

Evaluación del Derrame de Crudo de la Línea de Alta Presión de Pozo Sacha SA-78 en el Oriente Ecuatoriano, aplicando Métodos Analíticos de Flujo en Medios Porosos (Ecuaciones de Darcy y Difusividad)

¹J. Jines, ²H. Terán

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Campus "Gustavo Galindo". Km. 30.5 Vía Perimetral, Apartado Postal 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

¹Ingeniero en Petróleo, FICT-ESPOL jjines@espol.edu.ec

²Ingeniero en Petróleo, FICT-ESPOL hteran@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo explica los diferentes métodos para el análisis de flujos en medios porosos y su aplicación en la caracterización de un derrame de hidrocarburos. La evaluación pretende estimar mediante el empleo de las ecuaciones de Darcy y Difusividad, el proceso de avance de los contaminantes en los terrenos aledaños al desastre y cuánto se propagaría si no se hubiera ejecutado las técnicas de remediación correspondientes. El proceso de análisis se efectúa tomando en cuenta factores como flujo radial y continuo, tiempo de exposición del área a los contaminantes. Es necesario hacer algunas suposiciones en diferentes variables de las ecuaciones y su analogía con subsuelo tales como compresibilidad, viscosidad y porosidad. La resolución de la Ecuación de Difusividad se la realiza por medio de la Integral Exponencial, la viscosidad es determinada con la correlación empírica de Edbogah o de petróleo muerto (sin gas en solución). Algunos datos son recopilados de PECS IECONTSA S.A compañía que efectuó los trabajos de limpieza y la Estatal de Petróleos, como ubicación del derrame, características del suelo, petróleo recuperado y datos PVT respectivamente.

Palabra clave: Ecuaciones de Darcy y Difusividad, Flujo Estable, Flujo en Medios Porosos, Correlación empírica de Edbogah, petróleo muerto, datos PVT.

Abstract

This paper explains some methodology to analyze the media porous flux and apply it on the characterization of hydrocarbon spillover. The review claims although of the Darcy and Diffusivity Equations, the process of advanced of these contaminants above ground near to hydrocarbon disaster and how many it spreads if would not applied the remediation techniques. The analysis was performed taking some factors such as radial and continuous flow, the area exposure to the contaminants. Also necessary to did some assumptions on different equation's variables such as compressibility, viscosity and porosity. The Diffusivity's Equation resolved although of the Exponential Integral, so viscosity was performed with Edbogah's empirical correlation or dead oil (without gas dissolver). Some data were collected of PECS IECONTSA S.A Company; it did the cleaner's hardships and Government Oil Company such as spill locate, ground's features, oil recovered and PVT data respectively.

Keyword: Darcy's, Equation, Diffusivity's Equation, Steady Flow, Media Porous Flow, Edbogah's Empirical Correlation, dead oil, Diffusivity's Equation, PVT data.

1. Introducción

Buena parte de la producción hidrocarburífera del Ecuador se hace a través de largas líneas de tubería de acero que transportan no solo petróleo crudo sino diferentes derivados del mismo, el desgaste de las líneas se origina por efectos de la corrosión o atentados ocasionados por moradores

del sector, provocando derrames que afectan los diferentes ecosistemas ahí establecidos. Los estudios que se realizan sobre contaminación por hidrocarburos en forma general no tienen un sustento que permita identificar cómo la propagación de un derrame se desarrolla en el tiempo y si la remediación no se efectúa con todas las normas establecidas, se puede omitir residuos de combustible considerables en la zona. Esto

incidirá que el frente de contaminación se prolongue y aunque sea mínimo se mantenga presente en las áreas afectadas. Se prevé realizar un estudio detallado de estos avances de hidrocarburo mediante el análisis de las Ecuaciones de Darcy y Difusividad para Flujo en Medios Porosos, en este caso suelos contaminados (considerado como el lugar donde el flujo se desarrolla en analogía con el flujo desarrollado en subsuelo). Es por esto que se ve la necesidad de asumir, proponer e interpretar a través de algún documento el fenómeno que se produce en el medio, analizando las principales variables que afectan los resultados tales como permeabilidad, radio de drenaje, viscosidad, entre otras y que al aplicarlas en las ecuaciones antes mencionadas lleguemos a establecer cuánto (radios-longitud) el avance de la contaminación se extiende.

1.1 Objetivos

- Establecer un modelo que muestre el avance radial producido por la contaminación de hidrocarburos sobre un medio subsuperficial poroso.
- Analizar las diferentes variables involucradas en las ecuaciones de Darcy y Difusividad cuando son aplicadas en un medio subsuperficial poroso.

1.2 Ubicación del Sitio del derrame

El siniestro se presentó en el sector “Y” de la Parker el día 11 de junio de 2002, debido a una fisura de 60 cm en la línea de 5 pulgadas de inyección del Pozo Sacha No. 78 correspondiente al Campo Sacha del Distrito Amazónico con el posterior derrame de crudo. La dispersión de crudo se dirigió hacia el sector antes mencionado junto al estero S/N en una extensión aproximada de 5.5 km dentro de las cuales se estimó un área aproximada de 15.300 m² de limpieza de crudo en suelos con vegetación, 12.000 m² de limpieza de crudo en riberas, 3.000 m² de zonas inundables y pantanosas y se estimó una recolección de 900 barriles de crudo en río.

2. Reglamentos ambientalistas para remediación

El suelo lavado y tratado debe cumplir con los parámetros requeridos por el reglamento Ambiental para operaciones hidrocarburíferas en

el Ecuador (Decreto Ejecutivo N°1215, publicado en el Registro Oficial N° 265 del 13 Febrero de 2001), (para zonas de uso agrícola, TPH menor a 2500mg/kg.). La contratista es responsable de cualquier daño ambiental que pudiera generarse como consecuencia de los trabajos de remediación del derrame.¹ La compañía encargada de los trabajos de remediación debe alcanzar estos parámetros mínimos que establece el presente decreto. La Tabla 1 detalla los resultados de los análisis realizados a muestras de suelo en fechas diferentes verificando los límites mínimos permisibles de cada contaminante ajustándose de esta forma a la norma de decreto y mencionada anteriormente.



Figura 1. Lavado del suelo contaminado

Se continuaron realizando labores de limpieza para eliminar cualquier residuo sobre suelo contaminado con trabajos de desbroce y recolección de basura vegetal contaminada y el avance de remediación alcanzó el 100% del trabajo total ejecutado.

En la figura 2 mostramos la ubicación del sitio del desastre.

¹ Instructivo para la Calificación y Registro de Consultores Ambientales Hidrocarburíferos. Acuerdo N°141 de 04 de Abril de 2001.

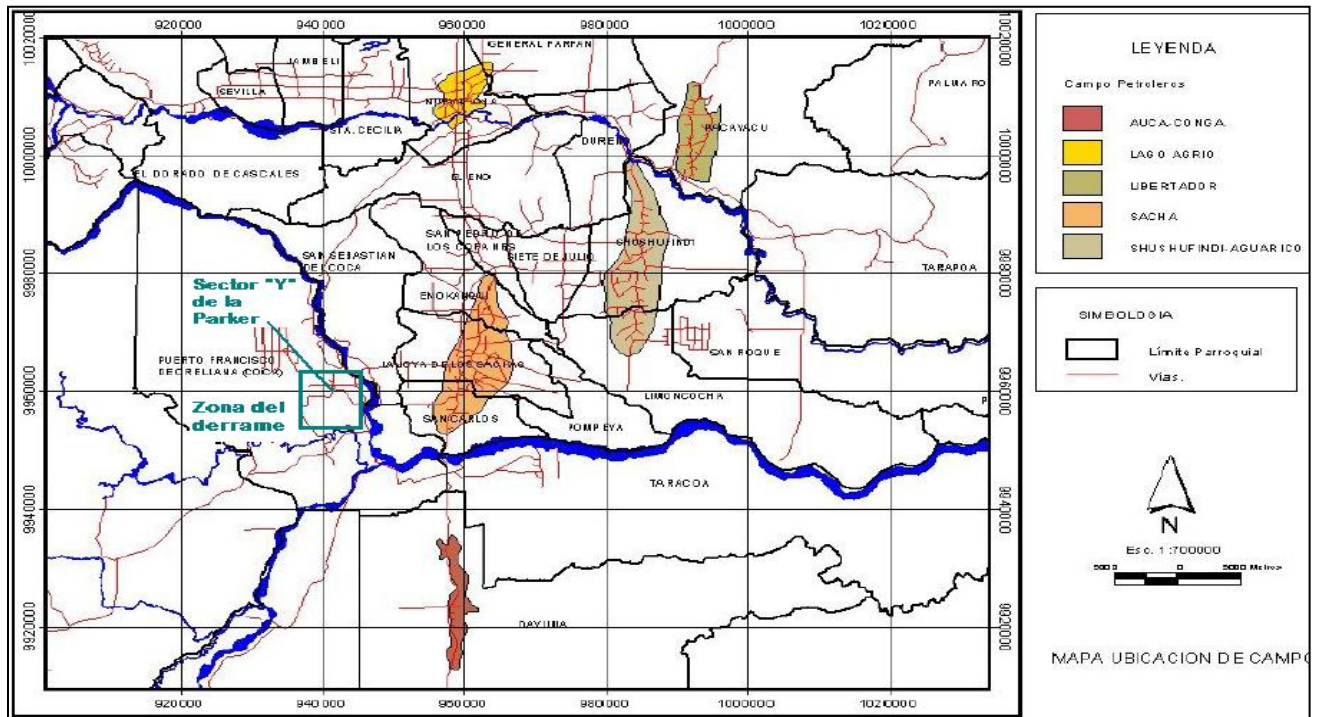


Figura 2. Ubicación de la zona en donde se provocó el derrame

Tabla 1. Análisis de muestras de suelo (Resultados Analíticos)

Parámetros	Límites Permisibles	M1 (14/06/02)	M2 (14/06/02)	M3 (14/06/02)	M4 (14/06/02)	M5 (14/06/02)	M6 (14/06/02)	M7 (17/06/02)	M8 (17/06/02)	M9 (17/06/02)	M10 (17/06/02)
Profundidad (m)		1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192
TPH (mg/Kg)	<2500	1468.82	552.35	2948.19	162.58	211.84	157.12	143.74	355.24	163.12	135.35
HAPs (mg/Kg)	<2	1.45	1.65	1.56	1.43	1.6	1.55	1.32	1.27	1.24	1.26
Cadmio (mg/Kg)	<2	0.36	0.33	0.35	0.36	0.46	0.33				
Níquel (mg/Kg)	<50	9.06	11.33	7.64	9.26	7.82	5.46				
Plomo (mg/Kg)	<100	15.17	5.03	10.7	8.73	7.66	4.69				

Nota1 : Las muestras fueron tomadas en la propiedad del Sr. Juan Ortiz (Sector "Y" de la Parker)

Nota2 : Los análisis se realizaron en Laboratorios de la Universidad Central del Ecuador

3. Solución Técnica de remediación

La técnica utilizada en la limpieza y tratamiento del Derrame del Sector “Y” de La Parker fue mediante la aplicación del producto PECS y lavado de la zona afectada con equipos especializados (Bombas de Caudal y de Presión). *El lavado de los suelos contaminados y zonas inundables se realizó in situ, mediante un Sistema de Drenaje (Espinas de Pescado), para un mejor lavado y recuperación del crudo.* El crudo fue retenido y controlado mediante Barreras de PVC, para ser recuperado y transportado en tanques metálicos de 55 galones a la Planta de Tratamiento de PECS IECON TSA S.A. (empresa contratada para remediación) que se encuentra ubicado en el campamento Base de la Joya de Sachas. El tratamiento y eliminación de la vegetación contaminada se realizó en el Centro de Disposición Final de Petroproducción. La siguiente figura muestra los trabajos que la empresa remediadora efectuó en la zona afectada, tómese en cuenta los tanques de recuperación de crudo.



Figura 3. Detalle de la técnica de remediación

4. Características del área afectada

En la Tabla 2 se detalla los aspectos físicos y bióticos que presentaba la zona afectada por el derrame en el sector “Y” de la Parker.

Tabla 2. Características físicas del área expuesta al derrame

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Suelo	Tipo de suelos (con/sin capa vegetal): arcilla plástica expansiva, limo arenoso y sectores de arena
Agua	El sector afectado va desde el denominado Y de La Parker en la vivienda del Sr. Juan Ortiz hacia el Estero S/N.

En la tabla anterior se describe las características del suelo donde se produjo el derrame.

A continuación se detallan en tablas 3 y 4 todas las especies de flora y fauna que se encontraron expuestas a la contaminación en el sector del siniestro. Se enfatiza en la descripción por Nombre Común y Nombre Científico de las especies involucradas.

Tabla 3. Especies de flora expuesta al derrame

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
Camizales	<i>Cortaderia selloana</i>
Platanillos	<i>Heliconia bihai</i>
Lechuguines	<i>Pistia stratiotes</i>

Tabla 4. Especies de fauna que son expuestas al derrame

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
CULEBRAS	
Culebras	<i>Amphisbaena alba</i>
MONOS	
Monos Araña Negro	<i>Ateles fusciceps robustus</i>
Monos Araña Colorado	<i>Ateles geoffroyi griseus</i>
Mono chorongo	<i>Lagothrix lagothricha</i>
MAMÍFEROS	
Jabali	<i>Dicotyles pecari</i>
AVES	
Filuco	<i>Nyctibius</i>
Guacamayo Roco	<i>Ara macao</i>
Loro	<i>Ara severa</i>
PECES	
Paiche	<i>Arapaima gigas</i>



Figura 4. Toma de muestras en suelo contaminado

5. Planteamiento del problema

El problema a resolver se orientó principalmente a estimar mediante un modelo matemático el avance de un frente de contaminación (distancia radial) cuando se ha producido un derrame de petróleo en un determinado medio poroso subsuperficial (suelo para el caso de estudio). El avance del flujo de fluidos hacia un pozo de hidrocarburo perforado se estudia en analogía para un derrame producido en superficie, en este caso el flujo se dirige o se expande hacia los alrededores. Ver diferencias en figuras 5 y 6.

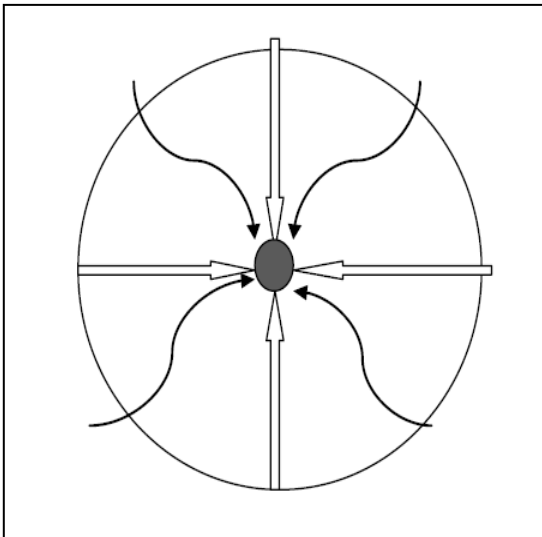


Figura 5. Esquema de la dirección de flujo hacia un pozo petrolero. Flujo radial.

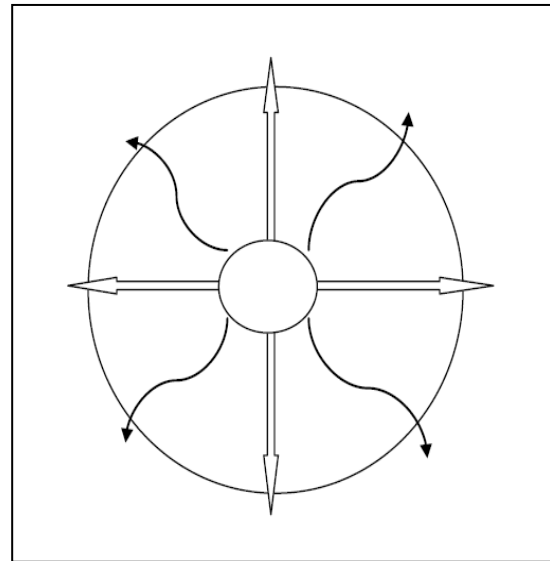


Figura 6. Dirección del flujo para el problema planteado. El círculo de la mitad interpreta a la tubería.

6. Metodología

El sitio que se escoge para la realización del estudio es una zona muy propensa (como el Sector “Y” de la Parker) a los derrames y en donde la remediación podría ser dudosamente exitosa, se toma una parte específica en un terreno aledaño a la línea de la tubería averiada; en este sector, realizando un radio hipotético que se supone fue en donde las primeras gotas de aceite cayeron cuando la tubería se rompió, este radio nos servirá como el punto de partida en que empieza a diseminarse el fluido en el medio poroso (suelo), se calcula en primer lugar la permeabilidad a través de la ecuación de Darcy, asumiendo flujo radial, continuo y estable, para fluidos incompresibles y de sistemas ilimitados. El modelo será para un yacimiento infinito, es decir que no toca la frontera. A pesar que la presión varía con el tiempo, para este modelo se asumirá el diferencial de presión constante en el mismo para los respectivos cálculos. Así la permeabilidad calculada con Darcy la consideraremos absoluta. El valor de viscosidad en este tipo de estudios es significativa, hidrocarburos con viscosidades altas, tienen razones de movilidad mínima en el avance de la contaminación referenciándose por otra parte a fluidos con viscosidades bajas cuyo frente de contaminación es mayor, obteniéndose el valor de la ecuación de Edbogah, igualdad empírica para determinar viscosidades de petróleo muerto, es decir sin gas en solución, siendo la más aproximada para las condiciones de superficie

donde se desea calcular el avance. La resolución de la ecuación de Difusividad (Ecuación Diferencial Parcial de Segundo Orden), la realizamos por intermedio de una aproximación que contiene la variable E_i cuyos valores se los obtiene del gráfico que contiene las soluciones de la Integral Exponencial (ver gráfica 8), y tiempo adimensional, estos valores se tomarán como definitivos e invariables en el tiempo para determinadas características del crudo derramado. Así tomamos en cuenta que el flujo permanece sin modificación en un medio isotrópico a temperatura constante. Se obtendrán en los resultados finales radios de avance de contaminación para comprobar con los valores estimados en la remediación efectuada por la empresa contratada para el mismo.

7. Análisis del Avance en el derrame

7. 1. Análisis con la Ecuación de Darcy:

Mediante la ecuación de Darcy analizaremos y evaluaremos la condición del derrame sobre el lecho, considerando flujo radial incompresible, isotropía de la zona afectada (arcilla plástica y limo arenoso medianamente compactados), gravedad de crudo Oriente de 28°API, permeabilidad relacionada con la tasa de flujo (crudo derramado), área y radio en zona afectada, estos datos fueron tomados por la empresa PECS IECONTSA S.A. que realizó la remediación. A continuación se detalla el procedimiento:

Ley de Darcy:

$$q = -0.001127 \frac{kA}{\mu\beta} \frac{dP}{dr} \quad \text{Ec. 7.1.1}$$

Flujo Radial Incompresible

Con las respectivas suposiciones y sustituciones tenemos:

$$v = \frac{q}{A} \quad \text{Ec. 5.2.2}$$

$$v = \frac{900 \text{ bbl/día}}{251328 \text{ ft}^2}$$

$$v = 0.003581 \text{ bbl/día/ft}^2$$

El signo menos (-) en la ecuación que define la velocidad, nos representa el fluido dirigiéndose contra el flujo. En los datos que se obtuvieron y midieron son aquellos refiriéndose a la cantidad que se contrató para la remediación. Tabla N°5, código ítem IF2.1AN (Limpieza de crudo en suelo con vegetación).

Tabla 5. Códigos para diferentes zonas en el área de remediación

Código de Ítem	Descripción de Ítem	Cantidad Contratada (m)
IF2.1AN	Limpieza de crudo en suelo con vegetación	15.000
IF3.BN	Limpieza de crudo en riberas de ríos	12.000
IF3.CN	Limpieza de crudo en zonas inundables y pantanos	3.000
IF4.BN	Recuperación de crudo en ríos BSW 20%	900 Bls.
No existe	Lavado de lecho de estero	No existe

De la tabla N°5 se puede anotar los siguientes trabajos realizados.

- Se realizaron trabajos de desbroce y recolección de basura vegetal contaminada.
- Se realizó recuperación de crudo
- Se trabajó en lavado de riberas.
- Lavado de lecho del estero

De lo anterior describimos a continuación las variables de las ecuaciones:

v = velocidad (bbl/día/ft²)
 k = permeabilidad del medio circundante (md)
 μ = viscosidad del petróleo (cp)
 β = factor volumétrico del petróleo (bbl/STB)
 dr = distancia radial (pies)
 dP = Diferencial de presión (psia)
 A = $2\pi * r$ (radio del área cubierta por la contaminación * h (profundidad) = $2\pi * (15000 \text{ m} * 1.2192 \text{ m}) = 114907.1616 \text{ m}^2 = 1236850.394 \text{ ft}^2$ (Limpieza de crudo en suelo con vegetación)
 h = 4 pies \approx 1.2192m (profundidad o espesor hasta donde se encontró crudo, aproximadamente para efectos de cálculo)
 Δr = 15 km = 49212.5984 ft
 ΔP = 14.7 psia (diferencial de presión considerada para el caso, condiciones de superficie)
 q = 900 bbl/día (volumen de crudo recuperado, según reporte de empresa remediadora del desastre).

7.2. Cálculo de viscosidad del petróleo derramado.

La viscosidad se la calcula mediante la correlación empírica de Edbogah⁽²⁾ para petróleo muerto (dead oil), en presiones muy inferiores a presión de burbuja (nosotros consideramos a condiciones estándares; 14.7 psia)

$$\begin{aligned} \log_{10}[\log_{10}(\mu_{od} + 1)] \\ = 1.8653 - 0.02586\rho_{o,API} \\ - 0.5644 \log(T^{\circ}F) \quad \text{Ec. 7.2.1} \end{aligned}$$

Ecuación que se usa para rangos de valores que van desde:

$$59 < T(^{\circ}F) < 176$$

$$5 < \rho_{o,API} < 58.0$$

Donde:

μ_{od} = viscosidad de petróleo muerto (sin gas en solución), cp

T = Temperatura, °F (100°F ≈ 37.77°C)

$\rho_{o,API}$ = densidad API del petróleo (28°API)

Lo que obtenemos resolviendo:

$$\begin{aligned} \log_{10}[\log_{10}(\mu_{od} + 1)] \\ = 1.8653 - 0.0258(28) \\ - 0.5644 \log_{10}(100) \end{aligned}$$

$$\mu_{od} = 8.2637 \text{ cp}$$

Calculamos la permeabilidad mediante de la ecuación de Darcy ya establecida:

$$k = 887.3114 \frac{q\mu\beta\Delta r}{A\Delta P} \quad \text{Ec. 7.2.2}$$

$$\begin{aligned} k \\ = 887.3114 \frac{900 \left(\frac{bbl}{día}\right) (8.2637 \text{ cp}) \left(1 \frac{bbl}{stb}\right) (49212.5984 \text{ pies})}{1236850.394 \text{ pies}^2 (14.7 \text{ psia})} \end{aligned}$$

$$k = 17862.2038 \text{ md}$$

Con factor volumétrico de formación considerado a: $B = 1.00 \text{ bbl/stb}$

7.3. Análisis con Ecuación de Difusividad para flujo radial

Mediante la ecuación de Difusividad se calcula la extensión de la contaminación, este dependerá de las características edafológicas como porosidad, así también variables propias del fluido

contaminante como compresibilidad y viscosidad además del tiempo de exposición de los alrededores a dicho fluido. El modelo usado es flujo radial en estado continuo de líquidos compresibles. Se toma en cuenta que el flujo no se dirige hacia un pozo, sino que el flujo se expande en un terreno. La flecha indica la dirección del flujo.

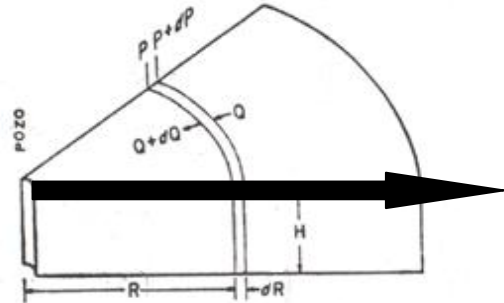


Figura 7. Esquema de una sección radial de flujo

De la figura anterior, verificamos su volumen en el elemento anular:

$$V = \frac{2\pi r(dr)h\phi}{5.615} \quad (bbl) \quad \text{Ec. 7.3.2}$$

El valor de compresibilidad del fluido se obtiene:

$$C = \frac{dV}{VdP} \quad \text{Ec. 7.3.3}$$

Despejando dV tenemos:

$$dV = -CVdP$$

Reemplazando el volumen (Ec. 7.3.2) en ecuación anterior:

$$dV = -\frac{2\pi r(dr)h\phi C dP}{5.615} \quad \text{Ec. 7.3.4}$$

Derivando el volumen con respecto al tiempo, observamos:

$$dq = \frac{dV}{dt} = -\frac{2\pi r(dr)h\phi C}{5.615} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{Ec. 7.3.5}$$

Reordenando la ecuación tenemos:

$$\frac{dq}{dr} = -\frac{2\pi r h \phi C}{5.615} \frac{\partial P}{\partial t} \quad [1]$$

El producto $C\phi$ sería: a) el producto de la compresibilidad promedio de los fluidos y la porosidad total o b) la compresibilidad efectiva de

la fase móvil y el espacio poroso ocupado por la misma (porosidad de la fase móvil).

Donde h es el espesor de la capa contaminada.

Ahora aplicando la ley de Darcy:

$$q = \frac{-7.08khr}{\mu} \frac{dP}{dr}$$

Derivando la ecuación de Darcy para el tiempo el radio tenemos:

$$\frac{dq}{dr} = \frac{-7.08kh}{\mu} \left(r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad [2]$$

Luego igualamos las ecuaciones 1 y 2:

$$-1.119h\phi C \frac{\partial P}{\partial t} = -7.08 \frac{kh}{\mu} \left(r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{\partial P}{\partial r} \right)$$

Despejando y reordenando tenemos:

$$\frac{-1.119r\phi C\mu}{-7.08k} \frac{\partial P}{\partial t} = \left(r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{\partial P}{\partial r} \right)$$

Dividiendo para el radio r , obtenemos:

$$0.16 \frac{\phi C\mu}{k} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \quad \text{Ec. 7.3.6}$$

A la que denominamos Ecuación de Difusividad para flujo radial en estado continuo y estable.

Donde:

$$\eta = \frac{k}{0.16\phi C\mu} \quad \text{Ec. 7.3.7}$$

La anterior es la constante de Difusividad Hidráulica.

V = volumen de la porción analizada (bbl)

r = radio de extensión de la contaminación.(pies)

dr = diferencial de radio de extensión de la contaminación.

C = Compresibilidad de fluido (psi^{-1}).

ϕ = porosidad del medio (%).

h = altura del estrato contaminado, por efectos de practicidad se tomará 4 pies ≈ 1.2192 m

dq = diferencial de tasa

t = tiempo (días)

k = permeabilidad del medio (md)

μ = viscosidad del fluido contaminante (cp)

5.615 = factor de conversión a bbl

8. Resolución Ecuación Diferencial Parcial de Difusividad.

Para ello definimos las siguientes variables:

Presión Adimensional definida en función de E_i .

$$P_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{2} E_i \left(-\frac{r_D}{4t_D} \right) \quad \text{Ec. 8.1}$$

Yacimiento infinito, que no toca la frontera

Condiciones para radio infinito:

$$\left. \begin{array}{l} r_w = 0 \\ r_e = \infty \\ p = p_i \end{array} \right\} \frac{r_D}{4t_D} \leq 0.01$$

Definamos también:

Radio Adimensional

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad \text{Ec. 8.2}$$

Donde:

r_D = radio adimensional

r = radio determinado (cualquiera)

r_w = radio del pozo

Tiempo Adimensional

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu Cr_e^2} \quad \text{Ec. 8.3}$$

Donde:

t_D = tiempo adimensional

k = permeabilidad

t = tiempo

ϕ = porosidad

μ = viscosidad

C = compresibilidad

r_e = radio externo (frontera)

A la presión adimensional se la puede definir también en función de diferencial de presión

$$p_D = \frac{kh}{141.2q\beta\mu} (p_i - p) \quad \text{Ec. 8.4}$$

Donde:

p_D = presión adimensional

p_i = presión inicial

p = presión determinada (cualquiera)

Si despejamos el diferencial de presión y reemplazamos de Ec. 6.1 en Ec. 6.4, tenemos:

$$p(r, t) = p_i - 141.2 \frac{q\beta\mu}{kh} \left[-\frac{1}{2} E_i \left(948 \frac{\phi\mu Cr^2}{kt} \right) \right] \quad \text{Ec. 8.5}$$

El diferencial de presión $\Delta P = p(r, t) - p_i$ en este caso debemos asumir como de la presión atmosférica a nivel del mar (14.7psia).

Donde:

$$x = 948 \frac{\phi\mu Cr^2}{kt}$$

ó

$$x = \frac{r^2}{4\eta t}$$

Para resolver esta ecuación diferencial parcial de segundo orden, se introdujo la integral exponencial $Ei(-x)$, para aproximar la solución, que se define con la siguiente serie:

$$Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \left[\ln(x) - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2+2!} - \frac{x^3}{3+3!} \right] \quad \text{Ec. 8.6}$$

Resolviendo esta serie se obtiene la gráfica 8. Con la Ec. 8.5 reordenando y simplificando los términos tenemos:

$$\Delta P = -\frac{q\mu\beta}{14.16kh} Ei(-x) \quad \text{Ec. 8.7}$$

Para las características que presenta el problema planteado, despejando Ei de la ecuación anterior podremos encontrar el radio de avance del derrame con:

$$Ei(-x) = -\frac{14.16kh\Delta P}{q\mu\beta} \quad \text{Ec. 8.8}$$

Reemplazando valores:

$$Ei(-x) = -\frac{14.16(17.8622038D)(4ft)(14.7psia)}{900bbl(8.2637cp)\left(\frac{1.0bbl}{stb}\right)}$$

$$Ei(-x) = -1.9996$$

Verificando la gráfica N°8 adjunta estimamos el valor de x , como sigue:

Si ingresamos con el valor obtenido de $Ei(-x) = -1.9996$ en el eje "abscisa" y cruzamos con la curva, nos dirigimos desde la intersección hasta el eje "ordenado" para leer el valor de :

$$x \approx 0.081$$

Verificando:

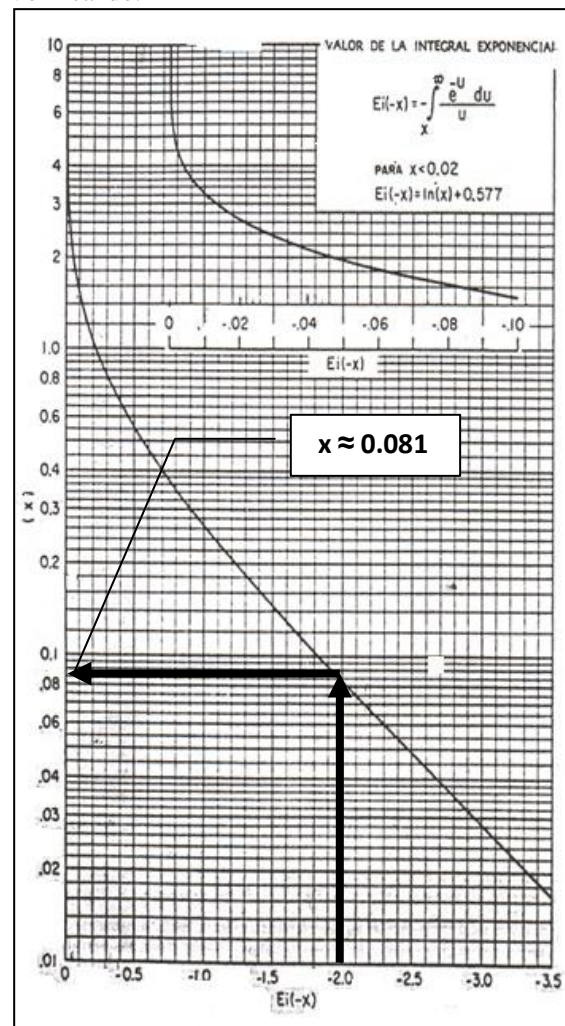


Figura 8. Gráfica para estimar el valor aproximado de integral exponencial

Con este valor aproximado podemos estimar el radio de avance de la contaminación para varios períodos de tiempo en días, para el mismo

tenemos que verificar el valor de la constante de Difusividad Hidráulica η con propiedades tales que:

$$\Phi = 60\%$$

$$C = 6 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$$

El valor de la porosidad es elevado por ser un medio poroso sin estar sometido a compactación (valor aleatorio) por capas sucesivas como sucede en subsuelo.

Por lo tanto:

$$\eta = \frac{k}{0.16\Phi C\mu}$$

$$\eta = 3752606.782$$

y con:

$$x = \frac{r^2}{4\eta t}$$

Despejando el radio;

$$r = \sqrt{4x\eta t} \quad \text{Ec. 8.8}$$

Con ecuación 8.8 obtenemos los diferentes radios de avance de la contaminación, como sigue.

9. Resultados

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultados que se obtienen en el frente de contaminación.

tiempo (días)	radio (pies)	radio (metros)
10	3443,57916	1049,602928
20	4869,95635	1484,362696
30	5964,45406	1817,965599
40	6887,15832	2099,205856
50	7700,07709	2346,983496
60	8435,01183	2570,991606
70	9110,85408	2776,988323
80	9739,9127	2968,725392
90	10330,7375	3148,808784
100	10889,5534	3319,135891
110	11421,06	3481,139091
120	11928,9081	3635,931198
130	12416,0012	3784,397176
140	12884,6934	3927,254549
150	13336,9247	4065,09466

Luego se presentan los resultados en forma gráfica, estos corroboran el efecto que tiene la contaminación sobre el medio subsuperficial.

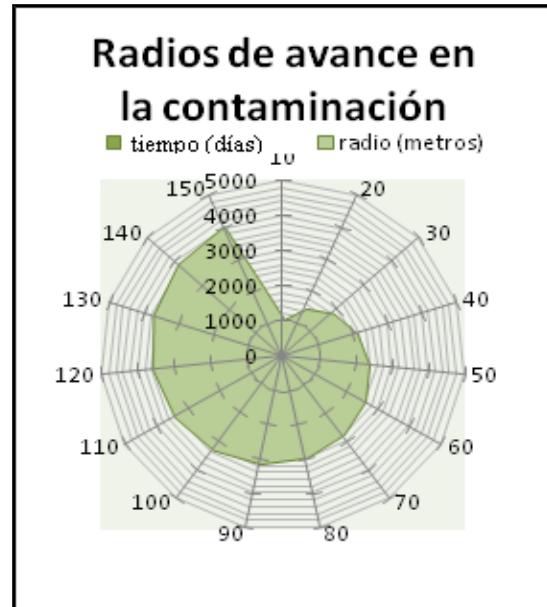


Figura 9. Gráfico que representa el avance de la contaminación.

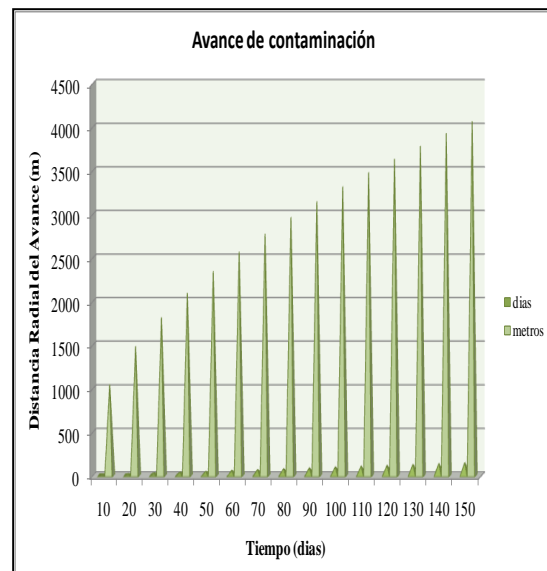


Figura 10. Aumento progresivo de la propagación del fluido contaminante

La gráfica 9 y 10 muestra la forma proporcional directa en el avance de contaminante, esta proporción se debe en especial al tiempo de evolución de la contaminación y

cubre una extensión considerable. Así las condiciones del medio donde fluye el petróleo y las características propias del mismo estimulan mencionado avance.

Pareciese algo ilógico que el flujo se desarrolle hasta alcanzar un radio muy amplio después de un tiempo determinado luego de iniciados los trabajos de remediación, considerando en primer término que dejamos pasar un lapso corto de tiempo luego del desastre, esto conlleva a suponer que el crudo continua fluyendo dentro del seno en la matriz del suelo y por las condiciones que este presenta, siga filtrándose en él. Aquí vale destacar nuevamente a la presión (atmosférica) como constante y que no varía en ningún momento (condición necesaria al aplicar el modelo), suministrando el empuje y aunque sea mínimo si el suficiente para continuar su avance contaminante a pesar de haber finalizado con la remediación, siendo según los resultados superior a los 4 km luego de 5 meses de suscitado el derrame.

Además es preciso señalar que los resultados obtenidos se desarrollan en condiciones ideales, sin variación en la temperatura, se presume del mismo modo cero precipitaciones de lluvia (la presencia de esta definitivamente afectaría al desplazamiento del crudo en el medio poroso) y por supuesto la presión constante (siendo atmosférica como se anotó durante el trayecto del derrame). La compresibilidad del fluido también se considera sin modificación en todo el recorrido que el fluido hará sobre el medio poroso, así el valor de compresibilidad es característico para petróleo con las propiedades mencionadas ($6 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$).

En todo caso si consideramos otro tipo de crudo, debemos evaluar la compresibilidad para esos fluidos, de esta forma verificamos los resultados y comparamos con los obtenidos en este trabajo.

10. Conclusiones y recomendaciones

El avance de la contaminación utilizando este modelo de flujo radial aumenta con el tiempo.

Existe un aumento proporcional y progresivo en distancia a los 150 días de exposición al derrame, este recorrería un radio mayor a 4 km comparándolos con los contratados para remediación.

La compresibilidad, porosidad y permeabilidad son variables directas tanto del fluido como del medio donde se dispersa este último. El valor de permeabilidad es elevada por la poca compactación del suelo.

Los radios de avance de una determinada contaminación aplicando este modelo estarán sujetos en forma continua al aumento o disminución de las mismas.

La viscosidad interviene de modo inverso en los cálculos de resolución de la Ecuación de Difusividad.

Todas las suposiciones y aproximaciones se realizan tomando condiciones ideales de superficie.

Los valores de "x" aproximados con la tabla (Ei) utilizada como referencia, sufren incertidumbres considerables por lo que se necesita tomar tolerancias muy importantes en el momento de aplicar el criterio de las suposiciones en las variables de las fórmulas empleadas.

Para resultados más exactos, debemos recordar que este trabajo es el primero que se realiza para las características presentadas.

Las incertidumbres definitivamente están sujetas a estos cambios en las propiedades de los fluidos y del medio.

Este modelo indirecto resulta de mucha utilidad para estas aproximaciones, puede considerarse como una herramienta muy aceptable para predecir este tipo de flujos en medios porosos de poca profundidad o someros.

Mejorar la exactitud de los cálculos utilizando otros modelos si fuese posible, considerando menor variabilidad en las suposiciones.

Propondremos un programa computacional con el presente modelo en futuros trabajos para desarrollarlo de mejor forma y complementar la investigación.

Hacer investigaciones a futuro al modelo y ajustarlo de ser necesario con otras características del medio y fluidos.

La aplicación del modelo sirve de igual manera en ahorro de dinero para las empresas operadoras que sufren este tipo de desastres, mediante la simulación podremos establecer la distancia que

un derrame alcanzaría y sólo contratar lo necesario para remediar sin pagar excedentes.

Recalcar y de forma específica que los valores de los análisis de suelo contaminado luego de los trabajos de remediación están ajustados a los límites mínimos establecidos en la norma decretada.

Verificar los resultados tabla N°1 y el Instructivo para la Calificación y Registro de Consultores Ambientales Hidrocarburíferos propuesto por la Norma decretada el 13 de Febrero del 2001 (Archivos de la Secretaria del Ministerio de Medio Ambiente) y que fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Central.

11. Agradecimientos

Agradecimiento a Ing. Ángel Jines y Lcda. Iris Núñez por su valiosa contribución en el mejoramiento del documento por sus acertados consejos y sugerencias.

12. Referencias

- [1] Fuentes de Información Archivos de Compañía PECS IECONTSA S.A.
- [2] Fuente laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador.
- [3] Craft & Hawkins, *Ingeniería Aplicada de Yacimientos Petrolíferos.*, Tecnos, Madrid-España.
- [4] W. Cardwell, Jr., y R. L. Parsons, *Average Permeabilities of Heterogeneous Oils Sands*, Trans. AIME (1945), pp.160.
- [5] J. Law, *A Statistical Approach to the Interstitial heterogeneity of Sand Reservoirs*, Trans, AIME (1948), 174, 165.
- [6] N. L. Carr, R. Kobayashi y D. B. Burrows, “*Viscosity of Hydrocarbon Gases under Pressure*”, Trans. AIME (1954), 201, 264.
- [7] C. Beal, “*The Viscosity of Air, Water, Natural As, Crude Oil and Its Associated Gases at Oil Field Temperatures and Pressures*”, Trans. AIME (1946).
- [8] L. J. Klinkenberg, “*Permeability of Porous Media to Liquids and Gases*”, Drilling and Production Practice, API (1941), pp. 200.
- [9] J. Chew y C. A. Connally, Jr, “*A Viscosity Correlation for Gas Saturated Crude Oils*”.
- [10] J. R. Elenbaas y D. L. Katz, “*A Radial Turbulent Flow Formula*”, Trans. AIME (1949), 186, 36.
- [11] R. L. Perrine, “*Analysis of Pressure Build-Up Curves*”, Drilling and Production Practice, API, pp.482.
- [12] R. C. Craze y J. W. Glanville, “*Well Spacing*”, Humble Oil and Refining Co., Houston, Texas. 1955, pp.40.
- [13] Sotelo, Gilberto.1990. *Hidráulica General*. Vol. I. Editorial Limusa, México, D.F.561 p.
- [14] Tidwell, Vicente. *Teoría y aplicaciones de transporte en medios porosos*, 2006, Volumen 20, Parte II, 273-278.