

Estimacion de zonas de erosion y azolvamiento de sedimentos en oleoductos con un modelo pesado trazador de particulas

Israel Herrera, Jose Gasca, Blanca Gomez, Juan Ramírez y Sergio Marquez.

I. Herrera, J. Gasca, B. Gomez, J. Ramírez y S. Marquez.
Universidad de Guanajuato
eherrera@ugto.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

We developed a particle tracking model to estimate sediment transport in coastal areas where there are protection works, this will make the calculation of the hydrodynamics of the study area by identifying the three-dimensional velocity field in conjunction with the spread wave and the associated phenomena (diffraction and reflection) on the free surface allows particle transport independently in any direction in space caused by the velocity field and the turbulent dispersion (type random Brownian motion). Dispersal mechanisms and re-suspension of particles used were represented by stochastic models, which describe the movement by means of a probability function.

Model validation was carried out with two cases with known numerical solution using a discrete-continuous transformation method PIC (Particle in Cell), obtaining lower percentage average relative errors to 4.8 % in both cases. The results of simulating the transport of 350,000 particles under different scenarios can determine areas susceptible to erosion and clogging which houses a pipeline (pipeline or pipeline) in a coastal.

4 Introducción

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[12], el análisis toma especial interés sobre las partículas en suspensión.

En el modelo lagrangeano 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 se modela por separado, esto por conveniencia computacional. Los resultados del cálculo hidrodinámico corresponden a un campo estable y convergido 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, ($6t$) 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[7], 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.

4.1 Materiales y métodos

Modelo hidrodinámico

Se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes para modelar el movimiento del fluido en aguas someras, en donde las escalas horizontales son mucho más grandes que la escala vertical, con la hipótesis de presión hidrostática y considerando los postulados de Reynolds[10] son:

Las ecuaciones que describen el movimiento del flujo:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \text{div} \left(v_e \overrightarrow{\text{grad}}(u) \right) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \text{div} \left(v_e \overrightarrow{\text{grad}}(v) \right) \quad (4.1)$$

La ecuación para la superficie libre:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-zf}^{\eta} u \, dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-zf}^{\eta} v \, dz \right) \quad (4.2)$$

Donde (v_e) es el coeficiente de viscosidad efectiva, obteniéndose mediante la suma del coeficiente de viscosidad turbulenta y molecular $v_e = v_t + v_m$ para resolver la viscosidad turbulenta [3].

$$v_t = \left\{ l_h^4 \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] + l_v^4 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (4.3)$$

Donde la longitud vertical se define por $l_v = k(z - zb)$ para $(z - zb) / \delta < \lambda / k$ y $l_v = \delta$ para $\lambda / k < (z - zb) / \delta < 1$, (k) es la constante de von Kármán con valor típico de 0.41, $(z - zb)$ es la distancia desde el fondo, (δ) es el espesor de la capa límite y (λ) es una constante con valor de 0.09. En el caso de los flujos de aguas poco profundas, debido a una corriente constante, el espesor de la capa límite puede suponerse igual a la profundidad del agua (h) . La escala horizontal es generalmente mayor que la escala vertical, por lo tanto, es más simple asumir una proporcionalidad directa definida por $l_h = \beta l_v$. La constante (β) tiende a ser determinada experimentalmente.

Las condiciones de frontera para la superficie libre y el fondo se definen por:

$$\begin{aligned} \tau_x^{fondo} &= v_e \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{fondo} = \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{c_z^2} (u) \\ \tau_y^{fondo} &= v_e \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{fondo} = \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{c_z^2} (v) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde (c_z) es el coeficiente de Chezy. Las componentes de la velocidad toman los valores de la capa adyacente a la interfase agua-sedimento.

$$\begin{aligned}\tau_x^{superficie} &= v_e \frac{\partial u}{\partial z} |_{superficie} = -\frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (a_{viento}) \omega_x |\omega_x| \\ \tau_y^{superficie} &= v_e \frac{\partial v}{\partial z} |_{superficie} = -\frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (a_{viento}) \omega_y |\omega_y|\end{aligned}\quad (4.5)$$

donde $\rho_{aire} = 1.29 \text{ kg/m}^3$, (ω_x, ω_y) son las componentes horizontales en x y y respectivamente de la velocidad del viento a 10 m de altitud. El coeficiente a_{viento} adimensional y se puede obtener utilizando la ecuación dada por Flather (1976) [10].

$$\begin{aligned}a_{viento} &= 0.565 \times 10^{-3} \text{ si } |\vec{\omega}| \leq 5 \text{ m/s} \\ a_{viento} &= (-0.12 + 0.137 |\vec{\omega}|) \times 10^{-3} \text{ si } 5 \leq |\vec{\omega}| \leq 19.22 \text{ m/s} \\ a_{viento} &= 2.513 \times 10^{-3} \text{ si } |\vec{\omega}| \geq 19.22 \text{ m/s}\end{aligned}\quad (4.6)$$

Modelo de distribución de partículas de sedimento

El modelo numérico para el transporte de 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 [9].

Para el movimiento de partículas se considera un modelo estocástico y discretizado en tres dimensiones, considerando el peso específico de cada partícula así como de la velocidad de caída de la misma [4] y se verifica si éstas están dentro del dominio de estudio para un único paso de tiempo (t) de (n) a $(n + 1)$ está dada por:

$$\begin{aligned}x_i^{n+1} &= x_i^n + u_{i,j,k}(\Delta t) \pm (2 \text{rand}(\text{iseed}) - 0.5) \sqrt{2 v_{t_{i,j,k}} \Delta t} \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + v_{i,j,k}(\Delta t) \pm (2 \text{rand}(\text{iseed}) - 0.5) \sqrt{2 v_{t_{i,j,k}} \Delta t} \\ z_i^{n+1} &= z_i^n + w_{i,j,k}(\Delta t) \pm (2 \text{rand}(\text{iseed}) - 0.5) \sqrt{2 (v_{t_{i,j,k}} \Delta t) - (w_s \Delta t)}\end{aligned}\quad (4.7)$$

(10)

donde (x_i^n, y_i^n, z_i^n) es la posición de la partícula en el tiempo (t) [4] (u, v, w) son las velocidades medias en (i, j, k) , (vt) es el coeficiente de viscosidad turbulenta, (Δt) es el paso de tiempo lagrangeano y (w_s) es la velocidad de caída del sedimento. El seguimiento de las partículas es empleando las ecuaciones (10), por lo tanto cada partícula está sujeta a un desplazamiento espacial de magnitud

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 cada partícula, de esta forma el movimiento tiene un sentido en función del movimiento principal, dado por los campos de velocidades.

El término (vt) se encuentra sobre todo el dominio, representado por un campo de escalares positivos, que posee la información de las intensidades turbulentas.

Los esfuerzos cortantes en un flujo turbulento, a lo largo de su profundidad (z), puede escribirse como:

$$\overline{u'v'} = -\overline{u'w'} \frac{dz}{dz} \quad (4.8)$$

donde: (τ_b) es el esfuerzo cortante de fondo, (ρ_f) densidad del fluido, (ν)

coeficiente de viscosidad cinemática, (U) velocidad media del fluido y $(\overline{u'w'})$ correlaciones dobles en el fondo.

El esfuerzo cortante crítico que actúa sobre las partículas, se escribe:

$$\tau_{b,critico} = 0.03 (\rho_s - \rho_f) g d_{50} \quad (4.9)$$

se tiene que (ρ_s) es la densidad del sólido, (ρ_f) densidad del agua, (g) aceleración de la gravedad y (d_{50}) el diámetro de la partícula para el cual pasa el 50 %.

Velocidad de caída del sedimento

Para determinar la velocidad de caída de las partículas de sedimentos,

Éstas se consideran que tienen forma no esféricas [2], por lo que el efecto que tiene la formas influyen bastante en su velocidad principalmente en partículas relativamente grandes ($> 300\mu m$), las expresiones que determinan la magnitud de la velocidad de caída [13] se expresan a continuación.

$$1 < d \leq 100\mu m$$

$$100 < d \leq 1000\mu m \quad (4.10)$$

$$d \geq 1000\mu m$$

se tiene que (d) es el diámetro de la criba, (S) gravedad específica, (ν) coeficiente de viscosidad cinemática y (g) la aceleración de la gravedad.

Efecto de la concentración de sedimentos

La velocidad de caída de una sola partícula es alterada por la presencia de otras partículas [5], 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 emplear la siguiente ecuación:

$$w_{s,m} = (1 - c)^\mu w_s \quad (4.11)$$

las variables son: $(w_{s,m})$ velocidad de caída de la partícula en suspensión, (w_s) velocidad de caída de la partícula en líquido limpio, (c) concentración

volumétrica de sedimentos y (μ) coeficiente adimensional (con valor de 4 a 5 para partículas con diámetros entre $50\mu m$ y $500\mu m$).

Transformación discreta-continua para la concentración de partículas

El esquema de transformación empleado para obtener el campo de concentración del sedimento a partir del modelado lagrangeano de las partículas es el (PIC) por sus siglas en ingles (particle-in-cell) [6] y [1], 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.

Validación del modelo de partículas

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 dada por la siguiente ecuación [11]:

$$C_{x,y,z,t} = \frac{C_0}{(4 \pi K_x K_y K_z t)^{3/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4K_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4K_y t} - \frac{(z-z_0)^2}{4K_z t}} \quad (4.12)$$

La distribución de concentración resultante fue obtenida empleando un tiempo de simulación por difusión de 15 segundos 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 obteniendo un promediado del error relativo porcentual en comparación con la solución analítica de 4.76 %.

Figura 4 Distribución de la concentración al final del periodo de simulación de forma continua (superior) y discreto de partículas (inferior)

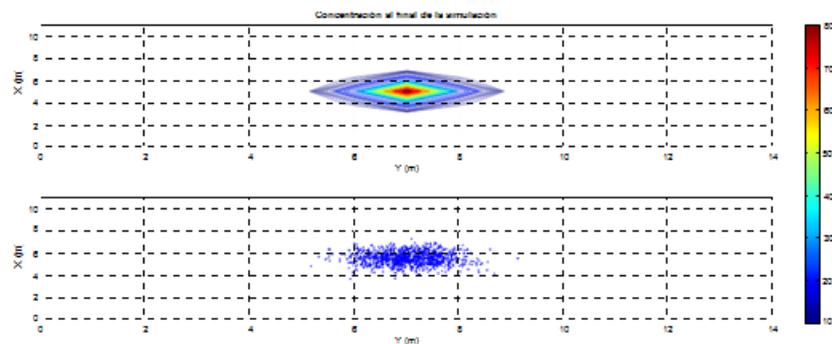
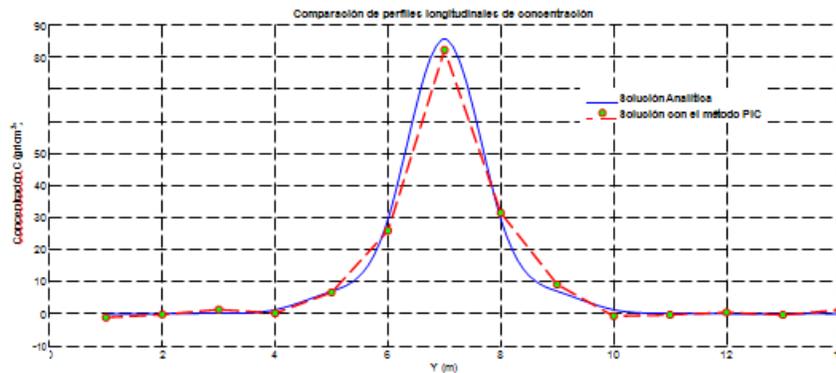
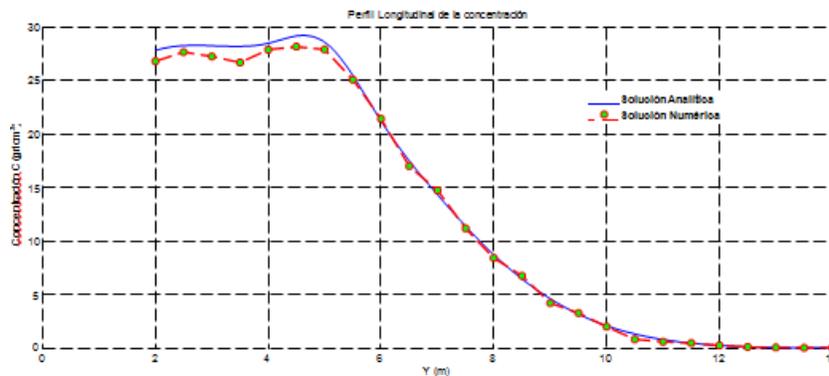


Figura 4.1 Perfiles de comparación entre la solución analítica y el método PIC del primer caso



El segundo caso de validación, corresponde a una descarga continua de duración infinita donde la solución analítica en 1D corresponde a una sustancia conservativa.

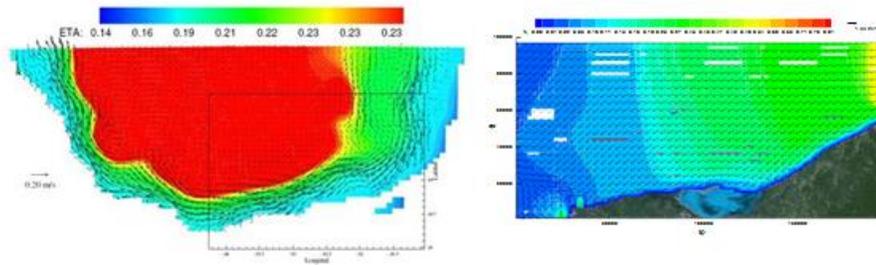
Figura 4.2 Comparación del perfil longitudinal de concentración entre la solución analítica y el método PIC del segundo caso



4.2 Resultados y discusión

El dominio numérico considera profundidades reales hasta los 400 m, después de esta isóbata se considera que las profundidades se mantienen constantes. Para evitar inestabilidades en los gradientes de presión, la batimetría se suavizó cuidando que no perder 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. La malla contiene 99 celdas en la dirección longitudinal y 49 en la dirección perpendicular con ($x = y = 2000m$) y se emplea el modelo 2D integrado en la vertical.

Figura 4.3 Simulación hidrodinámica 2D en el Golfo de México (izq.) y en Sonda de Campeche (der.)



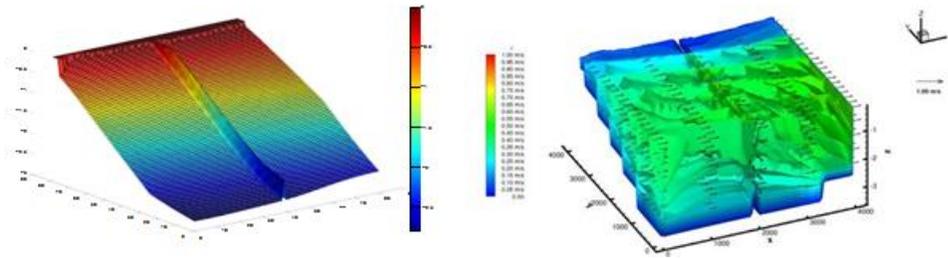
El tamaño de paso temporal fue de 1 segundo con duración total de simulación de 30 días. Como condiciones iniciales se consideran las entradas de corrientes litorales y la fluctuación de la superficie por la influencia de la marea en las fronteras Este y Oeste; se considera que la temperatura en la región 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 en todo el dominio de estudio. El campo hidrodinámico para el mes de Noviembre de una sección del Golfo de México y el campo de vectores de velocidad para la zona conocida como Sonda de Campeche se presenta en la figura (4); posteriormente, se utiliza un modelo de submalla para realizar una simulación hidrodinámica en 3D mas refinada donde se localiza el oleoducto, empleando espaciamiento en la vertical ($6z = 0.5m$) formando 7 celdas que en total representa una profundidad máxima de 3.5 m, para el plano horizontal se tiene un espaciamiento de ($6x = 6y = 50m$), por último, se presenta en el cuadro (1) las condiciones iniciales del sembrado y concentración de sedimentos en el fondo, donde se mantiene un comportamiento no cohesivo.

Tabla 4 Condiciones iniciales o forzantes para la simulación del transporte lagrangeano de sedimentos

Parámetro	Valor
Concentración inicial de fondo kg/m^3	0.81
Número de partículas D_{50} de fondo (0.088mm)	40,500
Número de partículas D_{10} de fondo (0.007mm)	9,300
Número de partículas D_{90} de fondo (0.190mm)	4,650
Concentración inicial puntual kg/m^3	0.56
Número de partículas D_{50} puntual (0.038mm)	7,980
Número de partículas D_{10} puntual (0.062mm)	3,518
Número de partículas D_{90} puntual (0.167mm)	2,682

La malla numérica esta formada por 81 celdas en la dirección “x” y el mismo número de celdas en la dirección “y”. Se consideran dos mallas, el primer caso es que no existe ninguna tubería sobre el fondo, el objetivo es observar el patrón hidrodinámico en estado natural; el segundo caso presenta un obstáculo al cual lo asociamos a una tubería de diámetro de 0.50 metros tendida en el fondo donde se observa que el patrón de velocidades sufre alteraciones en su dirección (figura5) por la presencia de la tubería en el fondo.

Figura 4.4 Malla 3D de la zona de estudio con campo hidrodinámico con oleoducto



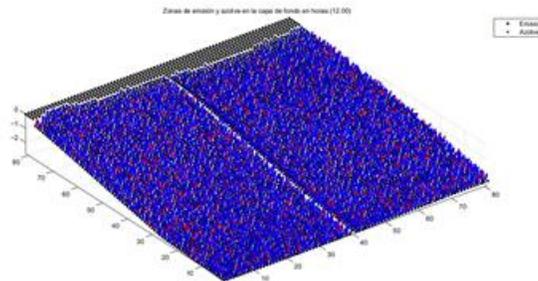
Modelación detallada del transporte de partículas en zonas aledañas a la tubería

La zona de estudio presenta zonas potencialmente erosionables o en su caso con azolve. 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.

Simulación con sedimentación al 25 % de cobertura de la tubería

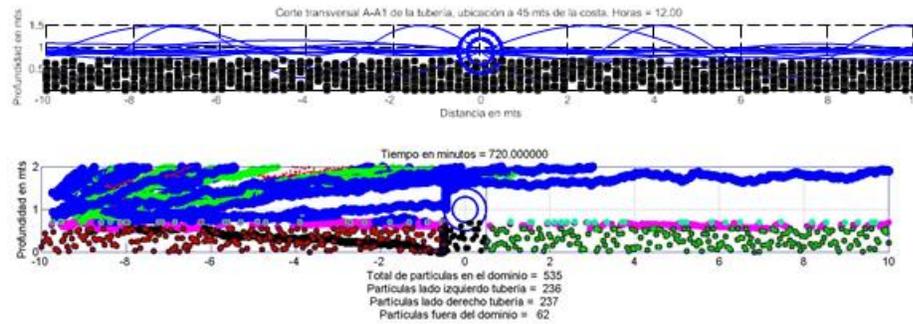
Se observa en todo el dominio de estudio el cambio en primera instancia de las zonas potencialmente erosionables (marcadas en color rojo) y las que son propicias a la sedimentación (marcadas en color azul). El balance general entre la zonas erosionadas y las sedimentadas se aprecia en la figura (6) donde 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 4.5 Estado de erosión y azolve al 25 % de sedimentación



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 (7) 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 4.6 Curvas de sedimentación y conteo de partículas en la sección transversal al 25 % de sedimentación

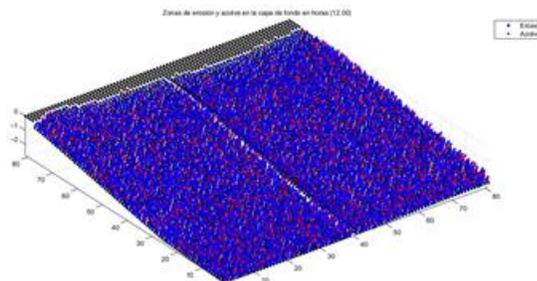


Se estima que un 11 % de las partículas totales en esta sección se pierden o salen fuera del dominio de estudio; a su vez, se muestran las curvas de sedimentación a cada hora durante las primeras 12 horas, estas tratan de interpretar el comportamiento de la sedimentación en la sección transversal a cada hora de computo, para su calculo y graficación, se emplea una segmentaria cúbica para interpolar y suavizar los datos en el lapso antes mencionado.

Simulación con sedimentación al 50 % de cobertura de la tubería

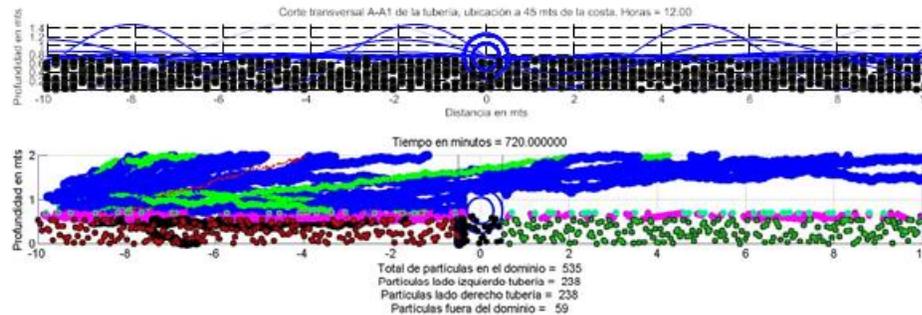
Para la condición de la tubería cubierta en un 50 %, la figura (8) muestra los resultados del cálculo de erosión y/o sedimentación del dominio de estudio arrojan que un 76 % presenta sedimentación, la zona de erosión cuenta con un 21 % y que el material que se encuentra en transición es de un 3 % aproximadamente.

Figura 4.7 Estado de erosión y azolve al 50 % de sedimentación



En la figura 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 4.8 Curvas de sedimentación y conteo de partículas en la sección transversal al 50 % de sedimentación

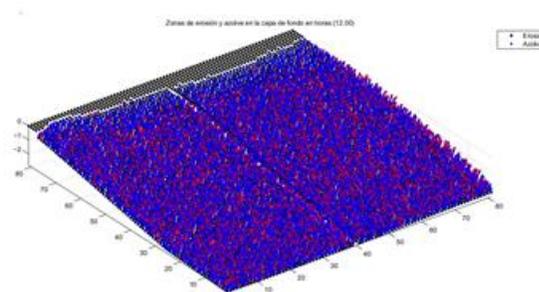


Las curvas de sedimentación para estas condiciones de sedimentación, donde se observa que en el extremo derecho de la tubería se presenta una tendencia a la erosión, esto viene en parte confirmando la situación actual de erosión parcial de la zona para esta época del año.

Simulación con sedimentación al 75 % de cobertura de la tubería

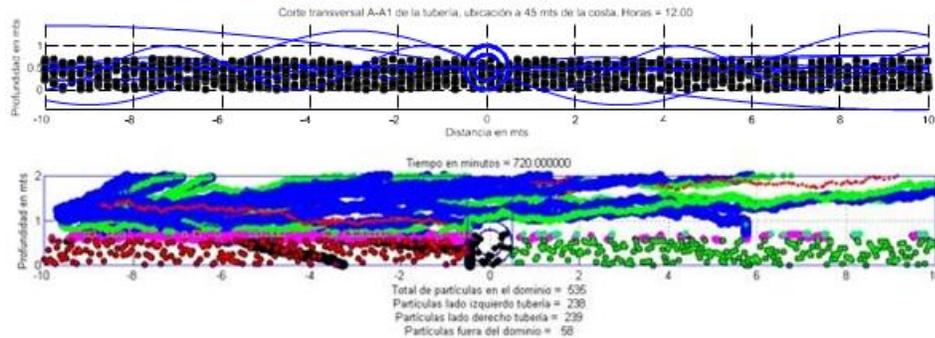
Los resultados se muestran en la figura (10), donde se observa que el porcentaje de sedimentación o azolve disminuye considerablemente alcanzando un 61 %, esta fracción es más notoria en la línea de costa donde se tiene un azolve más definido; el porcentaje de erosión se estimó en un 34 % y un 5 % para el material que se encuentra en transición.

Figura 4.9 Estado de erosión y azolve al 75 % de sedimentación



El conteo de partículas en la sección transversal ilustrado por la figura siguiente 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 4.10 Curvas de sedimentación y conteo de partículas en la sección transversal al 75 % de sedimentación



Revisando la figura (11), 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 %.

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, se aprecia una ligera sedimentación sobre la tubería, siendo más notable en la parte inferior del dominio (más profunda).

4.3 Conclusiones

La zona de estudio presenta zonas potencialmente erosionables o en su caso con azolve, por lo cual al realizar el estudio detallado donde se muestran las zonas cercanas a la tubería con movimiento de partículas de fondo se obtienen las curvas de movimiento indicando el balance del número de partículas entrantes y salientes en la sección de la tubería, esto 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.

Se observa que 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 las zonas sedimentadas se estima de un 87 %, la zona de erosión un 11 % y el restante 2 % se encuentra en estado de transición. 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 un 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, se aprecia una ligera sedimentación sobre la tubería, siendo más notable en la parte inferior del dominio (más profunda).

4.4 Referencias

- J. Calantoni and K.T. Holland. (2005) “Discrete particle model for surf zone sediment transport”, *Ocean science and technology*, 183– 185.
- D.P. Callaghan, F. Saint-Cast, P. Nielsen and T.E. Baldock. (2006) “Numerical solutions of the sediment conservation law; a review and improved formulation for coastal morphological modelling”, *International Journal for coastal harbor and offshore engineers*, 53:557– 571.
- V. Casulli and R. T. Cheng. (1992) “Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow”, *International Journal for numerical methods in fluids*, 15:629–648.
- I. Hernandez. (2003) “Modelos euleriano-lagrangianos en flujos a superficie libre: Aplicación al transporte de partículas suspendidas y al crecimiento de microorganismos”, Master’s thesis, DEPFI, UNAM.
- A. Lane. (2005) “Development of a lagrangian sediment model to reproduce the bathymetric evolution of the Mersey Estuary”, *Ocean Dynamics*, Springer Verlag, 55:541– 548.
- H. Gotoh. (2009) “Lagrangian Particle Method-Advanced Technology for Numerical Wave Flume”, *Proc. of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*.