

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



INFORME DE TESIS

**“MODELO UNIDIMENSIONAL PARA TRANSPORTE DE
ELEMENTOS CONTAMINANTES EN DIFERENTES TIPOS DE
SUELOS”**

**PARA OPTAR:
TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTADO POR:

Bach. MAMANI CARIAPAZA, Iris Margoth

Bach. VARGAS VILLALVA, Gabriela Fernanda

TACNA – PERÚ

2019

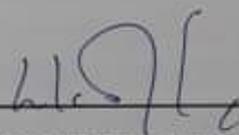
UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

Tesis

**“Modelo unidimensional para transporte de elementos contaminantes en
diferentes tipos de suelos”**

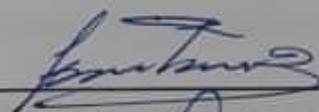
Tesis sustentada y aprobada el 13 de diciembre de 2019; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE:



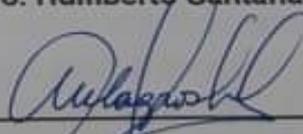
Dr. César Huanacuni Lupaca

SECRETARIO:



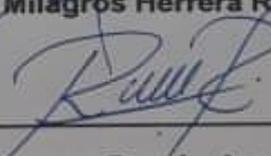
Mtro. Humberto Santana Soto

VOCAL:



Mtra. Milagros Herrera Rejas

ASESOR:



Ing. Carmen Román Arce

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Gabriela Fernanda Vargas Villalva e Iris Margoth Mamani Cariapaza en calidad de Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificadas con DNI 70613476 y 48376987.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor (a) de la tesis titulada:

“Modelo unidimensional para transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelos”.

la misma que presento para optar el:

Título Profesional de Ingeniero Ambiental

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.

3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.

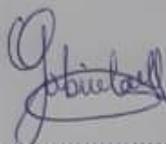
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

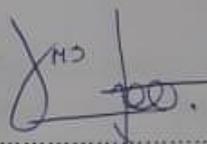
Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 13 de diciembre del 2019



.....
Gabriela Fernanda Vargas Villaiva
DNI. 70613476



.....
Iris Margoth Mamani Cariapaza
DNI. 48376987

DEDICATORIA

A nuestros padres, amigos y a nuestra adorable Asesora, su paciencia y apoyo fue infinita, le estaremos agradecidas por siempre.

*“La ciencia es como la tierra, solo se puede poseer un poco de ella”
Voltaire (1694 – 1778, escritor y pensador francés)*

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

A nuestros padres, amigos y docentes, quienes nos dieron su confianza y fueron parte de la construcción de lo que somos.

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	II
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCION	14
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1. Descripción del problema.....	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.3. Justificación e importancia de la investigación	17
1.4. Objetivos	17
1.5. Hipótesis	18
1.5.1. Hipótesis General	18
1.5.2. Hipótesis Específica	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes	19
2.2. Bases teóricas	24
2.2.1. Formación del suelo	24
2.2.2. Propiedades del suelo	25
2.2.3. Transporte de contaminantes	35
2.2.4. Modelamiento	39
2.3. Defición de términos.....	47
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	49
3.1. Tipo y diseño de la investigación	49

3.2.	Población y/o muestra de estudio	49
3.3.	Operacionalización de variables	49
3.4.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	50
3.4.1.	Propiedades físicas	50
3.4.2.	Propiedades químicas	50
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		72
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....		101
RECOMENDACIONES.....		106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107
ANEXOS		113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores índices de plasticidad	28
Tabla 2. Clasificación funcional de los poros en el suelo	30
Tabla 3. Relación entre la densidad aparente y la porosidad	31
Tabla 4. Relación densidad aparente y porosidad con la textura	32
Tabla 5. Valores típicos de permeabilidad por tipo de suelo	33
Tabla 6. Operacionalización de variables.....	49
Tabla 7. Volúmenes mínimos del hoyo de ensayo basado en el tamaño máximo de la partícula	60
Tabla 8. Color de los estratos 1, 2 y 3	72
Tabla 9. Textura de los estratos 1, 2 y 3	73
Tabla 10. Plasticidad del suelo arcilloso.....	75
Tabla 11. Límite líquido y límite plástico suelo arcilloso	75
Tabla 12. Plasticidad suelo arenoso.....	76
Tabla 13. Límite líquido y límite plástico suelo arenoso.....	76
Tabla 14. Plasticidad estrato suelo gravoso.....	77
Tabla 15. Límite líquido y límite plástico suelo gravoso.....	77
Tabla 16. Porosidad suelo arcilloso.....	78
Tabla 17. Porosidad suelos arenoso	78
Tabla 18. Porosidad suelo gravoso	79
Tabla 19. Permeabilidad estrato 1 – Limo Arcilloso	80
Tabla 20. Permeabilidad estrato 2 - Arenoso	81
Tabla 21. Permeabilidad estrato 3 – Gravoso.....	82
Tabla 22. Densidad aparente.....	83
Tabla 23. Infiltración suelo arcilloso.....	84
Tabla 24. Infiltración suelo arenoso.....	85
Tabla 25. Infiltración suelo gravoso	85
Tabla 26. pH.....	86
Tabla 27. Conductividad eléctrica.....	86
Tabla 28. Conductividad eléctrica según teoría	87
Tabla 29. Resumen de resultados, parámetros físicos y químicos	88
Tabla 30. Geometría de la región de flujo.	89
Tabla 31. Parámetros del contaminante.....	91
Tabla 32. Información de partículas basado en la distancia recorrida (m).....	95
Tabla 33. Parámetros del contaminante.....	97
Tabla 34. Información de partículas basado en la distancia recorrida (m).....	99
Tabla 35. Parámetros del contaminante.....	100

Tabla 36. Información de partículas basado en la distancia recorrida (m).....	102
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales Procesos en la Formación de Suelos.	24
Figura 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.	26
Figura 3. Disposición de Partículas para Distintas Estructuras de Suelo.....	27
Figura 4. Gráfico de Plasticidad.....	29
Figura 5. Permémetro de suelos.	33
Figura 6. Tortuosidad del recorrido.....	34
Figura 7. Subdivisiones en la Zona no Saturada.	36
Figura 8. Transporte y Distribución de Compuestos Químicos Orgánicos (Hidrocarburos Alifáticos Halogenados) a través del Flujo en Medio Poroso.	37
Figura 9. Dispersión y Ecuaciones.	38
Figura 10. Relación entre Adsorción y Concentración.....	43
Figura 11. Relación entre D^* y Contenido de Agua	45
Figura 12. Procedimiento Toma de Muestras.	51
Figura 13. Tabla de Munsell.	53
Figura 14. Procedimiento Determinación de Color.	54
Figura 15. Curva de distribución granulométrica.....	57
Figura 18. Procedimiento para Determinar Textura.	59
Figura 19. Cono de Arena para Determinar Densidad in Situ	60
Figura 20. Procedimiento para Determinar Densidad in Situ.....	63
Figura 21. Procedimiento para Determinar Humedad.	65
Figura 22. Procedimiento para Determinar Permeabilidad.	66
Figura 23. Diseño de Permeámetro.....	67
Figura 24. Procedimiento para Determinar Infiltración.....	68
Figura 25. Diseño de Columnas Experimentales.	69
Figura 26. Procedimiento para Determinar pH.....	70
Figura 27. Procedimiento para determinar C.E.....	71
Figura 28. A.....	90
Figura 29. B Distribución de flujo obtenido con SEEP/W.....	91
Figura 30. Dispersión del contaminante en el Día 0	92
Figura 31. Dispersión del contaminante en el Día 36	92
Figura 32. Dispersión del contaminante en el día 73	92
Figura 33. Dispersión del contaminante en el día 146	93
Figura 34. Dispersión del contaminante en el día 219	93
Figura 35. Dispersión del contaminante en el día 292	93

Figura 36. Dispersión del contaminante en el día 365	94
Figura 37. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 73	94
Figura 38. Análisis de la trayectoria de la partícula en el día 36	94
Figura 39. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 109	95
Figura 40. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 365	95
Figura 41. Relación entre Profundidad (m) y Concentración (g/m ³) en un período de 365 días	96
Figura 42. Distribución de flujo obtenido con SEEP/	96
Figura 43. Dispersión del contaminante en el día 9	97
Figura 44. Dispersión del contaminante en el día 18	97
Figura 45. Dispersión del contaminante en el día 27	97
Figura 46. Dispersión del contaminante en el día 90	97
Figura 47. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 9	98
Figura 48. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 18	98
Figura 49. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 27	98
Figura 50. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 29	98
Figura 51. Relación entre Distancia (m) y Concentración (g/m ³) en un periodo de 90 días.	99
Figura 52. Distribución de flujo obtenido con SEEP/W	100
Figura 53. Dispersión del contaminante después de 14,4 hrs.....	100
Figura 54. Dispersión del contaminante pasado las 1,2 días	100
Figura 55. Dispersión del contaminante después de 2,4 días	101
Figura 56. Dispersión del contaminante después de 3 días	101
Figura 57. Análisis de trayectoria de la partícula pasado las 7,2 hrs	101
Figura 58. Análisis de trayectoria de la partícula pasado las 14,4 hrs	101
Figura 59. Análisis de trayectoria de la partícula pasando 1,2 días.	102
Figura 60. Análisis de trayectoria de la partícula pasando 21,6 hrs.	102
Figura 61. Relación entre Distancia (m) y Concentración (g/m ³) en un periodo de 3 días	103

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Límites de Attenberg	27
Ecuación 3. Porosidad	30
Ecuación 4. Gradiente hidráulico	34
Ecuación 5. Caudal	34
Ecuación 6. Velocidad de Darcy	34
Ecuación 7. Flujo volumétrico	37
Ecuación 8. Valor de la descarga	38
Ecuación 9. Ecuación de velocidad lineal media	41
Ecuación 10. Velocidad de Darcy	41
Ecuación 11. Velocidad lineal promedio del fluido del poro	41
Ecuación 12. Velocidad lineal	41
Ecuación 13. Dirección flujo de masa	43
Ecuación 14. Concentración elemento C	44
Ecuación 15. Proyección de incremento de tiempo	47
Ecuación 16. Coeficiente de uniformidad	57
Ecuación 17. Coeficiente de curvatura	57
Ecuación 18. Volumen del orificio	61
Ecuación 19. Masa seca de material extraído	61
Ecuación 20. Densidad húmeda	61

RESUMEN

La presente investigación tiene el objetivo de desarrollar un modelamiento unidimensional utilizando las herramientas del software Geostudio mediante las plataformas de SEEP/W y CTRAN/W para simular el transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelos como arenosos, limo - arcillosos y gravosos. Para alcanzar el objetivo se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas (Color, Textura, Límites de Attenberg, Porosidad, Humedad, Densidad aparente y densidad in situ), químicas (pH y Conductividad Eléctrica) e hidráulicas con los parámetros de permeabilidad e infiltración para cada tipo de suelo; para determinar la capacidad de infiltración se construyeron columnas experimentales (probetas de 1,20 m), para el caso de la permeabilidad se realizó un permeámetro. Luego de generar los resultados se logró modelar un escenario parecido a la zona de estudio con las características del suelo propio en la que la dispersión del contaminante para el Estrato 1 (suelos limo-arcilloso) es mínima, el escenario para el Estrato 2 (suelo arenoso) demuestra una dispersión media y el Estrato 3 (suelo gravoso) posee una capacidad de dispersión muy alta, la concentración del contaminante fue reduciendo conforme avanzaba de acuerdo a la propiedad de cada suelo. Basado en la experiencia de este estudio se recomienda identificar acuíferos, cuerpos de agua y zonas con potencial de ser contaminados y desarrollar un estudio para determinar el tiempo y en qué medida puede ser vulnerado para tomar las medidas necesarias.

Palabras claves: Modelamiento unidimensional, columna experimental, elementos contaminantes, tipos de suelos, arcilla, arena y grava

ABSTRACT

This research aims to develop one-dimensional modeling using Geostudio software tools using the SEEP/W and CTRAN/W platforms to simulate the transport of contaminants in different soil types such as sandy, silt - clay and heavy. To achieve the objective, laboratory tests were carried out to determine the physical properties (Color, Texture, Attenberg Limits, Porosity, Humidity, Apparent Density and Density in situ), chemical (pH and Electrical Conductivity) and hydraulic properties with the permeability and infiltration parameters for each soil type; experimental columns (1,20 m probes) were constructed to determine the infiltration capacity, permeameter was performed for permeability. After generating the results, a scenario similar to the study area was modeled with the characteristics of its own soil in which the dispersion of the contaminant for stratum 1 (limo-clay soils) is minimal, the scenario for stratum 2 (sandy soil) demonstrates an average dispersion and Stratum 3 (burdensome soil) has a very high dispersion capacity, the concentration of the pollutant was reducing as it progressed according to the property. Based on the experience of this study it is recommended to identify aquifers, water bodies and areas with the potential to be contaminated and to develop a study to determine the time and to what extent it may be violated to take the necessary measures.

Key Words: one-dimensional modeling, experimental column, pollutants, soil types, clay, sand and gravel.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento industrial y el desarrollo y prioridad de algunas actividades, son factores que amenazan la integridad de las características naturales del suelo, agua y aire, con el tiempo la acumulación de los contaminantes en el suelo y sedimentos es inevitable, todas las actividades en alguna etapa entran en contacto directo con el suelo, afectándola de manera irreparable ocasionando graves problemas ambientales.

El vertimiento indiscriminado de materiales peligrosos directo a cuerpos de agua fundamentales para la región de Tacna ha incrementado el número de sitios contaminados los cuales no han sido suficientemente caracterizados para identificar el riesgo que representan para los ecosistemas y la población humana.

Los suelos son considerados descontaminantes naturales, debido a su heterogeneidad, tanto por su composición como por la diversidad de procesos que ocurren, ya que sus propiedades físicas, químicas y biológicas hacen posible que funcione como una barrera protectora de otros medios, especialmente de las aguas superficiales y subterráneas. Nuestra región cuenta con distintos tipos de suelo, diferentes comportamientos y propiedades los cuales no han sido cuantificados con precisión y no permite la medición del impacto real generado por el vertimiento de algunas sustancias en diferentes cuerpos de agua lo que automáticamente afecta la calidad del suelo; cuando un contaminante entra en contacto con el suelo se producen varios procesos complejos con la probabilidad de existir algún tipo de interacción con el medio geológico y el agua.

La predicción del comportamiento de los contaminantes líquidos en el suelo se hace necesaria para anticipar y por ende minimizar los impactos adversos fuera del punto de aplicación, entonces podemos simular y comprender lo que sucede con un contaminante en el suelo utilizando información real con un modelo unidimensional, sin duda la escasez de información sobre el transporte de contaminantes hace que esta investigación sea fundamental; el comportamientos real y los factores influyentes hacen de este proceso complejo, es por ellos que para lograr establecer elementos de análisis es preciso simplificar el modelo del sistema físico y describir el comportamiento y sus interacciones basado en los parámetros estudiados de la manera más imple posible.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El crecimiento demográfico y el desarrollo de nuevas industrias por el hombre han generado residuos en grandes proporciones que muchas veces no son dispuestos de forma adecuada y comúnmente terminan siendo parte de lechos de río o enterrados, la ejecución de actividades también produce impactos generando contaminación en un ecosistema y el suelo es uno de los mayores receptores por lo que ésta se transforma en una problemática de fundamental importancia. La disposición de contaminantes líquidos provoca un daño severo al ambiente ya que involucra la integridad de los recursos naturales, eventualmente tienen efectos negativos en la salud de las personas porque el contacto directo es inevitable y existen medios que lo hacen frecuente (Sharma y Reddy, 2004).

La preocupación que surge al analizar lo que involucra el desarrollo y por tanto la generación de contaminantes líquidos y que son dispuestos o tiene contacto con el suelo, es la posible migración o transporte del contaminante a través del subsuelo hacia la zona vadosa, pudiendo posiblemente alcanzar la napa freática y vulnerar la calidad de agua, aunque las situaciones serían de distinta forma de acuerdo a las distintas características de tipos de suelo.

La principal amenaza son los materiales químicamente peligrosos que se encuentran en los residuos sólidos y líquidos que se depositan y que pueden ser movilizados a través de procesos de infiltración en forma de lixiviados. Entonces, resulta de bastante interés evaluar no solo la capacidad de filtración de líquidos o lixiviados sino también analizar el transporte de contaminantes dentro de la capa drenante (Singhal y Islam, 2008).

Francisca et al. (1998) refiere que los tratamientos para suelos contaminados son ocasionalmente difíciles de llevar a cabo, sin embargo, el usar los recursos locales reduce casi en su totalidad el costo, por eso se propone el siguiente estudio y determinar las características del suelo local como medio de transporte de contaminantes y así identificar el mejor tratamiento de remediación.

La predicción del comportamiento de los contaminantes es necesaria para anticipar y minimizar los impactos generados fuera del punto de aplicación (Persicani, 1995).

La atenuación natural como una forma de tratamiento o control y manejo de lixiviados ha sido utilizada en diferentes partes del mundo. La atenuación natural se refiere a la autopurificación de un suelo, comprende al potencial de reducción de la concentración de los contaminantes presentes en el líquido lixiviado.

El proceso de atenuación natural juega un rol muy importante en la protección ambiental de los rellenos sanitarios, el cual permitirá dejar de lado las protecciones o impermeabilizaciones de fondo dejando al suelo que degrade de forma natural los elementos químicos y biológicos presentes en el líquido lixiviado.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Formulación general del problema

¿Cómo determinar el modelo unidimensional para el transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelos?

1.2.2. Formulación específica del problema

¿Cómo determinar las principales características del suelo?

¿Cuál es modelo experimental para reproducir el comportamiento de los elementos contaminantes en diferentes tipos de suelo?

¿Cómo identificar las principales variables de flujo y transporte de elementos contaminantes en suelos saturados?

1.3. Justificación e importancia de la Investigación

El suelo es un recurso natural el cual difícilmente se renueva y dentro del mismo ocurren ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, convirtiéndolo en un sistema dinámico. Es un componente esencial del ambiente y altamente vulnerable; tiene diferentes usos, entre ellos la agricultura, ganadería, extracción de minerales y de materiales, y lo hace un proveedor de importantes funciones ya que sirve de soporte para los diferentes procesos en el ambiente y se encuentra en contacto directo con otros elementos de distintas características (líquidas, sólidas y gaseosas).

Actualmente las actividades productivas usan de manera intensiva este recurso, situación que está conduciendo a una degradación creciente del suelo, así como a una pérdida irrecuperable del mismo causada por elementos contaminantes que se presentan en forma sólida, gaseosa o líquida, siendo esta última la más frecuente. Una vez el contaminante entra en contacto con el suelo puede ser degradado por los organismos presentes, adsorbido por los coloides o transportarse por los espacios porosos del suelo hasta los mantos acuíferos, afectando el recurso hídrico.

El flujo y transporte de contaminantes en el suelo es un proceso complejo, ya que intervienen distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos, a partir de ello se hace importante la generación de un modelo que permite acercarnos a una situación en caso un elemento contaminante en estado líquido o semi-líquido entra en contacto con el suelo para poder determinar el proceso de atenuación natural.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Generar un modelo unidimensional para el transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelo.

1.4.2. Objetivos específicos

Analizar las propiedades físicas, y químicas e hidráulicas de los diferentes tipos de suelos.

Generar de forma experimental el transporte de contaminantes en diferentes tipos de suelos utilizando columnas de experimentación.

Identificar las principales variables de flujo y transporte para elementos contaminantes mediante un análisis acoplado con las plataformas SEEP/W y CTRAN/W del código Geostudio fundamentado en el método de elementos finitos para suelos saturados

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El modelo unidimensional permite reconocer el comportamiento de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelo.

1.5.2. Hipótesis Específica

Determinar propiedades físicas, químicas e hidráulicas en los diferentes tipos de suelos para analizar el transporte de contaminantes.

Usar columnas de forma experimental en diferentes tipos de suelos para ver el transporte de contaminantes.

Hacer uso de diferentes escenarios para determinar el transporte de contaminantes en zonas saturadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

De acuerdo a la investigación desarrollada por Morales et al, (2013) consideran que el transporte de contaminante llega a una profundidad máxima de 80 cm que corresponde a la Zona No saturada del suelo, la evaluación de los procesos de biorremediación se analizó mediante columnas que permitió el control de las variables que influyen en la eficiencia de degradación de hidrocarburos (diésel). Las muestras fueron contaminadas con diésel de petróleo en laboratorio por el método de aspersión y una vez dispuestas se procede con el análisis fisicoquímico (textura, humedad, gravimétrica, densidad real y pH), cada columna será evaluada de acuerdo al tratamiento que lo caracteriza (atenuación natural, bioventing, bioaumentación-bioventing y solo bioaumentación) con los sistemas completos se procedió a inyectar agua a 1 L/s como simulación de las precipitaciones de la zona. El tiempo de evaluación fue de 4 meses. Para esta evaluación el método de bioventing fue la de mejor resultados en el proceso de biorremediación mejorando las condiciones de suelo en la parte superior de la columna favorecido por la textura arenosa del suelo.

Márquez (2009) refiere en su estudio sobre la atenuación natural de atrazina en perfiles de suelo de Guasave que los pesticidas y plaguicidas como el Atrazina los cuales son arrastrados tanto por corriente de aire como de agua subterránea por infiltración, ha afectado la salud de la población aledaña. Se escogieron tres puntos de monitoreo para evaluar el proceso de biorremediación por atenuación natural (adsorción y mineralización) y determinar el grado y proceso de contaminación para estimar el riesgo de alteración de la calidad de aguas subterráneas para determinar constantes de mineralización y adsorción de Atrazina los cuales resultaron ser todo lo contrario a la literatura, la reducción de la mineralización conforme aumenta la profundidad a través del perfil de suelo. Se llegó a la conclusión de que bajo condiciones controladas existe probabilidad alta de infiltración de atrazina ya que el volumen infiltrado era abundante excediendo las dos toneladas.

En la investigación de Rodríguez (2014) sobre el uso de solventes orgánicos en la extracción de diésel de un suelo contaminado, los análisis se desarrollaron en

un laboratorio química el cual contaba con suelos bajo condiciones controladas los cuales fueron parte de análisis físico químicos iniciando con el tamizado y posterior contaminación con diferentes concentraciones, la técnica experimental consistió en usar solventes que permitan disolver una sustancia, es decir separar los contaminantes de la muestra de suelo contaminada con tres repeticiones, los resultados no fueron los esperados ya que las propiedades particulares del suelo no fueron afectadas permaneciendo la misma clase textural (migajón-arcilloso).

El estudio denominado “Modelación matemática de contaminantes (metales pesados y pesticidas) en columnas de suelo, caso de estudio: Cochabamba-Bolivia” con el objetivo de desarrollar un modelamiento del proceso de transporte de elementos contaminantes como pesticidas y metales pesados en sistemas denominados “columnas” que representa los perfiles de suelo para la obtención de los parámetros que influyen en el transporte y migración para prevenir la contaminación ambiental. Se usó el programa de Hydrus-1d con los datos obtenidos de laboratorio que supera 0,97 en todos los casos, lo que facilita la estimación para determinar los tiempos de migración de los contaminantes y el riesgo que implica para los acuíferos de influencia directa (Villazón, 2015).

Se realizó una investigación titulada Comparación de técnicas de saneamiento en un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo de Tabasco cuyo objetivo fue seleccionar una técnica de remediación apropiada tanto biológicamente como fisicoquímicamente para el tratamiento de un suelo contaminado con petróleo crudo. Dentro de los métodos biológicos como la atenuación natural, y la biorremediación no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, pero se logró identificar el tiempo estimado para alcanzar la concentración del LMP para un suelo agrícola siendo 14 meses para lograr la atenuación natural, y de 16 meses para la biorremediación con nutrientes (Cardoso, 2006).

Urizar y Arriaga (2015) en su estudio evalúan tres métodos de biorremediación, uno de atenuación natural con estiércol bovino y el resto con estiércol de uso comercial para lograr la biorremediación de suelos impactados con diésel y aceite haciendo una comparación del tiempo y la adaptación a las condiciones de biorremediación de suelos impactados con diésel, y determina el método con mayor efectividad y adaptación a las condiciones del lugar. Finalmente concluyen que los tres métodos evaluados presentaron reducción en la concentración de hidrocarburos totales de petróleo. Esto demuestra la efectividad

que demuestra la biorremediación evitando métodos químicos que utilizan componentes contaminantes para el suelo.

Las actividades antrópicas como la ganadería, la minería y la extracción de petróleo generan impactos negativos al ambiente, en este caso al recurso Suelo, ocasionando el transporte de contaminantes en el medio. Es por ello que se realizó un estudio en Colombia con la finalidad de determinar el tiempo de viaje del derivado del petróleo, el aceite, suponiendo un posible derrame, utilizando columnas acrílicas con cuatro muestreadores y una bomba multipunto. El resultado del estudio arrojó que los valores de dispersividad eran de $1,27 \text{ m}^2/\text{día}$ en un medio con una gradación entre el tamiz N°4 y N°50, siendo el tiempo de viaje estimado de 8,8 días. En un medio con gradación de N° 50 a N° 200, el valor de las dispersividad fue de $0,7411 \text{ m}^2/\text{día}$ y el tiempo de viaje estimado fue de 8,9 días. El valor de dispersividad logra comprobar que a medida que el tamaño del grano disminuye, también disminuye la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio y también el tiempo de recorrido (Serrano-Guzmán et al., 2012).

El suelo en un relleno sanitario es usado como barrera para la contención de líquidos residuales y lixiviados. Una de las propuestas para una adecuada contención de líquidos y lixiviados ha sido optimizar las compactaciones agregando materiales arcillosos. Francisca (2013) propone considerar el aporte de los mecanismos acoplados que incluyen aspectos hidráulicos, mecánicos, químicos y biológicos. En conclusión, es necesaria una barrera compactada en el flujo de contaminantes, como mecanismo de reacción, difusión y advección; y la estimulación microbiana nativa es una alternativa importante en la construcción de barreras de suelo compactado en un relleno sanitario.

En la investigación de Mafla (2007) se han desarrollado varios tipos de sistemas de impermeabilización en rellenos sanitarios, entre los cuales se encuentran las barreras de contención los cuales muestran gran eficiencia a la hora de disminuir la migración de diferentes contaminantes hacia las aguas subterráneas. Y concluye que, en rellenos sanitarios de pequeñas poblaciones, el proceso de consumo de la materia orgánica constituye un proceso de atenuación natural de contaminantes que permite considerar la eliminación de membranas sintéticas para el fondo, sin producir la contaminación descontrolada del suelo.

La contaminación del suelo y aguas subterráneas por hidrocarburos del petróleo (gasolina y diésel) los cuales mayormente se manifiestan mediante vertidos o derrames se han ido incrementando, es por eso que se realizaron estudios para

conocer el compartimiento dinámico y la biodegradación de los contaminantes del suelo, realizando dos ensayos: 1) Suelo con mezcla de gasolina-etanol y 2) suelo con mezcla de diésel-biodiésel. En el estudio que se cita se calculó el tiempo de llegada a un acuífero y su remediación en caso sea necesaria. Los resultados obtenidos en la biodegradación de la gasolina permiten determinar que el etanol retrasa la degradación de la gasolina. (Pérez et al., 2015).

En la investigación sobre Atenuación Natural de contaminantes producidos en rellenos sanitarios según González (2011) al analizar el efecto de la atenuación natural de los líquidos percolados generados por un relleno sanitario cita que luego de incorporarse al suelo los líquidos percolados son atenuados por procesos microbiológicos, los que hacen desaparecer completamente a la materia orgánica, indicando que en determinadas situaciones es posible remover restricciones del diseño para un relleno sanitario, por ejemplo la impermeabilización de fondo, brindando así una alternativa económicamente factible al aplicar atenuación natural.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación realizada por Buendía (2012) propone biorremediar suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol, aplicando el modelo estadístico de Diseño Experimental Completamente al Azar (DCA) el cual requirió 36 macetas experimentales a las que se fue añadiendo aserrín y estiércol como sustratos a un tipo de cultivo en específico (maíz) controlados por dos meses, la concentración de hidrocarburos fue disminuyendo en un 22,5% y fue la que tuvo mayor efectividad al adicionar vacaza; la concentración inicial de hidrocarburos fue de 21,81 g de TPH/kg de suelo y finalizó con 16,28 g de TPH/kg de suelo, lo que representa una reducción de 25% siendo este último el tratamiento más recomendable de usar

Bazán (2009) desarrolla el estudio denominado “Mitigación y biorremediación de suelos contaminados por el derrame de combustibles Diesel 2 en la Quebrada del Toro, Camaná, 2009”, durante muchos años el derrame de combustibles ha sido un problema ignorado pero constante y que trajo consigo efectos negativos para el medio ambiente y específicamente la calidad de suelo y acuíferos. En este estudio se aprovechó microorganismos eficientes (EM) que son exógenos provenientes de Japón mediante una simbiosis con otros organismos en 3 etapas, la primera para la activación de microorganismos (aquellos que se encuentran en latencia) 96 horas antes de su aplicación, la segunda de aplicación de microorganismos y aireación de la muestra de suelo contaminada, y por último la etapa de uso final de material

contaminado en la que el mismo pierde todas las características contaminantes del hidrocarburo y la cual se opta por disponer en parques y jardines para aprovechar su alto contenido de nutrientes por la presencia de microorganismos benéficos para el enriquecimiento del suelo.

En un estudio según Montoya (2013) sobre modelamiento de transporte de contaminantes de botadero mineros y depósitos de relaves hace énfasis en las actividades mineras y su impacto a través del tiempo mediante la gran cantidad de pasivos ambientales mineros (PAM) que existen en nuestro país. Para contener la pluma de contaminante se procede con el bombeo permanente, el éxito de la técnica de bombeo depende de las características hidrogeológicas del acuífero y el tipo de contaminante presente. Mediante un flujograma que requiere de la definición de los propósitos para la construcción de modelo conceptual teniendo de base la hipótesis fundamentada sobre información disponible y aunque en muchos casos la simulación es poco cercana a la realidad esta sirve de buen inicio para una estimación y su proceso.

Las actividades mineras traen en consecuencia problemas de contaminación en el suelo, agua y otros recursos, por tal motivo en la investigación que se cita a continuación propone analizar la hidrogeología de los acuíferos implicados en la zona proyectada para la Minera, y evalúa los probables problemas a las que estaría sujeta antes y después de la actividad minera. Se toma en cuenta el análisis de flujo de las aguas y el transporte de contaminantes con modelo de simulación usando el software Processing ModFlow. Uno de los parámetros es el balance hídrico, asociándolo a los modelos de transporte de contaminantes. El resultado será la respuesta del acuífero frente a los focos de contaminación. En conclusión, la simulación de las aguas subterráneas usando el software ModFlow permite predecir la aparición y desaparición de agua superficial en los ríos. Por lo tanto, es una herramienta para los estudios de modos de explotación, defensa y gestión del agua en una minera (Palacios, 2006).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Formación del suelo

La formación del suelo es básicamente por erosión o descomposición de la roca madre, también influye los efectos de la presión, microorganismos y el viento; así también el suelo sufre cambios a nivel químico, color y forma (textura, volumen y porosidad). Existen procesos para la formación del suelo y en la siguiente figura se demuestra.

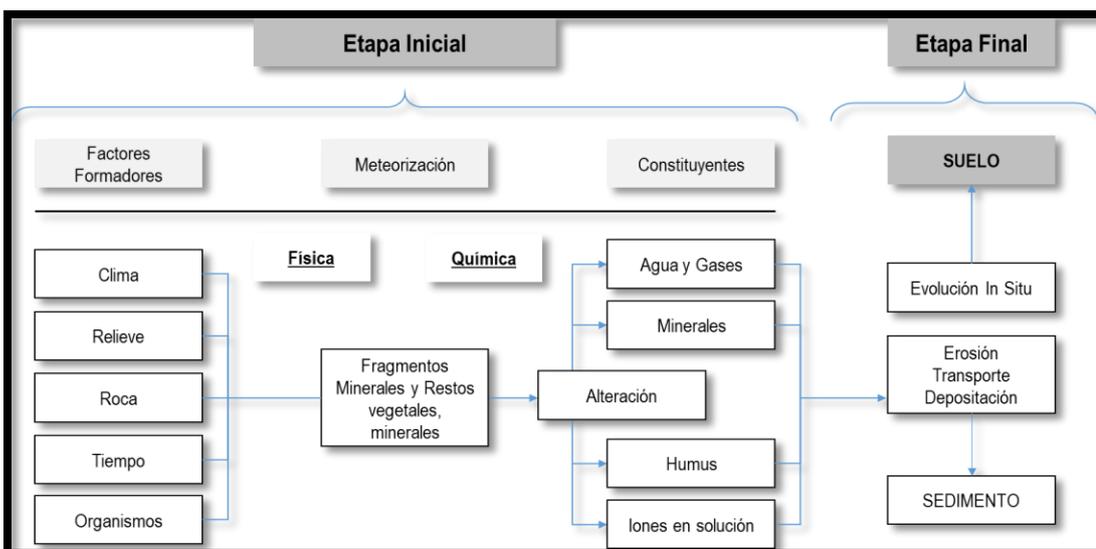


Figura 1. Principales Procesos en la Formación de Suelos. Elaboración propia

2.2.2. Perfil del suelo

Un perfil de suelo se puede disgregar en diferentes niveles u horizontes, los cuales están identificados con las siguientes letras: O1, O2, A, B, E, C, H Y R, entre otros. Cada horizonte tiene características específicas, usualmente el horizonte H es alto contenido en materia orgánica (menor a 20-30%).

Fases del suelo

El suelo se compone de 3 estados: sólido (50%), líquido (20-30%) y gaseoso (20-30%), estos porcentajes dependerán de las características propias de cada suelo y determinará la cantidad de espacio poroso.

- Fase Sólida

Especies minerales o inorgánicas o materia orgánica compacta.

- Fase Líquida del Suelo

Es una fase de material acuoso de variable cantidad y con la capacidad de disolver solutos produciendo reacciones químicas.

- Fase gaseosa

Corresponde a los espacios de aire o "atmósfera" del suelo, es una mezcla de gases de O₂, N₂, CO₂. La humedad relativa de esta fase puede llegar al 100%, esta proporciona las condiciones necesarias para la vida de muchos microorganismos.

2.2.3. Propiedades del suelo

Para el desarrollo de la caracterización del flujo en zonas no saturadas se presentan las características a considerar:

Propiedades físicas

a. Color

El color de suelo es una de las características más importantes del suelo, ya que permite identificar clases de suelos. Para determinar el color se emplea la tabla de colores Munsell.

b. Textura

Es la proporción de partículas de diferentes tamaños, como arena, limo o arcilla, para el reconocimiento es necesario desarrollar el procedimiento por granulometría que mediante una distribución estadística de los tamaños de partícula por colección define la composición de la muestra mediante tamizado. El tamizado es un método simple y económico, consiste en el pesado de material que pasa y retenido en una serie de mallas calibradas de acuerdo al tamaño que se requiere separar, estas se van superponiendo disminuyendo cada vez el tamaño de la malla y luego se pesa el material retenido en cada tamiz, con los valores se determina la plasticidad de la muestra de suelo. Uno de los sistemas usados para la clasificación de suelos para describir la textura y el tamaño de la partícula de un suelo es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (United Soil Classification System - USCS), se representa mediante un símbolo con dos letras que son determinados bajo las siguientes condiciones descritas en el cuadro.

SISTEMA CLASIFICACION USCS							
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4 > 0.73 (wl-20) ó >7	
	GP			≤ 6	<1 ó >3		
	GM		> 12				
	GC						
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4 > 0.73 (wl-20) y >7	
	SP			≤ 6	<1 ó >3		
	SM		> 12				
	SC						
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC. *** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm							
** Si $IP \geq 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$, usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.							
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.							
$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$				$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$			
FINOS (≥ 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. wl	Índice de Plasticidad * I_P				
limos inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 (w _L - 20) ó < 4				
	MH	> 50	< 0.73 (w _L - 20)				
arcillas inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 (w _L - 20) y > 7				
	CH	> 50	> 0.73 (w _L - 20)				
limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	** w _L seco al horno ≤ 75 % de w _L seco al aire				
	OH	> 50					
turba	P _t	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.					
Si $I_P \geq 0.73 (w_L - 20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $I_P > 0.73 (w_L - 20)$, usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH							
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente w _L seco al horno							
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML. Si w _L = 50; CL-CH ó ML-MH							

Figura 2. Casagrande, A. (1942). Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Recuperado de <https://www.academia.edu/38554976/CLASIFICACION%20UNIFICADA%20DE%20SUELOS>.

c. Plasticidad

Límites de Attenberg

También denominados como límites de plasticidad o de consistencia, son aplicados para determinar el comportamiento de suelos finos aunque puede variar

conforme pasa el tiempo, de acuerdo a estos principios el suelo puede estar solo en cuatro estados: Sólidos, semisólidos y finalmente líquidos, los ensayos necesarios para determinar los límites líquido y plástico se realizan en laboratorio y relacionados definen el índice de plasticidad (Lambe, 1999).

$$IP = L_l - L_p$$

Ecuación 1. Límites de Attenberg

IP: Índice de plasticidad

L_l : Límite Líquido

L_p : Límite plástico

- Límite líquido

Es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo moldeado (Osorio, 2010), a continuación, veremos un supuesto esquema de un suelo antes y después de moldearlo:

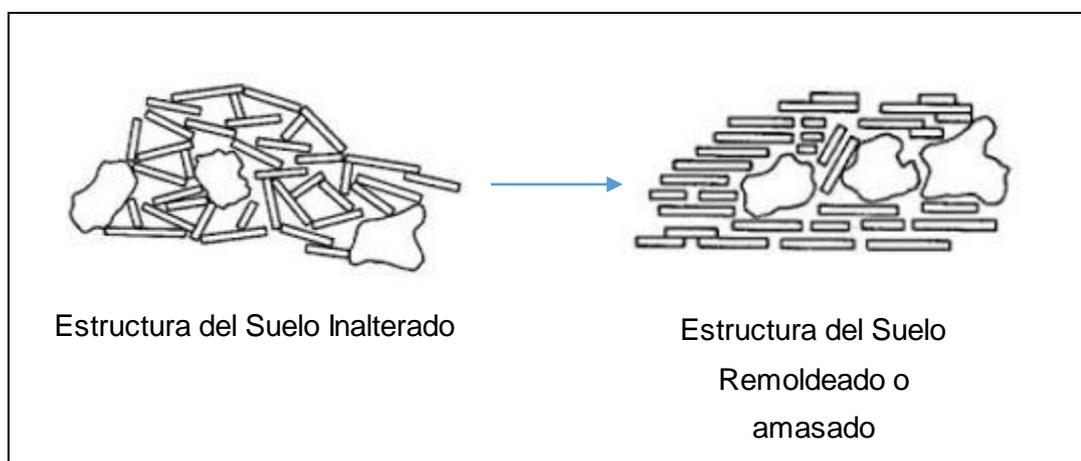


Figura 3. Disposición de Partículas para Distintas Estructuras de Suelo. Elaboración propia

Para la determinación es necesario un procedimiento normalizado con una mezcla de suelo y agua depositado en la cuchara de Casagrande o copa, se golpe consecutivamente contra la base de la máquina hasta que el surco en la muestra cierre en una longitud de 12,7 mm (1/2") y si el número de golpes para que se cierre el surco es de 25, la humedad del suelo corresponde al límite líquido. Para obtener resultados fiables se debe realizar al menos dos ensayos, ajustando el contenido de

agua de la muestra de forma aproximada, de manera que surco cierre con 15 y 25 golpes (ASTM).

- Límite plástico

Determina la plasticidad, pero es una propiedad poco permanente, dependerá del contenido de agua, ya que sin ella se podría determinar que la muestra de suelo posee plasticidad nula, entonces podemos definirlo como la humedad más baja con que pueden formarse cilindros de 3 mm de diámetro (Mendoza y Orosco, 2000).

- Índice de plasticidad

Los estudios de Attenberg demostraron que existe una relación entre el Límite plástico y líquido denominado Índice de plasticidad representada en una medida satisfactoria del grado de plasticidad del suelo.

Luego Casagrande en 1923, estudio la relación que existen entre el índice de plasticidad y el límite líquido para gran variedad de suelos, así que estableció que los suelos de un mismo depósito, generalmente no adoptan una posición caprichosa, sino que se agrupan de modo específico en líneas o bandas inclinadas respondiendo a sus características de plasticidad.

Más tarde Sowers en 1979 sugirió que el Límite líquido y plástico sirvieran de base en la clasificación de los suelos plásticos. Acorde al valor el índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1

Valores de Índices de Plasticidad

Índice de Plasticidad	Descripción
0 – 3	No plástico
3 – 15	Ligeramente plástico
15 – 30	Baja plasticidad
>30	Alta plasticidad

Nota. Recuperado de “Obtención del Límite Líquido y Límite Plástico usando el Penetrómetro de Cono de Caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico”, de Duarte,M, 2017.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla.

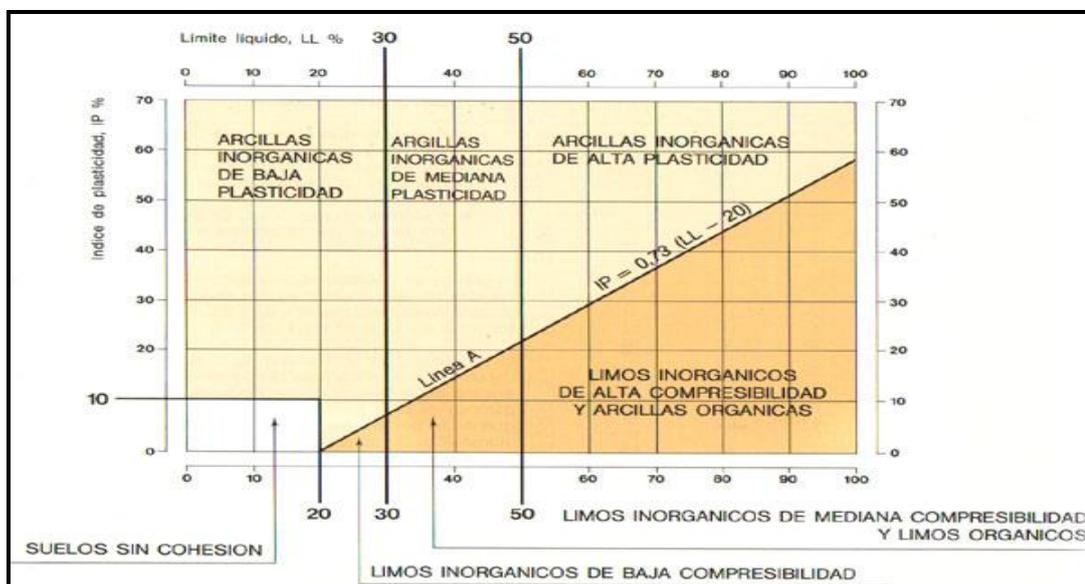


Figura 4. Casagrande, A. (1932). Gráfico de Plasticidad. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/120398>.

d. Estratigrafía

Es la sucesión vertical de rocas sedimentarias existentes en una determinada área, a través de la correlación entre columnas es posible la reconstrucción del perfil estratigráfico entre ellos, es posible a través de un corte vertical que describen y analizan la edafología con vistas al describirlo y clasificarlos. Este suele tener dos o tres metros de profundidad, si la roca madre o el material parental no aparecen antes.

Suele suceder que incurren en pasar a describir los horizontes constituyentes, pero puede darse el caso de que un suelo (o medio edáfico) no atesore más que uno o dos horizontes (a veces muy parecidos), entonces no todos los perfiles están constituidos por varios horizontes y dependerá del tiempo de conformación que tiene la muestra estratigráfica.

e. Porosidad

Se refiere al espacio entre los sólidos del volumen del suelo, donde pueden o no ubicarse componentes gaseosos o líquidos.

$$n = 1 - \frac{V_{\text{solidos}}}{V_{\text{total}}} = a + \theta$$

Ecuación 2. Porosidad

n: Porosidad del suelo

a: Porcentaje de gas de la muestra

 θ : Cantidad de agua en el suelo (volumétrica)

Tabla 2

Clasificación Funcional de los Poros en el Suelo

Tipo	Función	Diámetro cilindro equivalente (mm)
Poros de transmisión	Movimiento del aire y del drenaje en exceso de agua	>50
Poros de almacenamiento	Retención de agua contra gravedad	0,5 – 50
Poros residuales	Retención y dispersión de iones en solución	0,005 – 0,5
Espacios de enlace	Soporta fuerzas más importantes entre las partículas de suelo	< 0,005

Nota. Recuperado de “Estudio Practico, teórico y numérico de la atenuación natural en suelos naturales”, de Cifuentes, W. (2017).

f. Humedad

Es el agua almacenada o fluyente relativa en el suelo que ocupan los poros, afecta la formación del suelo, su estructura, estabilidad y erosión (Zamora, 2008). Según el contenido de humedad se podrá determinar la consistencia del suelo (seco, húmedo y mojado). Se puede expresar de varias maneras, relación de pes (gravimétrica), relación de volumen (volumétrica) o con relación al volumen de poros ocupados por agua (grado de saturación).

g. Densidad

Peso de una unidad de volumen de suelo que involucra el espacio poroso, refleja la porosidad de un suelo y el grado de compactación y facilidad de circulación de agua y aire. La densidad aparente en suelos no cultivados varia generalmente

entre 1 y 1,6 g/cm³, la variabilidad será posible por las diferencias en el volumen de poros a causa de la textura y la estructura, por ello que el espacio poroso total se incrementa a medida que la textura es más fina, resultando en la disminución de la densidad aparente (Thompson & Troeh, 2002). El tamaño de los poros para suelos arcillosos son extremadamente pequeñas comparado con el espacio en suelo de tipo arena pero existe mayor cantidad de poros en una muestra de textura arcillosa que en una arenosa, es importante no confundir el tamaño de poros con el volumen de poros; el tamaño de la partícula del suelo influye de manera considerable en la densidad aparente, las partículas de arcilla son planas y tienden a empaquetarse al azar, es decir en forma desordenada, y no como ladrillos perfectamente acomodados en una pared.

La densidad aparente aumenta de estructura migajosa o granular a primaria, columnar, laminar o masiva, porque de esta forma disminuye el volumen ocupado por la fase porosa.

La compactación disminuye el volumen de poros, la pérdida de materia orgánica por lo general es asociada a la reducción en el volumen total de poros, entonces puede reflejar el estado del espacio poroso, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3

Relación entre la Densidad Aparente y la Porosidad

Densidad aparente y porosidad										
Densidad Aparente (g/cm³)	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Poros (%)	63	59	56	52	48	45	41	37	33	30

Nota. Elaboración propia.

Es el peso por volumen del suelo, y se relaciona con la porosidad. Un suelo muy poroso será menos denso, un suelo poco poroso será más denso. La relación es que, a mayor cantidad de materia orgánica, más poroso y menos denso es el suelo.

Tabla 4

Relación Densidad Aparente y Porosidad con la Textura

Textura	Densidad aparente (mg/m³)	Porosidad (%)
Arenosa	1,65 (1,55 – 1,80)	38 (32-42)
Franca	1,40 (1,35 – 1,50)	47 (43-49)
Franco arcillosa	1,35 (1,30 – 1,40)	49 (47-51)
Arcillosa	1,25 (1,20 – 1,30)	53 (51-55)

Nota. Elaboración propia.

Propiedades químicas

h. pH

Los suelos pueden tener una reacción ácida o alcalina, y algunas veces neutral. La medida de la reacción química del suelo se expresa mediante su valor de pH. El valor de pH oscila de 0 a 14, y el pH = 7 es el que indica que el suelo tiene una reacción neutra. Los valores inferiores a 7 indican acidez y los superiores a 7, alcalinidad. Mientras más distante esté la medida del punto neutro, mayor será la acidez o la alcalinidad.

i. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica sirve para determinar la medida de la salinidad de un suelo, generalmente su unidad es en dS/m. La conductividad eléctrica depende mucho de la temperatura, y habitualmente esta temperatura es de 25°C (Gallart, 2017).

La circulación del agua en el suelo es el principal mecanismo de transferencia de contaminantes a las aguas superficiales y subterráneas; el comportamiento del agua en la estructura del suelo y las características fisicoquímicas del contaminante determina la velocidad y forma de infiltración en el suelo. En general, debido a la gran variabilidad de disposición en la zona, la modelación es una aproximación a la realidad que permite interpretar los resultados experimentales en base al flujo y el transporte de contaminantes en la columna de experimentación.

Propiedades hidráulicas

j. Permeabilidad

Se define como la capacidad de oposición que tiene el suelo al paso de un líquido, esto basado en las características y tipo de suelo y del líquido que intenta pasar, podemos apreciar en la siguiente tabla los valores característicos por tipo de suelo.

Tabla 5

Valores Típicos de Permeabilidad por Tipo de Suelos

Material	K (cm/s)
Grava limpia	>1
Arena Gruesa	1 a 10^{-2}
Mezcla de Arena	10^{-2} a 5×10^{-3}
Arena Fina	5×10^{-3} a 10^{-3}
Arena Limosa	2×10^{-4} a 10^{-4}
Limo	5×10^{-4} a 10^{-5}
Arcillas	$<10^{-6}$

Nota. Recuperado de "Hidrología Subterránea", de Vilaro, F. (1976).

Basado en los principios de Darcy es que se logra determinar la permeabilidad de distintos tipos de suelos, el estudio básicamente usa un permeámetro, un recipiente se sección constante por qué se hace circular agua conectado a unos de sus extremos un depósito elevado de nivel constante, se puede experimentar con distintos tipos de suelos y cambiando las variables.

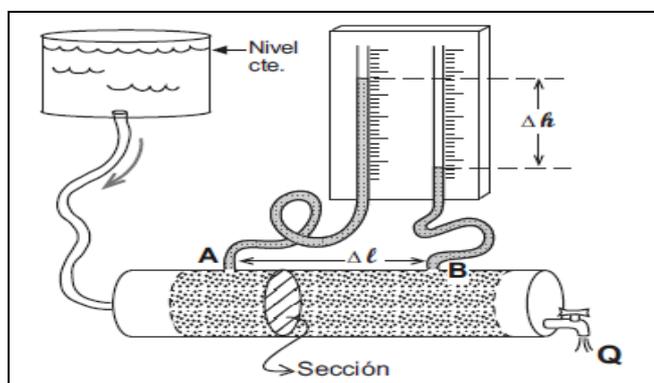


Figura 5. Angelone, S. (2006). Permeámetro de suelos. Recuperado de <https://www.fceia.unr.edu.ar>.

$$\text{Gradiente hidraulico} = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Ecuación 3. Gradiente hidráulico

Donde:

Q = Caudal

Δh = Diferencia potencial entre A y B

Δl = Distancia entre A y B

$$Q = K \cdot \text{sección} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

$$q = -K \cdot \frac{dh}{dl}$$

Ecuación 4. Caudal

Para determinar la velocidad real y velocidad Darcy

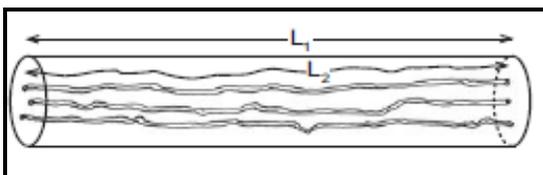


Figura 6. Sánchez, J. (2012). Tortuosidad del recorrido. Recuperado de <http://hidrologia.usal.es>.

$$\text{Velocidad de Darcy} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Sección Total}}$$

$$\text{Velocidad lineal media} = \frac{\text{Velocidad Darcy}}{me}$$

$$\text{Velocidad observada} = \frac{\text{Distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$= L1/\text{Tiempo}$$

Ecuación 5. Velocidad de Darcy

Donde:

me = Porosidad eficaz

k. Infiltración

Es el proceso en el cual el agua penetra la superficie del suelo llegando hasta sus capas inferiores. La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de

escurrimiento, detectando peligro de erosión. Para realizar la curva de infiltración se requiere tomar en cuenta los parámetros de velocidad de infiltración el cual se define como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior, infiltración acumulada la cual es considerada como la suma de los valores puntuales de infiltración, y velocidad de infiltración básica la cual está definida como la velocidad de infiltración del agua en el suelo en el momento en que la variación de esta con respecto al tiempo se vuelve lenta y constante (Pizarro et al.,2010). Este parámetro será comparado mediante una simulación utilizando el software Geostudio.

2.2.3. Transporte de contaminantes

El transporte de contaminantes guarda relación con la liberación de un contaminante mediante una fuente y la conexión con el cuerpo receptor. Este contaminante al ser liberado al medio, genera procesos de transporte, transformación y/o acumulación. El transporte de contaminantes y sus procesos permiten conocer y evaluar el grado de exposición del receptor, siendo fundamental para la realización de programas de monitoreo y control. (Martinez et al, 2005).

Un contaminante en el medio puede someterse a: (1) limitar su movilidad (volatilización o adsorción), (2) ayudar en su distribución del perfil del suelo y alcanzar el nivel freático mediante los procesos de disolución o dispersión, y (3) ser afectado por reacciones químicas por interactuar con componentes minerales o biológicos del suelo como la degradación química o biología y la precipitación (Márquez, 2009). Sánchez (2012) refiere que cuando un elemento contaminante ingresa al medio se pueden distinguir dos grupos de procesos:

- Ningún tipo de interacción con el medio geológico: Advección, difusión y dispersión; siendo contaminantes no reactivos.
- Interacciones entre las sustancias y el medio geológico: Adsorción, precipitación, y diversas reacciones químicas; siendo solutos reactivos.

Al momento de la migración de un compuesto en el medio se definen tres tipos de procesos: hidrodinámicos, físico-químicos y bióticos, siendo los mecanismos de transporte volatilización, advección, dispersión, difusión y sorción (Márquez, 2009). Los procesos de flujo, degradación y transporte se producen en tres zonas del suelo basado en el punto de contaminación o vertimiento de contaminantes

líquidos: 1) Zona radicular, 2) Zona no Saturada del suelo y 3) Zona de ascenso Capilar.

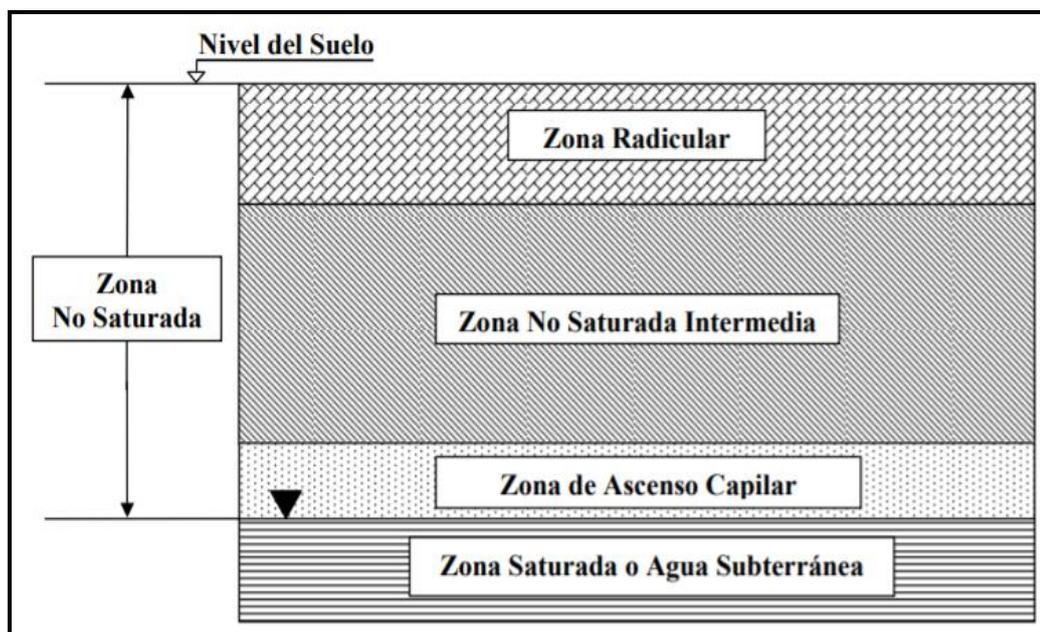


Figura 7. Henseleit, A. (2014). Subdivisiones en la Zona no Saturada. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl>.

Hay características que determinan el comportamiento de contaminantes que entran en contacto con el suelo, aquellas como el contenido de materia orgánica, permeabilidad, profundidad del nivel freático, porosidad y tipo de suelo. Es lógico reconocer que aquellos suelos que presentan granos gruesos permiten la migración rápida de los contaminantes y de forma contrario cuando los suelos presentan organismos vivos que influyen considerablemente en las propiedades físicas y químicas del suelo (Herández, 2010).

Iturbe (1997) refiere que un compuesto o contaminante migre a través del suelo, es necesario que intervengan tres tipos de procesos: Hidrodinámicos, físico-químicos y bióticos, es como se encuentran los mecanismos de transporte como la volatilización, advección, dispersión, difusión y sorción.



Figura 8. Transporte y Distribución de Compuestos Químicos Orgánicos (Hidrocarburos Alifáticos Halogenados) a través del Flujo en Medio Poroso. Elaboración propia

a. Advección

Es el movimiento de un soluto en dirección y velocidad del agua subterránea, en este caso la concentración no va disminuir conforme a la distancia o tiempo, situación que sucedería en caso de ser una zona saturada (Schwille, 1988). Algunos otros estudios indican que la porosidad es un factor relevante en este tipo de transporte porque un medio poroso puede variar considerablemente de otro que aparentemente tiene el mismo valor, pero sin considerar otras propiedades como: Permeabilidad, conductividad, dispersión, el mezclado ocasionado por la tortuosidad del medio y presión capilar, ya que en una zona no saturada el único mecanismo de migración del contaminante será a través de los espacios porosos del suelo (Silva, 2007). Los contaminantes pueden adsorberse con mayor facilidad en suelos de tamaño poroso parecido al tamaño de molécula del contaminante ya que existe mayor número de contacto entre la molécula y el adsorbente.

La Ley de Darcy es la base para entender el comportamiento del flujo volumétrico en un medio poroso ya que está relacionado y es proporcional a la conductividad hidráulica (k).

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

Ecuación 6. Flujo volumétrico

k : Conductividad hidráulica

i : Gradiente hidráulico

A : Área perpendicular de flujo

Al dividir el flujo volumétrico entre el Área (Q/A) se obtiene la velocidad de migración del líquido que se conoce como velocidad de Darcy (V_D) o valor de la descarga.

$$V_D = k \cdot i$$

Ecuación 7. Valor de la descarga

b. Dispersión y difusión

El escenario es el siguiente, tomemos un medio granular homogéneo y saturado, en el transporte intervienen dos mecanismos: dispersión mecánica y difusión molecular que se explica a continuación:

Dispersión mecánica: Es la variación de velocidad de flujo en el espacio debido a la geometría de los poros y sus interconexiones, esta geometría se presenta cuando existe un flujo de agua (Fernández, 2008).

El contaminante se propaga fuera de la línea de flujo del agua subterránea y puede ser en dirección longitudinal o transversal causando la disolución del contaminante en el medio que lo transporta esto se debe al mezclado mecánico durante el mecanismo de advección del fluido y por la difusión molecular debida a la energía cinética-térmica de las partículas del soluto (Freeze y Cherry, 1979).

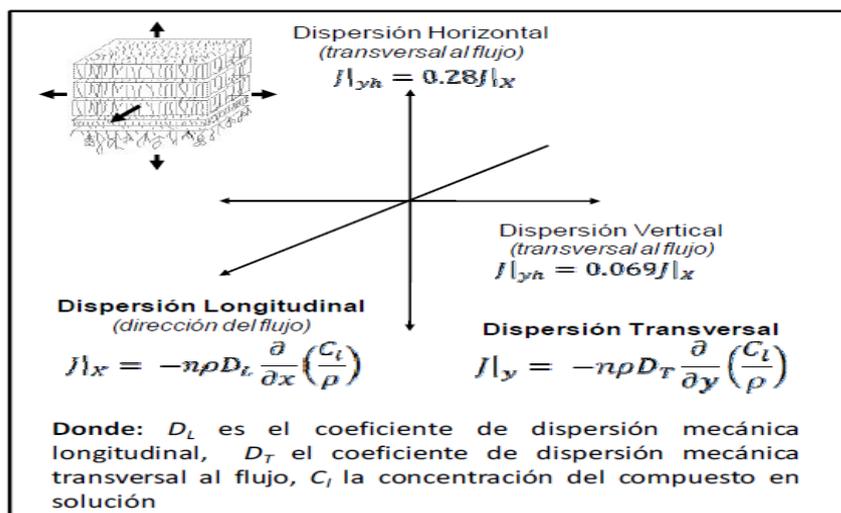


Figura 9. Cherry, J. (1979). Dispersión y Ecuaciones. Recuperado de <http://hidrologia.usal.es>.

La dispersión horizontal se considera para todo tipo de materiales y por lo general la dispersión transversal es mucho menor que la horizontal; las arenas presentan 0.069 veces la dispersión longitudinal.

2.2.4. Modelamiento

El modelamiento pretende simular los procesos de infiltración de la forma más apegada a la realidad y eso representa una dificultad inicial al identificar los parámetros necesarios para lograr una adecuada representación; en este estudio no se toma en cuenta la flora ni la presencia orgánica.

Con el objetivo de obtener algunas características sobre la humedad del suelo y la presencia de contaminantes, se identifica una zona de mayor impacto por contaminantes.

Para las mediciones de concentración de contaminantes en la zona de estudio se desarrollarán en condiciones de labranza cero, la toma de muestras será de forma simple aleatoria sistemática y en profundidad: a los 5, 40 y 90 cm con barreno manual (Reyna, 2014). Las características edafológicas fueron obtenidas de las muestras, así como las características físico-químicas:

Por la poca disponibilidad de información sobre estudios en campo para evaluar la validez de estos modelos propuestos es que se realiza la simulación en columnas de experimentación a fin de determinar el método y el daño ambiental que produce el derrame de algún contaminante.

Para el modelamiento se utiliza el software GEOSTUDIO versión 2012, El paquete de programas Geostudio 2012 está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

- Slope/W para cálculo de estabilidad de taludes, que será el usado en este texto.
- Seep/W para cálculo de redes de flujo.
- Sigma/W orientado al cálculo tenso deformacional.
- 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 contaminación de suelos
- Vadose usado en la modelización de acuíferos.

El uso de un programa de este estilo no sustituye al técnico, no toma las decisiones por este, sólo se limita a realizar cálculos que el técnico le indica, por lo que queda en manos del técnico:

- Selección de parámetros característicos del terreno y su posible variabilidad.
- Determinación de las acciones que actúan sobre el terreno y su concomitancia.
- Caracterizar las situaciones de proyecto

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

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

Enfocado al comportamiento del suelo frente a contaminantes, definimos que la herramienta a usar es CTRAN/W con un precedente de la plataforma SEEP/Wambos son un producto de software de elementos finitos para modelar la transferencia de solutos y gases en medios porosos. CTRAN/W puede usarse para modelar sistemas simples dominados por difusión a través de sistemas complejos de advección-dispersión con reacciones de primer orden, ofrece la capacidad de modelar un conjunto diverso de mecanismos de transporte de solutos y gases que incluyen difusión, advección, dispersión, adsorción, descomposición y flujo dependiente de la densidad debido a su formulación integral.

Formula para un medio saturado e insaturado, lo que permite que el coeficiente de difusión varíe con el contenido de agua y que el proceso de advección se ajuste a medida que cambian las velocidades del agua subterránea en la zona no saturada.

La teoría del programa presenta métodos, ecuaciones, procedimientos y técnicas para CTRAN/W, un sobre entendimiento de los conceptos en beneficio de la aplicación del software

Velocidad de flujo

Calculan la descargar específica o la velocidad de Darcy. La descarga específica es el flujo total Q dividido por el área de la sección transversal completa (huecos y solidos por igual), el área de sección transversal real disponible para el

agua es mejor que el área completa, debido a la presencia de sólidos y en consecuencia la velocidad real del movimiento del agua es mayor que la velocidad de Darcy, entonces entra a detallar la definición de porosidad, que es el volumen de huecos dividido por el volumen total. El área transversal disponible para el flujo de agua es la porosidad multiplicada por área transversal total.

Por lo tanto, la velocidad lineal promedio del fluido del poro es:

$$Velocidad\ lineal = \frac{Velocidad\ de\ Darcy}{m_e} \quad Ecuación\ 8. Ecuación\ de\ velocidad\ lineal\ media$$

Y la ecuación para determinar la Velocidad de Darcy, es la siguiente:

$$Velocidad\ de\ Darcy = \frac{Q}{Seccion\ total} \quad Ecuación\ 9. Velocidad\ de\ Darcy$$

También se puede determinar de esta forma:

$$v = \frac{U}{n} \quad Ecuación\ 10. Velocidad\ lineal\ promedio\ del\ fluido\ del\ poro$$

Donde:

$Q = Caudal$

$m_e = Porosidad\ eficaz$

$n = Porosidad$

$U = Descarga\ específica\ o\ velocidad\ arciana$

$v = Velocidad\ lineal\ promedio$

Bajo condiciones saturadas, el contenido volumétrico de agua (θ) es igual a la porosidad. Entonces la velocidad lineal es igual a:

$$v = \frac{U}{\theta} \quad Ecuación\ 11. Velocidad\ lineal$$

CTRW se formula asumiendo que la velocidad lineal promedio puede estar relacionada con el contenido volumétrico de agua para condiciones saturadas e insaturadas. SEEP/W siendo un modelo de flujo saturado/insaturado calcula el contenido volumétrico de agua. SEEP/W ve específicamente la descarga (Velocidad de Darcy) dividido por el contenido volumétrico de agua, lo que se considera en CTRW como la velocidad lineal promedio.

Ecuaciones gobernantes

La ecuación que rige para el transporte de contaminantes se conoce generalmente como la ecuación de transporte o ecuación de advección-dispersión.

Para facilitar la presentación discusión, la ecuación diferencial gobernante se presenta solo en términos de transporte unidimensional.

El flujo de masa a través del elemento surge de los procesos de advección y dispersión. En forma de ecuación, hay dos mecanismos:

$$advección = v\theta C = UC$$

$$dispersion = -\theta D \frac{\partial C}{\partial x}$$

La concentración C es la masa M del soluto disuelto en una unidad de volumen de agua (solución), se representa en la siguiente fórmula:

$$C = \frac{M}{V_w} \quad \text{o} \quad M = CV_w$$

El volumen de agua por unidad de volumen del elemento es el contenido volumétrico de agua θ . La masa M por el volumen total de la unidad es:

$$M = C\theta$$

Donde:

v = Velocidad lineal promedio

θ = Contenido volumétrico de agua

C = Concentración

D = Coeficiente de dispersión hidrodinámica

U = Velocidad de arco (descarga específica)

El signo negativo en el término de dispersión indica que la dirección del flujo de masa es desde un punto alto concentración a una concentración baja (es decir, un gradiente negativo):

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-\theta D \frac{\partial C}{\partial x} + U C \right)$$

$$= \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x}$$

Ecuación 12. Dirección flujo de masa

El coeficiente de dispersión hidrodinámica D está relacionado con la dispersividad, la velocidad lineal promedio y coeficiente de difusión D^* por:

$$D = \alpha v + D^*$$

Entonces tenemos este comportamiento:

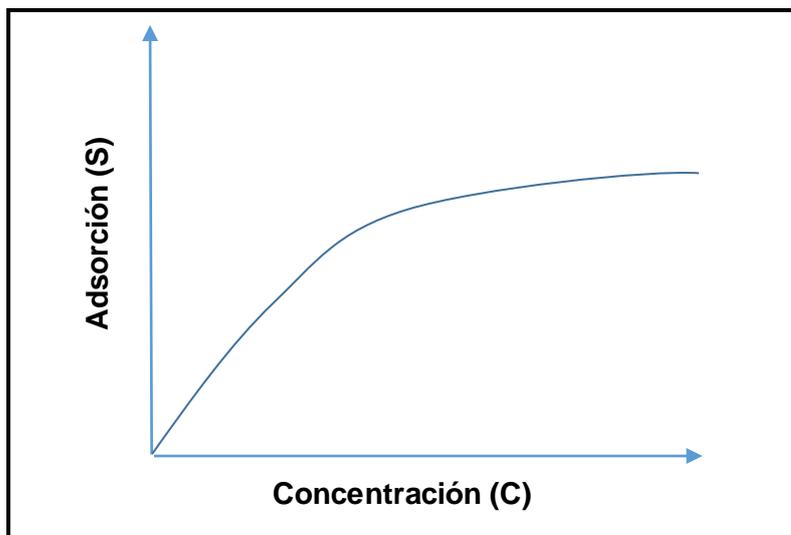


Figura 10. Relación entre Adsorción y Concentración. Elaboración propia

Ecuaciones de elementos finitos

CTRW utiliza las mismas técnicas que la solución de filtración para desarrollar la ecuación de elementos finitos, detalles sobre la función de interpolación, las funciones derivadas, el esquema de la integración numérica y la

implementación de los elementos infinitos se presentan en SEEP/W. Usando el método de Galerkin para derivar la ecuación de elementos finitos, la función residual para el gobierno de la ecuación diferencial es:

$$R(c) = \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \theta C - \lambda S \rho_d - \left(\theta + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t}$$

Expresando la concentración del elemento C, en el nodo de concentración {C} y la función forma < N >

$$q = \theta D \frac{\partial \langle N \rangle \{C\}}{\partial n} + U_b \langle N \rangle \{C\} \quad \text{Ecuación 13. Concentración elemento C}$$

Integración temporal

La solución para los elementos finitos para la ecuación de transporte está en función del tiempo indicado como {C}, t. La integración del tiempo se puede realizar mediante una aproximación de diferencia finita:

$$(\omega \Delta t [K_1] + [K_2]) C_1 = (\omega \Delta t \{Q_1\} + (1 - \omega) \Delta t \{Q_0\}) + ([K_2] - (1 - \omega) \Delta t [K_1]) \{C_0\}$$

Donde:

Δt = Incremento de tiempo

ω = Proporción entre 0 y 1

{C1} = Concentración nodal al final del incremento de tiempo

{C0} = Concentración nodal al inicio del incremento de tiempo

{Q1} = Flujo de masa nodal al final del incremento de tiempo

{Q0} = Flujo de masa nodal al inicio del incremento del tiempo

{K1} = Matriz característica del elemento

{K2} = Matriz de capacitancia de elementos (almacenamiento)

Matriz hidrodinámica de dispersión

Para flujo de forma unidimensional, el coeficiente de dispersión hidrodinámica D se define arriba como:

$$D = \alpha v + D^*$$

α = dispersividad (propiedad del material)

v = velocidad arciana D dividida por el contenido volumétrico de agua

D^* = coeficiente de difusión molecular.

La dispersión en la dirección del flujo de agua suele ser mayor que la dispersión perpendicular a la dirección del flujo, por lo tanto, se requiere dos valores de dispersividad para definir el proceso de dispersión, longitudinal α_L y trasversal α_T .

En general, el coeficiente de difusión D^* es una función del contenido volumétrico de agua, como se muestra en la Figura 10. según Kemper y Van Schaik en 1966, CTRAN/W le permite definir valores deseados de la función de coeficiente de difusión en función del contenido volumétrico del agua (función de difusión). El parámetro D^* y su dependencia del contenido de agua es importante solo en el flujo no saturado y cuando el caudal de agua es muy bajo. El valor del coeficiente de dispersión hidrodinámica es a menudo gobernado por el caudal del agua. Por lo tanto, a menudo es adecuado asumir que D^* como independiente de θ para definir la relación mediante una función horizontal constante para un análisis.

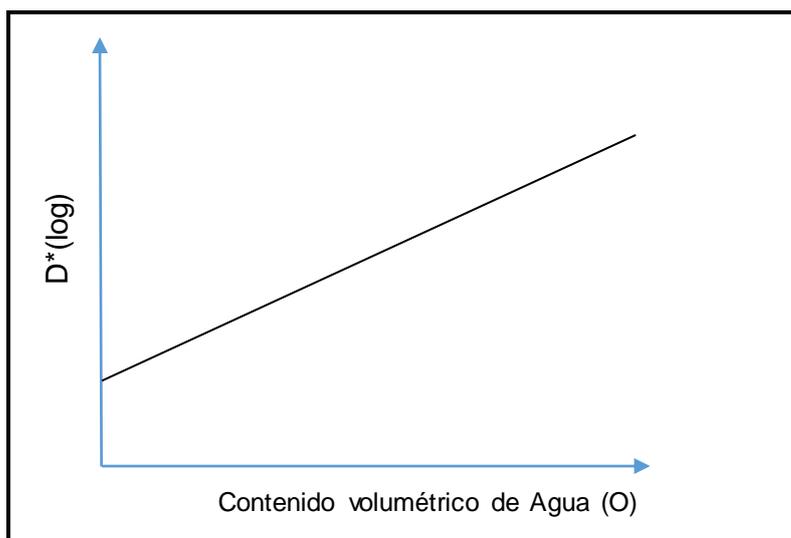


Figura 11. Relación entre D^* y Contenido de Agua. Elaboración propia

Cálculo de cantidad de masa

CTRAN/W calcula la cantidad de masa tanto en la fase fluida (M_f) como en la fase sólida (M_s) de un elemento por integración numérica de las siguientes ecuaciones:

$$M_f = \int_v \langle N \rangle^T \langle N \rangle dv\{C\} \text{ y } M_s = \int_v \rho_d \langle N \rangle^T \langle N \rangle dv\{S\}$$

Al realizar la integración numérica de las ecuaciones anteriores, CTRAN/W calcula la concentración bajo el Punto de Gauss, basado en la concentración de nodos y la función de interpolación. La concentración se utiliza para calcular la adsorción de punto de Gauss S a partir de la función de Adsorción.

El contenido volumétrico de agua θ en cada punto de Gauss se obtiene información generada por SEEP/W.

CTRAN/W calcula la cantidad de masa en cada punto de Gauss dentro de un elemento, este se determina en función de una distribución ponderada de la cantidad de masa de elemento, para la fase fluida, la distribución se pondera según el producto de $\theta * C$ en cada punto de Gauss. De manera similar para la fase sólida.

La cantidad de masa de cada elemento se suma para dar la cantidad de masa total en el problema de flujo.

Seguimiento de partículas

Es difícil resolver la ecuación de elementos finitos de dispersión por advección cuando la velocidad de flujo es alta y la dispersividad es baja, en el límite cuando el coeficiente de difusión D^* y los parámetros de dispersividad α_L y α_T se ponen en cero, es imposible resolver la ecuación de advección- dispersión con CTRAN/W de elemento finitos.

La función de seguimiento de partículas se puede usar para determinar dónde puede terminar una partícula contaminante y aproximadamente cuánto tiempo puede tomar para que una partícula llegue a una nueva posición en todos los pasos de tiempo representa la ruta de migración de la partícula, es decir, una gráfica de migración de contaminantes en un sistema de flujo sin dispersión, sin absorción y sin descomposición.

Para cada incremento de paso de tiempo de proyección, el cambio en la posición de cada partícula Δx y Δy , es calculado con esta ecuación:

$$\Delta x = \Delta t v_x$$

$$\Delta y = \Delta t v_y$$

Ecuación 14. Proyección de incremento de tiempo

Δt = Proyección de incremento de tiempo

V_x = Velocidad lineal promedio en la dirección X

V_y = Velocidad lineal promedio en la dirección Y

2.3. Definición de términos

Tipo de suelo

Diferenciación del suelo de acuerdo a las características propias de cada de tipo en base a la granulometría.

Parámetros Físicos

Conjunto de características que describen el color, la textura, la estructura y las relacionadas con la capacidad de retención de agua en el suelo.

Parámetros químicos

Son las que dependen de la parte más íntima del suelo como es su propia composición química.

Transporte de contaminante

El desplazamiento de una sustancia contaminante a través del suelo, está directamente relacionada con las características del contaminante y del suelo, se lleva a cabo de forma descendente en dirección vertical por la acción de la gravedad y un movimiento lateral producida por el efecto de las fuerzas capilares del suelo. Las características del suelo tales como la permeabilidad, tamaño de partículas, contenido de humedad y materia orgánica tiene una gran influencia en el comportamiento del contaminante, en este caso en particular hidrocarburos (Ortinez-Brito et al., 2003).

Contaminante

Sustancia cuya presencia en los cuerpos receptores implica disfunciones en el funcionamiento del mismo además de generar impactos negativos, resultan altamente tóxico.

Modelamiento Unidimensional

Cuando la escala espacial de análisis de la hidrodinámica de un río o un estuario es mucho mayor que su ancho y su profundidad, es suficiente y conveniente plantear las versiones de las ecuaciones de movimiento integradas en toda la sección transversal. Esto conduce a un modelo matemático unidimensional, en el cual los efectos de las escalas transversales de movimiento aparecen integrados y sólo se resuelven las escalas longitudinales largas (Ménendez, 2010).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Explicativo, diseño de laboratorio.

3.2. Población y/o muestra de estudio

Muestra: 03 muestras de suelo: arena, limo y arcilla.

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 6

Operacionalización de Variables

VARIABLES	DIMENSIÓN	ACTIVIDAD	INDICADOR
Variable Independiente Propiedades físicas, químicas	Laboratorio de suelos	Análisis a realizar: Propiedades físicas: análisis granulométrico, contenido de humedad. Propiedades químicas: análisis de pH y Conductividad Eléctrica.	Propiedades físicas: Humedad Color Textura Estratigrafía Porosidad Densidad Permeabilidad Densidad Propiedades químicas: pH - CE
Variable Dependiente Velocidad de infiltración Flujo volumétrico	Columna experimental	Análisis a realizar: Determinación en función del tiempo y descenso.	Tiempo: Segundos Descenso: cm

Nota. Recuperado de Repositorio Universidad Privada de Tacna (2018).

3.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.4.1. Propiedades físicas

Toma de muestras

Para la extracción de las muestras en diferentes tipos de suelo se optó por el método del Barreno manual.

La muestra es compuesta, una mezcla de varias sub muestras obtenidas a partir de la toma en distintos sitios representativos con el fin de asegurar una información promedio del nivel de fertilidad. La toma de una muestra compuesta se realiza por la metodología más conveniente de acuerdo a las características del terreno.

La zona de muestreo no presenta una pendiente considerable por lo que el muestreo fue de forma aleatoria y se tomaron las coordenadas correspondientes.

Equipos, materiales y reactivos:

- Barreno manual
- Balde de plástico
- Bolsas herméticas
- Marcadores
- Cinta de papel
- Libreta de apuntes
- GPS

Procedimiento:



Figura 12. Procedimiento Toma de Muestras. Elaboración propia

a. Color

El color permite inferir el estado de aireación y la clase de drenaje. Estas propiedades están directamente relacionadas con la productividad.

Se determinó usar el Sistema Munsell que es uno de los sistemas más influyentes, fue inventado por Alberto Henry Munsell, deseó crear una forma de describir el color. Su sistema consta básicamente de tres elementos claves Matiz, valor, e intensidad, y cada color tiene cualidades, de esa forma dispone, ordena y especifica los colores. Cada elemento está descrito por su escala.

La matriz se identifica de 0 a 100 y su símbolo es la letra H, el rango de Valor es de 0 a 10 siendo el símbolo la letra V, intensidad tiene como escala la saturación de un color. Los colores que no se representan por muestras reales pueden ser identificados con números intermedios.

Para determinar el color se emplea la tabla de colores Munsell. La tabla se compone por hojas, que representan cada Matiz (Hue) el cual aparece en la parte superior derecha de la página. Cada hoja contiene placas o chips de distintos colores que representa a la calidad (Value) y la pureza (Chroma).

Las divisiones de claridad se muestran en sentido vertical, el cual incrementa su valor de abajo hacia arriba. Las divisiones de pureza se muestran en sentido horizontal, en la parte inferior de la hoja y se incrementa de izquierda a derecha.



Figura 13. Domínguez, J. (2012). Tabla de Munsell. Recuperado de <https://www.redalyc.org/>

Equipos, materiales y reactivos:

- Tabla de Munsell
- Libreta de campo
- Tableta de campo
- Guantes de látex
- Pizeta

Procedimiento:

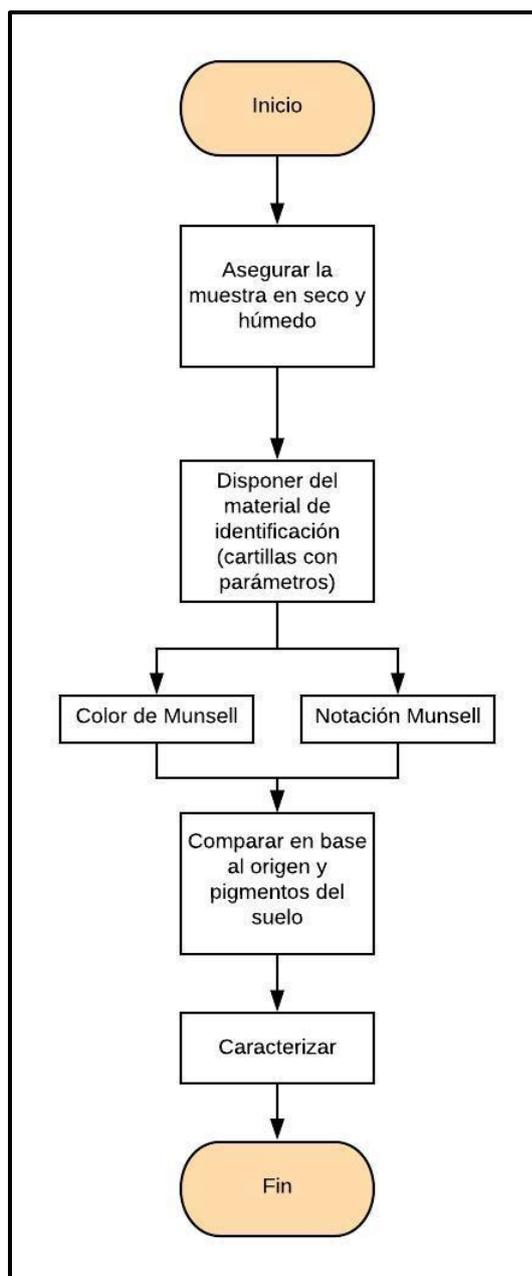


Figura 14. Procedimiento Determinación de Color. Elaboración propia

Según la base de origen y pigmentos del suelo, la variedad de colores es la siguiente:

- **Color negro**

Se asocia a condiciones de buena fertilidad, buena estructuración y actividad biológica, guarda relación con la incorporación de materia orgánica descomponiéndose en humus el cual da el color negro al suelo, debido a la presencia de carbonatos de Calcio o Magnesio, materia orgánica y cationes.

- **Color rojo**

Está asociado a procesos de alteración con condiciones de alta temperatura, baja actividad de agua, incorporación de materia orgánica, liberación de Hierro de las rocas el cual indica condiciones de alta meteorización, el cual se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácido y ambientes donde se desarrollan procesos de oxidación.

- **Color amarillo a marrón amarillento claro**

Indica meteorización en ambientes aeróbicos. Guarda relación con condiciones de media a baja fertilidad del suelo. Está asociado con la presencia de óxidos hidratados de Hierro.

- **Color marrón**

Se asocia a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo, y se relaciona con niveles medios a bajos de materia.

- **Color blanco o ausencia de color**

Se debe a la acumulación de minerales como calcita, dolomita y yeso. Está asociado a la presencia de tierras alcalinas y sales altamente solubles.

- **Color gris**

Indica un ambiente anaeróbico. El color gris significa que existe saturación el suelo con agua. En estas condiciones las bacterias anaeróbicas utilizan el Hierro presente en los minerales como la goetita y la hematita.

- **Color verde**

Indica que es un suelo con mal drenaje. Está asociado con la ocurrencia de óxidos de Hierro.

- **Color azulado**

En zonas costeras, deltaicas o pantanosas donde existe presencia del anión sulfato, existiendo condiciones de reducción. Esta coloración está asociada con presencia de óxidos hidratados de Aloisita y fosfatos ferrosos hidratados.

- **Moteado**

Se refieren a las manchas de diferentes colores de color intercalado e indican que el suelo estuvo sujeto a condiciones de alternancia entre mojado y seco. El moteado se describe en términos de abundancia, tamaño, contraste, límite y color.

b. Textura

Se determina mediante el análisis granulométrico de los suelos, es uno de los ensayos más básicos para caracterizar un suelo, junto con los límites de Atterberg y los ensayos de estado permiten identificar claramente un suelo.

La granulometría por tamizado consiste en confeccionar la curva granulométrica de una muestra, siendo representativa la distribución de los tamaños de las partículas.

Luego de realizar la gráfica granulométrica con los datos de la tabla, se puede apreciar que se usan para comparar diferentes tipos de suelos. Y también se identifican tres parámetros básicos del suelo los cuales son:

- Diámetros efectivos
- Coeficiente de uniformidad (Cu)
- Coeficiente de curvatura (Cc)

Coeficiente de uniformidad (Cu)

Es la relación entre el diámetro correspondiente al 60% del peso del material y el diámetro por el que pasa el 10% del material:

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

Ecuación 15. Coeficiente de uniformidad

Si el coeficiente de uniformidad es menor de 5 la granulometría es uniforme, y si comprende entre 5 y 20 significa que el suelo es poco uniforme y si es mayor a 20 se trata de un suelo bien gradado.

Coeficiente de curvatura (Cc)

Mide el grado de curvatura de la granulometría.

Se define como:

$$Cc = \frac{D30^2}{D10 \times D60}$$

Ecuación 16. Coeficiente de curvatura

Curva granulométrica

Los resultados del análisis mecánico se presentan en gráficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica. Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética.

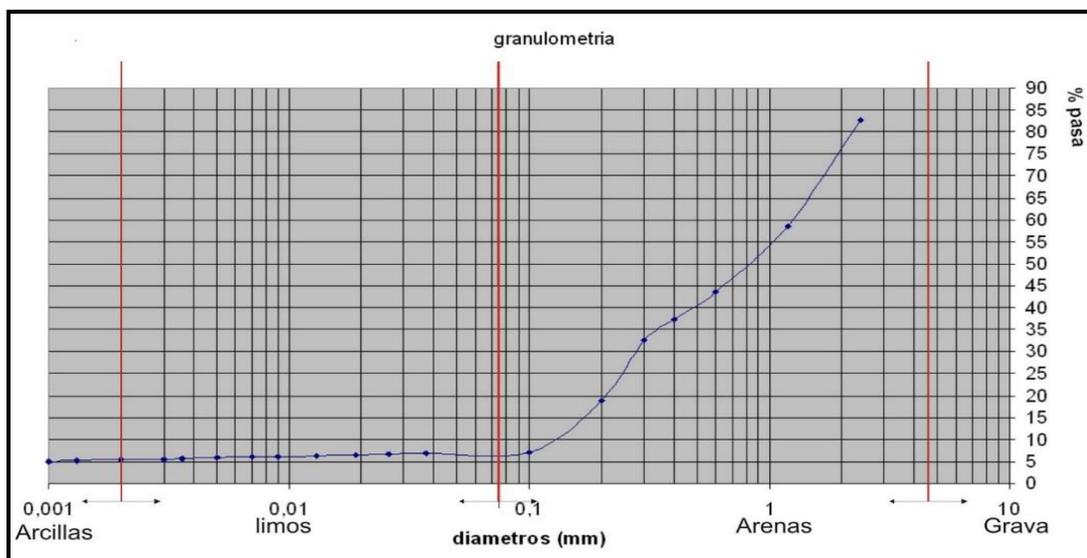


Figura 15. Ortiz, Jose. (2005). Curva de distribución granulométrica. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu>

Los porcentajes de grava, arena, limo y partículas de arcilla presentes en el suelo se obtienen de la curva de distribución granulométrica.

Equipos, materiales y reactivos:

Instrumentos de laboratorio y equipos

- Balanzas: Debe tener una sensibilidad de 0,01 g para que pueda pesar el material del tamiz de 4,760 mm (N°4). Y otra con una sensibilidad de 0,1 % del peso de la muestra para que se pueda pesar los materiales retenidos en el tamiz de 4,760 mm (N°4).
- Tamices de malla cuadrada: Los cuales deben ser de 75 m (3"), 50,8 mm (2"), 25,4 mm (1"), 19,0 mm(3/4"), 9,5 mm (3/8"), 4,76 mm (N°4), 2,00 mm (N°10), 0,840 mm (N°20), 0,425 mm (N°40), 0,250 mm (N°60), 0,106 mm (N° 140) y 0,075 mm (N°200).
- Horno: Se requiere un horno capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes de hasta 110 +- 5°C.
- Bandejas metálicas de acero con una capacidad de 2 kg.
- Cepillos y brochas
- Bolsas herméticas
- Marcadores para rotular
- Etiquetas para codificación de muestras

Procedimiento:

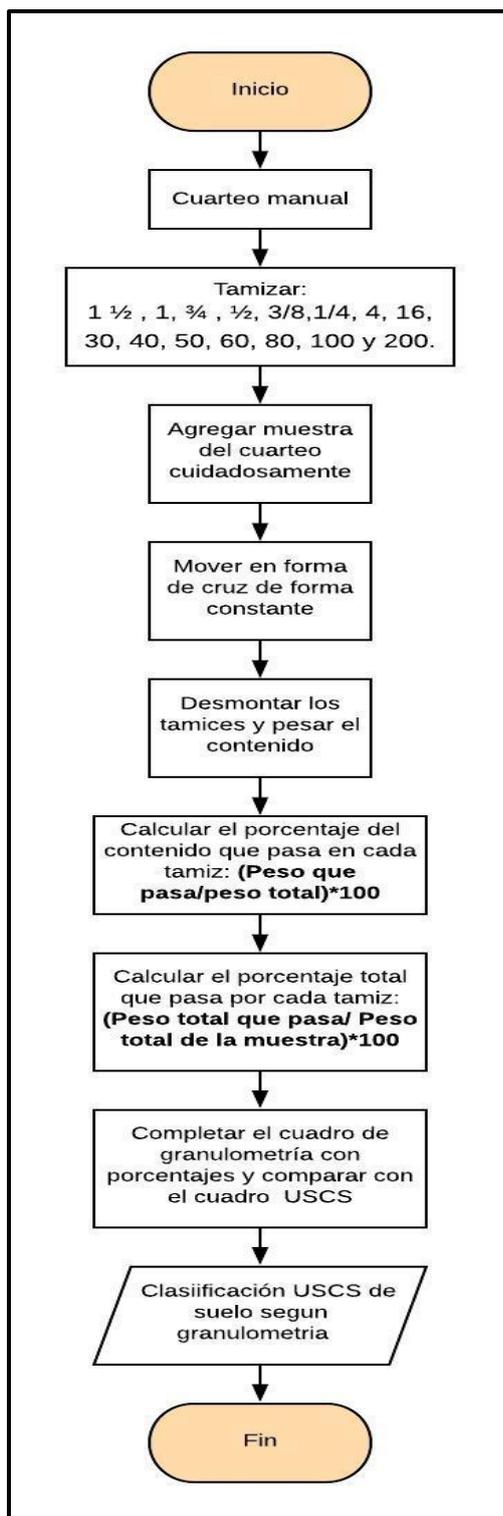


Figura 16. Procedimiento para Determinar Textura. Elaboración propia

c. Densidad in situ

El método usado es el de cono de arena, usualmente es aplicado a suelos que no contengan una cantidad excesiva de roca o materiales gruesos con un diámetro mayor a 1 ½ "(38 mm). Este método de ensayo puede no ser adecuado para suelos que contengan materiales dispersos o que no mantengan los lados estables en el orificio de ensayo; ni para suelos granulares que tengan altos porcentajes de vacíos.

Tabla 7

Volúmenes Mínimos del Hoyo de Ensayo Basado en el Tamaño Máximo de la Partícula

Tamaño máximo de la partícula		Volúmen mínimo del orificio de ensayo	
Pulgada	Mm	Cm ³	Pies ³
1/2	12,5	1420	0,05
1	25,0	2120	0,075
2	50,0	2830	0,1

Nota. Recuperado de "Manual de Ensayo de Materiales", Ministerio de Transportes, 2017.

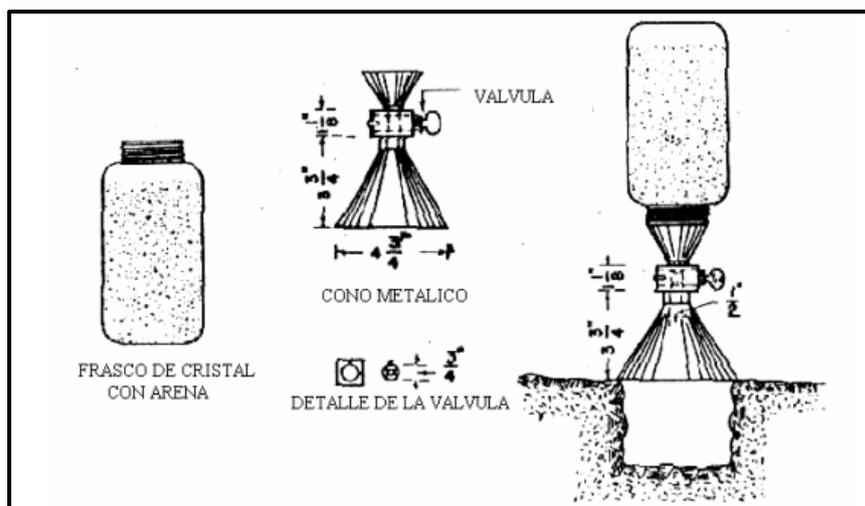


Figura 17. Cono de Arena para Determinar Densidad in Situ. Recuperado de <https://ingenieriareal.com>.

Para calcular el volumen del orificio de prueba:

$$V = \left(\frac{M_1 - M_2}{\rho_1} \right) \quad \text{Ecuación 17. Volumen del orificio}$$

Donde:

M_1 : Masa de la arena utilizada para llenar el orificio de prueba

M_2 : Masa de la arena utilizada para llenar el embudo y el plato de base

ρ_1 : Densidad del volumen de la arena g/cm³

V : Volumen del orificio de prueba m³

Para calcular la masa seca del material extraído del orificio de prueba tal como sigue:

$$M_4 = \left(\frac{100 \times M_3}{W + 100} \right) \quad \text{Ecuación 18. Masa seca de material extraído}$$

Donde:

M_3 : Masa húmeda del material extraído del orificio de prueba

M_4 : Masa seca del material del orificio de ensayo (g)

W : Contenido de humedad del material extraído del orificio de prueba (%)

Para el cálculo de la densidad húmeda y seca in situ del material

$$\rho_m = \frac{M_3}{V} \quad \text{Ecuación 19. Densidad húmeda}$$

$$\rho_d = \frac{M_4}{V}$$

Donde:

M_3 : Masa húmeda del material extraído del orificio de ensayo

M_4 : Masa seca del material del orificio de ensayo (g)

V : Volumen del orificio de prueba m³

ρ_m : Densidad húmeda del material, o su peso unitario húmedo en g/cm³

ρ_d : Densidad seca del material, o su peso unitario seco en g/cm³

De acuerdo a la bibliografía es recomendable expresar la densidad in situ como porcentaje.

Equipos, materiales y reactivos:

Equipo

- Aparato de densidad
Un aparato desarmable que consiste en una válvula cilíndrica con un orificio de ½ " (13 mm) de diámetro.
Frasco desarmable
Placa metálica cuadrada
- Balanza
- Cíncel
- Espátula
- Brocha pequeña

Materiales

- Calculadora
- Libreta de campo
- Lápiz
- Tableta de campo
- Guantes

Procedimiento:

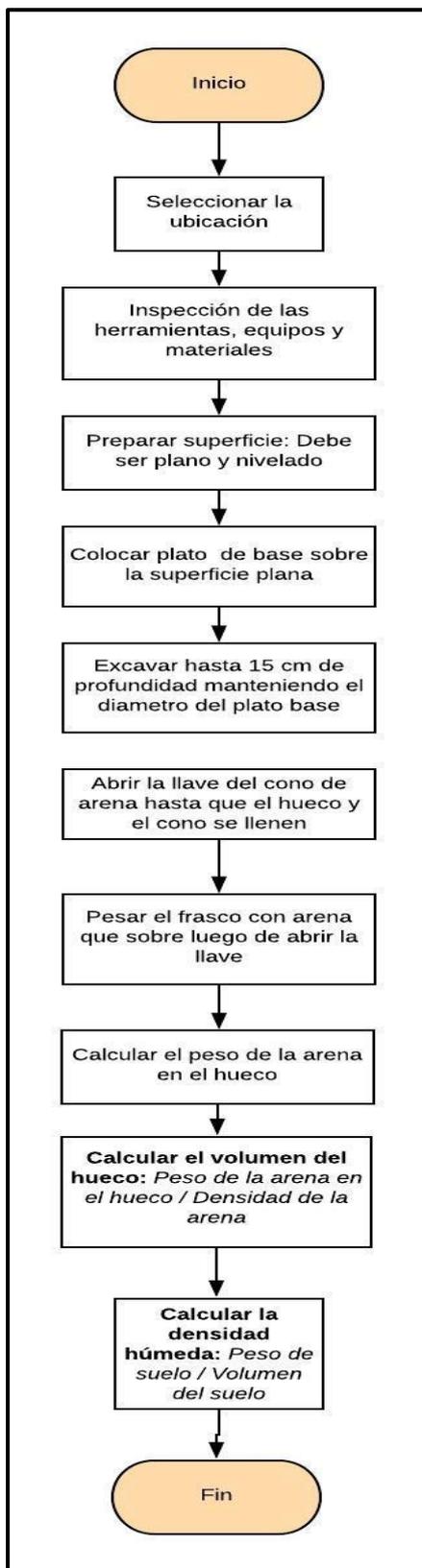


Figura 18. Procedimiento para Determinar Densidad in Situ. Elaboración propia.

d. Humedad**Equipos, materiales y reactivos:**

- Horno de secado: Horno termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Placa metálica: Tiene un hueco central con borde para recibir el embudo grande (Cono). La placa debe ser plana en la base y tener suficiente rigidez, con un espesor de $\frac{3}{8}$ " a $\frac{1}{2}$ " (10 a 13 mm).
- Frasco desarmable: Debe tener una capacidad de volumen que exceda el volumen requerido para llenar el orificio de prueba y aparato durante la prueba.
- Aparato desarmable que consiste en una válvula cilíndrica con un orificio de $\frac{1}{2}$ " (13 mm) de diámetro
- Balanzas: Debe tener una capacidad conveniente con aproximaciones de 0,01 g para muestras de menos de 200 g de 0,1 g para muestras de más de 200 g.
- Recipientes: Deben ser fabricados de material resistente a la corrosión, y al cambio de peso cuando sea sometido a condiciones de frío o calor continuo.
- Desecador: Debe tener un tamaño apropiado que contenga sílica gel o fosfato de calcio anhidro.
- Utensilios para manipulación de recipientes: Se requiere el uso de guantes, tenazas o un sujetador apropiado para manejar recipientes calientes.

Procedimiento:

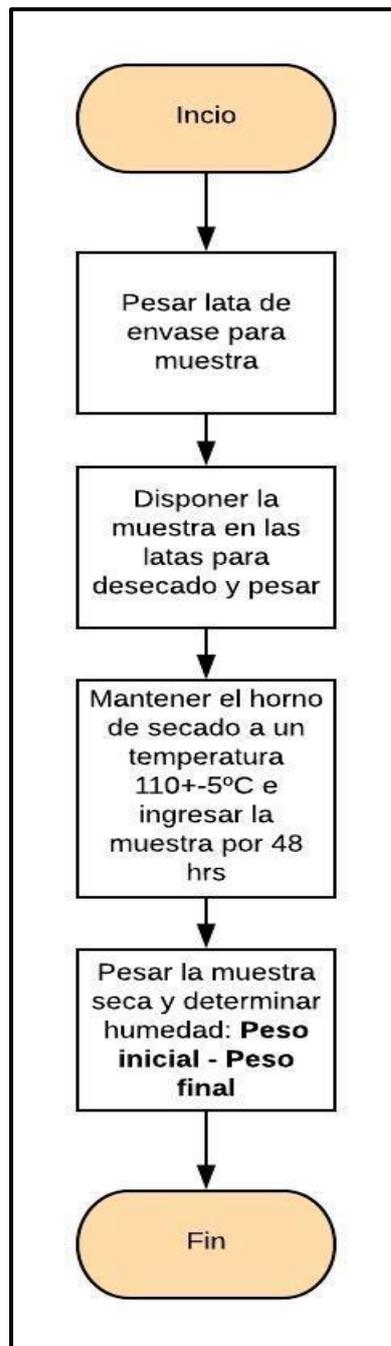


Figura 19. Procedimiento para Determinar Humedad. Elaboración propia.

e. Permeabilidad

Equipos, materiales y reactivos:

- Balanzas
- Perméatro
- Probeta

Procedimiento:

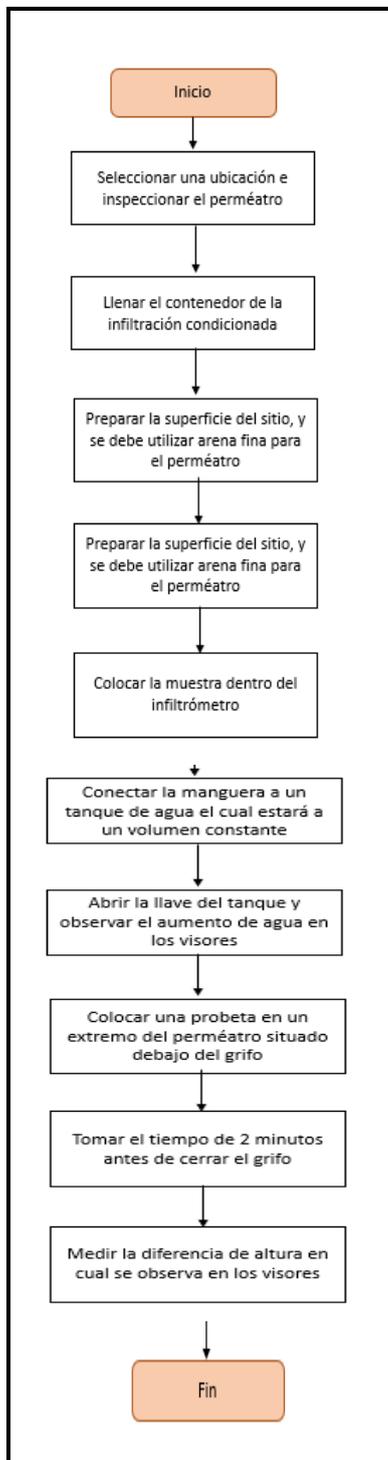


Figura 20. Procedimiento para Determinar Permeabilidad. Elaboración propia.

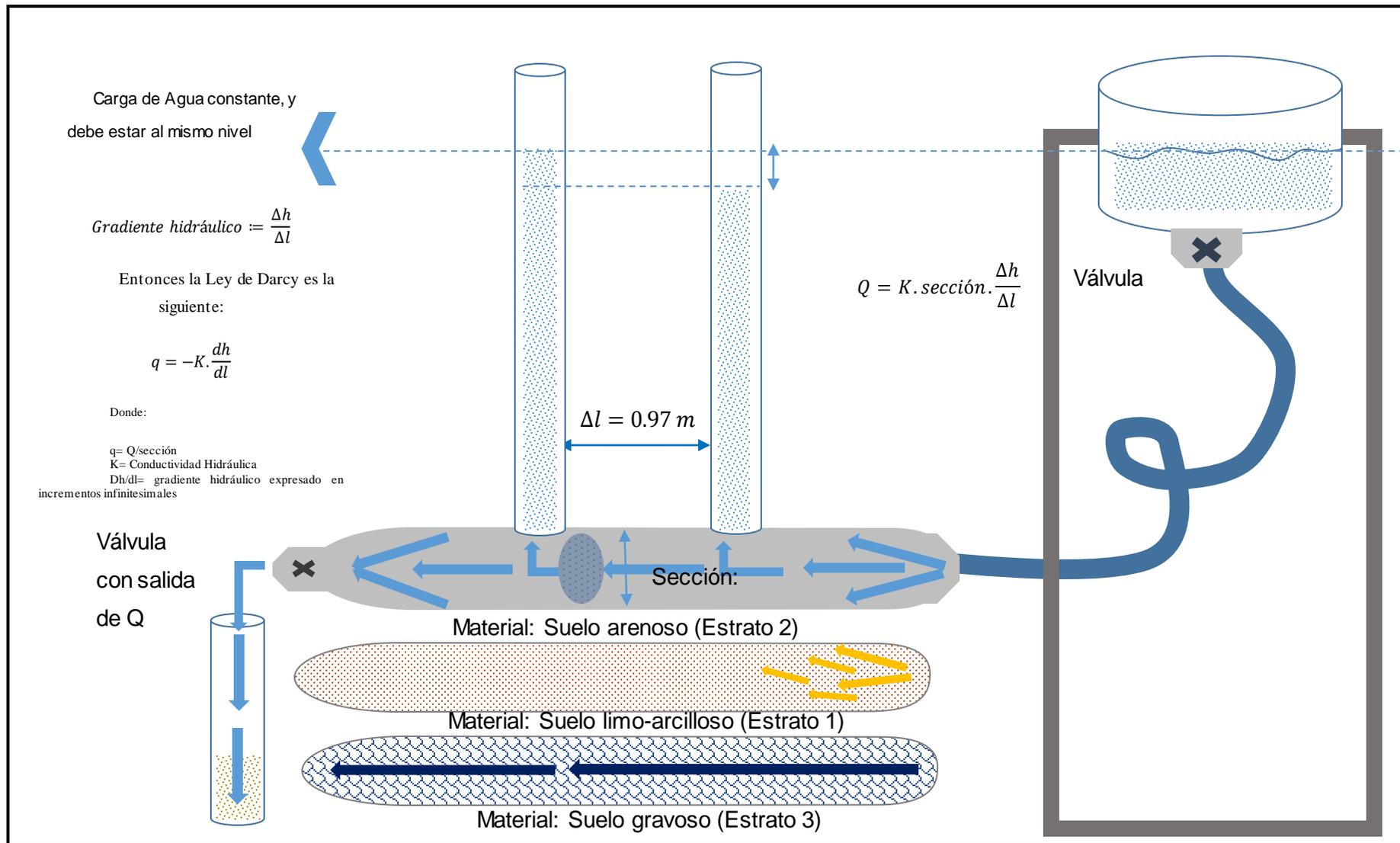


Figura 21. Diseño de Permeámetro. Elaboración propia

f. Infiltración

Equipos, materiales y reactivos:

- Tamiz N°4
- Probetas de vidrio de 1m. de alto
- Baldes
- Manguera
- Planchas de Tecnopor
- Envases de metal

Procedimiento:

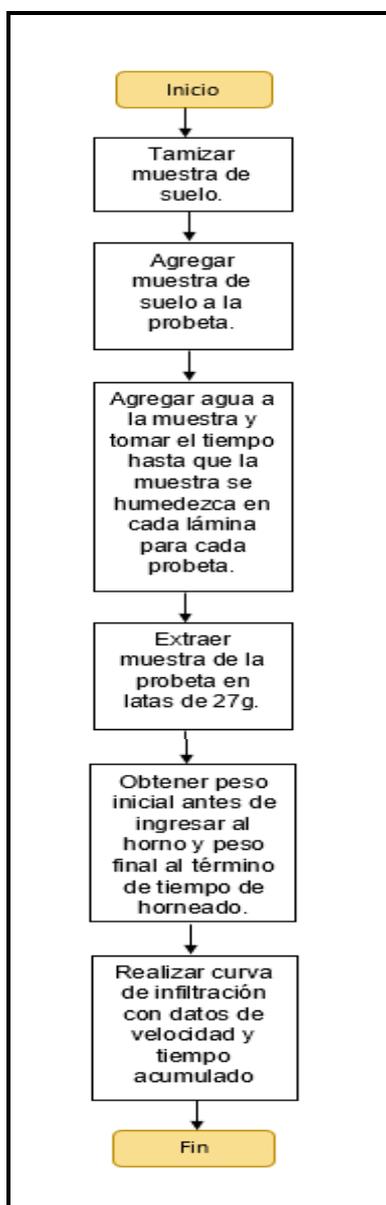


Figura 22. Procedimiento para Determinar Infiltración. Elaboración propia

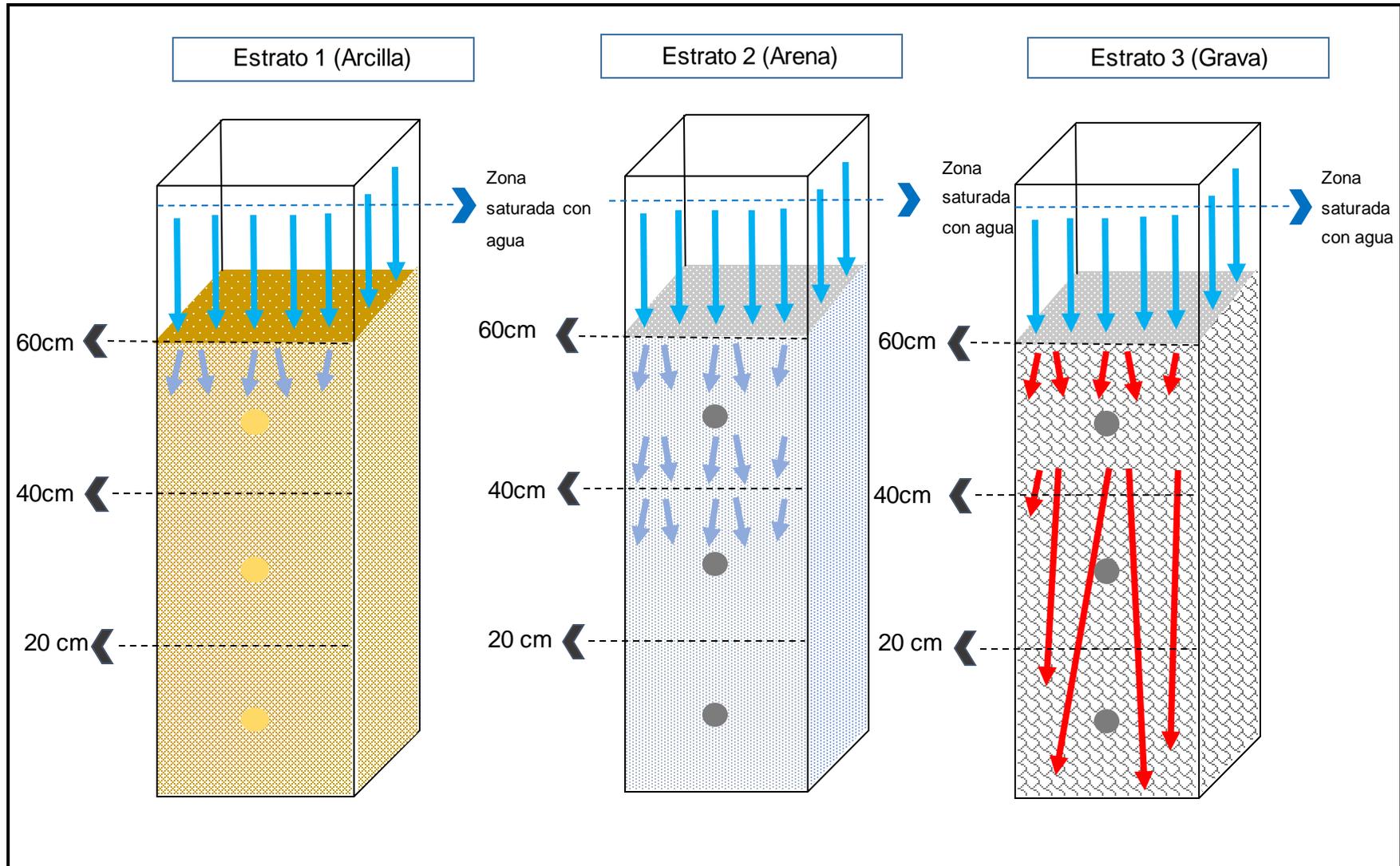


Figura 23. Diseño de Columnas Experimentales. Elaboración propia

3.4.2. Propiedades químicas

a. pH

Materiales, equipos y herramientas:

- Papel indicador de pH
- Agua destilada
- Vasos de precipitado
- Varillas de vidrio

Procedimiento:

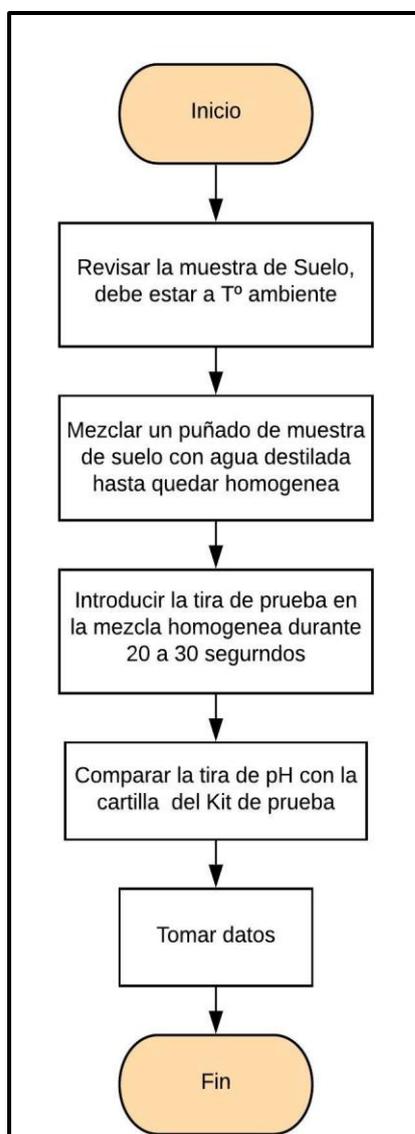


Figura 24. Procedimiento para Determinar pH. Elaboración propia

b. Conductividad eléctrica

Materiales, equipos y herramientas:

- Tamiz N°4
- Probetas de vidrio de 1m de alto
- Balanza
- Multiparámetro

Procedimiento:

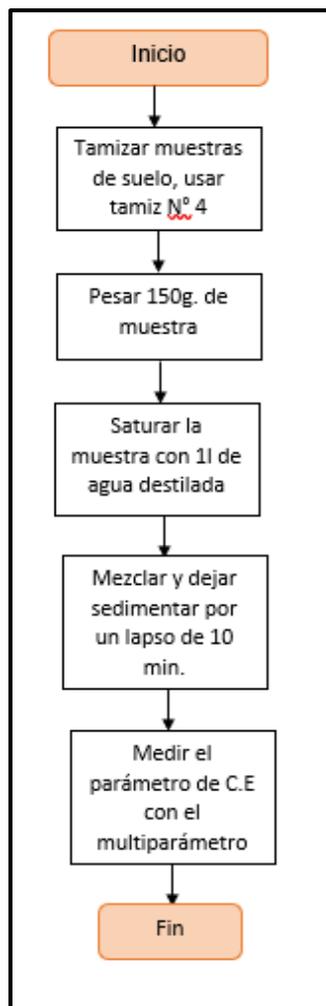


Figura 25. Procedimiento para determinar C.E.
Elaboración propia

3.5. Procesamiento y análisis de datos

- Software GEOSTUDIO versión 2012, extensión SEEP/W y CTRAM/W.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades físicas

Tabla 8

Color de los estratos 1, 2 y 3

Muestra	Estrato 1 (Arcilla)		Estrato 2 (Arena)		Estrato 3 (Grava)	
	Color en seco	Color en húmedo	Color en seco	Color en húmedo	Color en seco	Color en húmedo
1	7-10YR-4 Marrón fuerte	5-10YR-6 Marrón amarillento	7-10YR-4 Marrón muy suave	5-10YR-6 Marrón amarillento	6-5YR-4 Marrón Rojizo claro	4-5YR-6 Rojo amarillento
2	7-10YR-4 Marrón muy suave	5-10YR-6 Marrón amarillento	7-10YR-4 Marrón muy suave	5-10YR-6 Marrón amarillento	6-5YR-4 Marrón Rojizo claro	4-5YR-6 Rojo amarillento

Fuente. Elaboración propia

Según la Tabla Munsell el color se determina en dos escenarios los cuales son Color en seco, y Color en húmedo. El estrato 1 de la muestra 1 tuvo como resultado de color en seco el color marrón fuerte cuyo código en la Tabla Munsell es 7-10YR-4, este color está asociado con la ocurrencia de materia orgánica ácida parcialmente descompuesta según (Ramírez). Como resultado en color en húmedo, se determina un color marrón amarillento cuyo código en la Tabla Munsell es 5-10YR-6, este color se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo.

El estrato 2 de la muestra 1 tuvo como resultado de color en seco el color Marrón muy suave cuyo código en la Tabla Munsell es 7-10YR-4, este color está asociado a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo y se relaciona con niveles medios a bajos de materia, esta discusión coincide con el estudio realizado según Domínguez (2011). Como resultado en color en húmedo, se determina un color marrón amarillento cuyo código en la Tabla Munsell es 5-10YR-6, este color se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo.

El estrato 3 de la muestra 1 tuvo como resultado de color en seco el color marrón rojizo claro cuyo código en la Tabla Munsell es 6-5YR-4, este color indica

materia orgánica ácida parcialmente descompuesta, el color rojizo determina alta meteorización, pH ácidos y procesos de oxidación. Como resultado en color en húmedo, se determina un color rojo cuyo código en la Tabla Munsell es 4-5YR-6, este color se asocia a procesos de alteración de los materiales parentales bajo condiciones de alta temperatura, baja actividad del agua, rápida incorporación de materia orgánica; es indicativo de condiciones de alta meteorización, se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación (Mosquera Lenti, 2017).

El estrato 1 de la muestra 2 tuvo como resultado de color en seco el color Marrón muy suave cuyo código en la Tabla Munsell es 7-10YR-4, se caracteriza por meteorización bajo ambientes aeróbicos (oxidación), se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo. Como resultado de color en húmedo, se determina un color marrón amarillento cuyo código en la Tabla Munsell es 5-10YR-6, este color se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo.

El estrato 2 de la muestra 2 tuvo como resultado de color en seco el color marrón muy suave cuyo código en la Tabla Munsell es 7-10YR-4, y como resultado de color en húmedo se determina un color marrón amarillento cuyo código en la Tabla Munsell es 5-10YR-6.

El estrato 3 de la muestra 2 tuvo como resultado de color en seco el color marrón rojizo claro cuyo código en la Tabla Munsell es 6-5YR-4, este color está muy asociado a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo; se relaciona con niveles medios a bajos de materia, y como resultado de color en húmedo se determina un color rojo cuyo código en la Tabla Munsell es 5-10YR-6 el cual es indicativo de condiciones de alta meteorización, se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación.

Tabla 9

Textura de los estratos 1, 2 y 3

Muestra	Estrato 1 (Arcilla)	Estrato 2 (Arena)	Estrato 3 (Grava)
1	CH – Arcilla de alta plasticidad	SW – Arena bien gradada	GM – Gravas limosas
2	CH – Arcilla de alta plasticidad	SP – Arena pobremente gradada	GM – Gravas limosas

Nota. SUCS. Sistema Unificado de Clasificación de suelos

Para la determinación de la textura de un suelo se usa el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), en el Estrato 1 de la muestra 1 se determinó que el suelo cuyo código de clasificación es CH corresponde a un suelo Arcilloso el cual tiene la característica que es de alta plasticidad y es de textura pesada siendo muy duro ante la falta de agua e impermeable ante la presencia de éste.

El estrato 2 de la muestra 1 el suelo identificado cuyo código de clasificación es SW corresponde a Arena bien gradada, tiene las características de alta permeabilidad, alta resistencia al corte y bastante compresible, un uso común que se le da a este tipo de suelos es para cimentación con poco flujo de agua y terraplenes, esta información se corrobora con la el Informe realizado por la Universidad Nacional de Colombia mediante el Manual de geología para ingenieros (Duque Escobar, 2016).

El estrato 3 de la muestra 1 el suelo identificado cuyo código de clasificación es GM corresponde a Gravas limosas, tiene las características de alta resistencia al corte y bastante compresible, un uso común que se le da a este tipo de suelos es para cimentaciones con flujo de agua.

El estrato 1 de la muestra 2 el suelo identificado cuyo código de clasificación es CH corresponde a un suelo arcilloso.

El estrato 2 de la muestra 2 es un suelo clasificado como SP el cual corresponde a Arena pobremente gradada, éste suelo tiene las características de ser altamente permeable y compresibles, son usados para diques y terraplenes de suave talud.

El estrato 3 de la muestra 2 es un suelo clasificado como GM el cual corresponde a Gravas limosas, tiene las características de alta resistencia al corte y bastante compresible.

Tabla 10

Plasticidad del Suelo Arcilloso

Estrato 1					
Ítem	Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Límite de Plasticidad
1	Peso de la lata + suelo húmedo	g	88	87	M1: 177.78
2	Peso de la lata + suelo seco	g	56	54	M2: 206.25
3	Peso del agua (1-2)	g	32	33	
4	Peso de la lata	g	38	38	
5	Peso del suelo seco (2-4)	g	18	16	
6	Contenido de humedad (35*100)	%	177,78	206,25	
7	Número de golpes	cantidad	33	32	

Nota. Elaboración propia

Tabla 11

Límite Líquido y Límite Plástico de un Suelo Arcilloso

Resultados	Muestra 1	Muestra 2
Límite Líquido (LL)	183,85	212,50
Límite Plástico (LP)	177,78	206,25
Índice de Plasticidad (IP)	6,074	6,254

Nota. Elaboración propia

En las Tablas 10 y 11 presentan los resultados experimentales de los ensayos para la determinación de los Límites de Atterberg así como los resultados para llegar a definir el Índice de Plasticidad (IP), basado en los estudios de Sower se determinó que las muestras del Estrato 1 (E1) son ligeramente plásticas con un valor entre 6,14 y 6,254 en los ensayos demostrando así su capacidad, entonces se determina que la muestra del estrato corresponde a Limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas; cabe señalar que los valores obtenidos se han determinado mediante dos ensayos de golpeo, esto debido a la dificultad de controlar las mismas

condiciones y mantener los resultados lo más fiables posibles, dando mayor consistencia a los resultados obtenidos.

Tabla 12

Plasticidad del Suelo Arenoso

Estrato 2					
Ítem	Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Límite de Plasticidad
1	Peso de la lata + suelo húmedo	g	47	53	M1: 4.55
2	Peso de la lata + suelo seco	g	46	51	M2: 7.41
3	Peso del agua (1-2)	g	1	2	
4	Peso de la lata	g	24	24	
5	Peso del suelo seco (2-4)	g	22	27	
6	Contenido de humedad (35*100)	%	4,55	7,41	
7	Número de golpes	cantidad	2	4	

Nota. Elaboración propia

Tabla 13

Límite Líquido y Límite Plástico del Suelo Arenoso

Resultados	Muestra 1	Muestra 2
Límite Líquido (LL)	3,35	5,93
Límite Plástico (LP)	4,55	7,41
Índice de Plasticidad (IP)	-1,20	-1,48

Nota. Elaboración propia

En las Tablas 12 y 13 se presentan los resultados de los ensayos de las muestras de suelo del Estrato 2 generando valores de -1,20 y -1,48 para la Muestra 1 (M1) y Muestra 2 (M2) respectivamente demostrando que no presenta plasticidad en concordancia con la clasificación textural ya que es de tipo arenoso y así se demuestra que es un tipo de suelo que no presenta cohesión.

Tabla 14

Plasticidad del Suelo Gravoso

Estrato 3					
Ítem	Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Límite de Plasticidad
1	Peso de la lata + suelo húmedo	g	87	88	M1: 8,89
2	Peso de la lata + suelo seco	g	83	84	M2: 8,70
3	Peso del agua (1-2)	g	4	4	
4	Peso de la lata	g	38	38	
5	Peso del suelo seco (2-4)	g	45	46	
6	Contenido de humedad (35*100)	%	8,89	8,70	
7	Número de golpes	cantidad	23	19	

Nota. Elaboración propia

Tabla 15

Límite líquido y límite plástico suelo gravoso

Resultados	Muestra 1	Muestra 2
Límite Líquido (LL)	8,80	8,41
Límite Plástico (LP)	8,89	8,70
Índice de Plasticidad (IP)	-0,09	-0,29

Nota. Elaboración propia

En las Tablas 14 y 15 se presentan los resultados para las muestras del Estrato 2 demostrando que no posee características plásticas al presentar valores negativos de -0,09 y -0,29 para las Muestra 1 (M1) y Muestra 2 (M2) respectivamente, lo que demuestra que son suelos sin cohesión.

Tabla 16

Porosidad del Suelo Arcilloso

Estrato 1			
Ítem	Descripción	Und	Muestra 1
1	Peso del suelo	g	90
2	Volumen del suelo	ml	53
3	Densidad aparente	g/cm ³	1.7
4	Volumen del agua	ml	15
5	Volumen del agua + suelo	ml	53
6	Suma de volúmenes	ml	68
7	Volumen de espacios porosos	cm ³	15
8	Volumen de sólido	cm ³	38
9	Densidad de partícula	g/cm ³	2,37
10	Porosidad	%	28,3

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 16 se presentan los resultados para determinar la porosidad del Estrato 1, la porosidad está íntimamente relacionada con la textura, entonces la porosidad es de 28,3% lo que significa que el suelo es arcilloso (Aguilera, 1989) , lo que corresponde a un suelo ideal con poros grandes de 0,01-0,05 mm y ocupan un 33% de este espacio y los poros medianos (0.0002-0.01 mm) el 66% restante, ya que los poros pequeños (< 0.0002 mm) retienen agua no disponible para las raíces de las plantas.

Tabla 17

Porosidad del Suelo Arenoso

Estrato 2			
Ítem	Descripción	Und	Muestral
1	Peso del suelo	g	88
2	Volumen del suelo	ml	60
3	Densidad aparente	g/cm ³	1,467
4	Volumen del agua	ml	25
5	Volumen del agua + suelo	ml	60
6	Suma de volúmenes	ml	85
7	Volumen de espacios porosos	cm ³	25
8	Volumen de sólido	cm ³	35
9	Densidad de partícula	g/cm ³	2,514
10	Porosidad	%	41,667

Nota. Elaboración propia

Se constató que la muestra de suelo del Estrato 2 presenta 41,67% de porosidad característico de suelos de tipo arenoso, cuenta con partículas de diámetro menor de 0,2 cm o 2,0 mm (FAO, Training Edafología, 2010), las características pueden prestarse para el desarrollo de cultivos.

Tabla 18

Porosidad del Suelo Gravoso

Estrato 3			
Ítem	Descripción	Und	Muestral
1	Peso del suelo	g	90
2	Volumen del suelo	ml	88
3	Densidad aparente	g/cm ³	1,023
4	Volumen del agua	ml	48
5	Volumen del agua + suelo	ml	48
6	Suma de volúmenes	ml	72
7	Volumen de espacios porosos	cm ³	24
8	Volumen de sólido	cm ³	24
9	Densidad de partícula	g/cm ³	3,75
10	Porosidad	%	54

Nota. Elaboración propia

Los resultados del Estrato 3 para determinar porosidad corresponden a un suelo gravoso ya que el valor resultante es de 54%, cuentan con una proporción considerable de aire en los espacios libres que existen entre las partículas de la muestra, este tipo de suelo cuenta con partículas con un diámetro de 0,2 a 7,5 cm, y no permiten el desarrollo de cultivos.

Tabla 19

Permeabilidad Estrato 1 – Suelo Limo Arcilloso

Estrato 1													
Medida	Tiempo (s)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	dh	Volumen acumulado (cm ³)	Q (Caudal)	q (Caudal por sección)	K (Conductividad hidráulica – m/s)	Gradiente hidráulico	Me Sección total o Porosidad eficaz (%)	Velocidad de Darcy	Velocidad lineal media o Velocidad Real	Velocidad observada
0	0	62,5	62,5	0	0	0,000	0,00000	0,0000	0	0,051	0,000	0,000	0,000
1	30	59	64	5	0,1	0,003	0,00003	0,0005	0,052		0,007	0,013	3,233
2	60	58	64	6	0,3	0,005	0,00004	0,0007	0,062		0,010	0,019	1,617
3	90	58	64	6	0,8	0,009	0,00007	0,0012	0,062		0,017	0,034	1,078
4	120	58	64	6	1,2	0,010	0,00008	0,0013	0,062		0,020	0,038	0,808
5	150	58	64	6	1,5	0,010	0,00008	0,0013	0,062		0,020	0,038	0,647
6	180	57,5	64	6,5	1,8	0,010	0,00008	0,0012	0,067		0,020	0,038	0,539
7	210	55	64	9	2	0,010	0,00008	0,0008	0,093		0,019	0,037	0,462
8	240	54	64	10	2,3	0,010	0,00008	0,0008	0,103		0,019	0,037	0,404
9	270	53	64	11	2,7	0,010	0,00008	0,0007	0,113		0,020	0,038	0,359
10	300	53	63	10	3,1	0,010	0,00009	0,0008	0,103		0,020	0,040	0,323

Nota. Elaboración propia

Nota. El valor en promedio de la Conductividad Hidráulica (K) para el Estrato 1 es de 0.0009 cm/s y para su análisis convertido en 9×10^{-6} m/s, los resultados se generaron a nivel de laboratorio con muestras de la zona de estudio, las unidades en referencia a los valores del Código Técnico de la Edificación (OVCM, 2007, pág. 146), se tomaron 10 medidas con intervalos de tiempo de 30 segundos con una carga constante de agua usando el prototipo de estudio que usó Darcy denominado como Permeámetro de carga constante, el contenido del permeámetro era muestras de suelo limo-arcilloso saturado, a los 5 minutos logró acumular 3,1 mm.

Tabla 20

Permeabilidad Estrato 2 – Suelo Arenoso

Estrato 2													
Medida	Tiempo (s)	Altura (cm)		Volumen acumulado (ml)	Q (Caudal)	q (Caudal por sección)	K (Conductividad hidráulica)	Gradiente hidráulico	Me Sección total o Porosidad eficaz (%)	Velocidad de Darcy	Velocidad lineal media o Velocidad Real	Velocidad observada	
0	0	93,3	95,2	1,9	0	0,000	0,000	0,000	0,020	0,4373	0,000	0,000	0,000
1	30	92	94	2	62	2,067	0,017	0,828	0,021		4,726	9,267	3,233
2	60	93	94	1	120	2,000	0,017	1,603	0,010		4,574	8,968	1,617
3	90	92	94	2	175	1,944	0,016	0,779	0,021		4,446	8,719	1,078
4	120	92	94,4	2,4	235	1,958	0,016	0,654	0,025		4,478	8,781	0,808
5	150	92	94	2	307	2,047	0,017	0,820	0,021		4,680	9,177	0,647
6	180	92	92,5	0,5	457	2,539	0,021	4,071	0,005		5,806	11,384	0,539
7	210	76,5	79,5	3	707	3,367	0,028	0,900	0,031		7,699	15,096	0,462
8	240	83	85,3	2,3	807	3,363	0,028	1,172	0,024		7,689	15,077	0,404
9	270	66	68,6	2,6	995	3,685	0,030	1,136	0,027		8,427	16,524	0,359
10	300	65	70	5	1276	4,253	0,035	0,682	0,052		9,726	19,071	0,323

Nota. Elaboración propia

Nota. El valor en promedio de la Conductividad Hidráulica (K) para el Estrato 2 es de 1,265 cm/s y de acuerdo con la referencia su conversión a $1,256 \times 10^{-2}$ m/s, resultados generados a nivel de laboratorio con muestras de suelo de la zona de estudio de tipo arenoso, el valor promedio es el que se compara con los indicadores del Código Técnico de las Edificaciones, se tomaron 10 medidas de 30 segundos cada una y con carga de agua constante.

Tabla 21

Permeabilidad Estrato 3 – Suelo Gravoso

Estrato 3													
Medida	Tiempo (s)	Altura (cm)		Volumen (ml)	Q (Caudal)	q (Caudal por sección)	K (Conductividad hidráulica)	Gradiente hidráulico	Me Sección total o Porosidad eficaz (%)	Velocidad de Darcy	Velocidad lineal media o Velocidad Real	Velocidad observada	
0	0	91	92	1	0	0,000	0,000	0,010	0,074	0,000	0,000	0,000	
1	1,5	90	91	1	250	166,667	1,377	0,010		326,797	640,779	64,667	
2	30	86	87,6	1,6	4700	156,667	1,295	0,016		307,190	602,332	3,233	
3	60	85	86	1	10000	166,667	1,377	0,010		326,797	640,779	1,617	
4	90	85	86	1	15000	166,667	1,377	0,010		326,797	640,779	1,078	
5	120	85,5	86	0,5	20000	166,667	1,377	0,005		326,797	640,779	0,808	

Nota. Elaboración propia

Nota. Los resultados fueron obtenidas en 5 medidas con lapsos de tiempo irregulares ya que la conductividad hidráulica era elevada y corresponde a suelos de tipo gravoso, el resultado promedio de K fue de 149,308 cm/s o 1,493 m/s en referencia al Código Técnico de las Edificaciones, la carga de agua fue constante durante la prueba.

La Organización de alimentos y agricultura de los Naciones Unidas (FAO, Permeabilidad del Suelo) establece indicadores de permeabilidad así como el Código Técnico de la Edificación- SE-C (2007) mediante el estudio de Permeabilidad en diferentes tipos de suelo; consideran que esta propiedad es una de las más importantes para monitorear la calidad del suelo en caso de alguna eventualidad, además se relaciona con otros parámetros como la textura y estructura, la permeabilidad varía de acuerdo a la textura del suelo, por lo general mientras el suelo contiene más finos la permeabilidad es más lenta; como es de conocimiento, el suelo está conformado por varias capas y cada una con diferentes propiedades físicas y químicas por lo que el estudio se debe hacer por separado y la permeabilidad se verá reflejado en el valor de la Conductividad Hidráulica (K) bajo los principios de la Ley de Darcy.

Para el Estrato 1, la permeabilidad es de 0,0009 cm/s o 9×10^{-6} m/s, según el Código Técnico de la Edificación-SE-C (2007) de la Comunidad de Madrid, corresponde a un suelo con las características de arena fina, limo, mezclas de arenas, limos y arcillas considerado como de permeabilidad moderada lenta, en relación con la porosidad corresponde a espacios finos pero numerosos y con ligera dispersión de partículas.

En el caso del Estrato 2, la permeabilidad es de 1,265 cm/s o $1,265 \times 10^{-2}$ m/s correspondiente a suelos de tipo arenoso, mezclas de grava y arena limpia resultando ser de permeabilidad moderada rápida, de tamaño de grano mediano lo que hacen que los poros tengan un tamaño mediano a fino y numerosos.

La permeabilidad para el Estrato 3 corresponde a suelos de tipo gravoso con un valor en promedio de 1,49 m/s resultando de permeabilidad muy rápida y en concordancia con el Código Técnico de la Edificación, la estructura es de tipo grano suelto, posee gran porosidad.

Tabla 22

Densidad Aparente de los estratos 1,2 y 3.

Muestra	Estrato 1 (Arcilla)	Estrato 2 (Arena)	Estrato 3 (Grava)
1	1,06 g/cm ³	1,23 g/cm ³	2,37 g/cm ³
2	1,04 g/cm ³	1,12 g/cm ³	2,51 g/cm ³

Nota. Elaboración propia

La densidad aparente para los suelos arcillosos y arenosos estuvo en un intervalo de 1,04 g/cm³ a 1,23 g/cm³ y para el suelo gravoso la densidad aparente fue de 2,37 g/cm³ a 2,51. Según el informe de (Antúnez, Felmer, & Vidal) indica que las densidades aparentes elevadas causan algunos problemas de compactación, eso quiere decir que estos suelos son poco probables de ocurrencia de conglomerados o compactación es decir que la filtración de algún contaminante en estos suelos no se sería disipada de una manera más rápida.

Tabla 23

Infiltración del Suelo Arcilloso

Tiempo (s)	Lámina acumulada (cm)	Velocidad (cm/s)	Tiempo Acumulado (s)	Velocidad acumulada (cm/s)
212	20	0,094	212	0,094
255	20	0,078	467	0,173
453	20	0,044	920	0,217

Nota. Elaboración propia

El parámetro de infiltración se calcula con los datos de Tiempo, lámina, velocidad, tiempo acumulado, lámina acumulada y velocidad acumulada.

El estrato 1 el cual pertenece a un suelo arcilloso tuvo una capacidad de infiltración baja debido a la resistencia que oponía el suelo ante el contacto con el agua, esto se debe a que las partículas del suelo arcilloso eran menores a 0,002 mm de diámetro originando microporos, siendo la característica principal de un suelo altamente impermeable. La velocidad fue decreciente en un intervalo de 0,094 cm/s a 0,044 cm/s en un lapso de tiempo de 212 s a 453 s.

Tabla 24.

Infiltración del Suelo Arenoso

Tiempo (s)	Lámina acumulada (cm)	Velocidad (cm/s)	Tiempo Acumulado (s)	Velocidad acumulada (cm/s)
26,740	20	0,748	26,740	0,748
406,180	20	0,049	432,920	0,797
649,340	20	0,031	1082,260	0,828

Nota. Elaboración propia

El estrato 2 el cual pertenece a un suelo arenoso tuvo una capacidad de infiltración rápida al tamaño de las partículas del suelo las cuales eran mayores a 0,02 mm de diámetro, característico de un suelo muy permeable. La velocidad de infiltración fue de 0,748 cm/s a 0,031 cm/s en un intervalo de tiempo de 26 s a 649 s.

Tabla 25.

Infiltración del Suelo Gravoso

Tiempo (s)	Lámina acumulada (cm)	Velocidad (cm/s)	Tiempo Acumulado (s)	Velocidad acumulada (cm/s)
5	20	4	5	4
6	20	3	11	7,33
12	20	1	23	9

Nota. Elaboración propia

El estrato 3 el cual pertenece a un suelo gravoso tuvo una capacidad de infiltración muy rápida debido al tamaño de su material de 6,4 mm a 9,5 mm generando una dirección de flujo directa. La velocidad de infiltración fue de 4 cm/s a 1 cm/s en un intervalo de tiempo de 5 s a 12 s.

En los ensayos de infiltración de la segunda muestra se aprecia una reducción de la velocidad a medida que transcurre el tiempo. El flujo del agua presenta dos

estados característicos los cuales son flujo laminar y flujo turbulento éstos se diferencian por la velocidad, ya que cuando se da un flujo turbulento las velocidades son mayores a diferencia del flujo laminar. Los estratos con mayores velocidades fueron los de grava y arenas, una de las características de estos estratos es que poseen vacíos debido a que son materiales más permeables. A diferencia de los suelos arcillosos el volumen ocupado por sus elementos sólidos permanece invariable mientras que el volumen de vacíos disminuye y por lo tanto la permeabilidad también se reduce.

4.2 Propiedades químicas

Tabla 26

pH de los estratos 1, 2 y 3

Muestra	Estrato 1 (Arcilla)	Estrato 2 (Arena)	Estrato 3 (Grava)
1	7,1	7,08	7,07
2	7,15	7,02	7,06

Nota. Elaboración propia

Los suelos de los tres estratos tienen un valor de pH que oscila de 7,02 a 7,1, este valor corresponde a un suelo neutro, por tal motivo se caracteriza por contener porcentajes equilibrados de elementos químicos primarios y secundarios; y es altamente fértil (Vega, 2014).

Tabla 27

Conductividad Eléctrica de los estratos 1,2 y 3.

Muestra	Estrato 1 (Arcilla)		Estrato 2 (Arena)		Estrato 3 (Grava)	
	Conductividad (dS/m)	Conductividad Absoluta (dS/m ^Λ)	Conductividad (dS/m)	Conductividad Absoluta (dS/m)	Conductividad (dS/m)	Conductividad Absoluta (dS/m)
1	1,002	0,91	0,708	0,642	0,10	0,091
2	0,987	0,89	0,65	0,588	0,105	0,095

Nota. Elaboración propia

Según (Havlin, Tisdale, Nelson, & Beaton, 2013) en la siguiente tabla:

Tabla 28

Grupo de suelo	CE	Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	pH del suelo
Salino	>4	>15	<8,5
Sódico	<4	>15	>8,5
Salino-sódico	>4	>15	<8,5

Como se ve en la Tabla 27 sobre los resultados de la conductividad eléctrica las muestras 1 y 2 pertenecen a un suelo sódico es decir estos suelos contienen alta cantidad de Sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles. Las consecuencias de un suelo sódico es que al exceder en Sodio puede tener un efecto adverso sobre el crecimiento de las plantas y en la estructura del suelo (Gallart Martínez, 2017).

Basado en todos los estudios se presenta un resumen de los datos expuestos y de los procedimientos desarrollados:

	1	20	212	0,094	20	26,74	0,748	20	5	4
	2	20	467	0,173	20	432,92	0,797	20	11	7,33
	3	20	920	0,217	20	1082,2 6	0,828	20	23	9
Propiedades químicas										
		E1			E2			E3		
pH	1	7,1			7,08			7,07		
	3	7,15			7,02			7,06		
Conductividad Eléctrica		Coductividad (uS/cm)	Conductividad Absoluta(uS/c mA)		Coductividad (uS/cm)	Conductividad Absoluta (uS/cmA)		Coductividad (uS/cm)	Conductividad Absoluta (uS/cmA)	
		E1			E2			E3		
	1	1002	910		708	642		100	91	
	2	987	896		650	588		105	95	

Nota. Elaboración propia

4.3 Modelamiento Unidimensional

El modelamiento inicia con la creación de un panorama parecido a la zona de estudio, la misma de donde se extrajo el material de análisis, definimos la geometría:

Tabla 30.

Geometría de la Región de Flujo

Puntos	X(m)	Y(m)
Point 1	0	3
Point 2	1	3
Point 3	1	0
Point 4	0	0
Point 5	1,25	3,5
Point 6	1,25	0
Point 7	1,5	4
Point 8	1,5	0
Point 9	5	4
Point 10	5	0

Point 11	5,5	1
Point 12	5,5	0
Point 13	6	1
Point 14	6	0

Nota. Elaboración propia

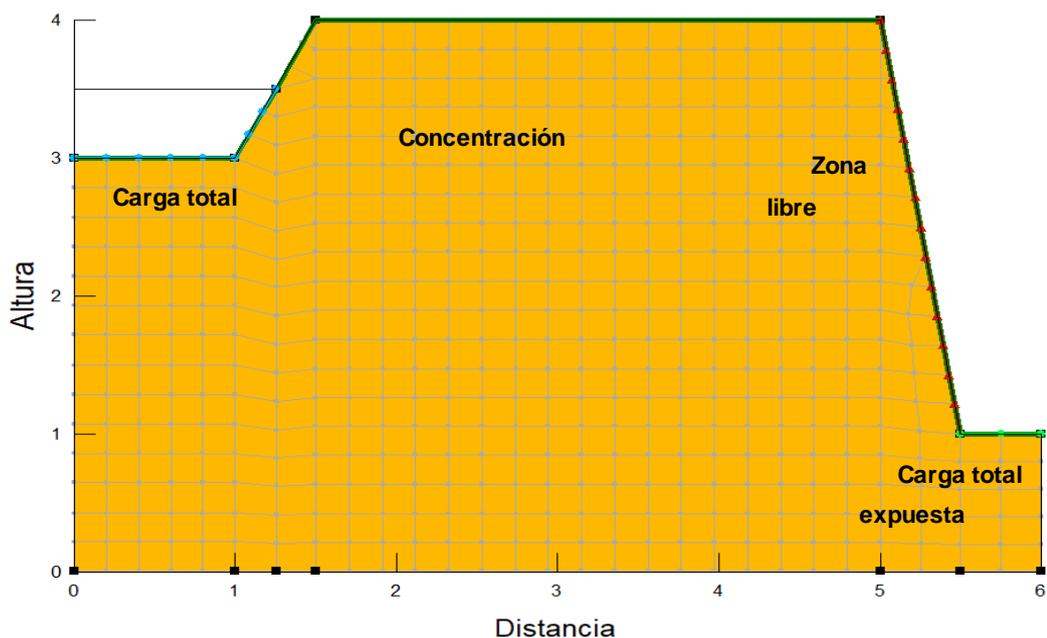


Figura 26. A

Figura A. Ingreso de datos para Condiciones de límite, materiales, Funciones hidráulicas, Concentración, determinación de la malla de elementos finitos y datos asumidos para el modelamiento. Carga Total: 3.5 m, Concentración: 5 kg/m³, Zona libre: 0 m³/día, Carga Total expuesta: 1m y Modelo: Zona Saturada.

1. Para suelo de tipos limo – arcilloso:

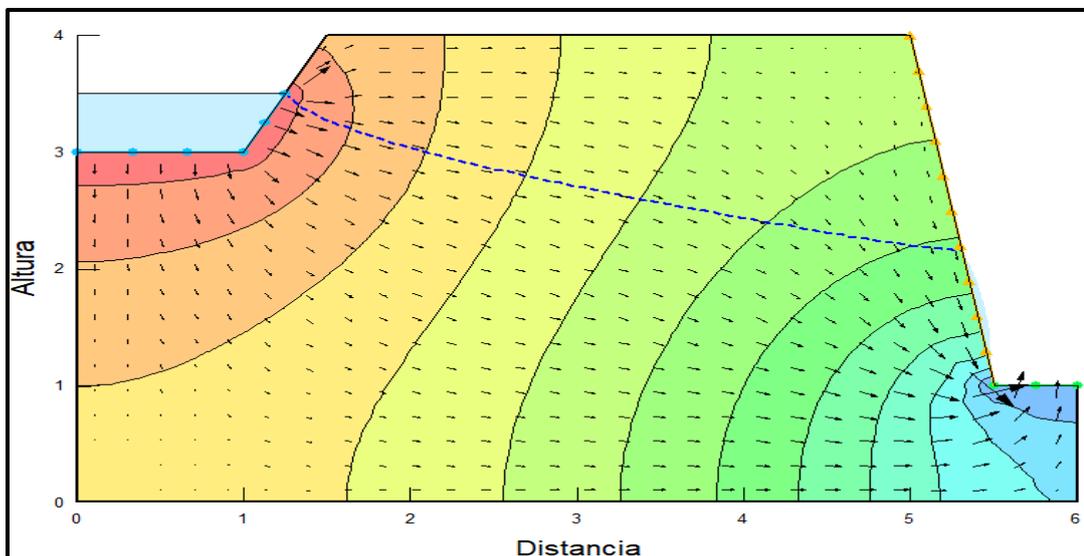


Figura 27. B Distribución de flujo obtenido con SEEP/W, dirección del flujo consideramos la Conductividad hidráulica: 9×10^{-6} . Elaboración propia

Para determinar el tiempo, concentración y dispersión del contaminante corresponde ingresar a la plataforma de CTRAN/W para un análisis de advección-dispersión, se toma en cuenta que el contaminante tiene presencia de forma constante dentro de la carga total ingresada.

Tabla 31.

Parámetros del Contaminante

Parámetro	Valor
Dispersividad longitudinal	0,97 m
Dispersividad transversal	0,11 m
Concentración	5 kg/m ³
Tiempo de simulación	365 días

Nota. Elaboración propia

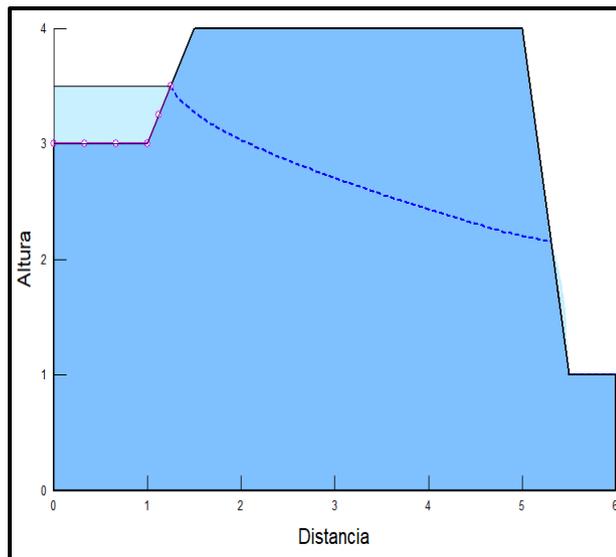


Figura 28. Dispersión del contaminante en el Día 0

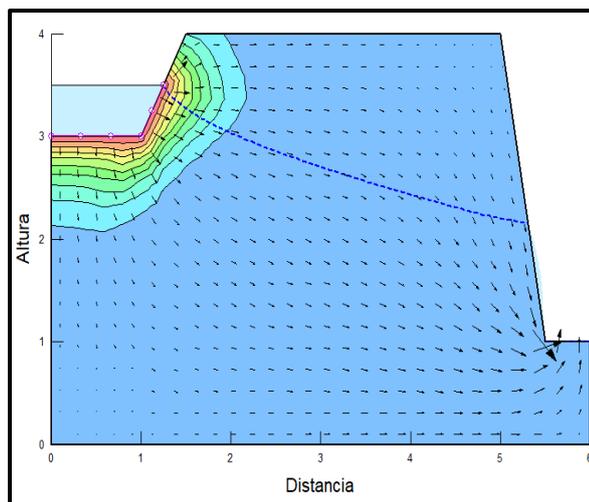


Figura 29. Dispersión del contaminante en el Día 36

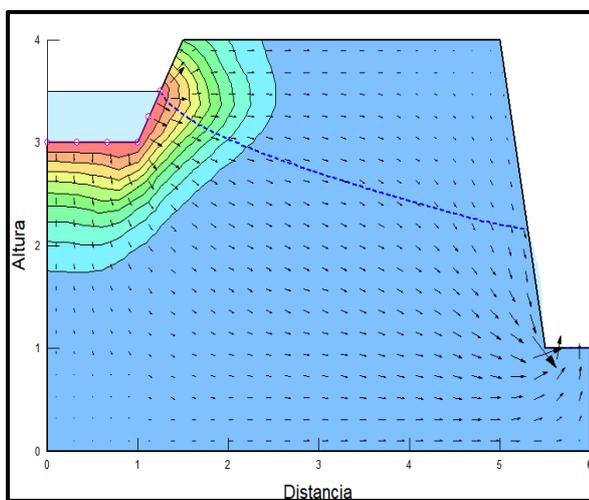


Figura 30. Dispersión del contaminante en el día 73

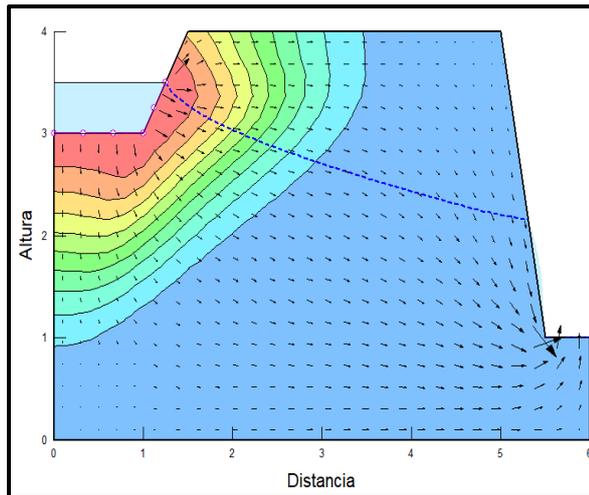


Figura 31. Dispersión del contaminante en el día 146

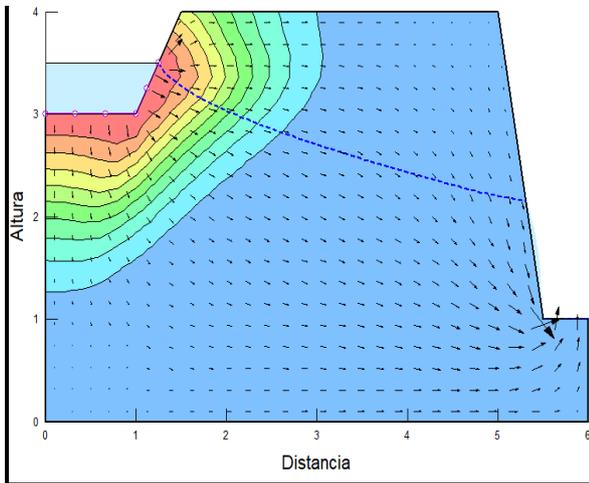


Figura 32. Dispersión del contaminante en el día 219

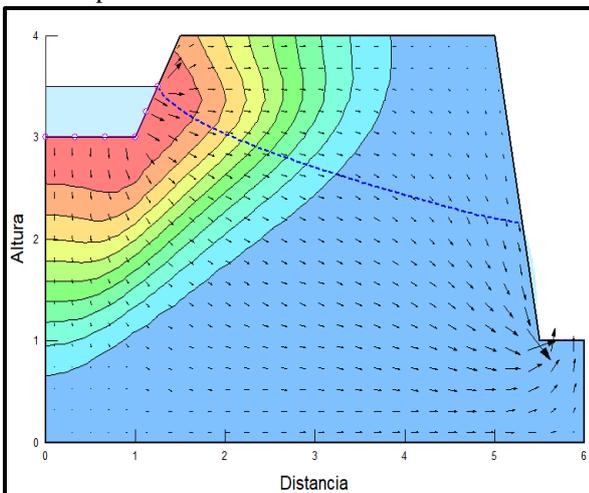


Figura 33. Dispersión del contaminante en el día 292

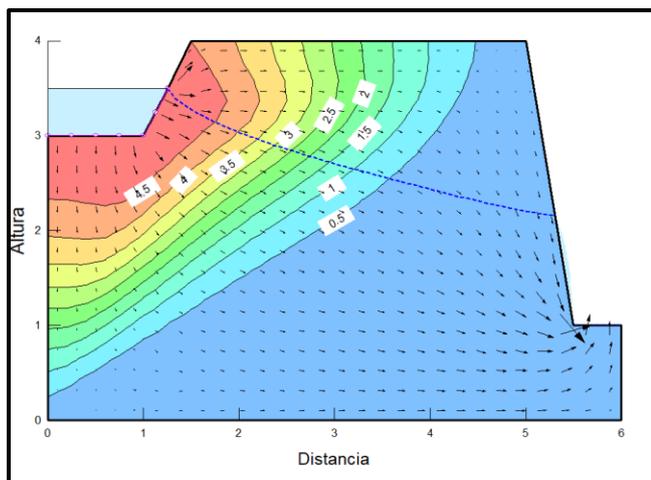


Figura 34. Dispersión del contaminante en el día 365

Basado en los resultados que generamos en los análisis de Permeabilidad, infiltración, textura y características del tipo de suelo limo-arcilloso, podemos verificar que la dispersión del contaminante es mínimo (Figura 34-365 días), a los 365 días el avance es de 0,48 m en promedio y la concentración se reduce a $0,232 \text{ g/m}^3$ a una distancia de 2,47 m de forma vertical, en las imágenes se puede observar la mancha de contaminación que se ha generado durante el tiempo de simulación.

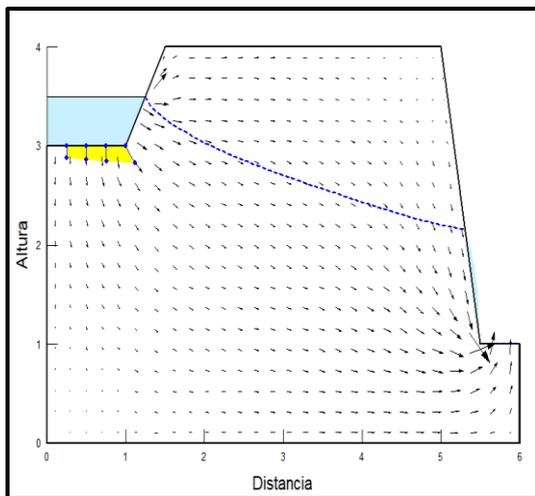


Figura 36. Análisis de la trayectoria de la partícula en el día 36

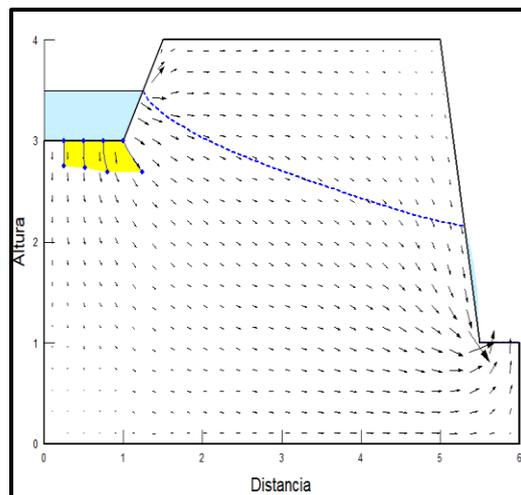


Figura 35. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 73

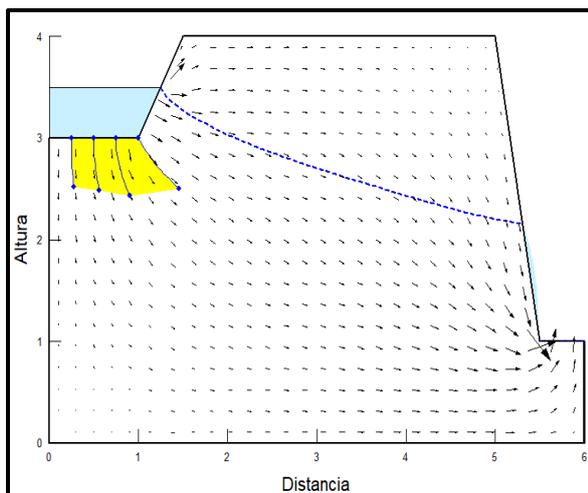


Figura 37. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 109

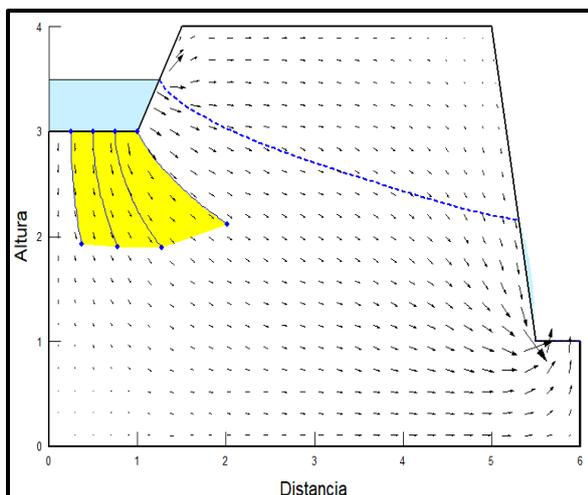


Figura 38. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 365

Tabla 32.

Información de Partículas Basado en la Distancia Recorrida (m)

Partículas	36 días	73 días	109 días	365 días
Partícula 1	0,124	0,246	0,366	1,080
Partícula 2	0,134	0,267	0,378	1,145
Partícula 3	0,158	0,312	0,461	1,245
Partícula 4	0,211	0,390	0,536	1,360

Nota. Elaboración propia

Nota. Se consideraron 4 partículas en la base de la carga total, los cuales tuvieron una distancia recorrida de acuerdo a los tiempos establecidos, y en promedio su velocidad fue de 0,0034m/días.

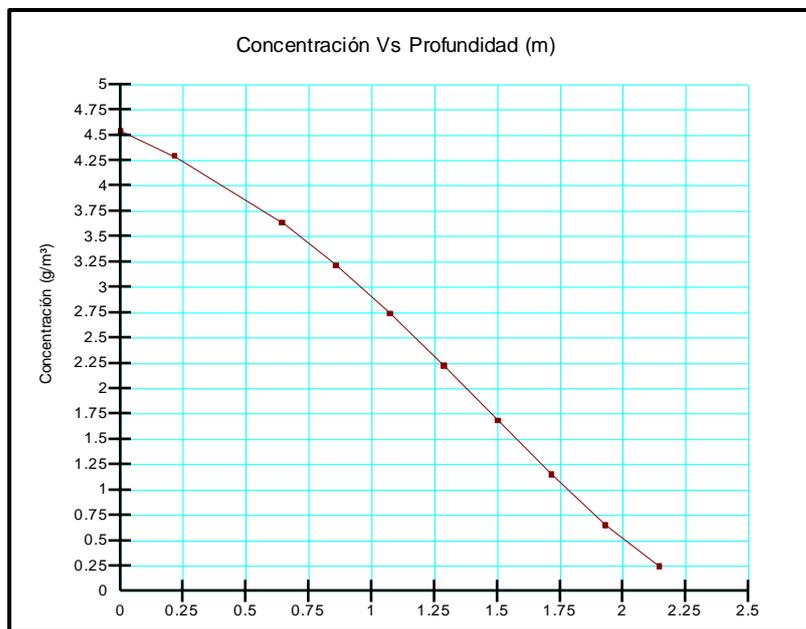


Figura 39. Relación entre Profundidad (m) y Concentración (g/m³) en un período de 365 días, la concentración del contaminante claramente disminuye conforme se incrementa la profundidad.

2. Para suelos de tipo Arenoso

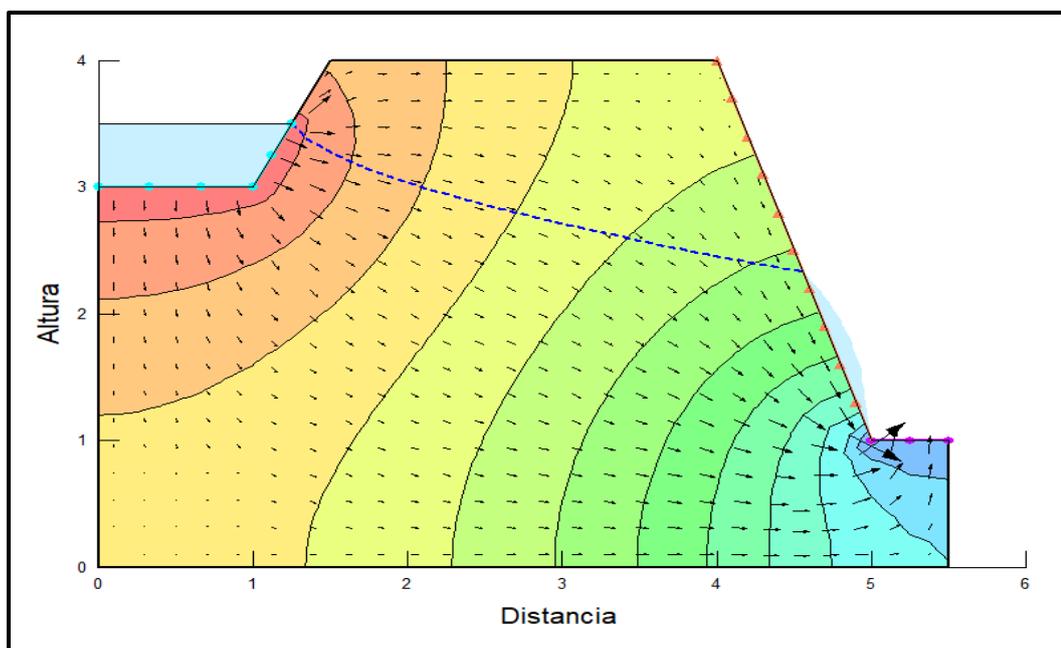


Figura 40. Distribución de flujo obtenido con SEEP/W, dirección del flujo, consideramos la Conductividad hidráulica: 1.265×10^{-2} m/s

Tabla 33.

Parámetros del Contaminante

Parámetro	Valor
Dispersividad longitudinal	0,97 m
Dispersividad transversal	0,11 m
Concentración	5 kg/m ³
Tiempo de simulación	90 días

Nota. Elaboración propia

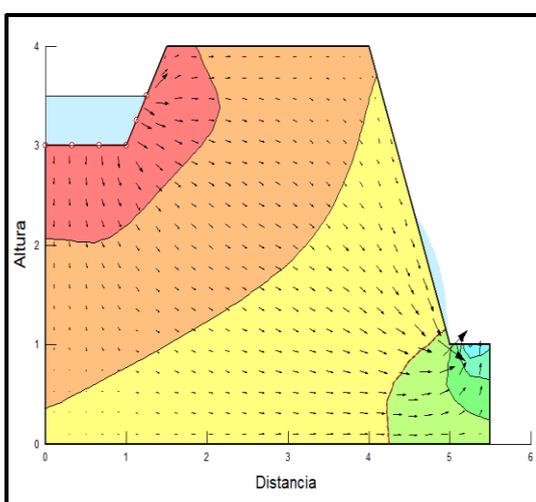


Figura 41. Dispersión del contaminante en el día 9

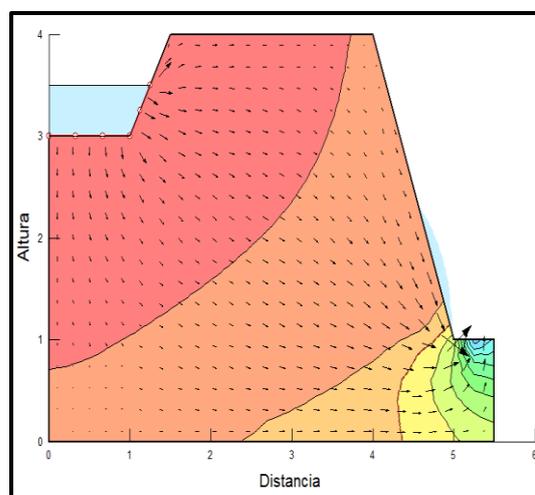


Figura 42. Dispersión del contaminante en el día 18

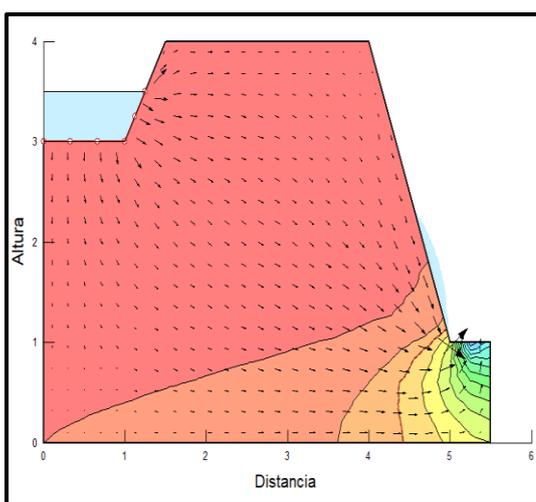


Figura 43. Dispersión del contaminante en el día 27

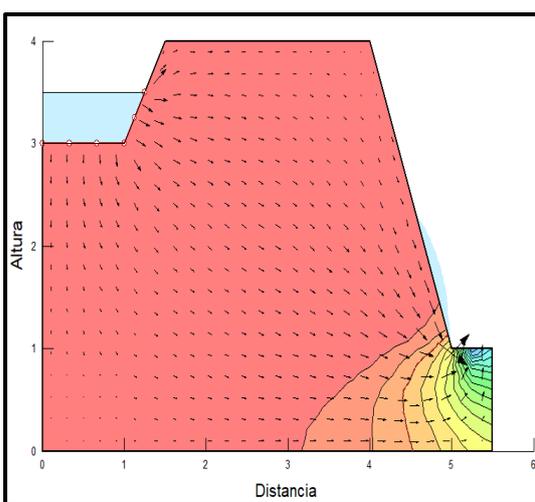


Figura 44. Dispersión del contaminante en el día 90

Basado en los resultados que generamos en los análisis de Permeabilidad, infiltración, textura y características del tipo de suelo arenoso, podemos verificar que la dispersión del contaminante es mínima (Figura 44-90 días), a los 90 días el avance es de 3,256 m en promedio y la concentración del contaminante se mantiene en una extensa zona, en las imágenes se puede observar la mancha de contaminación que se ha generado durante el tiempo de simulación.

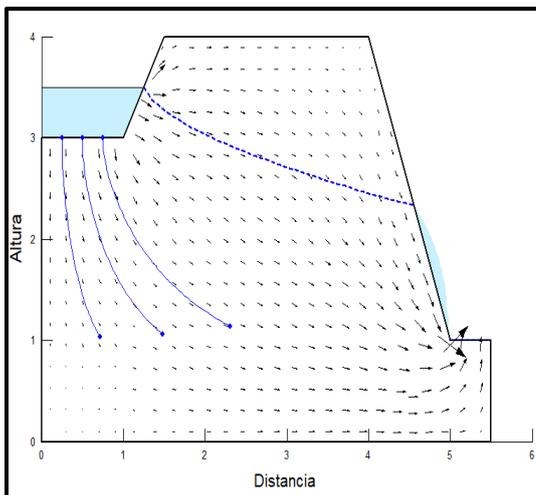


Figura 45. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 9

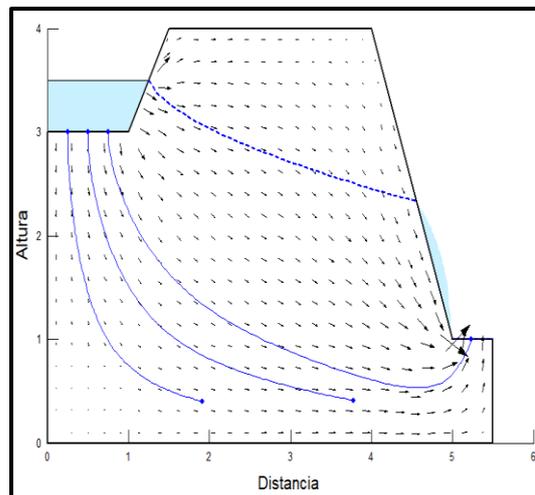


Figura 46. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 18

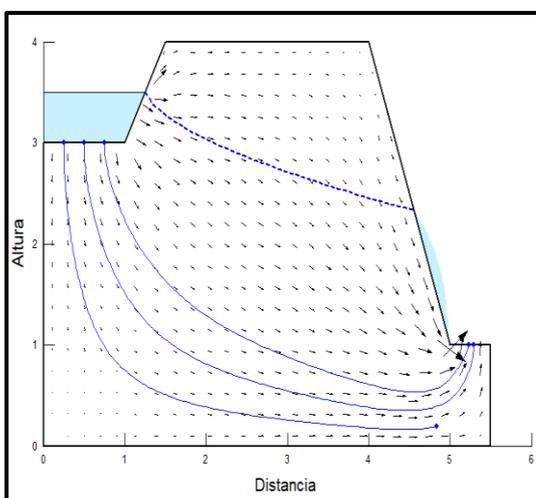


Figura 47. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 27

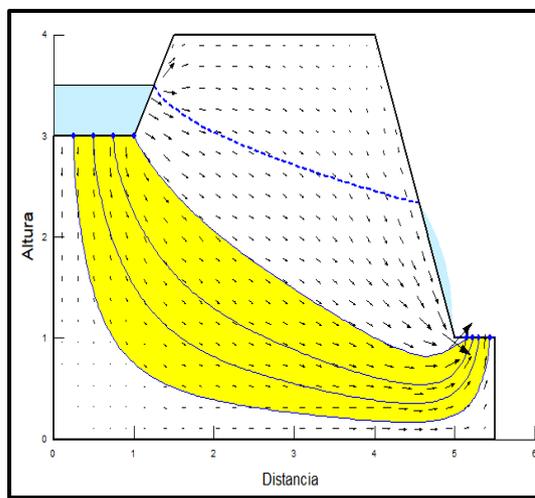


Figura 48. Análisis de trayectoria de la partícula en el día 29

Tabla 34.

Información de Partículas Basado en la Distancia Recorrida (m)

Partículas	9 días	18 días	27 días	29 días
Partícula 1	2,038	4,860	-	-
Partícula 2	2,256	5,766	-	-
Partícula 3	2,549	4,657	6,528	-
Partícula 4	2,907	3,388	6,362	7,471

Nota. Elaboración propia

Nota. Se consideraron 4 partículas en la base de la carga total, los cuales tuvieron una distancia recorrida de acuerdo a los tiempos establecidos, y en promedio su velocidad fue de 0,245 m/días.

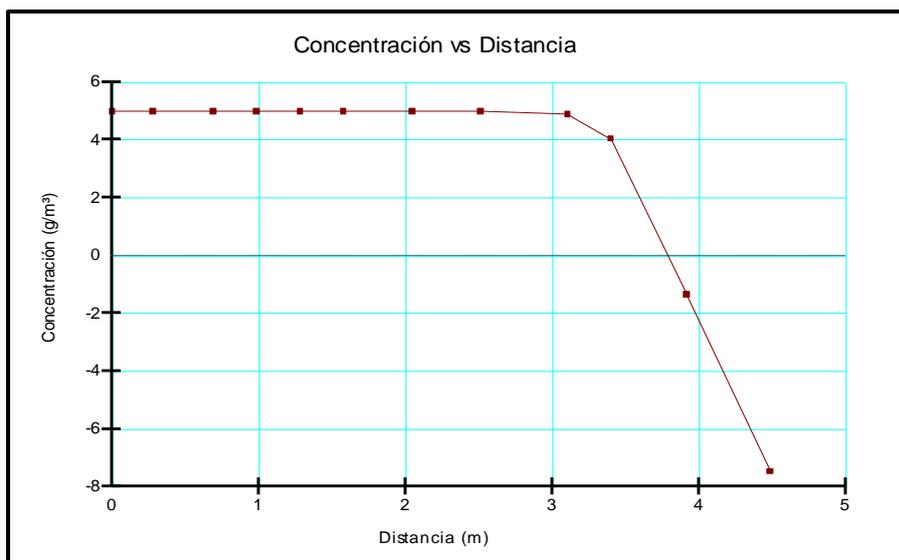


Figura 49. Relación entre Distancia (m) y Concentración (g/m³) en un periodo de 90 días, la concentración del contaminante claramente disminuye conforme se incrementa la distancia.

3. Para suelos de tipo Gravoso

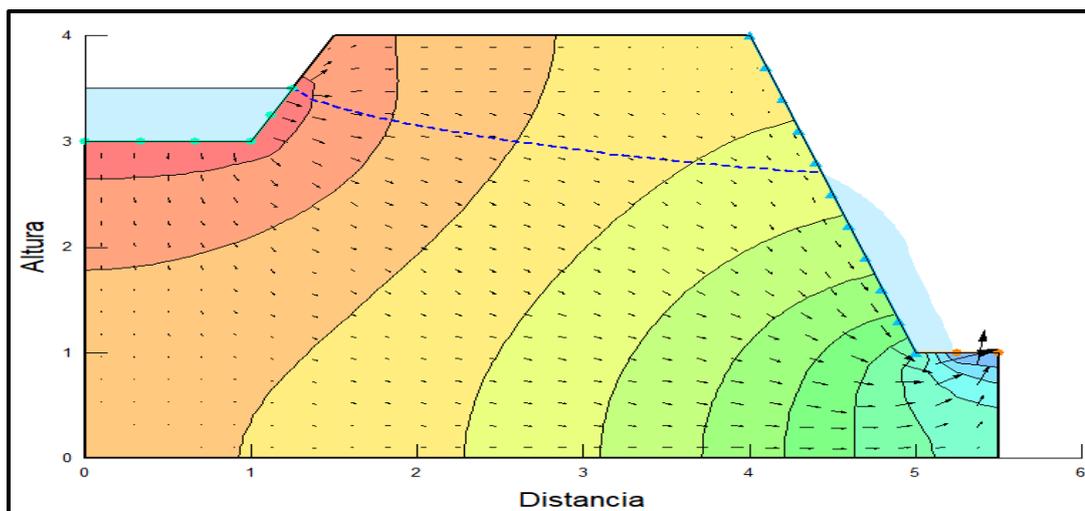


Figura 50. Distribución de flujo obtenido con SEEP/W, dirección del flujo, consideramos la Conductividad hidráulica: 1,493 m/s

Tabla 35.

Parámetros del Contaminante.

Parámetro	Valor
Dispersividad longitudinal	0,97 m
Dispersividad transversal	0,11 m
Concentración	5 kg/m ³
Tiempo de simulación	3 días

Fuente. Elaboración propia

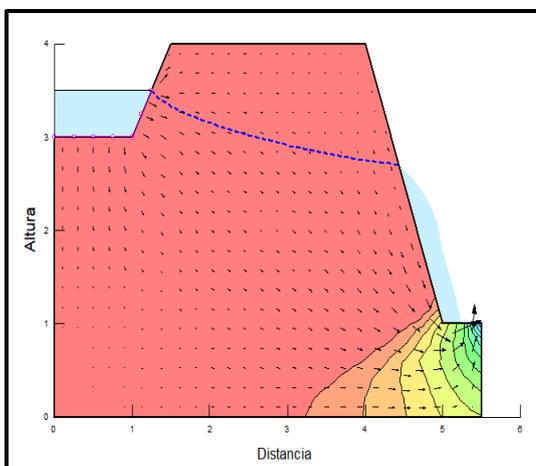


Figura 51. Dispersión del contaminante después de 14,4 hrs.

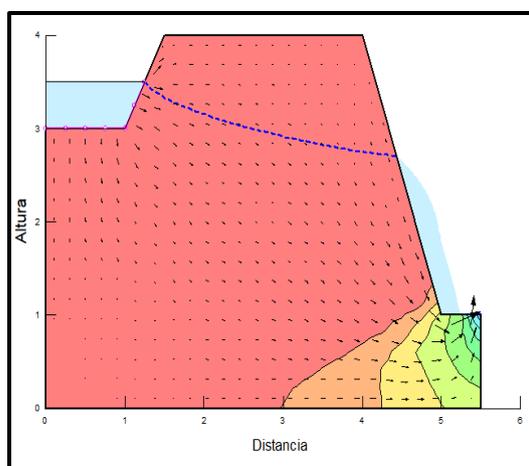


Figura 52. Dispersión del contaminante pasado los 1,2 días

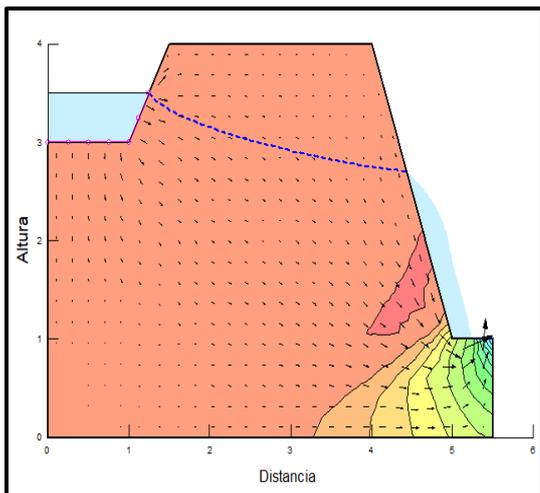


Figura 53. Dispersión del contaminante después de 2,4 días

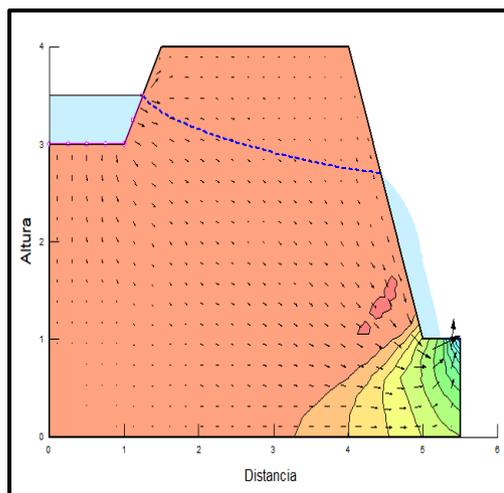


Figura 54. Dispersión del contaminante después de 3 días

Como se observa en la Figura 53 (2,4 día) y Figura 54 (3 días), la concentración del contaminante se ha reducido a $3,85 \text{ g/m}^3$ luego de pasado 2,4 días, empujando al contaminante hasta disiparse completamente durante el periodo de simulación. En concordancia con estudios como el de Agustín A. Millar (1997), los valores de K son característicos para cada tipo de suelos Karena $>$ Karcilla, la densidad de flujo en suelos saturados de diferentes texturas se da con esta secuencia: Grava>Arena>Limo-arcilloso, el flujo siempre será mayor en suelo saturados la conductividad es constante.

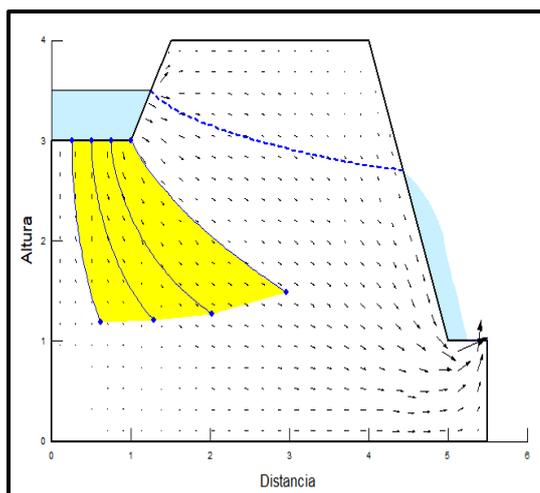


Figura 55. Análisis de trayectoria de la partícula pasado las 7,2 hrs

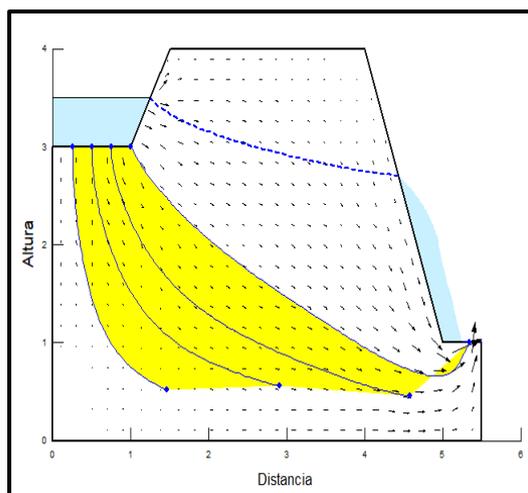


Figura 56. Análisis de trayectoria de la partícula pasado las 14,4 hrs

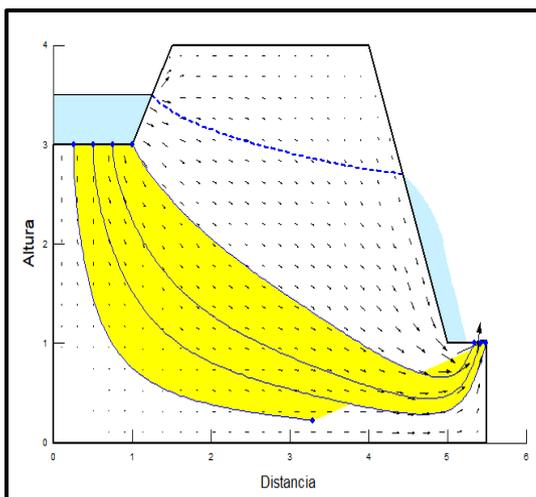


Figura 58. Análisis de trayectoria de la partícula pasando 21,6 hrs.

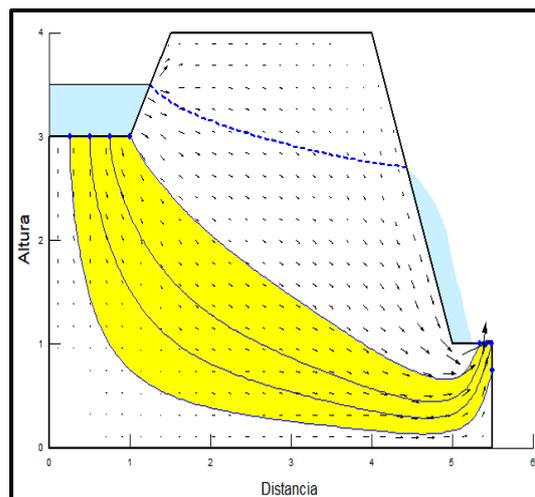


Figura 57. Análisis de trayectoria de la partícula pasando 1,2 días.

Tabla 36.

Información de Partículas Basado en la Distancia Recorrida (m)

Partículas	7,2 hrs	14,4 hrs	21,6 hrs	1,2 días
Partícula 1	1,860	2,971	4,813	7,355
Partícula 2	2,008	3,778	6,762	-
Partícula 3	2,231	4,929	6,048	-
Partícula 4	2,486	5,221	-	-

Nota. Elaboración propia

Nota. Se consideraron 4 partículas en la base de la carga total, los cuales tuvieron una distancia recorrida de acuerdo a los tiempos establecidos, y en promedio su velocidad fue de 8,205 m/días.

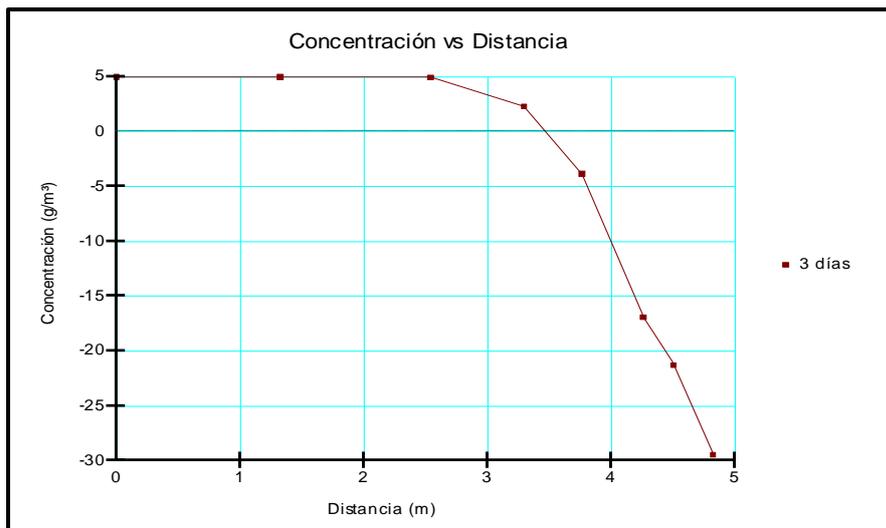


Figura 59. Relación entre Distancia (m) y Concentración (g/m³) en un periodo de 3 días, la concentración del contaminante claramente disminuye conforme se incrementa la distancia

El transporte de contaminantes en medio poroso o altamente poroso disminuye la concentración del contaminante debido a las reacciones químicas que se presentan al entrar en contacto con las partículas del suelo, o el fluido presente en los poros, las expresiones matemáticas ayudan a aproximarnos a un escenario más real de acuerdo basado en los resultados de la caracterización de suelos de la zona de estudio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. El comportamiento del agua en el suelo es el principal mecanismo para determinar el transporte de elementos contaminantes en una zona saturada, y este es afectado con procesos físicos y químicos, así como con las funciones hidráulicas del suelo determinadas en base a las mediciones en campo y su posterior modelamiento.
2. El color del estrato 1 presenta las características de un suelo con alto contenido orgánico y de acuerdo a la Tabla de Munsell, aunque los dos puntos difirieron levemente, se determinó que es un suelo media fertilidad, mientras en el Estrato 2, el suelo es de media baja fertilidad y en el Estrato 3 la fertilidad es nula, los colores son determinantes para reconocer la capacidad del suelo y su posible constitución.
3. De acuerdo con el Cuadro de clasificación USCS se determinó que el Estrato 1 corresponde a suelo de tipo arcilloso, el estrato 2 es un suelo de tipo arenoso y, por último, el Estrato 3 presenta las características de un suelo gravoso.
4. Los límites de Attenberg determinan el índice de plasticidad, para el Estrato 1 los resultados determinaron que presenta un índice de Plasticidad entre 6,14 y 6,25 característicos en suelos arcillosos, mientras que en el Estrato 2 y 3 de tipo arenoso y gravoso respectivamente la plasticidad presenta valores negativos de -0,09 y -1,48, lo que significa que no tiene plasticidad
5. La porosidad para el Estrato 1 es de 28,3%, está íntimamente relacionada con la textura lo que significa que el suelo es arcilloso y la permeabilidad es mínima, mientras que el Estrato 2, la porosidad es de 41,67% con poros de tamaño medio, y por último el Estrato 3 con una porosidad de 54%, lo que significa que el tamaño de poro va desde 0,2 a 7,5 cm lo que lo hace bastante permeable.
6. La humedad para el Estrato 1 es del 45,66%, para el Estrato 2 de 28,83% y para el Estrato 3 de 16,5%, claramente el porcentaje de humedad está relacionado con la capacidad del suelo para el desarrollo de cultivos y por su capacidad de almacenar agua.

7. La densidad aparente para el Estrato 1 y Estrato 2 varía entre 1 y 1,23 g/cm³, la variabilidad se debe a las diferencias en la porosidad a causa de la textura, mientras la textura sea más fina la densidad aparente ira disminuyendo.
8. El potencial de infiltración para suelos limo-arcillosos presenta una velocidad de 0,217 cm/s en una profundidad de 60 cm de suelo, para suelo de tipo arenoso la velocidad es de 0,828 cm/s y para suelos en el que predomina la grava la velocidad es de 9 cm/s en un perfil de 60 cm, los datos fueron obtenidos en una columna experimental con un perfil de suelo de 60 cm.
9. Los Estrato 1, 2 y 3 presentan valores correspondientes a suelos de pH neutro.
10. La permeabilidad es una propiedad hidráulica del suelo, es fundamental para determinar la conductividad hidráulica (K) y desarrollar un modelo basado en características reales de diferentes tipos de suelo, el estudio arrojó que para suelos de tipos limo-arcilloso la conductividad Hidráulica es de 9×10^{-6} m/s, para arena $1,256 \times 10^{-2}$ m/s y para suelos de tipo gravoso 1,493 m/s.
11. El modelo para elementos finitos según la plataforma SEEP/W y CTRAN/W demuestran que los suelos de tipo limo-arcilloso (Estrato 1) presentan una dispersión mínima que solo alcanza 0,48 m en un periodo de 365 días, los suelos de tipo arenoso (Estrato 2) avanzan 3,256 m en un periodo de 90 días, su dispersión es mediana y los suelos de tipo gravoso (Estrato 3) presentan dispersión rápida.
12. El desarrollo de nuevos modelos matemáticos y programas de especialidad, permite desarrollar problemas en materia ambiental que involucra también procesos geoquímicos.
13. Los resultados de los parámetros físicos, químicos e hidráulicos fueron determinantes para desarrollar el modelo unidimensional y generar un resultado muy pegado a la realidad.

RECOMENDACIONES

Se recomienda identificar acuíferos, cuerpos de agua y zonas con potencial de ser contaminados y desarrollar el estudio para determinar el tiempo y en qué medida puede ser vulnerado.

Considerar la densidad de distintos elementos contaminantes, dependiendo de su estado, elaborar una caracterización de las mismas.

Se recomienda utilizar esta tesis como prueba preliminar para desarrollar simulaciones de contaminación por aguas residuales en la zona de Viñani ubicado en el distrito Gregorio Albarracín Lanchipa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambiente, M., Unidos, E., & Tecnol, I. (1996). Guía del ciudadano: Atenuación natural, 1–4.
- Aguilera, N. (1989). Tratado de edafología de Mexico. México: Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional autónoma de Mexico.
- ANA. (2010). *Evaluación de recursos Hidricos Cuencas de los Ríos Locumba y Sama*. Lima: Ministerio de Agricultura. Obtenido de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/evaluacion_de_rh_superficiales_locumba_-_sama_0.pdf
- Antúnez, A., Felmer, S., & Vidal, M. (s.f.). Propiedades físico-hídricas del suelo en el cultivo. *Riego por Pulsos*, 31.
- ASTM. (s.f.). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils.
- Ávila Armas, D., & Silva Vásquez, C. (2010). *Tratamiento de lixiviados diluido con aguas residuales en una planta piloto a escala de un sistema de lodos activados con el fin de lograr un efluente óptimo*. Lima.
- Bagchi, A. (1994). *Design, Construction, and Monitoring of Landfills*.
- Buendía, H. (Noviembre de 2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol. *Instituto de Investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 123-130.
- Cifuentes, W. R. (2005). *Estudio Practico, teorico y numerico de la atenuación natutal e suelos naturales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Cuarto, T. &. (2018). *TABLA MUNSELL: TEORÍA Y PRÁCTICA*. 10.13140/RG.2.2.10998.65602. .
- D. Sharma, Hari & R. Reddy, Krishna. (2004). *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment and Emerging Waste Management Technologies*.

- Domínguez Soto, J., Román Gutierrez, A., Prieto García, F., & Acevedo, S. O. (2011). *Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos*. Ciudad de México.
- Duque Escobar, G. (2016). Manual de geología para ingenieros. *Geomecánica*.
- E, C., & Vilaro, F. (1976). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega.
- FAO. (2010). *Training Edafología*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm
- FAO. (s.f.). *Permeabilidad del Suelo*. Obtenido de Food and Agriculture Organization of The United Nations: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- Fernández, D. (10 de Agosto de 2008). *Multiphase Flow and Transport*. Obtenido de Grup d'Hidrologia Subterrània : <http://www.h2ogeo.upc.es/docencia/flujo/20y%20Transporte%20Multifase/>
- Francisca, F. (2013). *Flujo y transporte de contaminantes a través de barreras de limos pampeanos compactados*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Francisca, Franco; Cuestas, G.A; Rinaldi, Víctor. (1998). *Estudio de permeabilidad en limos loessicos*.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. *Prentice Hall Inc*.
- Gallart Martínez, F. (2017). *La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del Parque Natural de la Albufera de Valencia*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- González Rojas, E. H. (2011). *Conceptos y estrategias de biorremediación*. Bogotá: Universidad Antonio Nariño.
- Greenkorn, R. (1983). Flow phenomena in porous media. *Fundamentals and application in petroleum, water, food production*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2013). *Soil Fertility and fertilizers an introduction to nutrient management*.

- Herández Puentes, M. (2010). Evaluación de la adsorción del Percloroetileno y Tricloroetileno en la zona saturada de dos tipos de suelo. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- IARC. (2016). *Agencia para sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades* . Obtenido de Centro Internacional de Investigaciones sobre el cáncer: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts102.html
- Iturbe, A. (1997). Transporte y dispersión de compuestos químicos orgánicos (Hidrocarburos Alifáticos Halogenados) a través del flujo en medio poroso. Series de Instituto de Ingeniería.
- Lambe, T. (1999). Mecánica de Suelos. México.
- Leyva Cardoso, D. O. (2006). *Comparación de técnicas de saneamiento en un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo de Tabasco*. Tabasco: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y doctorado en Ingeniería.
- Mafla Ch., F. (2007). Sistemas de contención de lixiviados en rellenos sanitarios y su efecto en la contaminación de aguas subterráneas. *UNIMAR*, 23-35.
- Márquez Pacheco, H. (2009). Atenuación natural de atrazina en perfiles de suelo de guasave.
- Márquez Pacheco, H. (2009). *Atenuación natural de atrazina en perfiles de suelo de Guasave, Sinaloa*. Morelos: Programa de maestría y doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martinez, J., Mallo, M., Álvarez, J., Salvarrey, A., & Gristo, P. (2005). *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos*. Montevideo, Uruguay.
- Mendoza, M., & Orosco, M. (2000). Técnicas Alternativas para la determinación del Límite Líquido de Suelos. Mexico: Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Menéndez, A. (2010). *Transporte de contaminantes en el medio acuático*. Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, Maestría en Ingeniería Ambiental.
- Ménendez, A. (2010). *Transporte de contaminantes en el medio acuático*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Millar, A. (1997). Manejo de agua y producción agrícola . Chile: Institutp Interamericano de Cooperación para la Agricultura .

- Monteith, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. En *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* (págs. 1-27).
- Montoya, S. (2013). Modelamiento de transportes de contaminantes de botaderos mineros y depósitos de relaves. *Civilizate*, 53-56.
- Mosquera Lenti, F. (2017). *Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el Valle del Mantaro*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Muskus Morales, Angelica Maria; Santoyo Muñoz, Claudia; Plata Quintero, Luijesmarth Silvia. (2013). Evaluación de las técnicas de atenuación natural, bioventing, bioaumentación y bioaumentación-bioventing, para la degradación de diésel en un suelo arenoso, en experimentos en columna. *Gestión y Ambiente*, 83-94.
- Ortiz Salas, C. (2011). *Determinación del peligro sísmico de la región Tacna*. Tacna.
- Osorio, S. (Noviembre de 2010). *Geotecnia*. Obtenido de https://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html
- OVCN. (Septiembre de 2007). Oficina de Vivienda. (Pag. 146). Obtenido de Comunidad de Madrid: <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1310559772684&sbinary=true>
- Palacios Tovar, C. A. (2006). *Simulación de flujo y transporte de contaminantes de acuífero del Alto Chicama en régimen estacionario y transitorio*. Lima: Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería.
- Pelekani, C., & Snoeyink, V. (1999). Competitive adsorption in natural water. *Role of activated carbon pore size*, 1209- 1219. *Water and research* Vol. 33 No. 5.
- Pérez Robles, Samia Leisa, Silva Melo, Ivette Catherine, Peñuela Mesa, Gustavo Antonio, & Cardona Gallo, Santiago Alonso. (2015). Evaluación de biocombustibles e hidrocarburos del petróleo (gasolina y diesel) en un suelo: proceso de transporte y biorremediación. *Revista EIA*, 21-46.
- Persicani, D. (1995). Evaluation of soil classification and kriging for mapping herbicide leaching simulated by two models. *Soil Technology* 8, 17-30.

- Pizarro, R., Flores, P., Sangüesa, C., & Martínez, E. (s.f.). Curvas de infiltración. *Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos*, 6.
- Puglla, J., & Ramírez, M. (s.f.). *El color del suelo y la textura como propiedades de diagnóstico*. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Reyna, T. M. (2014). Aplicación de modelos unidimensionales de flujo en suelos no saturados y transporte de herbicidas en zonas agrícolas. *Revista Ambiente & Agua*, 9(3); 434-444.
- Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, M. J., & Friedman, S. P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. En *VAdose Zone Journal* (págs. 444-475).
- Rodriguez Bazan, J. (2009). *Mitigación y biorremediación de suelos contaminados por el derrame de combustible diesel 2 en la Quebrada del Toro, Camaná, 2009*. Arequipa: EAPIA.
- Rodriguez Zúñiga, J. (Noviembre de 2014). *Uso de solventes orgánicos en la extracción de diésel de un suelo contaminado*. Buenavista- Saltillo: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de ciencias del suelo, .
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo: Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Dpto. suelos y aguas.
- Sánchez San Román, F. (2012). Transporte de contaminantes. 1-13.
- Schwille, F. (1988). *Dense chlorinated Solvents in porous and fractured media, model experiments*. Chelsea: Lewis Publisher, Inc.
- Serrano-Guzmán, M. F., Forero Sarmiento, J. C., Guzmán Arias, D. A., & Pérez Ruiz, D. D. (2012). Predicción del tiempo de transporte de un contaminante en suelo arenoso. *Revista Educación En Ingeniería*, 7(13), 74-82.
- Silva, R. (2007). Transporte no pasivo de compuestos orgánicos volátiles en la zona no saturada. Vigili, España.
- Singhal, Naresh & Islam, Jubayr. (2008). One-dimensional model for biogeochemical interactions and permeability reduction in soils during leachate permeation. *Journal of contaminant hydrology*, 47.
- Thompson, L., & Troeh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté S.A.

Tol Urizar, Jackelyn y Cali Arriaga, Julia. (2015). *Evaluación de los métodos de atenuación natural con estiércol bovino, Oil Gator y SCD Bio Klean para la biorremediación de suelos impactados con diesel y aceite, en la Mina Marlin, San Miguel Ixtahuacán, San Marcos*. San Miguel Ixtahuacán: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Vega, M. R. (2014). *FECTO DE LA MATERIA ORGANICA Y ENCALADO DEL SUELO EN CEBADA*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.

Villazón, Mauricio; Oporto, Carla; Álvarez, Mercedes; Tapia, Diego; Canaviri, Carol; Guaygua, José Luis. (Octubre de 2015). *Modelación matemática de contaminantes (metales pesados y pesticidas) en columnas de suelo, caso de estudio: Cochabamba-Bolivia*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simon.

White, R. (2005). *Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource*. Oxford: Blackwell, 384.

Wilmans Cifuentes, W. (2005). *Estudio práctico, teórico y numérico acerca de la atenuación natural en suelos naturales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

INTERROGANTE DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOS	PRUEBA ESTADÍSTICA O ESTRATEGIA
<p>¿Cómo determinar el comportamiento en el transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelos?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL Generar un modelo unidimensional para el transporte de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelo.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL El modelo unidimensional permite reconocer el comportamiento de elementos contaminantes en diferentes tipos de suelo.</p>	<p>Variable independiente Propiedades físicas y químicas</p>	<p>Parámetros físicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Color • Textura • Límites de Attenberg • Porosidad • Humedad • Densidad aparente <p>Parámetros químicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • pH • Conductividad eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis físico-químico • Tabla de Munsell • Cuadro USCS • American Society for Testing and Materials (ASTM) para índice de plasticidad • Diferencias de peso (seco y húmedo) • Métodos estandarizados 	<p>Se tomaron dos muestras para reducir el margen de error y como comparativo</p>

	<p>Objetivos Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar las propiedades físicas, químicas e hidráulicas de los diferentes tipos de suelos. • Generar de forma experimental el transporte de contaminantes en diferentes tipos de suelos utilizando columnas de experimentación. • Identificar las principales variables de flujo y transporte para elementos contaminantes mediante un análisis acoplado con las plataformas SEEP/W y CTRAN/W del código Geostudio fundamentado en el método de elementos finitos para suelos saturados 	<p>Hipótesis Específica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar propiedades físicas, químicas e hidráulicas en los diferentes tipos de suelos para analizar el transporte de contaminantes. • Usar columnas de forma experimental en diferentes tipos de suelos para ver el transporte de contaminantes. • Hacer uso de diferentes escenarios para determinar el transporte de contaminantes en zonas saturadas. 	<p>Variable dependiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transporte de contaminantes en distintos tipos de suelos • Velocidad de infiltración 	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad • Infiltración 	<p>Ley de Darcy Columnas experimentales</p>	

GALERÍA FOTOGRÁFICA

TOMA DE MUESTRAS



Fotografía N° 1 Perfil estratigráfico desembocadura Río Sama



Fotografía N° 2 Punto de muestreo

PROPIEDADES FÍSICAS



Fotografía N° 3 Determinación de densidad in situ mediante cono de arena



Fotografía N° 4 Extracción de muestra utilizando el Barreno Manual



Fotografía N° 5 Secado de muestras en el Horno Mufla



Fotografía N° 6 Determinación de plasticidad utilizando equipo Casagrande



Fotografía N° 7 Ensayo de densidad aparente



Fotografía N° 8 Ensayo de permeabilidad

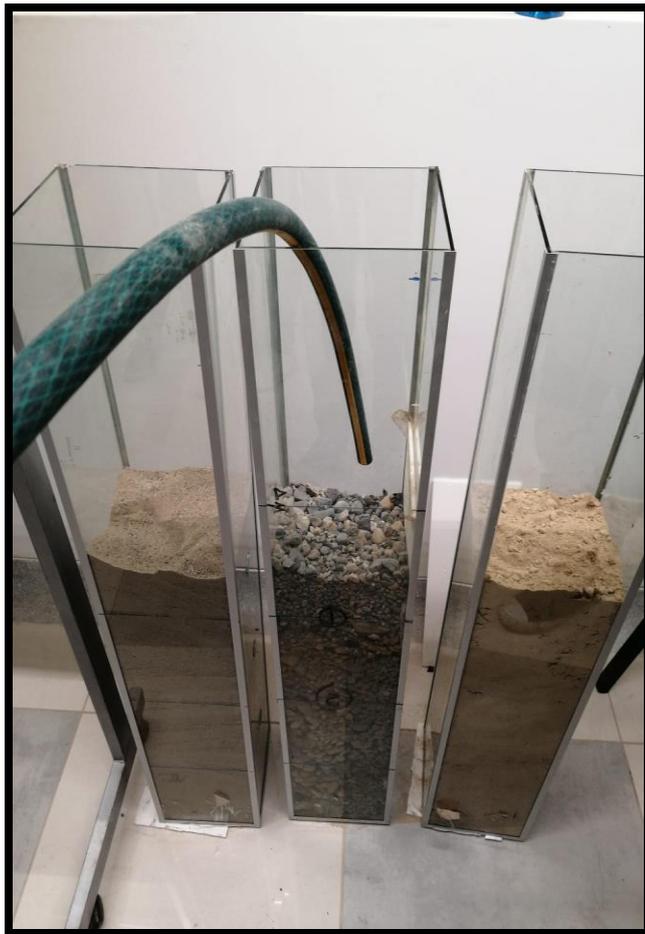


Fotografía N° 9 Medición para ensayo de permeabilidad

ENSAYO DE INFILTRACIÓN



Fotografía N° 10 Prueba de infiltración



Fotografía N° 11 Agregado de muestras de suelo, Arena, grava y arcilla



Fotografía N° 12 Agregado de agua

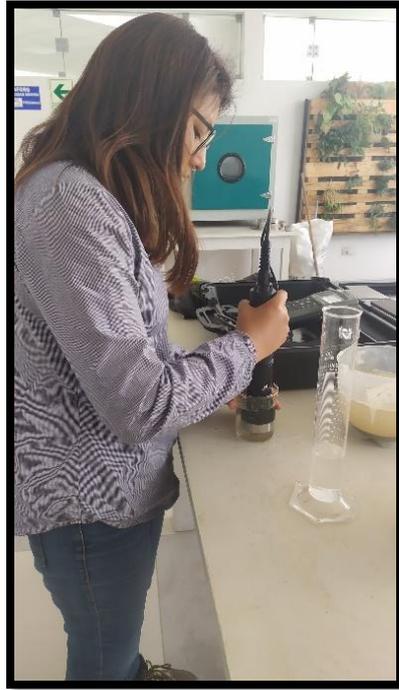


Fotografía N° 13 Tamizado de muestras para agregar a las probetas

PROPIEDADES QUÍMICAS



Fotografía N° 14 Determinación de pH y Conductividad Eléctrica, usando el Multiparámetro



Fotografía N° 85 Determinación de C.E

CUADRO RESUMEN DE DIAGRAMAS DE FLUJO

