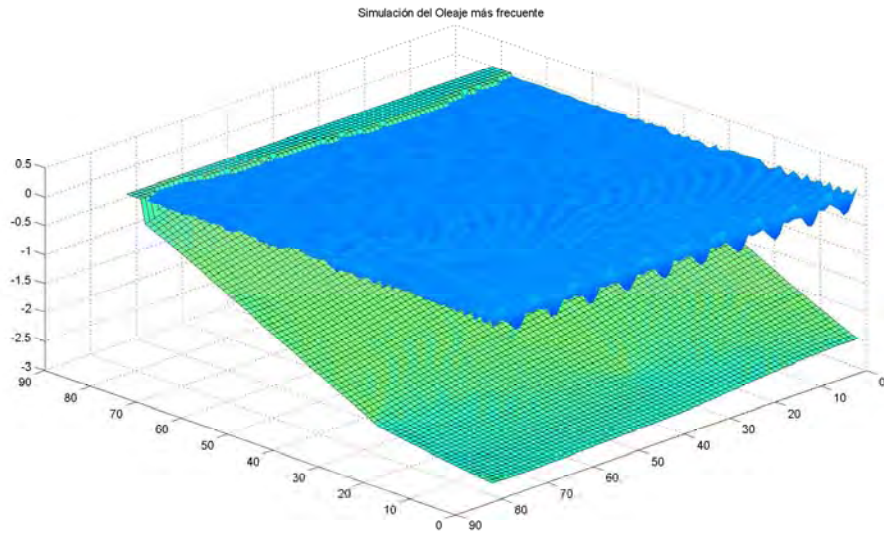


Figura 4.22: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de secas sin tubería

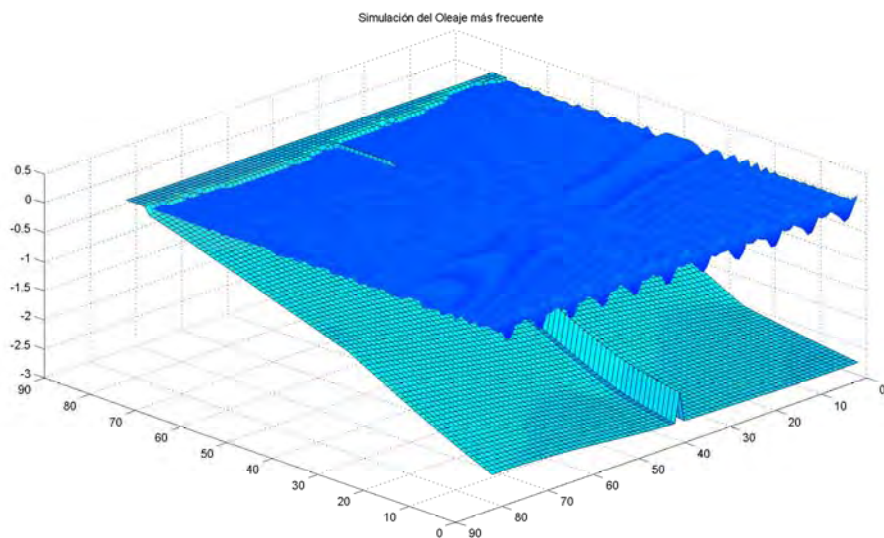


Figura 4.23: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de secas con tubería

Para la época de lluvias, los resultados del campo de velocidades en el dominio sin tubería se presentan en la figuras (4.24 y 4.25).

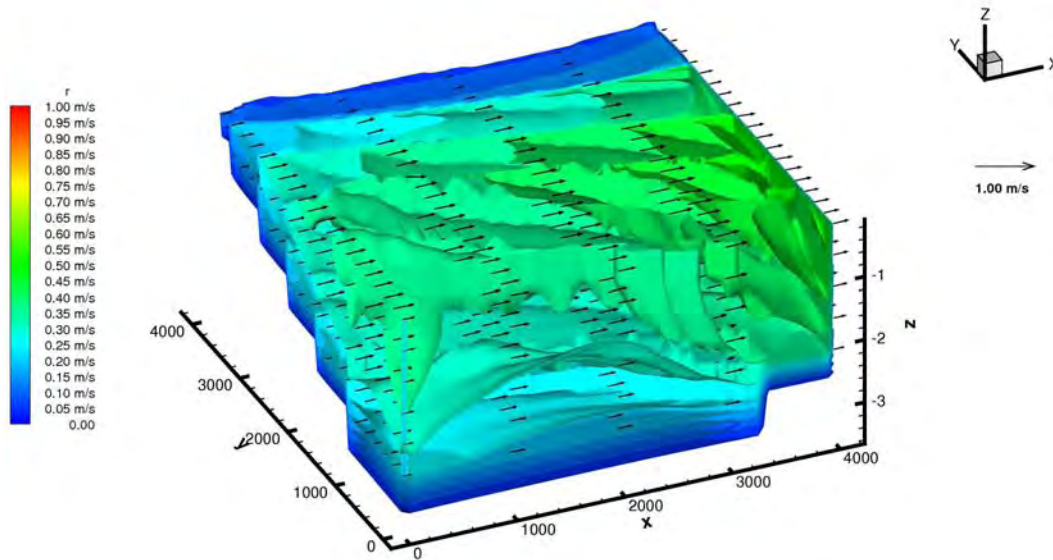


Figura 4.24: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de lluvias sin presencia de tubería

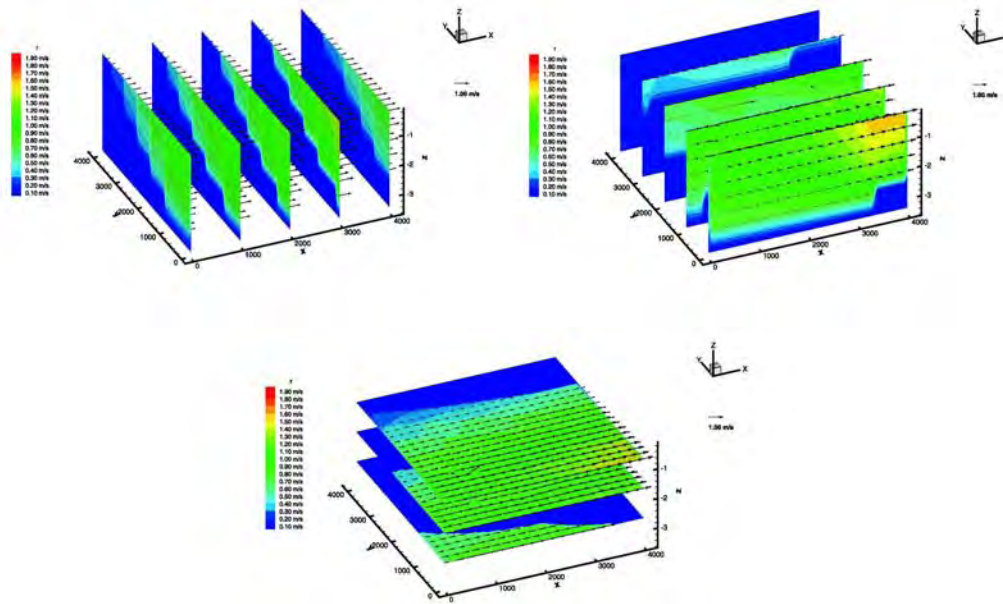


Figura 4.25: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de lluvias sin presencia de tubería

Colocando la tubería en el fondo, el campo de velocidades se observa en las figuras (4.26 y 4.27).

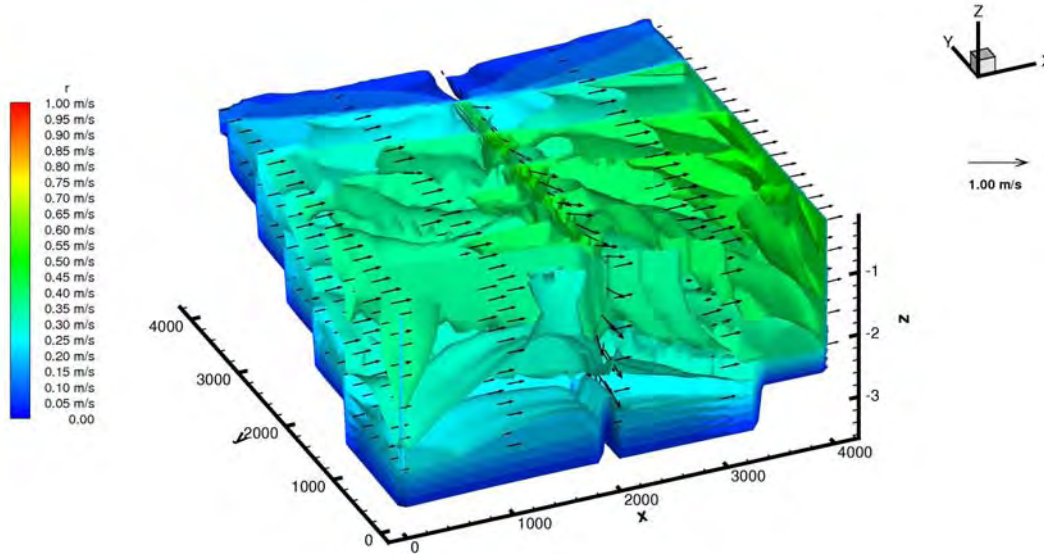


Figura 4.26: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de lluvias con presencia de tubería

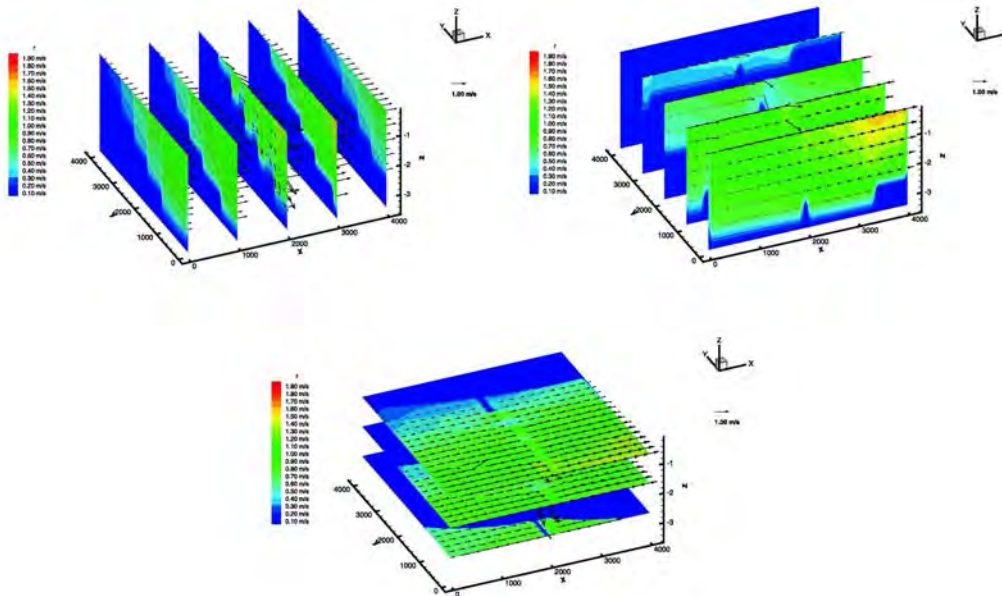


Figura 4.27: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de lluvias con presencia de tubería

En la figura (4.28) se aprecia la superficie libre sin presencia de tubería y en la figura (4.29) la modificación de la superficie por efecto de la tubería.

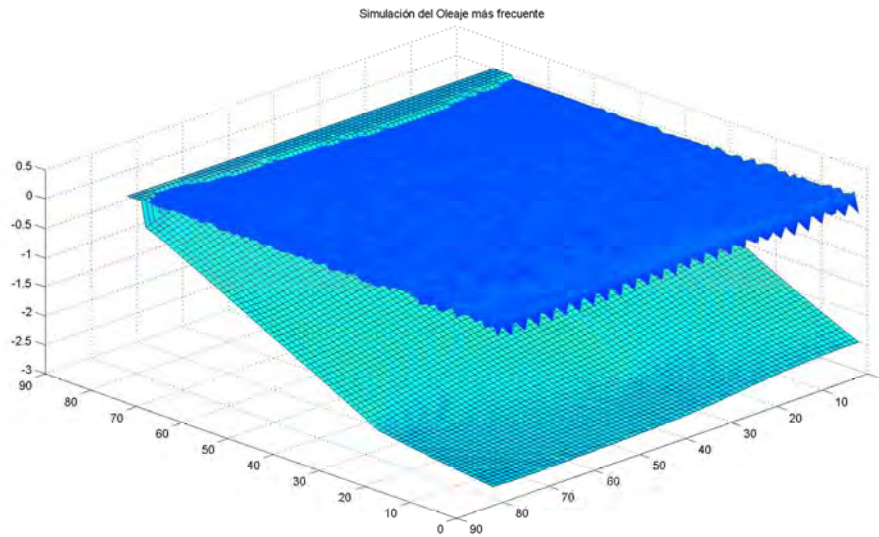


Figura 4.28: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de lluvias sin tubería

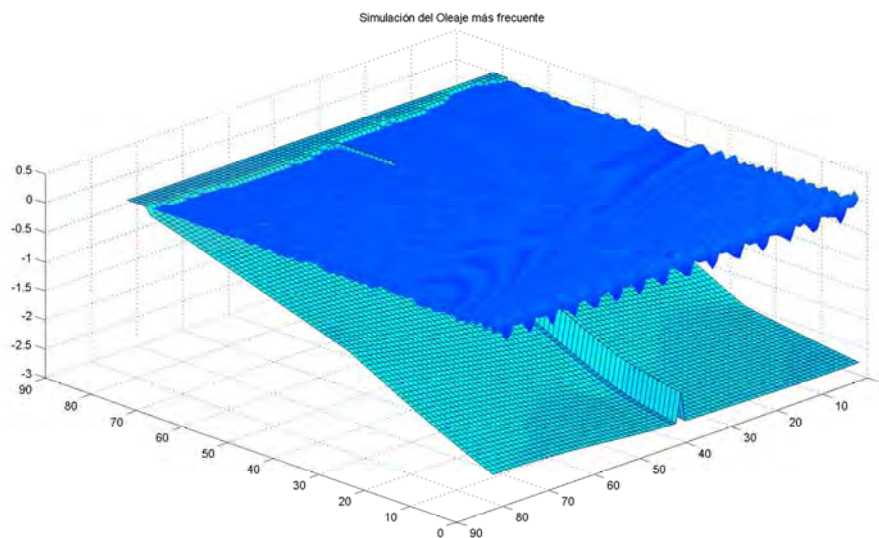


Figura 4.29: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de lluvias con tubería

Para la última época del año que es la de nortes, se presentan los resultados en las figuras (4.30 y 4.31) sin presencia de tubería del campo de velocidades.

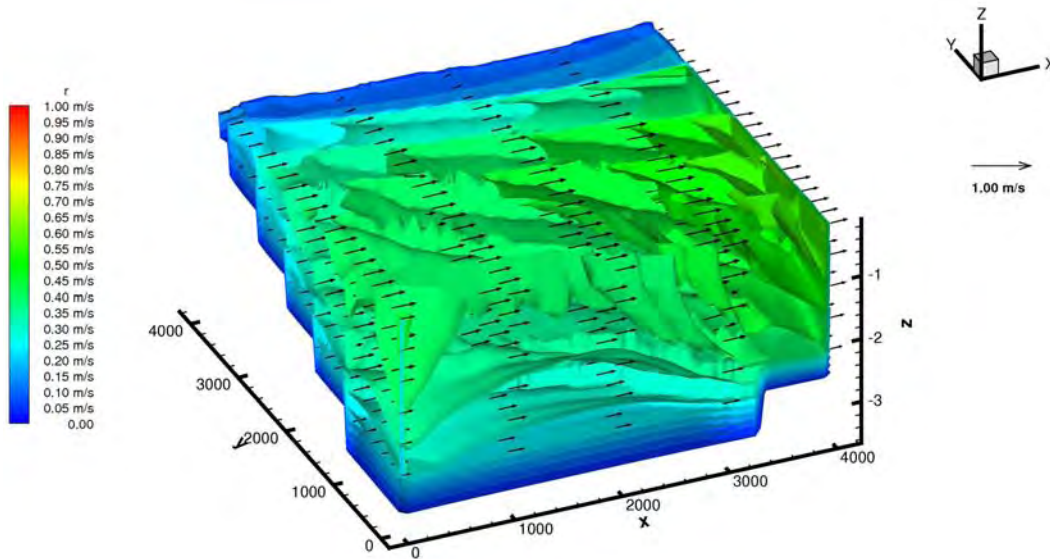


Figura 4.30: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de nortes sin presencia de tubería

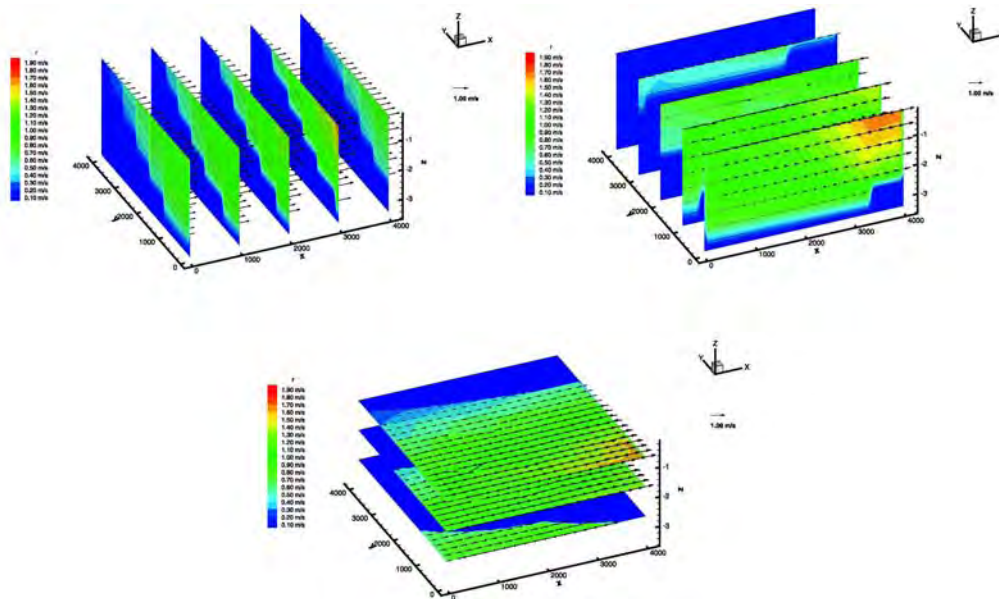


Figura 4.31: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de nortes sin presencia de tubería

Continuando con los resultados, en la figuras (4.32 y 4.33) se aprecia el campo hidrodinámico con la tubería en el fondo.

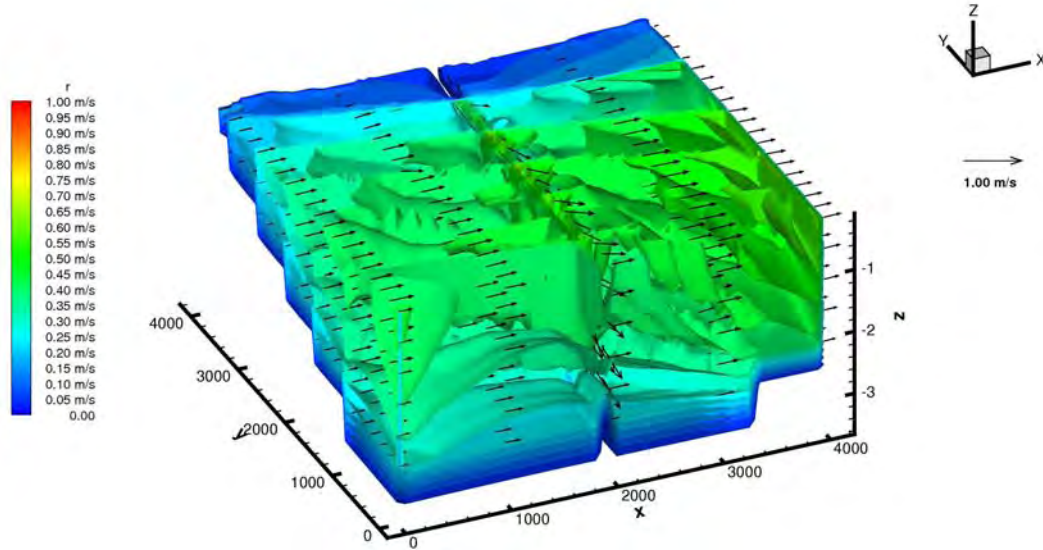


Figura 4.32: Campo de velocidades (Isosurface) en la zona de estudio para la época de nortes con presencia de tubería

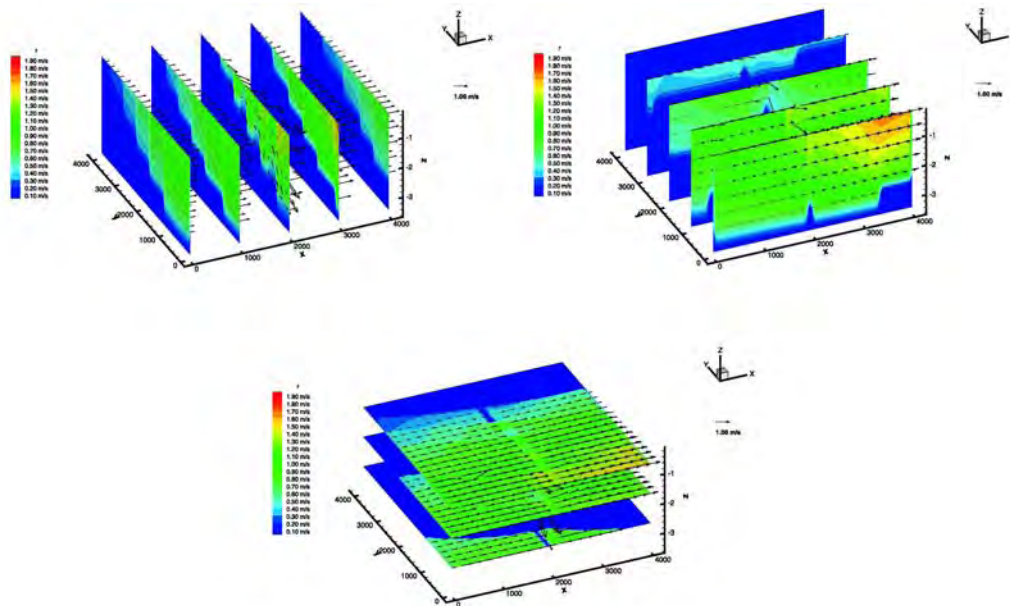


Figura 4.33: Planos del campo de velocidades en las direcciones x, y, z en la zona de estudio para la época de nortes con presencia de tubería

Por último, en las figuras (4.34 y 4.35) se observa la superficie libre antes y después de colocada la tubería.

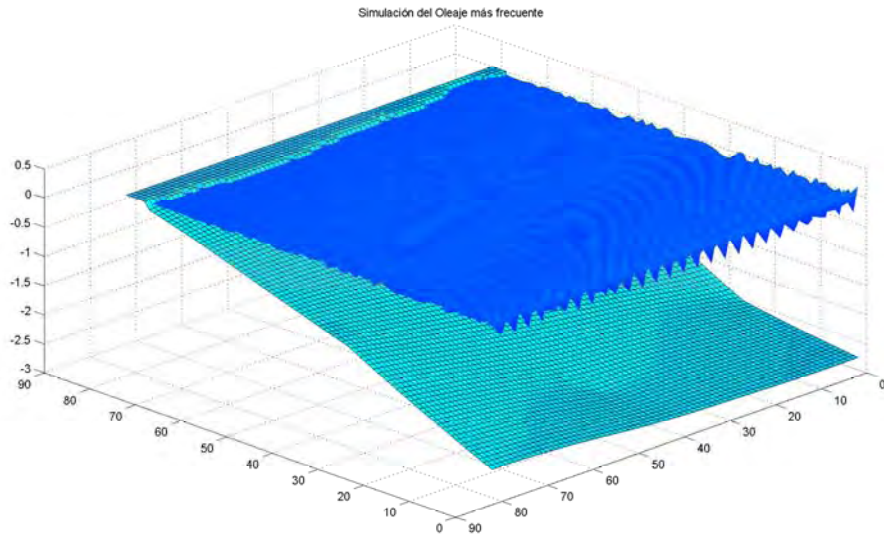


Figura 4.34: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de nortes sin tubería

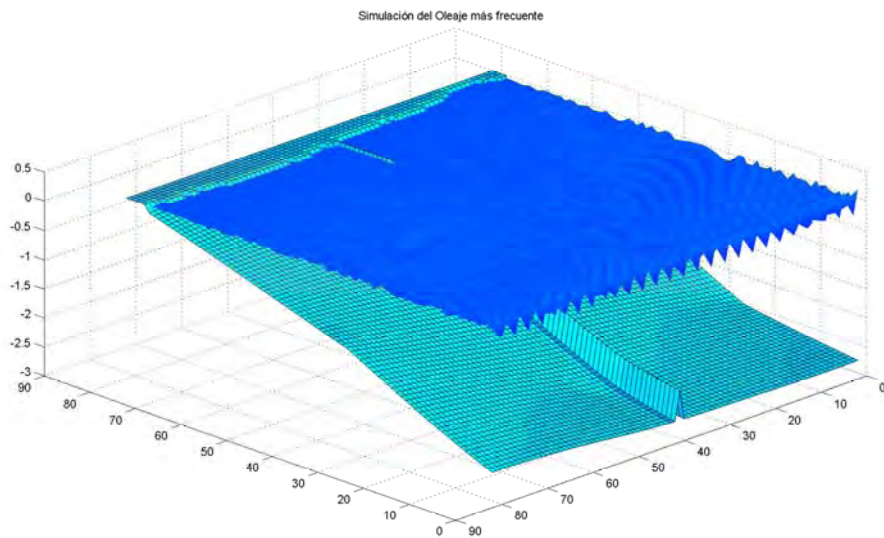


Figura 4.35: Simulación del oleaje dominante en la zona de estudio para la época de nortes con tubería

4.5. Modelación del transporte de partículas de sedimentos en la zona de estudio

El cuarto paso es la modelación de partículas de sedimento, esta se realizó retomando los escenarios hidrodinámicos de la zona de estudio y contemplando la no existencia de la tubería en un principio para observar cómo se comporta el transporte del sedimento en estado natural de la zona y posteriormente se presentan los resultados con la tubería indicando dónde se observa alteración del fondo por erosión y/o azolve de partículas.

Las condiciones iniciales con las cuales se simula numéricamente el transporte de sedimentos son mostradas en el cuadro (4.1). Se tomaron 3 diámetros significativos (D_{10} , D_{50} y el D_{90}) donde para cada época se tiene diferente concentración que al emplear el método PIC descrito en el capítulo 3 se estima un número de partículas para el fondo y para la descarga puntual en columna de agua que se sitúa en el extremo izquierdo de la zona de estudio.

Cuadro 4.1: Condiciones iniciales o forzantes para la simulación del transporte lagrangeano de sedimentos

<i>Parámetro</i>	<i>Secas</i>	<i>Lluvias</i>	<i>Nortes</i>
Concentración inicial de fondo (kg/m^3)	0.30	0.45	0.81
Número de partículas D_{50} de fondo(0,088 mm)	15,000	22,500	40,500
Número de partículas D_{10} de fondo(0,007 mm)	3,000	5,400	9,300
Número de partículas D_{90} de fondo(0,190 mm)	1,500	2,700	4,650
Concentración inicial puntual (kg/m^3)	0.20	0.30	0.56
Número de partículas D_{50} puntual(0,038 mm)	2,850	4,275	7,980
Número de partículas D_{10} puntual(0,062 mm)	1,135	2,043	3,518
Número de partículas D_{90} puntual(0,167 mm)	865	1,557	2,682

4.5.1. Resultados de la simulación del transporte de partículas

Para el conteo del transporte de sedimentos (partículas) se establecen 6 puntos en los que se obtienen perfiles adimensionales de concentración en columna de agua, sus ubicaciones se muestran en la figura (4.36).

Los resultados mostrados a continuación, son al término de las primeras 12 horas de simulación de un total de 720 horas totales.

Al final, se realiza una comparación de los perfiles 3 y 4 (antes y después de la tubería) para cada época, cuya finalidad es apreciar la posible existencia de sedimentación o exceso de partículas y/o erosión, cabe aclarar que la medición para todos los perfiles es a partir del fondo hasta la superficie libre y que el análisis es únicamente de forma cualitativa.

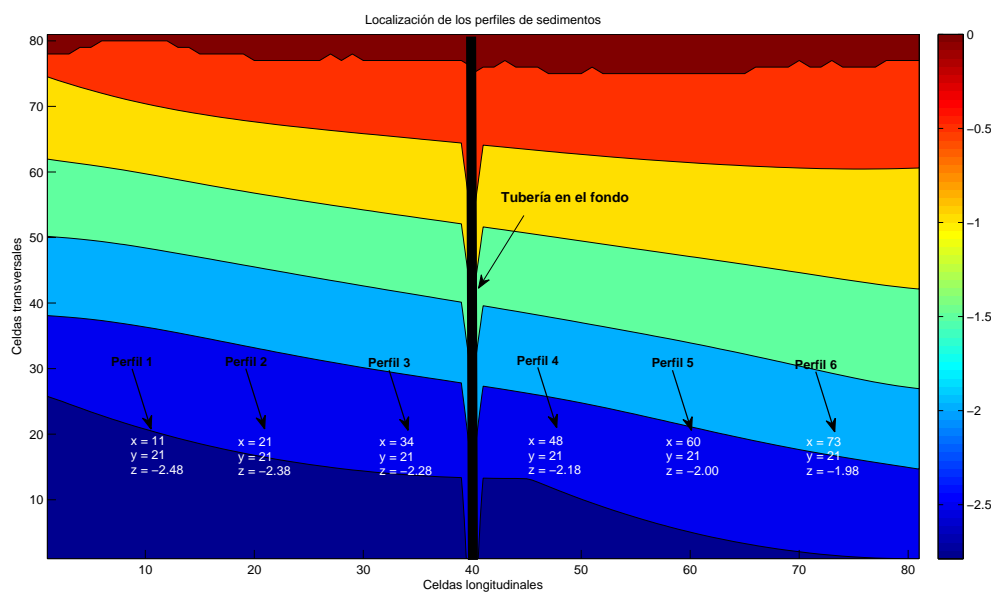


Figura 4.36: Localización de los perfiles de concentración en columna de agua en el dominio de estudio

En la figura (4.37) se presenta la condición inicial del sembrado de partículas en el fondo para las 3 épocas de estudio sin presencia de tubería, respetando el número de partículas mostrado en el cuadro (4.1); posteriormente, en la figura (4.37) se muestra la condición inicial del sembrado de partículas con la colocación de la tubería al centro de la zona de estudio.

Los resultados de la simulación para las 3 épocas sin contemplar la tubería están contenidas en las figuras (4.38, 4.39 y 4.40).

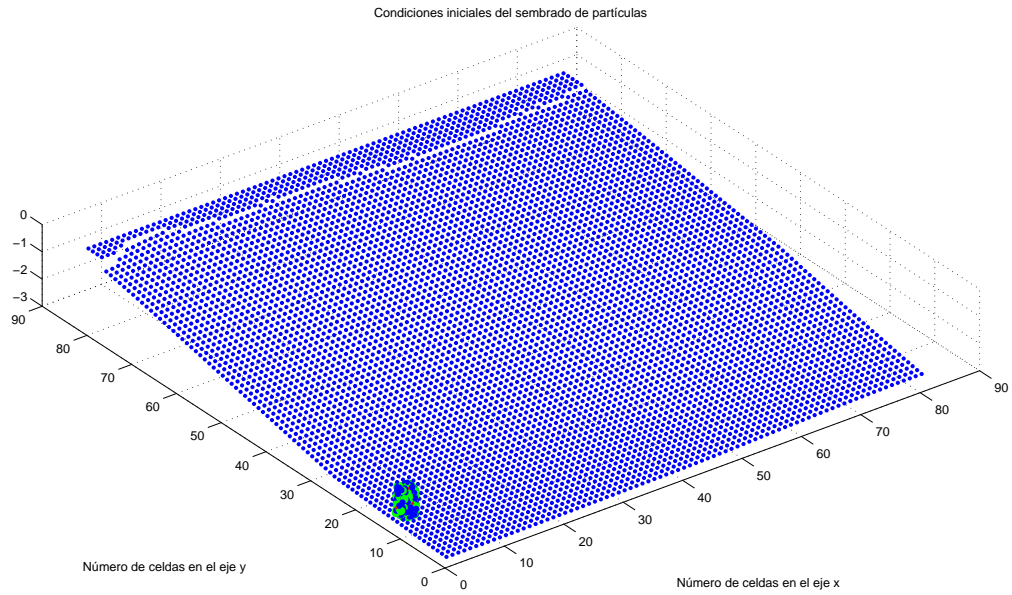


Figura 4.37: Condiciones iniciales de las partículas en el fondo y de la concentración puntual de descarga (sin tubería)

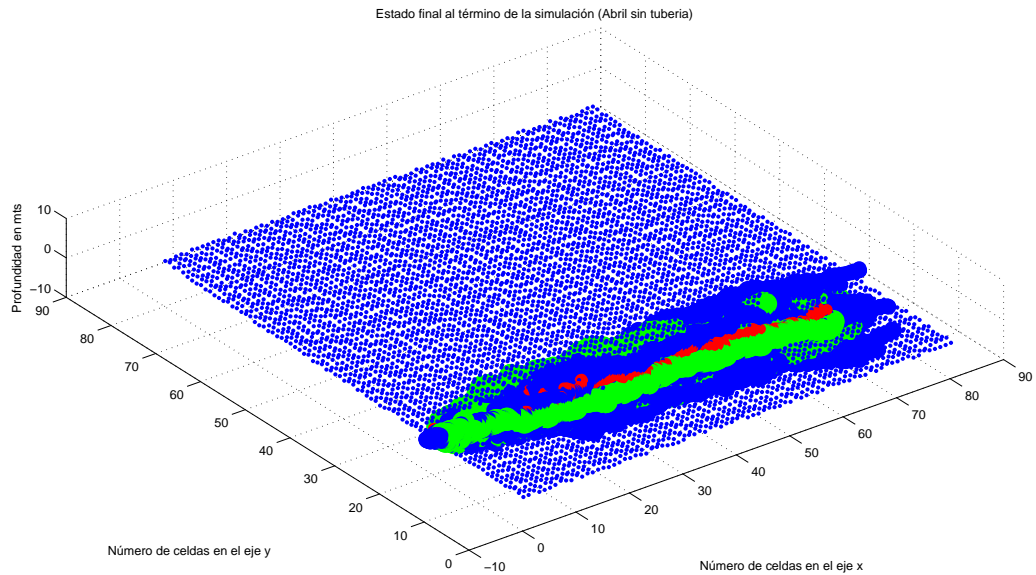


Figura 4.38: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de secas (Abril) sin tubería

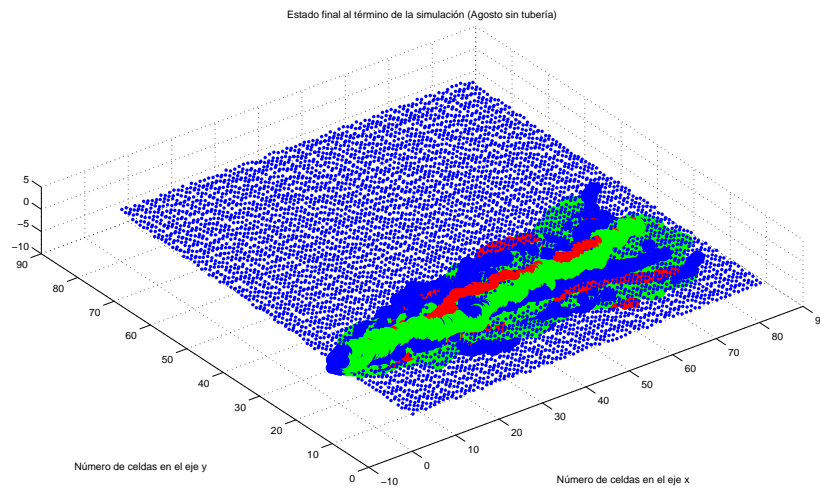


Figura 4.39: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de lluvias (Agosto) sin tubería

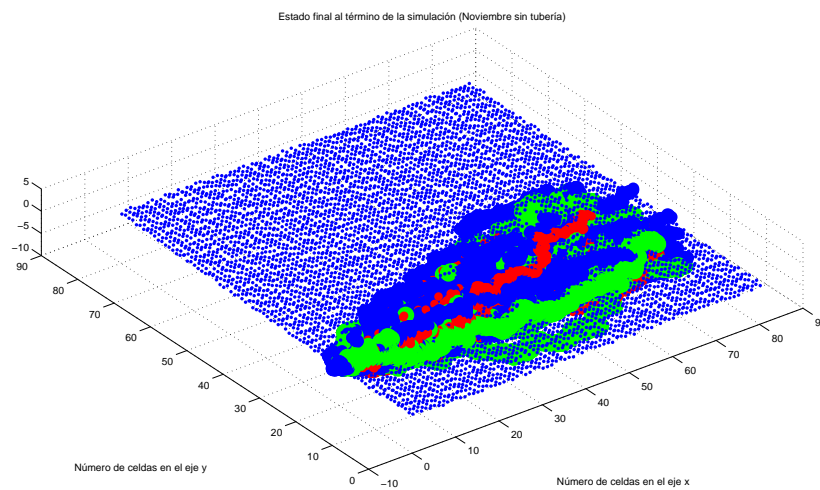


Figura 4.40: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de nortes (Noviembre) sin tubería

Los perfiles adimensionales en columna de agua de la concentración de las partículas al final de las 720 horas de simulación, se muestran en las figuras (4.41, 4.42 y 4.43) para cada época de simulación.

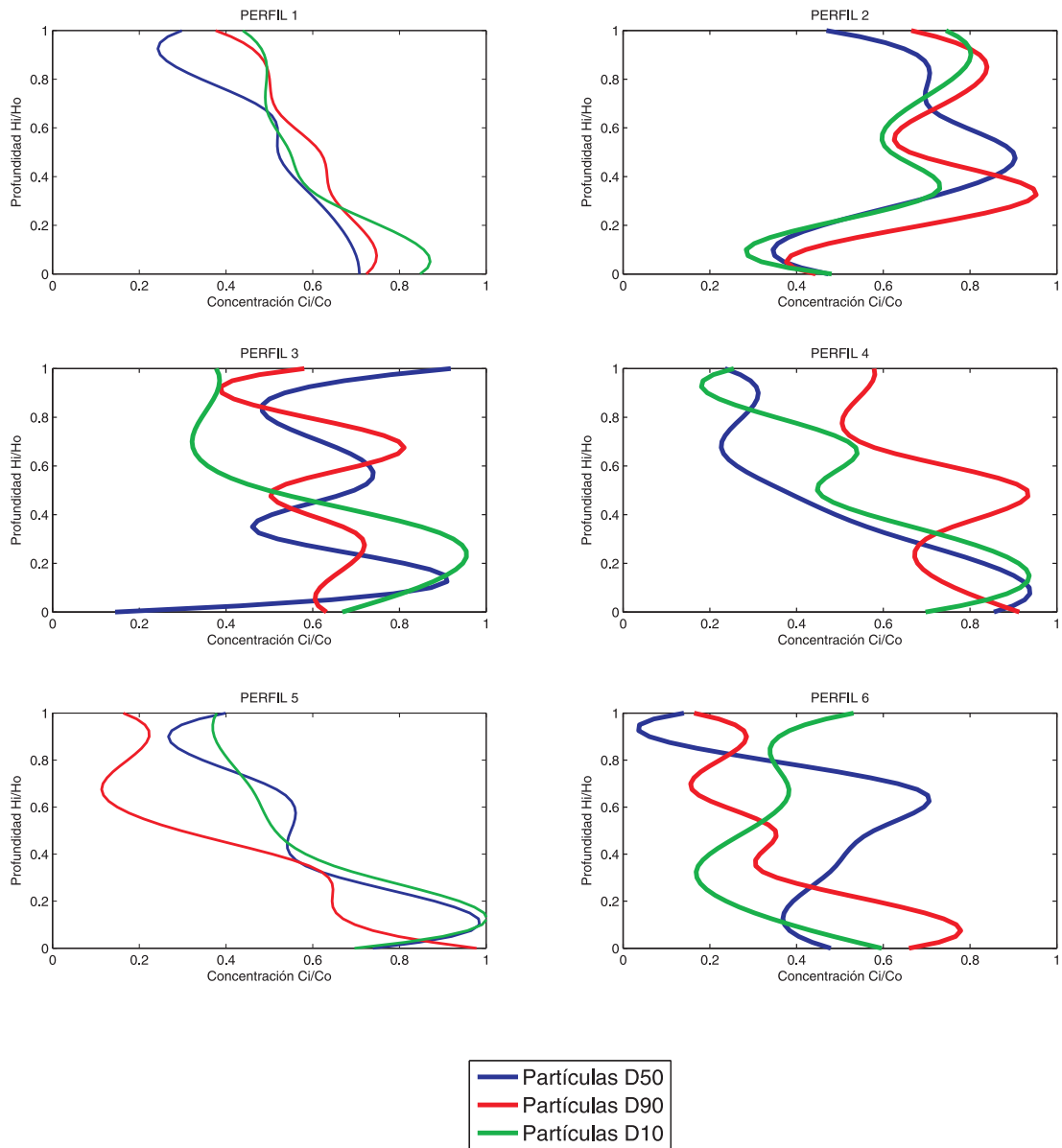


Figura 4.41: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de secas (Abril) sin tubería

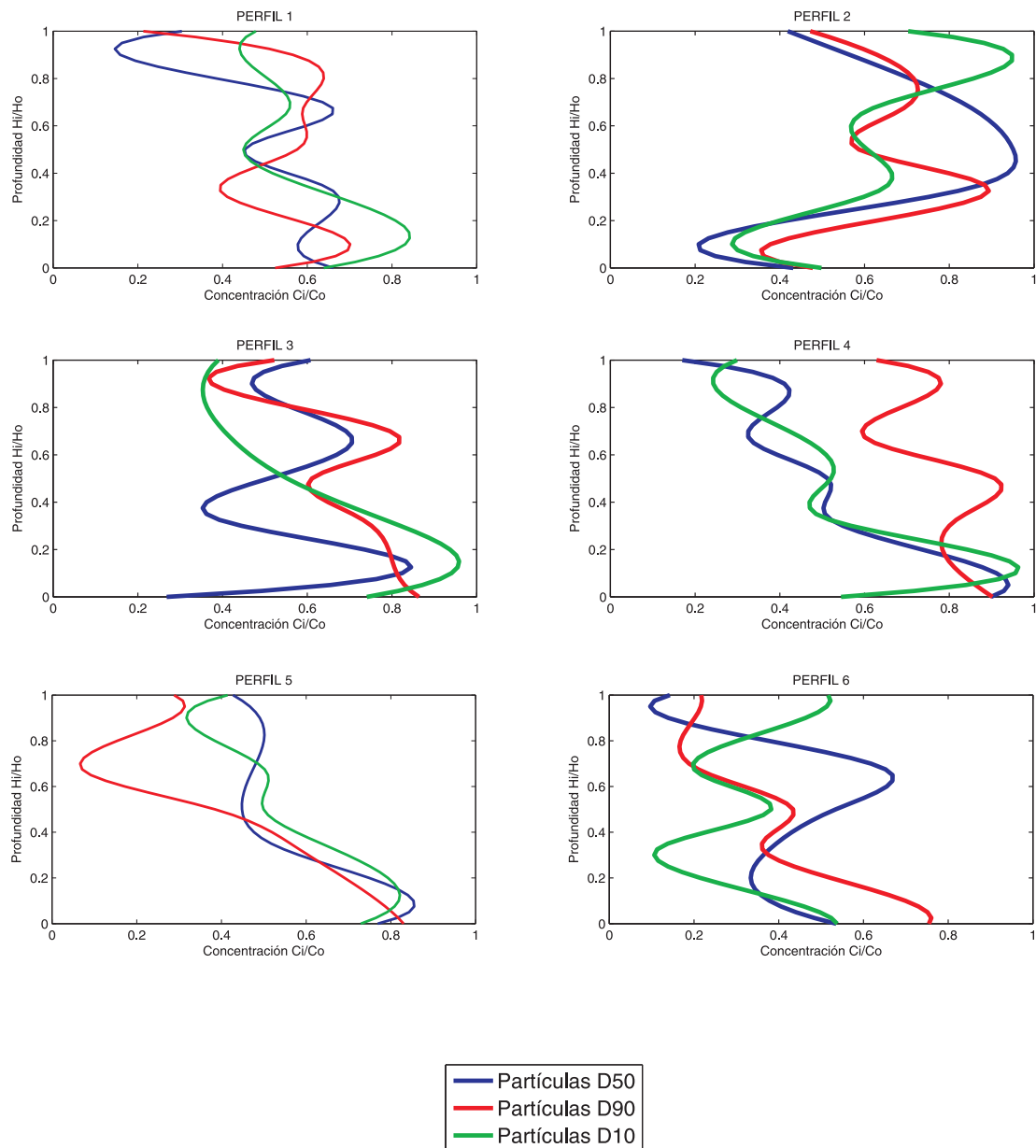


Figura 4.42: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de lluvias (Agosto) sin tubería

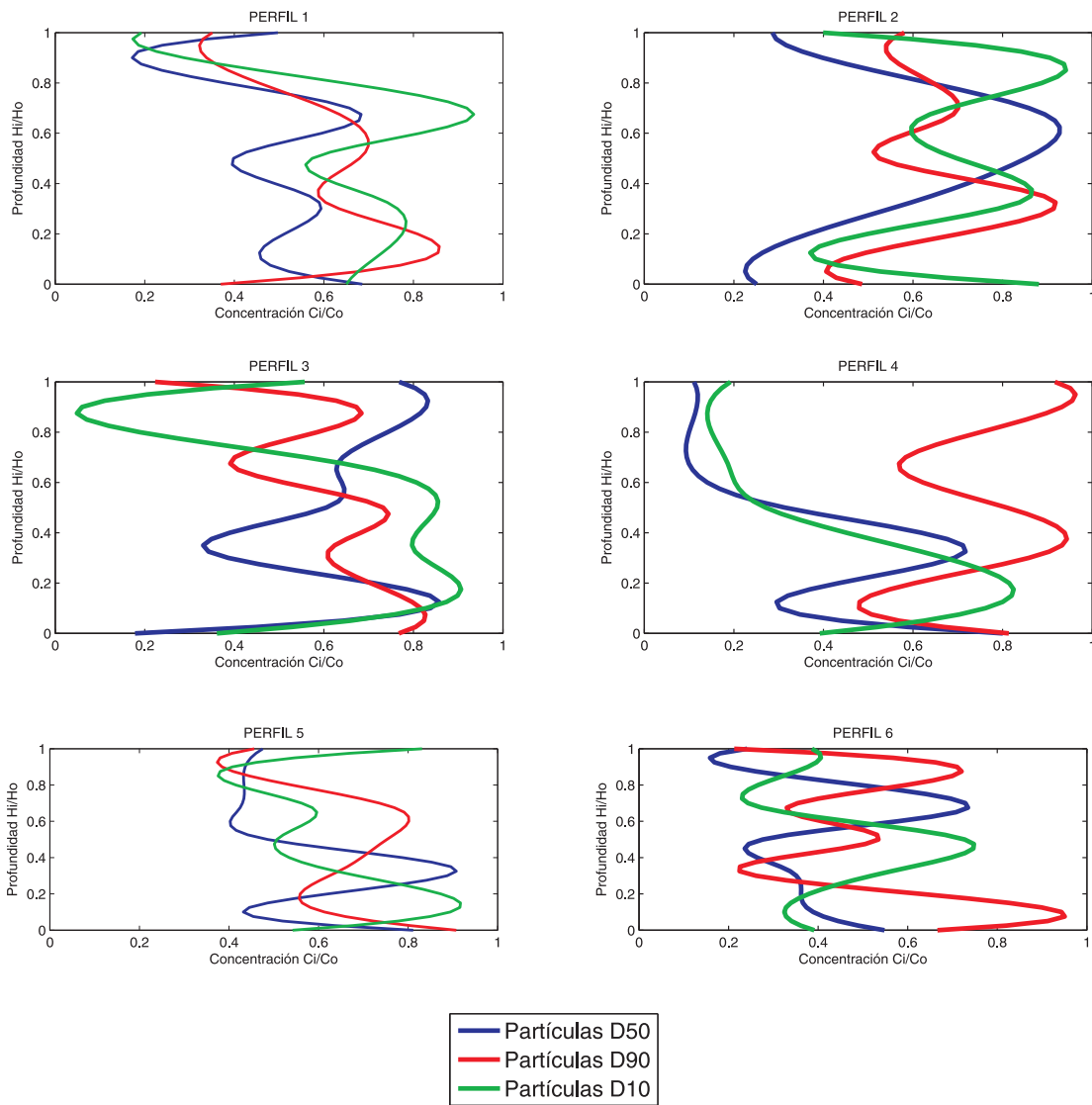


Figura 4.43: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de nortes (Noviembre) sin tubería

Continuando con los resultados, en la figura (4.44) se muestra la condición inicial con tubería y en las figuras (4.45, 4.46 y 4.47) al término de la simulación.

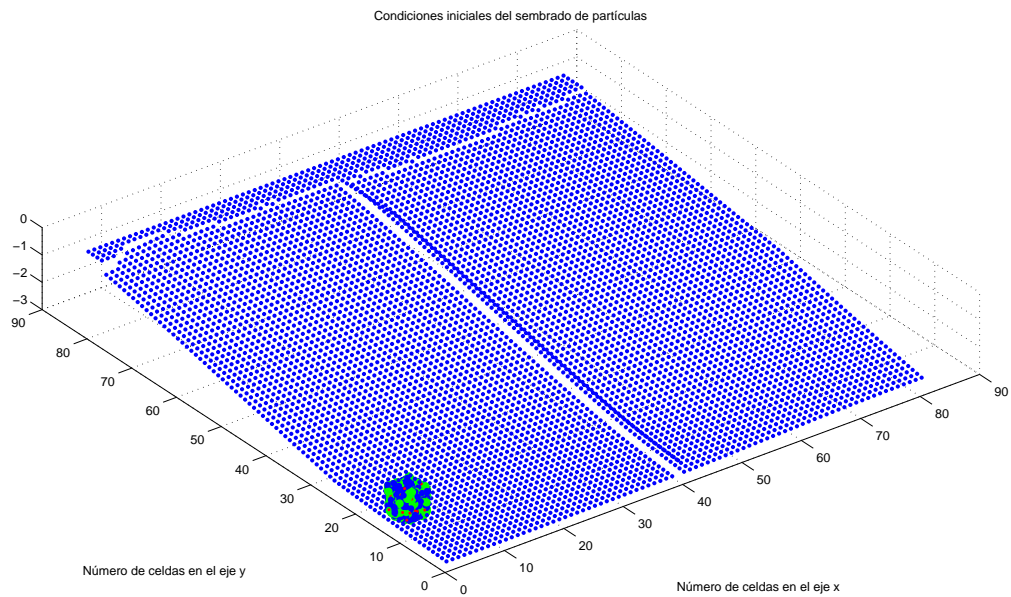


Figura 4.44: Condiciones iniciales de las partículas en el fondo y de la concentración puntual de descarga (con tubería)

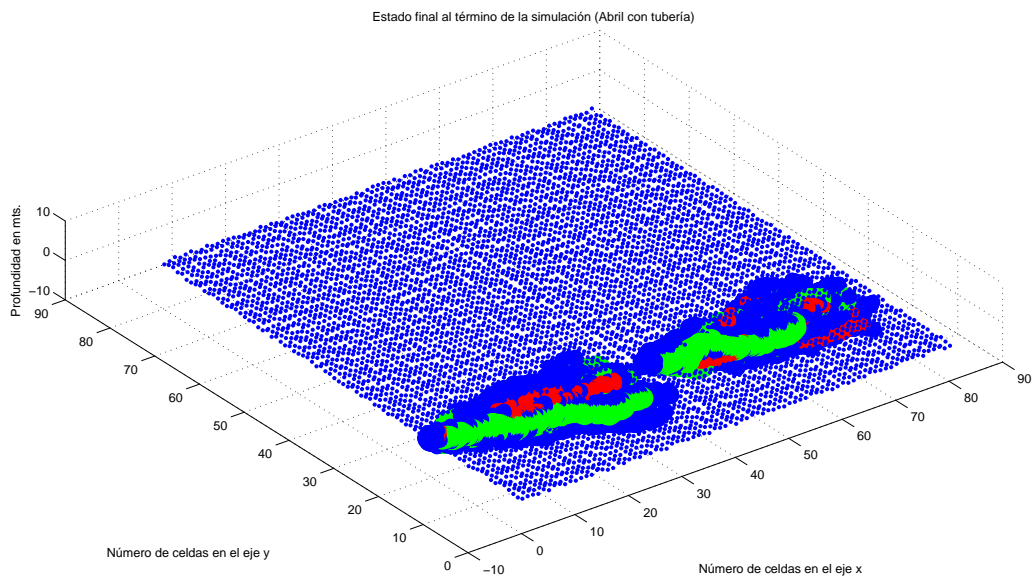


Figura 4.45: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de secas (Abril) con tubería

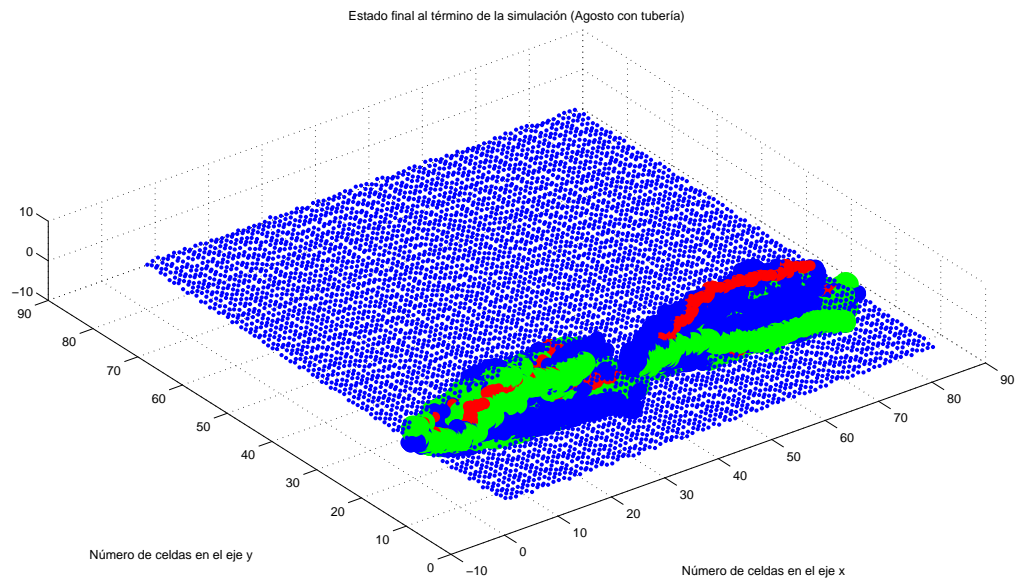


Figura 4.46: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de lluvias (Agosto) con tubería

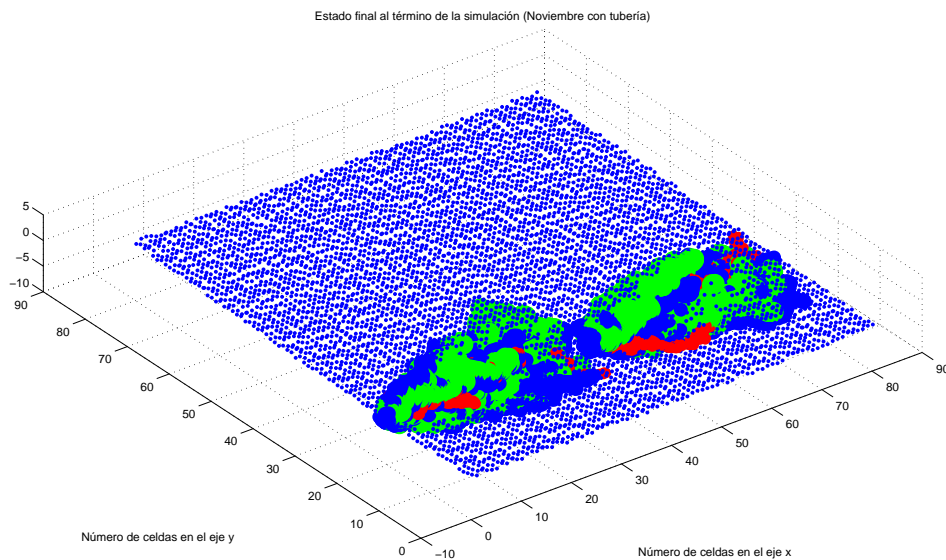


Figura 4.47: Transporte de partículas al final de la simulación para la época de nortes (Noviembre) con tubería

De forma similar al escenario sin tubería, en las figuras (4.48, 4.49 y 4.50) se

representan los perfiles de la concentración con presencia de tubería.

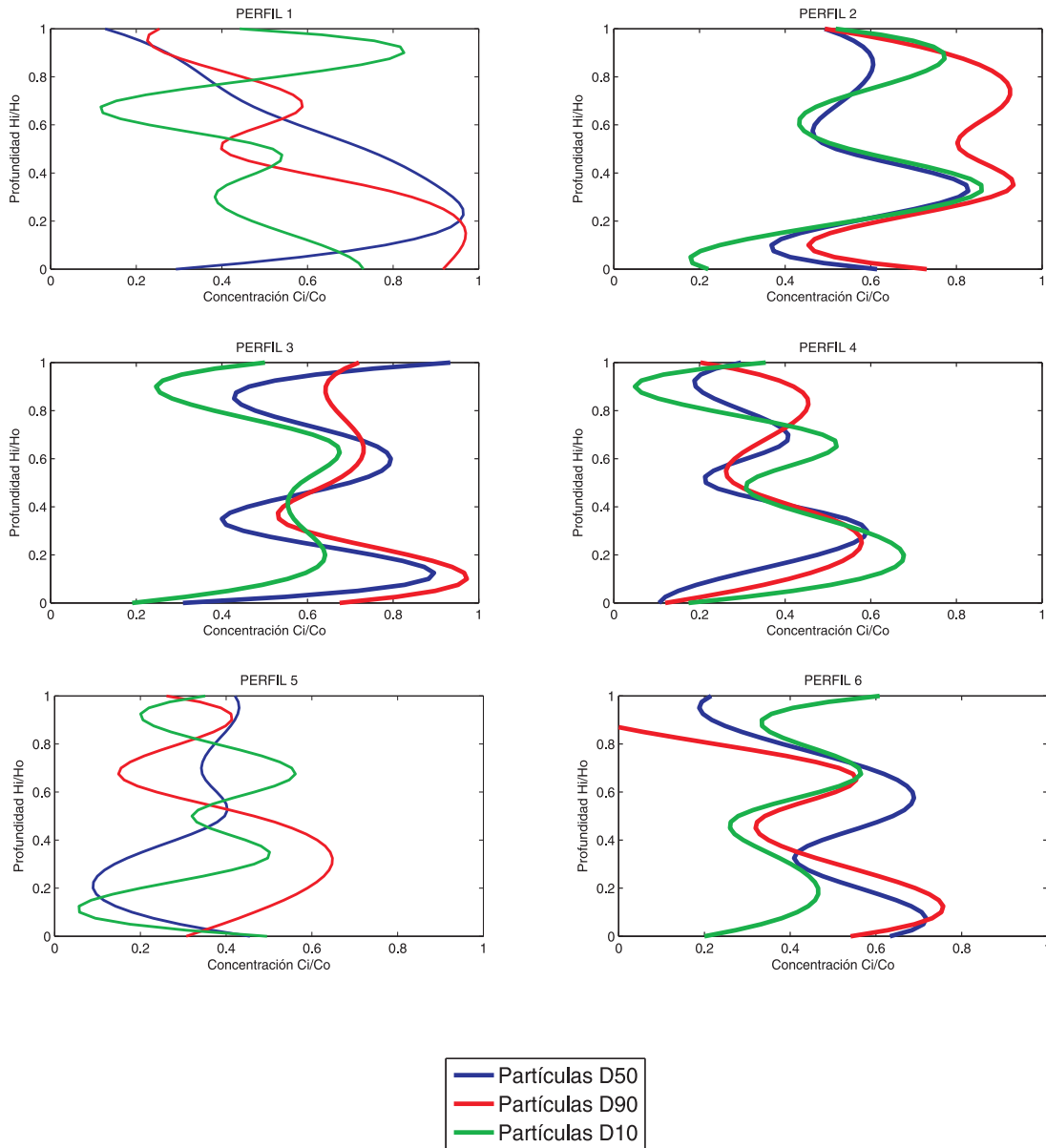


Figura 4.48: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de secas (Abril) con tubería

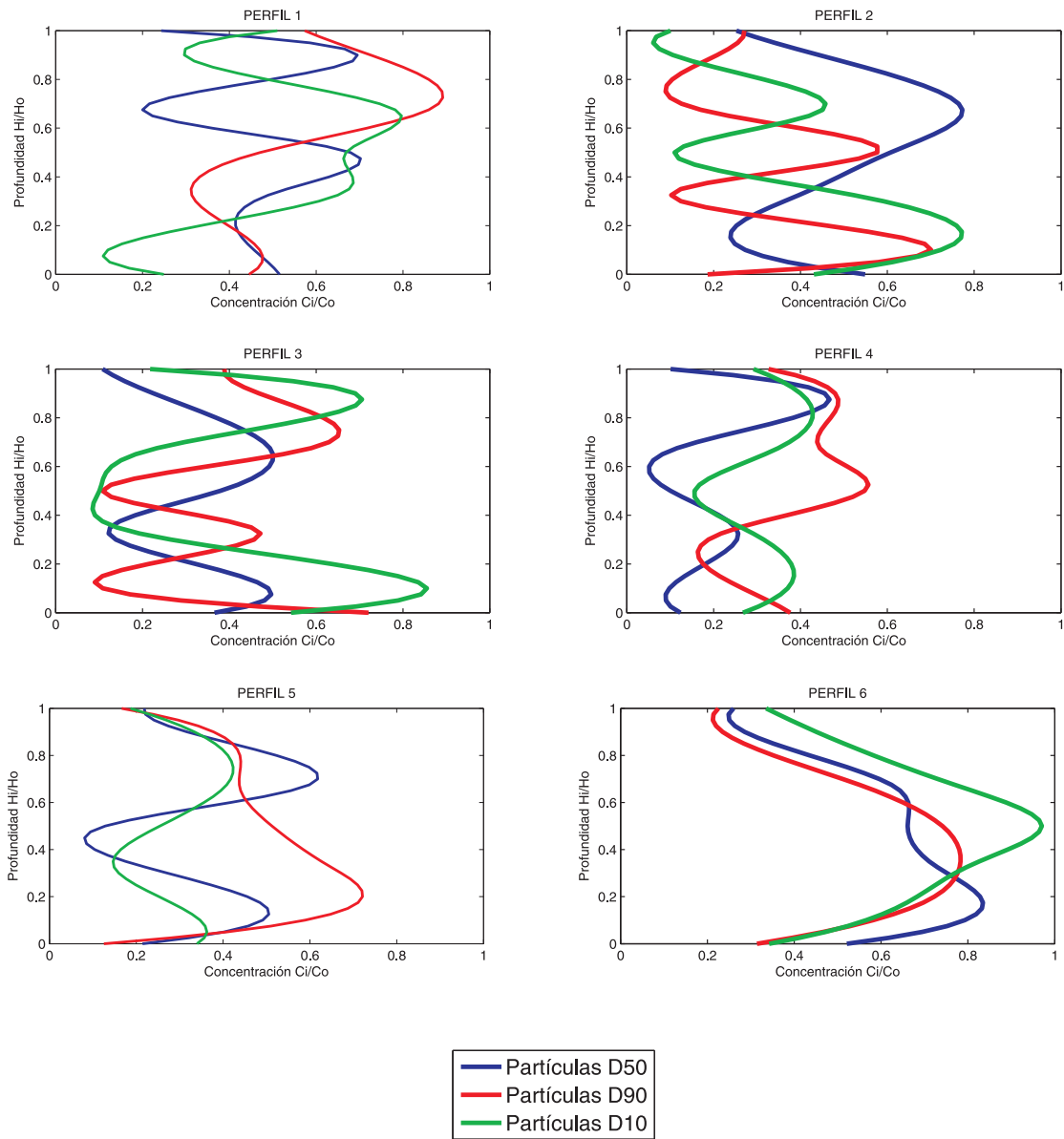


Figura 4.49: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de lluvias (Agosto) con tubería

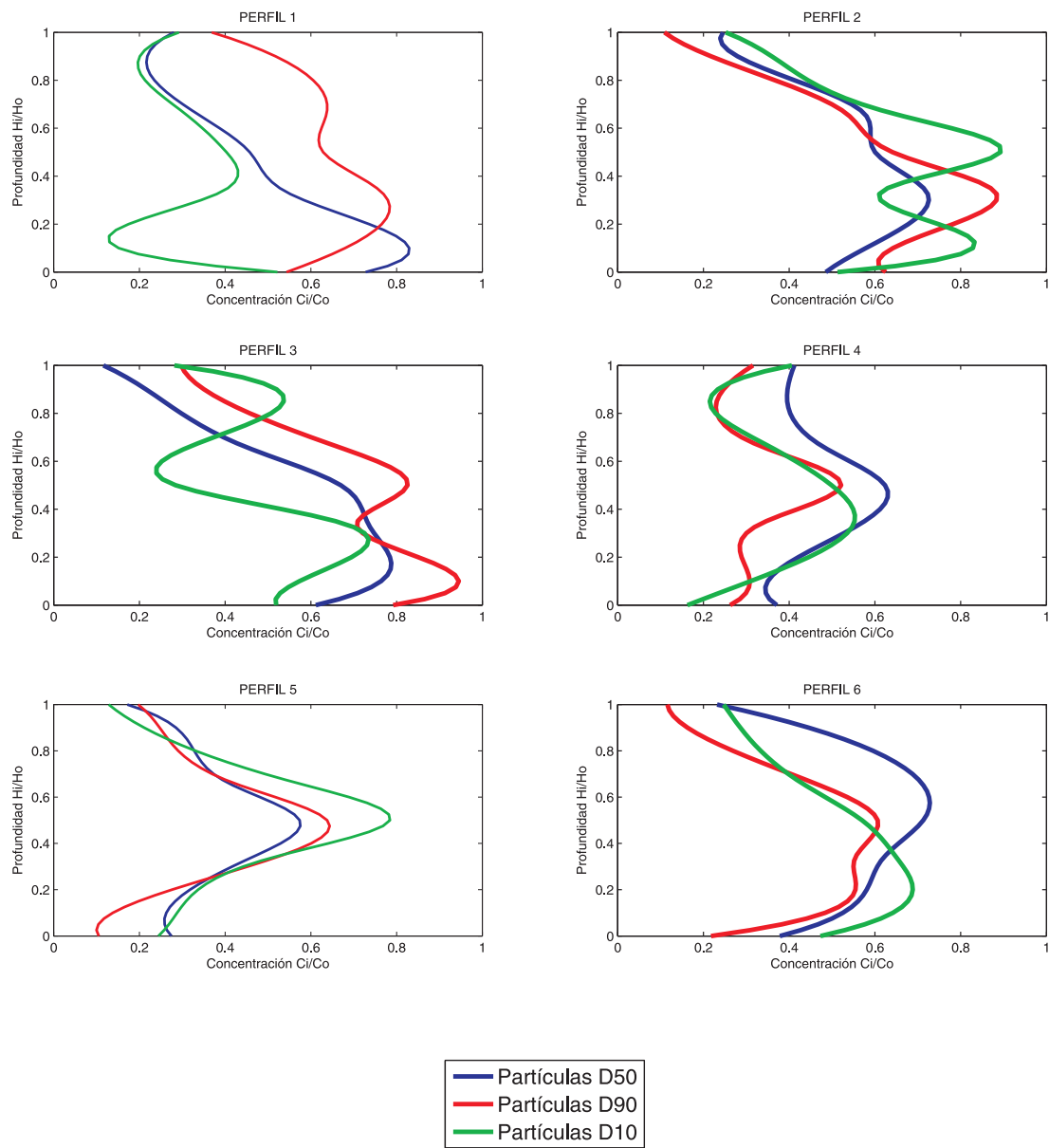


Figura 4.50: Perfiles 1 a 6 adimensionales en columna de aguadel transporte de partículas para la época de nortes (Noviembre) con tubería

4.5.2. Comparación de perfiles antes y después de la tubería

La comparación se realiza con los perfiles 3 y 4 antes y después de colocada la tubería para los 3 escenarios al final de las 720 horas de simulación.

Las figuras (4.51, (4.52 y 4.53) muestra la comparación de los perfiles para las épocas de estudio, donde se estima que la tubería modifica el transporte de sedimentos en columna de agua.

En el perfil 3 se infiere que el transporte de partículas en el fondo es considerable y una parte de ellas viaja en suspensión, cuando pasan por arriba de la tubería, gran parte de ellas sigue en suspensión y una cantidad pasa al fondo donde la concentración de ellas es menor por la obstrucción de la tubería.

La concentración en el perfil 3 se mantiene ligeramente distribuida en el centro, mientras que en el perfil 4 la concentración para los diámetros más finos (D_{50} y D_{90}) se presenta una sedimentación en el fondo y una suspensión temporal del material más grueso.

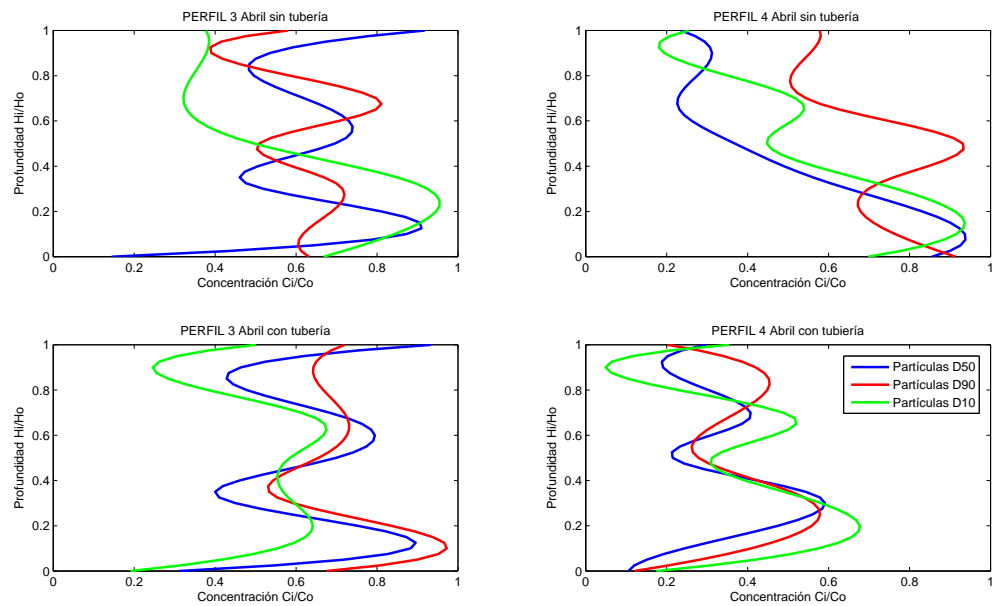


Figura 4.51: Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de secas (Abril) con y sin tubería

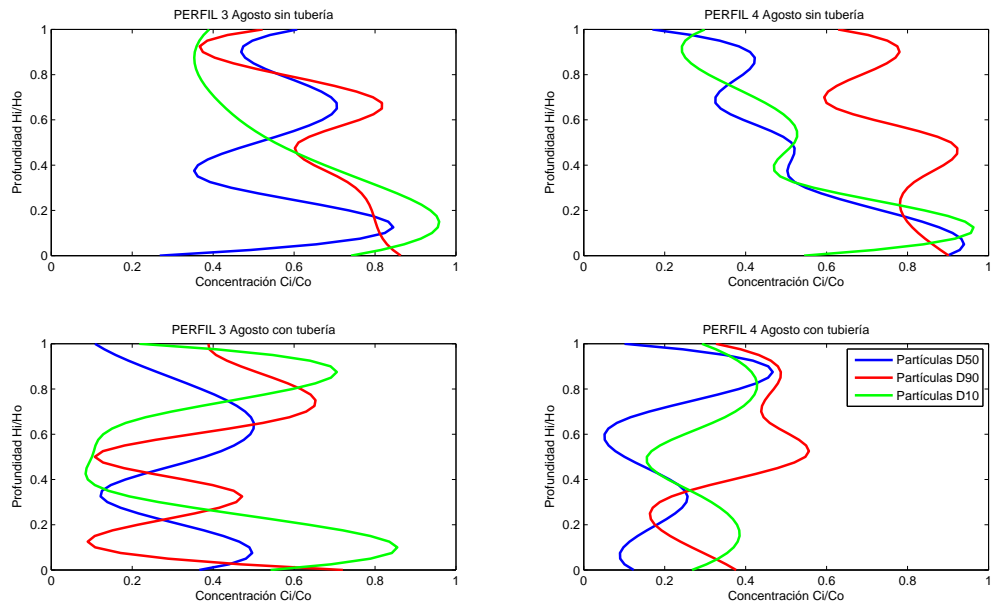


Figura 4.52: Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de lluvias (Agosto) con y sin tubería

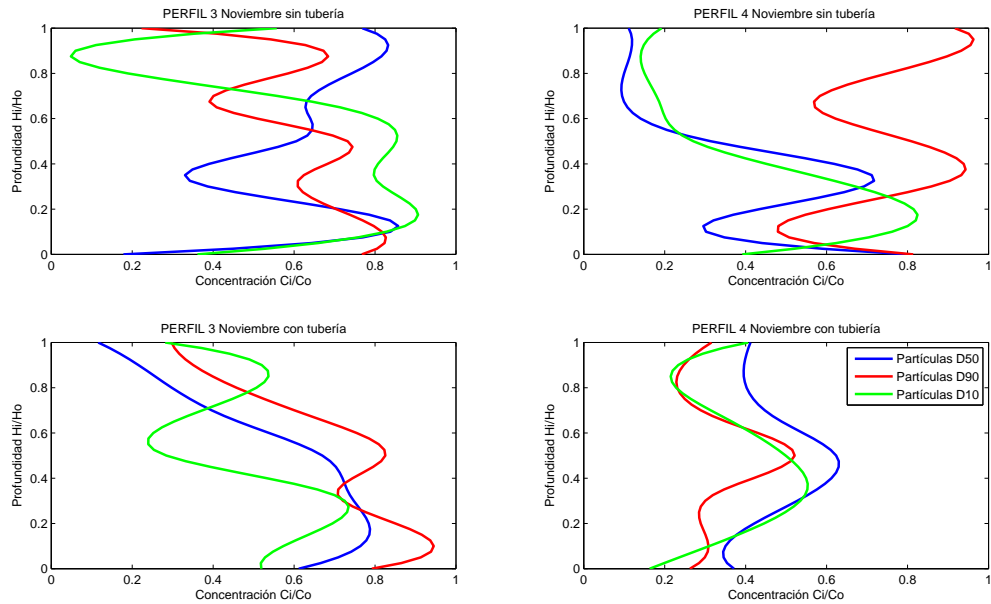


Figura 4.53: Comparación entre los perfiles 3 y 4 para la época de nortes (Noviembre) con y sin tubería

4.6. Modelación del transporte de partículas en zonas aledañas al obstáculo

Como quinto y último paso, se estudia la simulación detallada del transporte de sedimentos para un escenario en particular, se determina la época de nortes correspondiente al mes de Noviembre donde se ha observado que el campo de velocidades que representa la hidrodinámica manifiesta condiciones extremas. Se presenta en todo el dominio de estudio las zonas potencialmente erosionables o en su caso con azolve, así también, se muestran las zonas cercanas a la tubería donde se simula el movimiento de las partículas de fondo obteniéndose curvas del movimiento de las partículas e indicando el balance del número de partículas entrantes y salientes en una sección determinada.

Se ensayan tres condiciones de sedimentación en la tubería y se cuantifica el número de partículas en secciones y áreas determinadas; la primera condición se establece con la tubería parcialmente sedimentada (25 % de cobertura), la segunda con una sedimentación al 50 % de cobertura y la tercer condición con una sedimentación al 75 % de cobertura de la tubería por el sedimento de fondo.

4.6.1. Simulación con sedimentación al 25 % de cobertura de la tubería

Se observa en todo el dominio de estudio el cambio en primera instancia de las zonas potencialmente erosionables (marcadas en color rojo) y las que son propicias a la sedimentación (marcadas en color azul). El balance general entre la zonas erosionadas y las sedimentadas se aprecia en la figura (4.54) donde las zonas de sedimentación poseen un área estimada de 87 %, la zona de erosión un 11 % y el restante 2 % se encuentra en estado de transición.

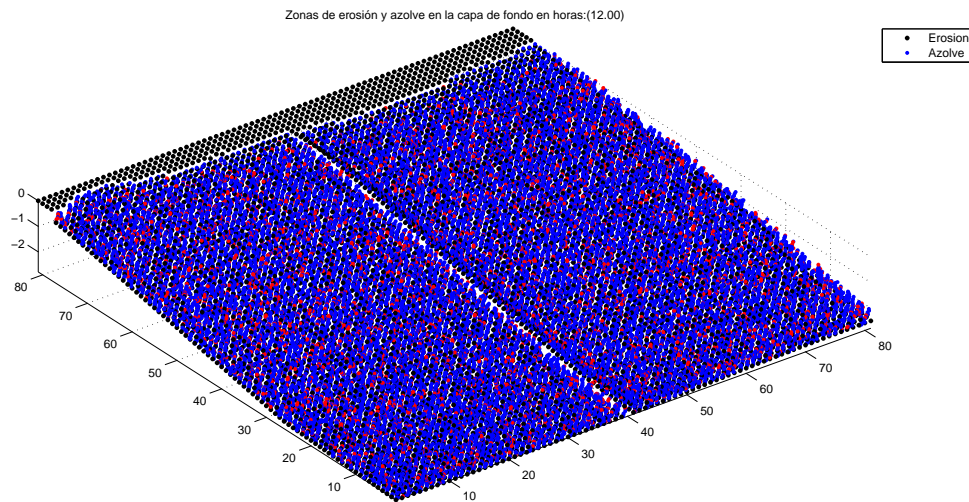


Figura 4.54: Zonas de erosión y depósito con 25 porciento de sedimentación en las primeras 12 horas

Se realiza un corte transversal que pasa a la mitad del dominio de estudio perpendicular a la tubería, el corte tiene una longitud a partir del centro de la tubería hacia cada lado de 10 metros, en la figura (4.55) se aprecia esta sección y se realiza un conteo a detalle del número de partículas que son transportadas en columna de agua durante las primeras 12 horas o 720 minutos.

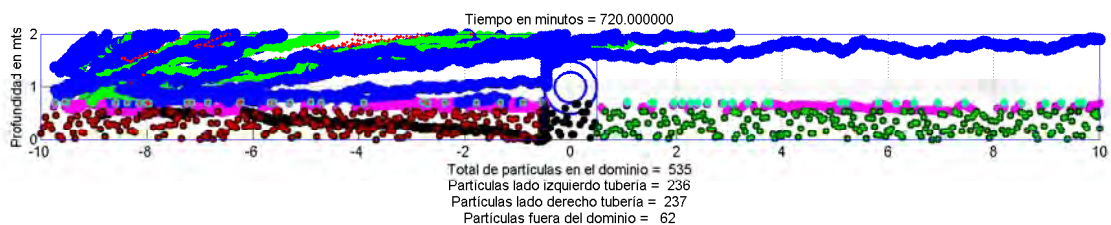


Figura 4.55: Conteo de partículas en la sección transversal con 25 porciento de sedimentación

Se estima que un 11 % de las partículas totales en esta sección se pierden o salen fuera del dominio de estudio. La figura (4.56) muestra las curvas de sedimentación a cada hora durante las primeras 12 horas.

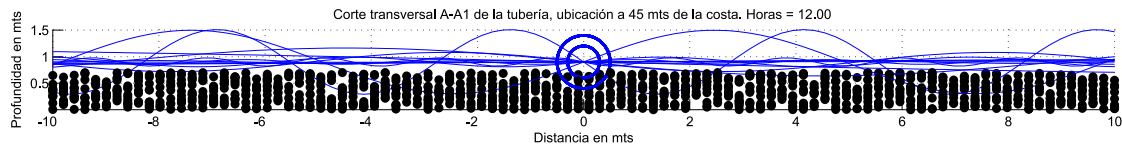


Figura 4.56: Curvas de sedimentación en la sección transversal con 25 por ciento de sedimentación

Las curvas tratan de interpretar el comportamiento de la sedimentación en la sección transversal a cada hora de computo, para su cálculo y graficación, se emplea una segmentaria cúbica para interpolar y suavizar los datos en el lapso antes mencionado.

4.6.2. Simulación con sedimentación al 50 % de cobertura de la tubería

Para la condición de la tubería cubierta en un 50 %, la figura (4.57) muestra los resultados del cálculo de erosión y/o sedimentación del dominio de estudio arrojan que un 76 % presenta sedimentación, la zona de erosión cuenta con un 21 % y que el material que se encuentra en transición es de un 3 % aproximadamente.

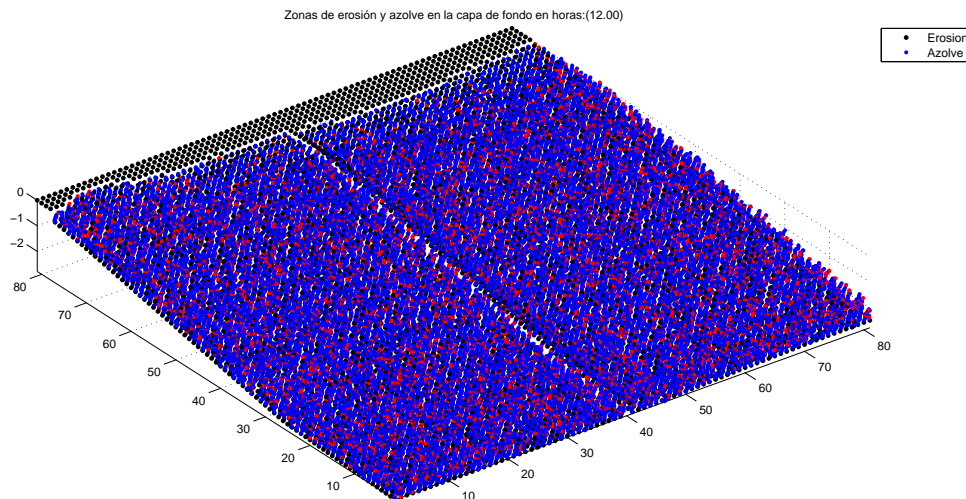


Figura 4.57: Zonas de erosión y depósito con 50 por ciento de sedimentación en las primeras 12 horas

En la figura (4.58) se muestran los resultados de la simulación de la sección transversal, donde el conteo de partículas para esta condición de sedimentación de la tubería muestra un 44 % de partículas para cada lado de la tubería y un 12 % restante de las partículas están fuera del área de conteo; con este 50 % de sedimentación cubriendo la tubería, se alcanza a apreciar que existe mayor continuidad en el movimiento de partículas y la posibilidad de erosión en alguno de los lados de la tubería.

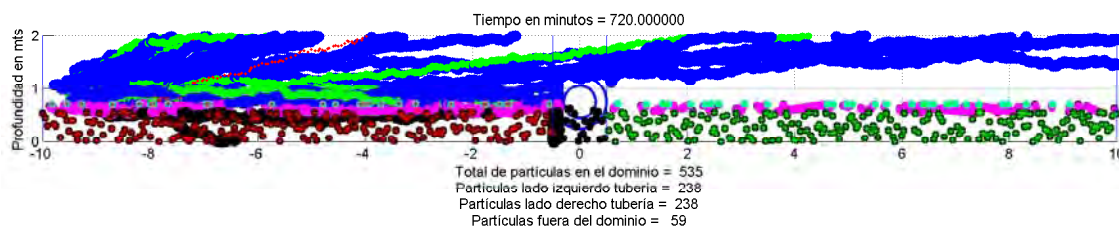


Figura 4.58: Conteo de partículas en la sección transversal con 50 por ciento de sedimentación

La figura (4.59) presenta las curvas de sedimentación para estas condiciones de sedimentación, donde se observa que en el extremo derecho de la tubería se presenta una tendencia a la erosión, esto viene en parte confirmando la situación actual de erosión parical de la zona para esta época del año.

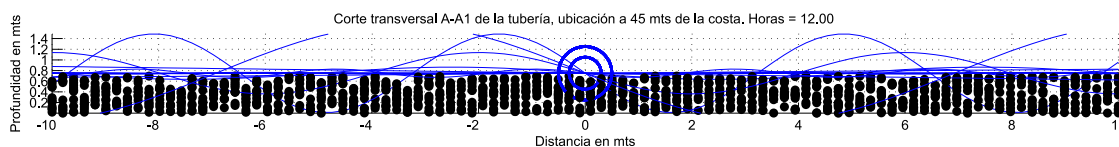


Figura 4.59: Curvas de sedimentación en la sección transversal con 50 por ciento de sedimentación

4.6.3. Simulación con sedimentación al 75 % de cobertura de la tubería

Los resultados se muestran en la figura (4.60), donde se observa que el porcentaje de sedimentación o alzóve disminuye considerablemente alcanzando un 61 %, esta fracción es más notoria en la línea de costa donde se tiene un alzóve más definido; el porcentaje de erosión se estimó en un 34 % y un 5 % para el material que se encuentra en transición.

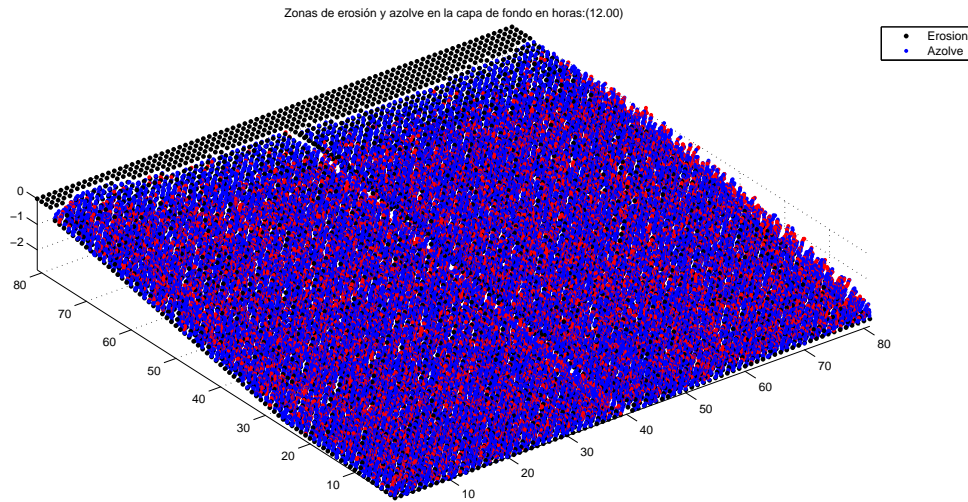


Figura 4.60: Zonas de erosión y depósito con 75 por ciento de sedimentación en las primeras 12 horas

El conteo de partículas en la sección transversal ilustrado por la figura (4.61) indica la existencia de un 44 % del total de partículas en el lado izquierdo que es antes de cruzar la tubería y un 46 % del lado derecho después de cruzar la tubería, esto indica un mayor transporte de sedimentos del lado derecho lo que ocasiona un estado de erosión.

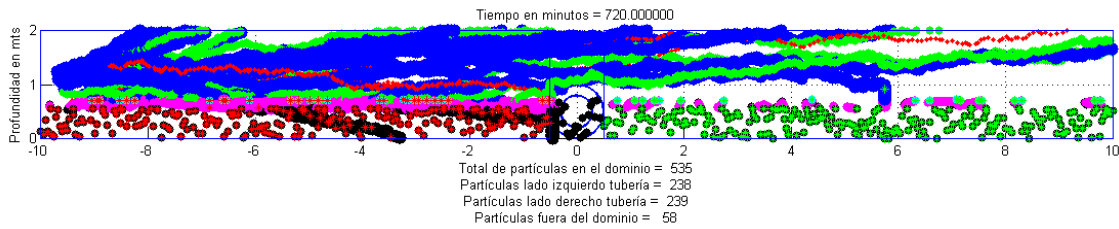


Figura 4.61: Conteo de partículas en la sección transversal con 75 por ciento de sedimentación

Revisando la figura (4.62), en la que se tienen las curvas de sedimentación de la sección transversal, se observa que las curvas ratifican el estado de erosión del lado derecho de la tubería, esto permite estimar que existe un proceso de erosión con un estado de sedimentación de la tubería cubierta hasta un 75 %.

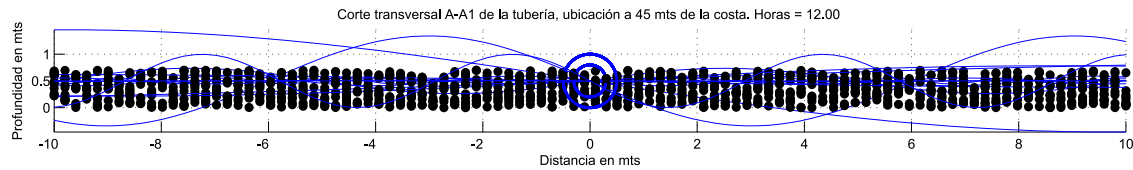


Figura 4.62: Curvas de sedimentación en la sección transversal con 75 por ciento de sedimentación

Por lo tanto, se puede concluir que el dominio de estudio tiene un estado parcialmente sedimentable con una tubería cubierta en un 25 %, y se tiene estado parcialmente erosionable con una tubería cubierta entre un 50 % a un 100 %; así mismo, en lo que respecta al comportamiento de erosión y sedimentación a lo largo de la tubería, las figuras (4.54, 4.57 y 4.60) indican que se tiene una ligera sedimentación sobre la tubería, siendo más notable en la parte inferior del dominio (más profunda).

Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

Referente a los resultados que arroja el caso de aplicación del modelo de transporte lagrangeano de partículas y su acoplamiento al modelo hidrodinámico y de oleaje, podemos establecer las siguientes conclusiones, recomendaciones, aportaciones y perspectivas del trabajo realizado.

Conclusiones

- Se desarrolló un modelo numérico para el estudio de la propagación del oleaje sobre fondo irregular. El modelo ha producido resultados consistentes con casos controlados de literatura y laboratorio; al aplicarlo en la zona costera de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, los resultados del comportamiento del oleaje en altura de ola y dirección son aceptables en comparación con los datos adquiridos *in situ*. Mediante el procedimiento de cálculo se logró reducir significativamente el tiempo de cómputo y la complejidad de la aplicación utilizando matrices dispersas. El modelo es capaz de reproducir los efectos de la reflexión, la difracción y la refracción con buena aproximación para los dominios con celdas no mayores a 10 metros cuadrados.
- El modelo lagrangeano de partículas al ser comparado para reproducir los casos teórico-académicos presenta buenos resultados en su comportamiento, esto es, representa el movimiento y concentración con un error menor del 10 % en comparación a la solución analítica. El método PIC empleado y su transformación discreto-continuo presenta una solución factible, sin

embargo, puede ser mejorada empleando variantes del método SPH ó MPS.

- Los resultados de la simulación de la aplicación del modelo lagrangeano a la zona de estudio conocida como Atasta, muestran que el modelo presenta limitantes, para poder inferir resultados cuantitativos, esto debidos a dos causas; la primera es que debido a la falta de información y su complemento con datos obtenidos mediante análisis estadístico limitan la observación del movimiento de partículas para periodos mayores al tiempo propuesto de simulación; la segunda causa, es debida a la capacidad de cómputo donde se realizo el trabajo, pues limita el tiempo de simulación el cual debe ser mayor a un año para poder observar cambios sustanciales en el fondo que es donde se requiere el empleo de este modelo lagrangiano de partículas. Por consiguiente, concluimos que la aplicación sobre la zona de estudio en particular tiene sentido estrictamente académico, puesto que no se representa un movimiento de partículas significativo que modifique el estado del fondo y si se presenta actividad de erosión y/o azolve.
- Referente al comportamiento de partículas en la zona costera, este se logró determinar con el conteo de partículas en una sección determinada, tomando en cuenta la posición inicial y la final, realizando un balance de partículas entrantes y salientes así como las que se pierden en el transcurso del movimiento; como no se tiene información que corrobore estos resultados, se considera que este comportamiento tiene estricto sentido académico y que puede ser empleado como una técnica de trazador especial, puesto que involucra características del sedimento, otro caso de aplicación es a un contaminante pasivo impregnado a una partícula de sedimento.

Resumiendo, como conclusión general, el resultado de acoplar un modelo euleriano-lagrangiano a un modelo hidrodinámico consideramos fue exitoso, esto debido a que se provó el método de las características de primer y segundo orden para los términos advectivos U y V de las ecuaciones hidrodinámicas, lo que permite entre otras acciones incorporar el modelo de oleaje al hidrodinámico haciendo este más completo para representar los campos de velocidades de zonas costeras donde se presentan procesos de baja y alta frecuencia (mareas y oleaje); permite además extraer las matrices del campo hidrodinámico y sus variables asociadas para cada

instante de tiempo y ser leídas por el modelo lagrangeano de partículas de forma transparente y su posterior aplicación a determinadas zonas con la certeza de obtener una buena aproximación tanto en la hidrodinámica como en el transporte de partículas.

Aportaciones del trabajo

- Los resultados del estudio de la hidrodinámica de la región de estudio (Sonda de Campeche) permiten brindar información básica del campo de velocidades y de otras variables para cada época del año simulado; también se cuentan con los resultados de la hidrodinámica de la zona de estudio (zonas costera de Atasta) que poseen un campo de velocidades en 3D y que permiten realizar pruebas para transportes de escalares, contaminantes, partículas, etc.
- En el ámbito ingenieril, el desarrollo y uso de un módulo de oleaje que no es pesado (en capacidad y almacenamiento) ni sumamente complejo en su entendimiento (programación y solución de las ecuaciones) da oportunidad a ingenieros con poco conocimiento matemático y de programación a ser empleado desde una computadora personal sin muchos requerimientos de procesamiento para observar el comportamiento de la superficie libre por condiciones de propagación de oleaje regular, el cual les brinda información básica necesaria para el diseño de obras de protección o de infraestructura obteniendo, zonas de agitación, alturas de ola máximas, etc., así también de tener la oportunidad de elaborar diseños de obras y probarlos con el modelo para su aprobación o reestructuración. Referente al modelo de partículas, la aportación más significativa es que se puede emplear tanto para observar el patrón del transporte con mayor refinamiento así como del uso de un posible trazador en un medio determinado, donde las propiedades y características físicas del trazador sean de un sólido bien definido.
- Si hablamos desde un punto de vista en innovación tecnológica, el desarrollo de modelos lagrangeanos que son acoplados a otros procesos físicos como oleaje, corrientes, mareas, vientos, variación de densidades y temperaturas todos involucrados en un solo modelo, requiere del empleo de paradigmas

de cómputo como el SPMD, los arreglos distribuidos, el diseño orientado a objetos y el paso de mensajes para la construcción de programas con mayor eficiencia; actualmente se está desarrollando tanto el modelo hidrodinámico como los módulos de oleaje y de partículas con estructuras híbridas (Matlab-Fortran) y su migración al lenguaje CUDA donde los códigos ejecutados son un 33 % más rápido que de forma convencional.

Perspectivas y recomendaciones

- El modelo de oleaje aunque tiene la capacidad de simular oleaje irregular, este no se ha probado ni validado aún; se tiene contemplado su adaptación para recibir datos de oleaje provenientes de aguas profundas con métodos espectrales de modelos de 3era generación.
- En relación al modelo de partículas, por el momento se presenta la oportunidad de continuar desarrollándolo considerando choques elásticos e incorporar el parámetro de floculación a las ecuaciones que rigen su movimiento, por otro lado, se contempla su migración a lenguaje CUDA-MatLab cuyo propósito es elevar el rendimiento de cálculo.

Por último, las recomendaciones acerca de éstos módulos desarrollados son las siguientes:

- Emplear equipo de cómputo con mayor capacidad de procesamiento para realizar simulaciones hidrodinámicas con mayor tiempo de cálculo.
- Para realizar una correcta aplicación en un caso de estudio, se recomienda construir una buena base de datos para realizar simulaciones hidrodinámicas y de transporte de partículas de sedimentos en un periodo no menor de un año.
- Como futuras líneas de investigación, se recomienda estudiar la modelación del transporte de partículas de sedimentos para determinar la erosión y depósito en estructuras sumergidas y sub-sumergidas, así como la modelación del transporte de partículas contaminantes por causas de infraestructura marina en medios costeros.

Bibliografía

- [AC82] M. B. Abbott and J. A. Cunge. *Engineering application of computational hydraulics, Vol.1 Homage to Alexandre Preissmann*. Pitman Advance Publish, 1982.
- [Ber72] J. C. W. Berkhoff. Computation of combined refraction-diffraction. *Int. Conf. on Coastal Eng.*, 13:471–490, 1972.
- [Ber76] J. C. W. Berkhoff. *Mathematical models for simple harmonic linear water wave models; wave refraction and diffraction*. PhD thesis, University of Delft, Holland, 1976.
- [Boo81] N. Booji. A note on the accuracy of the mild-slope equation. *Coastal Engineering*, 7:191–203, 1981.
- [BR96] A. Botello and J. Rosas. *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche, México, 1996.
- [Cam06] C. Campos. Modelación matemática de descargas térmicas en medios marinos. aplicación a la descarga de la central nucleoelectrica laguna verde. Master’s thesis, ESIA, IPN, 2006.
- [CC92] V. Casulli and R. T. Cheng. Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for numerical methods in fluids*, 15:629–648, 1992.
- [CP95] P. Chamberlain and D. Porter. The modified mild-slope equation. *Journal Fluid Mech.*, 29:303–407, 1995.

- [dC05] Universidad de Cantabria. *Modelo de propagación de oleaje monocromático*. Ministro del Medio Ambiente, Dirección General de Costas, España, 2005.
- [DSZ⁺05] Z. Demirbilek, J. Smith, A. Zundel, R. Jones, N. MacDonald, and M. Davies. Particle tracking model (ptm) in the sms. Technical report, Dredging Operations and Engineering Research Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-D5), 2005.
- [Eck52] C. Eckart. The propagation of gravity waves from deep to shallow water. *National Bureau of Standards*, 20:165–173, 1952.
- [Fis81] H. Fischer. *Transport models for inland and coastal waters*. Academic Press, 1981.
- [Fue96] O. Fuentes. *Propagación del oleaje en la proximidad de la costa*. PhD thesis, DEPFI, UNAM, 1996.
- [GAHL04] J.A. García, F. Arreguín, S. Hernández, and D. Lluch. Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de campeche, méxico, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia Association*, 2004.
- [GM77] R. Gingold and J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol.181*, pages 375–389, 1977.
- [GRD⁺07] M.G. Gesteria, B.D. Rogers, R.A. Dalrymple, A.J.C. Crespo, and M. Narayanaswamy. User guide for the shphysics code. Technical report, Office of Naval Research, Geosciences Program, Galicia Spain, 2007.
- [Her03] I. Hernandez. Modelos euleriano-lagrangeanos en flujos a superficie libre: Aplicación al transporte de partículas suspendidas y al crecimiento de microorganismos. Master’s thesis, DEPFI, UNAM, 2003.
- [Her04] E. Herrera. Dinámica y modelación de los sedimentos en la desembocadura del río grijalva. Master’s thesis, ESIA, IPN, 2004.

- [Hol85] F. Holly. *Dispersion in rivers and coastal waters, Chapter 1*. Novak, Elsevier London, 1985.
- [HRCC09] E. Herrera, H. Ramírez, C. Couder, and I. Campos. Numerical modeling of wave phenomena (refraction-diffraction) applied to breakwaters of the cooling water intake of laguna verde nuclear power plant in veracruz, mexico. *Numerical Modeling of coupled phenomena in science and engineering, Vol. 1, Chap 12*, pages 155–163, 2009.
- [Kir83] J. T. Kirby. *Propagation of weakly-nonlinear surface water waves in regions with varying depth and current*. PhD thesis, Univ. of Delaware, Newark, 1983.
- [KO96] S. Koshizuka and Y. Oka. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering, Vol. 123*, pages 421–434, 1996.
- [Kou88] C. Koutitas. *Mathematical Models in Coastal Engineering*. Pentech Press, 1988.
- [LA92] B. Li and K. Anastasiou. Efficient elliptic solvers for the mild-slope equation using the multigrid technique. *Applied Ocean Research.*, 13:245–266, 1992.
- [Lee71] J. J. Lee. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry. *J. Fluid Mech.*, 45:375–394, 1971.
- [Los00] J. Losada. Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria. Technical report, Grupo de Ingenieros Oceanográficos y de la Costa, España, 2000.
- [LS62] M. S. Longuet and C. Stewart. The refraction of sea waves in shallow water. *Journal Fluid Mech.*, 2:163–176, 1962.
- [LS92] J. Luettich, A. Jr. and Westerink and W. Scheffner. Adcirc: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries. Technical report, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS, 1992.

- [Luc77] L. Lucy. A numerical approach to the testing of fusion process. *Astronomical Journal.*, Vol. 82, pages 1013–1024, 1977.
- [Luk67] J. C. Luke. A variational principle for a fluid with a free surface. *J. of Fluid Mech.*, 27:395–397, 1967.
- [Mas93] S. R. Maseel. Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19:97–126, 1993.
- [MB07] M. A. Moreles and S. Botello. *Notas de Modelación y Métodos Numéricos I*. CIMAT y CIMNE, 2007.
- [MMLH97] J. Maa, M. H. Maa, C. Li, and Q. He. Using the gaussian elimination method for large banded matrix equations. Technical report, Special scientific report Num 135, Virginia Inst. of Marine Science, 1997.
- [Mon94] J. Monaghan. Simulating free surface flows with sph. *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pages 399–406, 1994.
- [PE02] R. Perriñez and A. J. Elliott. A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 58:13–33, 2002.
- [PP91] V. Panchang and B. Pearce. Solution of mild-slope wave problem by iteration. *Applied Ocean Research.*, 13:187–200, 1991.
- [Pro83] Proc. XX IAHR Congress, Moscow. *Surf-zone turbulence*, 1983.
- [Pro86] Proc. 33rd Japan Conference on Coastal Engineering. *Modelling of diffusion coefficient in the surf zone based on the physical process of wave breaking*, 1986.
- [Pro97] Proc. XVII IAHR Congress. Sn Fco. *GMRES solution of mild-slope equation on quadtree grids*, 1997.
- [Pro98] Proc. Hydroinformatics, V. Babovic and L. C. Larsen ed., A. A. Balkema, Rotterdam. *Automatic definition of two-dimensional coastal finite element domains*, 1998.

- [Pro09] Proc. of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). *Lagrangian Particle Method - Advanced Technology for Numerical Wave Flume-*, 2009.
- [Rad79] A. Radder. On the parabolic equation method for water-wave propagation. *J. of Fluid Mech.*, 95:159–176, 1979.
- [RMM07] M. Robinson, J. Monaghan, and J. Mansour. Dns sph simulation of 2d wall-bounded turbulence. *SPHERIC, Smoothed Particle Hydrodynamics European Research Interest Community, Second International Workshop*, pages 107–110, 2007.
- [Rod07] C. Rodríguez. *Modélisation Numérique des Courants Oceaniques. Application a la région du Golfe du Mexique*. PhD thesis, UNIVERSITE PAUL CEZANNE AIX-MARSEILLE III, 2007.
- [RRH05] H. Ramírez, C. Rodriguez, and E. Herrera. Multilayer hydrodynamic model and their application to sediment transport in estuaries. *Special Issue Shangai Conference, Springer-Verlag*, May, 2005.
- [Shi36] A. Shields. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Technical report, PVWES, Berlin., 1936.
- [SII90] N. Sato, M. Isobe, and T. Izumiya. A numerical model for calculating wave height distribution in a harbor of arbitrary shape. *Coastal Engineering in Japan*, 32:119–132, 1990.
- [SL03] S. Shao and E. Lo. Incompressible sph method for simulating newtonian and non-newtonian flows with a free surface. *Advance in Water Resources, Vol. 26, No 7*, pages 787–800, 2003.
- [SMRA02] J.P. Sierra, M. Mestres, A. Rodríguez, and A.S. Arcilla. A lagrangian 3d numerical model of pollutant dispersion in coastal waters. *Environmental Coastal Regions*, pages 331–340, 2002.
- [SMV⁺05] D.A. Salas, M.A. Monreal, H. Velasco, M.A. Díaz, I.S. Rosales, M.L. Riverón, and G. Expósito. Evaluación de los efectos de las actividades

- petroleras costa afuera e instalaciones costeras asociadas en el ambiente marino de la sonda de campeche fase ii (etapa final). Technical report, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 2005.
- [SS75] R. Smith and T. Sprinks. Scattering of surface waves by a conical island. *Journal Fluid Mech.*, 72:373–384, 1975.
- [SSR01] M. Smith, R. Sherlock, and T. Resio. Stwave: Steady-state spectral wave model: User’s manual for stwave version 3.0. Technical report, Supplemental Report (ERDC/CHL SR-01-1), US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS., 2001.
- [TL83] T. K. Tsay and P. L. Liu. Numerical solution of water-wave refraction and diffraction problems in the parabolic approximation. *J. of Geophysical Research*, 87:7932–7940, 1983.
- [TMB⁺10] V. Torres, A. Márquez, A. Bolongaro, J. Chavarria, G. Expósito, and E. Márquez. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado campeche debidos a efectos del cambio climático. *Vulnerabilidad en las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, pages 325–344, 2010.
- [UM73] U. Unluate and C. C. Mei. Long wave excitation in harbors an analytical study. Technical report, Rep. Num 171, Parsons Lab. MIT, Cambridge, Mass., 1973.
- [UNA10a] UNAM. Estudio de factibilidad del icmyl-unnam para pemex explotación y producción. Technical report, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 2010.
- [UNA10b] UNAM. Medición y análisis de variables oceanográficas y meteorológicas para revisar diseños de obras de protección para las instalaciones de pemex en el litoral de tabasco. Technical report, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 2010.
- [UNE81a] UNESCO. Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980. Technical report, UNESCO Tech. Papers in Marine Sci. N° 38, 1981.

-
- [UNE81b] UNESCO. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Technical report, UNESCO Tech. Papers in Marine Sci. N° 36, 1981.
- [vR93] L. C. van Rijn. *Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, 1993.
- [WB85] C. R. Wylie and L. C. Barrett. *Advanced engineering mathematics*. Mc Graw Hill, 1985.
- [Wor04] World Water and Environmental Resources Congress. *A generic format for multi-dimensional models*, 2004.
- [ZA96] Y. Zhao and K. Anastasiou. Modeling of wave propagation in the near shore region using the mild-slope equation with gmres-based iterative solvers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23:397–441, 1996.
- [ZdBRH10] J. Zavala, R. de Buen, R. Romero, and F. Hernández. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. *Vulnerabilidad en las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, pages 249–267, 2010.

Apéndice A

Aplicación del módulo de oleaje a las obras de protección de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Edo. de Veracruz, México

La aplicación se efectúa en la zona costera de las obras de protección de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV) la cual se localiza en la costa Nororiental del Estado de Veracruz, México, en los $19^{\circ}43'30''$ N y $69^{\circ}43'09''$ W, sobre la costa del Golfo de México (fig. A.1).

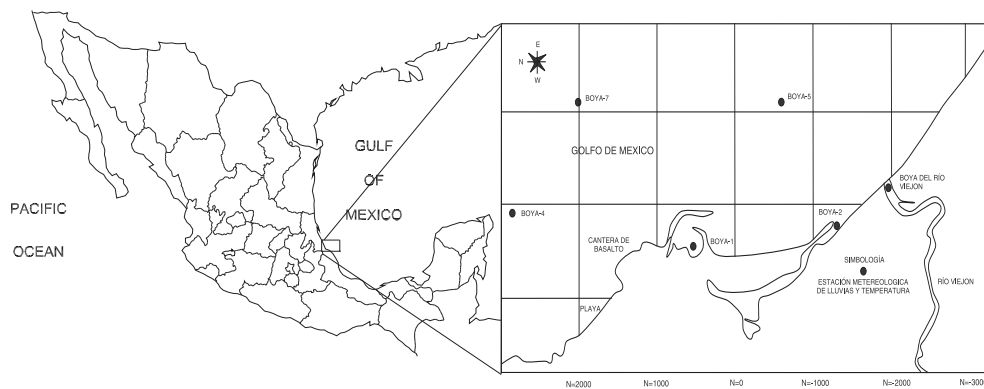


Figura A.1: Localización de la Central

La zona de estudio presenta una batimetría con pendiente suave, el dominio abarca un área aproximada de 11.7 km^2 , con una longitud de $42,000 \text{ m}$ en la dirección “x” y de $3,500 \text{ m}$ en la dirección “y”. La descarga se localiza a $1,800 \text{ m}$ de la obra de toma superficial y a $2,200 \text{ m}$ de la toma submarina, aproximadamente. A 800 m al Sur del canal de descarga se ubica la desembocadura del río El Viejón.

A.1. Problemática principal

La descarga del agua del sistema de enfriamiento de esta central se realiza a través de un canal, el cual conduce un gasto de $63 \text{ m}^3/\text{s}$ con una velocidad media aproximada de 1.4 m/s ., el canal desemboca al mar. El sistema de enfriamiento de la CNLV es de tipo abierto, actualmente su obra de toma es superficial la cual cuenta con dos escolleras (fig. A.1); esta obra de toma presenta serios problemas de azolve y de recirculación de agua caliente.

El gasto de suministro del sistema de enfriamiento, que pasa a través de los condensadores se descarga a la Laguna Salada, de la cual mediante un canal se conduce y descarga al mar, dicho gasto va con un incremento de temperatura de 8 a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Se ha percibido que dicha descarga con un incremento de temperatura es captada por el sistema de enfriamiento lo que ocasiona deficiencia en el enfriamiento de la CNLV.

El mallado del dominio (fig. A.2) esta construido con un total de $5,896$ celdas con $\Delta x = \Delta y = 250 \text{ m}$.

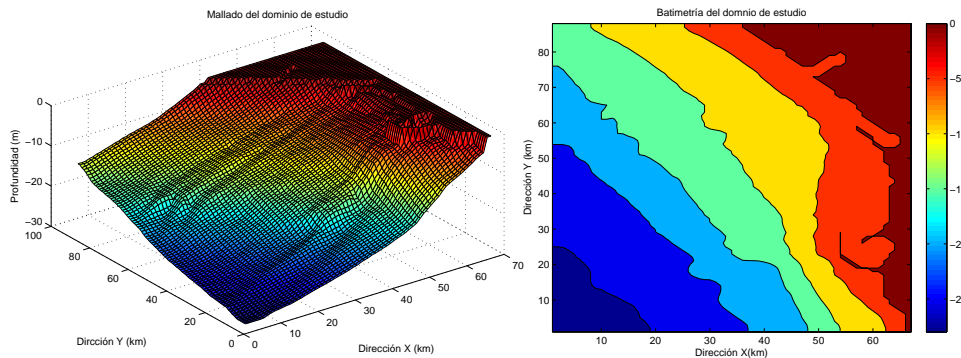


Figura A.2: Malla y batimetría de la zona costera de la CNLV

A.2. Resultados de la simulación

Para este escenario la descarga del río El Viejón es de $6.09 \text{ m}^3/\text{s}$, con una temperatura constante de 25°C . De acuerdo a la información oceanográfica, existe una forzante de corrientes marinas cuya intensidad es de 0.1 m/s con dirección de Sur a Norte. Se considera la variación de la superficie libre del mar producido por la marea. También existe la forzante producida por el viento, a 10 m sobre la superficie. De acuerdo a la información de la CNLV en el canal de descarga la temperatura máxima para esta época es de 44°C , misma con la cual se inyecta en la simulación. La temperatura media del mar, para el periodo de $1994 - 2003$, es de 28°C . La salinidad se inicializó para todo el dominio con 33 ups . Los parámetros

del oleaje tomados para esta primera simulación (fig. A.3) son: la altura se toma la ola máxima promedio de 1.35 m , el periodo signficante promedio es de 6.16 s y dirección del oleaje más frecuente que se presenta es NE (82.07°).

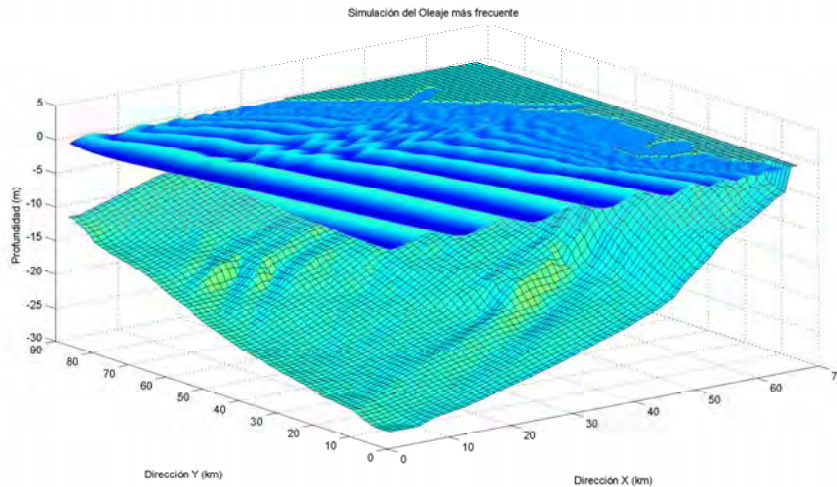


Figura A.3: Simulación del oleaje con dirección de incidencia de NE

En la figura (A.3) se muestran los resultados obtenidos para el sistema en estudio, apreciando la refracción del oleaje conforme se acerca a la línea de costa por efectos de la configuración del fondo.

A.2.1. Simulaciones dentro de las obras de protección

El estudio a detalle del comportamiento del oleaje y su circulación dentro de las obras de protección es de suma importancia en aspectos de sedimentación, recirculación y proliferación de vida (moluscos, conchas, almejas, etc.), esto es, conocer qué tan viable es que se presente el transporte de sedimentos dentro del recinto ó el crecimiento de vida marina en exceso, lo que puede ocasionar un azolvamiento u obstrucción en el área de la obra de toma, reduciendo así su capacidad de almacenamiento para el sistema de enfriamiento.

Por lo tanto, se genera un modelo de submalla de la zona de estudio, en la figura (A.4) se hace un refinamiento de la zona donde se localizan las obras de protección de la CNLV, con un total de 600 celdas con $\Delta x = \Delta y = 5$ m. tomando como condiciones iniciales los valores de la superficie libre sobre aquellas celdas que se localizen en la zona más profunda de la submalla.

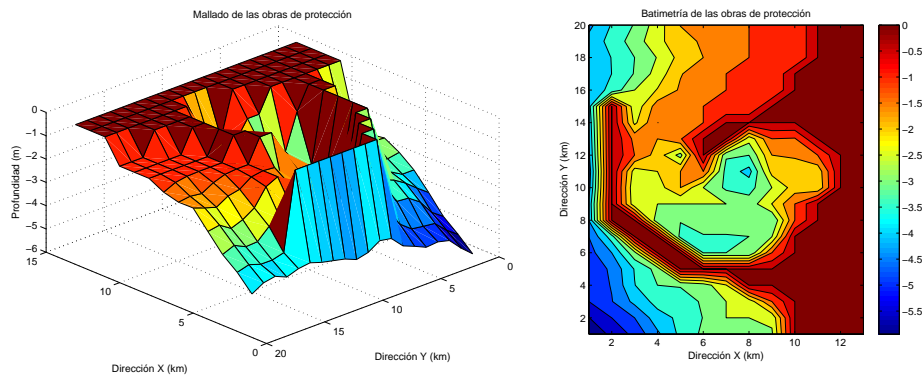


Figura A.4: Malla y batimetría de las obras de protección de la CNLV

Como primer instancia, se propone un escenario donde las obras de protección sean figuras geométricas idealizadas, esto es, un sistema controlado para la representación de los fenómenos del oleaje o más apegado a la forma y localización de las estructuras reales para observar el comportamiento de la propagación del oleaje.

Los resultados se presentan en la figura (A.5) obteniendo una agitación y patrones de circulación bien definidos para distintos tiempos de simulación, en la parte superior derecha se localiza la obra de toma y se aprecia que los fenómenos de difracción y reflexión representados en la altura de ola en esa zona son mitigados por las estructuras.

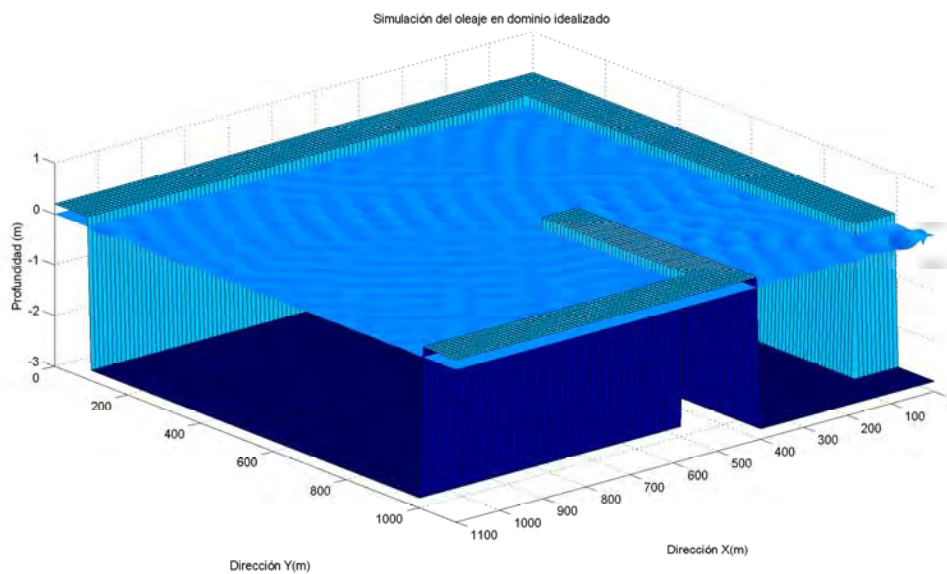


Figura A.5: Simulación del oleaje incidente sobre las estructuras de protección idealizadas de CNLV

Posteriormente en la figura (A.6), se presenta el comportamiento de la superficie libre con una vista en planta para diferentes instantes de tiempo hasta que el modelo presenta un estado estacionario dentro de las obras de protección.

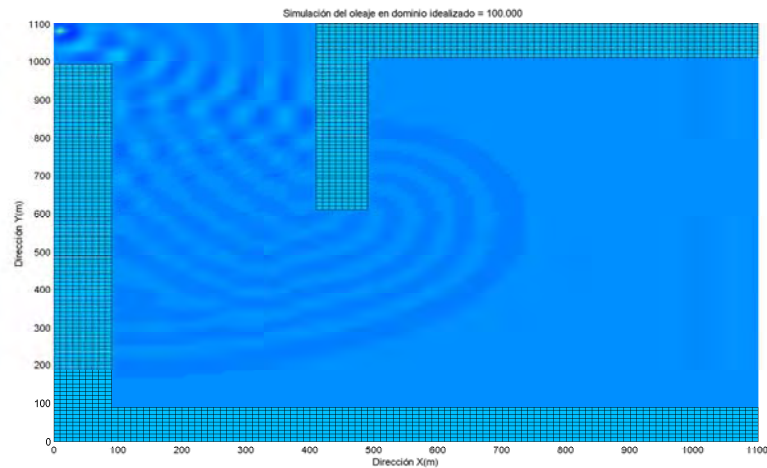


Figura A.6: Simulación del oleaje incidente sobre las estructuras en diferentes instantes de tiempo

Una vez realizado la modelación del escenario controlado, cuyos resultados muestran el patrón de circulación bien definido, se realizó la modelación con la batimetría real obteniendo las alturas de ola dentro del recinto, en las figuras (A.7) y (A.8) se presentan los resultados de la simulación del oleaje más frecuente.

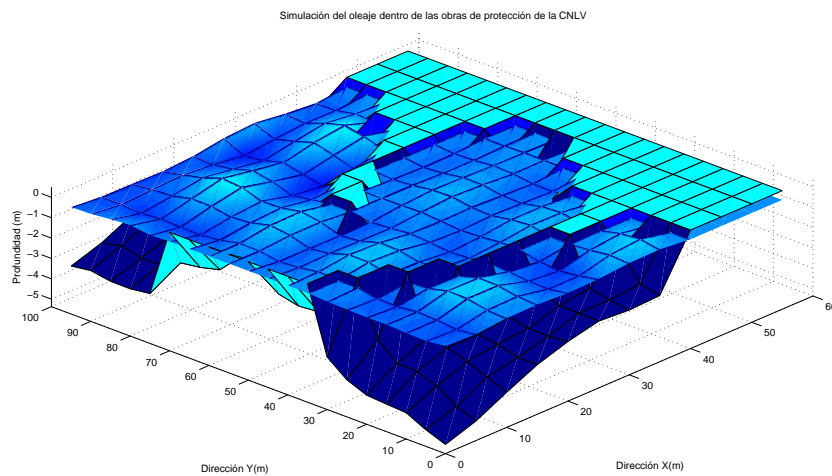


Figura A.7: Simulación del oleaje dentro de las obras de protección de la CNLV

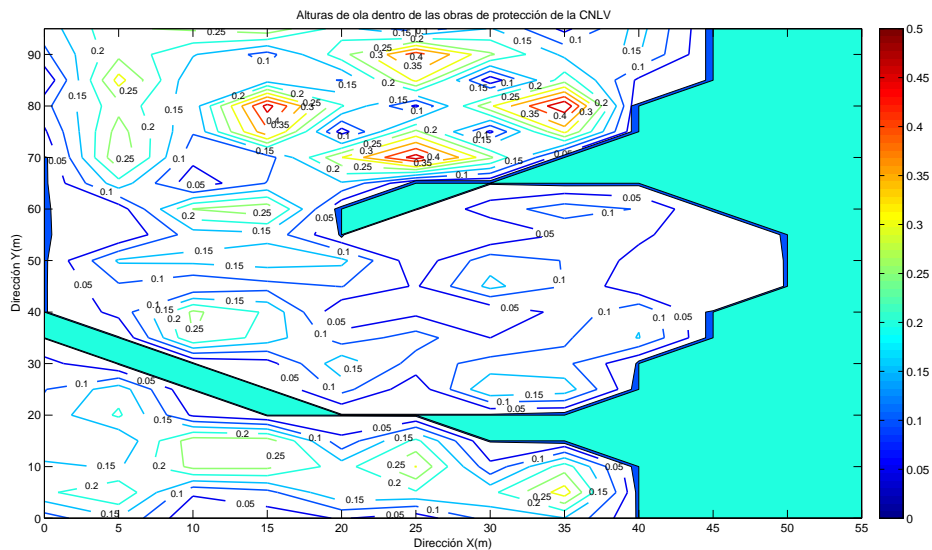


Figura A.8: Alturas de ola dentro de las obras de protección de la CNLV

Como se puede apreciar en la figura (A.8) , la altura del oleaje incidente dentro de las obras de protección es mínima, solo una pequeña agitación en la superficie libre (de 0.05 a 0.1 metros); este resultado concuerda con el promedio de los datos medidos en la obra de toma (Campos, 2006) [Cam06].

Apéndice B

Vulnerabilidad actual en la zona costera de Tabasco y Campeche debido a las anomalías climáticas actuales

La zona litoral de las regiones costeras es la zona donde se manifiestan los mayores efectos de los procesos marinos. Efectos como el cambio de la morfología de costas, los procesos de erosión y de crecimiento de playas son bastante notorios en diversas escalas geográficas y de tiempo.

Los procesos costeros que afectan al litoral ocurren en escalas de tiempo que varían desde instantes (horas) hasta intervalos geológicos (miles o más años). La comprensión de estos procesos requiere del estudio de la dinámica que domina y controla la zona litoral y es necesario considerar todas las escalas y distinguir la combinación de aquellos más relevantes que se presentan.

Los cambios morfológicos a lo largo de los litorales se pueden apreciar por la acumulación de arenas formando playas extensas de pendientes suaves, acompañadas de dunas, tómbolos, lengüetas, barreras, o bien, por los procesos de erosión o remoción de las arenas exponiendo sustratos rocosos, formando cavernas, farallones, puntas y playas angostas de pendientes fuertes la mayoría de las veces, con materiales gruesos de arena y gravas.

Los procesos que gobiernan la dinámica litoral como la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía causados por el oleaje y corrientes causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo las épocas de lluvias y nortes donde los cambios son más intensos principalmente por la frecuencia e intensidad de los oleajes. Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen vías de

comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc. en su parte continental, hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina alterando el transporte litoral y la morfología de la playa.

Si bien existe la percepción de que han ocurrido cambios topográficos importantes en la zona del litoral de Campeche, la cuantificación de los mismos es tarea que se ha empezado a realizar recientemente. Aunque existen trabajos que expresan algunas estimaciones de procesos de erosión y acreción en playas de Tabasco y Campeche, el presente anexo tiene el objetivo de mostrar la magnitud de los cambios en la morfología costera, en función de imágenes satelitales, fotografías aéreas, levantamientos topográficos y batimétricos, análisis granulométricos, descargas fluviales, meteorología y clima marítimo, así como presentar el caso de la macropera de los pozos Tizón 222 y 236 localizados en la cercanía del puerto de Dos Bocas donde se identifican las áreas vulnerables y de riesgo a la erosión y las posibles soluciones que se han empleado en la zona. Se hace énfasis en este sitio por su importancia para la industria petrolera y es justamente donde se centra la investigación de este trabajo.

B.1. Procesos de erosión y acreción de zonas costeras

B.1.1. Evolución histórica de la línea de costa

Prácticamente todo el litoral de Campeche se encuentra en proceso de erosión, incluyendo la zona de Playa Norte de la Isla del Carmen en la que aparentemente existen terrenos ganados al mar.

El proceso de erosión dominante se alterna con episodios de acreción en algunas playas. La dinámica costera obedece a los ciclos climáticos de la región. Así durante la temporada de secas generalmente se estabilizan las playas, para reiniciar el proceso de erosión durante las lluvias y nortes. Pero es precisamente en la temporada de nortes en la que ocurren los episodios de erosión más severos, con eventos de avance de la línea de costa de hasta 14 metros en un solo evento. En la figura (B.1) se presenta toda la zona de estudio de las costas de Tabasco y Campeche y en la figura (B.2) se muestran los sitios de erosión y erosión/acreción característicos de la zona de estudio (Torres, 2010)[TMB⁺10].



Figura B.1: Imagen de satélite de la zona de estudio que abarca las costas de los Estados de Tabasco y Campeche



Figura B.2: Ubicación de las playas donde se efectúan los estudios y mediciones de erosión/acresión en los Estados de Tabasco y Campeche

En el cuadro (B.1) se muestra un resumen del avance de la línea de costa du-

Vulnerabilidad actual en la zona costera de Tabasco y Campeche debido 122 a las anomalías climáticas actuales

rante el periodo 1974 a 2008 determinado a partir de la vectorización de imágenes satelitales y de fotografías aéreas georeferenciadas. Posteriormente, en el cuadro (B.2) se muestra los valores de erosión de los sitios característicos de Tabasco y Campeche.

Cuadro B.1: Desplazamiento neto de la línea de costa en localidades del Estado de Campeche durante el periodo 1974 a 2008 (Torres *et al*, 2010)

<i>Id</i>	<i>Sitio</i>	<i>Periodo</i>	<i>Intervalo (años)</i>	<i>Desplazamiento total (m)</i>
1	Sn Pedro Sn Pablo	1974-2006	32	-154.80
2	Nitrogenoducto	1974-2004	30	-21.20
3	Atasta	1974-2008	34	-487.70
4	Punta Disciplina	1974-2005	31	-216.80
5	Playa Norte	1974-2005	31	-8.10
6	Club de Playa	1974-2007	33	-171.10
7	Cases	1974-2007	33	-117.70
8	Isla Aguda	1974-2005	31	-5.70
9	Sabancuy	1974-2005	31	-211.20
10	Punta de Xen	1974-2002	28	-124.60
11	Champotón	1974-2006	30	-77.20

Cuadro B.2: Tasa de erosión costera en el Estado de Campeche, periodo 1974 a 2008 (Torres *et al*, 2010)

<i>Id</i>	<i>Sitio</i>	<i>Periodo</i>	<i>Intervalo (años)</i>	<i>Tasa de erosión (m/año)</i>
1	Sn Pedro Sn Pablo	1974-2006	32	-4.80
2	Nitrogenoducto	1974-2004	30	-0.70
3	Atasta	1974-2008	34	-14.30
4	Punta Disciplina	1974-2005	31	-7.00
5	Playa Norte	1974-2005	31	-0.30
6	Club de Playa	1974-2007	33	-5.20
7	Cases	1974-2007	33	-3.60
8	Isla Aguda	1974-2005	31	-0.20
9	Sabancuy	1974-2005	31	-6.80
10	Punta de Xen	1974-2002	28	-4.40
11	Champotón	1974-2006	30	-2.40

De los sitios mostrados en el cuadro (B.2) se presentan aquellos que muestran erosión y erosión/acresión (fig. B.3) (Torres, 2010)[TMB⁺10]; de estos sitios, hacemos incapié en su revisión y presentación de resultados de los lugares 3 y 4 que

corresponden a las zonas de Atasta y Punta Disciplinas, entre las cuales esta localizada la zona de estudio de este trabajo.

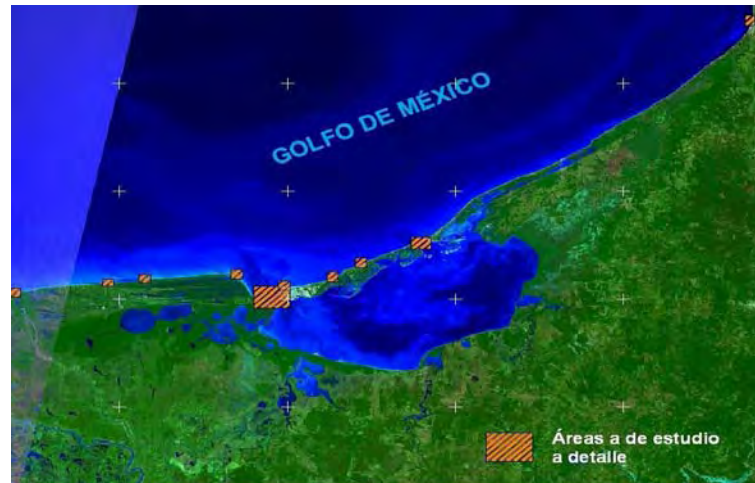


Figura B.3: Ubicación de las zonas o playas de estudio de erosión/acresión a detalle

B.1.2. Zonas con erosión continua (transgresión marina)

El proceso de erosión más importante detectado en la zona de estudio es el de erosión continua el cual es una constante a largo de toda la costa. En términos oceanográficos este proceso está asociado al fenómeno de “transgresión” caracterizado por el avance de la línea de costa hacia el continente generalmente ligado a la elevación del nivel del mar o a subsidencia del terreno

El proceso más drástico de erosión costera se ubica a todo lo largo de la denominada “península” de Atasta. La península está conformada por series de cordones deltáicos antiguos orientados en dirección Este-Oeste, a lo largo de los cuales se han desarrollado pequeños lomeríos intercalados con franjas de inundación. Con esta misma orientación se presentan los grandes cuerpos de agua interior como las lagunas de Pom y Atasta. Esta fisiografía configura al sitio como una gran zona de humedales alargados en dirección Este-Oeste intercomunicados por pequeños cuerpos de agua Norte-Sur.

En la figura (B.4) se ilustra la fisiografía antes descrita, así como la localización de las líneas de costa obtenidas de imágenes satelitales del periodo 1974-2008 (Torres, 2010) [TMB⁺10]. Puede observarse de esta reconstrucción que la franja erosionada se va ampliando progresivamente hacia el Este, siguiendo la morfología de antiguos cordones deltáicos que conforman el litoral actual.

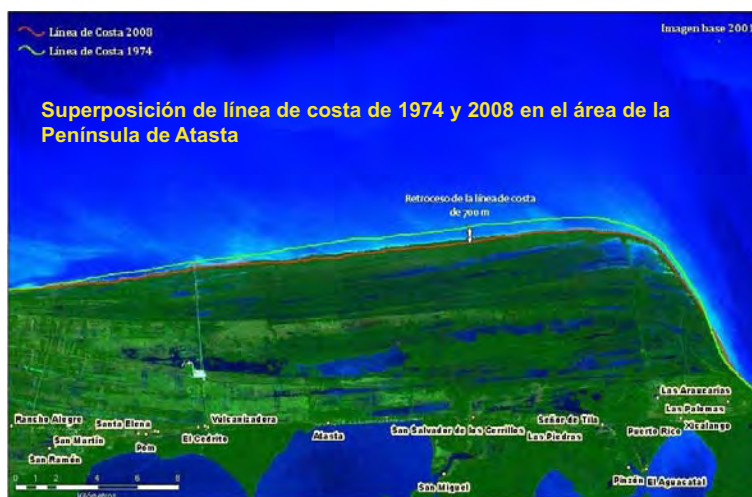


Figura B.4: Reconstrucción de la línea de costa de 1974 y su ubicación con respecto a la costa de 2008 de la Península de Atasta

De acuerdo con el estado actual de erosión de la Península de Atasta, en su extremo oriente (Punta Disciplina) la vulnerabilidad del sitio es extrema, toda vez que la franja actual en proceso de erosión tiene menos de 290 metros, la cual al desaparecer generaría la pérdida inmediata de un gran cuerpo lagunar localizado detrás de la punta mencionada. Sabiendo que la tasa de erosión es de 14 m/año, la integridad de este cuerpo lagunar es prácticamente nula. En la figura (B.5) se ilustra el estado de intensa erosión en la zona de Punta Disciplina.



Figura B.5: Erosión en Punta Disciplina, Campeche

En la figura (B.6) se ilustra otra localidad de la Península de Atasta en donde se observa el proceso de erosión de los cordones litorales, así como la presencia de infraestructura en la región. Se trata de la localidad de Atasta donde el desplazamiento de la líneas de costa ha sido de 487 metros en el lapso de 31 años (Torres, 2010)[TMB⁺10]. Posteriormente, en la figura (B.7) se aprecia como en la zona de Atasta el mar le ha ganado al terreno en los últimos años (2003 a 2007).



Figura B.6: Proceso de erosión continua de 1974 a 2008 en la zona de Atasta. Obsérvese el borde irregular de la zona costera



Figura B.7: Erosión en la zona de Atasta

B.1.3. Tasas de erosión

Las tasas de erosión de diferentes localidades en el Estado de Campeche difieren ligeramente de las magnitudes netas de desplazamiento de la línea de costa descritas en el inciso anterior. Así, por ejemplo, el sitio con mayor tasa de erosión corresponde a la zona de Atasta con un valor de 14.3 m/año, mientras que el de menor erosión se ubica en la Isla Aguada con solo 0.2 m/año (Torres, 2010)[TMB⁺10]. En la figura (B.8) se presentan los volúmenes de sedimento estimado para las zonas antes mencionadas.

Sitio de Muestreo	Volumen de sedimento estimado (m ³)					Cálculo de balance
	De lluvias 2005 a nortes 2006	De nortes 2006 a secas 2006	De secas 2006 a lluvias 2006	De lluvias 2006 a nortes 2007	De nortes 2007 a secas 2007	
San Pedro y San Pablo	2,833,248.30	-566,286.34	-26,220.17	-1,266,362.36	1,939,648.10	2,914,027.52
Nitrogenoducto	148,631.41	-628,175.79	941,027.92	-539,455.67	311,874.77	233,902.63
CPTG-Atasta	-854,050.45	862,276.49	552,359.49	-344,793.24	965,323.33	1,181,115.63
Pta. Disciplina	-3,034,160.33	746,584.78	-382,622.59	-2,042,336.56	2,971,575.80	-1,740,958.89
Boca del Carmen	-12,987,539.63	5,385,607.82	-4,182,531.27	-2,624,766.95	11,695,162.43	-2,714,067.61
Playa Norte	-2,443,528.22	-3,774,652.12	3,676,532.87	-3,212,025.02	4,795,631.18	-958,041.31
Club de Playa	-607,521.15	-886,178.24	-39,097.98	-1,734,750.95	1,191,154.15	-2,076,394.17
Cases Playero	-809,228.61	1,474,830.06	-570,840.38	-3,952,123.52	662,090.86	-3,195,271.57
Boca Pto. Real	-399,755.47	-637,201.88	186,951.70	-1,800,655.44	608,614.06	-2,042,047.03
Chamotón	343,586.13	3,588.67	3,237,648.49	-1,412,878.35	525,789.40	2,697,734.36

Nota: Los valores positivos representan volúmenes de ingreso y los negativos volúmenes de egresos.

Figura B.8: Balance de sedimentos en los sitios de estudio (Torres *et al*, 2010)

En el caso de las costas de Atasta que involucra la zona de estudio, se ha observado que la erosión en los últimos 5 años se ha incrementado, en las figuras (B.9 a la B.12) se muestran las batimetrías de 2005 a 2006 (Torres, 2010)[TMB⁺10] de la zona costera donde se proyecta el paso de la tubería que se modeló en este trabajo.

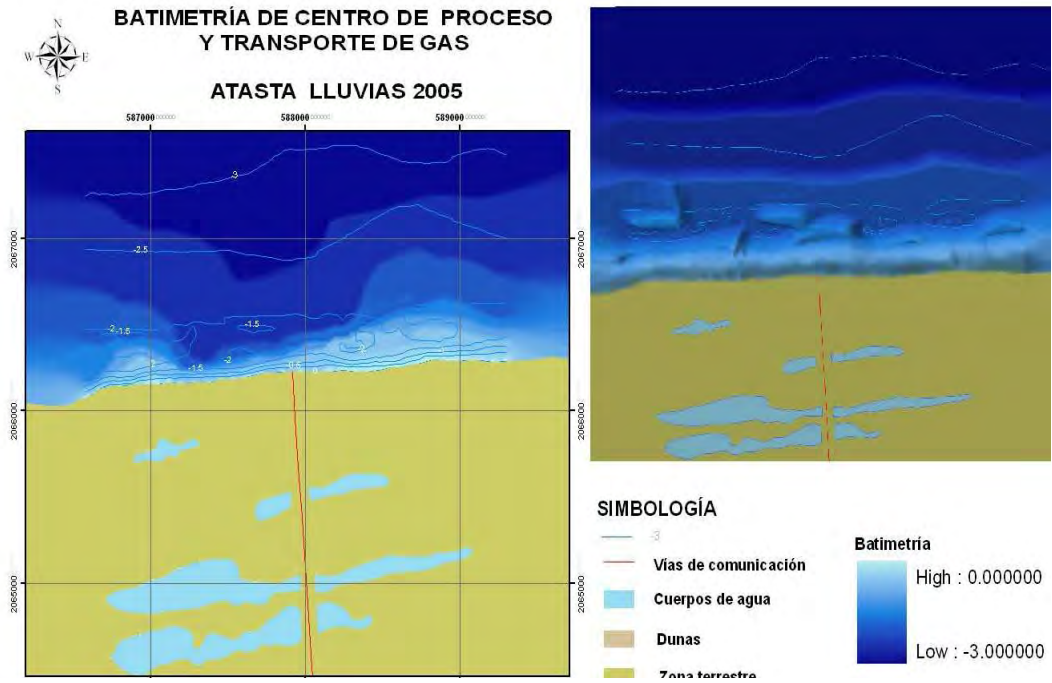


Figura B.9: Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de lluvias 2005

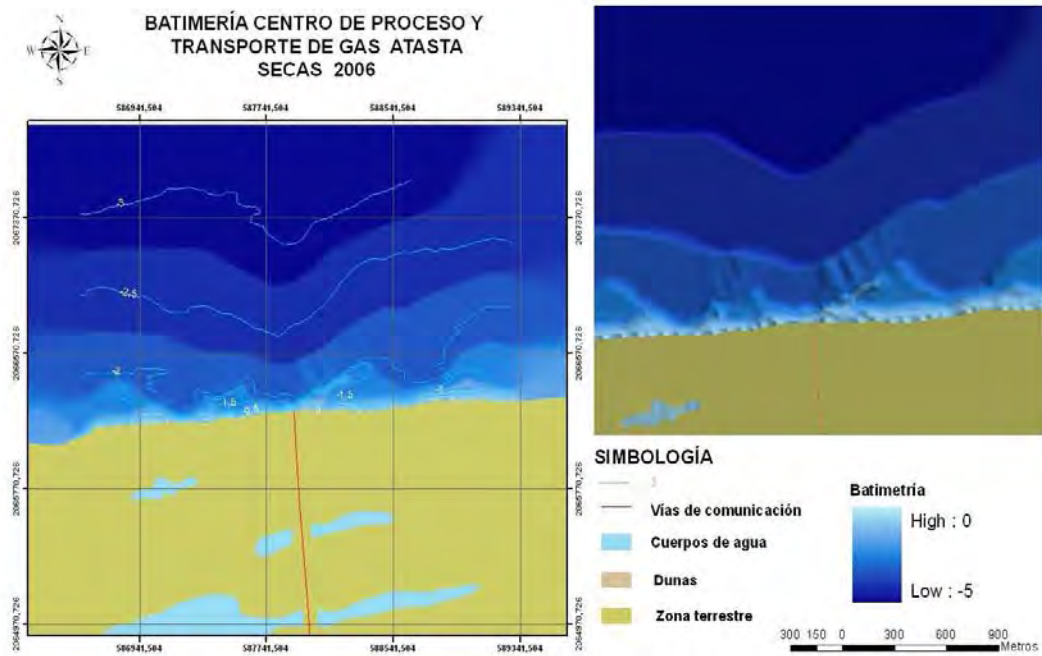


Figura B.10: Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de secas 2006

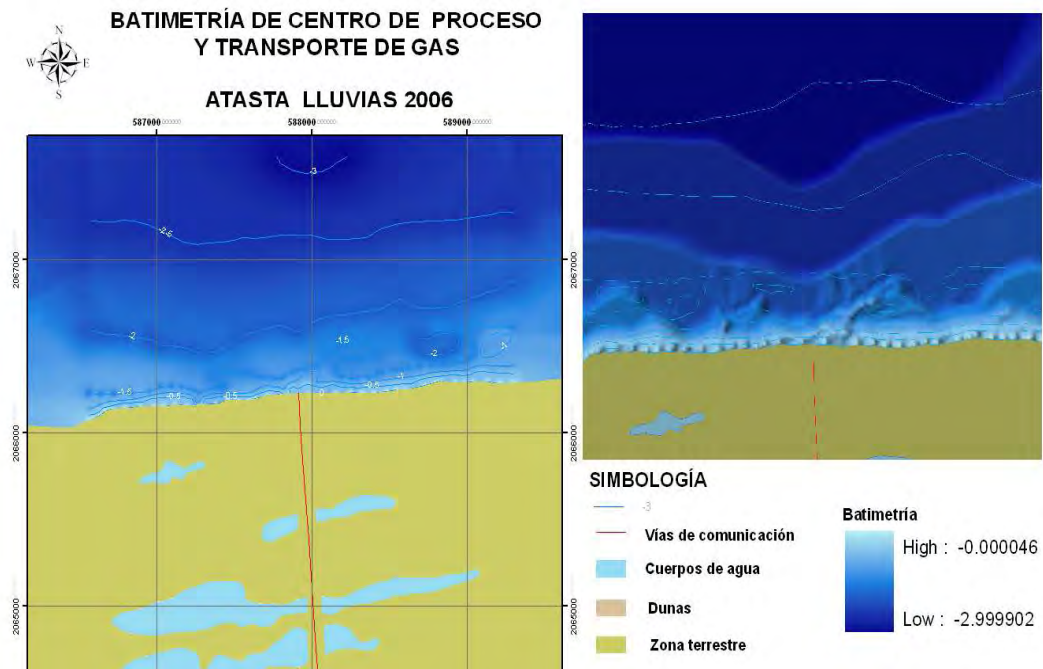


Figura B.11: Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de lluvias 2006

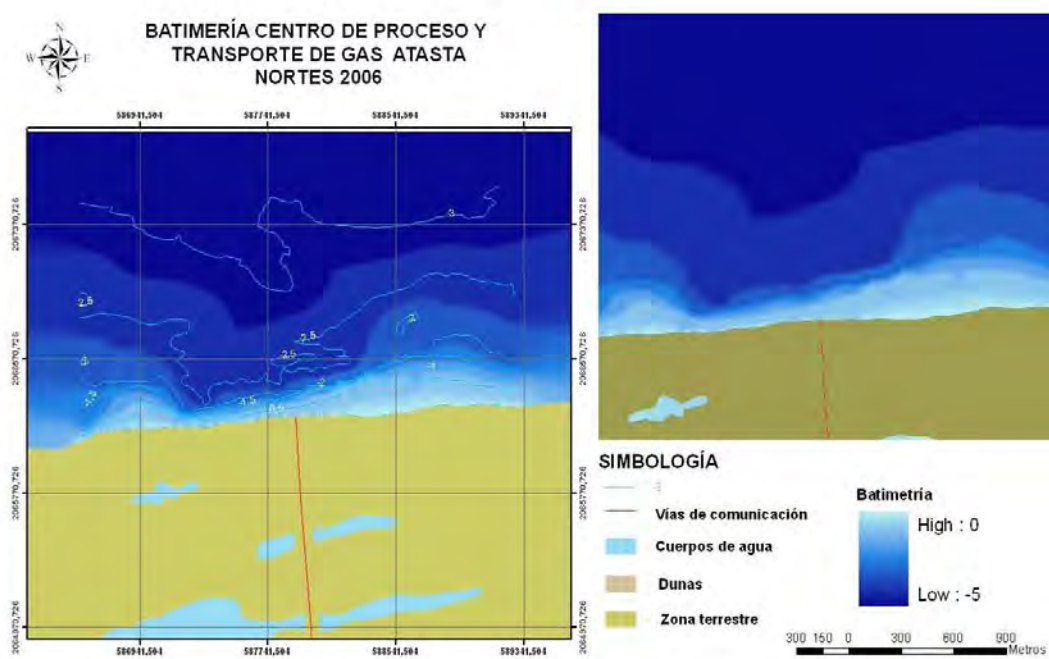


Figura B.12: Batimetría de la zona de estudio (Atasta) para la época de nortes 2006

B.2. Vulnerabilidad por elevación del nivel del mar en la zonas costeras

Enfocandonos a las costas de los Estados de Tabasco y Campeche, se han realizado diferentes trabajos con modelos numéricos que permiten estimar las zonas potencialmente inundables tras el aumento del nivel del mar en distintas elevaciones posibles para los años 2030, 2050 y 2100. Se observa pues en las figuras (B.13 y B.14) las condiciones de incremento del nivel del mar registradas en una estación mareográfica (Zavala, 2010)[ZdBRH10] y la zona de inundación que se presentó en el año 2001 respectivamente.

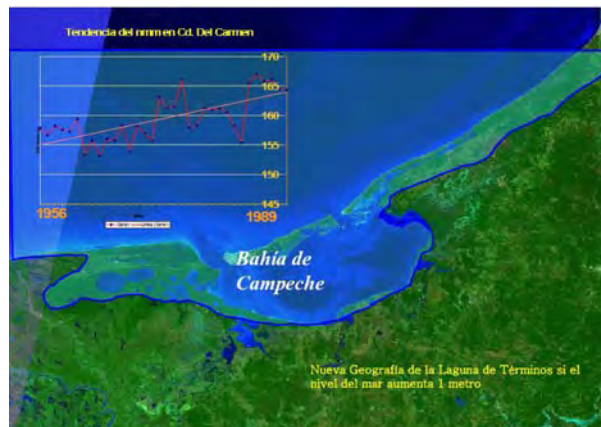


Figura B.13: Incrementos del nivel del mar para las costas de Tabasco y Campeche



Figura B.14: Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche en el año 2001

Hasta este punto queda demostrado que el nivel del mar ascenderá, independientemente de las políticas de control de emisiones que se apliquen, se tengan o no

Vulnerabilidad actual en la zona costera de Tabasco y Campeche debido a las anomalías climáticas actuales

130

instrumentos o acciones para la reducción de emisiones a la atmósfera, el nivel del mar continuará incrementándose en valores de 30, 60 y 90 centímetros, tratándose de un escenario optimista.

La pregunta es: ¿Cómo será la nueva configuración de las costas de Campeche, si el nivel del asciende 30 y 60 centímetros?. En las figuras (B.15 y B.16) se muestran las posibles zonas de inundación tras elevar estos niveles (Zavala, 2010)[ZdBRH10], puede observarse que la zona más vulnerable es la península de Atasta pues es la que presentará las primeras inundaciones.



Figura B.15: Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche con aumento de 30 cm (Zavala *et al*, 2010)

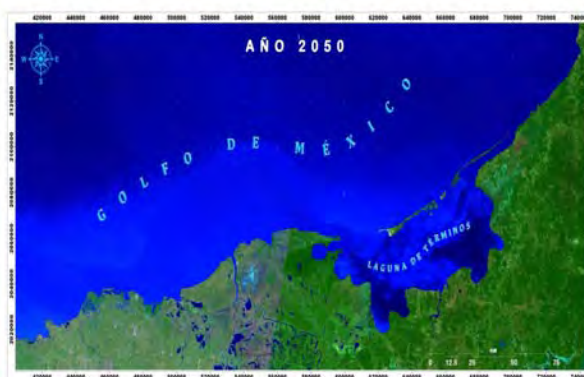


Figura B.16: Nivel del mar en la costas de Tabasco y Campeche con aumento de 60 cm (Zavala *et al*, 2010)

B.3. Ejemplo de erosión: Instalaciones de los pozos Tizón 222, 231 y 236 de PEMEX

Los pozos Tizón 222, 231 y 236 están ubicados en las costas del Estado de Tabasco, la problemática que se tiene en toda la zona costera (erosión de la línea de costa) no pasado desapercibido por estas obras de infraestructura petrolera; el grado de erosión que se presenta en la zona se esquematiza en la figura (B.17) (UNAM, 2010)[UNA10a].

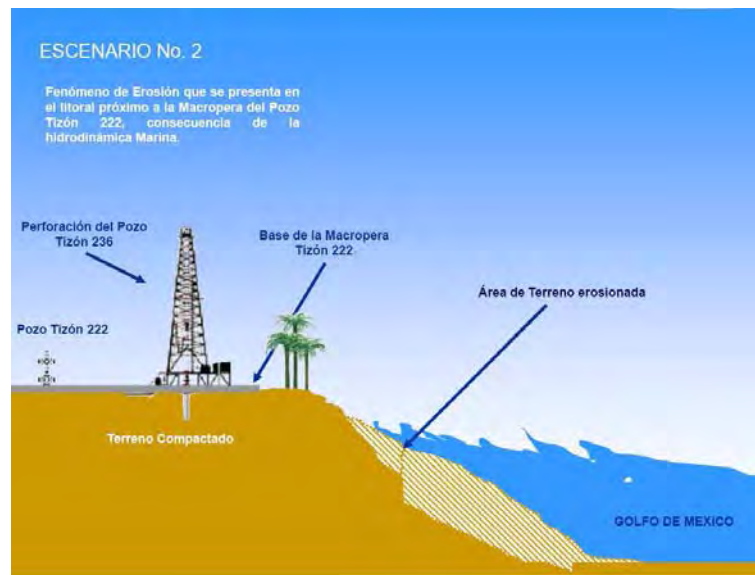


Figura B.17: Problemática de erosión en la zona de los pozos Tizón 222, 231 y 236

Esta erosión ha llegado a poner en riesgo la operación y producción de estos pozos (figs.B.18 y B.19), por lo que se han estado estudiando alternativas de solución e implementado obras de protección para la salvaguarda de estas instalaciones (UNAM, 2010)[UNA10b].



Figura B.18: Localización de los pozos Tizón 222 y 231



Figura B.19: Distancia de los pozos Tizón hacia la línea de costa

Las obras de protección que se sugirieron fue la realización del levantamiento de un muro a lo largo de la costa como se muestra en las figuras (B.20 y B.21) (UNAM, 2010)[UNA10a] cuya longitud cubra la zona de erosión que afecta al pozo.



Figura B.20: Esquema de solución al construir un muro vertical para detener el proceso de erosión de la línea de costa

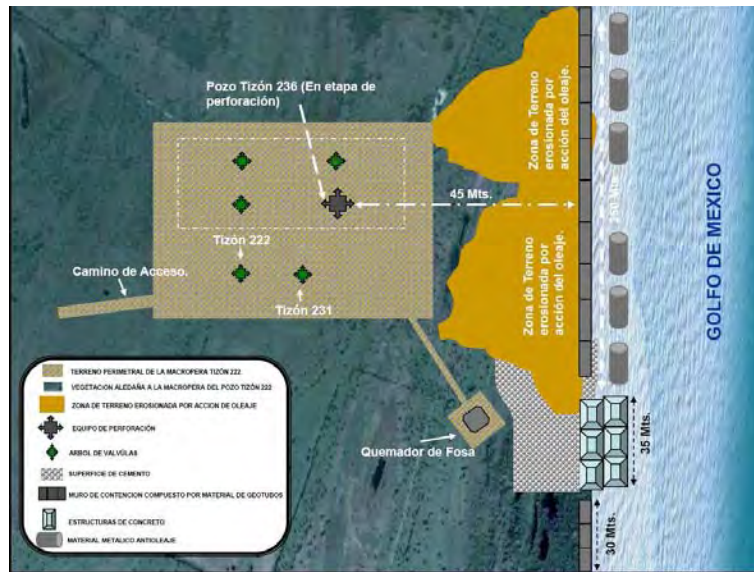


Figura B.21: Esquema de localización de los pozos Tizón, zonas de erosión y localización del muro vertical en la línea de costa

En la figura (B.22) se aprecia la erosión de la zona costera cercana a los pozos Tizón, posteriormente, en la figura (B.23) se observa el comienzo de los trabajos para el levantamiento del muro empleando perfiles tubulares y placas metálicas.



Figura B.22: Imagen de la zona de erosión en las cercanías de los pozos Tizón



Figura B.23: Comienzo de los trabajos para levantamiento del muro a base de placas metálicas y perfiles tubulares

Por último, en la figura (B.24) se muestra el avance de la construcción del muro y en la figura (B.25) parte del muro terminado con una altura a partir de la superficie libre de 1.80 metros.



Figura B.24: Avance de la construcción del muro de protección en la zona de erosión



Figura B.25: Sección del muro de protección terminado