

**MODELAMIENTO DE FLUJO Y DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTE EN
MEDIOS POROSOS MEDIANTE UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS**

**ANGEL EDUARDO DUARTE PEÑA
JENNY PAOLA VIZCAYA NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**MODELAMIENTO DE FLUJO Y DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTE EN
MEDIOS POROSOS MEDIANTE UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS**

**ANGEL EDUARDO DUARTE PEÑA
JENNY PAOLA VIZCAYA NIÑO**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero civil**

**Director
WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios por darme paciencia, sabiduría y guiarme por el camino correcto.

A mis padres Angel Vidal Duarte Carreño Y Edith Peña, quienes me han inculcado valores para actuar con prudencia y responsabilidad, son un gran ejemplo a seguir durante todo este recorrido.

A mi hermana Luz Helena, por compartir y aconsejarme en los momentos difíciles de mi vida.

A mi amiga y compañera Jenny Paola Vizcaya Niño por todo el esfuerzo y ánimo durante la realización de nuestro proyecto.

Y finalmente a todos mis amigos y compañeros que hicieron parte de esta meta que hoy logro alcanzar.

ANGEL EDUARDO DUARTE PEÑA

DEDICATORIA

A Dios por darme el don de la Vida, fortaleza, dedicación y sabiduría para alcanzar esta gran meta.

A mis padres Rufina Niño Pinto y Luis Eduardo Vizcaya Rodríguez quienes me han brindaron todo su apoyo, cariño, amor, confianza y compañía durante toda mi vida.

Gracias por tanto esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos, Daniela, Natalia y Juan Felipe Vizcaya por su constante apoyo paciencia y sabios consejos.

A mi amigo y compañero de proyecto, Ángel Eduardo por su apoyo, motivación dedicación y esfuerzo en la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de estudio que estuvieron presente en mi desarrollo profesional y con los que compartí momentos de alegrías y tristezas.

JENNY PAOLA VIZCAYA NIÑO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos:

A Dios, por darnos la sabiduría y paciencia para lograr esta meta.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil por permitirnos obtener una formación integral.

Al profesor WILFREDO DEL TORO, Director de nuestro proyecto, por brindarnos sus conocimientos, confiar en nosotros y dedicarnos parte de su tiempo en desarrollar este proyecto.

A la firma ECODES (Ecología y Desarrollo) por brindarnos todos los estudios realizados junto con la EMAB de la zona a la cual realizamos el modelamiento.

Al Geólogo Guillermo Vargas Silva el cual nos asesoró, recomendó y nos dio excelentes aporte en el proyecto.

A la empresa CDMB por la colaboración prestada en el desarrollo de la presente investigación.

Y a todas aquellas personas que de manera desinteresada brindaron su colaboración en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. FLUJO DE AGUA EN SUELOS	19
1.1. INTRODUCCIÓN	19
1.1.1. Ley de Darcy	19
1.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	20
1.3. PERMEABILIDAD EN SUELOS	21
1.4. FUNCIONES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS	23
1.4.1. Modelos de humedad	23
1.4.2. Modelos de conductividad	24
1.5. PROPIEDADES DE LOS SUELOS	26
1.5.1. Distribución de tamaños de partículas	26
1.5.2. Porosidad	27
2. TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS	29
2.1. INTRODUCCIÓN	29
2.2. APLICACIONES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	29
2.3. PRE PROCESO Y GENERACIÓN DE LA MALLA	30
2.4. CÁLCULO Y RESOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES	32
2.5. POSTPROCESO	32
3. SOFTWARE SEEP/W Y CTRAN/W	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. SEEP/W	35
3.2.1. Características del programa	35
3.3. CTRAN/W	37

4. EJEMPLO APLICATIVO SEEP/W Y CTRAN/W	39
4.1. FLUJO DE AGUA	39
4.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	41
4.3. GENERACIÓN Y MODIFICACIÓN DE LA MALLA MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	42
4.4. CONDICIONES DE CONTORNO PARA FLUJO DE AGUA	43
4.5. TRANSPORTE DEL CONTAMINANTE	46
4.6. RASTREO DE PARTÍCULAS	46
4.7. ADVECCIÓN-DISPERSIÓN	48
4.8. CONDICIONES DE CONTORNO PARA CONTAMINANTES	48
4.9. CONCLUSIÓN	50
5. EJEMPLO APLICATIVO BASURERO EL CARRASCO	51
5.1. INTRODUCCIÓN	51
5.2. RELLENO SANITARIO	52
5.3. BASURERO EL CARRASCO	53
5.4. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	57
5.4.1. Segmento Órganos (Qbo)	57
5.4.2. Segmento Finos de Bucaramanga (Qbf)	58
5.4.3. Segmento Gravoso (Qbg)	59
5.4.4. Segmento Limos rojos (Qblr)	59
5.5. HIDROLOGÍA	61
5.5.1. Valores del coeficiente de permeabilidad en distintos suelos	62
5.6. MODELAMIENTO	64
5.6.1. Posible Contaminación de Acuíferos	64
5.6.2. Transporte de lixiviados hacia el drenaje	68
5.6.3. Estudio de una posible trayectoria de lixiviados hacia la quebrada la Iglesia	71
CONCLUSIONES	74

RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	80

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Grafica 1. Clasificaciones de suelos más usadas	27
Grafica 2. Modelo geométrico presa	39
Grafica.3 ventana Estimación función de volumen contenido de agua	40
Grafica 4 Ventana función contenido de agua	40
Grafica 5 Ventana estimación de la conductividad hidráulica	41
Grafica 6 Ventana función de conductividad hidráulica	42
Grafica 7 Vista previa de la malla	43
Grafica.8 Ventana condiciones de contorno	43
Grafica 9. Resultados obtenidos comportamiento flujo de agua	44
Grafica 10 Líneas de referencia evaluación de caudal	45
Grafica 11 Resultado análisis de rastreo de partículas (Advección)	47
Grafica 12. Resultado análisis advección-dispersión.	49
Grafica 13. Análisis grafico tiempo vs masa acumulada	50
Grafica 14. Distribución de las cárcavas	56
Grafica 15. Modelamiento sección transversal del Carrasco	65
Grafica 16. Flujo y transporte de partículas del lixiviado después 1600 días	67
Grafica 17. Dispersión del lixiviado después 1250 días	67
Grafica 18. Modelo del suelo del drenaje de la cárcava 2	68
Grafica 19 Flujo y transporte de partículas del lixiviado después 4600 días	69
Grafica 20. Dispersión del lixiviado después 2400 días	70
Grafica 21. Trayectoria del recorrido del contaminante	71
Grafica 22. Perfil de la zona de estudio	72
Grafica 23. Nivel freático y transporte de partículas del lixiviado después 45000 días	72
Grafica 24. Dispersión del lixiviado después 35200 días	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores de permeabilidad	22
Tabla 2. Porcentajes de porosidad	28
Tabla 3. Características promedias de residuos que entran (Adaptado de estudio para la sustracción del predio “el Carrasco” ECODES 2006)	56
Tabla 4. Registros eléctricos verticales (Adaptado de estudio para la sustracción del predio “el carrasco” ECODES 2006)	60
Tabla 5. Valores de k en cm/seg (adaptado del estudio permeabilidad en suelos Universidad Nacional de Rosario)	63

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Propiedades Hidráulicas De Los Suelos	80
Anexo B. Análisis En Seep/W	82
Anexo C. Generación Y Modificación De La Malla Del Modelo De Elementos Finitos.	93
Anexo D. Rastreo de partículas	100

RESUMEN

TÍTULO: MODELAMIENTO DE FLUJO Y DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN MEDIOS POROSOS MEDIANTE UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS*

AUTORES: DUARTE PEÑA, Angel Eduardo
VIZCAYA NIÑO, Jenny Paola**

PALABRAS CLAVE: Transporte, lixiviados, agua subterránea, elementos finitos, geología.

DESCRIPCIÓN: Los recursos hídricos subterráneos están bajo amenaza progresiva debido a las demandas crecientes, el desperdicio y la contaminación. Para enfrentar este desafío deben implementarse planeamientos y prácticas de manejo integrado del agua subterránea.

Un factor clave del agua subterránea es el modelamiento del régimen de flujo en la sub-superficie. Los modelos numéricos son una plataforma para interpretar el flujo de aguas subterráneas y permite evaluar escenarios predictivos. Modelos de agua subterránea son utilizados para representar las condiciones actuales del régimen y simular el impacto en los recursos hídricos subterráneo de proyectos.

Se utilizó como herramienta de estudio el software GeoStudio el cual permitió elaborar diferentes modelamientos del Carrasco, actualmente es el depósito de basura de la ciudad de Bucaramanga y otros 9 municipios, este software es un herramienta potencial y muy buena para analizar el flujo y transporte de contaminantes en el suelo, conociendo los posibles comportamientos y el tiempo que puede demorar un contaminante en llegar a cierto punto.

Tomando suelos arenosos, limo-arenosos, limo-arcillosos y gravas con conductividades hidráulicas que van desde $10e-4$ a $10e-6$ cm/seg en terrenos semi-saturados y volúmenes de contenido de agua de 0.1 a 0.3 m³/m³ se realizó el estudio de flujo y transporte de lixiviados en la zona de la cárcava 1 del Carrasco, así se pudo determinar cómo este contaminante influye en los acuíferos regionales, quebradas y drenaje de la planta de tratamiento.

Con los estudios realizados se observa una posible contaminación del acuífero que se encuentra entre la formación girón y la formación Bucaramanga, también se determinó la influencia que el contaminante tiene hacia la quebrada la iglesia y se concluyó que no es posible que se contamine por medio del transporte de flujo subterráneo, por último se estudia como flujo llega al drenaje que va hacia la planta de tratamiento.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil UIS. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez.

SUMMARY

TITLE: MODELING FLOW AND CONTAMINANT TRANSPORT IN POROUS MEDIA BY USING FINITE ELEMENT*

AUTHORS: DUARTE PEÑA, Angel Eduardo
VIZCAYA NIÑO, Jenny Paola **

KEYWORDS: Transport, leachate, groundwater, finite elements, geology.

DESCRIPTION: In many parts of the world, groundwater resources are under threat due to progressively growing demands, wasteful use and pollution. To meet this challenge you should implement good planning and integrated management practices groundwater.

A key factor in the management of groundwater is the modeling of the system of groundwater flow in the subsurface. Numerical models are a great platform to interpret the flow of groundwater and to evaluate predictive scenarios. The groundwater models are used to represent the current conditions of groundwater regime and simulate the impact on underground water resources projects.

Was used as a study tool GeoStudio software which allowed us makes different modeling Carrasco area, now is the garbage dump of the city of Bucaramanga and 9 other municipalities, this software is a very good potential tool for analyzing the flow and transport of contaminants in soil, knowing the possible behaviors and the time it may take a contaminant in a certain point.

Taking sandy, sandy loam, clay loam and gravel with hydraulic conductivities ranging from $10e-4$ to $10e-6$ semi-saturated land and volumes of water content of 0.1 to 0.3 m^3/m^3 was conducted to study flow and transport leachate in the gully area carrasco 1, so it could be determined as this pollutant affects regional aquifers, streams and drainage treatment plant.

According to studies there is a possible contamination of the aquifer that lies between Girontraining and lower Bucaramanga training, we also determined the influence that the contaminant has broken into the church and it was concluded that it is not possible to be contaminated by the transport of groundwater flow, and finally studied as flow reaches the drain that goes to the treatment plant.

* Grade Project.

** Faculty of Engineerings Physicomechanical. School of Civil Engineering UIS. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez.

INTRODUCCIÓN

El medio poroso está compuesto por formaciones geológicas consolidadas (rocas) e inconsolidadas (sedimentos). La parte más superficial es normalmente considerada como suelo. La formación del suelo se inicia con el intemperismo de la roca o de los sedimentos no consolidados. Las acciones climáticas, los procesos geoquímicos, el movimiento del agua y la actividad biológica dan continuidad al proceso de formación de suelos. Las características físico-químicas de los suelos varían ampliamente en el tiempo y en el espacio dependiendo principalmente del material de origen, el clima y la topografía.

El suelo es una mezcla de diferentes materiales orgánicos e inorgánicos. La fracción inorgánica consiste, principalmente, en granos minerales subdivididos de acuerdo a su tamaño (arcilla, limo, arena, etc.). El porcentaje en peso de los diferentes tamaños es la base para la clasificación de la textura del suelo. La mineralogía de las arcillas varía, pero en su gran mayoría están formadas por silicatos.

La descarga de contaminantes al ambiente es prácticamente inevitable. Los contaminantes son liberados a través de las industrias, usos de productos y como resultado del tratamiento y disposición de los residuos urbanos e industriales. Después de alcanzar el ambiente, los contaminantes se mueven en respuesta a diversos factores naturales y tecnológicos interrelacionados. Pueden moverse rápida o lentamente, los caminos pueden ser directos o complejos.

El principal objetivo de este contenido es introducirnos en la descarga, transporte y destino de lixiviados en el suelo, en particular en el ambiente de flujo subterráneo, teniendo en cuenta la ecuación de los problemas relacionados con los residuos.

1. FLUJO DE AGUA EN SUELOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El suelo y la zona no saturada tienen una gran importancia en el ciclo del agua, así como en el transporte y las transformaciones de los compuestos químicos en el suelo. Sin embargo, existen otros tipos de medios porosos no saturados. Además, otras fases diferentes pueden coexistir con el agua y el aire.

Con el nacimiento de la mecánica de suelos y el conocimiento de los materiales, que con esta se adquirió, ha sido posible analizar bajo un nuevo enfoque el comportamiento de las estructuras de retención de fluido.

Fue el Ingeniero francés Henry Darcy quien estableció las bases para un estudio racional de los problemas prácticos acerca de la infiltración del agua a través de los suelos. Darcy en el siglo XIX estudió en forma experimental el flujo del agua a través de un medio poroso y estableció la ley que se conoce con el nombre de ley de Darcy. Dicha ley se basa en las siguientes hipótesis, que condicionan su validez:

- Medio continuo, es decir que los poros vacíos estén intercomunicados.
- Medio isótropo.
- Medio homogéneo.
- Flujo del agua en régimen laminar.

1.1.1. Ley de Darcy

La ley física que describe el movimiento del agua a través de suelos fue propuesta por Darcy en 1856. Darcy encontró que la velocidad del agua que fluye en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico causado por el flujo.

La forma más general de la ley de Darcy expresa que el agua en un medio poroso, se mueve en dirección contraria al gradiente de energía $\nabla \bar{h}$ y a una velocidad \vec{q} proporcional al gradiente. El factor de proporcionalidad involucrado se conoce como conductividad hidráulica [K], la cual depende de la naturaleza del medio y de su grado de saturación:

$$\vec{q} = -[K] \cdot \nabla \bar{h}$$

Donde, \vec{q} es el vector velocidad de Darcy del líquido. [K] es la conductividad hidráulica; escribiéndose ésta como un tensor de segundo grado para un suelo anisotrópico, \bar{h} es el potencial total del agua en el suelo, que tiene naturaleza escalar, y ∇ es el operador gradiente, que da el carácter vectorial al producto $\nabla \bar{h}$.

1.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, que indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo. El conocimiento del valor de la conductividad aporta innumerables beneficios, se puede resaltar, que sirve como indicador de la hidrodinámica del agua subterránea, y este entendimiento es fundamental para analizar problemas hidrogeológicos en relación con las obras civiles, como en presas y embalses; problemas hidrogeológicos en estudios geotécnicos y de minería; y el diseño de drenajes.

La conductividad hidráulica sirve para la definición de la interacción agua superficial – agua subterránea, esto permite realizar la valoración de las reservas y recursos subterráneos, porque ayuda a la estimación de la recarga, siendo insumo de los modelos precipitación – infiltración – recarga, procesos que se presentan en el tránsito de flujo por la zona parcialmente saturada. También es materia prima importante para la realización de modelos numéricos directos e inversos en hidrogeología de flujo y transporte. Por último se puede destacar su empleo en estudios de calidad y contaminación de las aguas

subterráneas, estudios de contaminación puntual y difusa, almacenamiento de residuos y descontaminación de acuíferos.

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.

Una posible aproximación para alcanzar una descripción muy detallada está basada en la Introducción de alguna caracterización estadística de la matriz. Algunos ejemplos de descripciones estadísticas de medios porosos son la distribución de tamaños de partículas o granulometría y la distribución de tamaños de poros (Bear, 1972).

1.3. PERMEABILIDAD EN SUELOS

La permeabilidad es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si se deja pasar a través de él una cantidad de fluido es despreciable.

Para ser permeable, un material debe de ser poroso; es decir, debe de contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben de estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material. Estos vacíos existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactas, y en todos los materiales de construcción no metálicos, incluido el granito sano y la pasta de cemento, por lo tanto dichos materiales son permeables. La circulación de agua a través de la masa de éstos obedece aproximadamente a leyes idénticas, de modo que la diferencia entre una arena limpia y un granito es, en este concepto, solo una diferencia de magnitud.

Tabla 1. Valores de permeabilidad

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/s)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Prácticamente impermeable	Menor de 10^{-7}

Fuente: (Adaptado de *Bear, 1972*)

En un suelo el agua que ocupa los espacios vacíos ejerce una presión sobre ellos llamada presión intersticial, generalmente se encuentra distribuida en una serie de zonas verticales de humedad las cuales se denominan de la siguiente manera:

Zona Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Positivas: Es aquella limitada superiormente por la superficie freática y en donde el agua llena todos los espacios vacíos o poros existentes en el medio, y se encuentra experimentando presiones positivas en relación con la presión atmosférica.

Zona Parcialmente Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Negativas: Está limitada inferiormente por la superficie freática y superiormente por la superficie del terreno, usualmente se le conoce como zona vadosa o zona de aireación y en ella se pueden distinguir tres subzonas: la primera de ellas es la sometida a evapotranspiración la cual esta comprendida entre la superficie del terreno y los extremos radiculares de la vegetación; la segunda es la intermedia que se ubica debajo de la anterior pero que no presenta formaciones radiculares y, la tercera es la capilar en la cual los poros se hallan saturados pero el agua de poros presenta una succión (presión inferior a la atmosférica) por efecto del ascenso capilar desde la zona saturada (cuya superficie se encuentra a presión atmosférica). El límite entre las subzonas capilar e intermedia puede ser o no claramente apreciable dependiendo de las características del suelo.

1.4. FUNCIONES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS

Las funciones hidráulicas dependen de algunos parámetros que necesitan para su calibración de las propiedades hidráulicas, determinadas por medio de ensayos. Para lograr las mediciones de las propiedades hidráulicas de suelo nos enfrentamos a numerosas complicaciones debido a dos factores importantes:

- la no linealidad de la función de conductividad - succión y
- la no linealidad de la función de humedad – succión

1.4.1. Modelos de humedad

- **Modelo de Van Genuchten**

Van Genuchten (1980) presentó una ecuación para el cálculo del grado de saturación efectiva, la cual tiene ventajas para su implementación en los modelos de cálculo de flujo en medios porosos no saturados,

$$s_e = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Donde:

s_e es el grado efectivo de saturación.

α , n y m son constantes empíricas (ver anexo A).

h = carga total o carga hidráulica.

La ecuación de Van Genuchten con $m = 1$ fue usada por Ahuja y Swartzendruber (1972), Endelman y otros (1974) y Varallyay y Mironenko (1979). La ecuación tiene como límite la expresión de Brooks y Corey con $\lambda = mn$.

Cuando n tiende a infinito (mientras el producto mn es constante e igual a 0,4), aparece la curva de Brooks y Corey, con un determinado valor de entrada de aire. Las restricciones usuales utilizadas para la ecuación de Van Genuchten son $m = 1-1/n$ y $m = 1-2/n$. Los resultados más estables se obtienen generalmente cuando se utilizan las restricciones para una serie incompleta de datos.

- **Modelo de Fredlund, Xing y Huang**

Fredlund y otros (1994) desarrollaron una ecuación para describir la humedad en función de la succión:

$$\theta(h) = c(h) \frac{\theta_s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{h}{a} \right)^p \right) \right]^q}$$

Donde:

$\theta(h)$ humedad volumétrica

a, p y q son parámetros de ajuste.

e = relación de vacíos.

h = carga total o carga hidráulica.

θ_s es la humedad saturada.

C(h) es:

$$c(h) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{c_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{c_r} \right)}$$

Donde $C_r = a$ es una constante que relaciona la matriz de succión con el contenido de agua residual.

1.4.2. Modelos de conductividad

- **Modelo de Van Genuchten**

El modelo de Van Genuchten tiene un adecuado ajuste a las curvas de datos experimentales y comúnmente es utilizado como curva de comparación para los nuevos modelos propuestos por los investigadores. Van Genuchten (1980) desarrolló una curva característica de humedad del suelo y además, desarrolló un modelo para el cálculo de conductividad hidráulica utilizando el modelo de Mualem (1976a).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Donde:

θ_r y θ_s , humedad residual y saturada.

α , n y m son constantes empíricas (ver anexo A).

h = carga total o carga hidráulica.

$$k(h) = k_s \left(\frac{(1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m})^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{mi}} \right)$$

.Donde:

$k(h)$ conductividad hidráulica.

α, k_s y n parámetros de ajuste, $m = 1-1/n$ (ver anexo A).

h = carga total o carga hidráulica.

• Modelo de Fredlund, Xing y Huang

Como se mostró en los modelos de humedad, Fredlund y otros (1994) describen la humedad en función de la succión.

Fredlund y otros (1994) combinaron la expresión para el cálculo de la humedad con el modelo para la conductividad hidráulica de Childs y Collins- George (1950) y obtuvieron la siguiente expresión para la conductividad hidráulica:

$$k(h) = k_s \frac{\int_{\ln h}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(h)}{e^y} \theta'(e^y) dh}{\int_{\ln h}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_0}{e^y} \theta'(e^y) dh}$$

Donde:

$k(h)$ conductividad hidráulica.

y es una variable de integración que representa $\ln h$.

b es igual a $\ln(106 \text{ kPa})$.

h_a es el valor de entrada de aire.

θ' es la derivada de la expresión de la humedad en función de h .

θ_0 humedad volumétrica inicial.

1.5. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Los suelos en ingeniería son definidos como un conjunto discontinuo de partículas discretas, orgánicas o inorgánicas, que constituyen un sistema de varias fases (Lambe & Whitman, 1996). Una fase es una parte de un sistema, uniforme en su totalidad, incluidas sus propiedades físicas y composición química. Cada fase está separada de otras partes homogéneas del sistema por superficies de frontera. (Tindall & Kunkel, 1999). Los suelos son un sistema compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está compuesta de minerales y materia orgánica, los cuales conforman la matriz del suelo; la fase líquida está compuesta de agua y sustancias disueltas; y la fase gaseosa está compuesta por diversos gases en equilibrio dinámico. Cualquiera de estas tres fases puede ser homogénea o heterogénea. Si la composición química dentro de la fase no varía de un lugar a otro se dice que la fase es homogénea, si hay variación se dice que es heterogénea; es decir que una fase puede ser físicamente homogénea pero químicamente heterogénea o viceversa (Tindall & Kunkel, 1999).

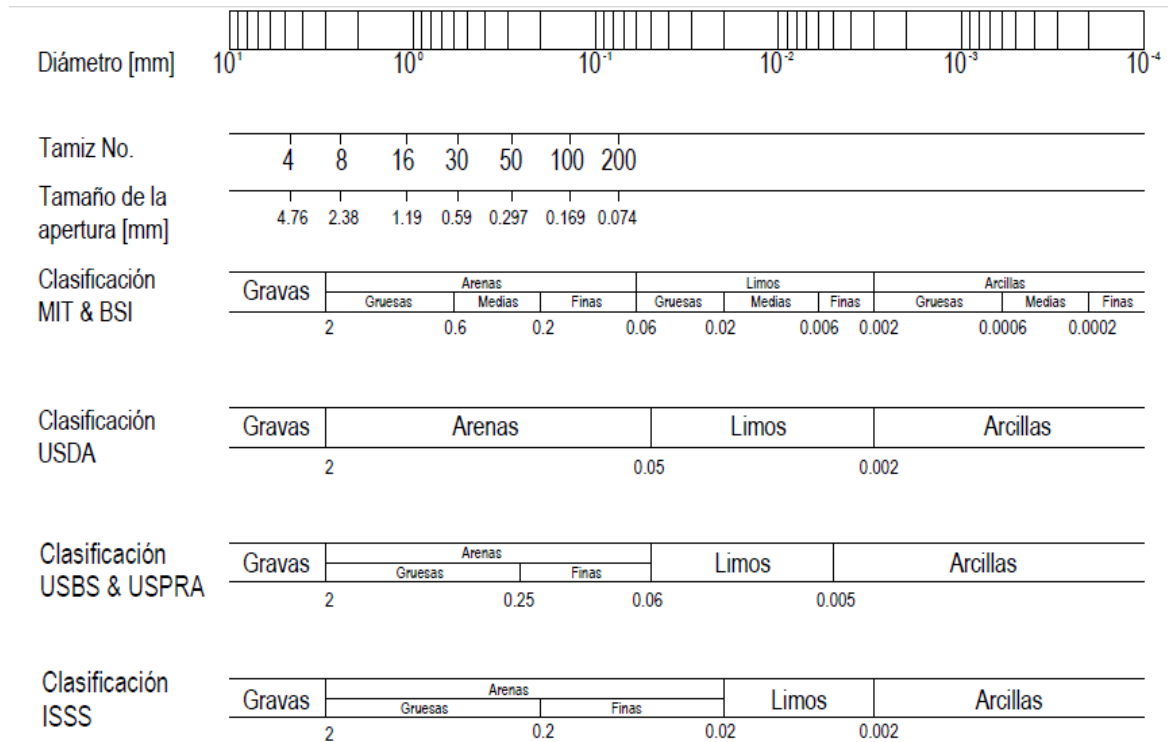
Dentro del sistema del suelo, las interfaces entre sólidos, líquidos y gases, están cambiando continuamente, resultando en grandes interacciones de adsorción, intercambio iónico, desplazamiento, tensión superficial, y fricción entre cada fase o combinación de estas (Tindall & Kunkel, 1999). Es importante resaltar que la fase sólida de los suelos es relativamente estable físicamente en comparación con las otras dos fases, las cuales son muy dinámicas (presentan variaciones), dado que sus propiedades son poco variables con temperatura y humedad del suelo. En esta sección se definen claramente las propiedades asociadas al suelo.

1.5.1. Distribución de tamaños de partículas

Las partículas individuales que hacen parte de la fase sólida del suelo pueden dividirse arbitrariamente en dos clases de acuerdo a si su tamaño es menor o no que a un valor determinado. La fracción fina incluye minerales arcillosos, físicos y químicamente reactivos, los cuales han sido formados por productos secundarios de procesos de sedimentación (*Marshall, Holmes & Rose*). La fracción no arcillosa consiste de material no

inerte y fragmentos de roca, y está dividido en limos, arenas y gravas, según límites de tamaños que varían entre diferentes escalas, como lo muestra la Figura

Gráfica 1. Clasificaciones de suelos más usadas



MIT: Massachusetts Institute of Technology
 BSI: British Standards Institute
 USDA: U.S. Department of Agriculture

USBS: U.S. Bureau of Soils
 USPRA: U.S. Public Road Administration
 ISSS: International Soil Science Society

Fuente: (Adaptado de *Bear, 1972*)

1.5.2. Porosidad

La estructura de poros de un suelo (tamaños, forma y distribución) es un elemento esencial en el estudio de los suelos, pues es relevante para el estudio del comportamiento hidráulico y mecánico (Colmenares, 2002). Además, el número, tamaño y continuidad de los poros controlan el almacenamiento y la conductividad del agua en el suelo.

Tabla 2. Porcentajes de porosidad

Material Sedimentario	Porosidad (%)	Material Sedimentario	Porosidad (%)
Turbas	60 – 80	Arenas medias a finas	30 – 35
Suelos	50 – 60	Gravas	30 – 40
Arcillas	45 – 55	Gravas y arenas	30 – 35
Limos	35 – 40	Arenisca	10 – 20
Arenas gruesas a medias	30 – 40	Esquistos	1 – 10
Arena uniforme	30 – 40	Caliza	1 – 10

Fuente: (Adaptado de *Bear, 1972*)

2. TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS

2.1. INTRODUCCIÓN

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos Tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

2.2. APLICACIONES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número de finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada

mallada formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha mallada es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- **Pre proceso**, que consiste en la definición de geometría, generación de la mallada, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la mallada y pre condicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- **Cálculo**, el resultado del pre proceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- **Postproceso**, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la mallada que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

2.3. PRE PROCESO Y GENERACIÓN DE LA MALLA

La mallada se genera y ésta en general consta de miles (e incluso centenares de miles) de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del

problema se almacena junto con la información que describe la malla. Por otro lado las fuerzas, los flujos térmicos o las temperaturas se reasignan a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente probados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Las tareas asignadas al pre proceso son:

El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de pre proceso.

Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.

Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Por ejemplo el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos podría venir definido por: $u = N_1u_1 + N_2u_2$, siendo N_1 y N_2 las funciones comentadas (funciones de forma) y u_1 y u_2 los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.

Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.

Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \cdot u$, que como vemos es similar a la del cálculo matricial.

2.4. CÁLCULO Y RESOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES

En un problema mecánico lineal no-dependientes del tiempo, como un problema de análisis estructural estático o un problema elástico, el cálculo generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.

Cuando el problema es no-lineal en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y considerar incrementos numéricos, y calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos. Algo similar sucede con los problemas dependientes del tiempo, para los que se considera una sucesión de instantes, en general bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio instantáneo en cada instante. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo substancialmente más elevado que en un problema estacionario y lineal.

2.5. POSTPROCESO

Actualmente, el MEF es usado para calcular problemas tan complejos, que los ficheros que se generan como resultado del MEF tienen tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensible e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de post-proceso los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representación gráficas y obtener magnitudes derivadas, que permitan extraer conclusiones del problema.

El post-proceso del MEF generalmente requiere software adicional para organizar los datos de salida, de tal manera que sea más fácilmente comprensible el resultado y permita decidir si ciertas consecuencias del problema son o no aceptables. En el cálculo de estructuras por ejemplo, el post-proceso puede incluir comprobaciones adicionales de si una estructura cumple los requisitos de las normas pertinentes, calculando si se sobrepasan tensiones admisibles, o existe la posibilidad de pandeo en la estructura.

3. SOFTWARE SEEP/W Y CTRAN/W

3.1. INTRODUCCIÓN

Dentro del paquete GEOSTUDIO de la empresa GEOSLOP se encuentran algunos software de modelamiento a través de elementos finitos; GeoStudio es una paquete de productos para el modelado geotécnico y geo-ambiental, lo suficientemente amplio para manejar todas las necesidades de modelado; SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W Y VADOSE/W son la serie de software que comprenden este paquete. Como objeto de estudio tomaremos SEEP/W usado para la modelización de las redes de flujo en medios permeables y CTRAN/W el cual es utilizado para modelar el movimiento de los contaminantes a través de materiales porosos, este análisis se realiza por medio de dos procesos, análisis de advección y advección – dispersión.

Iniciando el programa

El paquete de programas Geostudio está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

- **Slope/W** para cálculo de estabilidad de taludes
- **Seep/W** para cálculo de redes de flujo y filtración.
- **Sigma/W** orientado al cálculo de tensiones y deformaciones de suelos o rocas sometidos a carga.
- **Quake/W** para cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc)
- **Temp/W** aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- **Ctran/W** aplicado a fenómenos de difusión de contaminantes en suelos
- **Vadose** usado en la modelización de acuíferos.

Todos estos programas están interrelacionados por lo que una geometría planteada para un tipo de problema, por ejemplo cálculo de asientos en un terraplén puede servir para un cálculo de estabilidad sin más que dar los correspondientes parámetros resistentes de los materiales, no necesitando introducir los puntos que definen la geometría, ya que estos se importan directamente.

3.2. SEEP/W

SEEP/W es un software que trabaja con el método de elementos finitos para el análisis de filtración de aguas subterráneas, el exceso de agua intersticial y problemas de disipación de la presión dentro de materiales porosos como el suelo y roca. Su formulación integral le permite tener en cuenta los análisis que van desde suelos simples y saturados en estado estacionario y problemas más complejos de suelos saturados/insaturados que dependen del tiempo. SEEP/W se puede aplicar al análisis y diseño de proyectos geotécnicos, de ingeniería civil, hidrogeológicos, y la minería.

3.2.1. Características del programa

El programa en el cual nos vamos a introducir tiene fundamentalmente las siguientes características definidas a continuación:

Tipos de análisis:

El programa permite realizar el cálculo de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis:

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adapta prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones

Propiedades de los suelos:

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre permeabilidades K_y/K_x
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente k_x .
- Modelo de estado saturados o insaturado/saturado
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

Condiciones de contorno del problema:

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de las siguientes opciones:

- Head (Altura piezométrica=Altura de cota+altura de presión)
- Total Flux (Caudal Filtrado)
- Press Head (Altura de presión)
- Unit Flux (Flujo unitario)
- UnitGradient (Gradiente unitario)

SEEP / W puede modelar tanto el flujo saturados e insaturados, una característica que amplía en gran medida la gama de problemas que pueden ser analizados. Además de tradicional de estado estacionario análisis de flujo saturado, la formulación saturados / insaturados de SEEP / W hace que sea posible analizar la filtración como una función del tiempo y de considerar los procesos tales como la infiltración de la precipitación. La característica transitoria permite analizar problemas tales como la migración de un frente de humedecimiento y la disipación del exceso de presión del agua intersticial.

Aplicaciones

SEEP / W puede modelar casi cualquier problema de las aguas subterráneas, incluyendo:

- La disipación del exceso de presión de poro después de la reducción reservorio
- Los cambios en las condiciones de presión de agua de poros dentro de la tierra se inclina debido a la infiltración de la precipitación

- Amontonamiento de la capa freática por debajo de las estructuras de retención de agua como lagunas y balsas
- Efecto de los pozos subterráneos desagües y la inyección
- Disposición de una capa freática debido al bombeo de un acuífero
- Cantidades de flujo de infiltración en las excavaciones

3.3. CTRAN/W

CTRAN/W es un software que trabaja con el método elemento finito el cual se puede utilizar para modelar el movimiento de los contaminantes a través de materiales porosos como el suelo y roca. La formulación completa de CTRAN/W hace posible analizar los problemas que varían desde el simple seguimiento de una partícula en respuesta al movimiento del agua, como también los procesos complejos que implican la difusión, la dispersión, la adsorción, la desintegración radiactiva y dependencias de densidad. CTRAN/W se puede aplicar al análisis y diseño de proyectos geotécnicos, hidrogeológicos, civiles, y mineros de ingeniería.

Análisis de resultados

Después de resolver el problema de transporte de contaminantes, CTRAN/W ofrece muchas herramientas para la Visualización de los resultados. Generar curvas de nivel o trazados xy de cualquier parámetro calculado, por ejemplo, como la concentración, la masa, la adsorción, dispersión, o Peclet y números Courant. Vectores de velocidad muestran la dirección del flujo y la frecuencia. Examine la masa del contaminante en las fases sólida y líquida en cualquier ubicación. Condiciones transitorias puede demostrarse mediante el trazado de los niveles de concentración cambiantes en el tiempo. Calculo interactivo de los valores de consulta, haga clic en cualquier nodo, en la región de elemento de Gauss, o la sección de flujo.

Aplicaciones

CTRAN/W puede modelar casi cualquier problema de transporte de contaminantes, incluyendo:

- Flujo de contaminantes a partir de un estanque superficie
- Flujo de hidrocarburos disueltos
- Flujo de contaminantes radioactivos
- Transporte a través de roca fracturada
- La intrusión de agua del mar en los acuíferos costeros
- Transporte de salmuera
- Transporte de lixiviados

4. EJEMPLO APLICATIVO SEEP/W Y CTRAN/W

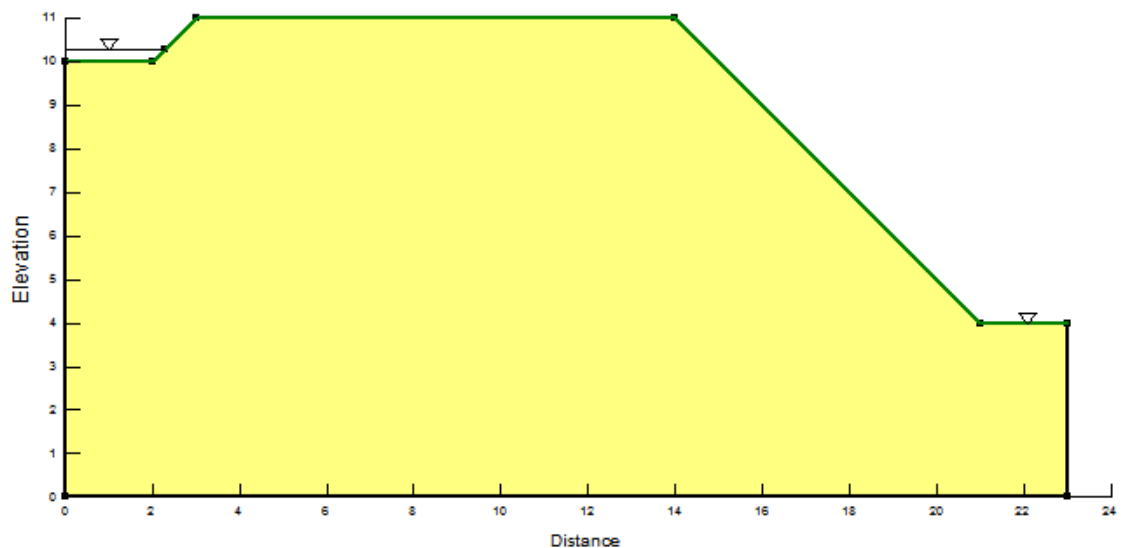
4.1. FLUJO DE AGUA

Para la modelización y estudio de las redes de flujo en medios permeables utilizaremos el software SEEP/W el cual permite realizar los cálculos a través de dos tipos fundamentales de análisis: régimen estacionario y régimen transitorio.

Comenzamos con un sencillo problema en el que se va a calcular la red de flujo de un sistema formado por una presa. El esquema del suelo se realizara teniendo en cuenta los vértices que definen las condiciones de contorno del terreno (zonas húmedas, impermeables, secas, entre otras).

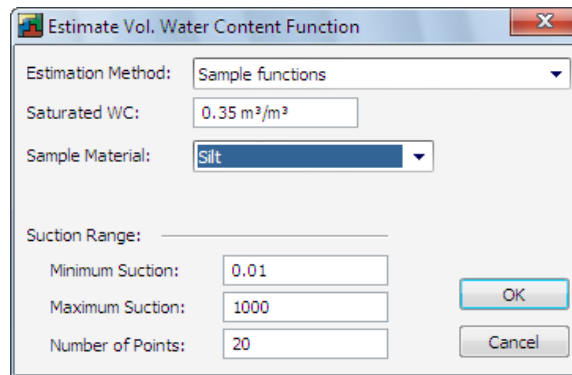
Se utilizara un suelo limoso parcialmente saturado (saturado-insaturado), al cual se analizara la tendencia del contenido de volumen de agua respecto a la succión matricial, usando la función de punto que genera el programa Seep/w.

Grafica 2. Modelo geométrico presa



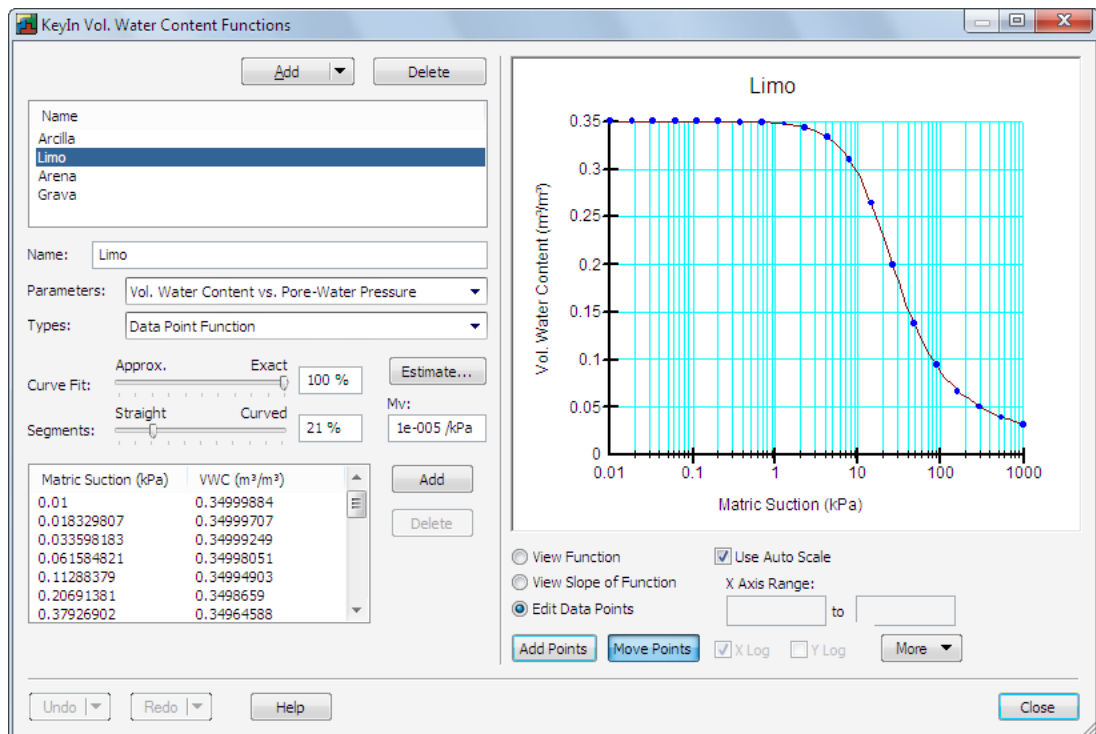
Estimación función de volumen contenido de agua

Grafica.3 ventana Estimación función de volumen contenido de agua



En este ejemplo podemos evidenciar el método para modelar el flujo de agua en el suelo; teniendo en cuenta el tipo de suelo (arcilla, limo, arena, grava). Para esto tomaremos como principal herramienta de análisis “la matriz de succión” con respecto al contenido de agua.

Grafica 4 Ventana función contenido de agua



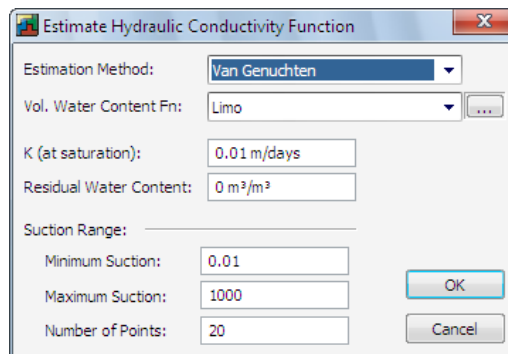
En esta grafica se utilizó un tipo de suelo limoso con un contenido de volumen de agua saturada de 0.35 m³/m³, con una mínima succión matricial de 0.01 kPa y máxima de 1000

kpa, con estos valores se genera una grafica con suficientes datos para analizar la tendencia del comportamiento del contenido de agua en el suelo.

4.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Se estimara el comportamiento de la función de conductividad hidráulica respecto a la matriz de succión del suelo utilizando los datos de la función de volumen de contenido de agua que hallamos anteriormente.

Grafica 5 Ventana estimación de la conductividad hidráulica

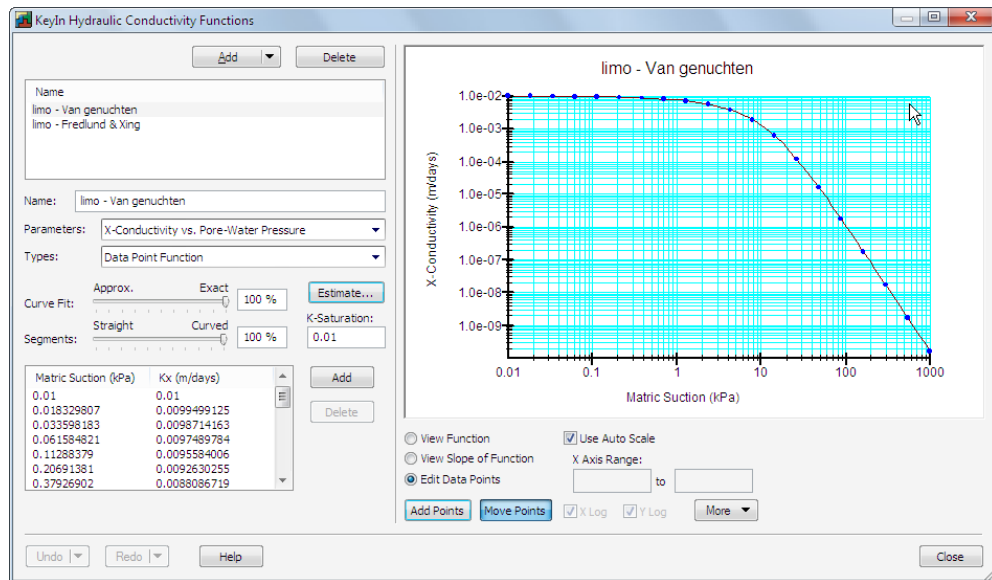


Se utilizó el método de Van Genuchten para estimar la función de conductividad hidráulica y un K de saturación de 0.01 m/día.

La función de conductividad hidráulica está relacionada con la succión matricial del suelo y en ocasiones con el contenido de agua residual, cuando decimos que existe una succión matricial muy baja (tienda a cero) se da por entendido que la conductividad es la misma saturación.

Cuando un suelo presenta un tamaño de poro muy pequeño la conductividad hidráulica de este suelo es muy baja, por lo tanto el contenido de agua residual no afecta a la función.

Grafica 6 Ventana función de conductividad hidráulica

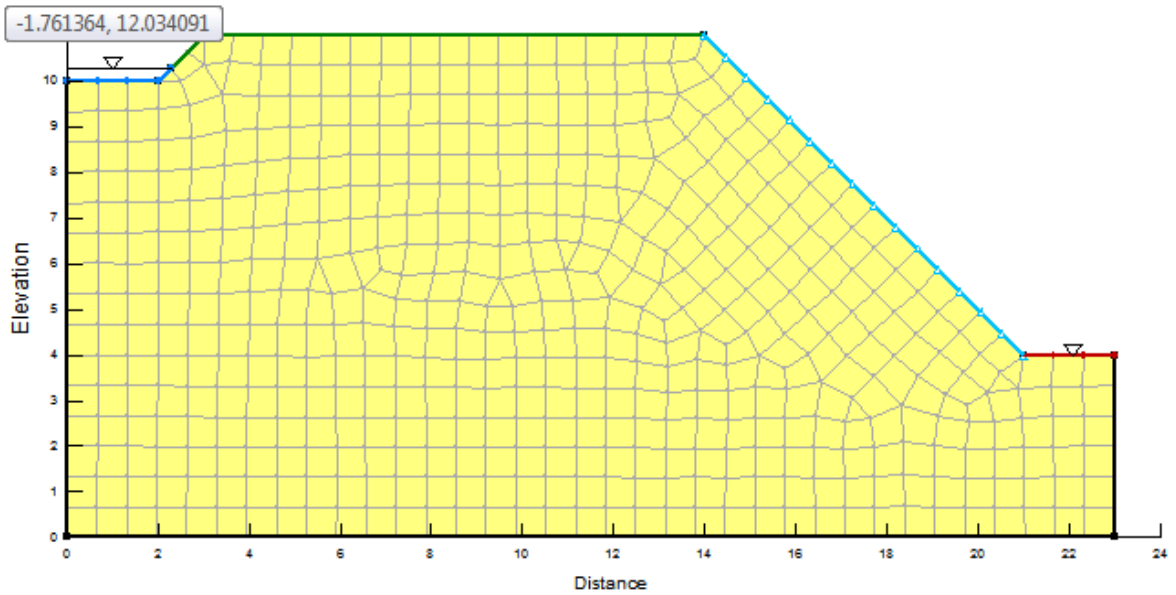


4.3. GENERACIÓN Y MODIFICACIÓN DE LA MALLA MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

El programa requiere una aproximación global de la distancia entre nodos, automáticamente genera una malla de elementos finitos en el interior de las regiones y a lo largo de las líneas que le han asignado propiedades, si se requiere una mejor precisión del análisis se puede disminuir la distancia entre nodos para obtener un mayor número de elementos finitos.

Una vez definido esto se procede a darle un patrón a la malla (geometría interna). Se recomienda experimentar con estos modelos de mallas para elegir la que mejor se adapte al modelo a construir.

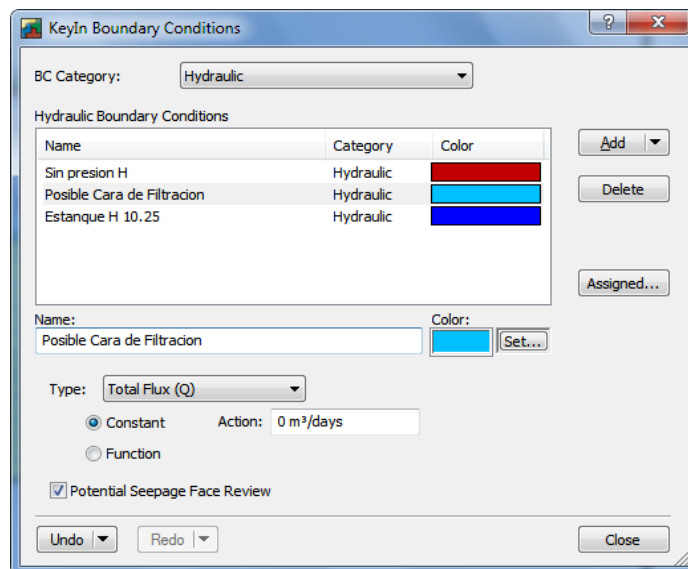
Grafica 7 Vista previa de la malla



4.4. CONDICIONES DE CONTORNO PARA FLUJO DE AGUA

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno, se podrán delimitar como muestra las líneas de la superficie en la figura anterior para así poder asignarles propiedades tales como zonas húmedas, impermeables, secas, entre otras.

Grafica.8 Ventana condiciones de contorno

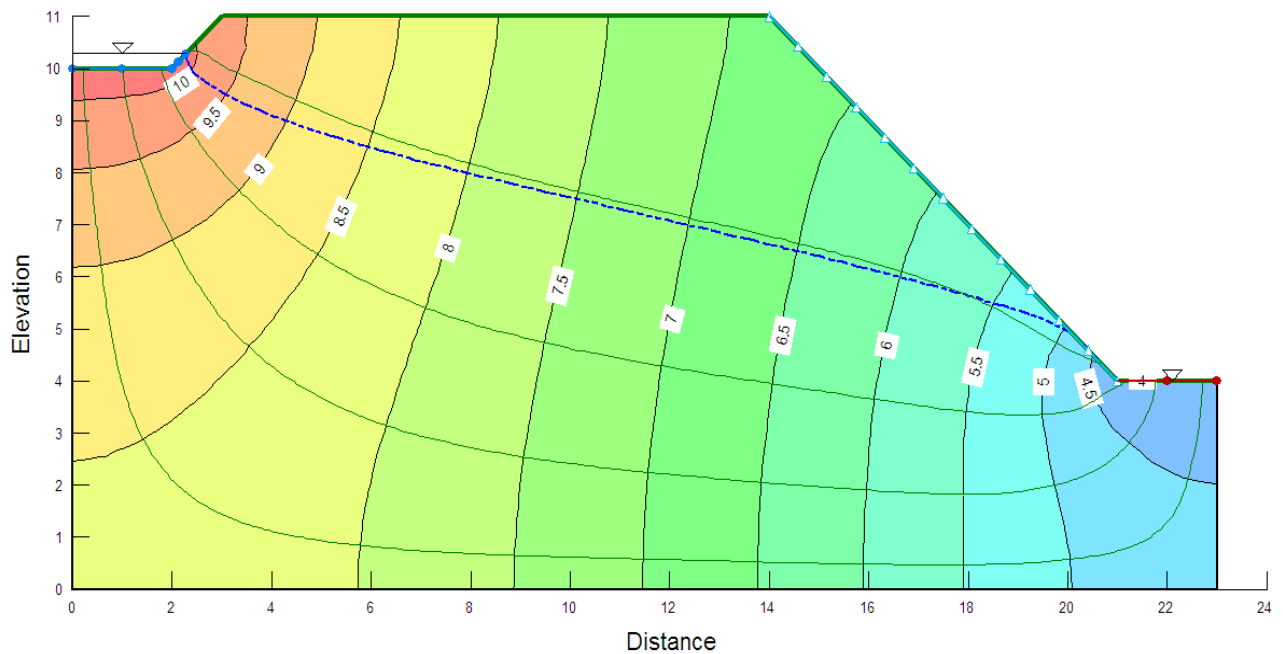


Se definieron 3 condiciones de contorno, la primera es la superficie donde se encuentra el estanque (Estanque H 10.25), el cual presenta una altura piezométrica de 10.25 m. La segunda condición está conformada por la cara del talud (Posible Cara de Filtración) se estimara esta zona como impermeable donde el caudal será igual a cero. La tercera y última condición es la parte del terreno donde puede haber filtración de agua (Sin presión H) en esta zona se tomó presión igual a cero debido a que solo es afectada por la presión atmosférica.

El programa entiende automáticamente que los contornos a los que no se les aplique condiciones de contorno son impermeables, pero se le sugiere su aplicación ya que así se tiene una mejor percepción de la definición del modelo.

Una vez establecida las condiciones del terreno, se procede a ejecutar el programa para observar el comportamiento del flujo del agua. La línea punteada corresponde al nivel freático, las líneas continuas es una tendencia de cómo se transporta el flujo por el medio y las curvas de nivel corresponden a las líneas piezométricas del suelo.

Grafica 9. Resultados obtenidos comportamiento flujo de agua

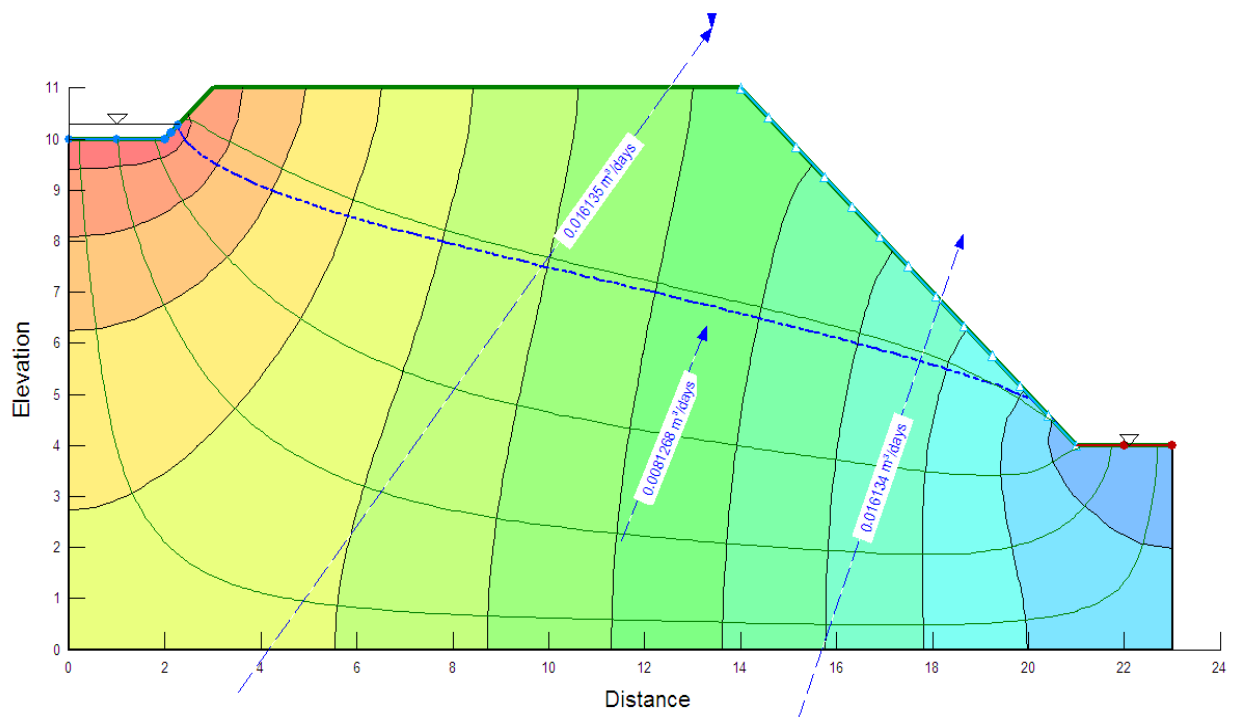


Aparte de las líneas piezométricas también es posible visualizar la presión de poro y presiones de altura piezométrica entre otras.

Con objeto de conocer el caudal que atraviesa una determinada sección de nuestro modelo, para comprobar la eficacia de las medidas que se toman para minimizar fugas o para el dimensionamiento de un equipo de bombeo necesario, vamos a conocer que caudal atraviesa una determinada zona de nuestro modelo.

Para esto el programa tiene una opción que se llama flux labels que consiste en dibujar una línea de referencia donde se requiere evaluar el caudal que pasa por esa zona

Grafica 10 Líneas de referencia evaluación de caudal



En esta grafica se encuentran tres líneas de flujo las cuales representan el caudal que pasa por la zona que estas atraviesan, el caudal de la primera línea y de la tercera es el mismo debido a que estas líneas cruzan la totalidad del terreno por donde se transporta el flujo y la segunda presenta un caudal menor ya que solo atraviesa cierta parte del terreno donde se encuentra el flujo.

4.5. TRANSPORTE DEL CONTAMINANTE

El objetivo de este análisis es demostrar cómo CTRAN/W puede ser usado para modelar los fenómenos de advección y dispersión de un sistema de filtración de flujo en estado estacionario. Además, un análisis de seguimiento de las partículas que se lleva a cabo para dar una primera aproximación del movimiento de los contaminantes sin ningún componente dispersivo.

Hay tres análisis en el archivo: el primero es un análisis de la filtración de estado estacionario que forma el sistema de flujo de agua, el realizado anteriormente con SEEP/W y dos análisis de CTRAN/W. Uno de ellos es un análisis de rastreo de partículas, que muestra los movimientos de las partículas debido solo a la advección y el segundo es un análisis de advección-dispersión.

4.6. RASTREO DE PARTÍCULAS

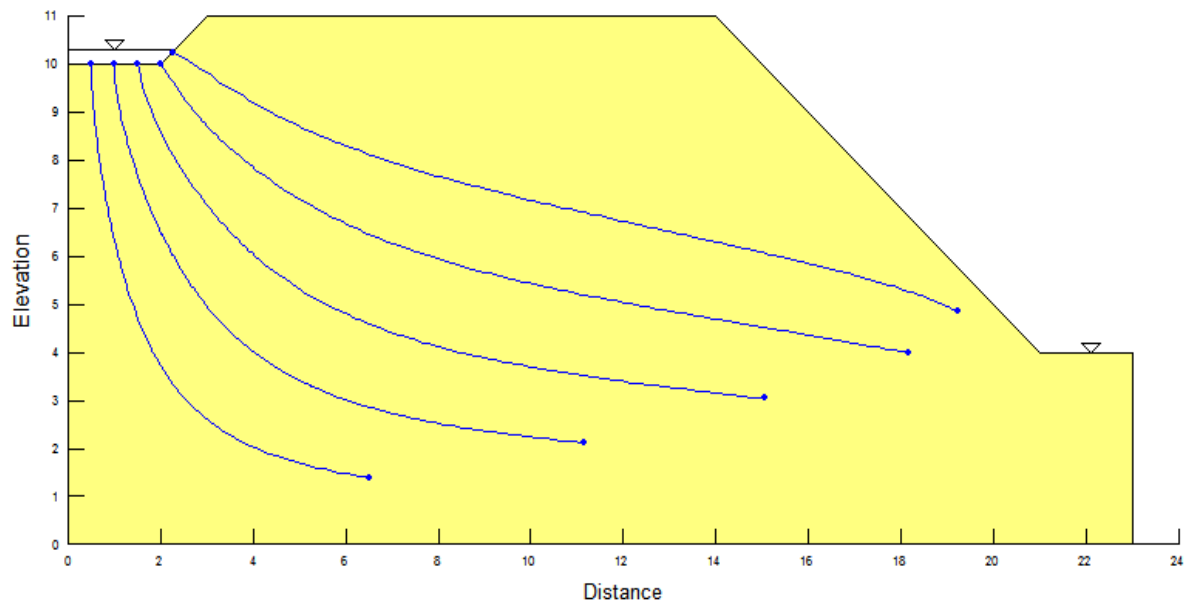
Los análisis hidráulicos se basan en las muestras disponibles obtenidas con las funciones SEEP/W. El suelo se considera que es un limo con una K_{sat} de 0,01 m/día y una porosidad de 0,35. Tiene una dispersividad longitudinal de 2 metros y una dispersividad transversal de 1 metro. Decadencia y adsorción no está incluido en el modelo.

El transporte de contaminantes en los suelos involucra los procesos de ambos, advección y dispersión. Es útil aislar la magnitud del transporte puramente advectivo sin necesidad de invertir datos de entrada y los requisitos de cómputo de la inclusión de la dispersión. Es imposible de resolver numéricamente la ecuación de advección-dispersión cuando el componente de dispersión es pequeño en relación con el componente de advección, ya que la solución numérica es inestable en estos casos. Para superar esta dificultad, CTRAN/W tiene una opción para simular el transporte de contaminantes puramente advectivo, proceso realizado mediante el seguimiento de las partículas.

En el rastreo de partículas, los solutos disueltos son representados por partículas. Para cada paso de tiempo, las partículas se mueven en el espacio proporcional a la velocidad del flujo del agua y al tiempo del tamaño de paso. Las vías de flujo de partículas proporcionan una representación gráfica del movimiento de la pluma de contaminantes causado por el transporte puramente advectivo. Los efectos de la dispersión, la adsorción, la decadencia y la densidad no se consideran en un análisis de seguimiento de partícula.

Para realizar este análisis debemos agregar una componente de tiempo que definirá el recorrido de las partículas del contaminante, en la grafica siguiente se muestra el recorrido de las partículas durante 2500 días. Se debe tener en cuenta que la estimación de los días debe ser suficiente para que las partículas realicen toda la trayectoria, es decir desde el estanque contaminado hasta el punto de análisis.

Grafica 11 Resultado análisis de rastreo de partículas (Advección)



La ventaja de hacer primero un análisis de partículas es que no hay problemas de convergencia y no se aplican a las propiedades del material, excepto en la solución de la filtración. El análisis proporciona una buena estimación del tiempo de desplazamiento de una "partícula" de contaminante por el sistema, junto con el flujo.

4.7. ADVECCIÓN-DISPERSIÓN

La cuantificación de la magnitud del flujo advectivo es útil como paso previo al análisis del transporte de contaminantes. Un análisis más realista también incluye el efecto de la dispersión hidrodinámica. Dispersión hidrodinámica causa la dilución de contaminantes tanto en sentido longitudinal, (en la dirección del flujo de agua subterránea), y transversal (perpendicular a la dirección del flujo).

En caso de problemas, donde la densidad de soluto disuelto es importante, CTRAN/W da la capacidad de realizar análisis dependiente de la densidad de flujo. Algunos de estos problemas incluyen la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros, el transporte de salmuera y la migración de Lixiviados en vertedero, por mencionar sólo algunos.

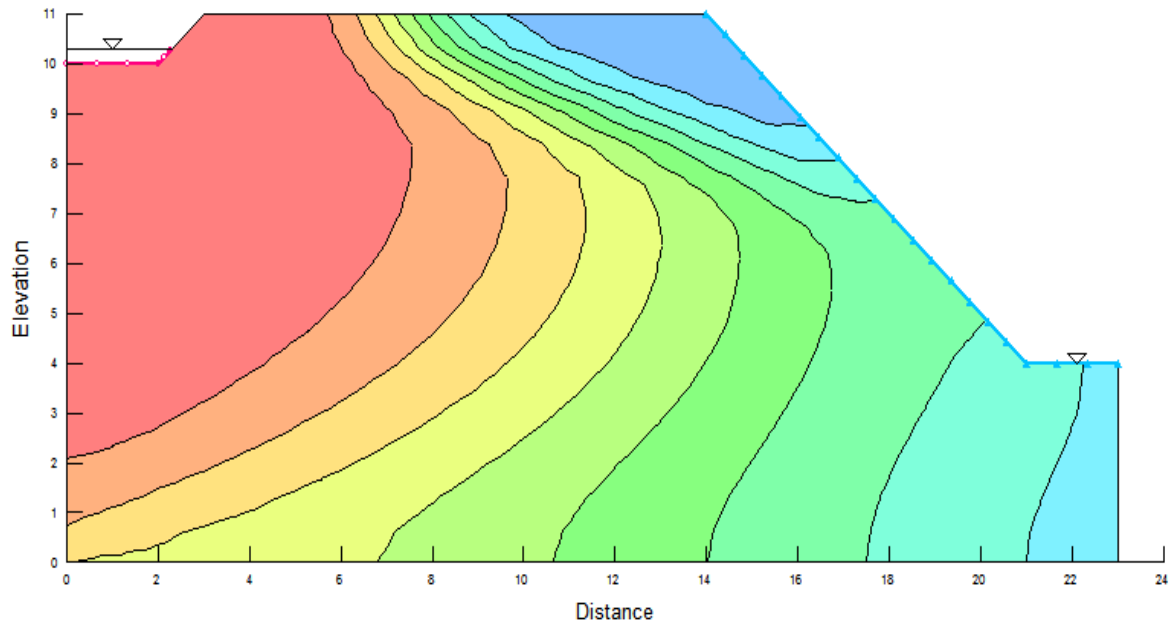
4.8. CONDICIONES DE CONTORNO PARA CONTAMINANTES

Especificar las condiciones en los límites de un problema es una de las claves de un análisis numérico. Por esta razón este tipo de problemas se refiere a menudo como "un valor límite," de los problemas. Ser capaz de controlar las condiciones en las fronteras es también lo que hace que los análisis numéricos sean tan exactos.

Un punto muy importante a destacar aquí es que las condiciones de contorno sólo pueden haber dos opciones. Puede especificar el C (concentración) o el Q (flujo del contaminante) en un nodo. Es muy útil tener esto en cuenta al especificar condiciones de frontera.

La superficie en donde se encuentra el estanque presenta una condición de contorno de tipo concentración de masa constante de 10 kg/m^3 y el talud junto con la base presenta un flujo de concentración de 0 kg/día , esto se debe a que el contorno es el límite de la salida de flujo durante el análisis.

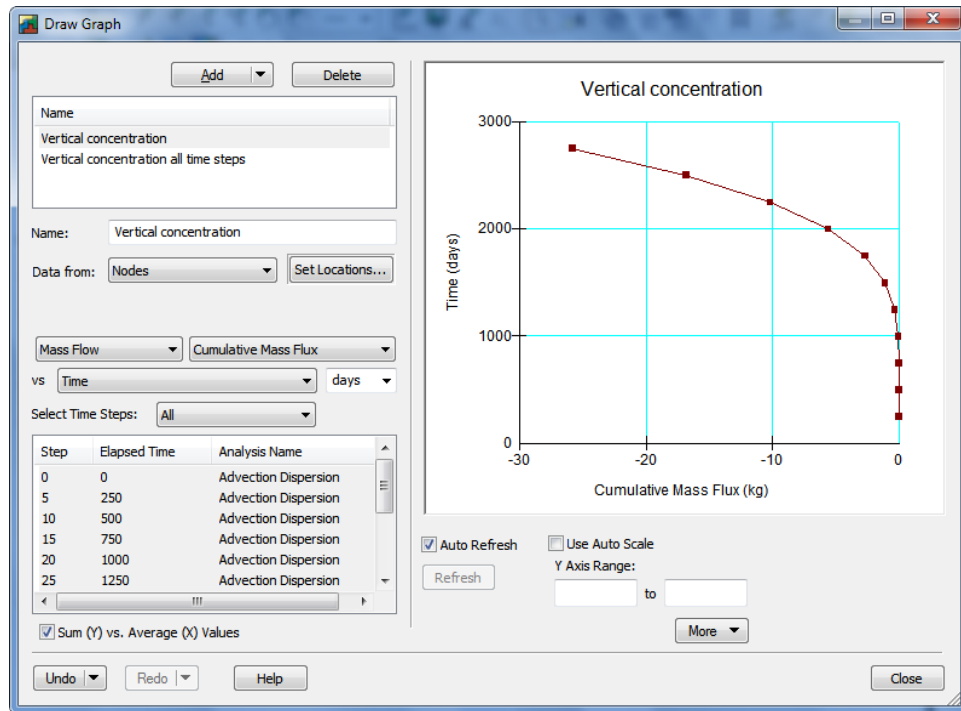
Grafica 12. Resultado análisis advección-dispersión.



La Figura muestra los contornos de concentración al final del análisis. La dispersión del contaminante se considera en este análisis, lo que significa que es posible que el contaminante se mueva por delante del agua que fluye. El análisis demuestra que el contaminante se mueve muy por delante del análisis de partículas y que se extiende a las zonas no saturadas por encima de la superficie freática.

Teniendo estos resultados el programa nos da la posibilidad de analizar de manera grafica las diferentes variables contenidas en el análisis de cada nodo.

Grafica 13. Análisis grafico tiempo vs masa acumulada



La figura anterior presenta una gráfica de la masa acumulada que sale del sistema a través del tiempo. La gráfica fue creada mediante la selección de los nodos del pie de la pendiente junto con la base, muestra la elección de flujo de masa acumulada como en una categoría vs el trazado frente a todos los pasos de tiempo. Esto da a la masa total de salida del borde seleccionado.

4.9. CONCLUSIÓN

CTRAN/W puede ser usado para modelar el transporte de contaminantes en un sistema de flujo saturado-insaturado para los casos que impliquen únicamente a la advección y advección-dispersión. El primero se logra usando un análisis de rastreo de partículas, que es útil para estimar los tiempos de llegada y la comprensión de las vías de partículas. El último incluye la difusión y la dispersión hidráulica, por lo tanto resulta una mayor extensión de la zona contaminada y un tiempo de llegada anterior.

5. EJEMPLO APLICATIVO BASURERO EL CARRASCO

5.1. INTRODUCCIÓN

La proximidad física del suelo hace que este sea el lugar al que con más probabilidad vayan a parar residuos originados por la actividad del hombre. Estos son rápidamente incorporados al suelo a través de procesos degradativos. En un principio eran fácilmente metabolizados y asimilados por la naturaleza pero a medida que la sociedad fue creciendo industrialmente y demográficamente, los residuos generados son cada vez más y más peligrosos.

La época actual está muy marcada por la sociedad de consumo pero además existe otro agravante y es la cantidad diaria que en el planeta se genera de todo tipo de residuos que aunque puedan ser degradados de forma natural, el tiempo que para ello se necesitará es tan elevado que son focos potenciales de contaminación. Las consecuencias de este aumento de residuos son por una parte la disminución de las materias primas y por otra, que el abandono incontrolado de estos residuos origina serios problemas ambientales. Esto nos lleva a la conclusión de que se produce una dispersión de los contaminantes y por lo tanto la magnificación del problema.

En este momento se entiende por residuos aquellos productos generados en las actividades de producción y consumo que no son totalmente aprovechados en el contexto en el que son producidas, ningún valor económico pudiendo ser debido tanto a la falta de tecnología adecuada para su aprovechamiento como a la inexistencia de un mercado para los posibles productos a recuperar.

Uno de los principales contaminantes en el suelo son los lixiviados estos son líquidos residuales generados por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de las basuras, bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas, o como resultado de la percolación de aguas a través de los residuos en proceso de degradación.

5.2. RELLENO SANITARIO

El manejo y la eliminación de residuos sólidos domésticos son problemas críticos en las áreas urbanas de América Latina. En Colombia, por lo general, el destino final de estos residuos es su disposición en rellenos sanitarios. Aunque los rellenos que existen en la actualidad poseen diversidad de problemas operativos, los encontrados con mayor frecuencia son un inadecuado tratamiento de los lixiviados, la emisión de olores desagradables y un manejo pobre de la cobertura de los residuos sólidos. Aunque es necesario mejorar la operación y el mantenimiento de los rellenos, también es urgente incrementar el compromiso de las Agencias Ambientales y de Salud en programas que disminuyan la producción de basuras y promuevan el uso sostenible de aquellos residuos con valor económico.

Los residuos una vez recolectados pueden ser asignados a diversos procesos de transformación; incluyendo el reciclaje, el aprovechamiento energético, la elaboración de compost (a veces también se le llama abono orgánico), la producción de biogás y la formulación de combustibles alternos, entre otros. Estos procesos deben estar enmarcados dentro de una Gestión Integral de Residuos Sólidos, de tal forma que representen beneficios sanitarios, ambientales, sociales, económicos e inclusive culturales. Cuando el aprovechamiento de las basuras no es posible, el relleno sanitario, y en algunos casos la incineración, aparecen como opciones para la disposición final de las mismas. Sin embargo, cada día se insiste con mayor frecuencia en el aprovechamiento de los residuos, y la tendencia actual es la disminución de la fracción de aquellos destinados en rellenos sanitarios, aumentando el incremento en las cifras correspondientes al reciclaje y el compost. La meta de muchos países, en particular los europeos, es en un futuro no utilizar rellenos sanitarios (Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental, 2003). Sin embargo, para los países latinoamericanos donde los recursos son limitados y construir una cultura de reciclaje toma tiempo, los rellenos sanitarios constituyen una opción segura a mediano y corto plazo, amigable con el ambiente y además económica, en comparación con otros métodos como la incineración (Collazos, 2009).

El relleno sanitario, de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una “técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio

ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en el menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, y cubriendo la basura allí depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria al fin de cada jornada” (Meléndez, 2004). Básicamente consta de celdas previamente impermeabilizadas donde una vez depositados, compactados y nivelados los residuos sólidos, estos son cubiertos con tierra u otro material inerte, al menos una vez al día. El manejo de los subproductos de la descomposición de los residuos es realizado en instalaciones cercanas al relleno. Estos subproductos en su mayoría corresponden a líquidos percolados, comúnmente denominados lixiviados, y el biogás, producto de la descomposición anaerobia de los residuos. En el caso de los lixiviados estos son recolectados en fondo de la celda y enviado a lagunas donde son tratados, o recirculados al interior del relleno. Por su parte, el biogás es recogido mediante la instalación subterránea de una red de tuberías, almacenados para su utilización posterior, o incinerado para convertirlo a CO₂ y de esta manera disminuir su capacidad de generación de calentamiento global. Finalizada la disposición de residuos en celda, esta es aislada mediante una cubierta adicional final.

5.3. BASURERO EL CARRASCO

La Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB S.A. ESP.) es la entidad encargada del servicio de aseo: barrido, recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de Bucaramanga. En la actualidad presta el servicio de disposición final de residuos al Área Metropolitana y otros municipios aledaños. Los municipios adscritos a este servicio son en orden de densidad poblacional, Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Cáchira y Suratá.

Bucaramanga con una población de 524.012 habitantes, capital de Santander dispone sus residuos en el relleno sanitario El Carrasco que recibe cerca de 734,3 ton/día de residuos provenientes de 11 municipios. La producción de Bucaramanga es de aproximadamente 562 Ton/día de residuos sólidos, es decir el 76,5% de los residuos recibidos en el sitio. El relleno dispone de un área de 92 ha y está ubicado en la parte suroccidental de la ciudad

de Bucaramanga, en una depresión o cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la terraza de Bucaramanga.

Figura 1. Imagen cárcava 1



Los residuos son descargados por los vehículos recolectores y particulares, en celdas de trabajo con dimensiones de 40 metros de ancho por 30 metros de largo, luego son esparcidos por el buldózer, en tal forma que se conforma y compacta una capa de 1 metro. Después de compactada la capa se realizó el proceso de cobertura con una capa de material de 0.25 metros sobre los residuos. En las dos últimas terrazas se construyeron paralelo a su conformación los filtros para lixiviados y elevando las chimeneas para gases a medida que las terrazas iban ganando altura.

Figura 2. Carrasco



DATOS DE EL CARRASCO

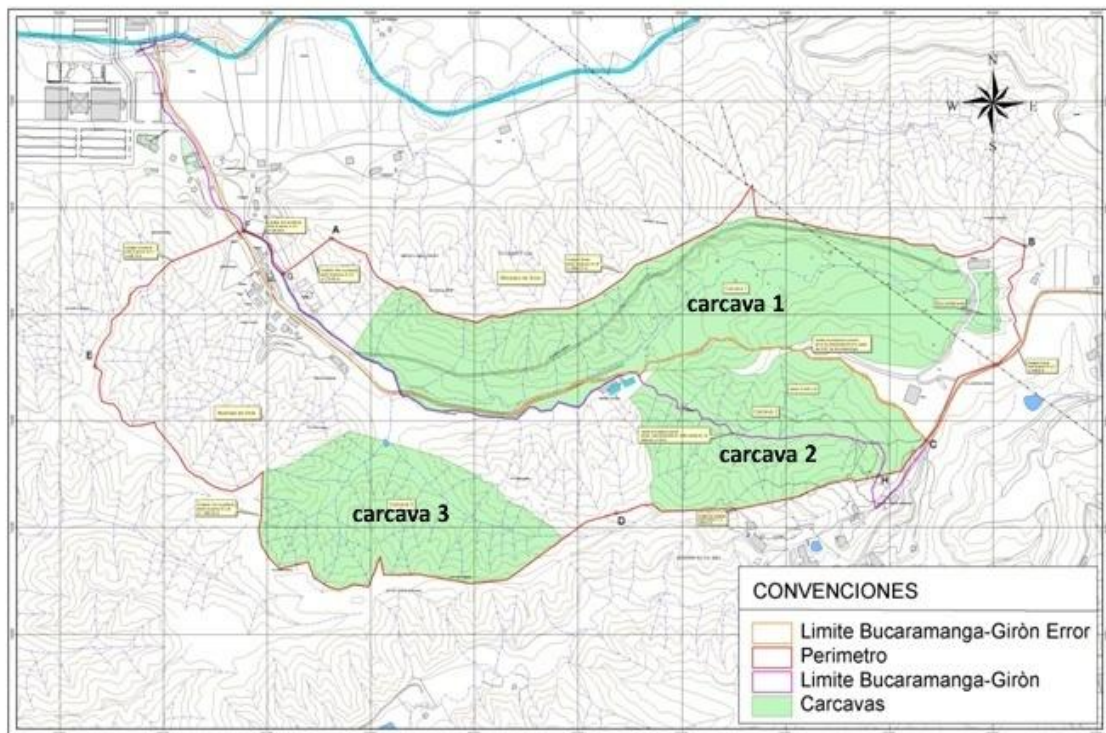
Producción por persona	0.602 Kg/Hab/día
Población servida	1.200.000 Habitantes
Total Diario	700 Toneladas
Densidad de Residuos compactados	0.7 a 0.8 Ton/m ³
Sueltos	0.3 Ton /m ³

CARACTERÍSTICAS PROMEDIAS DE RESIDUOS QUE ENTRAN

Tabla 3. Características promedio de residuos que entran (Adaptado de estudio para la sustracción del predio “el Carrasco” ECODES 2006)

Materia Orgánica	56%
Papel/Cartón	9%
Plástico	19%
Vidrio	4%
Metales	2.5%
Textiles	4.5%
Cueros	2%
Residuos Sanitarios	3%
Producción de Lixiviados	3 Lit/Seg

Grafica 14. Distribución de las cárcavas



5.4. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Según la Caracterización georeferenciada y materialización de los límites del Carrasco, realizado por la firma Soluciones Geomáticas en el año 2004. En el área del Relleno Sanitario del carrasco afloran depósitos detríticos de edad cuaternaria; sobre estos materiales, que cubren más del 60 % del área, se encuentran construidas las zonas urbanas del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB). El principal depósito de éste tipo es la formación Bucaramanga conformada de base a techo por el miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr); los tres primeros miembros afloran en el Relleno Sanitario; adicionalmente, fueron identificados en la zona depósitos antrópicos, como el sector clausurado de la cárcava 1, el cual fue caracterizado como Relleno (Qll) y la zona utilizada antiguamente como botadero de basuras sin tratamiento, ubicada en la cárcava 2, se caracterizó como depósito superficial junto con el sector de la escombrera (Qms).

5.4.1. Segmento Órganos (Qbo)

Corresponde a una serie de niveles conglomeráticos con alternancia de niveles y lentes limoarenosos con variaciones laterales y verticales tanto en su composición como en su textura. Se definen en un 60% como matriz soportados y en un 40% como gravo soportados. Los cantos presentan una variación lateral y vertical y se distribuyen dentro del segmento de la siguiente manera:

- **Areniscas silíceas**

Coloración blanca y amarilla muy bien cementada, dura de grano medio a grueso, bien redondeada, media esfericidad.

- **Lodolitas y Areniscas rojizas y violetas**

Fragmentos de rocas blandas de grano fino, bien redondeadas y de media esfericidad. El origen de estos cantos puede corresponder a las formaciones Jordán y Girón. En

secuencia vertical la proporción de estos cantos aumenta en los niveles superiores del segmento alcanzando aproximadamente un 50%.

- **Cantos ígneos y metamórficos**

Los fragmentos ígneos corresponden a rocas de textura fanerítica, de grano medio a gruesa, presentando buena redondez y esfericidad. Los fragmentos metamórficos presentan buena redondez y esfericidad, con tonos rojizos. La presencia de esquistos y filitas es baja en la zona.

- **Otros fragmentos**

Se observan algunos fragmentos subangulares y de composición cuarzosa (cuarzo lechoso). Existe alternancia de niveles limoarenosos, los cuales presentan contactos ondulados hacia la base e irregulares y erosiónales hacia el tope del segmento.

5.4.2. Segmento Finos de Bucaramanga (Qbf)

Suprayace el segmento órganos, con estratificación plano paralela en algunos sectores, presentando contactos netos y suavemente ondulados. Este segmento se puede dividir en dos paquetes básicos definidos de base a techo de la siguiente manera:

- I. Arcillas grises masivas sin estructuras internas presentando una variación en su espesor entre 5 y 15 mts.
- II. Alternancia de niveles limoarenosos con niveles gravoarenosos de color pardo-amarillento.

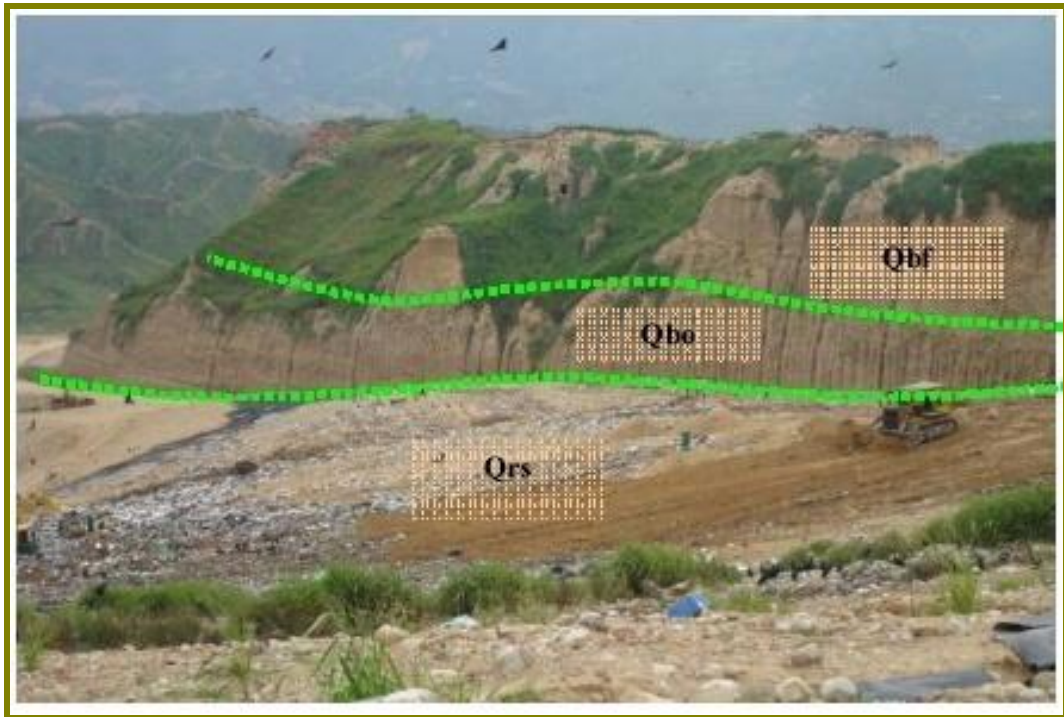
Entre los dos paquetes se puede observar un nivel arcilloso guía de un centímetro de espesor, color pardo oscuro.

5.4.3. Segmento Gravoso (Qbg)

Constituido por niveles areno gravosos y gravo arenosos con cantos subred ondeados de baja esfericidad, soportados en un matriz arcillo-arenosa color pardo-rojizo. En algunos sectores se incrementa la presencia de la grava haciendo menor el porcentaje de matriz. Se pueden observar contactos ondulados e irregulares sin encontrarse estructuras internas dentro del Miembro.

5.4.4. Segmento Limos rojos (Qblr)

Este segmento está compuesto por arcillas, arenas arcillosas y limos de color rojizo, el cual no aparece en el área del relleno de El Carrasco.



En la zona del Carrasco, de acuerdo con el mismo estudio, la Formación Girón, descrita como rocas sedimentarias, fracturadas y meteorizadas compuestas por areniscas y limolitas, se encuentra a 35 m de profundidad teniendo como nivel de referencia las zonas más bajas del sector.

- **Caracterización de materiales en la Quebrada la Iglesia**

En el área del valle de la quebrada la Iglesia se han adelantado numerosos registros eléctricos que sirven para caracterizar los diferentes materiales, los registros existentes en el área se resumen en la siguiente tabla.

- **Registros eléctricos verticales**

Tabla 4. Registros eléctricos verticales (Adaptado de estudio para la sustracción del predio “el carrasco” ECODES 2006)

SEV No.	Localización	Profundidad (metros)	Resistividad (Ohm-m)	Correlación Hidrogeológica
C-14	Valle de la quebrada de La Iglesia cerca de Circulación y Tránsito	0.00 – 0.30	204	Suelo de arena y grava, seco.
		0.30 – 0.70	226	Material aluvial de grava en matriz areno arcillosa.
		0.70 – 6.60	251	Material aluvial de grava en matriz arenosa y bajo porcentaje de arcilla.
		6.60 - 34.30	125	Material aluvial de arena, grava y arcilla, húmedo.
		34.30 – 100.00	332	Interpretado como rocas meteorizadas, fracturadas, sedimentarias, de areniscas y limolitas de la formación Girón, con agua.
C-15	Valle de la quebrada de La Iglesia frente al Carrasco	0.00 – 0.30	178	Suelo de arena y grava, seco.
		0.30 – 1.40	255	Material aluvial de grava en matriz areno arcillosa.
		1.40 – 10.60	310	Material aluvial de grava en matriz arenosa y bajo porcentaje de arcilla.
		10.60 – 50.00	107	Material aluvial de arena, grava y arcilla, húmedo.
		50.00 – 100.00	1059	Interpretado como rocas meteorizadas, fracturadas, sedimentarias, de areniscas y limolitas de la formación Girón, con agua.
C-17	Junto a Cenfer	0.00 – 0.20	198	Suelo de arena y grava, húmedo.
		0.20 – 1.10	351	Material aluvial de grava y arena fina.
		1.10 – 3.90	767	Material aluvial de grava en matriz arenosa.

SEV No.	Localización	Profundidad (metros)	Resistividad (Ohm-m)	Correlación Hidrogeológica
		3.90 – 21.30	201	Material aluvial de arena, grava y arcilla, húmedo.
		21.30 – 100.00	722	Interpretado como rocas meteorizadas, fracturadas, sedimentarias de areniscas y limolitas de la formación Girón, con agua hacia el techo.
B-55		0.00 – 1.10	703.7	
		1.10 – 5.50	203.4	Material aluvial de arena, grava y arcilla, húmedo?.
		5.50 – 46.80	38.3	Material aluvial de arena, grava y arcilla, seco. ?
		46.8 – 83.7	21.0	Material aluvial de arena, grava y arcilla, seco?.
		83.70 -?	86.6	Roca?

5.5. HIDROLOGÍA

La hidrología de la zona se caracteriza por estar altamente intervenida tanto en su dirección de drenaje natural como en la calidad del recurso. La Cárcava 2 es una microcuenca que drena en sentido NE – SW hacia la quebrada La Iglesia.

La importancia hidrogeológica de este componente radica en que el drenaje El Carrasco, cuando lleva aguas de manera temporal durante periodos lluviosos, se constituye en una zona de aporte de aguas hacia el sistema hídrico subterráneo, favorecido además por aspectos geológicos como la composición de los materiales y su posición estratigráfica.

Diferentes estudios han determinado la permeabilidad o conductividad hidráulica de los niveles de conglomerado del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, teniéndose por norma general que la conductividad horizontal (Kh) es mayor que la conductividad vertical (Kv), esto debido a que el tránsito de aguas se facilita por los contactos entre los diferentes niveles del depósito indicativos de los pulsos de sedimentación.

La información para el análisis de los elementos del clima obtenida es tomada de las estaciones de Llano Grande de Girón y la existente en la Planta de Tratamiento de Aguas

Residuales (PTAR) Río Frío, que la CDMB, tiene en el anillo vial. Se escogió estas estaciones como las más representativas de las condiciones del Carrasco, por su cercanía y similitud de condiciones.

En los sondeos se detectaron suelos que en general corresponden a mezclas de arena arcilla y limo, cuyo contenido de finos varía entre 37% y 59%, índices de plasticidad bajos a medios y contenidos de humedad bajos, entre 7% y 18%. Se Clasificaron como SC, SM o ML-CL que corresponden a arenas arcillosas, arenas limosas o mezclas de limos y arcillas con arenas.

5.5.1. Valores del coeficiente de permeabilidad en distintos suelos

La siguiente tabla expresa valores del coeficiente de permeabilidad y formas de determinarlo, relacionándolo con las condiciones de drenaje y el tipo de suelo.

Tabla 5. Valores de k en cm/seg (adaptado del estudio permeabilidad en suelos Universidad Nacional de Rosario)

	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		

5.6. MODELAMIENTO

El transporte del contaminante (lixiviado) en el basurero el Carrasco es un tema de mucha responsabilidad y delicadeza ya que este fue una de las principales causas de la contaminación de la quebrada la Iglesia y posible contaminación de acuíferos de la zona, hace unos años se vienen aplicando medidas para controlar y mejorar este problema.

Teniendo la geología e hidrología del área de estudio del Carrasco se puede hacer un análisis de la tendencia del lixiviado por medio del suelo que se encuentra entre los depósitos de basura y los acuíferos, de igual manera también se puede analizar la filtración del contaminante a los drenajes de la planta de tratamiento y la quebrada la Iglesia.

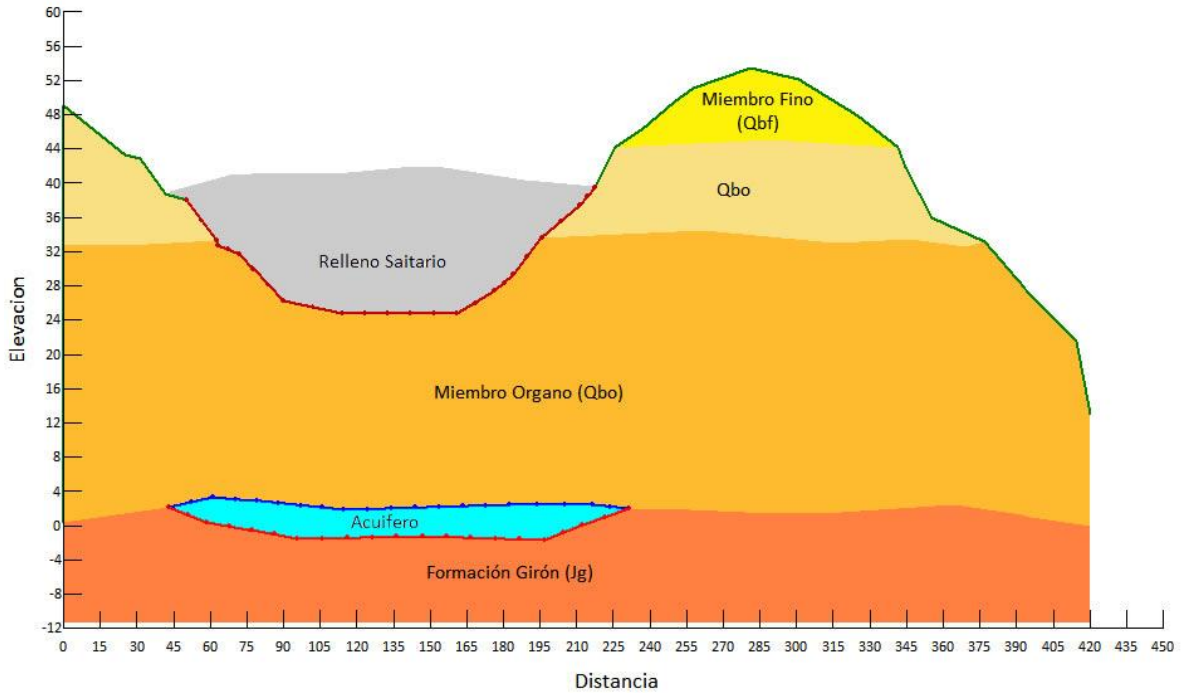
5.6.1. Posible Contaminación de Acuíferos

En la zona donde se encuentra la cárcava 1 y 2 se encuentran algunos acuíferos de gran importancia por su contenido de agua, en este estudio se analizo el acuífero que se encuentra entre la formación Girón, Este acuífero es actualmente explotado, entre otros sitios, en inmediaciones de Piedecuesta por medio de un pozo profundo, donde sus aguas se caracterizan por presentar alto contenido de hierro.

Con relación a su caracterización, el acuífero de la Formación Girón se considera de tipo confinado a semi confinado al estar en parte cubierto por el acuitardo del Miembro Calcáreo de la Formación Bucaramanga, teniendo su recarga principal de forma lateral desde las laderas orientales de la ciudad, en zonas de permeabilidad alta asociadas al trazo de la falla de Bucaramanga.

Aun así no se puede asegurar que este acuífero lo proteja en su totalidad el acuitardo de la parte baja de la formación Bucaramanga, por este motivo es necesario conocer los posibles riesgos que puede tener el acuífero por contaminación del lixiviado.

Gráfica 15. Modelamiento sección transversal del Carrasco



Debido a que ya se habló del funcionamiento del programa (anexo B) y se realizó un ejemplo práctico se omitirá algunos pasos en este estudio para poder concentrarnos en el recorrido del lixiviado y cómo influye en el acuífero.

Ya conociendo la cantidad de basura que llega diaria al carrasco y la producción de lixiviado que este genera se realiza el análisis en el software para conocer su comportamiento.

Total de basura Diario	700 Ton/día
Producción de Lixiviados	3 Litros/seg (temporada de lluvia)
Densidad de Residuos Compactados	0,75 Ton/m ³
Densidad del lixiviado	1.0 Ton/m ³ (muy similar al agua)

$$TotalBasura = \frac{700 \text{ Ton/día}}{0.75 \text{ Ton/m}^3} = 930 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$TotalLixiviado = 3 \frac{\text{Litros}}{\text{seg}} * 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} * 24 \frac{\text{hora}}{\text{día}} = 259200 \frac{\text{Litros}}{\text{día}}$$

$$TotalLixiviado = 259200 \frac{\text{Litros}}{\text{día}} * 1 \frac{\text{Kg}}{\text{Litros}} = 259200 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

$$ConcentraciondelLixiviado = \frac{259200 \text{ Kg/día}}{930 \text{ m}^3/\text{día}} = 278 \text{ Kg/m}^3$$

De acuerdo con los datos que la cdmb a registrado la planta de tratamiento del carrasco recoge un 85% de los lixiviados que se genera, se trabajara con el 15% restante de la concentración del lixiviado, aun así se debe ser consciente que esta planta comenzó a funcionar a partir del año 2000 y El "Carrasco" empezó a ser utilizado desde 1.978 como un botadero a cielo abierto.

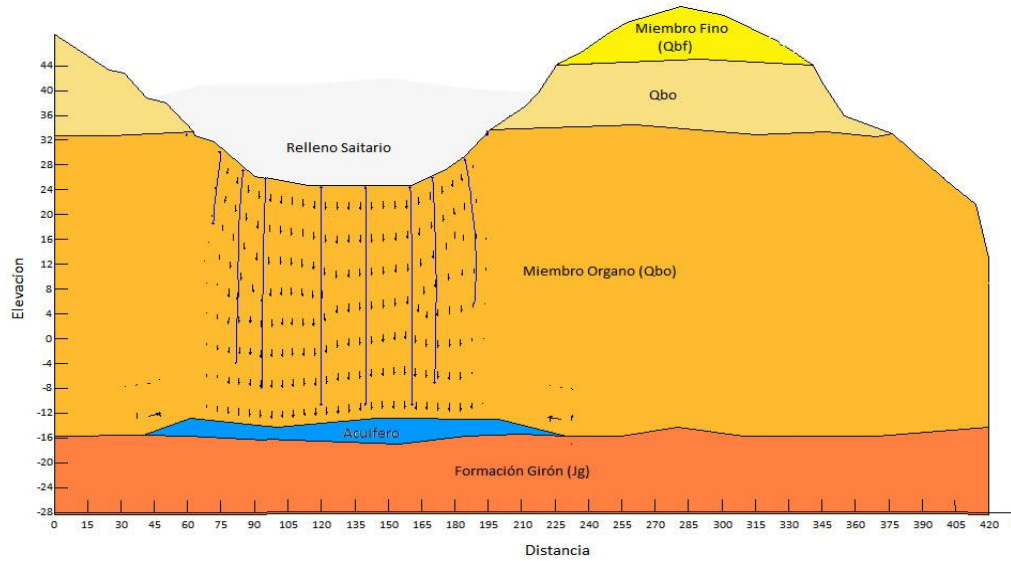
$$ConcentraciondelLixiviado = 278 \text{ Kg/m}^3 * 0.15 = 42 \text{ Kg/m}^3$$

Casi toda la superficie del Carrasco está conformada por la formación Bucaramanga la cual contiene miembro órganos (Qbo) este miembro están constituidos por capas de grava y limo-arenosos, tomaremos este terreno como limo-arenoso ya que es donde se encuentra el recorrido del contaminante.

La formación Girón está constituida por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas, de color rojo violáceo y gris verdoso, de estratificación cruzada y capas gruesas, con interestratificación de limolitas y lodolitas de color rojo violeta.

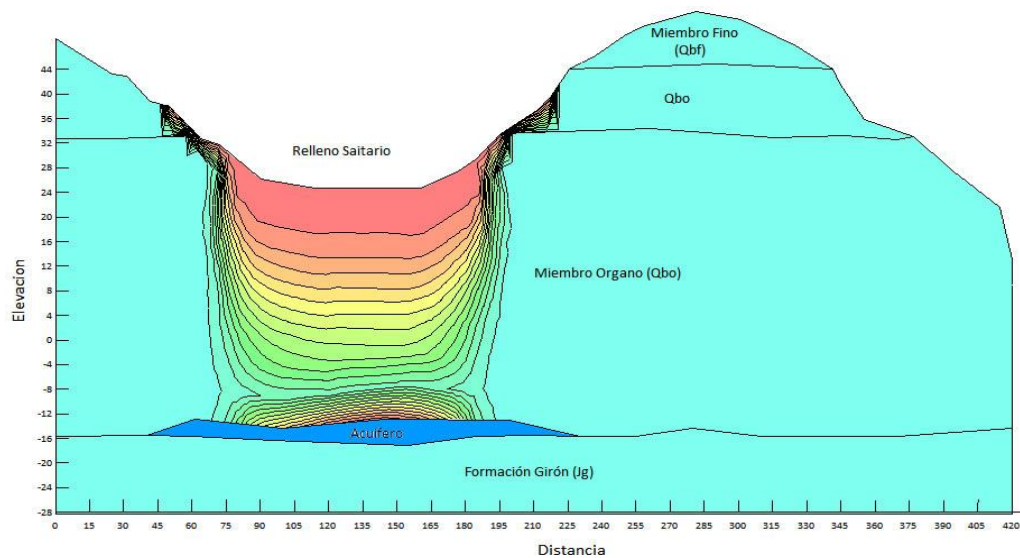
El material aluvial por donde se desplaza la quebrada la Iglesia esta conformados por grava en matriz arenosa y bajo porcentaje de arcilla como lo describe la tabla 6.3.

Grafica 16. Flujo y transporte de partículas del lixiviado después 1600 días



Se distribuyeron partículas por toda la base del relleno sanitario para conocer el comportamiento y la posible duración que puede tener el contaminante, como se puede ver en la grafica una partícula alcanzaría el acuífero en un poco mas de 4 años sin tener en cuenta las propiedades del suelo y su dispersión.

Grafica 17. Dispersión del lixiviado después 1250 días



Realizado el modelamiento de advección - dispersión se puede evidenciar que el contaminante llega al acuífero en un periodo aproximado de 3.5 años, se debe tener

presente que se realizó solo con el 15% del contaminante asumiendo que la planta siempre ha estado desde el inicio del Carrasco.

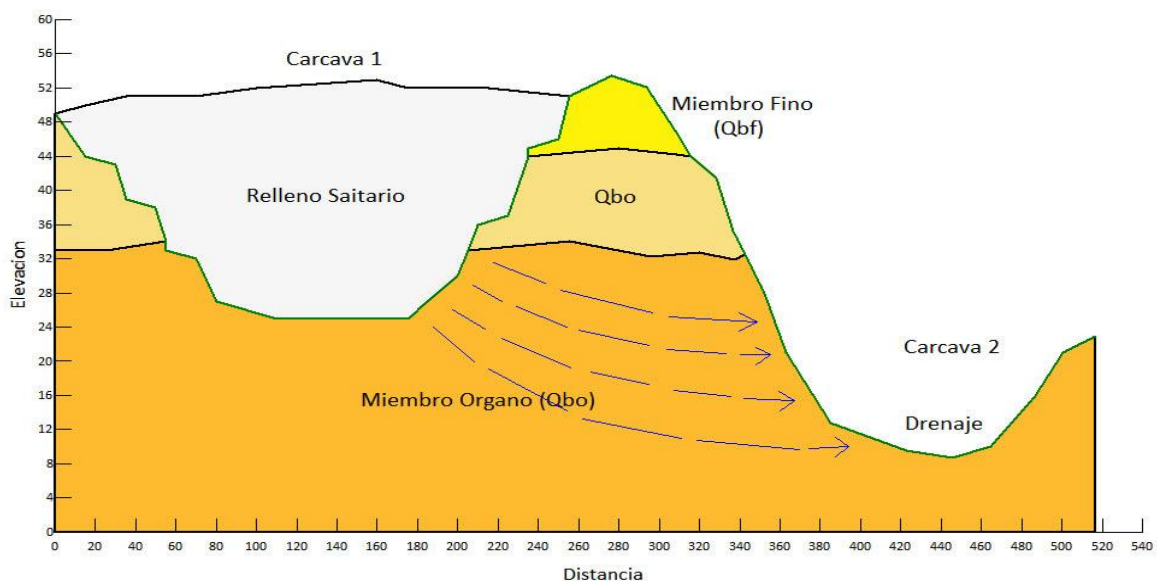
No se puede afirmar que el acuífero se encuentre contaminado, debido al tiempo que se demora el lixiviado en llegar a este se podría pensar en que en el transcurso del recorrido se halla purificado y solo llegue agua. Se tiene presente que la cárcava 1 está funcionando hace 26 años que es donde actualmente se deposita la basura la probabilidad de que el lixiviado haya contaminado el acuífero es significativo.

5.6.2. Transporte de lixiviados hacia el drenaje

La hidrología de la zona se caracteriza por estar altamente intervenida tanto en su dirección de drenaje natural como en la calidad del recurso. La Cárcava 2 es una microcuenca que drena en sentido NE – SW hacia la quebrada La Iglesia.

La importancia hidrogeológica de este componente radica en que el drenaje El Carrasco, cuando lleva aguas de manera temporal durante periodos lluviosos, se constituye en una zona de aporte de aguas hacia el sistema hídrico subterráneo, favorecido además por aspectos geológicos como la composición de los materiales y su posición estratigráfica.

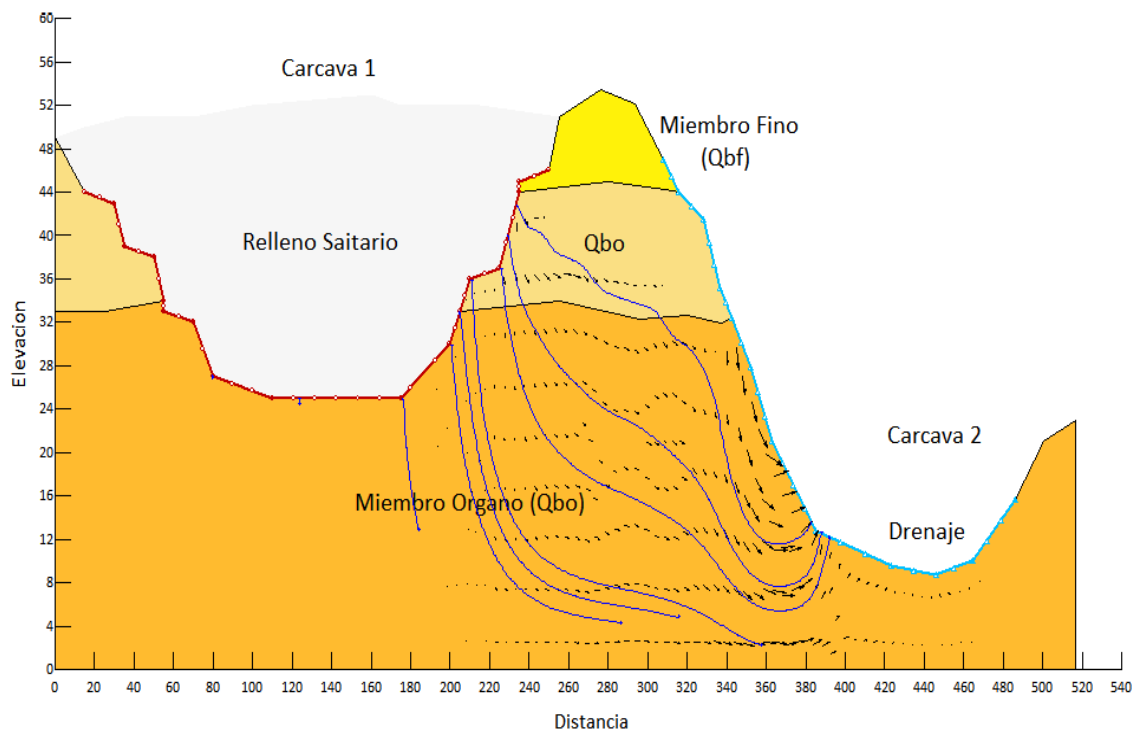
Grafica 18. Modelo del suelo del drenaje de la cárcava 2



La planta de tratamiento del carrasco recibe el lixiviado por medio de canales los cuales captan toda el agua residual de los depósitos de basura ya sea por las pendientes del terreno o la filtración que se genera por medio del suelo. Actualmente la basura se cubre con una geomembrana y tierra compacta la cual ayuda a controlar los lixiviados.

En los estudios de la EMAB se habla de la filtración del flujo desde la cárcava 1 a las cárcava 2 ayudando al drenaje del agua superficial que viene de las pendiente del terreno, pero no indican el tiempo que este necesita, se entiende que debido al tiempo funcionando ya este flujo es constante y aporta para el canal de la planta de tratamiento.

Grafica 19 Flujo y transporte de partículas del lixiviado después 4600 días

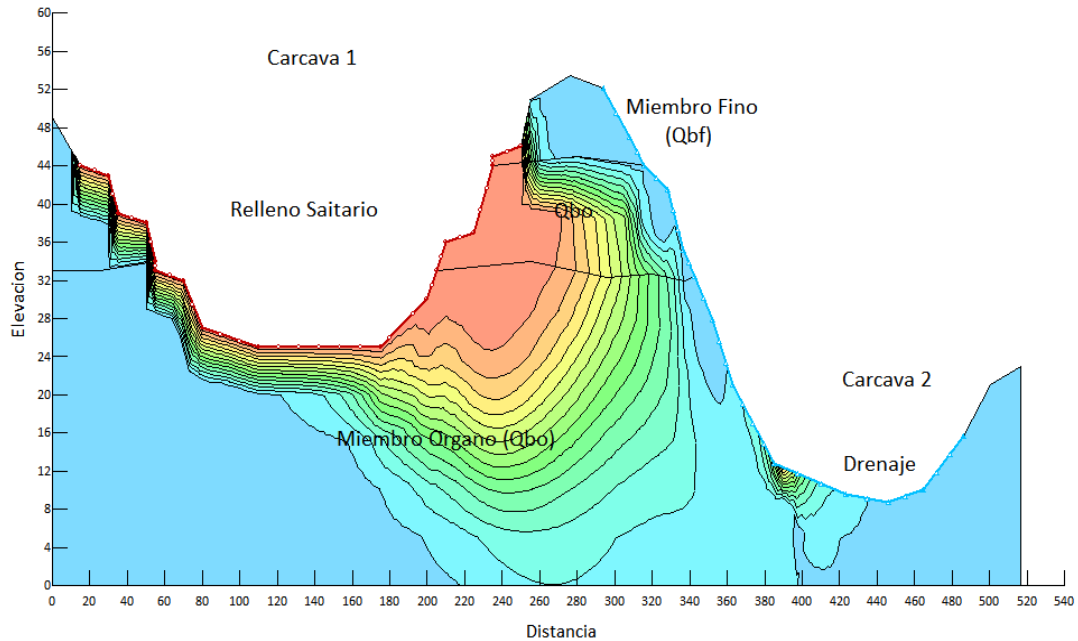


En este modelamiento (Grafica 6.21) se puede evidenciar los vectores de flujo y el posible comportamiento de las partículas del contaminante, tiende a concentrarse en la parte baja del talud donde la hay un cambio de pendiente considerable, se puede estimar que el contaminante llegaría al drenaje en un tiempo de 12.5 años.

El modelamiento de partículas se realiza es mas para conocer el comportamiento o la tendencia que puede tener un contaminante en el suelo, con esta grafica se puede

evidenciar en qué punto va a ocurrir la concentración del lixiviado, debido a que en este ejercicio no se toma las propiedades del terreno se asume que el tiempo de llegada debe ser menor.

Grafica 20. Dispersión del lixiviado después 2400 días



Como nos indicaba en el modelamiento de partículas (Grafica 6.22) se puede observar que el lixiviado tiende a concentrarse en la parte baja del talud donde se diferencia el cambio de pendiente, ya aplicada las propiedades al terreno para hacer el análisis de dispersión del contaminante se observa que este llega en aproximadamente 6.5 años.

Esta concentración aporta flujo hacia el drenaje de las aguas residuales de la cárcava 2 que produce el basurero, las cuales luego van a la planta de tratamiento, Igual que en el modelamiento anterior se podría pensar que este flujo no estaría contaminado debido al tiempo que se demora en llegar.

5.6.3. Estudio de una posible trayectoria de lixiviados hacia la quebrada la Iglesia

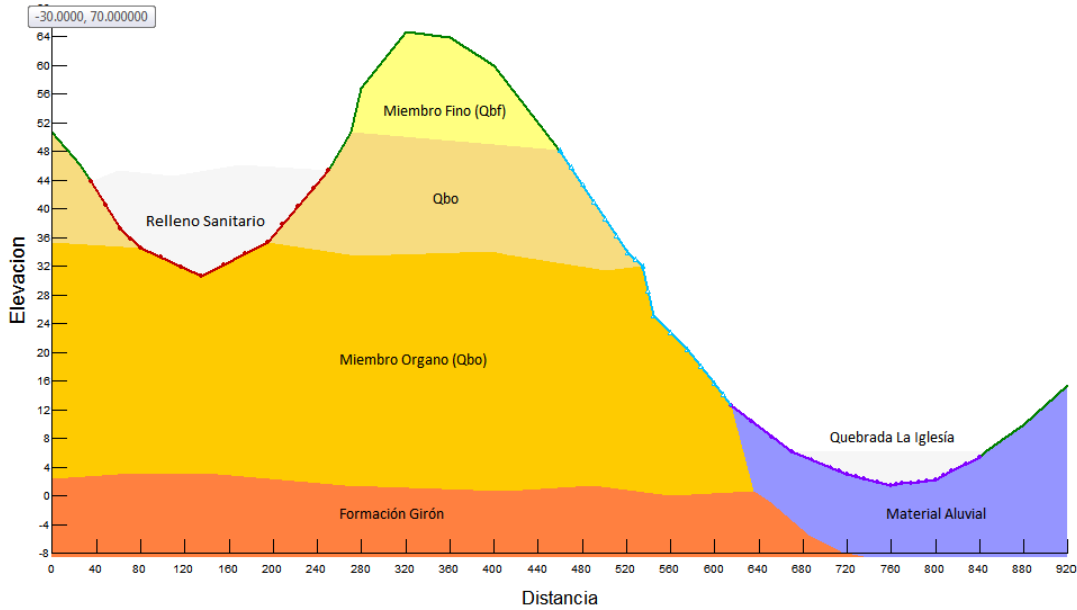
Para el modelamiento se tomó una posible trayectoria del recorrido del lixiviado por medio del suelo hacia la quebrada la Iglesia, se debe tener en cuenta que este transporte de contaminantes no es el único que afecta la quebrada ya que gran parte del lixiviado viene directamente por el flujo superficial.

Grafica 21. Trayectoria del recorrido del contaminante



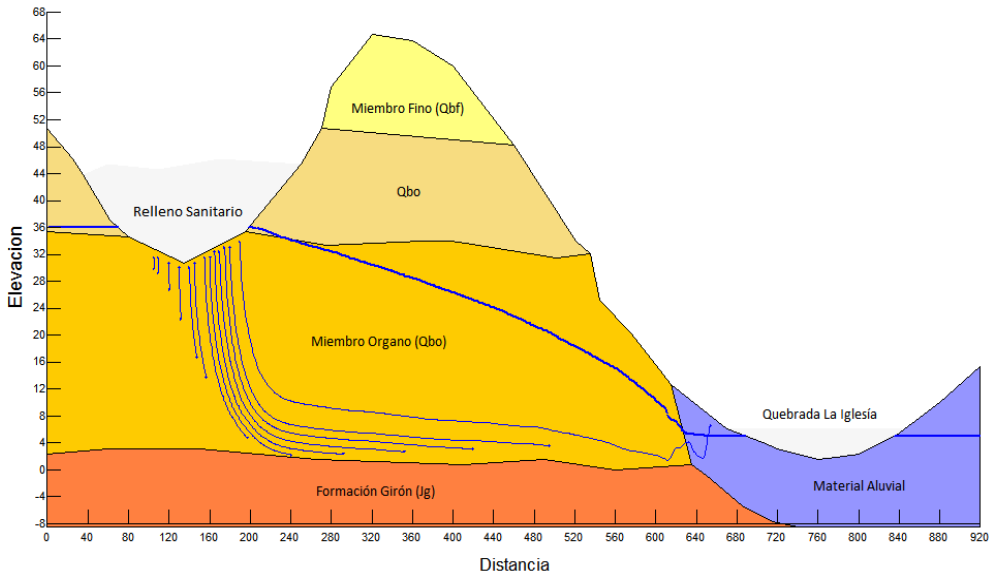
Ya teniendo definida la zona que se va a estudiar se realiza el esquema del perfil en el software, al estar ya el perfil realizado se procede a asignar los diferentes tipos de suelos, entre mas se encuentre detallado mejor será el resultado del modelamiento y así se podrá tener una estimación más exacta del flujo y el comportamiento de las partículas en este.

Grafica 22. Perfil de la zona de estudio



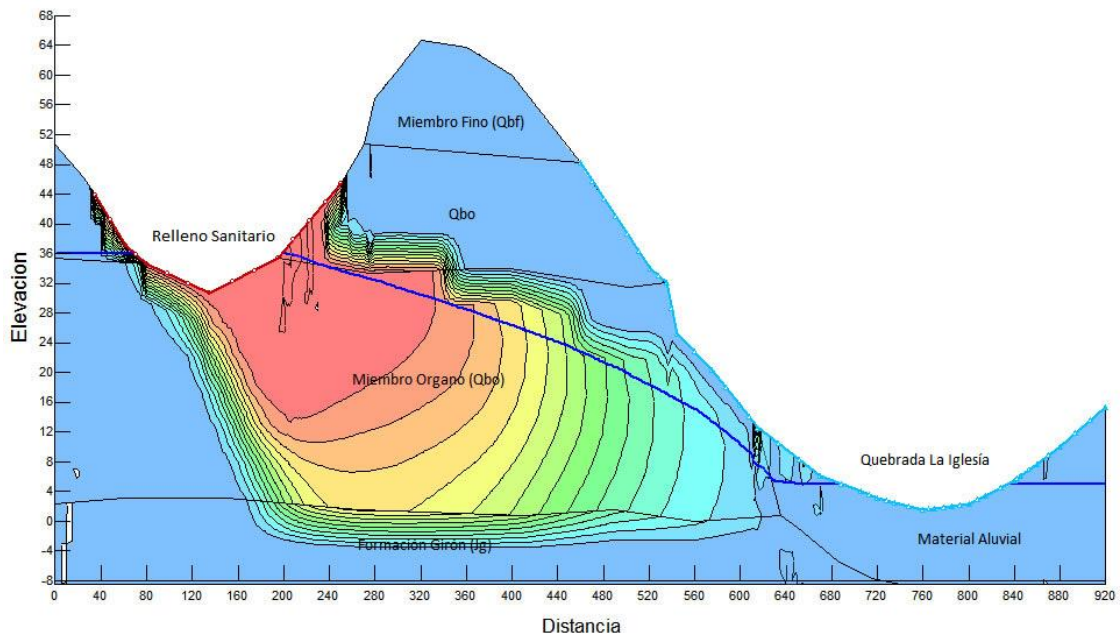
Este modelamiento se realiza para conocer el comportamiento del lixiviado en grandes distancia de suelo, de ante mano se asume que es muy difícil que el flujo haga efecto sobre la quebrada la Iglesia, y por lo tanto se descarte que este pueda contaminarla o causar algún efecto.

Grafica 23. Nivel freático y transporte de partículas del lixiviado después 45000 días



En el modelamiento de partículas (Grafica 6.26) se observa el comportamiento que puede tomar el contaminante, este realiza un recorrido considerable para poder llegar a la quebrada dando da una curva antes de llegar a la formación Giron y tomar dirección hace el material aluvial, en todo este trayecto se demora aproximadamente 123 años.

Grafica 24. Dispersión del lixiviado después 35200 días



En el proceso del transporte del contaminante por dispersión se observa lo que se venía comentando anteriormente, el lixiviado hace el recorrido en 96 años mucho más rápido que el de partículas debido que se están tomando en cuenta las propiedades del suelo, pero aun sigue siendo demasiado tiempo para el transporte.

Se puede afirmar que por este medio el lixiviado no contaminara la quebrada la Iglesia. Al momento de realizar este análisis se trabajo con la conductividad hidráulica mas optima y se tomo un mayor valor de dispersión para facilitar el flujo por medio del terreno.

CONCLUSIONES

Se permitió establecer el comportamiento que realiza el flujo subterráneo por medio de diferentes tipos de suelos, ya sea un suelo con una conductividad hidráulica baja $10e-7$ y una dispersión longitudinal normal, en el cual se logró concluir por medio de datos y graficas que son suelos útiles para la captación de residuos sanitarios debido a su baja permeabilidad. Igualmente se pudo establecer como varía la trayectoria y el tiempo que toma el contaminante por medio de suelos con conductividades hidráulicas más elevadas.

En los modelamientos que se estudiaron con el software GeoStudio y sus herramientas Seep/w y Ctran/w se pudo concluir que el método de elementos finitos establece un mejor modelamiento cuando se toma una distancia pequeña entre nodos de la malla, aunque el tiempo de análisis aumenta de manera significativa, los resultados se obtienen con una mayor aproximación.

Debido al mal manejo que se le dio al basurero el Carrasco desde el año inauguración 1978 hasta el año 2000 donde empezó a funcionar la planta de tratamiento, se pudo establecer que es muy probable que los lixiviados que se generaron durante ese periodo de tiempo hayan contaminado algunos acuíferos, sin mencionar que fue en este periodo donde se contaminó la quebrada la Iglesia.

El trabajo de modelamiento numérico de aguas subterráneas que se realizó requirió de una atención especial para conceptualizar el dominio del modelo, seleccionar las condiciones de borde, asignar los parámetros del modelo y calibrar el modelo. GeoStudio nos permitió realizar diversos modelos numéricos de flujo de agua subterránea que tienen la capacidad para la simulación del flujo saturado, de una sola fase como el flujo no saturado y para el transporte de especies químicas.

Los modelos numéricos actuales permiten la simulación de flujo de densidad variable como es caso de la intrusión de lixiviados en acuíferos regionales.

Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de basura aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los RSM (Residuos Sólidos Municipales), de ahí es lo importante de interceptarlas y desviarlas para evitar el incremento de lixiviado; de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación en las corrientes y nacimientos de agua y pozos vecinos.

El buen manejo del suelo que se le haya dado al relleno sanitario permite en un futuro desarrollar programas de recuperación paisajística y social como un parque, un campo deportivo o una zona verde. Por fortuna ya existen en América experiencias de aprovechamiento de estos sitios transformados en parques y áreas recreativas como sucedió en México D. F., Santiago de Chile y Buenos Aires, entre otras ciudades.

El manejo de SEEP/W y CTRAN/W del paquete de programas de GeoStudio son herramientas muy útiles y fáciles de usar para el desarrollo de análisis de redes de filtración y Modelos de simulación de la calidad de aguas en suelos y rocas.

RECOMENDACIONES

Se hace necesario estudiar el periodo de lluvias que afectan la zona del Carrasco, conocer las precipitaciones y realizar modelamientos en distintos periodos de tiempo, para luego establecer un balance más preciso.

Efectuar ensayos de permeabilidad del terreno de la formación Bucaramanga y establecer con más detalle el perfil de suelo que se encuentra en la zona de estudio para un mejor modelamiento.

Se aconseja realizar un estudio más detallado a todo lo que tiene que ver con la zona que afecta la quebrada la Iglesia y los acuíferos, realizar métodos que puedan controlar la llegada de lixiviado hacia la planta de tratamiento e intentar captar el 100% del contaminante que genera el depósito sanitario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Germán López Pineda - Introducción a la modelización de redes de flujo mediante el uso del programa seep/w 2007 - Universidad de Córdoba – 2010.
2. John Krahn - Transport Modeling with CTRAN/W - First Edition - GEO-SLOPE International, Ltd – 2004.
3. Silvia Angelone, Ing. María Teresa Garibay y Marina CauhapéCasaux –Permeabilida de suelos – Universidad Nacional de Rosario – 2006.
4. [2] BADILLO, Juárez. Mecánica de Suelos / FloorMechanics. Editorial Limusa S.A. de C.V.
5. Julio Cardini – Dispersión de contaminantes es cuerpos receptores (Aguas subterráneas) – Regional concepción de Uruguay – 2007.
6. Ricardo Oyarzún L. - Transporte de contaminantes en aguas subterráneas– CEAZA Chile – 2007.
7. ECODES - estudio para la sustracción del predio “el carrasco” de propiedad de la empresa de aseo de bucaramanga – emab, del distrito de manejo integrado (dmi) de los recursos naturales renovables – 2006.
8. Juan David Pérez Aristizábal – Capitulo 3 Teoría de Lixiviados – Maestria en Ingenieria Urbana – Universidad de Medellin – 2007.

9. Katia M. Noguera, Jesús T. Olivero - los rellenos sanitarios en latinoamérica: caso colombiano – 2010.
10. Leonardo David DoandGarzon – Modelo de conductividad hidráulica en suelos – Tesis de Magister en ingeniería – Recursos Hidráulicos – Universidad Nacional – 2004.
11. Germán López Pineda, - Introducción a la modelización de redes de flujo mediante el uso del programa seep/w 2007 – Universidad de Cordoba - 2007.
12. Nidia Emilcen Barrera Orduz . José Alfredo Muñoz Castelblanco. Julio Esteban Colmenares Montañez y Leonardo David Donado Garzón - análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias – 2008.
13. Edgar Castillo, Adriana Salcedo&Yasmin Moreno - evaluación de un sistema biológico a escala piloto laboratorio para la remoción de materia organica del lixiviado del relleno sanitario de bucaramanga(santander), colombia - Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingeniería Química Universidad Industrial de Santander.
14. S. A. GAVANDE - La Física de Suelos – 1968.
15. Frind, E.O., 1988. Solution of the Advection-Dispersion Equation with Free Exit Boundary. Numerical Methods for Partial Differential Equations. 4, John Wiley & Sons, Inc.
16. Contaminant Modeling with CTRAN/W 2007 - GEO-SLOPE International Ltd – 2008

17. <http://www.geo-slope.com/support/geostudio2012/examples.aspx?q=kind%3aseep>

18. http://www.eesc.usp.br/sgs/MecSolos/SEEP_SEWorkbook1.pdf

19. EMAB – Generalidades Zona del Carrasco 2005

20. SEEP/W - Student Edition Workbook - GEOSLOPE International Ltd – 2007

21. CTRAN/W - Student Edition Workbook - GEOSLOPE International Ltd – 2007

ANEXOS

Anexo A. Propiedades Hidráulicas De Los Suelos

Las funciones hidráulicas de los suelos necesitan de la definición de parámetros del suelo. El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (1975) presentó los valores medios de las propiedades hidráulicas de los suelos de acuerdo a la clasificación de USDA estimadas por Rawls y otros (1982) (Tabla 1) y Carsel y Parrish (1988) (Tabla2). Estos parámetros pueden servir como guía para estimar inicialmente los parámetros del suelo.

Tabla 1. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Rawls y otros, 1982), α y n son los parámetros de Van Genuchten.

<i>Textura</i>	θ_r	θ_s	α <i>1/cm</i>	n	K_s <i>cm/d</i>
Arena	0,020	0,417	0,138	1,592	504,00
Arena-Loam	0,035	0,401	0,115	1,474	146,60
Loam arenoso	0,041	0,412	0,068	1,322	62,16
Loam	0,027	0,434	0,090	1,220	16,32
Limo-loam	0,015	0,486	0,048	1,211	31,68
Loam arenoso arcil.	0,068	0,330	0,036	1,250	10,32
Loam arcilloso	0,075	0,390	0,039	1,194	5,52
Loam limoso arcil.	0,040	0,432	0,031	1,151	3,60
Arcilla arenosa	0,109	0,321	0,034	1,168	2,88
Arcilla limosa	0,056	0,423	0,029	1,127	2,16
Arcilla	0,090	0,385	0,027	1,131	1,44

Tabla 2. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Carsel y Parrish, 1988), α y n son los parámetros de Van Genuchten.

<i>Textura</i>	θ_r	θ_s	α <i>l/cm</i>	n	K_s <i>cm/día</i>
Arena	0,045	0,430	0,145	2,680	712,80
Arena-Loam	0,057	0,410	0,124	2,280	350,20
Loam arenoso	0,065	0,410	0,075	1,890	106,10
Loam	0,078	0,430	0,036	1,560	24,96
Limo	0,034	0,460	0,016	1,370	6,00
Limo-loam	0,067	0,450	0,020	1,410	10,80
Loam arenoso arcil.	0,100	0,390	0,059	1,480	31,44
Loam arcilloso	0,095	0,410	0,019	1,310	6,24
Loam limoso arcil.	0,089	0,430	0,010	1,230	1,68
Arcilla arenosa	0,100	0,380	0,027	1,230	2,88
Arcilla limosa	0,070	0,360	0,005	1,090	0,48
Arcilla	0,068	0,380	0,008	1,090	4,80

Anexo B. Análisis En Seep/W

Al iniciar el software elegimos la opción SEEP/W el cual nos permite calcular redes de flujo y filtraciones, enseguida nos muestra una ventana para especificar las condiciones iniciales del proyecto:

Name: Especificamos el nombre del proyecto

Analysistype (tipo de análisis);

- steadystate
- Transient
- Convective heat transfer (TEMP/W and SEEP/W)
- Density-Dependent (CTRAN/W and SEEP/W)

Steady-state (estado estacionario): Un análisis no dependiente del tiempo. Si se especifica esta opción, sólo debe seleccionar la opción de análisis de flujo de aire (include air flowanalysis) si es necesario, esta opción depende del manejo del programa AIR/W el cual permiten especificar las propiedades del material aéreo y las condiciones de límite que se puede aplicar al análisis.

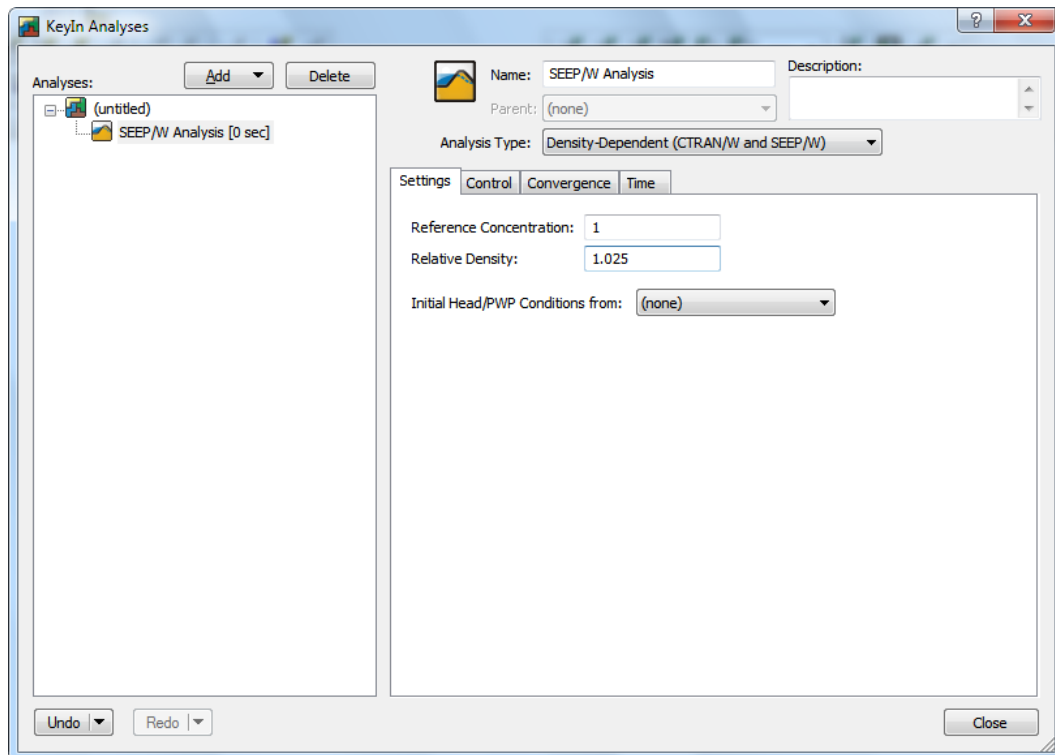
Transient (transitorios): Un análisis dependiente del tiempo, lo que permite aplicar una condición de límite fija o el tiempo que depende para calcular el cambio de presión de agua de poro en diferentes momentos. Se deberá introducir información de paso de tiempo si se selecciona esta opción.

Convective heat transfer (TEMP/W and SEEP/W) (transferencia de calor convectiva): análisis dependiente de la transferencia de calor convectiva utilizando el programa TEMP/W el cual permite especificar aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.

Density-Dependent (CTRAN/W and SEEP/W) (dependiente de la densidad): Un análisis dependiente de la densidad en el cual se integra el manejo del programa CTRAN/W este nos permite calcular fenómenos de difusión de contaminantes en suelos, nos enfocaremos solo a estudiar el manejo de esta herramienta y sus diferentes aplicaciones.

SETTINGS

Gráfica 1. Condiciones iniciales (settings)



En el análisis CTRAN/W KeyIn se especifican los criterios de información y la convergencia del paso de tiempo. Una captura de pantalla del cuadro de diálogo Análisis KeyIn se presenta en la figura. La densidad relativa se especificó como 1,025 (es decir, agua de mar) en una referencia concentración $c = 1.0 \text{ g/cm}^3$

Si el nuevo análisis tiene unas condiciones iniciales que pueden ser satisfechas por el análisis original, que el nuevo análisis de un niño y establecer las condiciones iniciales que provienen de la matriz. En nuestro ejemplo, un análisis transitorio de SEEP/W puede

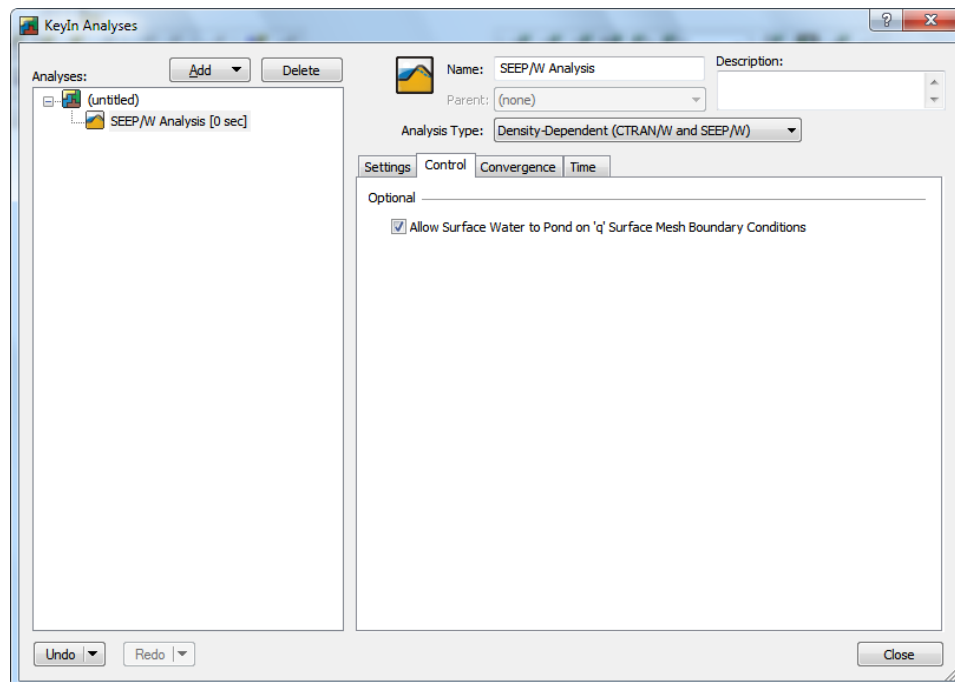
obtener las condiciones iniciales de cabeza/PWP (Pore Water Pressure) de otro análisis SEEP/W.

CONTROL

Permitir la superficie de agua de estanque en 'q' condiciones de límite de malla de superficie: al seleccionar esta opción en SEEP/W permitirá el flujo que sale de los nodos de frontera 'q' al estanque en la superficie de la tierra. Esta opción sólo funciona para las condiciones de límite que se han definido en la parte superior de una región de superficie (creada con dibujar regiones de superficie).

Esta opción acumulará cualquier infiltración no (o cara de filtraciones de agua generado) aguas superficiales a "Laguna" en los puntos bajos de la malla donde puede construir una cabeza positiva y estar disponible para la infiltración en pasos posteriores de tiempo generado) aguas superficiales a "Laguna" en los puntos bajos de la malla donde puede construir una cabeza positiva y estar disponible para la infiltración en pasos posteriores de tiempo.

Grafica 2. Condiciones iniciales (control)



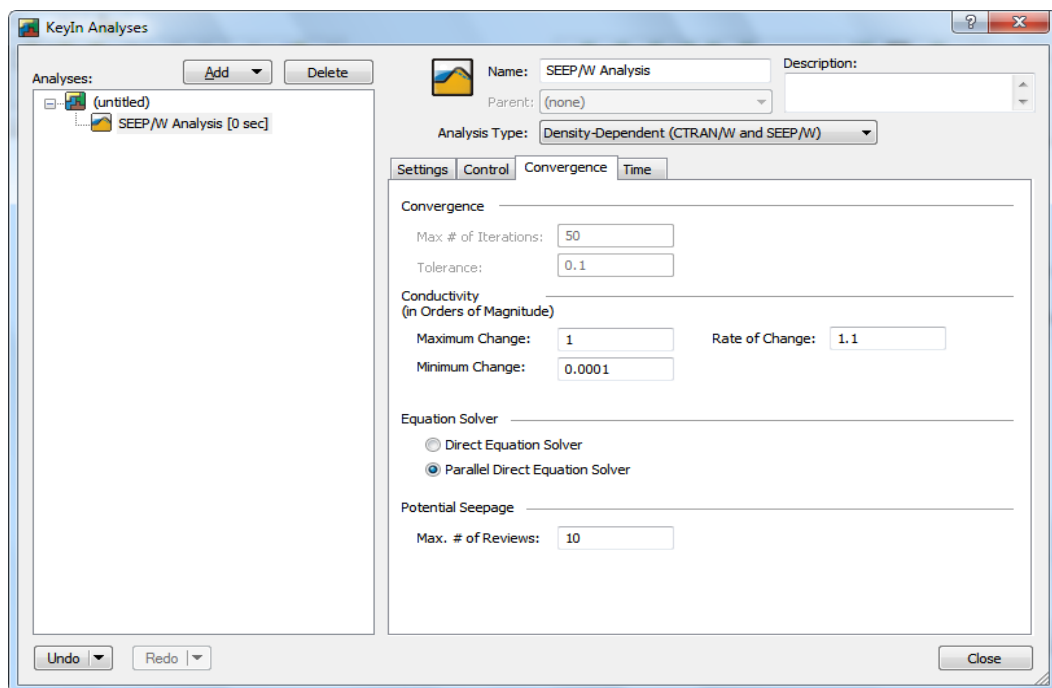
Permitir la superficie de agua del estanque en 'q' condiciones de límite de malla de superficie: al seleccionar esta opción en SEEP/W permitirá el flujo que sale de los nodos de frontera 'q' al estanque en la superficie de la tierra. Esta opción sólo funciona para las condiciones de límite que se han definido en la parte superior de una región de superficie (creada con dibujar regiones de superficie).

Esta opción acumulará cualquier no-infiltración (o cara de filtraciones de agua generada) aguas superficiales a "Laguna" en los puntos bajos de la malla donde puede construir una cabeza positiva y estar disponible para la infiltración en pasos posteriores de tiempo.

CONVERGENCIA FICHA:

La ficha de Convergencia establece las siguientes opciones:

Grafica 3. Condiciones iniciales (convergencia)



Max. # De iteraciones: El número máximo de iteraciones SOLVE se ejecutará en un intento de obtener una solución. La ejecución se detiene o pasa a la etapa siguiente si el número de iteración alcanza el máximo especificado.

Tolerancia (Convergencia): Este parámetro es la diferencia porcentual deseado en la norma del vector de la cabeza ganglionar entre dos iteraciones sucesivas. El proceso de iteración se detiene cuando la diferencia% es menor que la tolerancia especificada. Si la diferencia es mayor que la tolerancia, el proceso de iteración continúa hasta que alcanza el número máximo de iteraciones.

Cambio de conductividad máxima: Este parámetro es el cambio máximo en el log10 de la conductividad hidráulica entre dos iteraciones sucesivas. Un valor de 1 (el valor por defecto) significa que la conductividad hidráulica se puede cambiar tanto como un orden de magnitud entre iteraciones. Un valor de 0,5 significa que el cambio máximo en la conductividad hidráulica entre iteraciones es medio un orden de magnitud. Un valor de 0,05 es de 0,05 órdenes de magnitud, y así sucesivamente.

Tasa de Cambio Conductividad: Este parámetro controla la velocidad a la que el cambio máximo disminuye con cada inversión de oscilación en el proceso de convergencia. Un valor de 1,1 significa, por ejemplo, que después de la inversión primera oscilación, el cambio máximo se reduce a 0,91 ($1.0/1.1$). Después de la inversión de oscilación que viene, el cambio máximo se reduce a 0,83 ($0.91/1.1$) y así sucesivamente hasta que el cambio máximo es menor que el cambio mínimo. A partir de entonces, el cambio máximo es igual al cambio mínimo.

Cambio de conductividad mínima: Este parámetro establece un límite inferior en el valor al que puede disminuir el Cambio Max. Un valor de 0,0001 significa que el cambio en la conductividad hidráulica de una iteración a la siguiente es 0.0001 órdenes de magnitud.

Nota: La reducción en el parámetro de cambio máximo con cada oscilación de la inversión puede ser desactivado mediante el establecimiento de la tasa de cambio a 1,0.

Equation Solver directo: seleccione esta opción si desea que las ecuaciones del sistema que hay que resolver con un horizonte de eliminación de Gauss directo Solver. La velocidad de procesamiento del método directo es el ancho de banda (la diferencia de número de nodo máximo de todos los elementos de un dominio) dependiente. En las

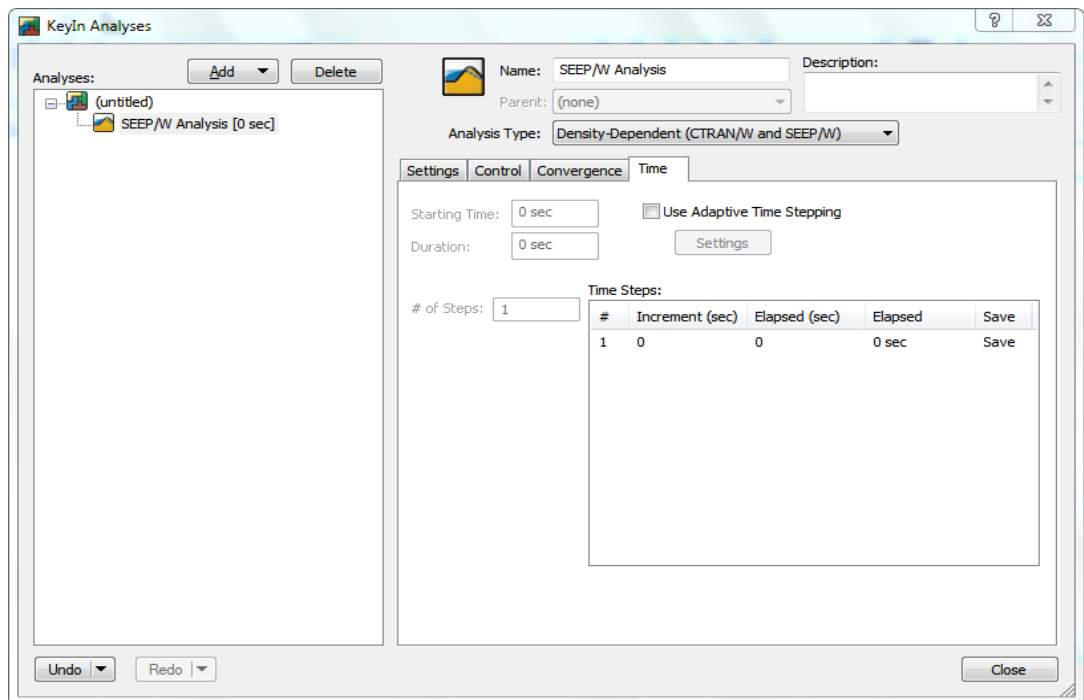
palabras, el método directo es muy rápido en la resolución de problemas sencillos con ancho de banda pequeño, pero puede ser bastante lento en la resolución de problemas más complejos con un gran ancho de banda.

Solver paralelo ecuación directa: seleccione esta opción si tiene un análisis más complejo que lleva mucho tiempo para analizar cada paso de tiempo. El solucionador se pondrá en marcha con múltiples subprocesos en paralelo, que permiten a los ordenadores con procesador central más de uno para resolver el análisis mucho más rápido.

Posibles filtraciones: Este parámetro pone un límite superior en el número de veces que un único nodo puede ser revisado por un posible cambio en el flujo de los límites a la cabeza por el paso del tiempo.

FICHA DE TIEMPO

Grafica 4. Condiciones iniciales (tiempo)



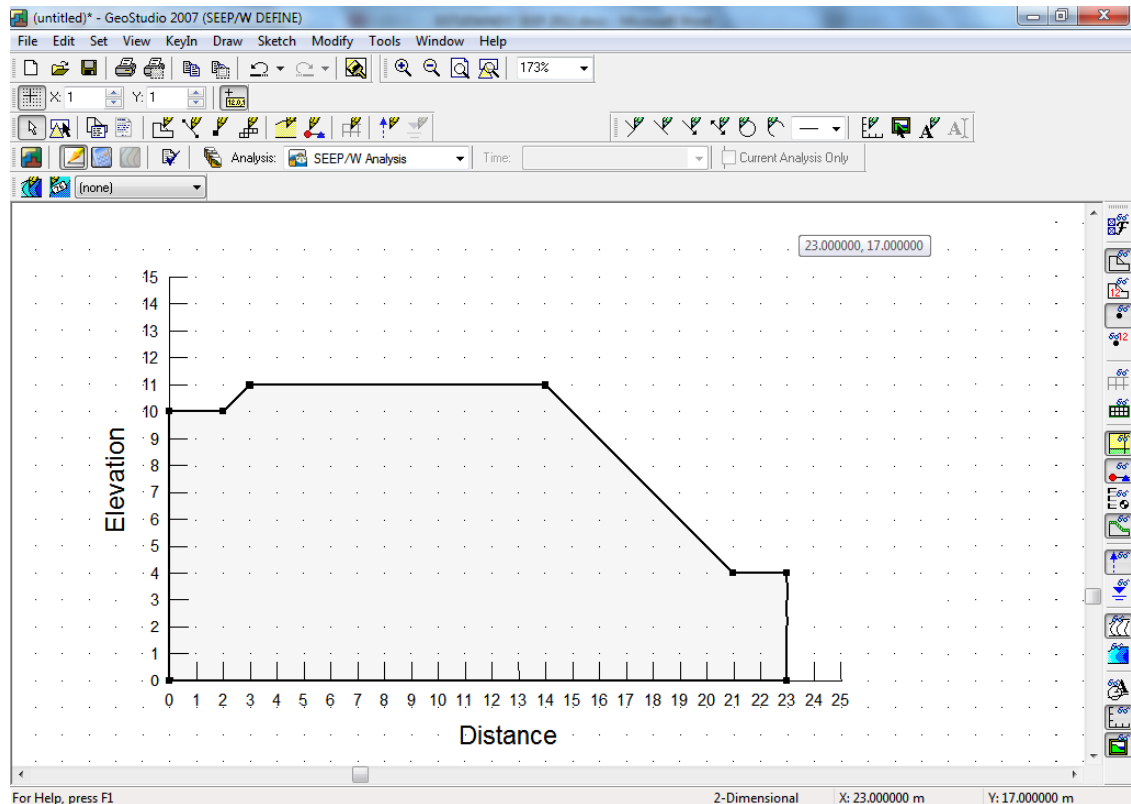
La ficha Time especifica la duración de los análisis, así como definir las medidas de tiempo requerido utilizadas en el análisis.

Cada análisis en GeoStudio, independientemente de su tipo, pueden asignarse una hora de duración, que le permite ver los resultados de los análisis consecutivos en contorno. Para problemas transitorios (depende del tiempo), GeoStudio discretiza el dominio del tiempo en una serie de pasos de tiempo incremental.

Geometría y condiciones de límite

A partir de aquí podemos empezar a introducir geometrías, mallas parámetros y todos los datos necesarios para modelizar el comportamiento de una red de flujo en un terraplén, presa, excavación etc.

Grafica 5. Geometrización del problema



KeyIn – Materiales: crea modelos de materiales que se pueden aplicar a las regiones y las líneas dentro de cada análisis. Una vez que haya definido un material, utilice el

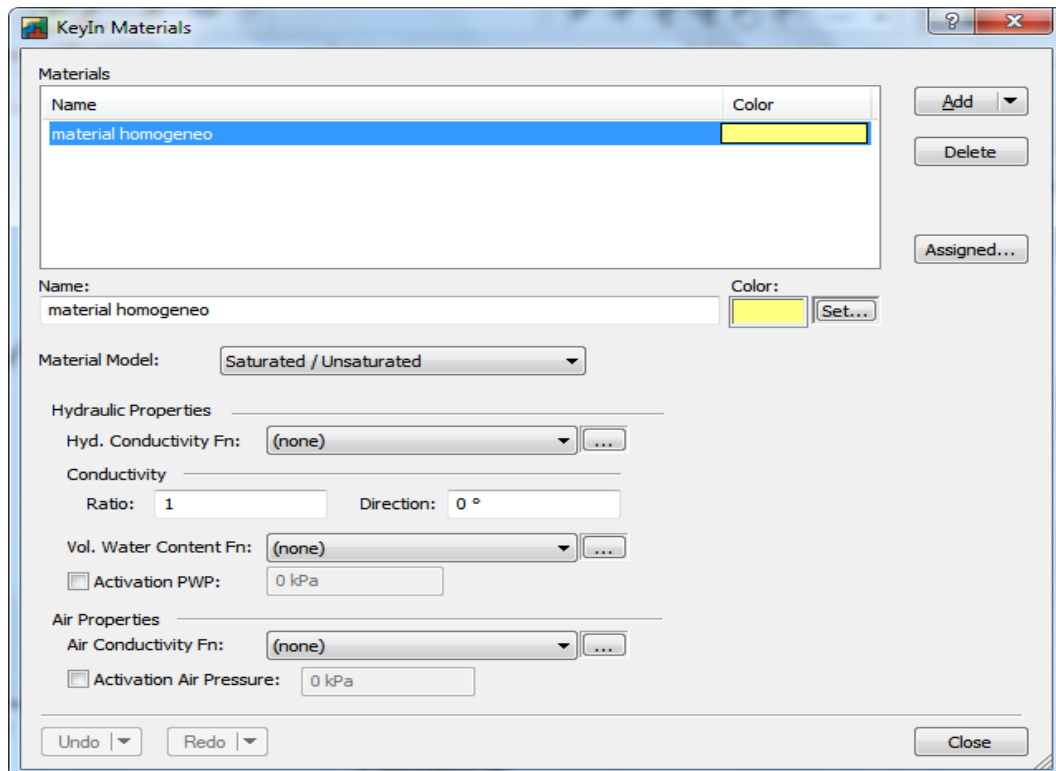
comando extraer materiales en cada análisis para aplicar diferentes materiales a las regiones y las líneas.

La lista de materiales disponibles es compartida entre todos los análisis. Por ejemplo, si crea 3 materiales en un análisis SLOPE/W y, a continuación, cambie a un análisis SEEP/W, verá los mismos materiales ya definidos en SEEP/W; simplemente necesita introducir las propiedades específicas de SEEP/W. Las propiedades de los materiales también son compartidas entre los productos en su caso. Por ejemplo, si especifica una función volumétrica de contenido de agua para un Material de arcilla en un análisis SEEP/W, se utilizará la misma función del contenido de agua volumétrica del material de arcilla en el análisis SLOPE/W.

Saturados / insaturados

Este modelo define por completo el agua y las propiedades del aire (si se utiliza aire / W), tanto en zonas saturadas y no saturadas.

Grafica 6. Definición de propiedades del material (modelo saturado-insaturado)



Hidr. Conductivity Fn: Seleccione una función existente o haga clic en el '...' para crear una nueva función “Hydraulic Conductivity Function”.

- **Hydraulic Conductivity Function:** define la relación entre la presión de poro-agua y conductividad hidráulica. La función se utiliza en materiales KeyIn para definir las propiedades hidráulicas del material.

Conductivity Ratio: La relación de conductividad hidráulica es la relación entre la conductividad hidráulica en la dirección coordenada “y” a la conductividad hidráulica en la dirección coordenada “x”. Por ejemplo, un K-Relación de 5 significa que la conductividad hidráulica en la dirección y es 5 veces mayor que en la dirección x. Un K-Ratio de 1,0 (el valor por defecto) significa que la conductividad hidráulica es la misma en las direcciones x e y. Un valor de 0,1 significa que la conductividad hidráulica y es 10 veces menor que la conductividad hidráulica x. La función de la conductividad hidráulica siempre define K_x .

Conductivity Direction: La dirección de la conductividad hidráulica le permite especificar la conductividad hidráulica en una dirección que no sea en las direcciones de coordenadas x-y. La dirección K es el ángulo en grados entre la dirección x positiva y la dirección x'.

Vol. Water Content Fn: Seleccione una función existente o haga clic en el botón '...' para crear una nueva función usando “Volumetric Water Content Function”. Usted debe seleccionar una función para un análisis transitorio o de cualquier análisis de AIR/W. No se requiere de un análisis de filtraciones en estado estacionario sólo a menos que desee perfilar el contenido volumétrico de agua.

- **Volumetric Water Content Function:** Una función de contenido volumétrico de agua describe el volumen de agua que puede almacenar un material en función de la presión del agua de poro. Como la presión del agua de poro se mueve de un estado positivo a un estado negativo, el suelo comienza a desaturar y disminuye el contenido de agua. El contenido de agua debe especificarse como contenido volumétrico de agua, que se define como la porosidad multiplicada por el grado de saturación.

Activation PWP (Pore Water Pressure): seleccione esta opción si desea utilizar un valor específico PWP cuando el primer material se activa en el análisis.

Air conductivity Fn: Seleccione una función existente o haga clic en el '...' para crear una nueva función con "Air Conductivity Function:".

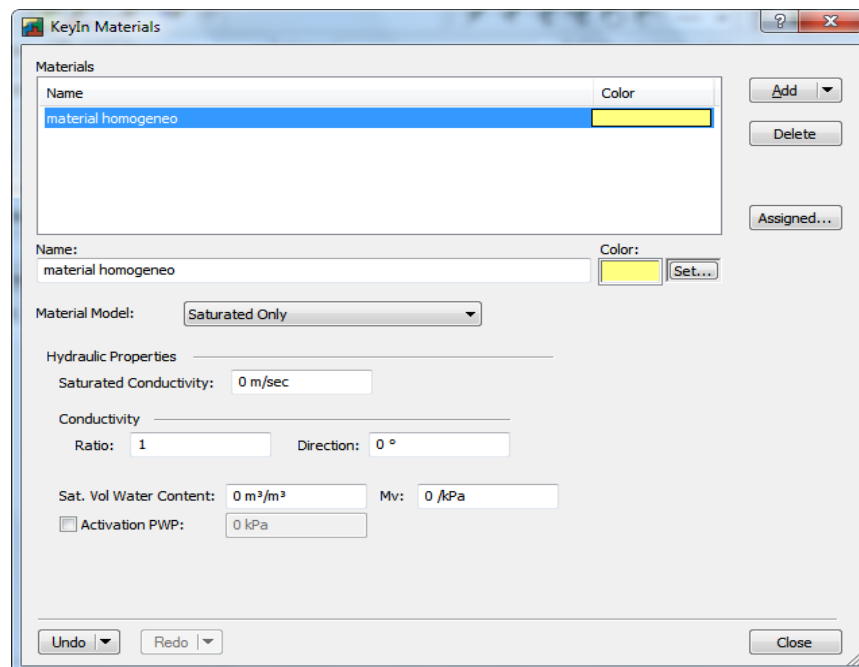
- **Air Conductivity Function:** define la relación entre el grado de saturación de agua y aire conductividad. La función se utiliza en materiales KeyIn para definir las propiedades de aire del material.

Activation Air Pressure: seleccione esta opción si desea utilizar un valor de presión de aire específico cuando el primer material se activa en el análisis.

Sólo Saturada

Este modelo define las propiedades del agua en la zona saturada solamente. No utilice este modelo si se hace un análisis AIR/W.

Grafica 7. Definición de propiedades del material (modelo solo saturado)



Saturated Conductivity: Especificar una conductividad constante para su uso en la zona saturada.

Sat. Vol Water Content: Especifique un contenido de agua constante.

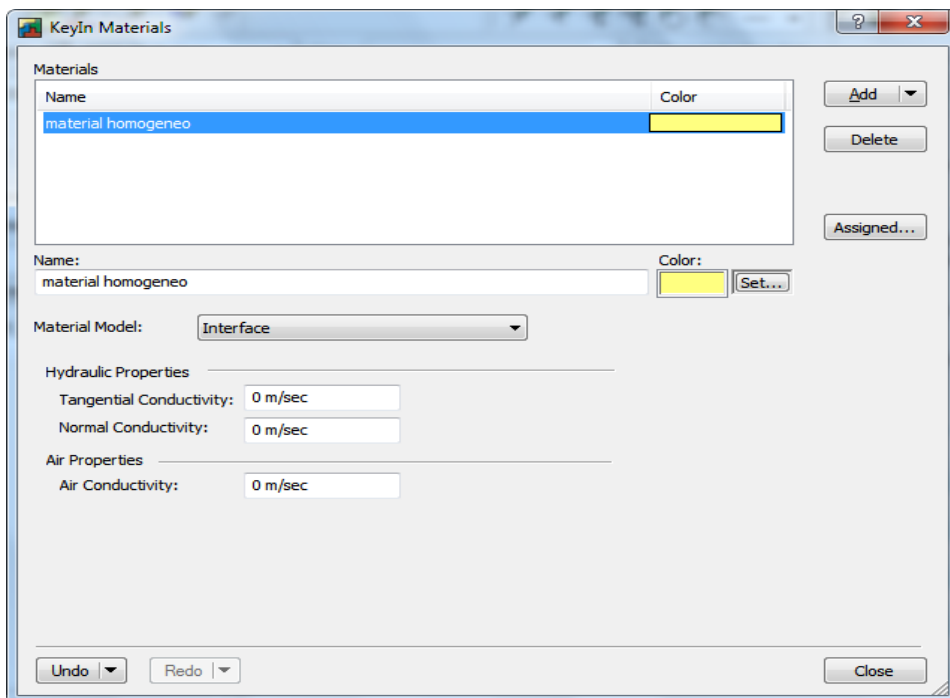
MV: Especifique el Mv de aplicar en la zona no saturada.

Activation PWP (Pore Wáter Pressure): seleccione esta opción si desea utilizar un valor específico PWP cuando el primer material se activa en el análisis.

Interfaz

Este modelo se utilizado cuando los materiales se aplican aplicación a las líneas o regiones de superficie. El material actúa como un interfaz entre las regiones con otras propiedades del material.

Grafica 8. Definición de propiedades del material (modelo interface)



Conductividad hidráulica tangencial: La conductividad paralela a la línea que se aplica el material.

Conductividad hidráulica normal: La conductividad perpendicular a la línea que se aplica el material.

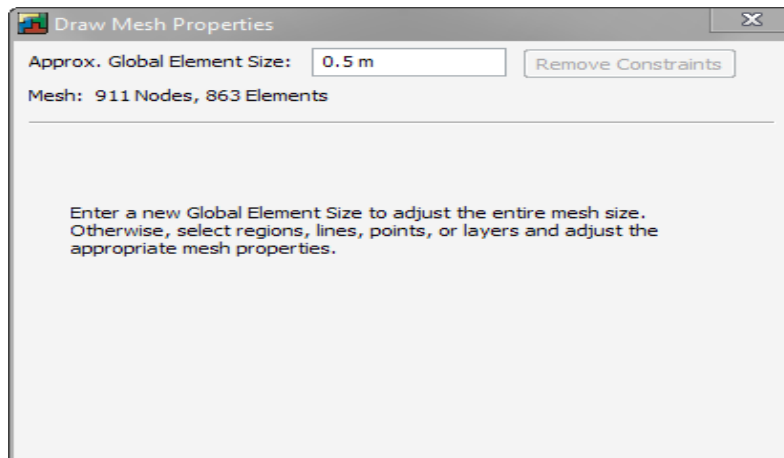
Conductividad del aire: La conductividad constante del aire a través de la interfaz.

Anexo C. Generación Y Modificación De La Malla Del Modelo De Elementos Finitos.

Tamaño del elemento Global cuadro de edición. Este valor representa la longitud aproximada de cada elemento de borde que se creará. El número predeterminado de elementos generados en una región depende del valor introducido en el Aprox.

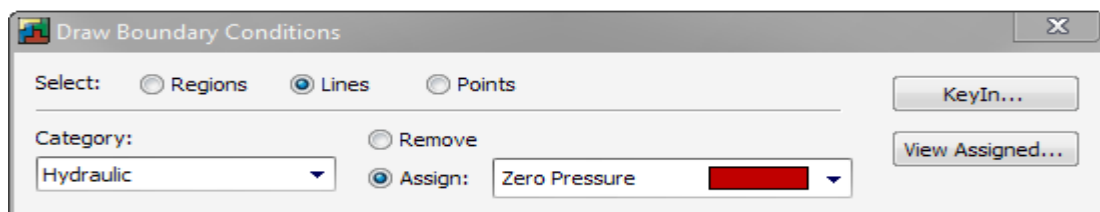
Cuando se cambia el Aprox. Valor global de tamaño de elementos, GeoStudio re-genera la malla sobre todo el dominio. El ajuste de este valor es una poderosa manera de volver a discretizar el dominio completo. Si necesita una malla más fina para su proyecto, introduzca un valor menor. Cuando la nueva malla se genera, todas las condiciones de contorno y vigas estructurales y bares se vuelven a aplicar a los nodos de la malla recién generadas, usted no tiene que volver a definir.

Grafica 9. Definición de tamaño de grilla



CONDICIONES DE CONTORNO PARA FLUJO DE AGUA

Grafica 10. Herramientas de dibujo condiciones de borde



Seleccionar regiones, líneas o puntos.

Regiones especifica la condición de frontera en cada nodo de la región seleccionada. Esto es útil cuando la aplicación de condiciones de contorno cara que se definen como un flujo por unidad de volumen.

Líneas especifica la condición de frontera en cada nodo a lo largo de la línea seleccionada. Esto es útil cuando la aplicación de condiciones de contorno que se definen por unidad de longitud, o cuando se desea que cada nodo a lo largo de la línea para recibir la condición de frontera misma.

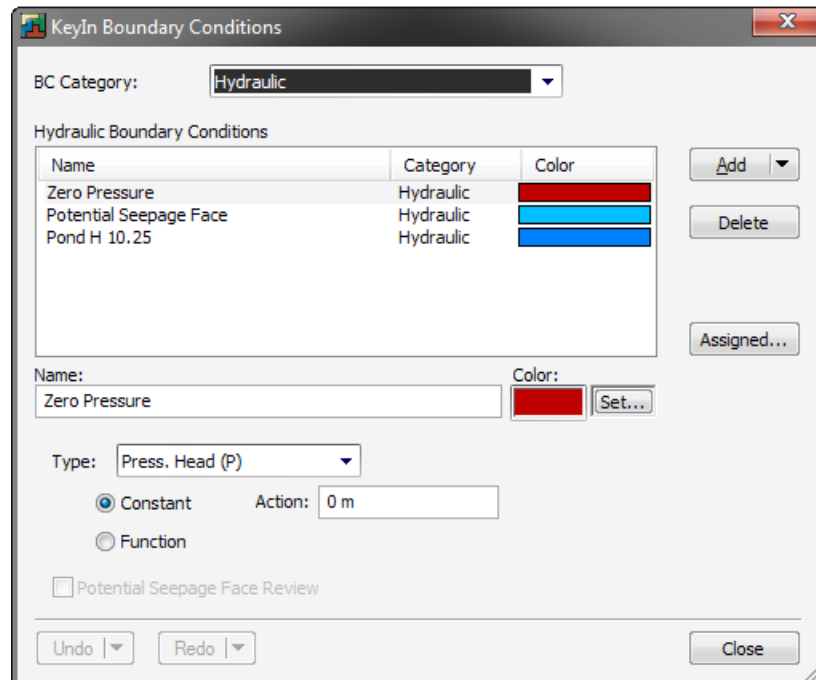
Puntos especifica la condición de frontera en el nodo generado por debajo del punto.

Categoría de condición de frontera a especificar (propiedades hidráulicas).

Las condiciones de contorno KEYIN crea condiciones de contorno que se pueden aplicar a los puntos, líneas y regiones dentro de cada análisis. Una vez que haya definido una condición de contorno, utilice el comando Boundary Draw Condiciones en cada análisis de la aplicación de condiciones de contorno para la geometría.

La lista de condiciones de contorno disponibles se comparte entre todos los análisis. Por ejemplo, si crea tres condiciones de contorno hidráulicas en un análisis de SEEP / W y luego cambiar a un análisis SIGMA / W, podrás ver las mismas condiciones hidráulicas límites ya definidos en SEEP / W.

Grafica 11. Definición keyIn Boundary Conditions (propiedades hidráulicas).



Nombre: el nombre de la condición límite debe ser único.

Color: El color condición de contorno se utiliza cuando se muestra el símbolo de condición de contorno en objetos geométricos que se les ha asignado la condición de contorno para el análisis actual. Haga clic en Configurar para cambiar el color.

Tipo: Cada categoría tiene una lista de los tipos de condición de contorno que se pueden seleccionar para la condición de frontera. Cada tipo contiene un conjunto de propiedades que se utilizarán para la condición de contorno.

Tipo: Head (H), Flux hidráulica total (Q), Flux Unidad hidráulica (q), Gradiente Unidad (i), o de presión (P).

Puede seleccionar una función de límite de una función hidráulica y Modificador hidráulica (si es necesario) para especificar un límite que cambia con el tiempo. Las secciones restantes de este tema se describen los diferentes tipos de límites de condición y propiedades disponibles para cada categoría.

Si el tipo de límite es Q o q, el nodo es revisado y modificado en respuesta a los resultados calculados. Cuando un límite de flujo es crítico, “solve” determina si hay un flujo neto o salida neta. Si hay un flujo neto en el exterior, esto representa una cara de la filtración. La condición de frontera es entonces modificada que consiste en establecer la coordenada “y” y ajustar al tipo de cabeza (H). Esto tiene el efecto de fijar la presión de agua a cero.

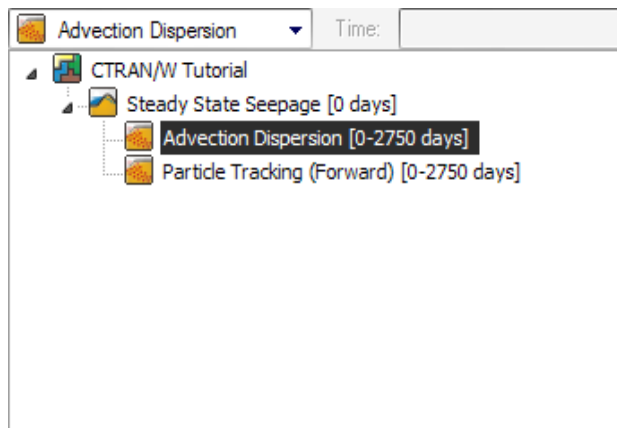
“las propiedades hidráulicas definidas en SEEP/W se conservan para otros análisis plantados del mismo ejemplo”.

Una vez establecida las condiciones del terreno, se procede a ejecutar el programa para observar el comportamiento del flujo del agua.

Análisis de resultados

En la barra menú se encuentra la herramienta de análisis, la cual consiste en una lista desplegable en donde se agregan cada uno de los tipos de análisis que se desea realizar, en nuestro caso análisis de contaminantes en CTRAN/W (advección dispersión y rastreo de partículas).

Grafica 12. Listado de análisis disponibles para grafica de resultados.



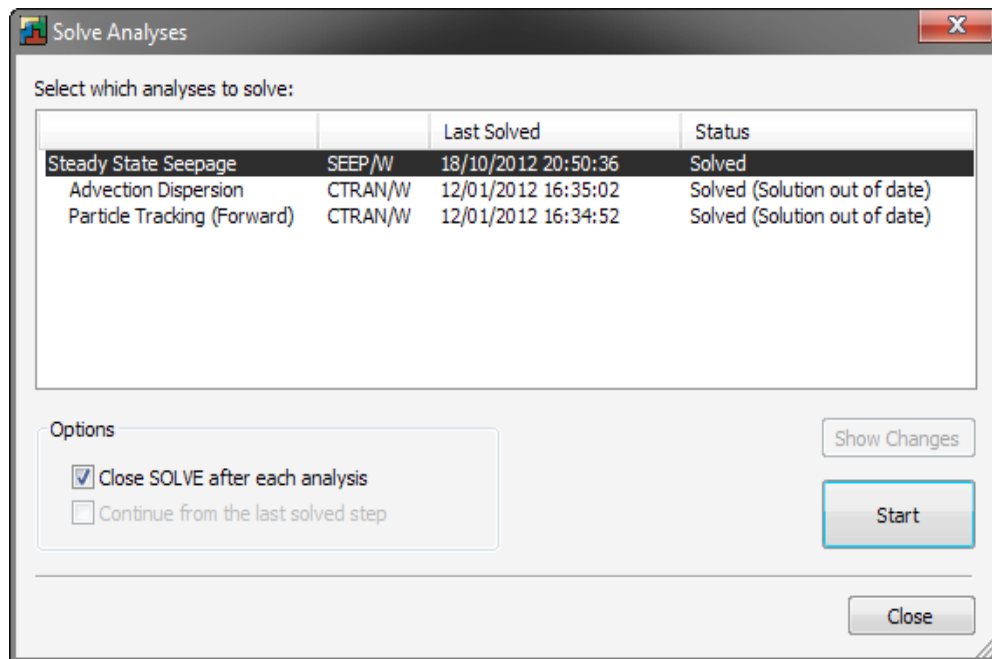
GeoStudio le permite definir muchos análisis dentro del mismo archivo de proyecto. Esto le permite compartir el mismo modelo y definición de propiedades entre muchos análisis. Por ejemplo, si se agrega una región a su geometría, todos los análisis inmediatamente

utilizar la nueva región, usted no tiene que volver a importar la geometría en archivos de datos diferentes.

Advección-dispersión

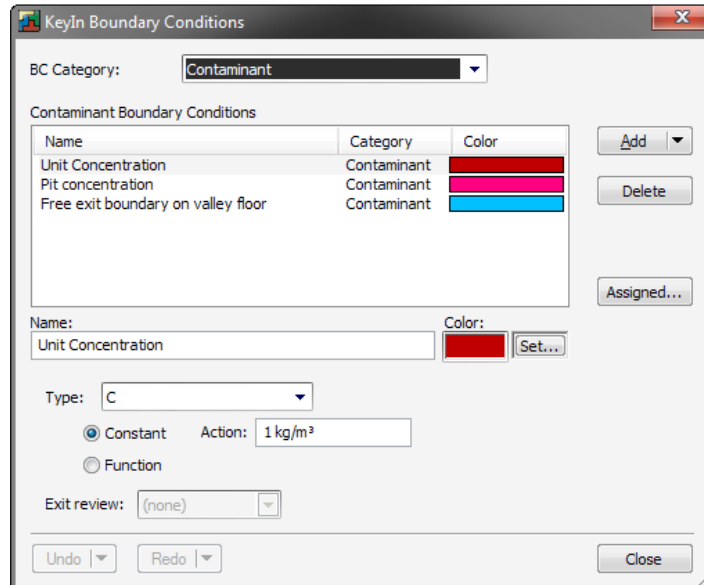
Para observar los resultados se debe seleccionar primero el tipo de análisis a realizar; para esto se va a la barra herramientas y en el botón “solve analyses” (en forma de calculadora).

Grafica 13. Ventana Solve Analyses.



Al realizar este cambio de análisis se puede observar que las condiciones de borde cambian al seleccionar un análisis de rastreo de contaminantes.

Grafica 14. Definición keyIn Boundary Conditions (propiedades contaminantes).



Condición de frontera para Contaminantes

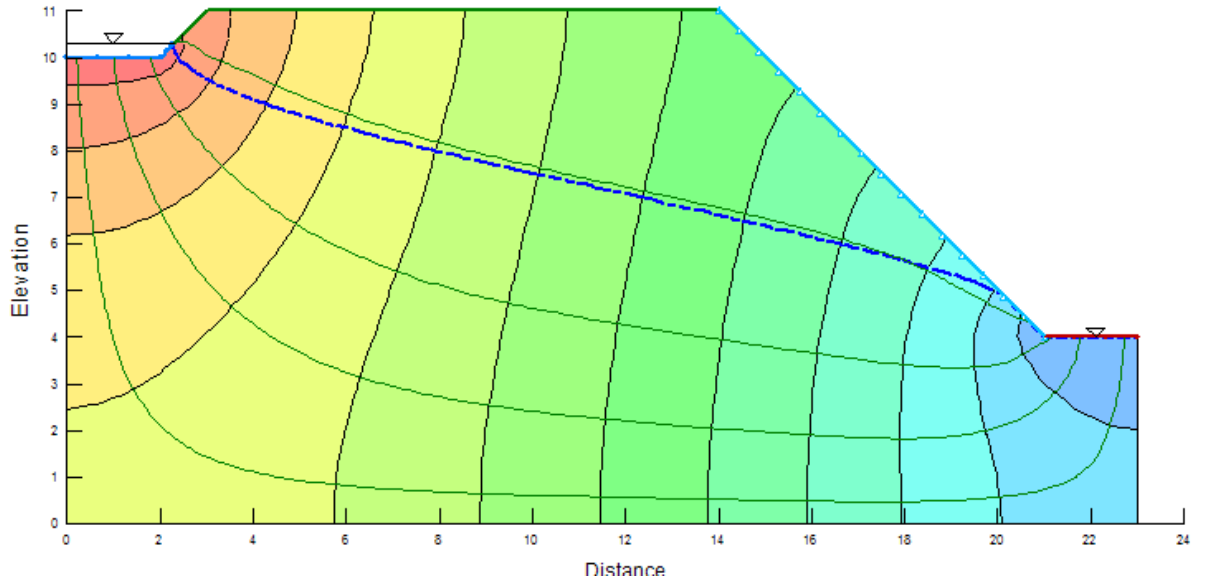
Tipo: Concentración de masa (C), flujo de masa total (Qm), Flux unidad de masa (CM), o concentración de la fuente (Cs).

Puede seleccionar una función de Límites de Contaminantes para especificar un límite que cambia con el tiempo.

si el límite puede convertirse en un límite de salida de flujo durante el análisis, se puede especificar un $Q_d = 0$ o una condición $Q_d > 0$ la salida.

Una vez seleccionado análisis en SEEP/W se observa: La línea punteada corresponde al nivel freático, las líneas continuas es una tendencia de cómo se transporta el flujo de agua por el medio y las curvas de nivel corresponden a las líneas piezometricas del suelo.

Grafica 15. Grafica comportamiento del flujo de agua.



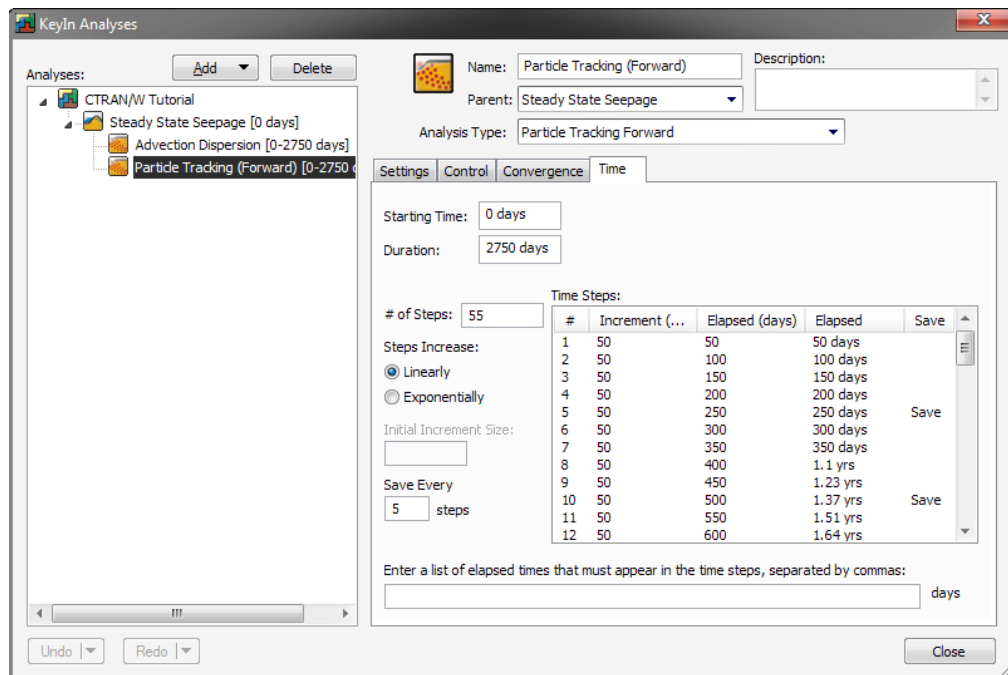
Anexo D. Rastreo de partículas

Para realizar este análisis se debe agregar una componente de tiempo que definirá el recorrido de las partículas del contaminante, en la grafica siguiente se muestra el recorrido de las partículas durante 2750 días. Se debe tener en cuenta que la estimación de los días debe ser suficiente para que las partículas realicen toda la trayectoria, es decir desde el estanque contaminado hasta el punto de análisis.

Esta componente de tiempo es incluida en la barra menú keyin / analyses / time

Esta línea de tiempo se controla por las condiciones iniciales de un análisis”. Tiempo Un análisis 'Start (en la ficha Time) es casi siempre el último tiempo final de sus condiciones iniciales. Si no tiene las condiciones iniciales, la hora de inicio es editable, y se puede pensar en ello como una partida nueva línea de tiempo.

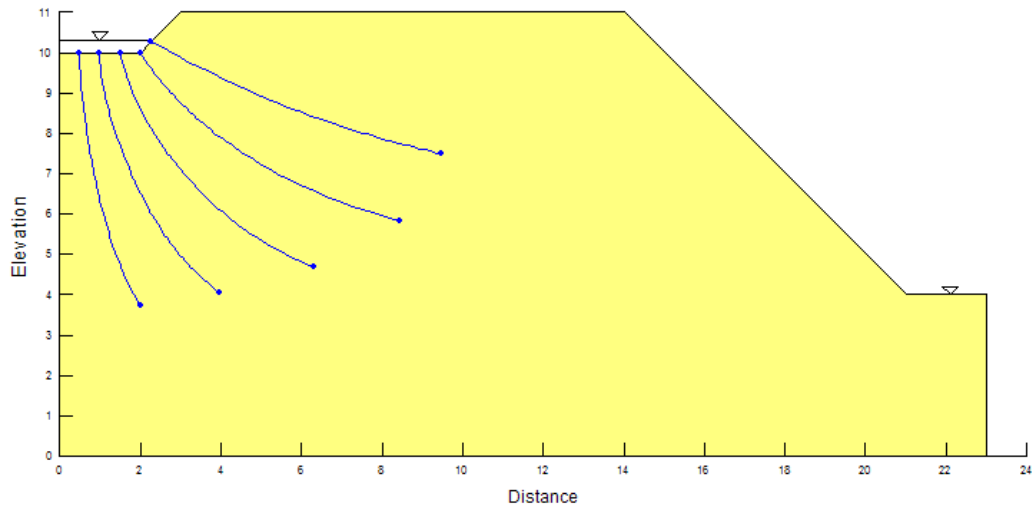
Grafica 16. Definición de intervalos de tiempo para análisis de rastreo de partículas.



El análisis de recorrido de partículas proporciona una buena estimación del tiempo de desplazamiento de una "partícula" de contaminante por el sistema, junto con el flujo.

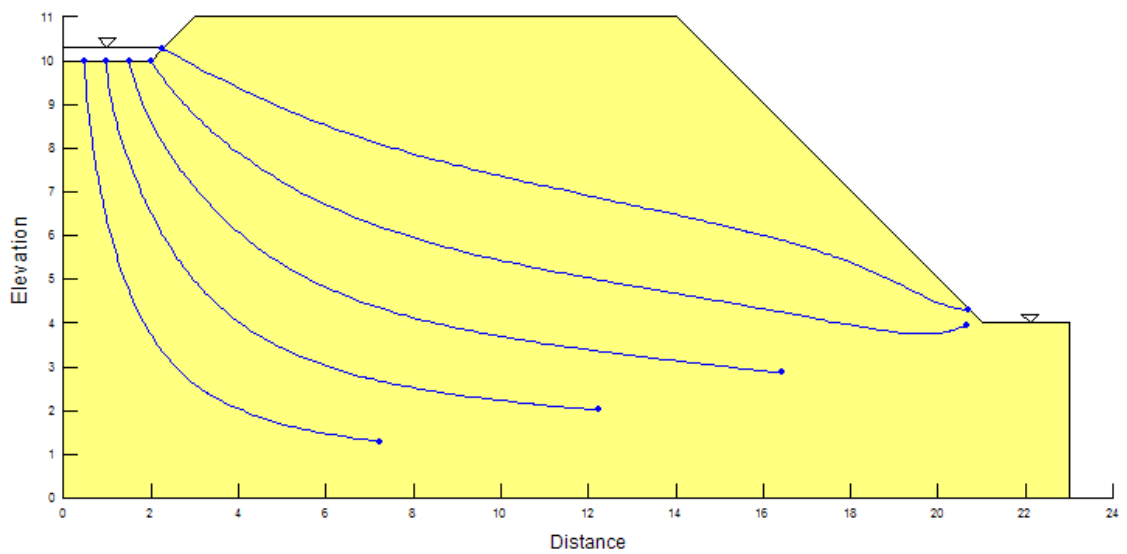
Rastreo de partículas a los 1000 días

Grafica 17. Grafica rastreo de partículas a los 1000 días.



Rastreo de partículas para que realicen toda la trayectoria, es decir desde el estanque contaminado hasta el punto de análisis.

Grafica 18. Grafica rastreo de partículas a los 2750 días.



La siguiente figura muestra los contornos de concentración al final del análisis considerando análisis de dispersión del contaminante.

Grafica 19. Grafica concentración final del contaminante al final del recorrido de las partículas.

