

**ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y TRANSPORTE DE
CONTAMINANTES EN UN RELLENO ARENOSO**

**JHON ANDERSON NIETO GONZALEZ
WILMER LEONARDO ORDÓÑEZ TOLEDO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2021

**ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y TRANSPORTE DE
CONTAMINANTES EN UN RELLENO ARENOSO**

**JHON ANDERSON NIETO GONZALEZ
WILMER LEONARDO ORDÓÑEZ TOLEDO**

Trabajo de grado para optar título de Ingeniero Civil

Directora

Hebenly Celis Leguizamo

Maestría en Ciencias en Ingeniería Civil Área Geotecnia



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2021

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por darme vida, salud, brindarme la sabiduría y la fortaleza para hacer realidad esta gran meta para mí y mi familia.

Le agradezco a mis padres Sandro y Ana por ser ese apoyo incondicional y haberme dando una gran educación para no desfallecer en los sueños que me proponga. Primordialmente por ser ese ejemplo a seguir.

A mi hermano Chrystian por ser mi alma gemela y apoyarme en los momentos donde sentía que no era capaz con más, por defenderme y cuidarme cada segundo de la vida.

A mis abuelas Cecilia y María por ponerme siempre en sus oraciones para que todo me saliera bien con ayuda de Dios.

Le agradezco a mi comadre Lizzeth por confiar en mis capacidades y siempre estar para lo que necesite; a mis amigos que ya son parte de mi familia como Diego, Jaime, Jorge, Jessica y Daniela por siempre escucharme y apoyarme en los momentos difíciles y crecer juntos como personas.

Le agradezco a todos los profesores que fueron parte de este proceso al compartir todo el conocimiento para forjar a un profesional y a una buena persona.

A mi directora de tesis la ingeniera Hebenly Celis Leguizamo por guiarnos en esta etapa, por tener demasiada paciencia y por aportarnos los mejores consejos para realizar un buen proyecto de grado.

A mis abuelos Pascual y Jose que no se encuentran conmigo físicamente pero siempre viven en mi corazón, este logro también es por ustedes, de donde me estén viendo... ¡Soy ingeniero civil!

Wilmer

Agradezco primero, a la Universidad Industrial de Santander por brindarme un proceso de aprendizaje singular, basado en la construcción del conocimiento, la crítica y el sentido humano. En segundo lugar, gracias a mi familia, a mis padres por darme la vida y apoyarme en todo lo que me he propuesto. En tercer lugar, gracias a Dios por brindarme la oportunidad de vivir y por permitirme disfrutar cada momento de mi vida y guiarme por el camino que ha trazado para mí. También, gracias a mi abuela, que siempre me ha prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles, finalmente a mis maestros que compartieron conmigo conocimientos para convertirme en profesional, por su tiempo, dedicación y por su pasión por la actividad docente. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo. A todos, muchas gracias

Jhon Anderson

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 PROCESOS DE TRANSPORTE.....	18
4.2 PROCESOS DE ATENUACIÓN.....	20
4.3 MODELADO NUMÉRICO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LA MASA DEL SUELO.....	20
5. METODOLOGÍA.....	23
6. MODELACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
7. CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de entrada simulacion 1, 2, 3.....	23
Tabla 2. Datos de entrada simulación 4, 5, 6.....	24
Tabla 3. Datos de entrada Simulación 7, 8.....	24

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. (CTRAN/W, 2012).....	19
Ilustración 2. (CTRAN/W, 2012).....	19
Ilustración 3. (CTRAN/W, 2012).....	19
Ilustración 4. Permeabilidad 0.01 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	25
Ilustración 5. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	25
Ilustración 6. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	26
Ilustración 7. Permeabilidad 0.01 (m/d), 2772 días (7.59años)	26
Ilustración 8. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 2772 días (7.59años).....	26
Ilustración 9. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 2772 días (7.59años).....	27
Ilustración 10. Dispersividad longitudinal 1 m, 264 días (8.8 meses)	28
Ilustración 11. Dispersividad longitudinal 2 m, 264 días (8.8 meses)	28
Ilustración 12. Dispersividad longitudinal 3 m, 264 días (8.8 meses)	28
Ilustración 13. Dispersividad longitudinal 1 m, 2772 días (7.59años)	29
Ilustración 14. Dispersividad longitudinal 2 m, 2772 días (7.59años)	29
Ilustración 15. Dispersividad longitudinal 3 m, 2772 días (7.59años)	29
Ilustración 16. Dispersividad transversal 0.5 m, 264 días (8.8 meses)	30
Ilustración 17. Dispersividad transversal 1 m, 264 días (8.8 meses)	30
Ilustración 18. Dispersividad transversal 2 m, 264 días (8.8 meses)	31
Ilustración 19. Dispersividad transversal 0.5 m, 2772 días (7.59años).....	31
Ilustración 20. Dispersividad transversal 1 m, 2772 días (7.59años).....	32
Ilustración 21. Dispersividad transversal 2 m, 2772 días (7.59años).....	32
Ilustración 22. Concentración relativa 5 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	33
Ilustración 23. Concentración relativa 10 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	33
Ilustración 24. Concentración relativa 20 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	33
Ilustración 25. Concentración relativa 5 (kg/m ³), 2772 días (7.59años)	34
Ilustración 26. Concentración relativa 10 (kg/m ³), 2772 días (7.59años).....	34

Ilustración 27. Concentración relativa 20 (kg/m ³), 2772 días (7.59años).....	35
Ilustración 28. Permeabilidad 0.01 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	36
Ilustración 29. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	36
Ilustración 30. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 264 días (8.8 meses).....	36
Ilustración 31. Permeabilidad 0.01 (m/d), 2772 días (7.59años).....	37
Ilustración 32. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 2772 días (7.59años).....	37
Ilustración 33. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 2772 días (7.59años).....	37
Ilustración 34. Dispersividad longitudinal 1 m, 264 días (8.8 meses)	38
Ilustración 35. Dispersividad longitudinal 2 m, 264 días (8.8 meses)	38
Ilustración 36. Dispersividad longitudinal 3 m, 264 días (8.8 meses)	39
Ilustración 37. Dispersividad longitudinal 1 m, 2772 días (7.59años)	39
Ilustración 38. Dispersividad longitudinal 2 m, 2772 días (7.59años)	39
Ilustración 39. Dispersividad longitudinal 3 m, 2772 días (7.59años)	40
Ilustración 40. Dispersividad transversal 0.5 m, 264 días (8.8 meses)	41
Ilustración 41. Dispersividad transversal 1 m, 264 días (8.8 meses)	41
Ilustración 42. Dispersividad transversal 2 m, 264 días (8.8 meses)	41
Ilustración 43. Dispersividad transversal 0.5 m, 2772 días (7.59años).....	42
Ilustración 44. Dispersividad transversal 1 m, 2772 días (7.59años).....	42
Ilustración 45. Dispersividad transversal 2 m, 2772 días (7.59años).....	42
Ilustración 46. Concentración relativa 5 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	43
Ilustración 47. Concentración relativa 10 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	43
Ilustración 48. Concentración relativa 20 (kg/m ³), 264 días (8.8 meses).....	44
Ilustración 49. Concentración relativa 5 (kg/m ³), 2772 días (7.59años)	44
Ilustración 50. Concentración relativa 10 (kg/m ³), 2772 días (7.59años).....	44
Ilustración 51. Concentración relativa 20 (kg/m ³), 2772 días (7.59años).....	45

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Parámetros hidráulicos del modelo base	51
Anexo B. Parámetros del contaminante del modelo base	52
Anexo C. Ubicación de las partículas	52
Anexo D. Diagrama de flujo del terreno estudiado	54
Anexo E. Tabla de coeficiente de permeabilidad del suelo	55
Anexo F. Datos de cada simulación elaborada	56
Anexo G. Procedimiento de la elaboración para cada simulación en GEOSTUDIO	57

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN UN RELLENO ARENOSO*

AUTOR: JHON ANDERSON NIETO GONZALEZ, WILMER LEONARDO ORDÓÑEZ TOLEDO**

PALABRAS CLAVE: CONTAMINACIÓN, TRANSPORTE DE CONTAMINANTES, RELLENO SANITARIO, ADVECCIÓN, DISPERSIÓN.

DESCRIPCIÓN:

La contaminación del suelo por procesos industriales, mineros o rellenos sanitarios es un reto para la ingeniería hoy en día debido al impacto ambiental generado en estos suelos; existen una variedad de software para observar la evolución de estos procesos y el avance que determinado contaminante puede tener en función del tiempo. Hay diferentes tipos de análisis para abordar estos problemas, lo más comunes son advección y dispersión, donde el movimiento del contaminante con el flujo del agua es denominado advección y la dispersión es la mezcla que se tiene del contaminante y el flujo. Para este proyecto se modela el transporte de contaminantes en un suelo a través del tiempo por medio del programa *GEOSTUDIO*, utilizando *SEEP/W* y *CTRAN/W* como herramientas fundamentales para dicho análisis, además, se tiene un modelo base para modificar algunas variables mostradas en el proyecto. Los resultados dan una comparación del cambio de la distribución del contaminante al alterar solo una característica al modelo base y así, tener criterio de la variable más sensible que se puede llegar a tener en la simulación; por último, se combinan los dos modelos más eficaces para tener el mejor control de contaminantes en un estudio para un relleno sanitario.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo. Magíster en Ciencias en Ingeniería Civil Área Geotecnia

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE DIFFUSION AND TRANSPORT COEFFICIENT OF POLLUTANTS IN A SAND FILLER*

AUTHOR: JHON ANDERSON NIETO GONZALEZ, WILMER LEONARDO ORDÓÑEZ TOLEDO**

KEY WORDS: POLLUTION, POLLUTANT TRANSPORT, LANDFILL, ADVECTION, DISPERSION

DESCRIPTION:

Soil contamination by industrial processes, mining or sanitary landfills is a challenge for engineering today due to the environmental impact generated in these soils; There is a variety of software to observe the evolution of these processes and the progress that a certain pollutant may have as a function of time. There are different types of analysis to address these problems, the most common are advection and dispersion, where the movement of the contaminant with the flow of water is called advection and dispersion is the mixture of the contaminant and the flow. For this project, the transport of pollutants in a soil through time is modeled through the GEOSTUDIO program, using SEEP / W and CTRAN / W as fundamental tools for said analysis, in addition, there is a base model to modify some variables shown in the project. The results give a comparison of the change in the distribution of the pollutant when altering only one characteristic to the base model and thus, having the criterion of the most sensitive variable that can be obtained in the simulation; finally, the two most effective models are combined to have the best contaminant control in a study for a landfill.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo. Magíster en Ciencias en Ingeniería Civil Área Geotecnia

INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios que se encuentran en algunas ciudades y en municipios de Colombia generan contaminación en acuíferos y en depósitos naturales de agua cercanos a ellos, si estos no son tratados e impermeabilizados adecuadamente, la acumulación de todos los desechos orgánicos en los terraplenes expuestos al agua y a los efectos climáticos generan rápidamente lixiviados, los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos urbanos (RSU) se degradan, formando un líquido contaminante de color negro con olor desagradable y fuerte, denominado lixiviado, estos con el paso del tiempo penetran el suelo y se transportan rápidamente hasta llegar alcanzar distancias considerables, por lo que, arrastran a su paso toda clase de sustancia nocivas para la salud y algunas veces dichas sustancias llegan a ser cancerígenas; al pasar un tiempo determinado los lixiviados llegan alcanzar depósitos de aguas subterráneos (acuíferos), o depósitos de aguas cercanos superficiales contaminando fuentes hídricas de abastecimientos que pueden ser utilizadas en generación presentes y futuras, no solo para su consumo, sino también, para el riego en el sector agropecuario, es por esto, que es necesario controlar el transporte de los lixiviados, ya que son un gran problema que afecta a la comunidad en general.

En este estudio se modela el comportamiento del lixiviado desde el punto de vista del flujo y de la concentración del contaminante. Se pudo evidenciar las distancias que alcanza el lixiviado para determinados tiempos, haciendo posible una aproximación de riesgo para los acuíferos cercanos y aguas superficiales, también se determina la extensión de la región contaminada simulando como se mueven las partículas a través del suelo con el paso del tiempo.

Se simula en una serie de programas de la familia Geoslope International, LTD (2012), por lo que se hace una unión entre *SEEP/W* y *CTRAN/W* los cuales hacen

posible el análisis del transporte de lixiviados, tanto en flujo, como en la concentración de contaminante y en trayectoria de partículas.

Un primer estudio del flujo se hace en *SEEP/W* donde se define la geometría del terreno a analizar, así mismo, la ubicación de los acuíferos cercanos al relleno sanitario, las características del suelo que va a contener el terraplén, propiedades de los contaminantes a analizar, y condiciones de frontera, estos resultados se acoplan con el programa *CTAN/W* para hacer un estudio de la *advection-dispersion*, el cual representa la concentración del contaminante a medida que se transporta en el suelo en función del tiempo; este estudio es realizado para un periodo de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59 años) con un paso de 166 días, luego en el mismo software se hace el análisis de *Particle Tracking (Forward)* o seguimiento de partícula hacia adelante con el mismo tiempo de duración, este consiste en la simulación de la trayectoria del flujo desarrollado en el relleno sanitario determinando eficazmente la extensión de la región contaminada en el estudio.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el comportamiento de un contaminante mediante el software *CTRAN/W* a través de un suelo afectado por almacenamiento de desechos

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros de entrada y salida para el análisis del caso a estudiar.
- Escoger la geometría del terreno a trabajar para analizar el contaminante.
- Realizar el análisis para identificar la variación de un contaminante a través del tiempo producido en el suelo.

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

El agua es uno de los factores más importantes del desarrollo sostenible y es de gran importancia en el desarrollo socioeconómico; así mismo, en la energía, producción de alimentos, ecosistemas y para la supervivencia de los seres humanos el agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático y es un vínculo decisivo entre la sociedad y el medio ambiente.

Datos del sistema de información ambiental de Colombia aportan que la carga orgánica biodegradable DBO5 vertida a los sistemas hídricos después del tratamiento en Colombia durante el año 2012 alcanzó 756.945 t/año, que equivalen a 2102 t/día. De este total, la industria aporta el 28%, el sector doméstico el 69% y el sector cafetero el 3%, el 80% de la carga DBO5 es aportada por 55 municipios principalmente por áreas metropolitanas y ciudades grandes del país: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Cúcuta, Villavicencio y Manizales (SIAC, 2012).

Las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial y representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010). A nivel mundial, 2.500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias (UNESCO, 2012), con esta información, se identifica la importancia que tienen las aguas subterráneas en el entorno; las grandes poblaciones en muchas partes del mundo favorecen su existencia con dicha agua, y, aun así, se ven las afectaciones que le causa el ser humano.

Se estima que el 20% de los acuíferos mundiales está siendo sobreexplotado (Gleeson et al., 2012), lo que tiene grandes consecuencias con el paso del tiempo, como el hundimiento de suelos y la intrusión de agua salada (USGS, 2013).

Es necesario el estudio de la contaminación en el suelo para contribuir en el manejo de residuos sanitarios y así mitigar el riesgo de afectar acuíferos y fuentes hídricas superficiales aledañas al terreno.

3. JUSTIFICACIÓN

Según estudios se encuentran hasta 200 compuestos diferentes de lixiviados en un relleno sanitario, si se exponen a la población afectan la salud y, en muchos casos, llegan a ser cancerígenos. La humedad de los residuos y la lluvia son grandes factores que conllevan a la generación de lixivianos rápidamente a través del tiempo (Diagnostico Nacional De Salud Ambiental, diciembre de 2012).

El adecuado tratamiento de estos lixivianos debe ser parte fundamental de la gestión de los RSU. Los lixivianos pueden ser trasportados subterráneamente y con el paso del tiempo llegan a recorrer grandes distancias que contaminan tanto aguas subterráneas (acuíferos) como superficiales y suelos aledaños a ellos, obstruyendo el aprovechamiento nutritivo de este líquido en futuras generaciones.

Es de gran importancia realizar un estudio base incluyendo el sector químico e hidráulico, así mismo, un análisis detallado de los lixiviados producidos en un relleno sanitario, si se tiene una idea base para la elaboración de este tipo de proyectos se obtiene una aproximación de riesgo para las zonas vulnerables aledañas donde es ubicado el terraplén

4. MARCO TEÓRICO

4.1 PROCESOS DE TRANSPORTE

Hay diferentes tipos de transporte, los más comunes son dos: el primero, es por advección y el segundo por dispersión, casi todos los análisis de transporte de contaminantes requieren el cálculo de advección y dispersión.

La advección se refiere al proceso por el cual los solutos son transportados por el movimiento masivo de agua subterránea que fluye, es el movimiento de agua a través de un límite; y la dispersión es el fenómeno de propagación de contaminantes desde el camino que se espera seguir, de acuerdo con la hidráulica este proceso se debe a los gradientes químicos entre los nodos del límite y los nodos inmediatamente dentro del límite. Si se tiene un tubo por el cual fluye un caudal determinado y dentro de este se inyecta una porción o un grumo de contaminante, la masa del contaminante fluye dentro de él con una velocidad constante v , este proceso de transporte es el denominado advección. Mientras que, la masa se mueve también pierde concentración en el agua, entonces, el contaminante empieza a ocupar un espacio creciente dentro del tubo y disminuye su concentración en el tiempo, este proceso se llama dispersión.

Mientras “el proceso de advección es simple migración en respuesta al flujo de agua, el proceso de dispersión consta de dos componentes: uno es de aparente mezcla y el otro es de difusión molecular”¹

¹ GEO-SLOPE International, Ltda. Contaminant Modeling. Introduction. Calgary. 2012. Vol 6. #.5

Ilustración 1. (CTRAN/W, 2012)

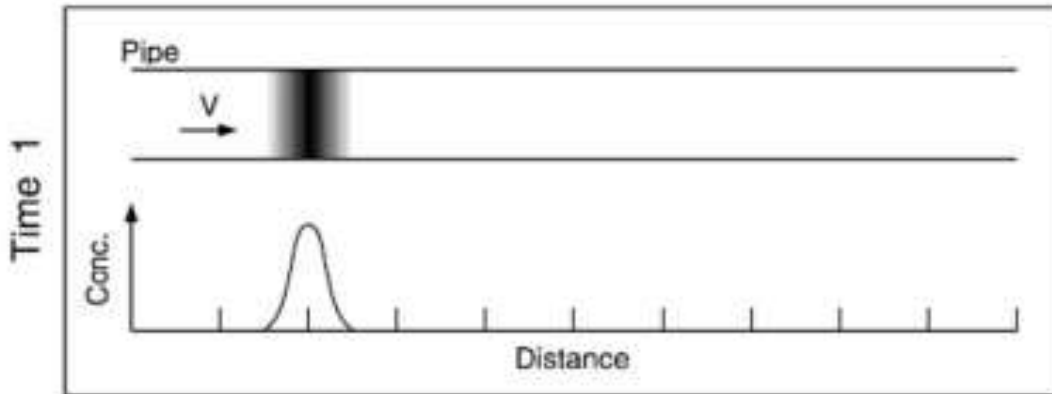


Ilustración 2. (CTRAN/W, 2012)

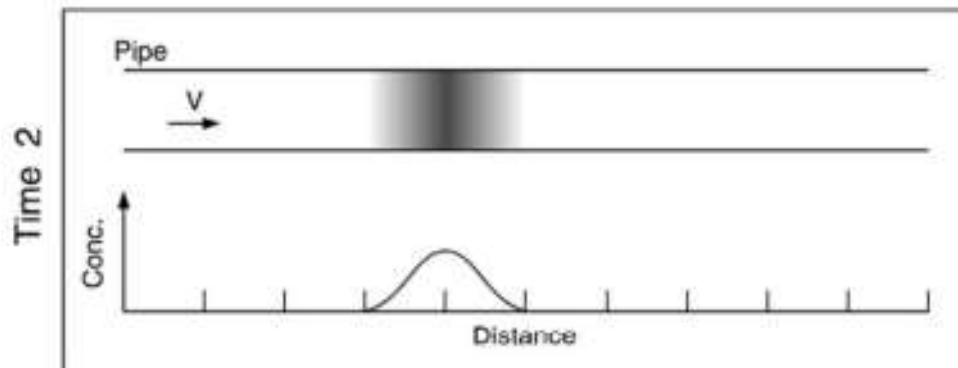
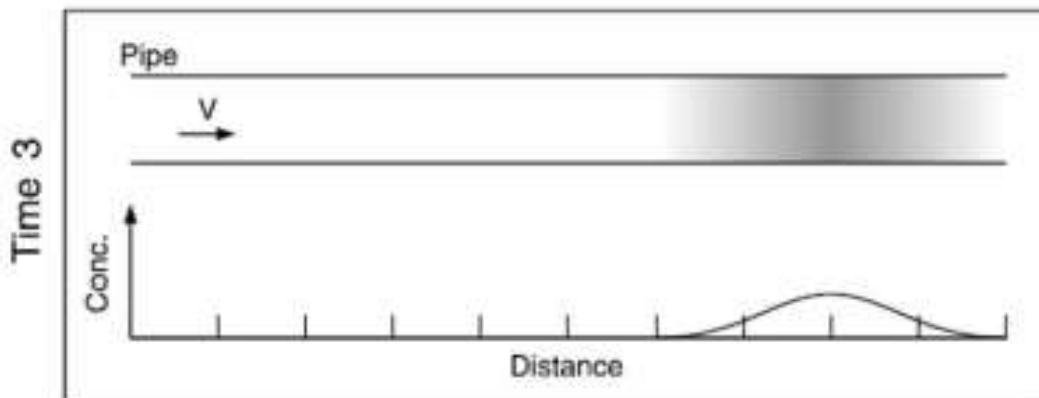


Ilustración 3. (CTRAN/W, 2012)



“El flujo producido por la mezcla de fluidos en dirección al flujo es denominada dispersión longitudinal y el flujo transportado en dirección perpendicular es llamado dispersión transversal; estos flujos se pueden dar en dirección horizontal y vertical”².

4.2 PROCESOS DE ATENUACIÓN

Cuando una partícula contaminante se transporta por un medio poroso como el suelo, dentro de estos poros se pueden desarrollar diferentes tipos de reacciones, una de ellas es la reacción entre el contaminante y los compuestos del suelo, y otra entre el contaminante y el fluido presente en las aberturas, por los factores anteriores este desplazamiento es atenuado. “Para los entornos porosos es de suma importancia el proceso de adsorción ya que es un elemento de gran relevancia para estos procesos; la adsorción es capaz de reducir el nivel de contaminación retirándola del suelo y dejando un flujo con pocos contaminantes”³.

4.3 MODELADO NUMÉRICO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LA MASA DEL SUELO

Para la simulación del transporte de contaminantes ha habido varios influyentes para la realización de modelos eficaces en la estimación que tienen estos lixiviado al reaccionar con el agua en el suelo.

Grandes investigadores han ido aportando modelos para culminar un método capaz de analizar los procesos que se tienen al momento de transporte de especies orgánicas o de algún contaminante, entre ellos han contribuido el

² APEY, Ashley. Contaminación de aguas subterráneas; determinación del coeficiente de dispersión mediante el uso de trazadores conservativos. Dispersión Mecánica. Santiago de Chile. 2009. #. 13.

³ CHAMORRO, Claudia y LÓPEZ, Norma. Modelación de contaminantes en la masa de suelo. Transporte de contaminantes. Mérida. 2016. #.3-4

problema de flujo multifase, técnicas numéricas para resolver el transporte de advección-difusión, flujo de agua subterránea, transporte de lixiviados a través de suelos estratificados y saturados; cabe resaltar que Li et al, 1999 postuló una manera de analizar el transporte de contaminante en el suelo incluyendo los mecanismos de advección, dispersión, difusión molecular y absorción, planteando la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = D * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \lambda * C$$

Donde: u= velocidad; t= tiempo; x= coordenada espacial; D= coeficiente de dispersión; y λ = constante de degradación.

A esta ecuación diferencial se le puede dar solución por el método de elementos finitos, asumiendo condiciones de fronteras iniciales correctas. (Chamarro & López, 2018).

De modo similar, en el 2004 Ataie-Ashtieni y Hosseini promueven una ecuación que representa este proceso en dos dimensiones, considerando una degradación de primer orden.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - KC \quad [2]$$

Donde: C = Concentración disuelta (M/L); t= tiempo [t]; k = coeficiente de reacción de primer orden [1/t]; D_{xx}, D_{yy} = términos principales del coeficiente de dispersión [L²/T]; D_{xy}= Término cruzado del coeficiente de dispersión; y V_x, V_y = componentes de velocidad en las direcciones X y Y [L/T].

“Este modelo es capaz de simular varios fenómenos en los que transportan contaminantes miscibles por medio del suelo e incluye advección, dispersión,

difusión, adsorción y los efectos de las reacciones químicas, cuyos resultados se presenta con gran exactitud”⁴.

En el transporte de contaminantes emiten varios procesos de desplazamientos de éste, pero dependerá de los compuestos que tenga la sustancia y de las propiedades geoquímicas del suelo; “el suelo no es el principal factor de distribución de contaminantes, sino que se complementa con el agua, el aire, colides y microorganismos para así ser distribuidos por el terreno”⁵.

⁴ CHAMORRO & LÓPEZ, Claudia & Norma. Modelación de contaminantes en la masa de suelo. Transporte de contaminantes. Mérida. 2016. #.3-4

⁵ LENOIR, TORNARI & CAMPOS. Christian, Gerardo & Luis. Contaminación y tratamiento de suelo. Proceso de flujo y transporte en el suelo. Buenos Aires. 2004. #.10.

5. METODOLOGÍA

El ejemplo tratado en este proyecto, se basó en el artículo “Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo”⁶, a partir de este se establecieron variaciones en la dispersividad longitudinal, transversal, permeabilidad y concentración relativa. Con el objetivo de obtener cuál de estos factores tenía mayor influencia el comportamiento del contaminante.

La modelación fue realizada en los programas *SEEP/W* y *CTRAN/W* pertenecientes a la marca *Geostudio*, se realizaron ocho modelaciones variando las propiedades anteriormente descritas de acuerdo a la tabla 1, 2. y 3.

Tabla 1. Datos de entrada simulacion 1, 2, 3

Modelo	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3
Kx saturasa, m/d	0,01	0.00864	0.0000864
Parámetros del contaminante			
Dispersividad Longitudinal, m	2	2	2
Dispersividad Transversal, m	1	1	1
Concentración de activación, Kg/m ³	0	0	0
Concentración relativa, Kg/m ³	10	10	10

⁶ CHAMORRO & LÓPEZ. Op. cit., p. 3-4

Tabla 2. Datos de entrada simulación 4, 5, 6

Modelo	Simulación 4	Simulación 5	Simulación 6
Kx saturasa, m/d	0,01	0.01	0.01
Parámetros del contaminante			
Dispersividad Longitudinal, m	2	3	2
Dispersividad Transversal, m	1	1	0.5
Concentración de activación, Kg/m ³	0	0	0
Concentración relativa, Kg/m ³	10	10	10

Tabla 3. Datos de entrada Simulación 7, 8

Modelo	Simulación 7	Simulación 8
Kx saturasa, m/d	0,01	0.01
Parámetros del contaminante		
Dispersividad Longitudinal, m	2	2
Dispersividad Transversal, m	1	1
Concentración de activación, Kg/m ³	0	0
Concentración relativa, Kg/m ³	10	20

6. MODELACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las modelaciones 0, 1 y 2 se varió la permeabilidad entre 0.01 y 0.0000864 (metro/día). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

La simulación de advección-dispersión representa la concentración del contaminante a medida que avanza en función del tiempo.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de advección-dispersión.

Ilustración 4. Permeabilidad 0.01 (m/d), 264 días (8.8 meses)

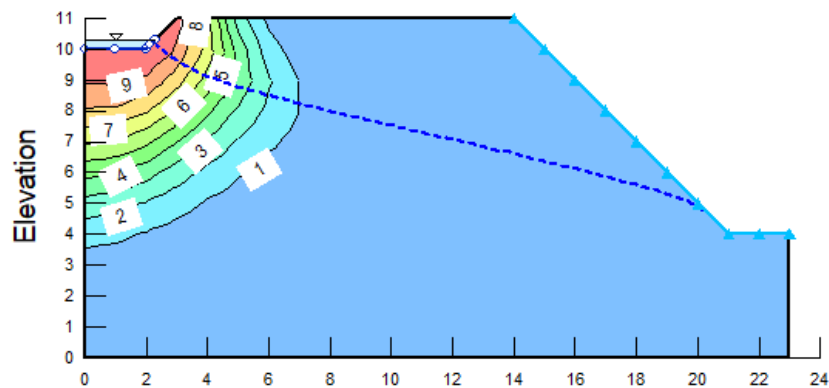


Ilustración 5. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 264 días (8.8 meses)

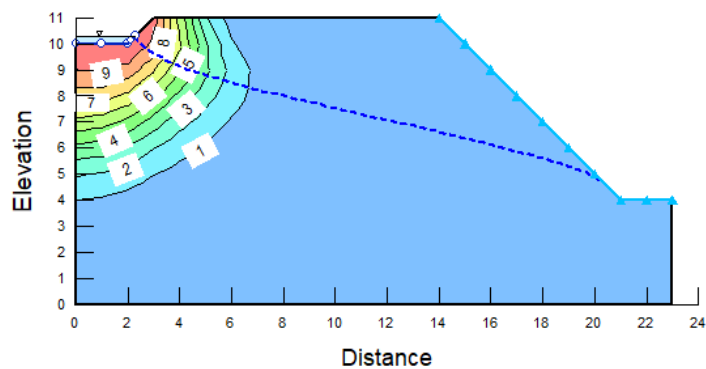
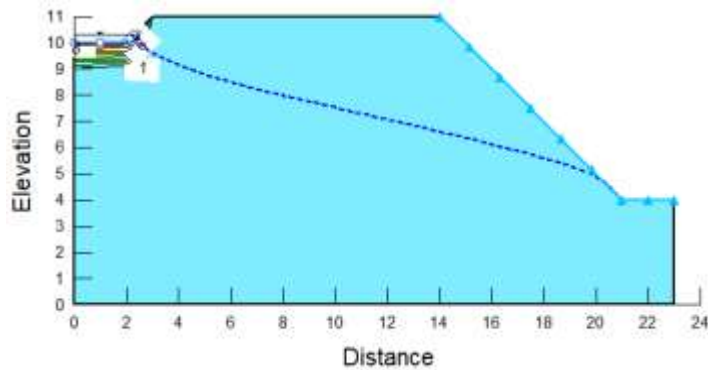


Ilustración 6. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 264 días (8.8 meses)



En la ilustración 4 la mancha del contaminante para una permeabilidad de 0.01 (m/d) se desplaza aproximadamente 4.4 metros y su máxima concentración está a un 1.2 metros aproximadamente, al disminuir la permeabilidad en la ilustración 5 a 0.00864 (m/d) se analiza que el contaminante recorre 4 metros y su máxima concentración se encuentra a 1 metro, por último en la ilustración 6 se tiene una permeabilidad de 0.0000864 (m/d) lo cual se observa que a disminuirla, la concentración máxima se reduce de 4.4 metros a aproximadamente 0 metros.

Ilustración 7. Permeabilidad 0.01 (m/d), 2772 días (7.59años)

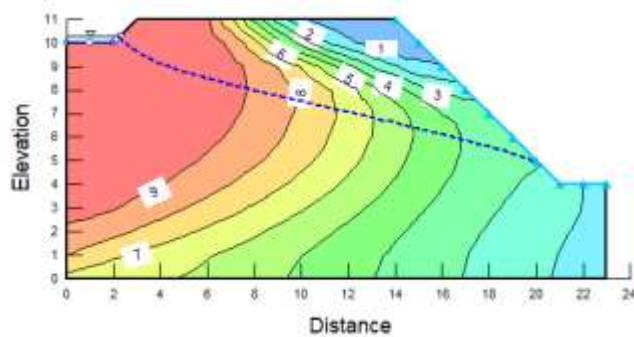


Ilustración 8. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 2772 días (7.59años)

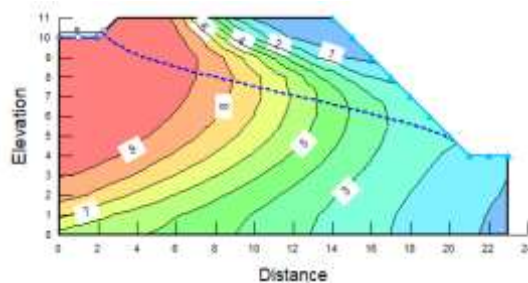
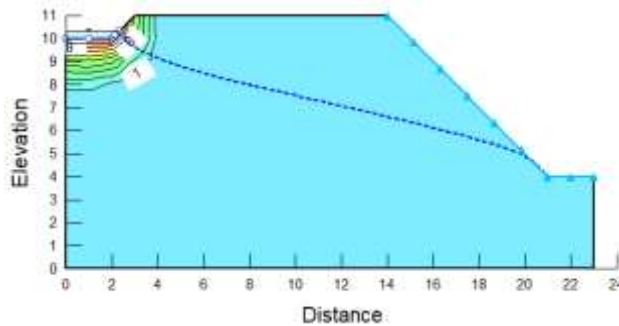


Ilustración 9. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 2772 días (7.59años)



Al transcurrir 2772 días se observa que en la ilustración 7 con una permeabilidad de 0.001 (m/d) la concentración máxima alcanza a 7.8 metros de profundidad, en la ilustración 8 se disminuye la permeabilidad a 0.00864 (m/d), el desplazamiento se ve reducido a 7 metros, por último en la ilustración 9, se analiza que la permeabilidad de 0.0000864 (m/d) el suelo reduce la mancha de concentración máxima a 0.2 metros aproximadamente.

Se varió la permeabilidad del suelo tres veces y fue disminuyendo desde 0.01 (m/d), luego 0.00864 (m/d) y por último 0.0000864 (m/d); se puede notar como al disminuir la permeabilidad del suelo no permite que el contaminante fluya tan fácil por el terreno, por ello es de gran importancia la impermeabilización del perímetro del relleno sanitario, para así reducir la propagación del lixiviado a zonas donde no queremos que llegue y pueda traer afectaciones ambientales y sanitarias.

En las modelaciones 3, 0 y 4 se varió la dispersividad longitudinal entre 1 y 3 (metro). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de advección-dispersión.

Ilustración 10. Dispersividad longitudinal 1 m, 264 días (8.8 meses)

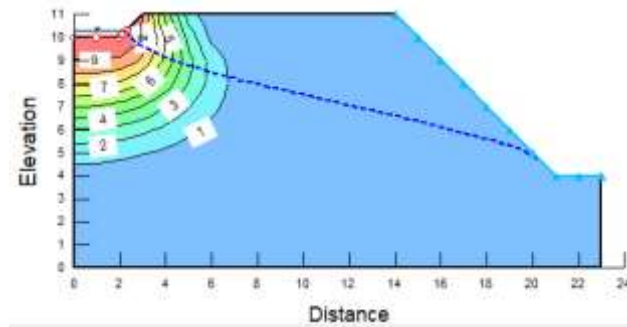


Ilustración 11. Dispersividad longitudinal 2 m, 264 días (8.8 meses)

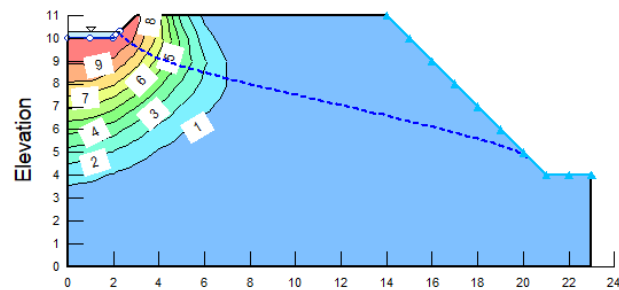
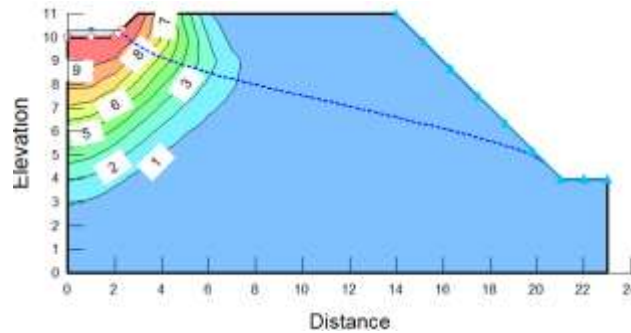


Ilustración 12. Dispersividad longitudinal 3 m, 264 días (8.8 meses)



En el día 264 para la ilustración 10 con una dispersividad longitudinal de 1 metro, se observa que la mancha de contaminante tiene un alcance de 5.25 metros y en la ilustración 11 aumentado su dispersividad longitudinal a 2 metros la mancha aumenta hasta una profundidad de 6.25 metros aproximadamente y en la ilustración 12 se vuelve aumentar este factor a 3 metros, lo cual también aumenta la profundidad de la mancha a 7 metros, esto indica que al aumentar la

dispersividad longitudinal será más fácil la propagación de la mancha contaminante en función del tiempo.

Ilustración 13. Dispersividad longitudinal 1 m, 2772 días (7.59años)

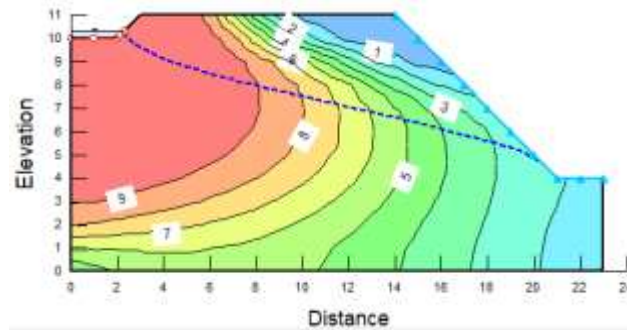


Ilustración 14. Dispersividad longitudinal 2 m, 2772 días (7.59años)

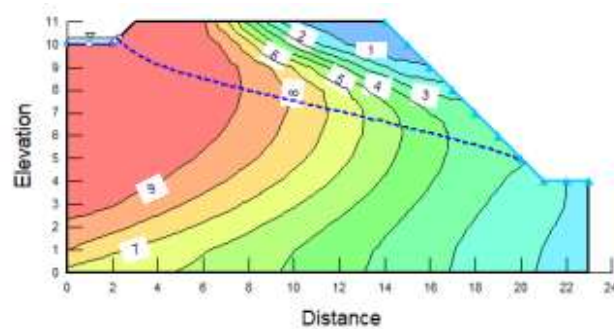
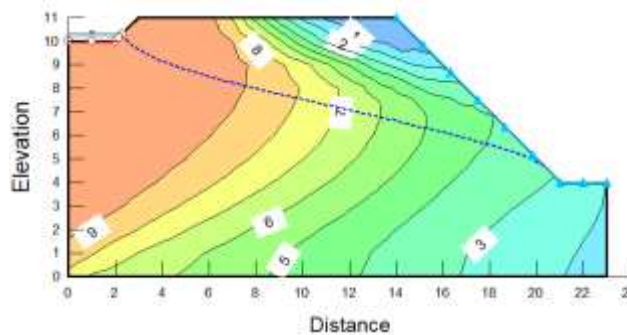


Ilustración 15. Dispersividad longitudinal 3 m, 2772 días (7.59años)



Al transcurrir el día 2772 se observa en la ilustración 13 con una dispersividad longitudinal de 1 metro la mancha de mayor concentración está a una distancia de 7 metros con respecto a la superficie del relleno, en la ilustración 14 con una dispersividad longitudinal de 2 metros la mancha de mayor concentración se encuentra a una profundidad de 7.8 metros y en la ilustración 15 se cambia este

factor a 3 metros aumentando la profundidad de la mancha contaminante de 7.8 metros a 8.5 metros, se puede notar como al aumentar la dispersividad longitudinal aumenta la profundidad de la trayectoria del contaminante.

En las modelaciones 5, 0 y 6 se varió la dispersividad transversal entre 0.5 y 2 (metro). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de advección-dispersión.

Ilustración 16. Dispersividad transversal 0.5 m, 264 días (8.8 meses)

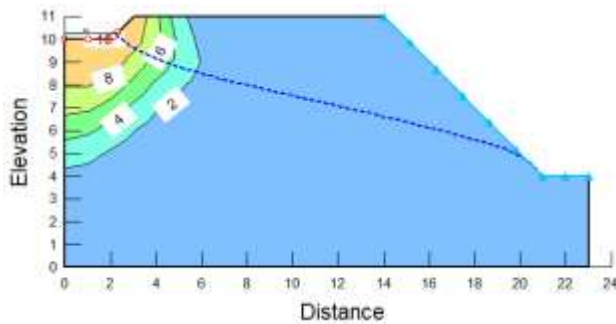


Ilustración 17. Dispersividad transversal 1 m, 264 días (8.8 meses)

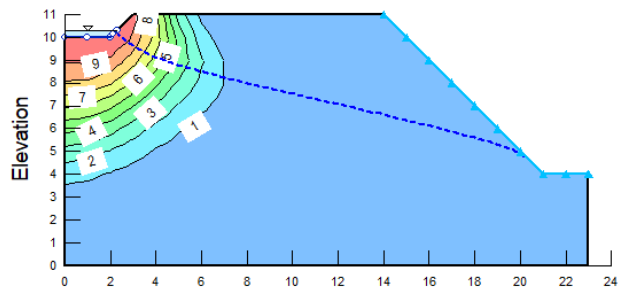
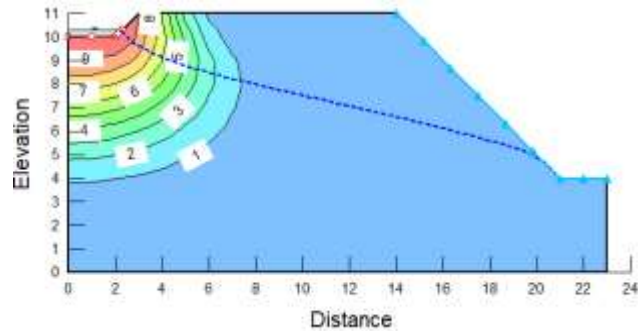


Ilustración 18. Dispersividad transversal 2 m, 264 días (8.8 meses)



Para un tiempo de 264 días se observa en la ilustración 16 con una dispersividad transversal de 0.5 metros la mancha contaminante de color rojo con concentración máxima tiene una profundidad de 0 m y la mancha de color naranja de concentración media-alta se desplaza hasta 2 metros por debajo de superficie y en la ilustración 17 con una dispersividad trasversal de 1 metro la mancha roja de concentración máxima llega a una profundidad de 1.1 metros y la mancha naranja de concentración media-alta a 1.9 metros, en la ilustración 18 con una dispersividad transversal de 2 metros la mancha roja de concentración máxima tiene una profundidad de 1 metro y la mancha naranja de concentración media-alta llega a una profundidad de 1.8 m.

Ilustración 19. Dispersividad transversal 0.5 m, 2772 días (7.59años)

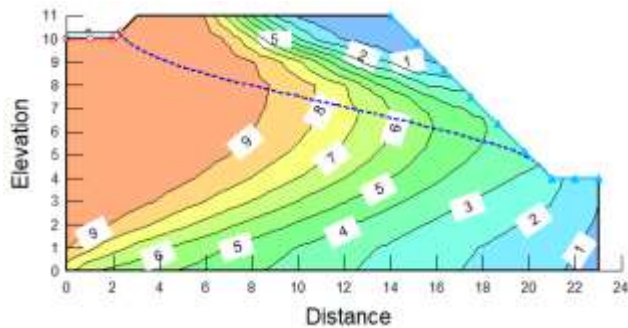


Ilustración 20. Dispersividad transversal 1 m, 2772 días (7.59años)

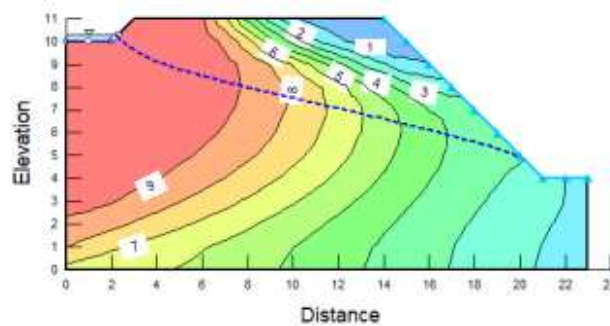
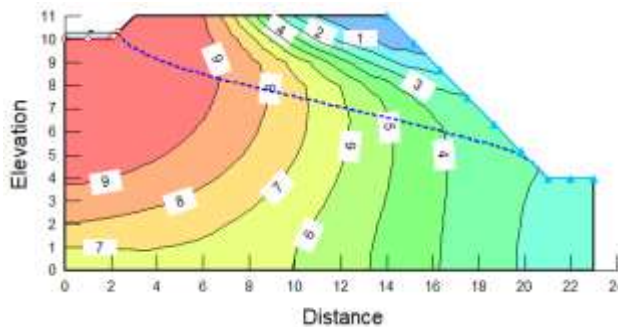


Ilustración 21. Dispersividad transversal 2 m, 2772 días (7.59años)



Al transcurrir el día 2772 días se observa en la ilustración 16 con una dispersividad transversal de 0.5 metros la mancha contaminante de color rojo con concentración máxima tiene una profundidad de 0 metros y la mancha de color naranja de concentración media-alta se desplaza hasta 9 metros por debajo de superficie y en la ilustración 17 con una dispersividad trasversal de 1 metro la mancha roja de concentración máxima llega a una profundidad de 7.8 metros y la mancha naranja de concentración media-alta a 9 metros, en la ilustración 18 con una dispersividad transversal de 2 metros la mancha roja de concentración máxima tiene una profundidad de 6.1 metros y la mancha naranja de concentración media-alta llega a una profundidad de 8 m.

Al analizar las ilustraciones de la 16 a la 21 observamos como al reducir la dispersividad longitudinal disminuye la concentración máxima del contaminante, pero la concentración media-alta aumenta su expansión.

En las modelaciones 7, 0 y 8 se varió la concentración relativa entre 5 y 20 (kilogramo/ metro cúbico). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de advección-dispersión.

Ilustración 22. Concentración relativa 5 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)

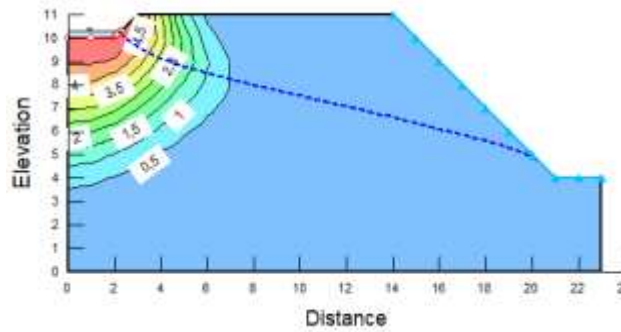


Ilustración 23. Concentración relativa 10 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)

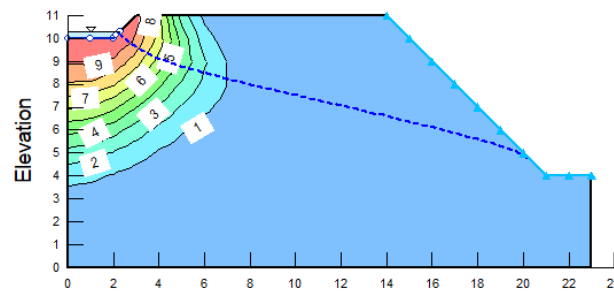
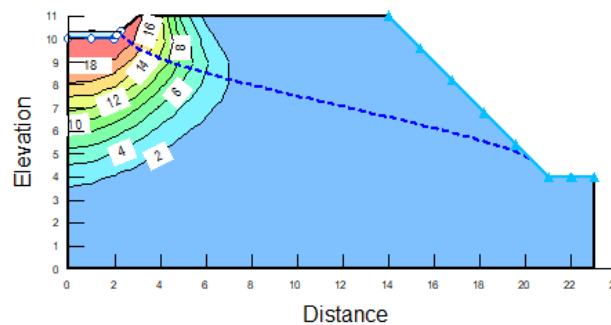


Ilustración 24. Concentración relativa 20 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)



Para un tiempo de 264 días se observa en la ilustración 22 con una concentración relativa de 5 (kilogramo/ metro cúbico) la mancha del contaminante se desplaza hasta una profundidad de 6.3 metros con una concentración mínima de 0.5 (kilogramo/ metro cúbico) al cambiar su concentración relativa a 10 (kilogramo/metro cúbico) en la ilustración 23 tiene una profundidad de 6.3 metros con una concentración mínima de 1 (kilogramo/ metro cúbico) y en la ilustración 24 se cambia este factor a 20 (kilogramo/ metro cúbico) donde la mancha se desplaza hasta una profundidad de 6.3 metros con una concentración mínima de 2 (kilogramo/ metro cúbico).

Ilustración 25. Cconcentración relativa 5 (kg/m³), 2772 días (7.59años)

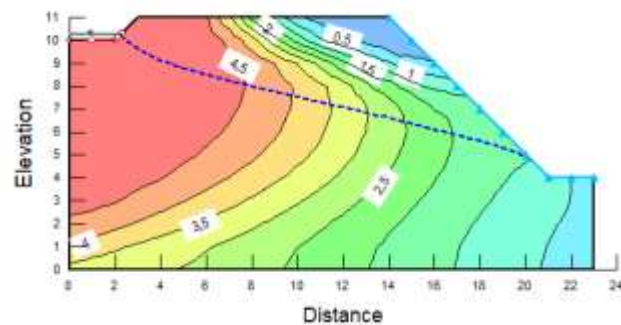


Ilustración 26. Concentración relativa 10 (kg/m³), 2772 días (7.59años)

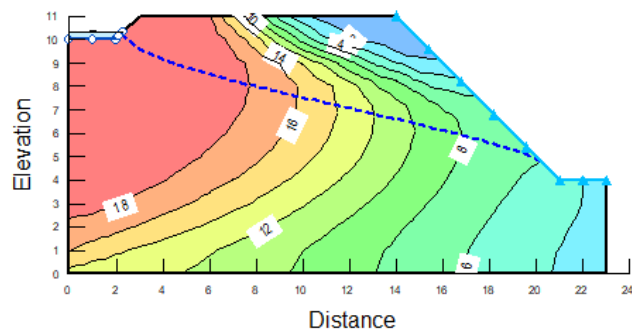
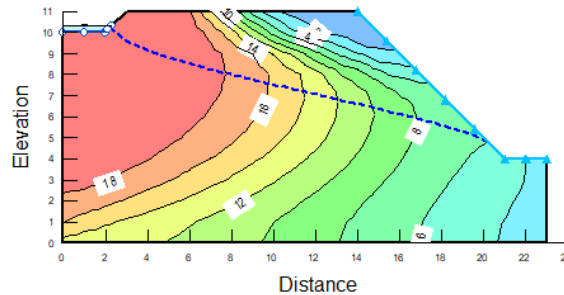


Ilustración 27. Concentración relativa 20 (kg/m³), 2772 días (7.59años)



Trascurriendo el día 2772 días se observa en la ilustración 25 con una concentración relativa de 5 (kilogramo/ metro cúbico) la mancha máxima del contaminante de 6 (kilogramo/ metro cúbico) se desplaza hasta una profundidad de 6.3 m al cambiar su concentración relativa a 10 (kilogramo/ metro cúbico) en la ilustración 26 tiene una profundidad de 6.3 metros con una concentración máxima de 9 (kilogramo/ metro cúbico) y en la ilustración 27 se cambia este factor a 20 (kilogramo/ metro cúbico) y la mancha se desplaza hasta una profundidad de 6.3 metros con una concentración máxima de 18 (kilogramo/ metro cúbico).

Analizando las ilustraciones del 24 al 27 se observa como al aumentar la concentración relativa del modelo no aumenta ni disminuye la profundidad de la mancha contaminante, pero si varia su concentración máxima teniendo el mismo desplazamiento, pero mayor concentración.

En las modelaciones 0, 1 y 2 se varió la permeabilidad entre 0.01 y 0.0000864 (metro/día). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de seguimiento de partículas.

Ilustración 28. Permeabilidad 0.01 (m/d), 264 días (8.8 meses)

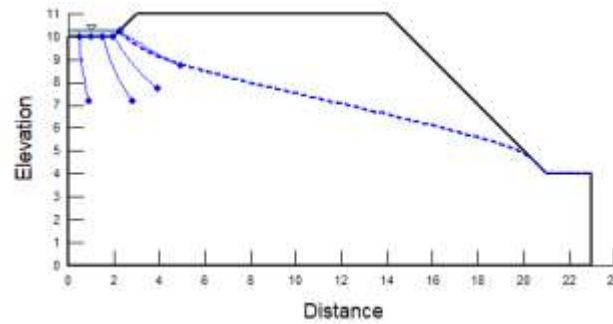


Ilustración 29. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 264 días (8.8 meses)

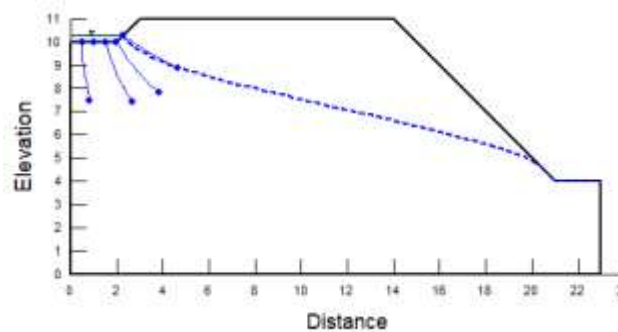
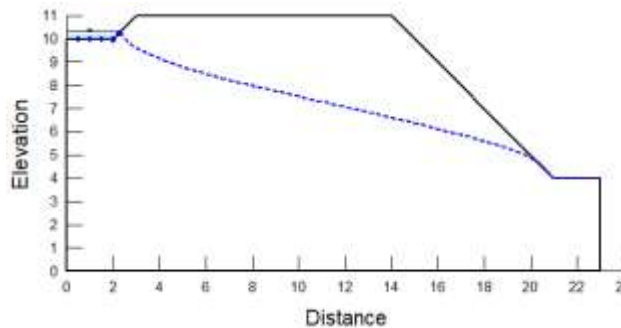


Ilustración 30. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 264 días (8.8 meses)



En un tiempo de 264 días para una permeabilidad de 0.01 metro/día en la ilustración 28 se muestra como la primera partícula a analizar llega hasta una profundidad de 2.9 metros y en la ilustración 29 al disminuir su permeabilidad a 0.0084 metro/día la profundidad de esta misma partícula será de 2.7 metros y en la ilustración 30 al volver a disminuir la permeabilidad a 0.0000864 metro/día el desplazamiento de esta partícula es 0 m.

Ilustración 31. Permeabilidad 0.01 (m/d), 2772 días (7.59años)

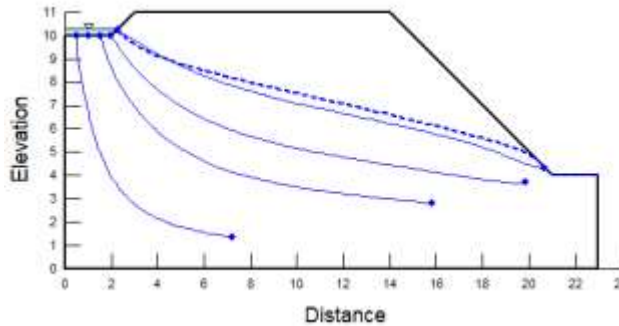


Ilustración 32. Permeabilidad 0.00864 (m/d), 2772 días (7.59años)

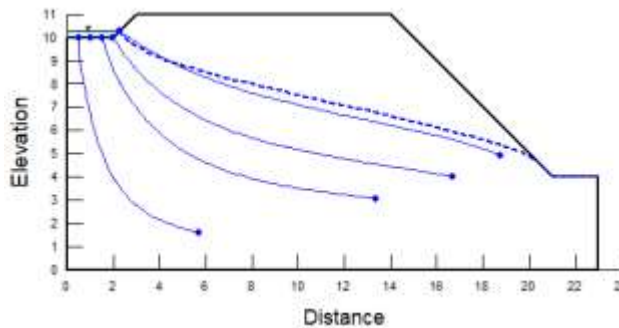
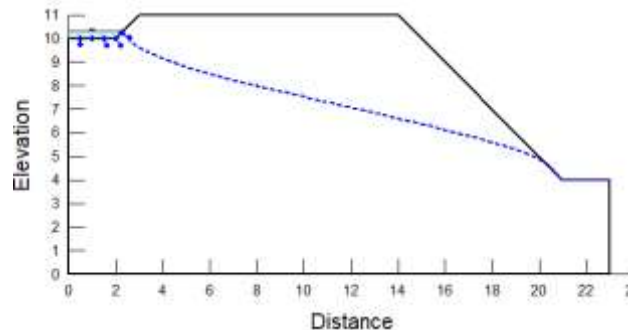


Ilustración 33. Permeabilidad 0.0000864 (m/d), 2772 días (7.59años)



En el día 2772 para una permeabilidad de 0.01 metro/día en la ilustración 31 se muestra como la primera partícula a analizar llega hasta una distancia en dirección Y de 8.9 metros y en dirección X de 7.2 metros, en la ilustración 29 al disminuir su permeabilidad a 0.0084 metro/día la distancia en dirección Y de esta misma partícula será de 8.5 metros y la distancia en dirección X será 5.9 metros, en la ilustración 30 al volver a disminuir la permeabilidad a 0.0000864 metro /día el

desplazamiento de esta particular en dirección Y es de 0.4 metros y en dirección X es 0.2 metros.

En las modelaciones 3, 0 y 4 se varió la dispersividad longitudinal entre 1 y 3 (metro). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59) años). A continuación, se presenta las gráficas de seguimiento de partículas.

Ilustración 34. Dispersividad longitudinal 1 m, 264 días (8.8 meses)

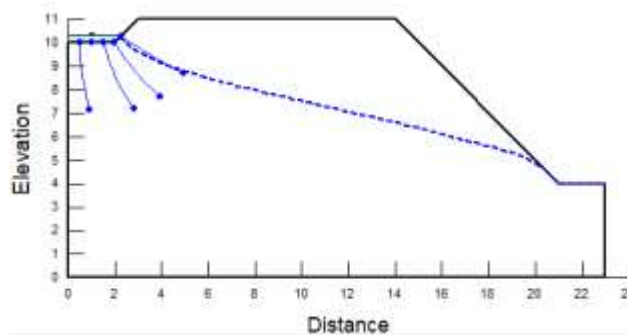


Ilustración 35. Dispersividad longitudinal 2 m, 264 días (8.8 meses)

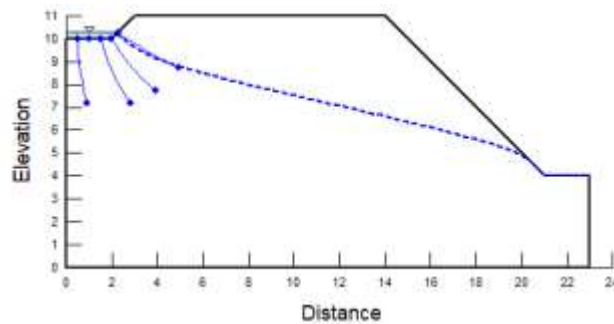
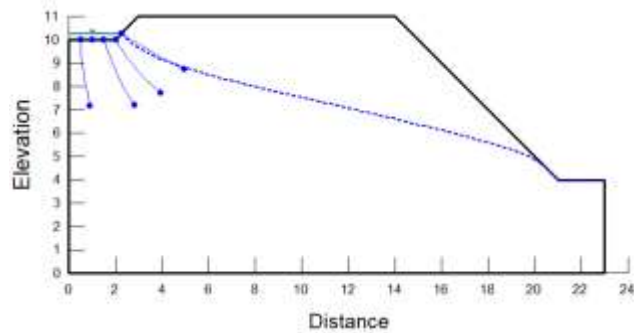


Ilustración 36. Dispersividad longitudinal 3 m, 264 días (8.8 meses)



En un tiempo de 264 días para una dispersividad longitudinal de 1 metro en la ilustración 34 se muestra como la primera partícula a analizar llega hasta una profundidad de 2.9 metros y en la ilustración 35 al aumentar su dispersividad longitudinal a 2 metros la profundidad de esta misma partícula será de 2.9 metros y en la ilustración 30 al volver aumentar la dispersividad longitudinal a 3 metros la profundidad de esta partícula será 2.9 metros, no varía el desplazamiento de la partícula aumentando la dispersividad longitudinal.

Ilustración 37. Dispersividad longitudinal 1 m, 2772 días (7.59años)

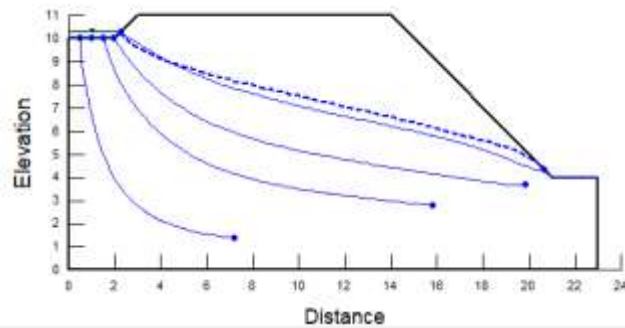


Ilustración 38. Dispersividad longitudinal 2 m, 2772 días (7.59años)

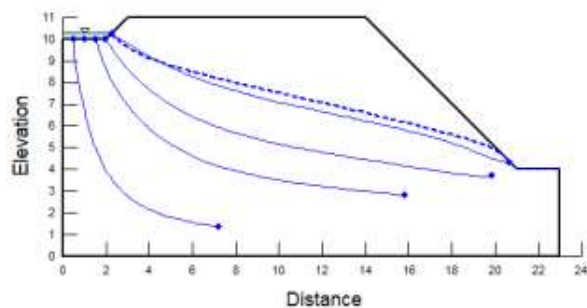
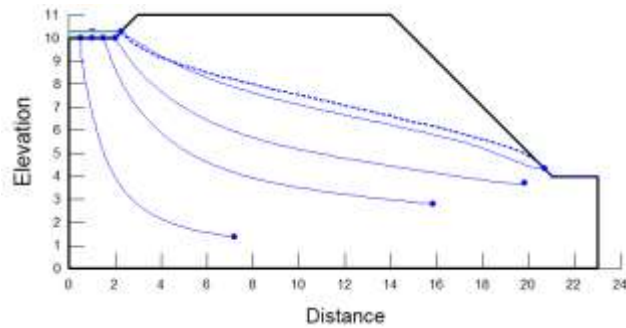


Ilustración 39. Dispersividad longitudinal 3 m, 2772 días (7.59años)



Trascurrido un tiempo de 2772 días para una dispersividad longitudinal de 1 metro en la ilustración 37 se muestra como la primera partícula a analizar llega a una distancia en dirección X de 7.3 metros y en dirección Y de 8.8 metros y en la ilustración 38 al aumentar su dispersividad longitudinal a 2 metros la distancia en el eje Y de esta misma partícula será de 8.9 metros y en el eje X de 7.3 metros y en la ilustración 30 al volver aumentar la dispersividad longitudinal a 3 la distancia en dirección Y de la partícula será de 8.9 metros y en dirección X de 7.3 metros, no varía el desplazamiento de la partícula aumentando la dispersividad longitudinal.

Al variar la dispersividad longitudinal no afecta el desplazamiento de las partículas ni en el eje X ni en el eje Y, por lo tanto, tendrán el mismo desplazamiento lo que varía es la concentración de la partícula contaminante.

En las modelaciones 5, 0 y 6 se varió la dispersividad transversal entre 0.5 y 2 (metro). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59 años). A continuación, se presenta las gráficas de seguimiento de partículas.

Ilustración 40. Dispersividad transversal 0.5 m, 264 días (8.8 meses)

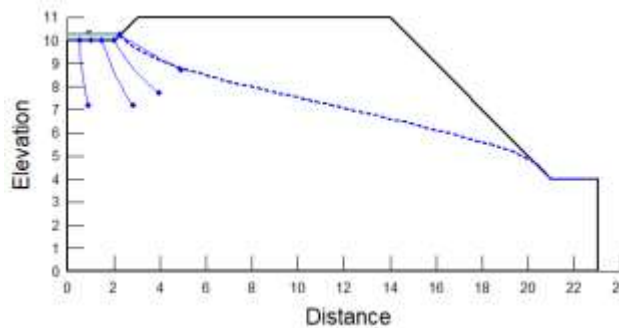


Ilustración 41. Dispersividad transversal 1 m, 264 días (8.8 meses)

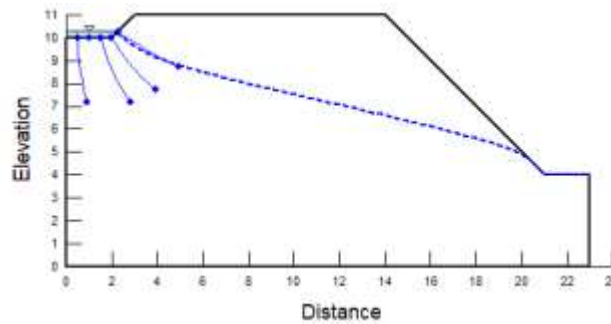
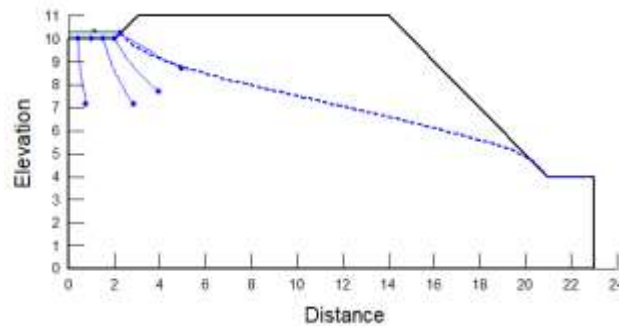


Ilustración 42. Dispersividad transversal 2 m, 264 días (8.8 meses)



En un tiempo de 264 días para una dispersividad transversal de 0.5 metros en la ilustración 40 se muestra como la primera partícula a analizar llega hasta una profundidad de 2.9 metros y en la ilustración 41 al aumentar su dispersividad longitudinal a 1.0 metro la profundidad de esta misma partícula será de 2.9 metros y en la ilustración 42 al volver aumentar la dispersividad longitudinal a 2 metros la profundidad de esta particular será 2.9 metros, no varía el desplazamiento de la partícula aumentando la dispersividad transversal.

Ilustración 43. Dispersividad transversal 0.5 m, 2772 días (7.59años)

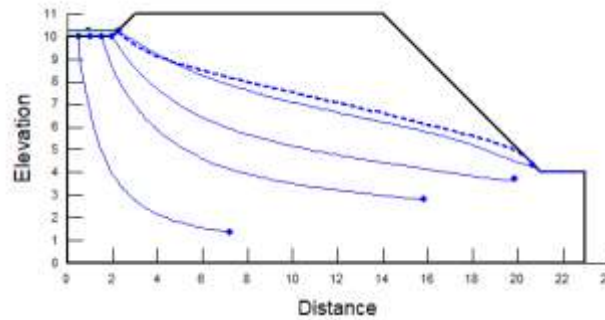


Ilustración 44. Dispersividad transversal 1 m, 2772 días (7.59años)

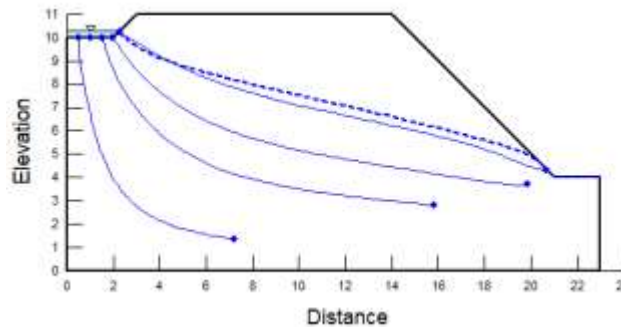
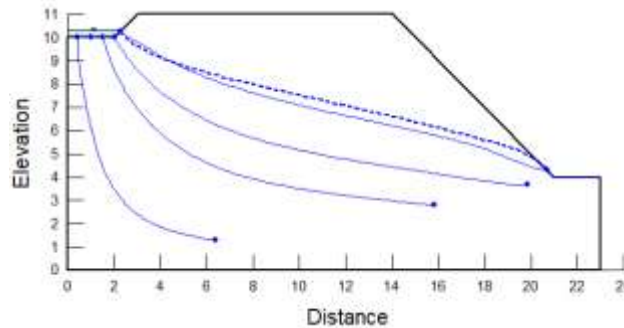


Ilustración 45. Dispersividad transversal 2 m, 2772 días (7.59años)



Trascurrido un tiempo de 2772 días para una dispersividad transversal de 0.5 metros en la ilustración 43 se muestra como la primera partícula a analizar llega a una distancia en el eje X de 7.3 metros y en el eje Y de 8.8 metros y en la ilustración 34 al aumentar su dispersividad transversal a 1 metro la distancia en el eje Y de esta misma particular será de 8.9 metros y en el eje X de 7.3 metros y

en la ilustración 30 al volver a aumentar la dispersividad longitudinal a 3 metros la distancia en el eje Y de la partícula será de 8.9 metros y en el eje X de 7.3 metros. Al variar la dispersividad longitudinal no afecta el desplazamiento de las partículas ni en el eje X ni en el eje Y van a tener el mismo desplazamiento, pero varía la concentración de la partícula del contaminante.

En las modelaciones 7, 0 y 8 se varió la concentración relativa entre 5 y 20 (kilogramo/ metro cúbico). Se analizaron dos tipos de gráficas: advección-dispersión y seguimiento de partículas.

También para cada gráfica se simularon dos tiempos de 264 días (8.8 meses) y 2772 días (7.59 años). A continuación, se presenta las gráficas de seguimiento de partículas.

Ilustración 46. Concentración relativa 5 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)

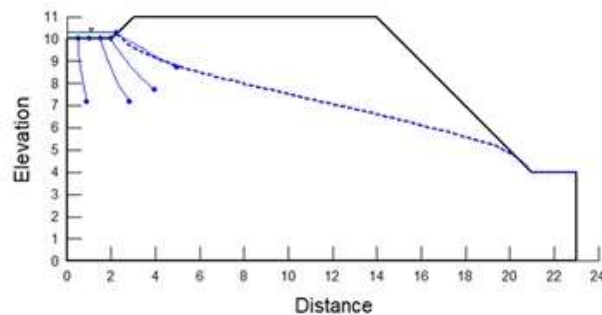


Ilustración 47. Concentración relativa 10 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)

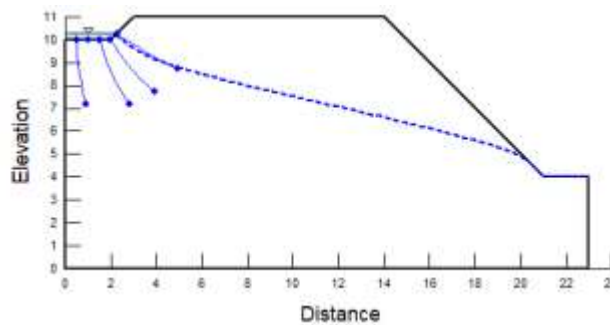
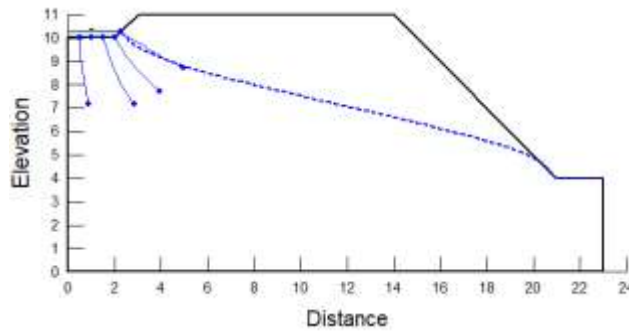


Ilustración 48. Concentración relativa 20 (kg/m³), 264 días (8.8 meses)



En un tiempo de 264 días para una concentración relativa de 5 (kilogramo/ metro cúbico) en la ilustración 46 se muestra como la primera partícula a analizar alcanza una profundidad de 2.9 metros y en la ilustración 47 al aumentar su concentración relativa a 10 (kilogramo/ metro cúbico) la profundidad de esta misma partícula será de 2.9 metros y en la ilustración 48 al volver incrementar la concentración relativa a 20 (kilogramo/ metro cúbico) la profundidad de esta particular será 2.9 metro, por lo tanto, no varía el desplazamiento de la partícula al aumentar la concentración relativa.

Ilustración 49. Concentración relativa 5 (kg/m³), 2772 días (7.59años)

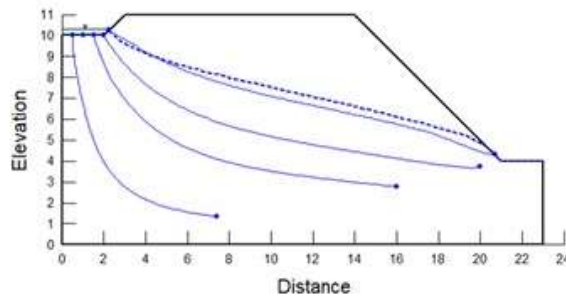


Ilustración 50. Concentración relativa 10 (kg/m³), 2772 días (7.59años)

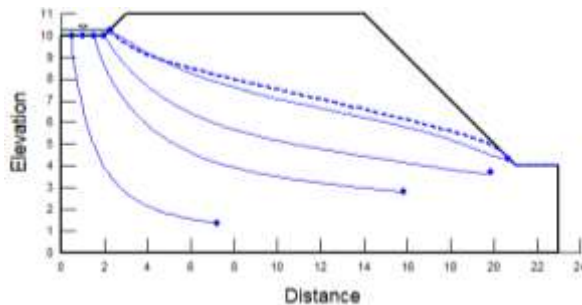
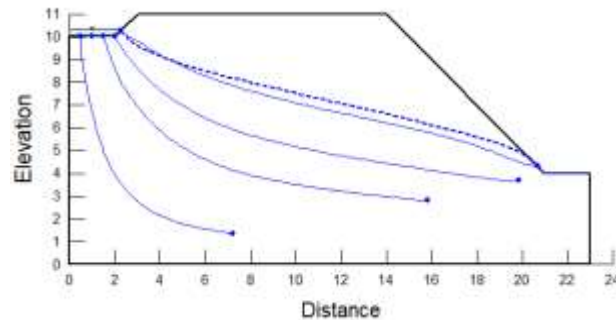


Ilustración 51. Concentración relativa 20 (kg/m³), 2772 días (7.59años)



Trascurrido un tiempo de 2772 días para una concentración relativa de 5 (kilogramo/ metro cúbico) en la ilustración 49 se muestra como la primera partícula a analizar llega a una distancia en el eje X de 7.3 metros y en el eje Y de 8.8 metros y en la ilustración 50 al aumentar su concentración relativa a 10 (kilogramo/ metro cúbico) la distancia en el eje Y de esta misma particular será de 8.9 metros y en el eje X de 7.3 metros y en la ilustración 51 al volver aumentar la concentración relativa a 20 (kilogramo/ metro cúbico) la distancia en el eje Y de la partícula será de 8.9 metros y en X de 7.3 metros, no varía el desplazamiento de la particular aumentando la concentración relativa

Al variar la concentración relativa no afecta el desplazamiento de las partículas ni en el eje X ni en el eje Y, por lo tanto, van a tener el mismo desplazamiento y lo que varía es la concentración de la partícula contaminante aumentando su concentración a medida que aumenta la concentración relativa.

Analizando las anteriores simulaciones, se puede observar que la permeabilidad es de suma importancia al momento de controlar la propagación de los lixiviados al igual que reducir la dispersividad transversal, por lo tanto, se hizo una última simulación combinando estas dos propiedades resaltantes para estudiar el mejor comportamiento que se le puede dar a un contaminante en un relleno sanitario. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en esta última simulación.

Ilustración 52. Concentración del contaminante 264 días (8.8 meses)

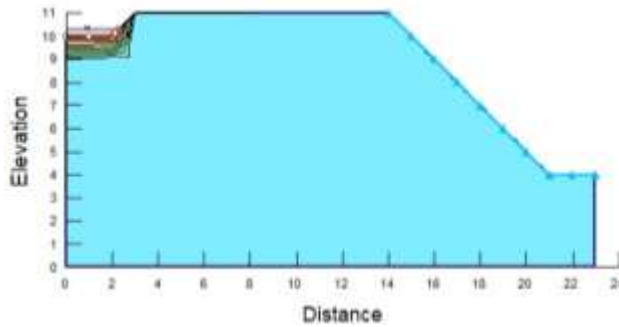
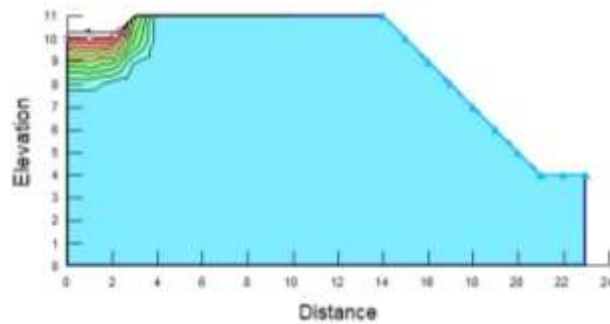


Ilustración 53. Concentración del contaminante 2772 días (7.59 años)



En las ilustraciones 52 y 53 se puede observar la poca variación de concentración que tiene el contaminante, esto se debe a la mitigación que se hizo a la permeabilidad y la dispersividad transversal, en esta simulación se tuvo en cuenta una permeabilidad de 0.0000864 metro/día y una dispersividad transversal de 0.5 metros

Ilustración 54. Seguimiento de partículas (hacia adelante) 264 días (8.8 meses)

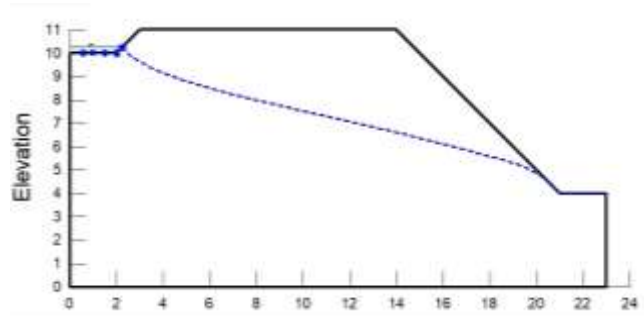
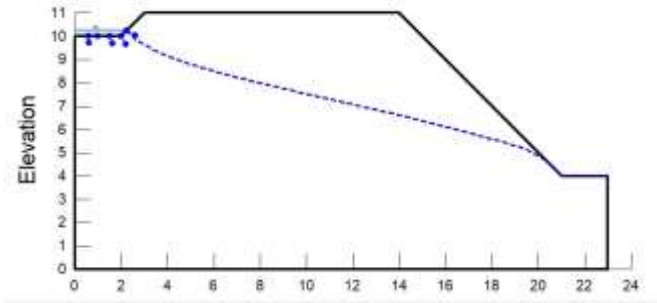


Ilustración 55. Seguimiento de partículas (hacia adelante) 2772 días (7.59 años)



Teniendo en cuenta el seguimiento de partículas se puede analizar en las ilustraciones 54 y 55 que el desplazamiento de estas partículas es muy poco debido a que tiene las mismas condiciones descritas en el anterior párrafo.

7. CONCLUSIONES

- La permeabilidad incide en el avance de la mancha del contaminante, a menor permeabilidad podemos obtener una contención de la contaminación.
- En los modelos se pudo establecer que al aumentar el coeficiente de dispersividad longitudinal y transversal se obtuvo un mayor avance en la propagación del contaminante.
- El avance de la mancha del contaminante es independiente de la concentración relativa, cambia los valores de contaminación, pero la tendencia se mantiene.
- Se observó que la permeabilidad del suelo es el parámetro que mayor incide de la trayectoria de la mancha del contaminante.
- Al combinar la menor permeabilidad con la menor dispersividad transversal se obtiene el mejor comportamiento del contaminante en el relleno sanitario.

BIBLIOGRAFÍA

APEY, A. (2009). Contaminación de aguas subterráneas: Determinación de dispersión mediante el uso de trazadores conservativos. 13

ANGELONE, S, Garibay, M. y CAUHAPÉ, M. (septiembre, 2006). Permeabilidad de suelos. 16

CHAMORRO, C. y LÓPEZ, N. (2018): Modelación del transporte de contaminantes en la masa del suelo. 3,4

GARCÍA GUADARRAMA, B. (2007). Determinación de los coeficientes de solubilidad, difusión y permeabilidad de gases en polímeros mediante la técnica de decaimiento de la presión. 11.

GEO-SLOPE, Internacional Ltd. (2012).

Informe de las Naciones Unidas Sobre los recursos hídricos en el mundo. (2015). Agua para un mundo sostenible. 2

LENIR, C. Tornari, G. y CAMPOS, L. (octubre 2004) Contaminación y tratamiento del suelo. 10

Ministerio de Ambiente Sostenible de Colombia, SIAC, (2012). Calidad del agua.

Modelamiento de contaminantes con CTRAN/W. 5

Organización Mundial De Las Naciones Unidas Para La Educación La Ciencia Y La Cultura (UNESCO), (2012). Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos (WWAP).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agrícola (FAO), (2010), La labor de la FAO en el agua.

Science for a changing world (USGS), (2013), The Effects of Withdrawals and Drought on Groundwater Availably in the Northern Guam Lens Aquifer, Guam.

ANEXOS

Anexo A. Parámetros hidráulicos del modelo base

Parámetro	Valor
Material	Limo
Modelo	Saturado / No saturado
Función	Conductividad - X vs. Presión de poro
Proporción K_y'/K_x'	1
K_x saturada	0.01 m/d
Contenido de agua saturado	0.35 m ³ /m ³
Contenido de agua residual	0.035 m ³ /m ³

Ilustración 1. Tabla de datos para establecer el flujo

Anexo B. Parámetros del contaminante del modelo base

Parámetro	Valor
Dispersividad longitudinal	2 m
Dispersividad transversal	1 m
Período de semidesintegración	0 d
Densidad seca	0 kg/m ³
Concentración de activación	0 kg/m ³

Ilustración 2. Tabla de datos para el contaminante

Anexo C. Ubicación de las partículas

Partículas	x (m)	y (m)
Partícula 1	0.5	10
Partícula 2	1	10
Partícula 3	1.5	10
Partícula 4	2	10
Partícula 5	2.25	10.25

Ilustración 3. Tabla de la ubicación de las partículas para todas las simulaciones

Anexo D. Diagrama de flujo del terreno estudiado

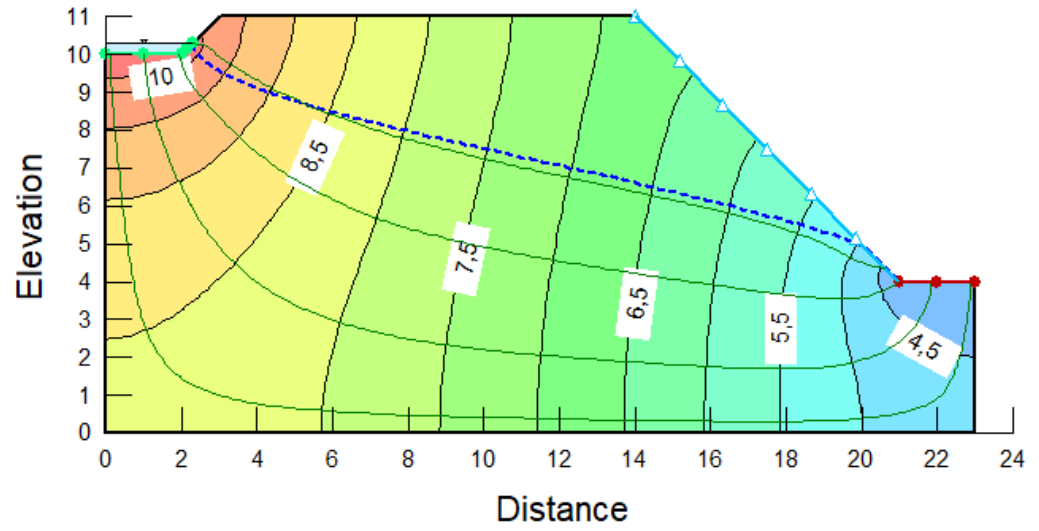


Ilustración 4. cabeza total

Anexo E. Tabla de coeficiente de permeabilidad del suelo

TABLA I: Valores de k en cm/seg

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno						Pobre			Prácticamente impermeable		
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d							
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.			
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.						Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia					

Ilustración 5. Angelone, Garibay & Cauhapé. (2006)

Anexo F. Datos de cada simulación elaborada

Modelo		Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4	Simulación 5	Simulación 6	Simulación 7	Simulación 8
Material	Limo	Limo	Limo	Limo	Limo	Limo	Limo	Limo	Limo
Modelo	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado	Saturado/No saturado
Función	Conductividad X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro	Conductividad - X vs Presión de poro
Proporción K_y/K_x'	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K_x saturada, m/d	0.01	0.00864	0.0000864	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de agua saturado, m^3/m^3	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Contenido de agua residual, m^3/m^3	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Parámetros del contaminante									
Dispersividad longitudinal, m	2	2	2	1	3	2	2	2	2
Dispersividad transversal, m	1	1	1	1	1	0.5	2	1	1
Periodo de semidesintegración, d	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Densidad seca, Kg/ m^3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concentración de activación, Kg/ m^3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concentración relativa, Kg/ m^3	10	10	10	10	10	10	10	5	20

Ilustración 6. Parámetros establecidos para analizar el comportamiento del contaminante en el suelo

Anexo G. Procedimiento de la elaboración para cada simulación en GEOSTUDIO

Se inicia con *SEEP/W* definiendo el tipo de análisis estado estable (steady-state), estableciendo la geometría del terreno a trabajar y los puntos de frontera que se tiene en este, para así, proceder a seleccionar el material del modelo que en este caso se manejará saturado-no saturado: a continuación se estipula el contenido del volumen de agua tomando función de punto de datos VWC (VWC data point function), para esta función se usa la estimación de algoritmos por intervalos con un contenido de agua saturada de 0.5 con un material de muestra tipo limo con un coeficiente de compresibilidad estará en $5E-41$ kPa, luego, para la función de conductividad hidráulica se usa el método de estimación de Van Genuchten donde se establece la conductividad hidráulica y el agua residual, además para crear un material isotrópico es necesario cambiar la rotación y la relación de permeabilidad tanto vertical como horizontalmente (K_y/K_x); se procede a asignar el dominio del material en la región modelada para determinar, en este caso, tres condiciones de perímetro del terreno: presión cero que analiza la cabeza de presión constante, la cara de filtración de potencial que estudia todas las cabezas de presión mayores a cero o que no sean constantes y, finalmente, la condición añadida que representa el nivel del análisis modelado o el límite del nivel de cabeza de presión que tenga el talud.

CTRAN/W acoge los resultados expuestos por *SEEP/W*, para iniciar con el análisis de transporte de contaminantes el estudio a realizar es el de advección y dispersión, le sigue el seguimiento de partículas el cual define el tiempo en que son modeladas las partículas del contaminante en el suelo y el número de pasos para este mismo tiempo, en seguida, se establece las propiedades del transporte soluto de este material así como la dispersividad longitudinal de 2m y transversal 1m, densidad seca cero kg/m^3 , periodo de semidesintegración cero días y concentración de activación cero kg/m^3 , con base a estas propiedades se da inicio

a las condiciones de advección y dispersión para fijar una constante de concentración de 10 kg/m^3 asumiendo que el modelo tiene una inyección continua del contaminante a lo largo del terreno, también se añade una salida de tasa masa mayor o igual a cero; en este proyecto se define el tamaño de la malla de elementos finitos para resolver el estudio cada un metro aproximadamente.