

Modelamiento y simulación espacial de la conductividad hidráulica por contaminación de hidrocarburos en suelos de Trujillo mediante método directo

Modeling and spatial simulation of hydraulic conductivity for oil pollution in soils of Trujillo by direct method

Ricardo Andrés Narváez Aranda ¹

Recibido: 10 de febrero de 2016

Aceptado: 15 de febrero de 2016

Resumen

En este informe se presenta el modelamiento y simulación espacial de la conductividad hidráulica de hidrocarburos en suelos adyacentes a la Vía de Evitamiento y la carretera Industrial, para cuyo efecto se consideran posibles derrames de petróleo por accidente, se realizan ensayos in situ de infiltración de petróleo y gasolina mediante método directo, y se tienen en cuenta abatimientos respecto al tiempo. Con un modelo teórico para determinar la permeabilidad por la gráfica de abatimientos y ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros

de U.S. Army se realizó un modelamiento, desarrollándose un programa (VEPER-H1) para procesamiento de datos y simuló así la velocidad de infiltración representada por la conductividad hidráulica.

Palabra claves: Modelamiento, simulación espacial, conductividad hidráulica, hidrocarburos, infiltración.

Abstract

This paper presents the modeling and space simulation of hydraulic conductivity of hydrocarbons in soils near to roads: Vía de Evitamiento y Carretera Industrial considering possible accidental oil spills, performing tests in situ about infiltration oil and gasoline by Direct Method, considering dejection over time. With a theoretical model to determine the permeability by the graph of dejection and experimental equation Corps of Engineers of the

U.S. Army made a modeling, making a software (VEPER-H1) to data process, simulate infiltration rate represented by the hydraulic conductivity.

keywords: Modeling, space simulation, hydraulic conductivity, hydrocarbon , percolation.

1. Universidad Privada Antenor Orrego – Perú. marvaeza@upao.edu.pe

1. Introducción

Las fuentes de derrames que contaminan el suelo, son los accidentes que ocurren cuando estas sustancias son transportadas a sus centros de consumo, y un poco más lenta, la lixiviación.

En nuestro país, en los últimos años se ha dado un gran impulso la producción minera con la extracción de oro, como es el caso de Minera Yanacocha en Cajamarca, Minera Antamina en Huaraz, Minera Barrick Misquichilca en Alto Chicama, etc. lo cual implica un mayor transporte de hidrocarburos.

La Zona Registral V-Sede Trujillo informó que se encuentran circulando 396 cisternas, y la estación E-17, ubicada en la Ramada-Huamachuco-MTC, registró 9 cisternas por día el año 2014 como se muestra en el tabla 1. Este incremento se da en La Libertad por la producción y operación minera, siendo el transporte de hidrocarburos más frecuente en nuestra red vial regional como son la vía de Evitamiento, la carretera Industrial y carretera Trujillo-Huamachuco, este hecho aumenta la posibilidad de accidentes al volcarse y derramar los líquidos que transportan.

Tabla 1: Numero de cisternas registrados en la estación E17- la Ramada MTC.

VEHICULOS TIPOS	AÑOS	
	2005 - 2010	DICIEMBRE 2012
AUTOS	6	28
CAMIONETAS	15	22
CAMIONES RURALES	59	67
MICROS	0	3
CISTERNAS	6	9
BUS 2 EJES	16	25
BUS 3 JES	0	0
CAMION 2 EJES	68	75
CAMION 3 EJES	28	32
SEMITRAYLERS	0	1
TRAYLERS	0	1
INDICE MEDIO DIARIO ANUAL	198	263

La infiltración de hidrocarburos en el suelo puede fluir hasta llegar a los acuíferos, contaminándolos, lo que determina un tiempo de respuesta para aislar el derrame, lo cual queda supeditado a la velocidad de infiltración de las sustancias tóxicas en los suelos.

Esta investigación proporciona un modelamiento de la infiltración de hidrocarburos en diferentes puntos, desarrolla el programa VIPER-H1-V1 que permite el procesamiento de datos de suelo y abatimiento respecto al tiempo de la infiltración obtenido de ensayos en diferentes puntos mediante la aplicación del método directo, se logra simular la profundidad de la contaminación por derrames de hidrocarburos, y así estimar que tan rápido se debe atender un derrame antes de que las combustibles puedan alcanzar el acuífero, con lo cual se reduce el daño ecológico y salud de los pobladores.

El resto de éste informe está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan los trabajos previos respecto a la permeabilidad de hidrocarburos. La sección 3 describe los materiales y métodos aplicados. Los experimentos y resultados se encuentran en la sección 4, y finalmente, las conclusiones y trabajos futuros está en la sección 5.

2. Teoría del dominio y trabajos previos

Las investigaciones de infiltración de hidrocarburos en suelos se han realizado por los problemas de contaminación, Castro [3] indica que en los países industrializados la contaminación de suelos y aguas subterráneas por el vertido incontrolado de residuos industriales es uno de los problemas más preocupantes que se plantean, ya que su eliminación no es fácil ni barata de realizar, y sus efectos persisten durante muchos años.

Las experiencias y directrices de la Environmental Protection Agency de Estados Unidos han servido como guía en los principales países industrializados para la evaluación de este tipo de contaminación. Esta metodología se basa en su identificación y delimitación tanto en el suelo como en las aguas subterráneas.

Vargas [6] presenta las definiciones de los principales conceptos relacionados con la vulnerabilidad de los acuíferos y las metodologías empleadas para su evaluación y sus limitaciones. Para ello, considera que la vulnerabilidad de los acuíferos ante la contaminación es un tema actual en la gestión del recurso hídrico, y su evaluación tiene como objetivo la protección del agua subterránea: prevención de la contaminación y el mantenimiento de la calidad del agua subterránea no contaminada.

Alvares [1] realiza una investigación para determinar la permeabilidad de los suelos relacionado al problema de transporte de contaminantes, para cuyo efecto efectuó ensayos de laboratorio y también in situ, respecto a los suelos del valle de Querétaro-México.

Navarro [5], presenta el estudio realizado por Henry Darcy basado en los trabajos sobre la mecánica de fluidos, quien descubrió una relación entre la cantidad de agua que fluye a través de una superficie, el área de esta superficie y el gradiente hidráulico. La permeabilidad puede variar por la estructuración del suelo, la estratificación ocasiona que los valores de su permeabilidad sean diferentes en cada estrato, incluso si se trata del mismo suelo con diferente grado de compactación o humedad, la permeabilidad seguramente será diferente.

Donato[4], presenta una investigación que determina que la conductividad hidráulica es un parámetro hidrogeológico fundamental para el estudio de la movilidad del agua subterránea. Es de difícil medición directa tanto en campo como en laboratorio, ya que presenta un alto grado de incertidumbre tanto en sus valores reales como en el fundamento de las teorías aplicadas por los diferentes ensayos. La estimación de la conductividad hidráulica como una función de parámetros más estables dentro de los suelos, se plantea como una alternativa de solución a estos inconvenientes.

3. Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio y característica hidrogeológicas

Los puntos de estudio se ubican en la carretera Panamericana Norte, vía de Evitamiento y carretera Industrial (figura 1). En estas zonas nos encontramos con suelos arcillosos ligeramente plásticos y arenas uniformes. Los distritos de Víctor Larco Herrea y Trujillo pertenecen a la cuenca hidrográfica del río Moche donde el agua superficial tiene un grado contaminación al 70% y el agua subterránea es actualmente utilizada para el abastecimiento de agua potable para la población de Trujillo en un 35%.

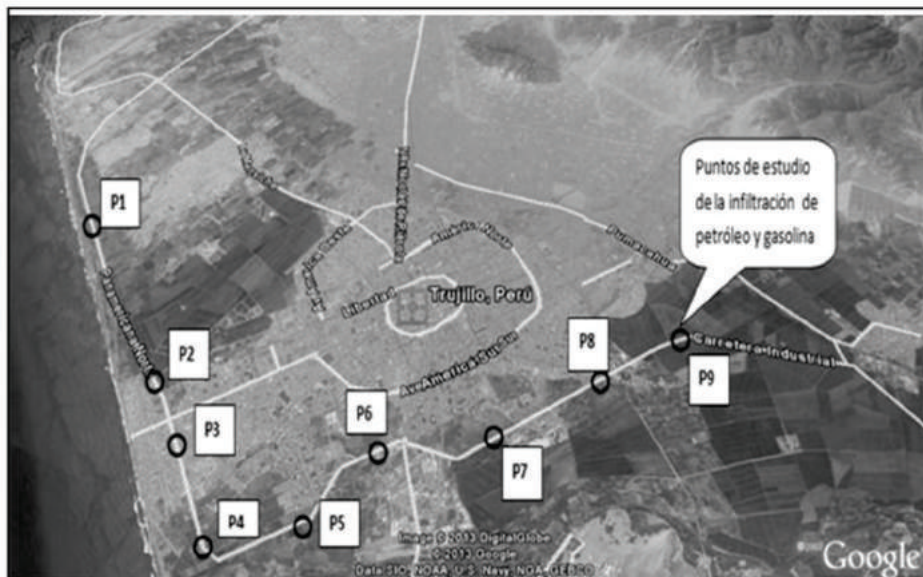


Figura 1: Zonas de estudio

Emergencia ambiental (derrame de petróleo)

Por informe periodístico del diario La Republica, del domingo 04 de diciembre 2011, nos enteramos que se registró un accidente en el sector de Quesquenda, distrito Quiruvilca, provincia de Santiago de Chuco, departamento La Libertad. Tras el despiste de un camión cisterna de placa POZ-861 cargado con 7 mil galones de combustible se derramaron en la zona adyacente de la infraestructura vial.

El viernes, 11 de setiembre del 2008, se registró un accidente en el caserío de Plazapampa, provincia de Otuzco, departamento La Libertad. Un camión cisterna de la empresa Primax S. A., con placa YI-5307, contratada por la minera Barrick Misquichilca S. A. que trasladaba petróleo, volcó de manera aparatosa y su carga de petróleo terminó regada por las calles del caserío, contaminando las áreas de cultivo de los pobladores y afectando a sus animales. Según comprobó Chami Radio, se llegó incluso a contaminar las aguas del río Moche. Figura 2.

En Cajamarca, 29 de enero del 2004, una cisterna vinculada a la minera Yanacocha vuelca y derrama siete mil galones de petróleo a la altura de la quebrada El Naranjo, distrito de Magdalena, cerca del kilómetro 131 de la carretera de penetración que une Cajamarca con la costa. En declaraciones al programa “En la boca del lobo”, el alcalde de dicha ciudad, Joel Godoy, denunció que el combustible contaminó las aguas del río Jequetepeque.

El comercio del 04-07-2006, publicó la información según la cual un camión cisterna, que trasladaba 9 mil galones de petróleo para la empresa minera Gold Fields, se volcó a la altura del Km. 50 de la carretera Cajamarca –Hualgayoc, el derrame de combustible ocasionó la muerte de miles de truchas, anfibios y otras especies acuáticas en la zona. El desastre ecológico se produjo en el río Pabellón La Quinoa, que divide a los caseríos Pampa Larga y Quebrada Honda, cuando el camión cisterna de placa de rodaje ZD 2949 perteneciente a la empresa Norte Medio SRL, transportaba el combustible a la empresa Minera Gold Fields que opera en el distrito de Hualgayoc.

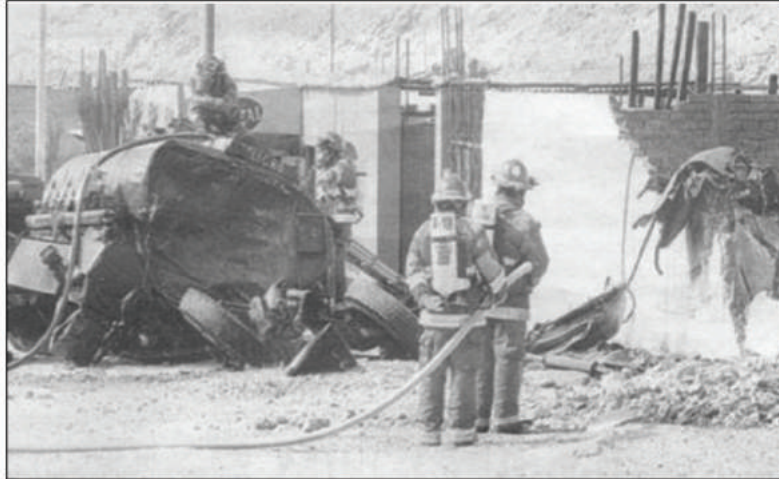


Figura 2: Derrame en el caserío de Plazapampa.

Metodología para determinar la permeabilidad

Existen varios procedimientos para la determinación de la conductividad hidráulica de los suelos, podemos dividir básicamente en dos grupos: “directos”, porque se basan en pruebas cuyo objeto fundamental es la medición del coeficiente de permeabilidad, y otros “indirectos”, ya que proporcionan el valor del coeficiente de permeabilidad en forma secundaria, es decir, por medio de pruebas y técnicas diseñadas para otros fines.

Modelo teórico para la determinación de la permeabilidad (km) por la gráfica de abatimientos

Cuando estamos ante la presencia de un derrame de hidrocarburos en el suelo una fracción se evapora, dependiendo de la volatilidad del compuesto vertido. Además, existe un proceso de infiltración en el suelo, muchas veces no apreciable a simple vista, y que involucra un descenso gravitacional por la matriz del suelo pudiendo llegar hasta aguas subterráneas contenidas en acuíferos someros o profundos [5].

El modelo propone una gráfica patrón que resulta de representar en el eje “y” el valor de cada abatimiento (S) y en el eje “x” el tiempo correspondiente (t). Los coeficientes que definen el modelo teórico propuesto son p y w , los cuales determinan el comportamiento del líquido sobre el suelo. Estos coeficientes tomaron rangos muy variables en todas las pruebas, y su valor se atribuye principalmente a las características del suelo y del líquido involucrado. La función que obedece a este comportamiento es de la forma:

$$S_c = \rho \cdot t$$

El modelo teórico presenta 3 zonas diferenciadas como se muestra en la figura 3.

Etapa de humedecimiento: corresponde a la etapa en la que el suelo absorbe el líquido, las partículas de suelo son humedecidas a gran velocidad.

Etapa de saturación: el suelo satura sus vacíos con el líquido y se encuentra listo para iniciar el flujo establecido o el transporte dentro del suelo. En el caso del aceite usado se observa que saturaba completamente el suelo en estudio para que luego pase a la etapa de cristalización.

Etapa de transporte: el fluido viaja libremente hasta donde está el frente húmedo, el promedio de las velocidades obtenidas en esta etapa, es el valor de la permeabilidad media K_m del suelo buscada.

Fuente: Datos alcanzados en el estudio

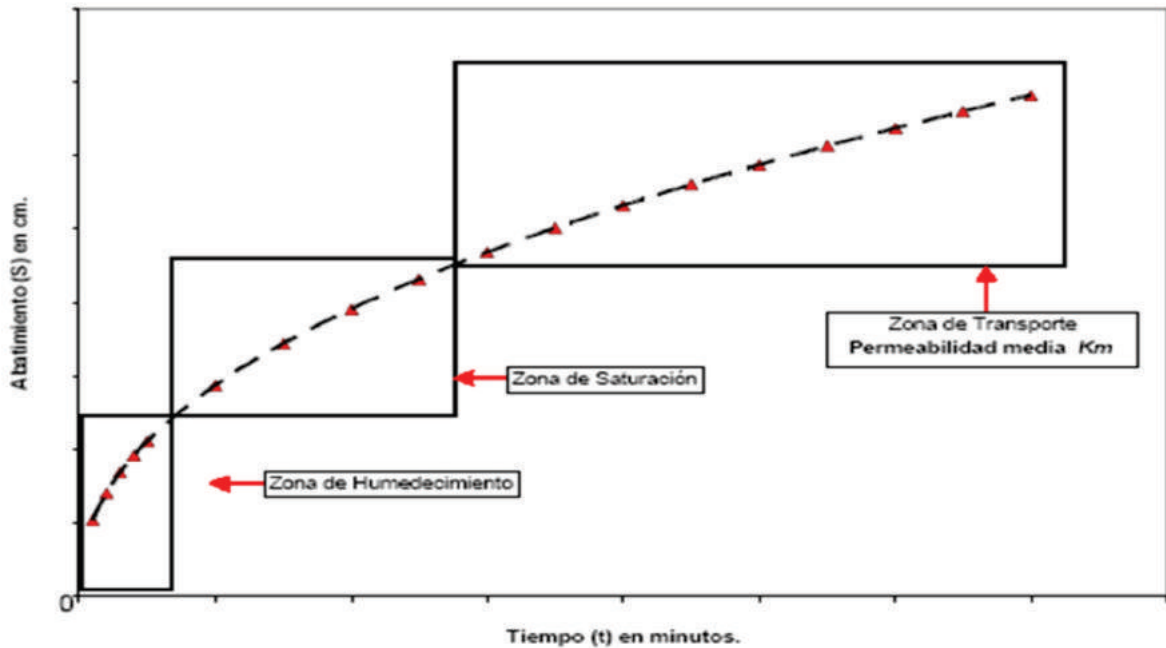


Figura 3: Modelo del comportamiento teórico de los abatimientos en el sondeo de prueba

Cálculo de la permeabilidad con la fórmula del Cuerpo de Ingenieros US Army.

Esta fórmula experimental obtenida por el Cuerpo de Ingenieros, U.S. Army [2], es muy sencilla y práctica para obtener la permeabilidad.

Los siguientes datos se necesitan en primera instancia:

- H1 : abatimiento total
- D: diámetro del sondeo o hueco
- t1 : tiempo de la 2º lectura de el abatimiento del líquido usado en campo

$$K_m = \frac{\pi D}{11 (t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right)$$

4. Experimentos y resultados

La medición de los parámetros de la conductividad hidráulica o permeabilidad, se realizó en campo aplicando el método directo para lo cual se realizaron 36 perforaciones en 9 sectores a lado de las carreteras como se muestra en la figura 1.

El trabajo de campo consistió en nivelar y limpiar el área de trabajo, retirando los residuos y la capa vegetal que se encuentra sobre el estrato. Se limitó el área de 50 x 50 cm² sobre el suelo donde se perforó un hueco de 10 cm de diámetro por 10 cm de profundidad, como muestra la figura 4. En cada perforación se colocó un combustible, se tomó lectura de los abatimientos respecto al tiempo de filtración. Ver figura 5 y tabla 2. Esta prueba se realizó en cada punto de estudio con dos repeticiones por líquido para disminuir el error de prueba.



Figura 4: Perforaciones en zona de estudio.

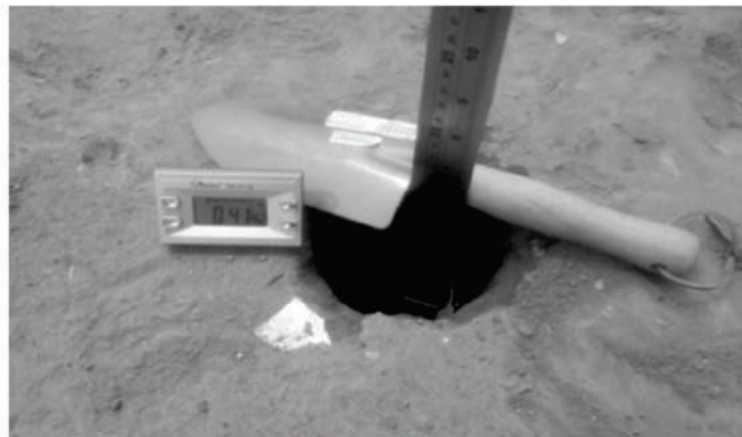


Figura 5: Medición de los abatimientos y tiempo.

Tabla 2: Formato de datos de campo

Formato de datos de campo		
Nº lectura	Tiempo (t) en min	Lectura regla (s) en cm
1	0,18	10,8
2	0,52	10,38
3	1	8,7
4	2	8,1
5	3	7,5
6	4	6,95
7	5	6,25
8	6	5,6
9	7	5,05
10	8	4,55
11	9	4,1

De cada perforación se tomo muestras para determinar las propiedades del suelo y clasificarlas en laboratorio, como se muestra en la figura 6.



Figura 6: Clasificación del suelo en laboratorio

Programa para calcular la permeabilidad en suelos por método directo (VEPER-H1)

Con el registro de los abatimientos y los tiempos correspondientes a cada nivel del líquido, se calcula la permeabilidad media de transporte del petróleo y gasolina, lo cual facilita el procesamiento de datos mediante el desarrollo de un programa en *visual basic* para la interpretación del modelo teórico propuesto [1] y la determinación de la permeabilidad por la gráfica de abatimientos y con la aplicación de la ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros de U.S. Army, además se consideró una ventana para el análisis y clasificación de suelos, como se muestra en la siguiente secuencia de las figuras 7 al 13:



Figura 7: Ingreso al programa VIPER-H1 y pantalla principal.

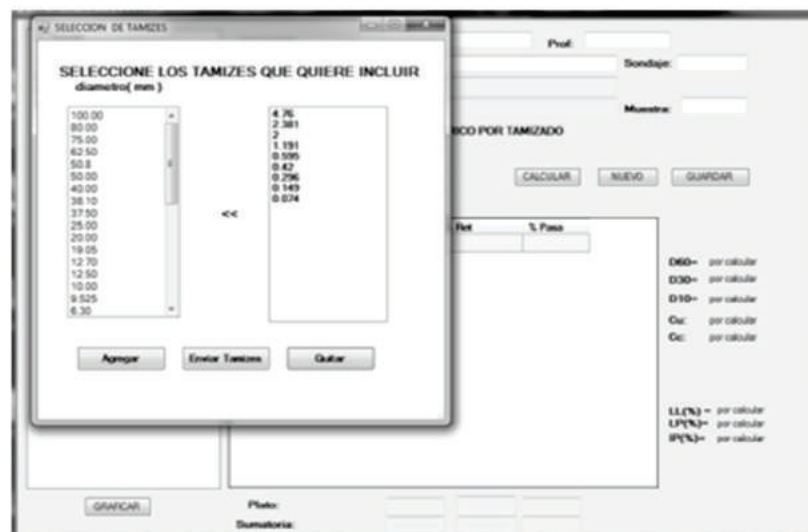


Figura 8: Selección de los tamices.



Figura 9: Ingreso de datos para el análisis granulométrico.



Figura 10: Contenido natural de humedad, LL y Lp

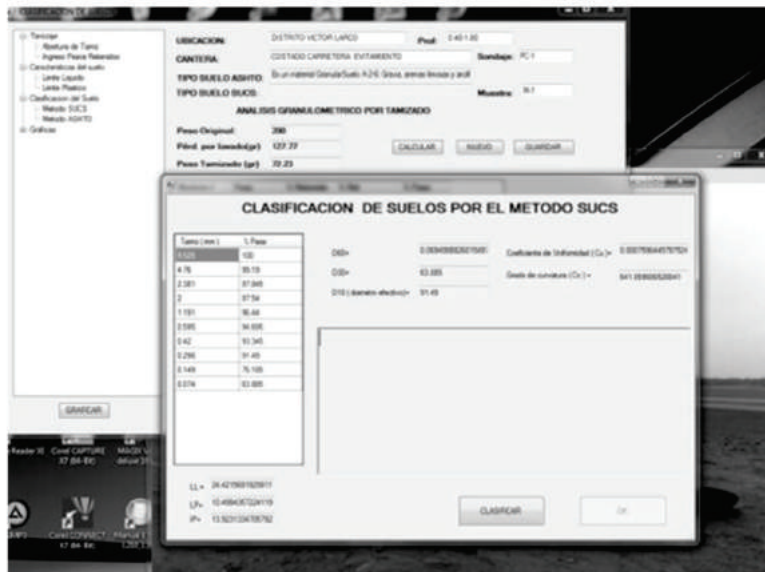


Figura 11: Clasificación de suelos

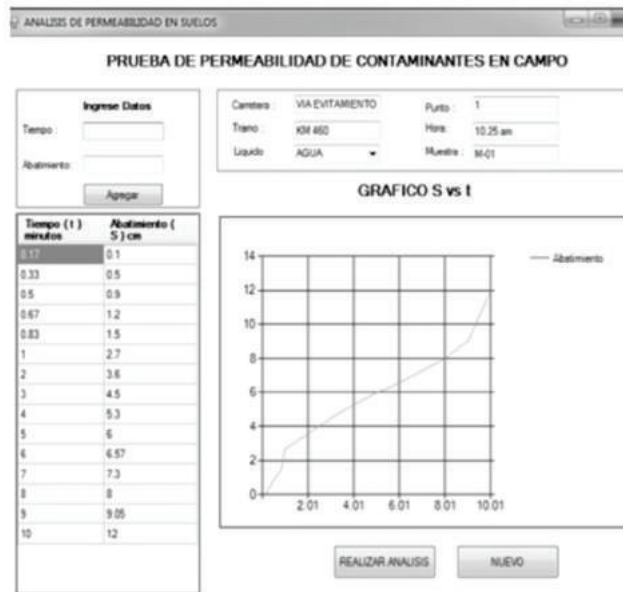


Figura 12: Ingreso de datos de abatimientos y tiempos de lectura

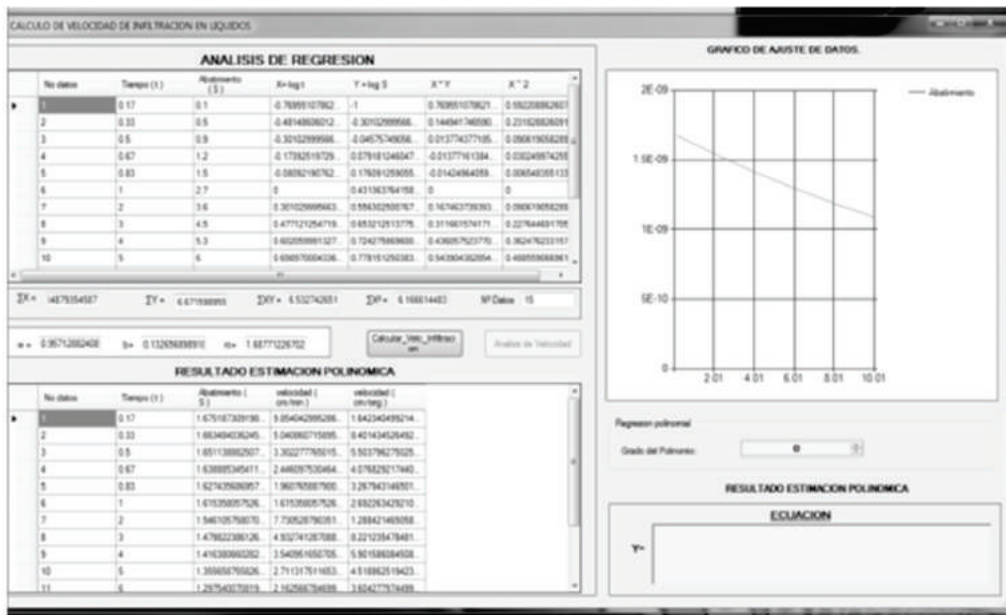


Figura 13: Procesamiento de datos

El programa tiene la opción de exportar todo el proceso a Excel; se presenta los resultados para una prueba de campo con petróleo, en las siguientes tablas del 3 al 20.

Tabla 3: Tiempos y abatimientos

N° de Lectura	Tiempo		Abatimiento	
	t(min)	t(seg)	Lectura de regla(cm)	S(cm)
1	0,18	10,8	10,8	0
2	0,52	31,2	10,38	0,42
3	1	60	8,7	2,1
4	2	120	8,1	2,7
5	3	180	7,5	3,3
6	4	240	6,95	3,85
7	5	300	6,25	4,55
8	6	360	5,6	5,2
9	7	420	5,05	5,75
10	8	480	4,55	6,25
11	9	540	4,1	6,7

Tabla 4: Proceso cálculo del método teórico

N° de Lectura	Tiempo		Abatimiento	
	t(min)	t(seg)	Lectura de regla(cm)	S(cm)
1	0,18	10,8	10,8	0
2	0,52	31,2	10,38	0,42
3	1	60	8,7	2,1
4	2	120	8,1	2,7
5	3	180	7,5	3,3
6	4	240	6,95	3,85
7	5	300	6,25	4,55
8	6	360	5,6	5,2
9	7	420	5,05	5,75
10	8	480	4,55	6,25
11	9	540	4,1	6,7

Tabla 5: Cálculo de la velocidad de abatimiento

N° Datos	Tiempo	Abatimiento	X	Y	X*Y	X²
	t(min)	S(cm)	Log t	Log S		
1	0,52	0,42	-0,284	-0,377	0,107	0,081
2	1,00	2,1	0,000	0,322	0,000	0,000
3	2,00	2,7	0,301	0,431	0,130	0,091
4	3,00	3,3	0,477	0,519	0,247	0,228
5	4,00	3,85	0,602	0,585	0,352	0,362
6	5,00	4,55	0,699	0,658	0,460	0,489
7	6,00	5,2	0,778	0,716	0,557	0,606
8	7,00	5,75	0,845	0,760	0,642	0,714
9	8,00	6,25	0,903	0,796	0,719	0,816
10	9,00	6,7	0,954	0,826	0,788	0,911
			5,276	5,236	4,003	4,296

A continuación se muestran las graficas correspondientes al procesamiento de datos:

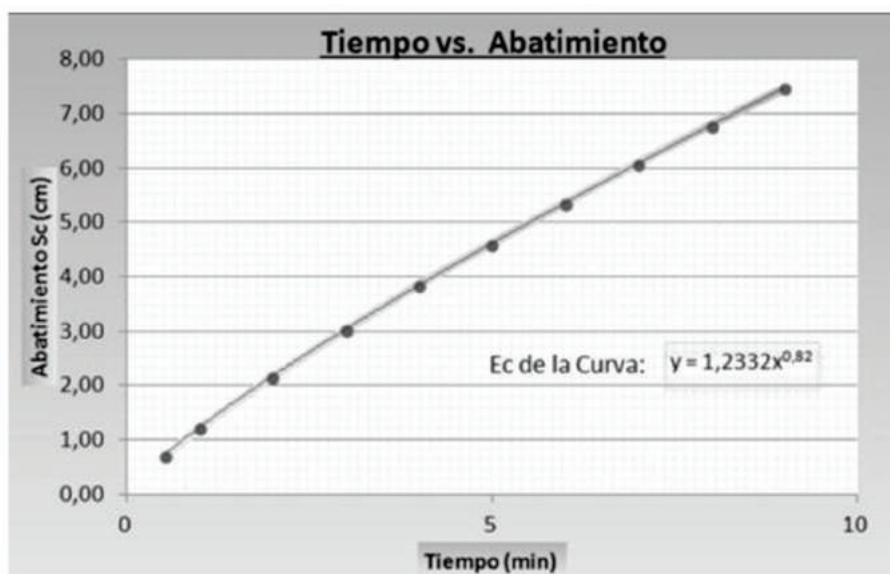


Figura 14: Proyección teórica de abatimientos

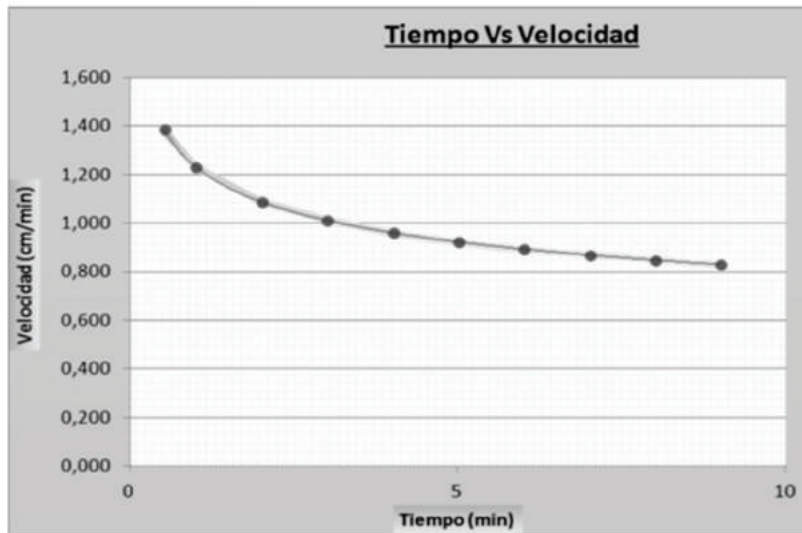


Figura 15: Variación de la velocidad de abatimiento

Tabla 6: Permeabilidad promedio con la ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros de U.S. Army

Diametro	D (cm)	11,8
Abatimiento total	H1(cm)	12,6
Tiniempo de 2da lectura	t1(s)	10,8

Permeabilidad
$$K_m = \frac{\Pi D}{11(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

	t min	t seg	S cm	H2 (cm)	Km cm/s
1	0,18	10,8	0	10,8	
2	0,52	31,2	0,42	10,4	0,032018
3	1	60,0	2,1	8,7	0,025370
4	2	120,0	2,7	8,1	0,013636
5	3	180,0	3,3	7,5	0,010333
6	4	240,0	3,85	7,0	0,008748
7	5	300,0	4,55	6,3	0,008170
8	6	360,0	5,2	5,6	0,007826
9	7	420,0	5,75	5,1	0,007530
10	8	480,0	6,25	4,6	0,007316
11	9	540,0	6,7	4,1	0,007150
					0,012810

Tabla 7: Simulación de la profundidad infiltración en un suelo arenoso de petróleo

Velocidad	Tiempo (s)	Profundidad (m)
0,022	10	0,002
0,022	20	0,004
0,017	30	0,005
0,017	40	0,007
0,017	50	0,009
0,017	60	0,010
0,017	120	0,020
0,017	180	0,031
0,017	240	0,041
0,015	300	0,044
0,015	420	0,061
0,015	3600	0,524
0,015	7200	1,047
0,015	10800	1,571
0,015	14400	2,095
0,015	18000	2,618

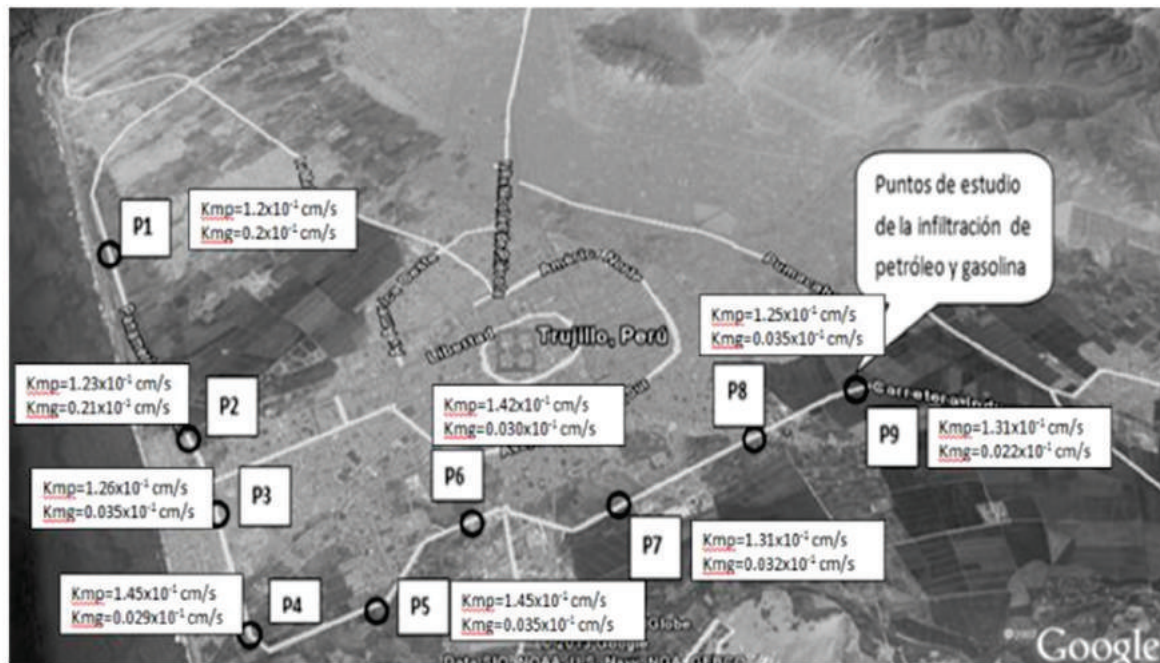


Figura 16: Resultados del moldeamiento y simulación espacial de la conductividad hidráulica.

5. Conclusiones y trabajos futuros

- Se obtuvo desde un punto de vista hidráulico, que los suelos de la zona de estudio son medianamente permeables, para los líquidos que se han vertido en especial la gasolina.
- El tiempo de infiltración obtenido del análisis de la permeabilidad de los suelos analizados, permitirán, a las autoridades competentes, tomar medidas para atender posibles eventos que involucren derrame de hidrocarburos, antes de que estas sustancias puedan alcanzar a la napa freática, o de que se produzca un incendio, en caso de que hubiese fuego cerca del lugar.
- La permeabilidad de los suelos varía de acuerdo a la naturaleza del mismo, su granulometría, temperatura, humedad, succión y de acuerdo al tipo de fluido.
- Mediante la interpretación de las pruebas de campo se establece que independiente al tipo de fluido y de suelo, existe tres velocidades de flujo las cuales son: velocidad de humedecimiento, velocidad de saturación y velocidad de transporte.
- Se deberá realizar estudios similares en las zonas más accidentadas donde pueden ocurrir accidentes en la carretera Trujillo –Huamachuco, en tiempos de verano y de lluvias para simular el comportamiento de la permeabilidad hidráulica de los hidrocarburos para conocer la profundidad de infiltración.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Álvarez. La permeabilidad de los suelos en los problemas de transportes de contaminantes. Aplicación de la infraestructura del transporte. Publicación Técnica N° 195 Instituto Mexicano de transporte. México 2002.
- [2] Boletín N° 36 Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi Abril 1951.
- [3] Castro Varela G. Informe final Diseño y monitoreo frente derrames de hidrocarburos. Quillota, Bogotá. 2007.
- [4] Donado G. L. Modelo de conductividad hidráulica en suelos. Bogotá, Colombia 2005. [5] Navarro A., Xavier F. Contaminación de suelos y aguas subterráneas por vertidos industriales. Barcelona, España 1996.
- [6] Vargas Quintero M. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Bogotá, Colombia 2010.