

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO FISICOQUIMICO DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN RIOS

Carmen Helena Zapata, Edgar Arturo Calle y Luis Fernando Parra

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

cezapata@perseus.unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 30 Agosto de 2002 / Aceptación: 13 de Noviembre de 2002 / Recibida versión final: 8 de Noviembre de 2002

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla y aplica un modelo de computador (COLSPILL) para simular el comportamiento físico de derrames de hidrocarburos en sistemas de agua dulce. En este modelo se considera el proceso físico de la transformación de una mancha de petróleo debido a la advección (transporte), esparcimiento, difusión turbulenta horizontal, evaporación, disolución, emulsificación, cambios en densidad y en viscosidad, y retención en las orillas. El modelo se puede usar para simular derrames de petróleo continuos o instantáneos. Los resultados del modelo se muestran coherentes y consistentes. No se hizo la comparación con datos experimentales pues no se tenían a disposición a la fecha. El modelo se puede usar para desarrollar medidas de limpieza en el caso de un derrame real de petróleo y para controlar exitosamente el impacto ambiental de posibles derrames de petróleo.

PALABRAS CLAVES: Derrames, Hidrocarburos, Impacto Ambiental, Derrames en Ríos, Comportamiento Fisicoquímico

ABSTRACT

The modern society had built many storage and transport pipelines around waterways. The economic and environmental impacts of inland oil spills are bigger than ocean oil spills because they affect rural and urban areas. Inland oil spills normally are less amount than ocean spills but they are more frequent. River oil spill need special and specific physicochemical process. COLSPILL model is a physicochemical behaviour simulation for river spill. The aspects consider in the model are advection, spreading, evaporation, emulsification (water in oil), dissolution, shoreline deposition and changes on density and viscosity. COLSPILL model may be used as a contingency tool to river oil spill response.

KEYS WORDS: Oil Spill, Environment, Environmental Impact, Inland Spill, River Model, Physicochemical Behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

Inmediatamente después de que un hidrocarburo entra en la superficie de un río, el petróleo derramado se esparce y forma una mancha superficial que cubre una determinada área de la superficie del agua y puede moverse por acción del viento y las corrientes. Algunos hidrocarburos livianos y algunos componentes polares comienzan a viajar en solución en la subyacente columna de agua, los demás componentes livianos se pierden por evaporación hacia la atmósfera. En aguas turbulentas, el petróleo se emulsiona dentro de la columna de agua como pequeñas gotas dispersadas en dicha columna. Estas gotas se dispersan debido a la acción de las corrientes, o también se unen o ligan a partículas de material suspendido y lentamente se precipitan hacia el fondo del río. La acción turbulenta también puede arrastrar el agua dentro del petróleo formando emulsiones de agua en petróleo, las cuales eventualmente se secan formando esferas densas de brea o alquitrán (tar-balls). Para contrarrestar el efecto contaminante de estos hidrocarburos, muchas autoridades gubernamentales, a nivel mundial, han preparado planes de contingencia para derrames de petróleo. Un importante elemento de estos programas es el uso de modelos de computador para predecir la localización y distribución del petróleo, para asistir en la contención y recobro. Haciendo de esta forma que el daño o perjuicio sea minimizado al poder conocer rápidamente los recursos en riesgo y la trayectoria del derrame.

Este modelo define los fenómenos físico - químicos que se presentan en los derrames en ríos y hace parte del proyecto de modelar tridimensionalmente el comportamiento de los derrames de petróleo en ríos colombianos, los cuales se ven frecuentemente impactados por los derrames de petróleos provenientes de las voladuras de los oleoductos.

2. REVISION DE LITERATURA

En 1979, Tsahalís desarrolló el primer modelo de simulación para derrames de petróleo en ríos. Es un modelo unidimensional con algunas provisiones para los efectos secundarios de la corriente. Adicionalmente a la advección calcula el esparcimiento mecánico de petróleo basado en la ecuación de Fay. La forma geométrica de la mancha se considera circular. Cuando el petróleo

golpea la orilla, la cantidad depositada en la orilla se calcula con base en el área circular de la mancha que cubre la tierra.

En 1987, Shen y otros desarrollan un modelo de computador para simular el movimiento de manchas de petróleo en lagos utilizando un algoritmo lagrangiano de parcelas discretas. Se considera, en este modelo, la transformación de una mancha de petróleo debido a la advección, esparcimiento, evaporación y disolución. También se considera, que para condiciones de aguas libres, el movimiento de la mancha de petróleo por acción de las corrientes y por la acción del viento puede calcularse en función del factor de arrastre.

En 1988 Shen y Yapa, desarrollan un modelo bidimensional para simular el transporte superficial de manchas de petróleo en ríos libres o con capas de hielo flotando. La distribución bidimensional de la velocidad promediada en profundidad se calcula por el método de tubos de flujo. El modelo usa un método lagrangiano de parcelas discretas para simular la transformación de la mancha de petróleo. Los procesos de transformación considerados incluyen esparcimiento mecánico, esparcimiento dispersivo, evaporación, disolución, deposición y resuspensión en las orillas.

En el año de 1993, Yapa y otros desarrollan uno de los modelos más completos para simular el comportamiento físico de derrames de hidrocarburos en sistemas de ríos complejos. Es un modelo de derrames de petróleo de dos capas que simula los procesos de advección, difusión horizontal, esparcimiento mecánico, deposición en la orilla, evaporación, disolución, mezclado vertical, resurgimiento, y asentamiento.

3. FORMULACION DEL MODELO

El tratamiento dado al comportamiento del derrame de petróleo, en este trabajo, se limita solamente a los procesos físicos dada su importancia en la elección de técnicas de contención durante las operaciones de control y combate de derrames de hidrocarburos en grandes volúmenes. En estos, el transporte está gobernado por los procesos de advección, y otros procesos tales como el esparcimiento mecánico y la deposición en las márgenes.

Por razones prácticas para la formulación del modelo desarrollado en este trabajo (COLSPILL) se hicieron las siguientes suposiciones y simplificaciones:

- El algoritmo se basó en los siguientes criterios:
 - Aceptabilidad en la industria como algoritmos estándar.
 - Facilidad de manipulación para ser programado.
- La mancha de petróleo esta formada por un promedio de todas las fracciones presentes en ella.
- El transporte superficial de la mancha está gobernado solamente por el proceso de advección, el proceso de difusión no se tiene en cuenta.
- No hay corte en la superficie de la mancha ($\tau_{sx} = \tau_{sy} = 0$ y en fondo del sistema el corte se genera solamente por el movimiento relativo (con respecto al centro de masa) de la mancha del petróleo sobre el cuerpo de agua.
- La configuración horizontal de la mancha de petróleo tiene una forma idealizada (radial o rectangular) descrita por una escala simple.
- La aceleración del centro de masa es pequeña.
- El petróleo no presenta turbulencia.
- El campo de viento se considera constante en el intervalo de tiempo considerado.
- La parte hidrodinámica del sistema se ingresa al modelo como dato debido a que la mayoría de las técnicas más avanzadas requieren de un conocimiento más profundo del análisis del que se supone en este trabajo.
- El modelo se desarrolla para derrames que ocurran en un río o en un lago.
- **Transporte (Trayectoria).** El modelo desarrollado en éste trabajo emplea un algoritmo de advección para tratar el problema del transporte superficial de manchas de petróleo, el cual a su vez utiliza una técnica de superposición lineal simplificada para aproximar el movimiento de la mancha. En esta técnica la tasa de transporte para una mancha de petróleo se representa utilizando un vector suma del transporte inducido por el viento y la corriente, y la dispersión turbulenta horizontal. Por tanto la velocidad con que es arrastrada la mancha de petróleo en la superficie del agua, se calcula de la siguiente manera:

$$\vec{V}_t = \vec{V} + \vec{V}^* \quad (1)$$

En la cual,

V_t = Velocidad de arrastre de la mancha de petróleo;
 \vec{V} y \vec{V}^* = La componente media y la componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad de arrastre respectivamente.

En la capa superficial, la velocidad de arrastre media se considera como un vector suma de un arrastre inducido por el viento y un arrastre inducido por la corriente del agua. Por lo tanto la velocidad de arrastre media \vec{V}_t en la superficie del agua se calcula con la siguiente ecuación desarrollada por Stolzenbach y otros:

$$\vec{V}_t = \vec{V}_s = \alpha_w \vec{V}_w + \alpha_c \vec{V}_c \quad (2)$$

En la cual,

\vec{V}_w = Velocidad del viento diez metros arriba de la superficie libre del agua, m/s .

\vec{V}_c = Velocidad de la corriente promediada en profundidad, m/s .

α_w = Factor de arrastre del viento que da cuenta del arrastre superficial de la mancha debido al efecto del viento.

α_c = Factor que da cuenta de la contribución al arrastre de la mancha de petróleo en la superficie del agua debido a la corriente.

Las corrientes superficiales inducidas por el viento varían entre 1% - 6% de la velocidad del viento, con 3% como el factor de arrastre más ampliamente usado por los modelos de trayectorias de manchas de petróleo. En el modelo desarrollado, valores 0.03 y 1.1 se usan para los factores α_w y α_c , respectivamente por ser estos los valores más ampliamente usados y recomendados en la literatura especializada para este tipo de modelos.

Durante cada intervalo de tiempo D_t de la simulación del derrame de petróleo, el desplazamiento $\Delta \vec{S}$, de la mancha de petróleo se calcula multiplicando la velocidad de arrastre \vec{V}_t por el intervalo de tiempo Δt .

- **Difusión horizontal:** La componente dispersiva del movimiento de la mancha se calcula suponiendo que la mancha está sometida a un movimiento al azar semejante al movimiento Browniano, como

resultado de la turbulencia presente en el medio de transporte. Por tanto el coeficiente de difusión horizontal se relaciona con la magnitud de V por un análisis de recorrido o caminata aleatoria de la siguiente manera:

$$V_K^* = (4E_T / \delta_{tk})^{1/2} \quad (3)$$

$$\vec{V}^* = V_K^* R_n e^{i\theta} \quad (4)$$

En la cual,

V_K^* = V^* durante el intervalo de tiempo δ_{tk}

δ_{tk} = Intervalo de tiempo

E_T = Coeficiente de difusión

R_n = Número generado al azar entre 0 y 1 ($0 < R_n < 1$).

θ = Angulo direccional (varía aleatoriamente entre 0 y P).

El coeficiente de difusión para ríos se calcula con la siguiente ecuación desarrollada por Fischer y otros, Sayre y Chang.

$$E_T = 0.6 h u_* \quad (5)$$

$$u_* = g h s \quad (6)$$

En la cual,

E_T = Coeficiente de difusión, m^2 / s

h = Profundidad de flujo, m

u_* = Velocidad de corte, m / s

s = Pendiente de la superficie del agua, m / m .

Para el caso de un lago se utiliza la siguiente relación para hallar el coeficiente de difusión:

$$E_T = 0.0027 t^{1.34} \quad (7)$$

En esta ecuación se tiene,

E_T = Coeficiente de difusión, cm^2 / s

t = Tiempo, s

superficial, contrabalanceadas por las fuerzas de la inercia y por las fuerzas viscosas. Ecuaciones para el esparcimiento radial y para el esparcimiento rectangular para las diferentes fases se resumen en la tabla 1, usando los términos definidos en la figura 1.

Este modelo siguiendo la sugerencia de Fay utiliza las siguientes ecuaciones para hallar el área final y el espesor mínimo de la mancha, considerando volumen constante durante el tiempo del derrame:

$$A_f = 10^5 V^{3/4} \quad (8)$$

$$h_m = 10^{-5} V^{1/4} \quad (9)$$

Donde,

A_f = Área final de la mancha, m^2 .

V = Volumen total de la mancha, m^3 .

h_m = Espesor mínimo de la mancha, m .

• **Deposición en las orillas.** En el presente modelo se adopta el concepto de vida media para calcular el volumen de petróleo depositado en las orillas. Acorde a esta formulación, el volumen de petróleo remanente en la orilla se relaciona con su volumen inicial por la siguiente ecuación:

$$V_2 = V_1 \exp[-K(t_2 - t_1)] \quad (10)$$

En la cual,

V_1 = Volumen de petróleo en la orilla al tiempo t_1

V_2 = Volumen de petróleo en la orilla al tiempo t_2

K = Constante de decaimiento.

• **Esparcimiento mecánico.** La teoría desarrollada por Fay se emplea en este modelo para simular el esparcimiento mecánico en la superficie libre del agua. Esta teoría considera el esparcimiento de petróleo como el resultado de dos fuerzas de impulso, la gravitacional y las de tensión

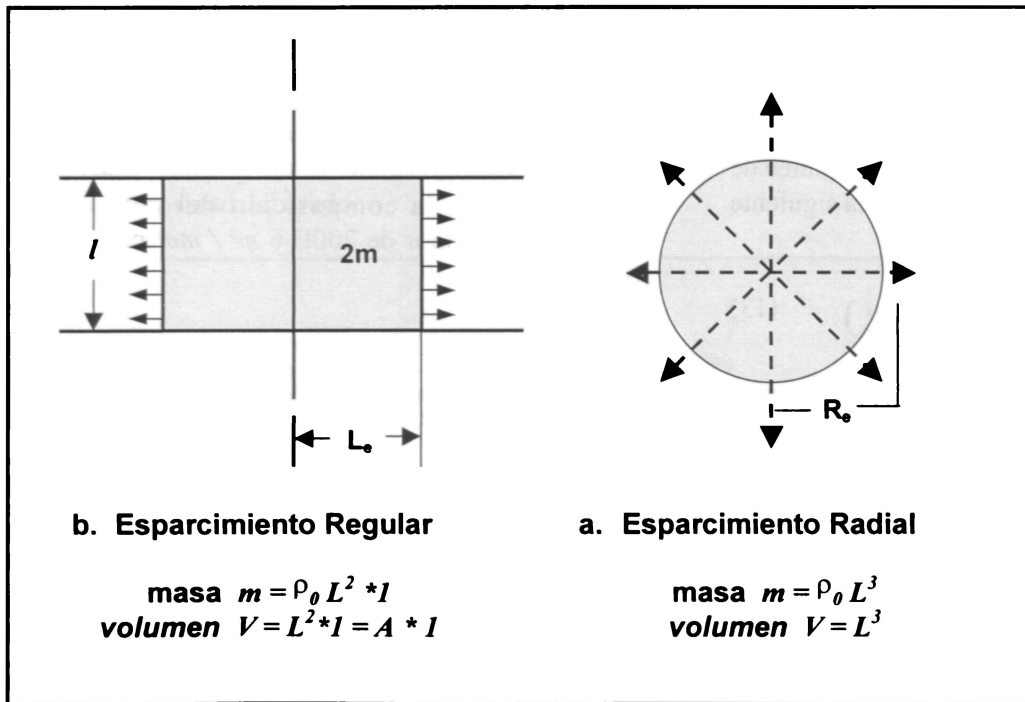


FIGURA 1.
Representación de la geometría de la mancha.

TABLA 1.
Reglas de esparcimiento para manchas de petróleo.

FASE DE ESPARCIMIENTO	L_e (RECTANGULAR)	R_e (RADIAL)
Gravitacional - Inercial	$1.39(\Delta g A t^2)^{1/3}$	$1.14(\Delta g V t^2)^{1/4}$
Gravitacional - Viscosa	$1.39(\Delta g A^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/4}$	$0.98(\Delta g V^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/6}$
Tensión superficial - Viscosa	$1.43(\sigma^2 t^3 \rho_w^{-2} \nu^{-1})^{1/4}$	$1.60(\sigma^2 t^3 \rho_w^{-2} \nu^{-1})^{1/4}$

$$\Delta = 1 - \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)$$

- ν = Viscosidad del agua
 A = 0.5 del volumen de petróleo \ unidad de longitud de la mancha de petróleo.
 V = Volumen de la mancha de petróleo
 σ = Tensión superficial del petróleo

La constante de decaimiento K se puede expresar en términos de la vida media λ por medio de la siguiente ecuación :

$$K = \frac{[-\ln(1/2)]}{\lambda} \quad (11)$$

La fracción de petróleo re-arrastrada dentro del cuerpo de agua durante cada intervalo de tiempo esta dado por la siguiente ecuación :

$$\frac{(V_1 - V_2)}{V_1} = 1 - e^{-k\Delta t} = 1 - e^{-\Delta t / \lambda} \quad (12)$$

En la cual,

V_1 = Volumen de petróleo en la orilla, m^3

DV = Volumen de petróleo re-arrastrado durante Δt

K = Constante de decaimiento o descomposición

λ = Vida media.

- **Evaporación.** Para calcular las pérdidas por evaporación se utilizó la teoría desarrollada por Mackay y Trudel y Mackay y Nadeau que considera la mancha de petróleo formada por un promedio de todas las fracciones presentes en ella. Acorde con esta teoría la fracción de volumen de petróleo evaporada se determina por la siguiente ecuación:

$$F = \left(\frac{1}{C} \right) \left[\ln P_o + \ln (CE + 1 / P_o) \right] \quad (13)$$

En la cual,

$E = K_E t$, es el término de la *exposición de evaporación*, el cual varía con el tiempo y con las condiciones ambientales;

$$K_E = \frac{K_M A V_m}{(RT V_o)} \quad (14)$$

K_M	=	Coefficiente de transferencia másico, $m/s = 0.0025 U_v^{0.78}$
U_v	=	Velocidad del viento en m/s
A	=	Area del derrame, m^2
V_m	=	Volumen molar, m^3/mol
T	=	Temperatura superficial del petróleo en $^{\circ}K$, la cual es generalmente cercana a la temperatura ambiente del aire T_E .
T_E	=	Temperatura ambiente
V_o	=	Volumen inicial del derrame, m^3
F	=	Fracción evaporada en el tiempo t

La presión de vapor inicial en atmósferas a la temperatura T_E se determina de :

$$\ln P_o = 10.6 \left[1 - T_o / T_E \right] \quad (15)$$

En la cual,

T_o = Punto de ebullición inicial, $^{\circ}K$.

La constante C se determina por la relación $T_E C = \text{constante}$ Para petróleos crudos de diferente gravedad API (American Petroleum Institute), C y T_o a $T_E = 283^{\circ}K$ se calcula por las siguientes relaciones obtenidas de ajuste de curvas.

$$C = 1158.9 API^{-1.1435} \quad (16)$$

$$T_o = 542.6 - 30.275 API + 1.565 API^2 - 0.03439 API^3 + 0.002604 API^4 \quad (17)$$

El volumen molar de petróleo requerido en la ecuación 14, puede variar entre $150E-6$ y $600E-6 m^3/mol$ dependiendo de la composición del petróleo. Se recomienda un valor de $200E-6 m^3/mol$ para aceites combustibles.

- **Disolución.** Cohen y otros, desarrollan un método para calcular la tasa de disolución total el cual se utiliza en este modelo.

$$N = K_d A_s S \quad (18)$$

En la cual,

N	=	Tasa total de disolución de la mancha, g/h .
K_d	=	Coefficiente de transferencia másico, generalmente se asume igual a $0.01 m/h$.
A_s	=	Area de la mancha, m^2 .
S	=	Solubilidad del petróleo en agua, g/m^3 .

Para un petróleo la solubilidad se puede calcular por la siguiente ecuación

:

$$S = S_o e^{-0.1t} \quad (19)$$

En la cual,

S_o	=	Solubilidad del petróleo fresco (sin degradar),
t	=	Tiempo en horas. Huang y Monastero, sugieren un valor típico de $30 g/m^3$ para S_o .

- **Emulsificación.** En este trabajo el proceso de emulsificación se aproxima por una expresión simple de primer orden de la siguiente manera:

$$D = K_{EMUL} V_o \quad (20)$$

Donde :

D	=	Tasa de formación de la emulsión, cm^3/s
K_{EMUL}	=	Constante de emulsificación, s^{-1}
V_o	=	Volumen de petróleo en la mancha, cm^3

El valor de K_{EMUL} se estima de un rango de 10% al 60% por día dependiendo del estado de agitación del agua y de la velocidad del viento (figura 2).

Valores de 15, 25, 35, y 45 en porcentaje por día

corresponden a Menor (2), Medio (4), Alto (7), y Muy alto (7+).

- **Predicción de propiedades del petróleo.** Se emplea ecuaciones desarrolladas por Mackay y otros para predecir el cambio en la densidad y en la viscosidad del crudo.

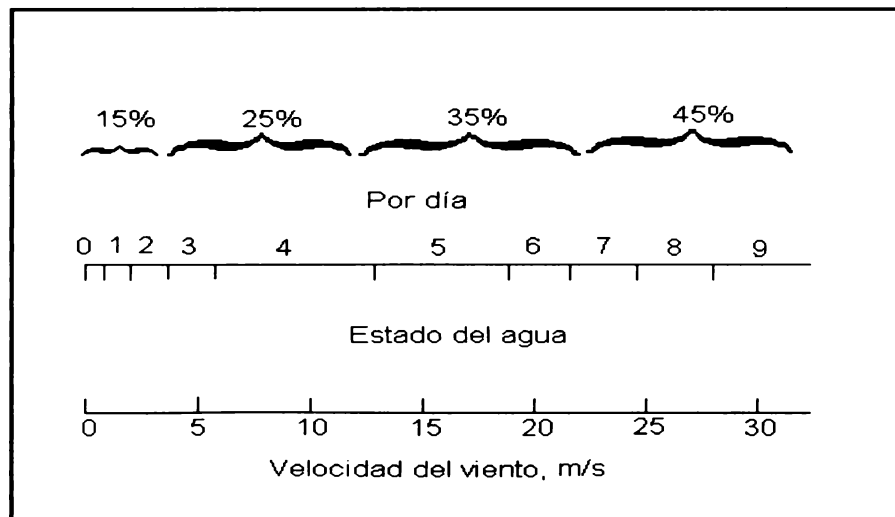


FIGURA 2.

Correlación entre el estado del agua, velocidad del viento y constantes de dispersión.

- **Viscosidad.**

$$\mu = \mu_o * \text{Exp}(v_1 * Fv) \text{Exp}[v_2 (1/T_k - 1/T_{ko})] \quad (21)$$

Donde:

μ	=	Viscosidad del petróleo a T_k y Fv (m Pa.s)
μ_o	=	Viscosidad del petróleo fresco a T_{ko} (m Pa.s)
v_1, v_2	=	Constantes
Fv	=	Fracción de petróleo remanente.
T_k	=	Temperatura del petróleo (Kelvin)
T_{ko}	=	Temperatura estándar (Kelvin)

v_1 representa la tasa a la cual la viscosidad incrementa con el incremento en el porcentaje de volumen evaporado.

v_2 representa la tasa a la cual la viscosidad decrece, con el incremento en temperatura. El valor para la constante de viscosidad v_2 se fija en un rango de 5000 a 9000 con el valor de 5000 como el más recomendado, y el valor de v_1 se estima por medio de la siguiente ecuación:

(22)

$$v_1 = 1.5 \mu_o^{0.5}$$

- **Densidad.** El cambio en la densidad debido a la evaporación está relacionado linealmente con la fracción evaporada y con la temperatura por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_o + C_1 Fv - C_2 (T_k - T_{ko}) \quad (23)$$

ρ	=	Densidad de la mezcla agua - petróleo
ρ_o	=	Densidad del petróleo fresco a una temperatura estándar.
C_1, C_2	=	Constantes ajustadas empíricamente que teóricamente dependen de la naturaleza del material derramado.
C_1	=	0.008 (1/ K)
C_2	=	0.18

4. SISTEMATIZACIÓN DEL MODELO

Para la simulación del comportamiento físico del derrame, se realizó un programa de computador (COLSPILL – 1.0), el cual permite entrar datos, encontrar la solución (proceso de simulación) y finalmente observarla en forma tabulada. En cuanto a su manejo el programa es amigable al usuario, permitiendo editar la información de manera

- *Colspill – Sistema considerado.* Río y lago.
- *Colspill – Presentación de resultados.*

Opciones 2 – 9. Al seleccionar una de estas opciones, el subprograma despliega unas ventanas cada vez que se avanza dentro del él. Estas se denominan de la siguiente manera:

- *Colspill – Geometría de la Mancha.* Esta permite seleccionar la geometría que presenta la mancha descrita por una escala simple así: Geometría radial y geometría rectangular.
- *Colspill – Fases de Esparcimiento.* En esta se seleccionan las fases de esparcimiento de la mancha de la siguiente forma: Gravitacional – inercial, gravitacional – viscosa y Gravitacional – tensión superficial.
- *Colspill – Condición del Derrame.* Puede ser: Derrame Instantáneo (Cantidad total derramada) y Derrame Continuo (Cantidad total derramada, Tasa del derrame y Duración del derrame).
- *Colspill – Entrada de Datos.* Se ingresan los datos para alimentar el subprograma enlazado a estas opciones: Propiedades físicas del producto derramado (Densidad, viscosidad, tensión superficial y volumen molar), Propiedades del agua (Densidad y viscosidad) y Condiciones ambientales imperantes en la zona del derrame (Velocidad del viento, temperatura del ambiente, descripción de la orilla y estado de agitación del agua).
- *Colspill – Retención en la Orilla.* En esta ventana se pregunta si existe retención en la orilla, de ser verdadera la respuesta se pasa a una ventana donde se muestran los diferentes tipos de orilla en caso contrario el programa lo lleva a presentación de resultados.
- *Colspill – Presentación de resultados.*

Opción 10. Es la ejecución de la simulación completa que van de la opción 2 a la 9.

5. RESULTADOS DEL MODELO

El modelo para un canal de sección rectangular de 500 m de longitud (dirección oeste – este) y de 100 m de ancho. Los resultados de dos casos se presentan en este trabajo. En el primer caso, se simula un volumen de petróleo derramado de 18°API en la frontera oeste del

canal considerando la acción del viento en la dirección de flujo. En el segundo caso se simula el mismo volumen derramado (con gravedad API de 40°) que en el primer caso con la diferencia de que se considera la acción del viento en dirección contraria a la dirección de flujo. El sistema de referencia utilizado para establecer la dirección del desplazamiento en este trabajo es un plano cartesiano con el punto de inicio del derrame en la coordenada (0,0).

En los resultados obtenidos de la ejecución del programa se observa que estos muestran coherencia y consistencia con el modelo desarrollado. Evaluando el comportamiento del área y el espesor del mancha de petróleo para cada intervalo de tiempo, se tiene: Para el caso No. 1 que el volumen remanente disminuye y el área tiende a aumentar dando como resultado una disminución en el espesor de la mancha, para el caso No. 2 el espesor disminuye hasta valores cercanos a 0, el comportamiento para el área en este segundo caso los incrementos son altos en las primeras siete horas donde alcanza su valor mas alto y luego el valor del área ya solo depende del volumen remanente y del tiempo. Comparando los resultados en ambos casos se puede decir que en el caso No. 1 el área es mayor que en el caso No. 2. Esto concuerda con las propiedades del crudo ya que el crudo del caso No. 1 es un crudo mas pesado y por lo tanto con un mayor volumen remanente. Con respecto a las demás propiedades el comportamiento se ajusta a lo esperado: Evaporación mayor en el caso No. 2, mayores espesores y emulsificación en el caso No. 1. (Tabla 2 y Figura 4).

Caso No. 1				Caso No. 2		
Tiempo (h)	Espesor (cm)	Area (m ²)	% Total Evaporado	Espesor (cm)	Area (m ²)	% Total Evaporado
1	341	2925	2.53	187	5346	11.3
2	198	4857	5.85	103	8468	23.9
3	142	6470	9.59	69	10627	36.3
4	111	7867	13.58	50	12070	47.5
5	90	9093	17.68	37	12947	57.4
6	76	10175	21.81	28	13376	65.8
7	65	11132	25.92	22	13458	72.7
10	43	13766	13.69	9	12503	86
12	34	14445	44.83	4	11623	90.4
18	17	16247	62.01	0.1	11671	93.8
24	8	16935	72.92	0	15180	100

TABLA 2.
Área, espesor y porcentaje de volumen evaporado de la mancha para cada caso

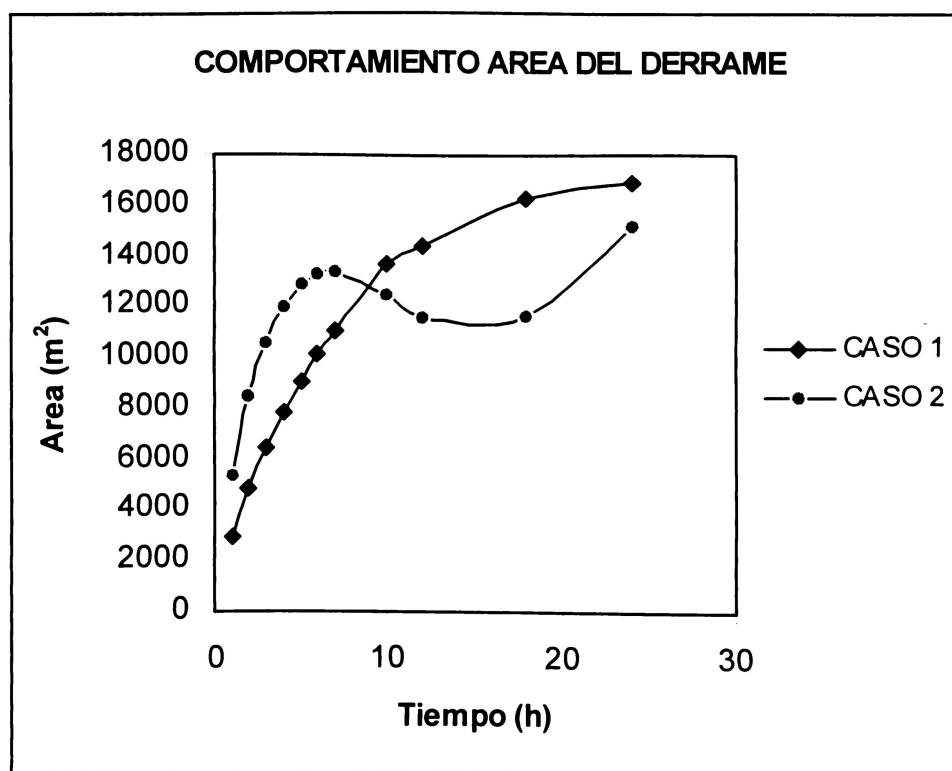


FIGURA 4.
Comportamiento del área de la mancha de petróleo en el tiempo.

6. CONCLUSIONES

- El COLSPILL es una herramienta de apoyo en caso de derrames en ríos y permite, al grupo de respuesta, seleccionar los equipos adecuados para la limpieza y recolección del petróleo derramado, así como, la trayectoria del derrame.
- La predicción del comportamiento físico de derrames de hidrocarburos en sistemas de agua dulce, es la base para la formulación de cualquier modelo que pretenda obtener predicciones de fenómenos advectivos como transporte de contaminantes y productos químicos en general.
- El modelo COLSPILL se muestra viable para modelar este tipo de fenómenos por la sencillez y claridad del sistema de entrada de datos y porque su algoritmo de cálculo considera la influencia de las corrientes sobre el derrame, lo que permite describir su influencia en los procesos de transporte de materia.
- La procedencia, exactitud y las limitaciones de cada grupo de datos de entrada determina, en gran medida, la calidad y exactitud de la predicción que efectúa el modelo. Hay que destacar que es difícil determinar con exactitud los datos de entrada por la variación en el tiempo de las condiciones reales existentes en el escenario del derrame.
- El modelo COLSPILL representa con aproximación satisfactoria el fenómeno real y puede ser empleado en la simulación del comportamiento físico de otros contaminantes, con las características descritas. Además se considera de vital importancia el desarrollo y aplicación de modelos de este tipo como aporte de la investigación a la solución de la problemática de la contaminación por vertimientos en sistemas de agua dulce.

7. BIBLIOGRAFIA

- Tsahalidis, D.T. 1979. Contingency Planning for Oil Spill: Riverspill - a River Simulation Model. In Proceeding of the 1979 Oil Spill Conference, Washington, D.C., American Petroleum Institute, 80p.
- Fay, J.A. 1969. The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. Fluid Mechanics Laboratory, Department of Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, pp. 53-64.
- Fay, J.A. 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. Proc. Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Sponsored By API, EPA, and USCG, Washington, D.C., American Petroleum Institute, pp. 463 - 467.
- Shen, H.T., Yapa, P.D. and Petrosky, M.E. 1987. A Simulation Model for Oil Slick Transport in Lakes. Water Resources Research, Vol. 23, No.10, Paper No. 7W4841, pp. 1949-1957, October.
- Shen, H.T. and Yapa, P.D. 1988. Oil Slick Transport in Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Paper No. 22409, Vol. 114, No. 5, pp. 529 - 543, May.
- Yapa, P.D., Shen, H.T. and Angamman, K.S. 1993. Modeling Oil Spill in a River - Lake System. Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, N.Y., Report. No. 93 - 1, January, 95p.
- Huang, J.C. and Monastero, F.C. Review of the State of Art of Oil Spill Simulation Models. Final Rep. Submitted to the Am. Petr. Inst., Raytheon Ocean Systems Co., East Providence, R.I., Washington, D.C., June, 319p.
- Stolzenbach, K.D., Mudsén, O.S., Adams, E.E., Pollack, A.M., and Cooper, C.K. A. 1982. Review and Evaluation of Basic Techniques for Predicting the Behavior of Surface Oil Slicks. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, Report No. MITSG 77 - 78, March, 1977, 324p.
- Shen, H.T., Yapa, P.D. and Petrosky, M.E. 1987. A Simulation Model for Oil Slick Transport in Lakes. Water Resources Research, Vol. 23, No.10, Paper No. 7W4841, pp. 1949-1957, October.
- Madsen, O.S. 1977. Wind Driven Currents in an Infinite Homogeneous Ocean. To Appear in J. Phys Oceanography, pp. 248 - 255, July.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. 1979. Mixing in Inland and Coastal

- Waters. Academic Press, New York, 483p.
- Sayre, W.W. and Chang F.M. 1969. A Laboratory Investigation of Open-Channel Dispersion Processes for Dissolved, Suspended, and Floating Dispersants, U.S.G.S. Professional Paper 433-E, 71p.
- Okubo, A. 1962. A Review of Theoretical Models of Turbulent Diffusion in Sea. Chesapeake Bay Institute, Johns Hopkins University, Technical Report No. 30, 105p.
- Shen, H.T. and Yapa, P.D. 1988. Oil Slick Transport in Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Paper No. 22409, Vol. 114, No. 5, pp. 529 - 543, May.
- Shen, H.T., Yapa, P.D. and Petroski, M.D. 1990. Simulation of Oil Slick Transport in Great Lakes Connecting Channels, Theory and Model Formulation. CRREL, Report 90 - 1, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, February, 30p.
- Gundlach, E.R. and Hayes, M.D. 1978. Vulnerability of Coastal Environments to Oil Spill Impacts. *Marine Technology Soc. J.*, Vol.12, No. 4, pp. 18-27, April.
- Gundlach, E.R. 1987. Oil Holding Capacities and Removal Coefficients for Different Shoreline Types of Computer Simulated Spills in Coastal Waters. *Proc. 1987 Oil Spill Conf.*, AM. Petr. Inst., Washington, D.C., pp. 451 - 457.
- Mackay, D., Paterson, S. and K. 1980. Trudel. A Mathematical Model of Oil Spill Behavior. Environmental Protection Service, Fisheries and Environment, Canada, 67p.
- Mackay, D., Paterson, S. and Nadeau, S. 1980. Calculation of the Evaporation Rate of Volatile Liquids. 1980 National Conference on Control of Hazardous Material Spills. Louisville, Kentucky, pp. 361-368.
- Shen, H.T., Yapa, P.D., and Petroski, M.E. 1986. Simulation of Oil Slick Transport in Great Lakes Connecting Channels. Department of Civil Environmental Engineering, Clarkson University, Postdam, N.Y, Report Nos. 86 - 1 To 86 - 4, Vols. I - IV, 1250p.
- Cohen, Y., Mackay, D., and Shiu, W.Y. 1980. Mass Transfer Rates Between Oil Slick and Water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 58, pp. 569 - 575, October.
- Blaikley, D.R., G.F.L. Dietzel, A.W. 1977. Glass and Vankleef P.J. - a Computer Simulation of Offshore Oil Spills, Cleanup Effects and Associated Costs. Proceedings of the 1977 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, D.C, pp. 45-53.
- Holmes, P.D. 1977. A Model for the Costing of Oil Spill Clearance Operations at Sea. *Proceedings of the 1977 Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spill*. American Petroleum Institute, Washington, D.C, pp. 39 - 44.
- Mackay, D. Shiu, W.Y., and Chau, E. 1983. Calculation of Diffusion Resistances Controlling Volatilization Rates of Organic Contaminants from Water. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.*, 40, Supp. 2, pp. 295 - 303, February.
- Mackay, D. and Leinonen P.J. 1977. Mathematical Model of the Behaviour of Oil Spill on Water with Natural and Chemical Dispersion Report EPS - 3 - EC - 77 - 19, Environmental Protection Service, Fisheries and Environment, Canada.