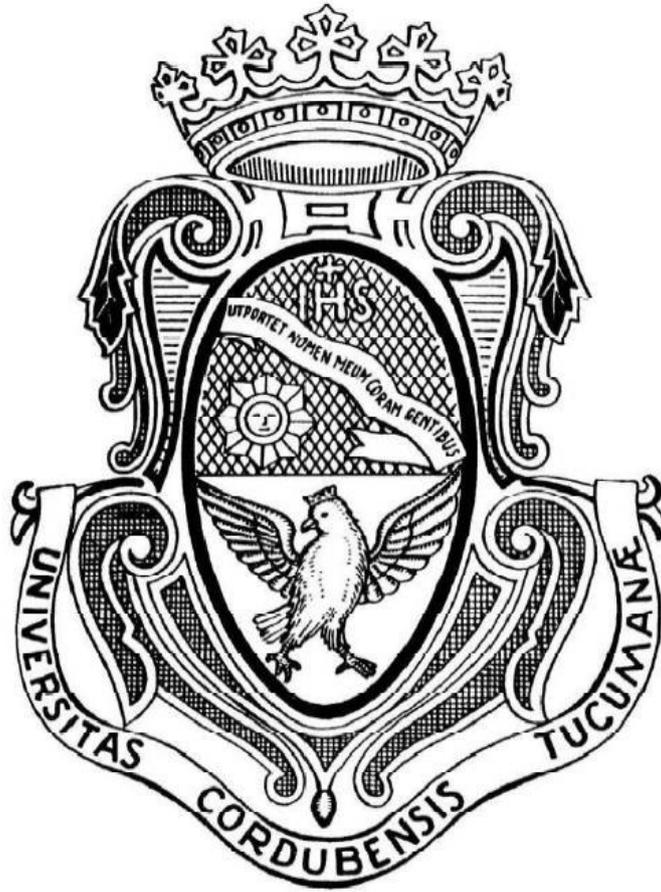


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA

Ingeniería Ambiental

“Diseño de barreras de fondo en rellenos sanitarios de alta eficiencia en la retención de metales”

Camila Tembrás

Tutor: Dr. Ing Franco Francisca

Supervisor externo: Dr. Ing. Daniel Glatstein

Lugar: Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos, FCEFyN – UNC.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, en especial a mis padres Raúl y Rosana y a mi abuela Celia, por todo lo que hicieron por mí, por su amor y su apoyo incondicional.

A mi novio Ezequiel, por su amor, su contención y por acompañarme siempre en el logro de todas mis metas.

A mis amigos tanto dentro como fuera de la facultad, porque los momentos compartidos con todos ellos son una de las cosas más lindas que me llevo de esta etapa.

A mi tutor, Dr. Ing. Franco Francisca, por todo lo que me enseñó a lo largo de estos años, por su paciencia y dedicación y por demostrarme ser no sólo un excelente profesional sino también una excelente persona. Sus consejos y su apoyo hacia mí fueron claves para mi formación como profesional.

Al Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la UNC y a las personas que lo conforman, por su colaboración, su apoyo y sus enseñanzas.

Al Ing. Agustín Adami y a Guillermo Iturri por su colaboración en el laboratorio de Geotecnia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: MARCO DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL

SUPERVISADA.....	7
1.1 Ámbito de desarrollo de la práctica supervisada	7
1.2 Objetivos de la práctica supervisada	7
1.3 Actividades desarrolladas durante la práctica supervisada	8
1.4 Aplicación de conocimientos adquiridos en asignaturas de la carrera Ingeniería Ambiental.....	9
1.5 Organización del informe.....	9

CAPÍTULO 2: CONCEPTOS TEÓRICOS 11

2.1 INTRODUCCION	11
2.2 PROPIEDADES GENERALES DE LOS SUELOS LIMOSOS COMPACTADOS	12
2.2.1 Localización	13
2.2.2 Formación	13
2.2.3 Composición y estructura.....	15
2.2.4 Propiedades físicas y mecánicas.....	16
2.2.5 Conductividad hidráulica	17
2.2.6 Mejoramiento de los suelos loésicos mediante la adición de bentonita	19
2.2.6.1 Compactación	21
2.2.6.2 Conductividad hidráulica	22
2.3 AISLAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN RELLENOS SANITARIOS.....	24
2.3.1 Configuración de las barreras de fondo.....	24
2.3.2 Materiales empleados.....	27
2.3.3. Caudal atravesado por la barrera	32
2.3.4 Cálculo de la separación de los drenes colectores.....	33
2.3.5 Cálculo del espesor de la geomembrana	33
2.3.6 Protección contra rasgadura y punzonamiento	34
2.3.7 Sistemas Americanos de GCL	35
2.3.8 Normativas internacionales.....	37
2.3.9 Normativas nacionales	39
2.4 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE BARRERAS EN RELLENOS SANITARIOS	40
2.4.1 Procesos de transporte.....	40
2.4.1.1 Advección	41

2.4.1.2 Difusión	42
2.4.1.3 Dispersión.....	43
2.4.2 Procesos químicos de transferencia de masa	45
2.4.2.1 Sorción y desorción	45
2.4.2.2 Precipitación y disolución.....	49
2.4.3 Transporte de contaminantes y modelación	49
2.4.3.1 Ecuación de advección-dispersión.....	50
2.4.3.2 Soluciones unidimensionales	53
2.4.3.3 Soluciones bidimensionales	54
2.4.3.4 Soluciones tridimensionales	55
2.5 SÍNTESIS	55
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	57
3.1 Materiales utilizados	57
3.1.1 Propiedades del limo.....	57
3.1.2 Propiedades de la escoria.....	59
3.1.3 Propiedades del lixiviado.....	61
3.2 Características del modelo	61
3.3 Ensayos experimentales.....	62
3.3.1 Determinación de la Gravedad específica.....	62
3.3.2 Determinación del contenido de humedad.....	64
3.3.3 Determinación de la conductividad hidráulica.....	64
3.3.4 Determinación del peso unitario.....	66
3.3.5 Determinación de Sales Solubles	68
3.3.6 Determinación de la variación del pH del lixiviado	69
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	71
4.1 Gravedad específica	71
4.1.1 Limo	71
4.1.2 Escoria	71
4.1.3 Limo mas 20% escoria	72
4.2 Conductividad hidráulica, peso unitario y humedad.....	73
4.3 Sales solubles	78
4.4 Variación del pH del lixiviado	79
4.4.1 Escorias	79
4.4.2 Arena fina.....	80

4.4.3 Limo	80
4.4.4 Bentonita	81
4.5 Modelación numérica	81
4.5.1 Variación del espesor de la barrera.....	82
4.5.2 Variación de la altura de lixiviado	83
4.5.3 Variación del Factor de retardo “R” con el porcentaje de escoria	83
4.5.4 Concentraciones de metales pesados en función del tiempo	87
CAPÍTULO 5: CASO PRÁCTICO PROYECTO CORMECOR	89
5.1 Introducción	89
5.2 Objetivos del proyecto.....	89
5.3 Características generales del proyecto	89
5.3.1 Especificaciones de los módulos	90
5.4 Cálculo del caudal de lixiviado atravesado por la barrera.....	90
5.5 Incorporación de escorias siderúrgicas en barreras de fondo.....	92
5.5.1 Concentración de los metales pesados en función del tiempo	92
5.5.2 Separación de los drenes colectores de lixiviados	93
5.5.3 Cómputo métrico para celda piloto	94
5.6 Conclusiones	99
APÉNDICE DE TABLAS	101
APÉNDICE DE FIGURAS.....	103
REFERENCIAS	106

CAPÍTULO 1: MARCO DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

1.1 Ámbito de desarrollo de la práctica supervisada

El presente trabajo corresponde a la asignatura Práctica Profesional Supervisada (PS) de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

La misma fue realizada en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos con el propósito de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

En este proyecto se plantea evaluar el potencial uso de limos loésicos abundantes en la región central de nuestro país para la construcción de barreras de fondo en rellenos sanitarios, mejorando o estabilizando las mismas adicionando escorias siderúrgicas. De esta manera se propone reutilizar un residuo proveniente de la industria de la acería con el objeto de mejorar el comportamiento hidráulico y reactivo de las barreras de fondo.

Se utilizan escorias siderúrgicas, las que actualmente son consideradas un residuo de la fabricación del acero con el fin de reutilizar un material residual para una nueva aplicación, y de esta forma reducir el volumen total de residuos así como también alargar el ciclo de vida de este producto.

Con las muestras de suelo limoso y las escorias se procede a preparar probetas de suelo con la humedad óptima de la mezcla y diferentes energías de compactación para realizar ensayos de permeabilidad. Los resultados obtenidos son incorporados en modelos de transporte de contaminantes con el fin de evaluar el potencial uso de los suelos compactados con escorias como barreras de fondo en rellenos sanitarios.

Finalmente se utilizan los resultados obtenidos para simular el comportamiento de una barrera real, para lo cual se modela la barrera de fondo de las celdas para la disposición final de residuos del complejo ambiental de CORMECOR con el objetivo de estudiar los beneficios y las ventajas que se obtendrían al incorporar las escorias siderúrgicas en la construcción de sus barreras de fondo.

1.2 Objetivos de la práctica supervisada

El propósito de la asignatura Práctica Supervisada es que el alumno logre llevar a cabo un proyecto real de Ingeniería bajo la supervisión de docentes y profesionales referentes a la materia en cuestión.

A continuación se mencionan las metas que se pretenden alcanzar:

- Comprobar los beneficios que posee la utilización de escorias en la estabilización de suelos.
- Crear conciencia acerca de la importancia de reutilizar un residuo teniendo en cuenta que la sociedad actual genera cantidades excesivas de los mismos

diariamente. La idea principal consiste en encontrar nuevas aplicaciones para las escorias de manera de darle un uso más sustentable y de esta forma alargar su ciclo de vida.

- Introducirse en el ámbito profesional en relación a proyectos geoambientales, afianzar y ampliar los conocimientos adquiridos y analizar e interpretar los problemas a resolver y los impactos de los mismos.

1.3 Actividades desarrolladas durante la práctica supervisada

- Análisis de material bibliográfico sobre los temas a abordar: utilización de escorias en diferentes aplicaciones en distintas partes del mundo, determinación de la mezcla más adecuada de suelo y escoria, determinación de su humedad óptima, beneficios de la utilización de escorias para diferentes aplicaciones, influencia de las mismas en la regulación del pH, remoción de fósforo y de metales pesados, etc.
- Preparación de probetas. Las mismas fueron sometidas a diferentes energías de compactación y para su preparación se utilizó la humedad óptima de la mezcla obtenida de la curva de compactación.
- Con las mismas se realizaron ensayos de permeabilidad a carga variable, peso unitario, gravedad específica, humedad y sales solubles.
- Se realizaron ensayos con limo, arena, bentonita, escorias y lixiviados del relleno sanitario de Piedras Blancas para determinar la curva que representa la influencia en el pH del lixiviado al ir aumentando la cantidad de sólidos.
- A través de modelaciones numéricas se fueron alterando diferentes variables como la altura de lixiviados y el espesor de la barrera para entender el comportamiento de la barrera.
- Se determinó el factor de retardo para cada porcentaje de escorias y de esta manera, se adoptó el porcentaje que se consideró más adecuado para la obra teniendo en cuenta los tiempos de remediación de cada uno. Habiendo ya elegido el porcentaje de escorias adecuado, se modeló la concentración a la salida de la barrera vs. el tiempo de permeado para los cuatro metales pesados frecuentemente encontrados en el lixiviado de los rellenos sanitarios. De esta forma se determinó la concentración de cada uno de ellos luego del tiempo de remediación calculado anteriormente.
- Luego, se aplicaron los resultados obtenidos al caso real de CORMECOR para determinar cuáles serían las ventajas de utilizar escorias en sus barreras de fondo. Se estimó el costo que implica el agregado de escorias siderúrgicas en las barreras del relleno sanitario y se lo comparó con el costo de las barreras convencionales para determinar la viabilidad e incidencia de la propuesta en el proyecto de CORMECOR. Se calculó además la cantidad de lixiviado que atravesaría la barrera teniendo condiciones controladas (altura de lixiviado acumulado = 0.3m) y no controladas (altura de lixiviado acumulado = 1m).

1.4 Aplicación de conocimientos adquiridos en asignaturas de la carrera Ingeniería Ambiental

Para el desarrollo de este informe se utilizaron conocimientos de las siguientes asignaturas:

- Geotecnia I y II: Se emplean conceptos de propiedades generales de los suelos, compactación, permeabilidad, resistencia al corte, estabilidad de taludes.
- Ingeniería ambiental I: En lo referido al estudio de los rellenos sanitarios, constitución de las barreras de fondo y de cobertura, materiales empleados, gestión de gases y lixiviados, impacto de los mismos sobre el ambiente y la sociedad.
- Ingeniería ambiental III: Para el estudio de transporte de contaminantes en suelos, gestión y vertido de Residuos Sólidos Urbanos, tecnologías de remediación y caracterización de sitios contaminados, aislación de contaminantes, sistemas de drenaje y anclaje de geomembranas y geotextiles utilizados en las barreras de fondo y laterales de los rellenos sanitarios.
- Tecnología, Ambiente y Sociedad, para el estudio de la sustentabilidad y el desarrollo sostenible en relación a la búsqueda de nuevas aplicaciones para un residuo que permita alargar su ciclo de vida mediante la reutilización del mismo.
- Proyecto, dirección y de obras y valuaciones: Para la realización del cómputo métrico y la interpretación de sus resultados.

1.5 Organización del informe

El trabajo consta de 5 capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo 1 se presenta el proyecto, las actividades realizadas en la práctica supervisada, el contexto institucional en el cual se realizó y la organización del informe.

En el capítulo 2 se desarrollan todos los conceptos teóricos necesarios para el desarrollo del presente trabajo, donde los principales temas en los que se hace hincapié son: las propiedades de los suelos limosos compactados, el aislamiento de residuos sólidos urbanos con barreras de fondo y el transporte de contaminantes a través de barreras en rellenos sanitarios.

En el capítulo 3 se detallan los procedimientos experimentales de los ensayos de permeabilidad, sales solubles, contenido de humedad, peso unitario, gravedad específica y ensayos de variación de pH con lixiviados. Se describen las técnicas de medición empleadas, las características de los materiales utilizados, en este caso, limo, escorias y lixiviados. Además se detallan las características del modelo utilizado para predecir el desplazamiento y transporte de contaminantes a través de una barrera o medio poroso y se especifican las ecuaciones a utilizar y las condiciones de borde.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y los de la modelación numérica. Se estudia el comportamiento de la barrera haciendo variar diferentes factores de la misma.

En el capítulo 5 se aplican los resultados obtenidos al caso de CORMECOR detallando cuales serían las ventajas de que se utilicen escorias en la construcción de sus barreras de fondo. Se realiza un cómputo métrico de la barrera para una celda piloto para realizar una comparación entre el costo de la barrera con escorias y la barrera tradicional.

CAPÍTULO 2: CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUCCION

El crecimiento poblacional y la actividad industrial desarrollada por el hombre provocan que millones de toneladas de residuos sean arrojados anualmente a la atmósfera, a las corrientes de agua o al suelo, contaminando el ambiente o el ecosistema. Durante el siglo XX, la revolución industrial generó una fuerte industrialización y crecimiento económico, lo que dio como resultado la producción de grandes cantidades de residuos de todo tipo y la necesidad de disponer los mismos. En muchos casos, la disposición final de estos residuos provoca la contaminación de los recursos naturales, afectando el ecosistema y causando así un impacto tanto en el ambiente como en la salud de la población, por lo que se transforma en una problemática geoambiental muy importante.

En la actualidad, los residuos sólidos urbanos (RSU) representan un gran problema para las grandes ciudades debido a la gran cantidad de residuos que se generan y a la falta de conciencia de la población sobre la necesidad de disponer los mismos correctamente para la preservación de los recursos naturales y el ambiente. La participación ciudadana en la gestión ambiental es fundamental para la creación de sociedades más maduras y conscientes de los desafíos colectivos y las responsabilidades de los ciudadanos. La degradación ambiental en las ciudades requiere de la atención de políticas públicas locales, con el fin de incorporar como una variable central de su gestión la participación ciudadana y de esta forma encargarse de un problema cuya responsabilidad es compartida entre la sociedad y el gobierno local. La solución al problema de los residuos sólidos urbanos requiere de una planificación sólida y de un marco regulatorio apropiado que considere aspectos técnico operativos, económicos, financiero, tarifarios, ambientales, institucionales y sociales.

Muchas veces los RSU son vertidos sin ningún tipo de control en basurales a cielo abierto o reciben tratamientos inadecuados como la quema indiscriminada en estos sitios, lo que genera la proliferación de vectores, olores, contacto de los residuos con animales y personas, y generación de lixiviados que al no estar contenidos ni recibir ningún tipo de tratamiento, pueden contaminar las aguas subterráneas. En la Figura 1 se muestran los potenciales problemas que genera la disposición descontrolada de residuos.

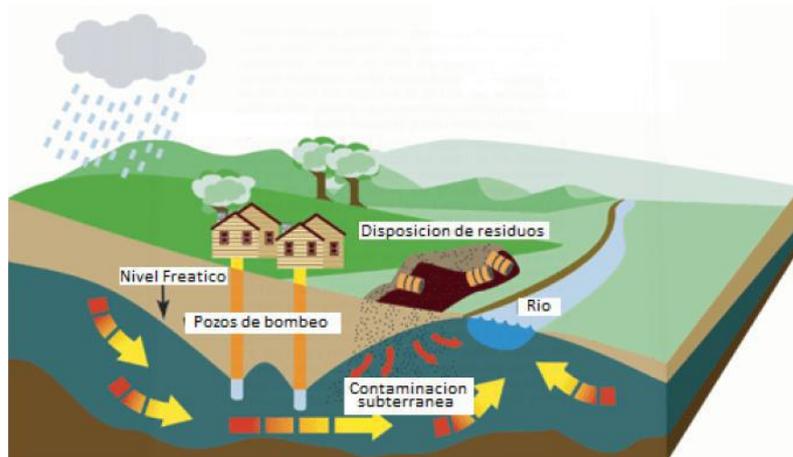


Figura 1: Problemas generados por la disposición incontrolada de residuos ([http:// ec.gc.ca/eauwater/3F93145A-2C1E-4D4C-A8A7-B94B59E998F2/a5f8e.gif](http://ec.gc.ca/eauwater/3F93145A-2C1E-4D4C-A8A7-B94B59E998F2/a5f8e.gif))

Ante este panorama resulta de fundamental importancia el estudio de sistemas de gestión para el tratamiento de los residuos y lixiviados generados, lo que define un espacio donde la Ingeniería cuenta con inigualables posibilidades para proveer soluciones.

Una alternativa son los sistemas de contención de residuos en rellenos sanitarios, cuyo principal propósito es aislar los residuos y sus lixiviados y ejercer control sobre la contaminación de aguas subterráneas que podría generar la infiltración de los mismos.

En la actualidad, el aislamiento se realiza a través de barreras de baja conductividad hidráulica, las cuales consisten usualmente en múltiples capas de arcilla compactada, filtros granulares y geosintéticos (geomembranas o revestimientos geosintéticos con arcillas). Además de la aislación, las barreras tienen el propósito de dirigir los fluidos propios del residuo hacia una zona de captación. Además de la inclusión de barreras de fondo, el diseño moderno de rellenos sanitarios debe contemplar sistemas de control de gases y barreras de cobertura. En general, el principal material de construcción de estas barreras es el suelo local, el cual se mejora mediante la adición de arcillas para lograr las especificaciones técnicas requeridas por la mayor de las regulaciones internacionales en relación a la conductividad hidráulica.

2.2 PROPIEDADES GENERALES DE LOS SUELOS LIMOSOS COMPACTADOS

Los loes son suelos predominantemente limosos cuyo nombre es indicativo del estado de su estructura interna, tratándose de sedimentos sueltos. Los suelos loésicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600.000 km² de superficie. Son suelos de origen eólico, que pueden conservar su estructura generada al depositarse (loess primario) o ser retransportados o alternados in-situ (loess secundarios o loessoides). Los depósitos recientes son principalmente primarios, mientras que los más antiguos son suelos arcillosos y limosos subsaturados.

Su principal característica geotécnica está constituida por su colapsibilidad o estado metaestable de su estructura interna que puede destruirse debido a cambios en el contenido de humedad o en su estado tensional. Como consecuencia de ello, se

generan variaciones volumétricas bruscas que pueden afectar a las estructuras que sean incapaces de soportar distorsiones y asentamientos diferenciales significativos.

2.2.1 Localización

En nuestro país, la zona ocupada por loess se extiende en las planicies situadas desde 23° a 38° S. Hacia el oeste, está contenida por varias cadenas montañosas que ocupan una faja que se extiende en dirección N-S. En Sudamérica existen varios suelos de tipo loésicos o loessoides del Cuaternario superior. De ellos, el Tipo Pampeano y el Tipo Chaqueño involucran a Argentina. El loess pampeano se ubica al sur de los 30°S mientras que el loess chaqueño, subtropical se ubica al norte de los 30°S (Figura 2).

2.2.2 Formación

El comienzo de la sedimentación del loess ha sido relacionada con una fase orogenia andina del Mioceno Tardío (cerca de 10 millones de años) que al modificar la cordillera de los Andes generó una barrera a los vientos húmedos del Pacífico, reteniendo la humedad en su vertiente occidental chilena. Estos son los depósitos antiguos que se encuentran en el subsuelo profundo. Los depósitos más recientes corresponden al Pleistoceno Tardío/Holoceno y constituyen los loess primarios.

La génesis y evolución del loess argentino, ha sido relacionada con los últimos acontecimientos glaciares de la Patagonia y con la evolución paleoambiental de las regiones andinas. Durante el último período glacial, la capa de hielo patagónico llevó a la deposición de los extensos depósitos fluvio-glaciares en el piedemonte andino, que sirvió como fuente del material loésico.

En el caso del loess de Tipo Pampeano, predominan partículas de origen volcánico originadas en los Andes Centrales y en la Patagonia. Éstas fueron transportadas por agentes erosivos como glaciares o ríos hacia el norte de la Patagonia. De allí las partículas fueron transportadas por la acción de los vientos del S - SW hacia el centro del país.

Las partículas arenosas fueron arrastradas por saltación cubriendo una planicie arenosa (arenas eólicas) en ambiente seco y desértico (Figura 3). Los mismos vientos produjeron la sedimentación de partículas de polvo en suspensión, formando el cinturón de loess detrás de las arenas eólicas (Figura 2). Los loess del Tipo Chaqueño tienen además otras fuentes de aportes de la zona NW. Las direcciones de los vientos están señaladas en la Figura 2.

Las lluvias de cenizas también constituyen una fuente del loess sudamericano estimándose entre 5 a 10 m de material piroclástico acumulado en el último millón de años. Se calcula que alrededor de un 10% de los loess del Pleistoceno Superior / Holoceno fueron depositados de esta forma.

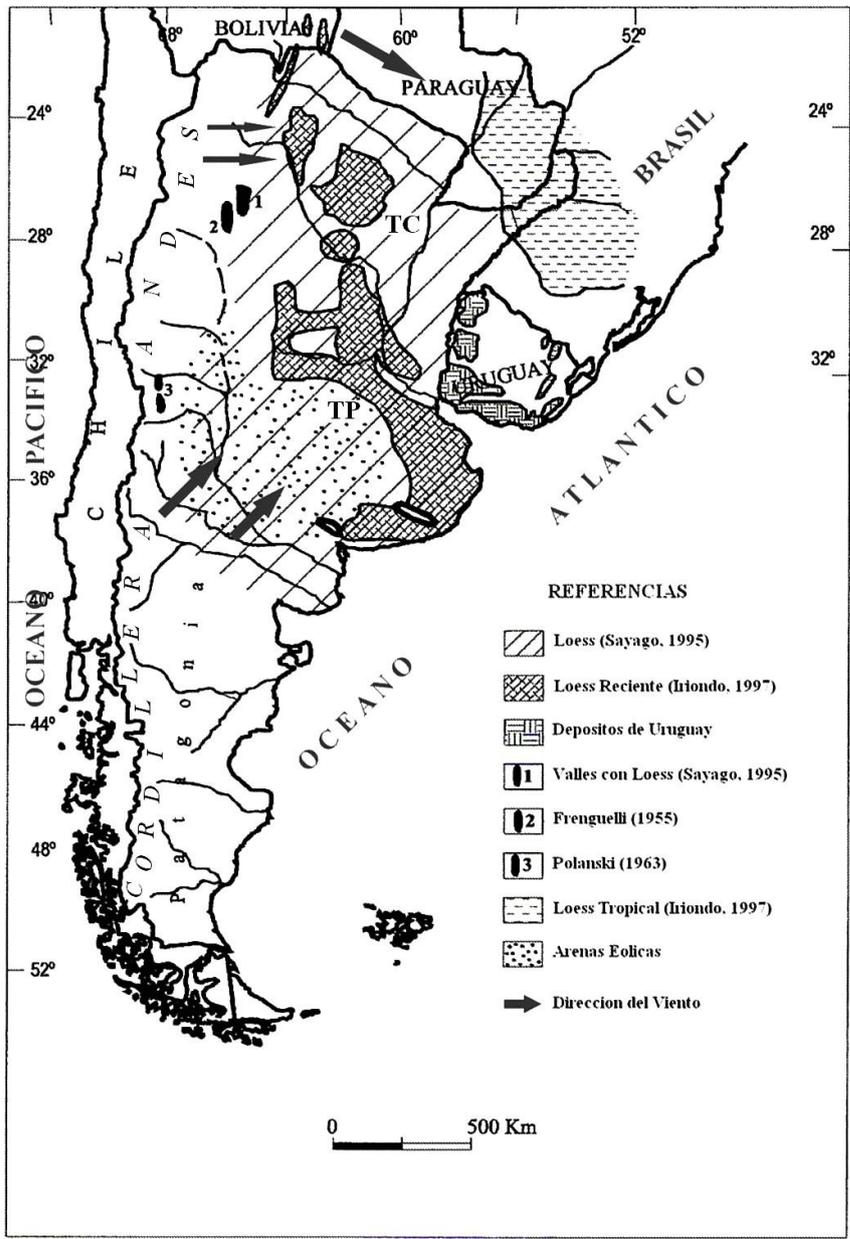


Figura 2: Distribución de Loess y loessoides (adaptado de Zárate, 2003).

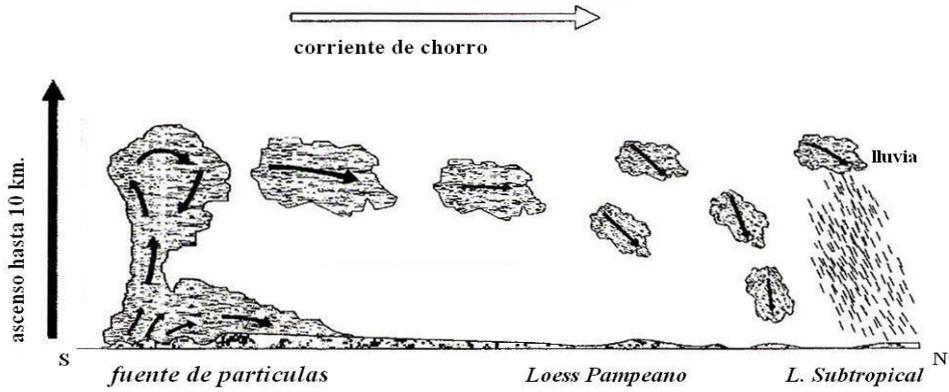


Figura 3: Modos de transporte de partículas (adaptado de Sayago et al., 2001).

2.2.3 Composición y estructura

Los suelos loésicos argentinos poseen minerales de origen volcánico, feldespatos, cuarzo, montmorillonita e illita. El porcentaje en peso del tamaño de las partículas de estos sedimentos usualmente es: arena 1 - 10%, limo 50 - 80% y arcilla 2 - 20% (Nieva y Francisca, 2007). Se pueden distinguir fracciones de arena, limo y arcilla (Tabla 1). La primera fracción está compuesta principalmente por plagioclasas, cuarzo, ortoclasas, cristales volcánicos, labradorita, feldespatos alterados, fragmentos de rocas volcánicas y ópalos orgánicos. La fracción limosa difiere de la arenosa, principalmente por la angulosidad de sus partículas, y el incremento en la proporción de vidrio volcánico. La fracción arcillosa está compuesta de montmorillonita, illita y pequeñas cantidades de cuarzo y feldespatos. Estos componentes son los principales responsables del comportamiento del suelo loésico.

Tabla 1: Componentes minerales para cada una de las fracciones (Teruggi, 1957 y Sayago et. al 2001).

Tamaño de la partícula	Mineral	Porcentaje en peso (%)
Arena	Cuarzo	20 - 30
	Feldespato	20 - 65
	Vidrio volcánico	1 - 25
	Basalto	1 - 25
Limo	Cuarzo	20 - 30
	Feldespato	30
	Vidrio volcánico	15 - 60
	Gibbsita	20
Arcilla	Illita	90 - 100
	Montmorillonita	0 - 5
	Caolinita	0 - 5

La composición mineralógica del loess es variable de norte a sur. Los depósitos del norte poseen principalmente cuarzo y feldespato, mientras que los depósitos de las pampas del sur contienen predominantemente volcanoclastos.

Loess Pampeano

Por lo general, su mineralogía se caracteriza por la abundancia de plagioclasas (20 a 60%), poco cuarzo (20 a 30%) y un considerable porcentaje de vidrio volcánico (15 a 30%).

Loess Chaqueño

En contraste, éstos poseen bajas proporciones de plagioclasas y vidrio volcánico, en debido a la influencia de factores climáticos (desvitrificación y alteración de feldespatos). La formación de arcilla in-situ es inversamente proporcional al tamaño de grano del material madre.

La composición química es la responsable de las características de estabilidad de la estructura del suelo. La presencia de carbonatos cálcicos a humedad natural, la interacción con el agua, la presencia de óxidos de hierro y yesos, son fundamentales para el interés en la actividad ingenieril. Por lo tanto los carbonatos de calcio, son

fundamentales en los suelos loésicos. Los carbonatos primarios están constituidos por minerales carbonáticos de origen detrítico como la calcita. Los carbonatos secundarios muestran una variedad de formas que van desde grandes y pequeños cristales, microcristales, películas, costras y nódulos (Quintana Crespo, 2005).

Un criterio para distinguir los suelos loésicos de los limos es utilizar el carbonato de calcio como parámetro de diferenciación. Frenguelli (1955) fijó valores inferiores al 1% de carbonato de calcio primario para el limo y entre 3 a 10% en los suelos loésicos.

La estructura de los limos loésicos es abierta, por lo que presenta forma de “castillo de naipes” con macroporos y aglomeraciones de partículas (Figura 4). La fábrica del suelo se encuentra compuesta por una fracción granular, unida entre sí a través de materiales cementantes (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos) (Francisca *et al.* 2002; Francisca y Redolfi, 2003).

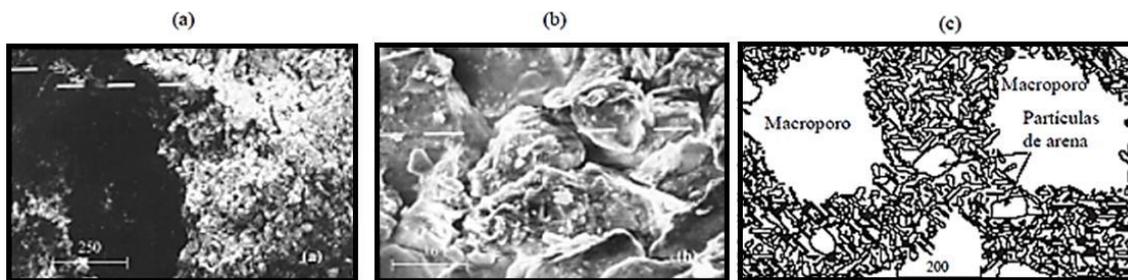


Figura 4: Estructura del loess (a), Fotografía de con microscopio electrónico de un macroporo en la estructura del loess, (b) Fotografía de con microscopio electrónico de las partículas de arena y limo alrededor de un macroporo, (c) Esquema de la fábrica de los loess de Argentina (Rinaldi *et al.* 2001).

2.2.4 Propiedades físicas y mecánicas

En la Tabla 2 se presentan las propiedades físico-mecánicas típicas del loess del centro de la Argentina. Las propiedades reportadas son valores medios representativos del loess que se encuentra en la Ciudad Universitaria en la Ciudad de Córdoba. Las variaciones encontradas, tanto en las propiedades físicas como mecánicas, se debe al origen, y a la composición química y mineralógica de los sedimentos (Francisca *et al.* 2002).

Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas típicas de los limos loésicos argentinos (Francisca et al. 2002).

Propiedad física o mecánica	Unidad	Valores
Peso unitario seco	KN/m ³	12,2 - 14,5 (13,0)
Peso unitario húmedo	KN/m ³	14,9 - 16,8 (15,2)
Limite liquido	%	20,8 - 32,2 (24,0)
Índice de plasticidad	%	0 - 8,0 (3,5)
Fracción arenosa (>0,1 mm)	%	5 - 15
Fracción limosa (0,1 - 0,002 mm)	%	40 - 75
Fracción arcillosa (<0,002 mm)	%	7 - 25
Conductividad hidráulica (ks)	cm/s	1,0 x 10 ⁻⁵
Peso unitario máximo (Proctor Estándar)	KN/m ³	16,0 - 17,8 (16,7)
Angulo de fricción efectiva ϕ'	°	26 - 30 (28)
Cohesión efectiva c'	KN/m ²	< 8
Modulo confinado a humedad natural (100 Kpa)	KN/m ²	1500 - 8000 (4000)
Modulo confinado saturado (100 Kpa)	KN/m ²	1000 - 4000 (1900)
Resistencia a compresión simple	KN/m ²	45 - 130 (85)

Rocca *et al.* (2006) presentaron un estudio realizado en 1420 perfiles de la ciudad de Córdoba donde se determinó que estos suelos presentan abundante cantidad de vidrio volcánico en sus fracciones limosas, y presencia de illita en su fracción arcillosa. Existen nódulos y microcristales de carbonato de calcio insoluble dentro de la masa, formados por procesos de ciclos de humedecimiento y secado, debido al ascenso capilar de bicarbonato seguido por cristalización. Los iones comunes más adsorbidos son el calcio y el sodio. En el fluido de los poros, el sodio es el catión más abundante, el Ca y Na solubles varía en 0,4 – 1,2%. Los aniones más comunes son sulfatos y cloruros. La superficie específica está controlada por la fracción arcillosa y puede variar entre 1 m²/gr a más de 10 m²/gr. Los suelos loésicos en general son alcalinos con un pH > 8 (Francisca et al. 1998).

2.2.5 Conductividad hidráulica

La conducción de un fluido en régimen estacionario y transitorio está regida por la Ley de Darcy, que establece una proporcionalidad directa entre la velocidad de flujo v_h y el gradiente hidráulico i_h :

$$v_h = k_h \times i_h$$

Donde la constante k_h es una propiedad que depende del material.

Para que la aplicación de la Ley de Darcy tenga validez es necesario que el flujo sea laminar y estacionario a través del medio poroso, esto implica que existe una relación lineal entre la conductividad hidráulica y el gradiente aplicado que pasa por el origen de coordenadas.

Los suelos loésicos presentan singularidades en cuanto a la anisotropía de la conductividad hidráulica, donde el coeficiente de permeabilidad vertical (k_v) es mayor que el coeficiente de permeabilidad horizontal (k_h). Los niveles superiores de limos arcillosos presentan estructuralmente una red de fisuras y microfisuras visibles. Esta red incrementa el valor de la permeabilidad, que se detecta en los ensayos. En estado

natural los suelos se encuentran generalmente, en condición subsaturada, con la intervención de tres fases y la estructura sólida es metaestable y susceptible al colapso cuando circula el agua.

Numerosos factores pueden afectar los valores de conductividad hidráulica de un suelo. La Tabla 3 muestra cuales son las principales propiedades:

Tabla 3: Factores que afectan la conductividad hidráulica de un suelo (Montoro y Francisca, 2011).

Conductividad Hidráulica			
Factor	Cambio del factor	Cambio en k	Referencia
Viscosidad relativa	↑ < 1 orden de magnitud	↓ < 1 orden de magnitud	Gnanapragasam <i>et al.</i> (1995), Jarsjö <i>et al.</i> (1997)
Relación de vacíos	↑ ~ 1 orden de magnitud	↑ ~ 2 órdenes de magnitud	Schenning (2004), Muhammad (2004)
Gradiente hidráulico	↑ > 3 órdenes de magnitud	↑ < 1 orden de magnitud	Muhammad (2004)
Tipo de permeámetro	N/A	Como máximo un orden de magnitud	Daniel <i>et al.</i> (1985), Kodikara <i>et al.</i> (2002), Muhammad (2004)

En la Figura 5 se muestra la influencia de la humedad de amasado en el peso unitario seco de muestras analizadas durante la realización de ensayos de conductividad hidráulica (Méndez, 2013).

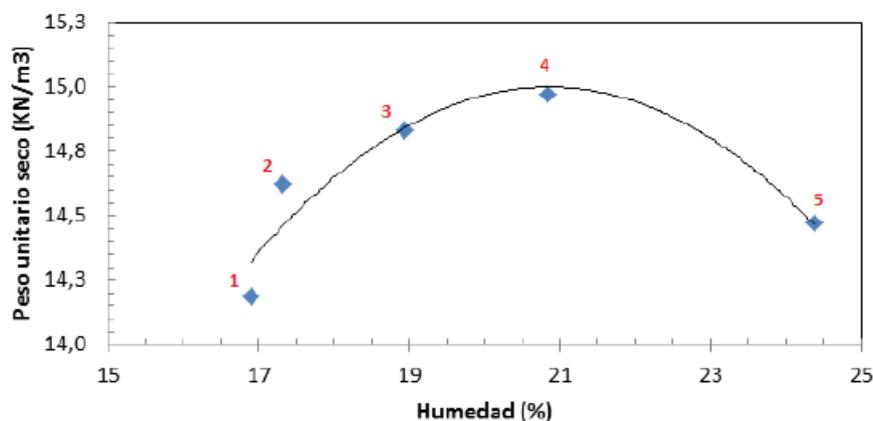


Figura 5: Influencia de la humedad de amasado en el peso unitario seco en ensayos de conductividad hidráulica (Méndez, 2013).

A continuación se muestran resultados de conductividad hidráulica en muestras de limo obtenidos de ensayos realizados con agua deaireada (Tabla 4). La Figura 6 muestra la influencia del contenido de humedad de amasado utilizada para la compactación en la conductividad hidráulica (Mendez, 2013).

Tabla 4: Resultados ensayos de conductividad hidráulica de un suelo limoso (Méndez, 2013).

Probeta	w (%)	γ_d (kN/m ³)	k (m/s)
1	16,0	14,2	1,16E-06
2	16,9	14,6	1,53E-06
3	18,9	14,8	1,30E-06
4	20,8	14,9	8,59E-07
5	24,4	14,4	3,33E-07

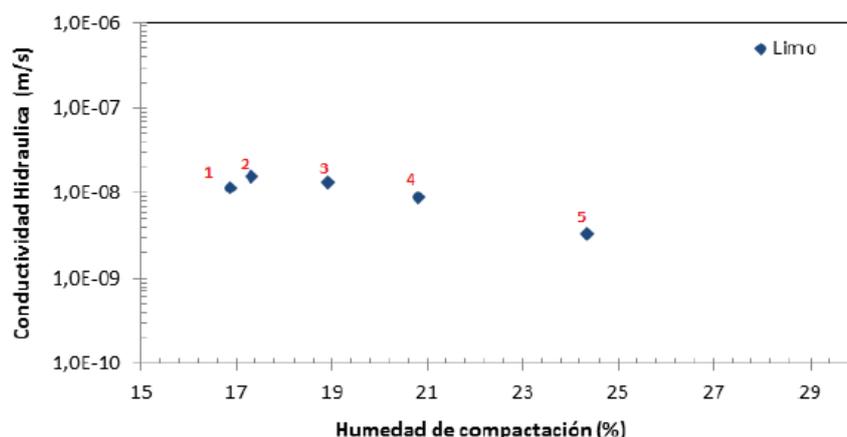


Figura 6: Influencia del contenido de humedad de amasado en la conductividad hidráulica del limo (Méndez, 2013).

Se observa que cuando la compactación se realiza en la rama seca, el arreglo entre partículas es más rígido y difícil de ser desestructurado (Benson y Daniel, 1990). Como consecuencia se tiene una estructura floculada, de mayor tamaño de poros y mayor conductividad hidráulica. Mientras que si se compacta la muestra en la rama húmeda, se permite el reacomodamiento y la consecuente reducción de vacíos. Se obtiene una estructura dispersa con menor conductividad hidráulica.

2.2.6 Mejoramiento de los suelos loésicos mediante la adición de bentonita

Los suelos de la provincia de Córdoba presentan valores de conductividad hidráulica demasiado elevados para ser usados como barreras en rellenos sanitarios, aún con una compactación adecuada. Durante años se ha investigado sobre diferentes posibilidades de mejoramiento o estabilización de estos suelos con el propósito de lograr condiciones y comportamientos adecuados para la contención de líquidos residuales y lixiviados que se producen en los rellenos sanitarios. Las mejoras propuestas han consistido en optimizar compactaciones y en el agregado de materiales arcillosos y/o polímeros sintéticos en las barreras.

Los minerales arcillosos son silicatos de aluminio complejos compuestos de una o dos unidades básicas: 1) tetraedro de sílice y 2) octaedro de alúmina. Cada tetraedro consiste en cuatro átomos de oxígeno que rodean a un átomo de silicio. La combinación de unidades de tetraedros de sílice da una lámina de sílice. Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros vecinos.

Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos que rodean un átomo de aluminio y la combinación de las unidades octaédricas de hidroxilos de aluminio dan una lámina octaédrica (también llamada lámina de gibbsita). En ocasiones el magnesio reemplaza los átomos de aluminio en las unidades octaédricas; en tal caso, la lámina octaédrica se llama lámina de brucita.

La bentonita es una arcilla de grano muy fino del tipo monmorilonita que contiene bases y hierro. La monmorilonita tiene una estructura similar a la illita, poseen una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice (Figura 7). En la monmorilonita hay sustitución isomorfa de magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas. Los iones de potasio no están aquí presentes como en el caso de la illita y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios entre las capas. Las partículas de monmorilonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å. Y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es aproximadamente de 800 m²/g.

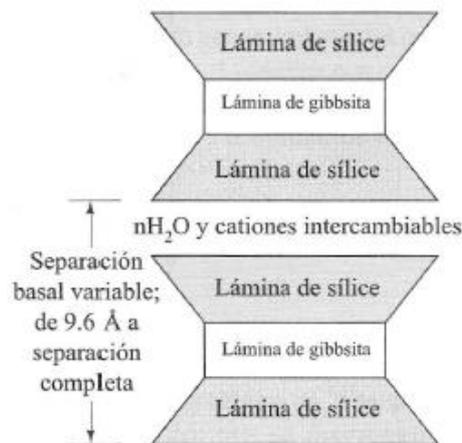


Figura 7: Estructura de la monmorilonita (Das, 2001).

Las partículas de arcilla poseen una carga neta negativa sobre su superficie, resultado de una sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes. Cargas negativas mayores se derivan de superficies específicas mayores. En arcilla seca, la carga negativa es balanceada por cationes intercambiables, como Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺, que rodean a las partículas mantenidas juntas por atracción electrostática.

Cuando se agrega agua a la arcilla, su carga negativa superficial se equilibra con los cationes presentes en el agua. Estos cationes poseen energía térmica, lo que permite el movimiento de los mismos, generando que se repelan. El agua "libre" tiende a rodear los cationes hidratándolos, formando una capa difusa (Figura 8). La concentración de cationes decrece con la distancia desde la superficie de la partícula.

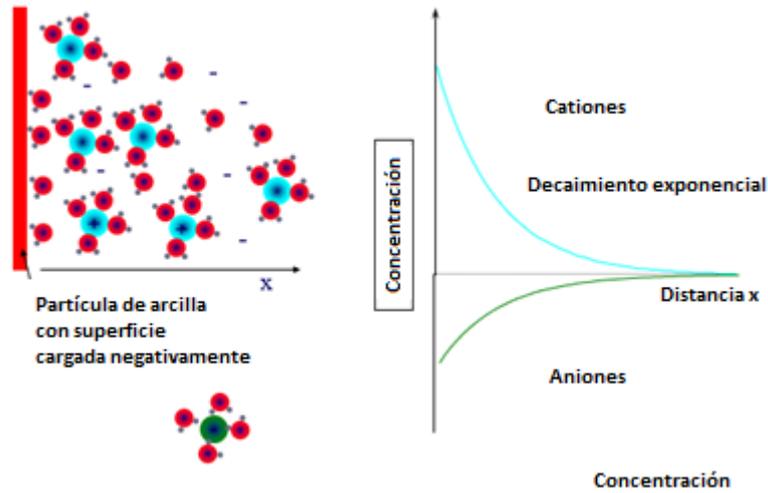


Figura 8: Formación de la doble capa difusa (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

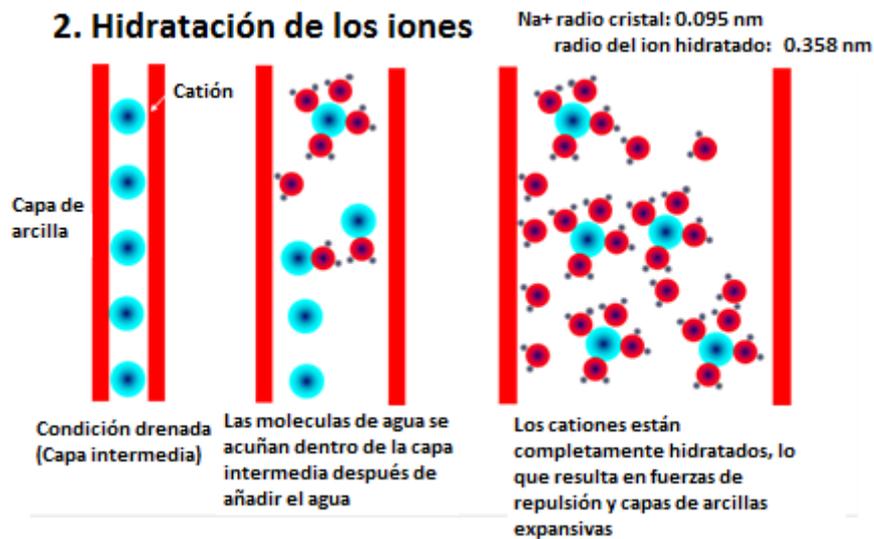


Figura 9: Hidratación de los iones (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

2.2.6.1 Compactación

La humedad de amasado empleada en el proceso de compactación influye en la conductividad hidráulica de las muestras (Figura 10). Las partículas arcillosas adicionadas se reorientan dando lugar a una estructura floculada con menor conductividad hidráulica (Lambe, 1958; Mitchell et al. 1965; Benson y Daniel, 1990).

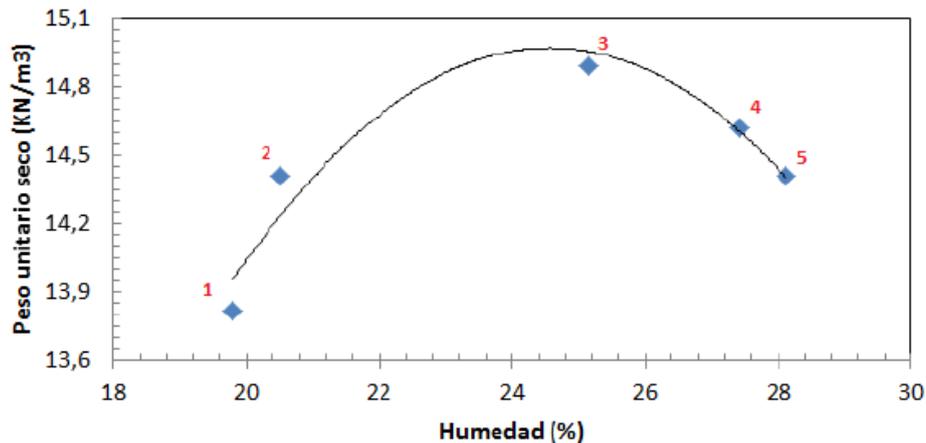


Figura 10: Variación del peso unitario seco del limo+6% de bentonita en función de la humedad de amasado (Méndez, 2013).

El peso unitario seco máximo disminuye y el contenido óptimo de humedad aumenta con el incremento del porcentaje de bentonita en las muestras de limo. Los resultados muestran que cuando el contenido de bentonita varía de 0 a 6%, el peso unitario seco máximo disminuye de 15,7 KN/m³ a 15,5 KN/m³ y su correspondiente humedad óptima de amasado aumenta de 21,7% a 23,5%.

2.2.6.2 Conductividad hidráulica

Para que los suelos loésicos puedan ser considerados aptos para la construcción de una barrera inferior en un relleno sanitario deben alcanzar una conductividad hidráulica inferior a 1×10^{-7} cm/s. Este valor debe alcanzarse independientemente que se trate de un suelo natural compactado o mezclado con arcillas. En la Figura 11 se muestra el histograma de conductividades hidráulicas de los limos loésicos compactados estabilizados con bentonita y permeados con agua deionizada. En el eje horizontal se muestran los valores del logaritmo de la conductividad hidráulica y en los ejes verticales el porcentaje acumulado y las frecuencias. Estos resultados demuestran que sólo el 22,5 % de los limos loésicos compactados tendrían un valor de conductividad hidráulica igual o inferior a 1×10^{-7} cm/s. Para el caso de las muestras compactadas y estabilizadas con bentonita este porcentaje asciende al 71,8 % (se logra llegar al 99% si sólo se consideran mezclas de limo con un contenido de bentonita mayor a 6% y muy buenas condiciones de compactación). Se puede ver a partir de esta comparación la ventaja incorporar bentonita en los limos loésicos para lograr conductividades hidráulicas menores a lo establecido como límite por la normativa internacional para las barreras inferiores en los rellenos sanitarios (Francisca, 2013).

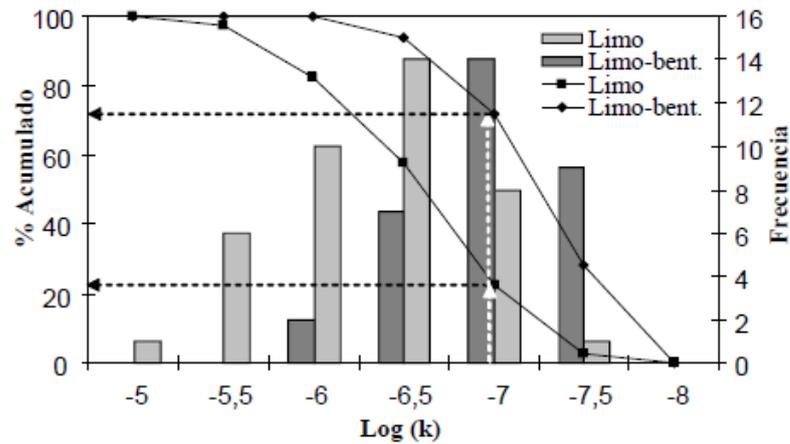


Figura 11: Comparación de histogramas del logaritmo de la conductividad hidráulica para el caso de los limos compactados y mezclas compactadas de limo-bentonita (Francisca, 2013).

A continuación se muestran resultados de ensayos de conductividad hidráulica, realizados con agua deaireada en muestras de limo y limo+6% de bentonita. Se observan la influencia del porcentaje de bentonita adicionada en la conductividad. La Figura 12 muestra la influencia del contenido de humedad de amasado utilizada para la compactación en la conductividad hidráulica.

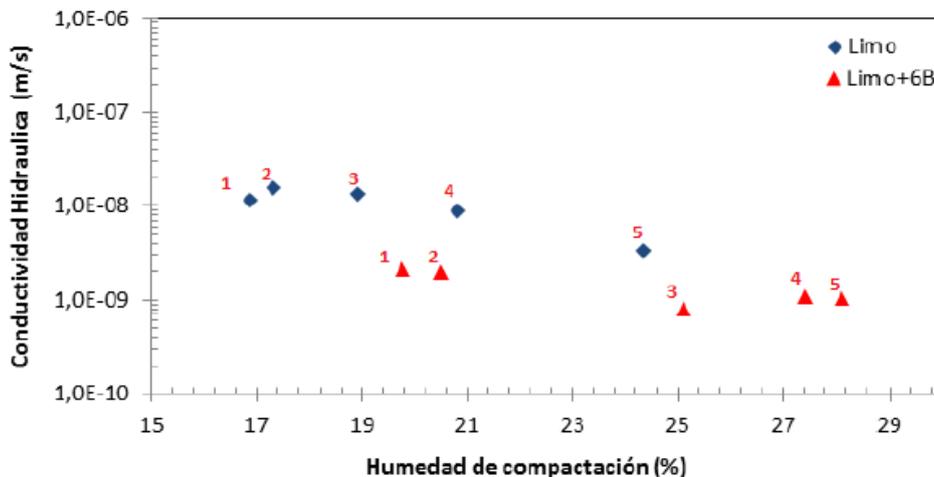


Figura 12: Influencia en el contenido de humedad de amasado en la conductividad hidráulica del limo y limo+6% de bentonita (Méndez, 2013).

La fracción arcillosa controla el comportamiento hidráulico de mezclas que contengan un porcentaje mayor a [5% - 7%] de arcilla (Santamarina et al. 2001). En los resultados se observa que la adición de 6% de bentonita a la muestra de limo, disminuye la conductividad hidráulica aproximadamente un orden de magnitud. En la Tabla 5 se presentan los resultados del ensayo de conductividad hidráulica de limo+6% de bentonita.

Tabla 5: Resultados de conductividad hidráulica en muestra de lim+6% bentonita (Méndez, 2013).

Probeta	w (%)	γ_d (kN/m ³)	k (cm/s)
1	19,8	13,8	2,08E-07
2	20,5	14,4	1,93E-07
3	25,1	14,8	7,78E-08
4	27,4	14,6	1,06E-07
5	28,1	14,3	1,04E-07

La adición de bentonita es efectiva para reducir la conductividad hidráulica en las mezclas de suelo, debido a su elevada capacidad de hinchamiento. Es importante seleccionar el porcentaje mínimo necesario de bentonita, para alcanzar la conductividad hidráulica especificada y evitar fisuras excesivas debido a la desecación (Mollins *et al.* 1996).

Abeele (1986) muestra resultados de suelo granular con bentonita, donde se muestra que la conductividad hidráulica decrece para una adición de 5% de bentonita, y para porcentajes mayores al 10% la conductividad hidráulica tiende a valores de bentonita pura.

2.3 AISLAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN RELLENOS SANITARIOS

Los métodos de aislación in situ de residuos sólidos urbanos pueden agruparse en dos categorías: sistemas pasivos y sistemas activos. Los sistemas pasivos consisten en la instalación de barreras de baja permeabilidad alrededor de los residuos que abarcan toda la zona contaminada con el propósito de reducir la dispersión de contaminantes. Estos sistemas incluyen:

- Barreras de fondo para limitar la migración de los lixiviados a las aguas subterráneas.
- Capa de cobertura en la superficie para minimizar la infiltración de las aguas que provienen de las precipitaciones, contener los gases que se generan en el relleno sanitario y evitar el contacto de los residuos con personas y/o animales.

Los sistemas activos generalmente se utilizan en la zona saturada y consisten en la instalación de pozos de bombeo o sistemas de drenaje para manipular los gradientes hidráulicos y de este modo evitar la contaminación de los acuíferos. En los rellenos sanitarios se utiliza una combinación de sistemas activos y pasivos, lo que resulta muy efectivo para contener los residuos y la pluma contaminante.

En este apartado nos concentraremos en los sistemas pasivos y específicamente, en las barreras de fondo.

2.3.1 Configuración de las barreras de fondo

Los sistemas de barrera de fondo son elementos de contención construidos debajo de los residuos, para prevenir o minimizar la infiltración de líquidos contaminados en el subsuelo o las aguas subterráneas. Los líquidos contaminantes o

lixiviados se generan a partir de los propios desechos y por el aporte de las precipitaciones y la consecuente infiltración de agua en los residuos (Delluer, 2007).

Las barreras de fondo consisten en múltiples capas que cumplen funciones específicas, éstas son (Figura 13):

Capa sub base: esta capa inferior generalmente compuesta de suelo local de conductividad hidráulica intermedia, separa la barrera interior del suelo natural del relleno sanitario.

Capa primaria: de baja conductividad hidráulica, evita o minimiza el movimiento de los lixiviados en el subsuelo del vertedero. El revestimiento primario consiste normalmente en suelos arcillosos compactados, geosintéticos o combinaciones de ambos.

Capa de recolección de lixiviados o capa drenante: esta capa de material permeable recoge los lixiviados formados en los residuos y los transporta a los sumideros, para su rápida eliminación.

Capa de protección: esta capa de suelo u otro material apropiado, tiene la función de separar los residuos del resto de la barrera de fondo, con el propósito de evitar daños ocasionados por objetos de gran tamaño colocados dentro del relleno sanitario.

El sistema de barrera debe cumplir con determinados requisitos de diseño. El diseño estándar mínimo requerido por la EPA (Subtítulo D) de un sistema de barrera individual compuesta, debe comprender una geomembrana de 762 μm colocada sobre una capa de suelo compactado de al menos 60 cm de espesor con una conductividad hidráulica menor o igual a 1×10^{-7} cm/s, además de una capa de recolección de lixiviados. Para alcanzar la conductividad hidráulica mínima exigida para el diseño se utilizan frecuentemente arcillas compactadas o mezclas de arcillas con suelos locales. En particular, el agregado de una cantidad baja de bentonita (5 a 10% en peso seco) permite obtener la conductividad hidráulica especificada por la mayoría de las regulaciones internacionales para la construcción de barreras de impermeabilización (Mitchell y Jaber 1990, Kayabali 1997, Manasero et al. 2000, Nieva y Francisca 2007). Si la geomembrana está hecha de polietileno de alta densidad, (high density polyethylene; HDPE) el espesor mínimo debe ser de 1524 μm . La geomembrana debe estar colocada uniformemente y en contacto directo con el suelo compactado.

Residuos

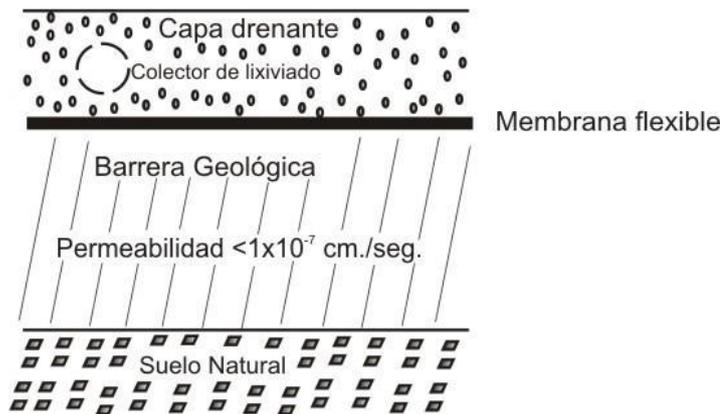


Figura 13: Principales capas de una barrera inferior de un relleno sanitario (Francisca, 2013).

Cada barrera puede consistir en 2 capas adyacentes de estos materiales, en cuyo caso recibe el nombre de barrera compuesta. Son adoptados generalmente tres tipos de sistemas de barrera (Figura 14), las cuales se describen a continuación:

- **Sistema de barrera simple:** este sistema posee una única capa de suelo compactado de baja permeabilidad debajo de una capa recolectora de lixiviados con una separación o protección adecuada. Este sistema es usado para rellenos sanitarios instalados en zonas de baja vulnerabilidad.
- **Sistema de barrera individual compuesta:** está formado por dos capas de materiales diferentes, ubicadas en contacto directo para proporcionar un efecto combinado. Generalmente se coloca una geomembrana sobre un suelo arcilloso. Por encima de este sistema se dispone un sistema de recolección de lixiviados. Este sistema es el mínimo requerido para rellenos sanitarios que contienen residuos sólidos urbanos.
- **Sistema de barrera doble:** consiste en dos sistemas de barrera individual compuesta colocados uno debajo del otro. La barrera primaria superior tiene por encima un sistema de recolección de lixiviados, y por debajo posee una segunda capa de recolección que permite realizar un monitoreo de filtraciones de la barrera superior. Finalmente, debajo de esta segunda capa drenante se coloca la barrera primaria inferior. Este tipo de sistemas ofrecen una seguridad reforzada y son utilizados para desechos industriales o peligrosos.

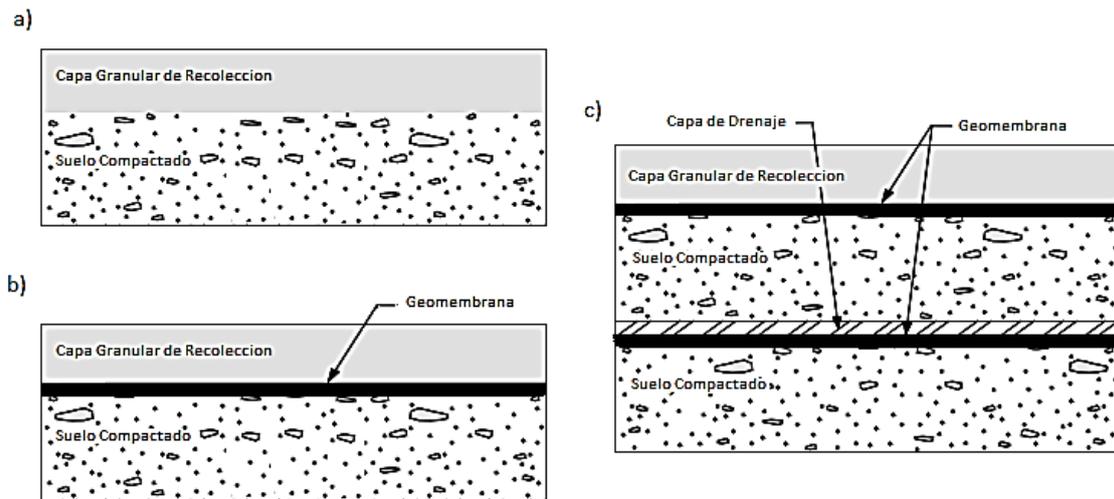


Figura 14: Sistemas de barrera inferior a) Barrera simple, b) Barrera individual compuesta, c) Barrera doble (Hauser, 2009).

2.3.2 Materiales empleados

Las barreras de fondo generalmente se construyen con materiales naturales como suelos arcillosos compactados o polímeros sintéticos como geomembranas, geotextiles, geomallas, georedes, geogrillas, geocompuestos o combinaciones de ellos como geocompuestos bentoníticos. Todos estos materiales tienen el propósito de proteger las aguas subterráneas de los contaminantes retenidos en el relleno sanitario.

Los geosintéticos presentan ciertas ventajas frente a los materiales arcillosos:

- Se instalan rápidamente
- Ocupan menos volumen
- Son competitivos en cuanto a los costos
- Gran variedad de diseños
- Disponibilidad

Se presentan algunos de los materiales utilizados:

Arcillas: En el caso de ser utilizada en sistemas de barrera simple se utilizan espesores de 0,6 a 1,5 metros dependiendo de la geología del lugar y las características del relleno sanitario. Según diferentes normativas, se debe lograr una conductividad hidráulica menor o igual a 1×10^{-7} cm/s. Las barreras arcillosas deben compactarse en la rama húmeda de la curva de compactación ya que de este modo se logra una menor relación de vacíos, por lo tanto menor conductividad hidráulica, lo que permite que sean más efectivas. La efectividad de estas barreras puede reducirse debido a fracturas generadas por ciclos de desecación, congelamiento-descongelamiento y por la presencia de ciertos compuestos químicos.

Para las barreras de fondo se utiliza bentonita, la cual es una arcilla extremadamente absorbente y granular formada por cenizas volcánicas. Al igual que todas las arcillas, la bentonita atrae las partículas de agua cargadas positivamente, y así, se hidratan muy rápidamente ante el contacto con agua o lixiviados.

Geomembranas: También son llamadas membranas de revestimiento flexible (flexible membrane liners, FML). Son geosintéticos impermeables compuestos por una o más laminas sintéticas que se utilizan para contener líquidos o gases. Se construyen de diversos materiales como cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad

(HDPE) o polietileno de baja densidad (LDPE). El HDPE es el material más utilizado ya que tiene una gran resistencia a los productos químicos y es impermeable al agua.



Figura 15: Geomembranas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).

Geotextiles: Son geosintéticos permeables compuestos de fibras textiles. Se caracterizan por tener una estructura abierta y porosa. Se utilizan para impedir el movimiento de las partículas pequeñas del suelo y para la proteger las geomembranas de posibles daños por penetración de materiales punzantes. Estos materiales permiten el movimiento del agua y retienen las partículas de residuos para reducir la producción de lixiviado.



Figura 16: Geotextiles (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).

Geomallas: es un producto plástico en forma de red. Los elementos de la red poseen resistencia a tracción que forman aberturas que son lo suficientemente grandes para formar una trabazón con la matriz de suelo que lo circunda. Pueden ser unidireccionales o bidireccionales y su estructura permite que el suelo pase a través de ella. Se utiliza como manto drenante en capas de recolección de material grueso.



Figura 17: Geomallas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).

Georedes: Las geored es una red plástica que se utiliza como capa drenante en rellenos sanitarios en lugar de arenas o gravas para la construcción de la capa de colección de lixiviados. Muchas veces las arenas y gravas son más efectivas debido a los costos y a que las georedes son más susceptibles a sufrir atascos de partículas pequeñas. Estos atascos podrían reducir el rendimiento del sistema de colección de lixiviado. Por otro lado, estos geosintéticos permiten el paso del agua más rápidamente que las arenas y gravas.

Generalmente se construyen con polietileno de alta densidad y están cubiertas con geotextiles.

Geocompuestos: Son geosintéticos formados por una combinación de dos o más tipos de geosintéticos.



Figura 18: Geomallas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).

Geocompuestos bentoníticos (GCL): Consisten en una capa de arcilla (bentonita) colocada sobre una geomembrana o entre dos geotextiles. Son los materiales más comunes en la construcción de barreras para rellenos sanitarios. Poseen ventajas frente a barreras de fondo convencionales, dentro de las que se pueden destacar:

- Son fáciles y rápidas de instalar
- Poseen una conductividad hidráulica muy baja
- Poseen la habilidad de auto-reparar rasgaduras o agujeros causados por la capacidad de hinchamiento de la bentonita.
- Menor espesor que las barreras convencionales.
- La eficiencia de las barreras es menos afectada por los ciclos de desecación.

En la Figura 19 se observa el fenómeno de hinchamiento de la bentonita.

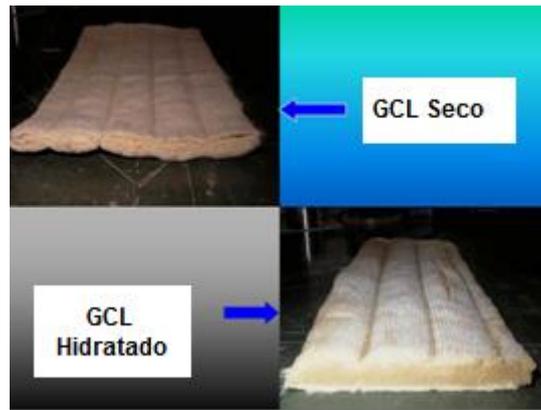


Figura 19: Fenómeno de hinchamiento en geocompuestos bentoníticos (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).

Los factores que mayor incidencia tienen en su rendimiento son la calidad de la arcilla, la cantidad de ésta por unidad de área y su uniformidad.

En pruebas de laboratorio realizadas por la EPA, se comprobó que la bentonita puede sellar agujeros de hasta 75mm de diámetro, permitiendo que las barreras de GCL sean uno de los sistemas más efectivos. En la Figura 20 se observan las diferentes configuraciones que pueden tener las barreras de GCL.

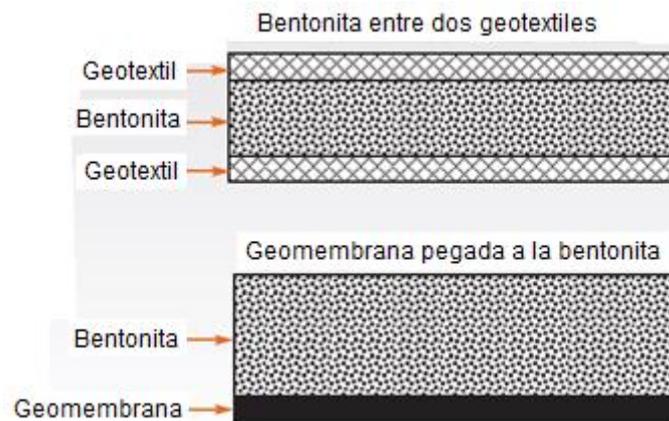


Figura 20: Configuración general de barreras de GCL (EPA, 2001).

En las configuraciones con geomembrana, la arcilla se fija a la misma a través de adhesivos mientras que en las que se utilizan geotextiles se suelen usar adhesivos, costuras, punzonado o una combinación de éstas. Aunque las costuras y punzonados crean pequeños orificios en el geotextil, éstos son sellados cuando se produce el hinchamiento del GCL. En la Figura 21 se muestran las uniones entre la arcilla y el geosintético.

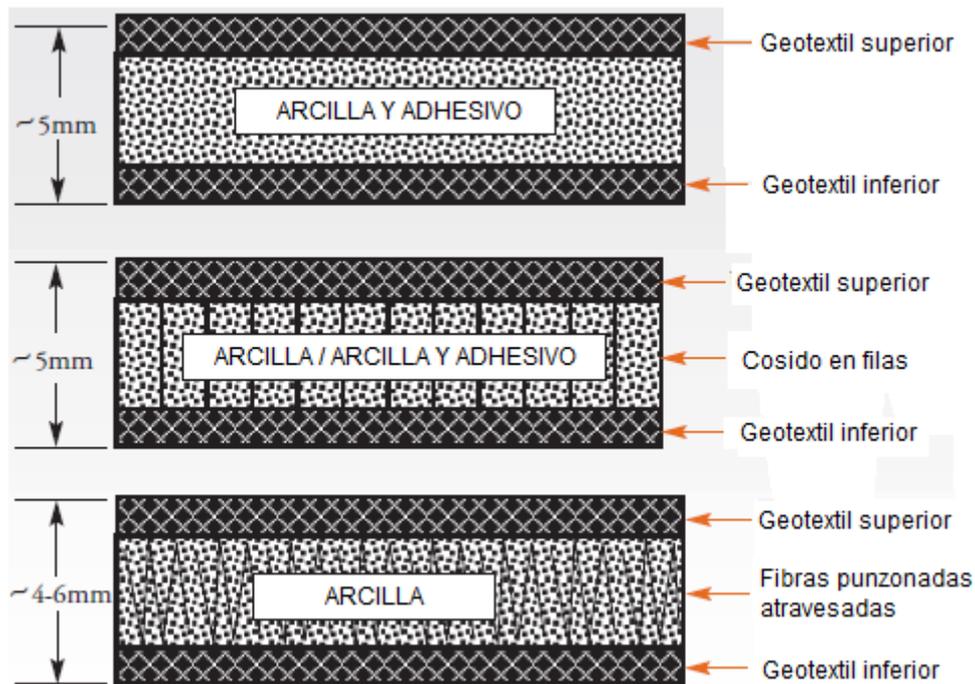


Figura 21: Fijación de arcilla al geotextil. a) Unión con adhesivos, b) Unión con costuras, c) Unión con punzonado (EPA, 2001).

Conductividad hidráulica: Los sistemas de GCL permiten obtener conductividades hidráulicas de hasta 1×10^{-12} cm/seg. Ésta dependerá de la calidad y cantidad de arcilla utilizada ya que esto resulta determinante en las características hidráulicas de la barrera. Los aditivos se utilizan para mejorar las propiedades hidráulicas de las mismas.

Resistencia al corte: Estos sistemas proveen una resistencia al corte considerable (máximo esfuerzo al que puede someterse un material sin perder la integridad de su estructura). En particular, la bentonita fijada por costura provee una resistencia al corte interna adicional a la barrera y el punzonado provee mayor fuerza y rigidez a la barrera. El punzonado requiere de un geotextil no tejido de al menos un lado, esto provee una mejor resistencia a la fricción en la interfaz.

En la Figura 22 se muestra un sistema de barrera de fondo que contiene múltiples materiales.

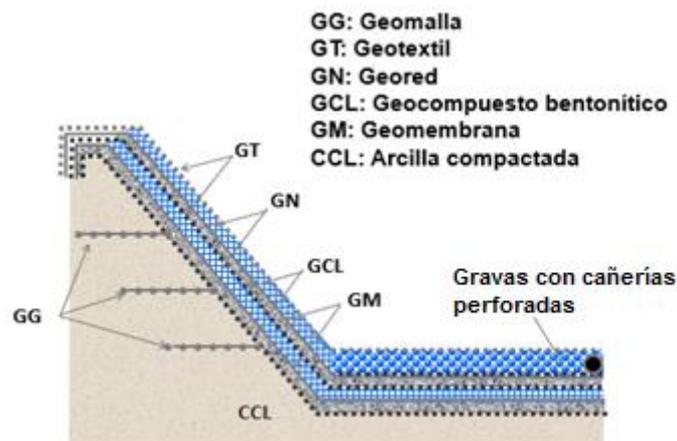


Figura 22: Sistema de barrera compuesta (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) desarrolló pruebas estandarizadas de laboratorio para evaluar la masa por unidad de área (ASTM D-3776), conductividad hidráulica (ASTM D-5084) y el corte directo (ASTM D-5321).

Investigadores del Instituto de Investigación en Geosintéticos de la Universidad de Drexler (Philadelphia, Pensilvania) y del Departamento de Ingeniería Geotécnica de Texas (Austin) desarrollaron pruebas para medir la resistencia al corte, así como el confinamiento, la tasa de reptación o creep y la permeabilidad utilizando uniones por costura. Estos métodos fueron adoptados por la ASTM. Además, la industria de la bentonita desarrolló pruebas para medir el hinchamiento (USP-NF-XVII). Las pruebas para la conductividad hidráulica dependen de las tensiones efectivas al aplicar sobrecargas al GCL durante el ensayo. Mientras más alto sea el esfuerzo de sobrecarga, menor es la conductividad hidráulica.

2.3.3. Caudal atravesado por la barrera

La Figura 23 muestra como fue variando la cantidad de lixiviado recolectado por debajo de barreras de arcillas compactadas y barreras compuestas, lo que nos da una idea de la efectividad de cada una. Se observa que en la última medición que se tiene de los años 90', la cantidad de lixiviado recolectado en barreras de suelos compactados es de aproximadamente 200 litros por semana, mientras que en las barreras compuestas está entre 0 y 10 litros semanales.

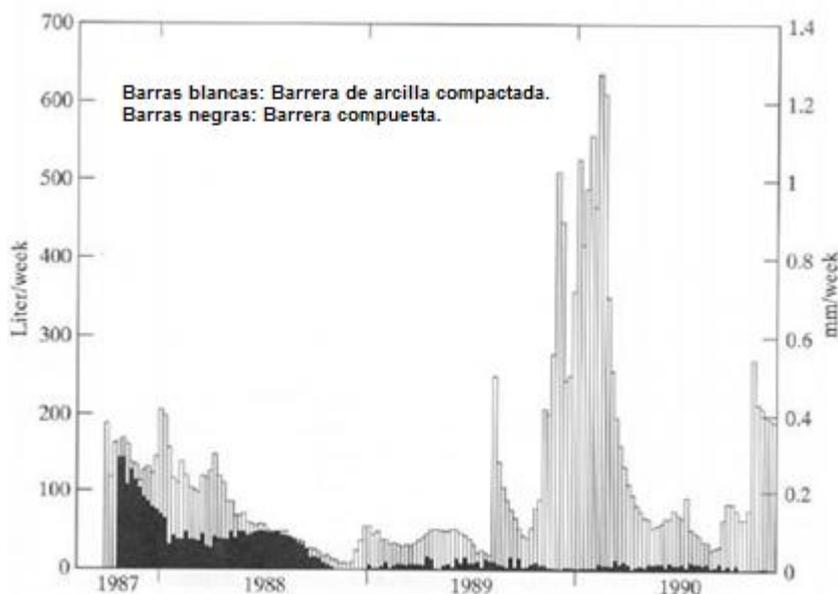


Figura 23: Comparación de lixiviado recolectado debajo de barreras de suelos compactados y barreras compuestas (Melchior and Miehlich, 1994).

Se considera que el permealto a través de la barrera compuesta (CCL+GM) se desarrolla a través de huecos (defectos) en la misma. El flujo a través de ellos puede calcularse como se muestra en la Tabla 6 teniendo en cuenta el tipo de contacto entre la geomembrana y la barrera de arcilla compactada.

Tabla 6: Ecuaciones para el cálculo del flujo a través de defectos (Touze-Foltz, Giroud, 2003).

Defecto	Condiciones de contacto	Ecuaciones empíricas para la tasa de flujo	Autor
Defecto circular	Excelente	$Q = 0.7h_w a^{0.1} k_s^{0.88}$	Giroud and Bonaparte (1989)
	Buena	$Q = 0.21h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	Giroud (1997)
	Pobre	$Q = 1.15h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	
Defecto de longitud infinita	Excelente	None	Giroud <i>et al.</i> (1992)
	Buena	$Q_L = 0.52h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.2(h_w/H_s)^{0.95}]$	
	Pobre	$Q_L = 1.22h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.2(h_w/H_s)^{0.95}]$	
Arruga dañada	Excelente	None	Touze-Foltz <i>et al.</i> (2002b)
	Buena	$Q_L = 0.94h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.2(h_w/H_s)^{0.95}]$	
	Pobre	$Q_L = 2.20h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.2(h_w/H_s)^{0.95}]$	

Donde Q es la tasa de flujo, Q_L es la tasa de flujo por unidad de longitud, h_w es la altura de lixiviado, H_b es el espesor de la barrera de suelo y a es el área del defecto, b es el ancho del defecto, k_s es la conductividad hidráulica y H_s es el espesor de la barrera de suelo.

Típicamente se recomienda considerar 5 defectos/ha, con un área por defecto de 290 mm².

2.3.4 Cálculo de la separación de los drenes colectores

$$L = \frac{2 \times h_{max}}{\sqrt{c} \cdot \left[\frac{\tan^2 \phi}{c} + 1 - \left(\frac{\tan \phi}{c} \right) \cdot \sqrt{\tan^2 \phi + c} \right]}$$

Donde:

L = distancia entre cañerías

h_{max} = carga máxima diaria

q =caudal

k = conductividad hidráulica del material granular

ϕ = pendiente de la capa drenante

c = q/k

θ = transmisividad

t = espesor del Geocompuesto

Cuando se reemplaza el material granular por un geocompuesto: $k = \theta/t$

2.3.5 Cálculo del espesor de la geomembrana

Existen recomendaciones y normas internacionales que especifican el espesor mínimo. Por ejemplo USEPA establece un espesor mínimo de 1,5 mm si la geomembrana es HDPE.

El espesor mínimo se calcula como:

$$t = \frac{\sigma_n x (\tan \delta_U + \tan \delta_L)}{\sigma_{allow} (\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_L)}$$

σ_n = Tensión normal vertical

t = espesor de la geomembrana

x = deformación de la geomembrana

δ_U = ángulo de fricción entre la geomembrana y el material de cobertura superior

δ_L = ángulo de fricción entre la geomembrana y el material de asiento inferior

σ_{allow} = tensión máxima permitida en la geomembrana

β = ángulo de asentamiento que moviliza la tensión en la geomembrana

2.3.6 Protección contra rasgadura y punzonamiento

Las geomembranas se disponen bajo/sobre capas de diferentes características que contienen partículas o elementos que pueden dañarlas. Las capas de drenaje que se colocan sobre la geomembrana están formadas por gravas, que son partículas grandes y angulosas, las cuales pueden generarle pinchazos o rasgaduras. De la misma forma, durante la instalación de las barreras, el tránsito ocasional de maquinaria pesada puede ocasionarle daños al geosintético. Por esta razón, se calcula un factor de seguridad para proteger la geomembrana de espesor mínimo a través de la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{p_{allow}}{p_{act}}$$

Donde:

$$p_{allow} = \left(50 + 0,00045 \frac{M}{H^2} \right) \left[\frac{1}{MF_S \times MF_{PD} \times MF_A} \right] \left[\frac{1}{RF_{CR} + RF_{CBD}} \right]$$

p_{allow} = Presión admisible (kPa)

M = masa por unidad de área de geotextil

H = tamaño de grano que rasgaría la geomembrana

MF_S = Factor de modificación por la forma de grano

MF_{PD} = Factor de modificación por densidad de compactación.

MF_A = Factor de modificación por efecto arco

RF_{CR} = Factor de reducción por creep a largo plazo

RF_{CBD} = Factor de reducción por degradación química/biológica a largo plazo

La Tabla 7 muestra los valores que pueden tomar los factores de modificación MF_S , MF_{PD} y MF_A . La Tabla 8 indica los valores que pueden tomar los factores de reducción RF_{CR} y RF_{CBD} .

Tabla 7: Valores de MFs, MFPD y MFA (Material de Clases Ingeniería Ambiental III).

Factores de Modificación					
MFs		MFPD		MFA	
Angular	1,0	Aislado	1,0	Hidrostático	1,0
Subredondeado	0,5	Denso, 38 mm	0,83	Geostático, poco profundo	0,75
Redondeado	0,25	Denso, 25 mm	0,67	Geoestático, moderadamente profundo	0,50
		Denso, 12 mm	0,50	Geoestático, profundo	0,25

Tabla 8: Valores de los factores de reducción RFCR y RFCBD (Material de Clases Ingeniería Ambiental III).

Factores de reducción					
RFCBD		RFCR			
		Masa por unidad de área (g/m ²)	Altura de granos u objetos punzantes (mm)		
			38	25	12
Lixiviados leves	1,1	Geomembrana sola	N/R	N/R	N/R
Lixiviados normales	1,3	270	N/R	N/R	N/R
Lixiviados concentrados	1,5	550	N/R	N/R	1,5
		825	N/R	1,5	1,3
		>1100	1,3	1,2	1,1

2.3.7 Sistemas Americanos de GCL

- a) Sistemas con geotextil:
- Bentofix: Bentonita activada sódica fijada por punzonado a un geotextil superior (tejido o no tejido) y a un geotextil inferior (no tejido).
 - Bentomat: Bentonita sódica fijada por punzonado a un geotextil superior (tejido o no tejido) y a un geotextil inferior (no tejido).
 - Claymax: Bentonita sódica mezclada con adhesivo soluble en agua cosida a un geotextil tejido superior e inferior.
- b) Sistemas con geomembrana:
- Gundseal: Bentonita sódica mezclada con un adhesivo unida a una mezcla de polietileno de alta densidad y polietileno de muy baja densidad.

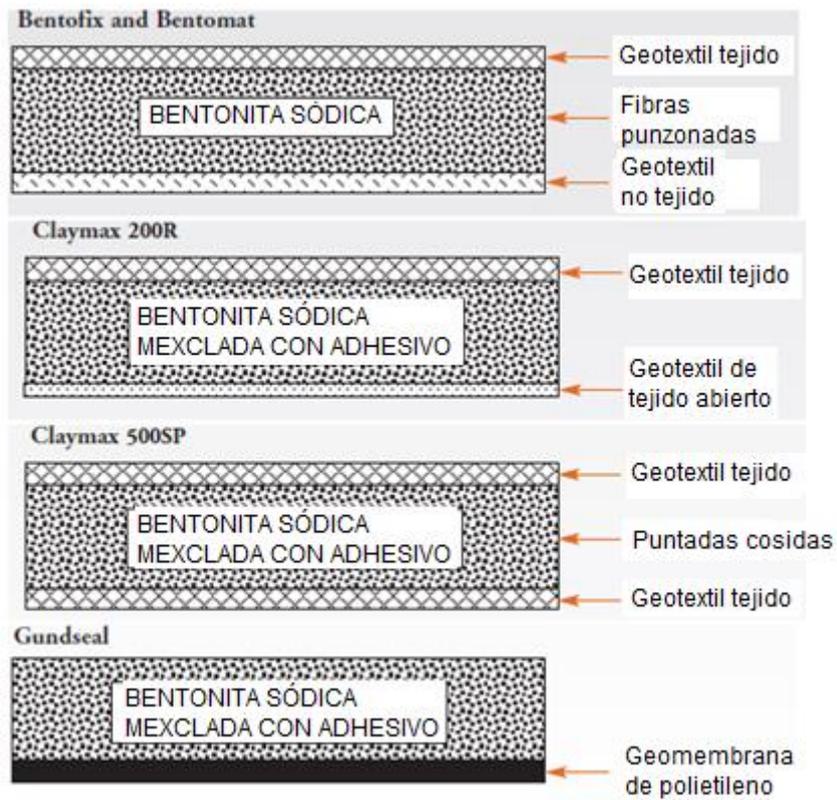


Figura 24: GCL (EPA, 2001).

La Tabla 9 muestra diferentes sistemas de GCL que varían según el fabricante:

Tabla 9: Principales GCL disponibles en los Estados Unidos (EPA, 2001).

Fabricante y nombre del producto	Geosintético superior ^a	Geosintético inferior ^a	Método de unión	Roll Standard Ancho x Largo
Fluid Systems, Inc. (FSI) (Alemania)				
Bentofix NS	Tejido	no tejido	Punzonado	15.2 x 100
Bentofix WP	Tejido	no tejido	Punzonado	15.2 x 101
Bentofix NW	no tejido	no tejido	Punzonado	15.2 x 102
Colloid Environmental Technologies Company (CETCO) (Estados Unidos)				
Claymax 200R	Tejido	Tejido	Adherido	13.83 x 150
Claymax 500SP	Tejido	Tejido	adherido y cosido	13.83 x 150
Claymax 206SP	Tejido	Tejido	adherido y cosido	13.83 x 150
Bentomat ST	Tejido	no tejido	Punzonado	15.3 x 125
Bentomat N	no tejido	no tejido	Punzonado	15.3 x 125
GSE Environmental (Estados Unidos) ^b				
Gundseal HD20	no tiene ^c	HDPE ^d	Adherido	17.5 x 200
Gundseal HD30	no tiene ^c	HDPE	Adherido	17.5 x 200
Gundseal HD30	no tiene ^c	HDPE/ULDPE ^e	Adherido	17.5 x 200
Gundseal HD60	no tiene ^c	HDPE/ULDPE	Adherido	17.5 x 170
Gundseal HD80	no tiene ^c	HDPE/ULDPE	Adherido	17.5 x 150
Gundseal HD40	no tiene ^c	HDPE texturada	Adherido	17.5 x 200
Gundseal HD60	no tiene ^c	HDPE texturada	Adherido	17.5 x 200

^a Estas propiedades varían con el producto y la aplicación.

^b Los productos Gundseal pueden ser fabricados en anchos de 8 pies y con bentonita resistente al lixiviado.

^c Pueden fabricarse con un geotextil no tejido de 0.75 onzas por yarda cuadrada como el material del geosintético superior.

^d Polietileno de alta densidad.

^e Polietileno de muy baja densidad.

2.3.8 Normativas internacionales

Con el motivo de dar una visión sobre los requerimientos mínimos para el diseño de barreras en rellenos sanitarios, resulta útil discutir y comparar el desempeño de diferentes sistemas de barreras utilizados alrededor del mundo. El diseño de las barreras de contención de residuos varía entre y dentro de los países en función de las prácticas que se llevan a cabo y las estrategias para el manejo y la gestión de los residuos.

A continuación se presenta un estudio comparativo realizado por Chai y Miura (2002) donde se muestra el desempeño de diferentes sistemas de barreras de fondo en Europa, Estados Unidos y Japón teniendo en cuenta los requerimientos mínimos de diseño.

Los sistemas de barreras se comparan de acuerdo a su habilidad para prevenir el transporte de contaminantes por advección y difusión a través de las mismas, los sistemas de colección de lixiviados, el sistema de cobertura para reducir la infiltración en el relleno sanitario y los sistemas de monitoreo.

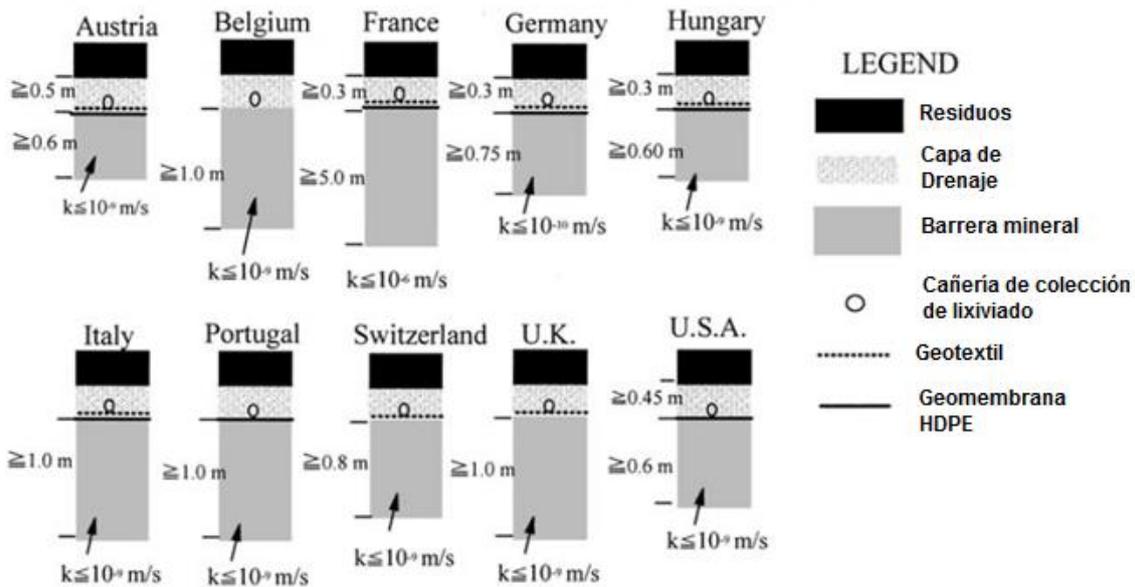


Figura 25: Sistemas de barreras fondo Europeas y Americanas para RSU (Chai y Miura, 2002).

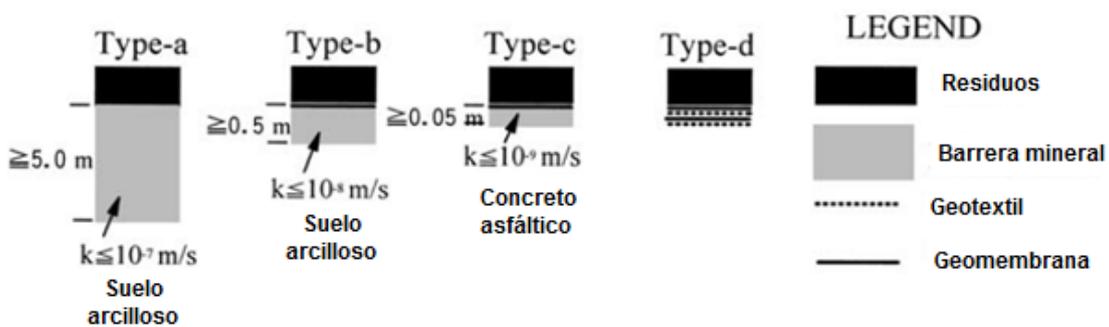


Figura 26: Sistemas de barreras fondo Japonesas para RSU (Chai y Miura, 2002).

El Código de Regulación Federal (CFR, 1991) de los Estados Unidos establece en el apartado 258 (40 CFR Part 258) los criterios generales, operativos, de diseño y control para la disposición de residuos sólidos urbanos. Allí se establecen los requerimientos mínimos que se necesitan cumplir para el diseño de sistemas de barreras, los principales son citados a continuación (Nieva, 2008):

- ✓ Sistema de remoción y recolección de lixiviados que limite la carga de lixiviado por encima de la barrera de contención a 0,30 m o menos.
- ✓ Geomembrana de 0,75 mm de espesor.
- ✓ Barrera de arcilla compactada de 0,60 m de espesor, con un valor máximo de conductividad hidráulica de 1×10^{-7} cm/s como mínimo.

La Ley para la Recuperación y Conservación de los Recursos (Resource Conservation and Recovery Act; RCRA) establece en el apartado D los criterios generales para el diseño de barreras y sistemas de recolección de residuos.

Estándares ASTM utilizados para la el diseño de barreras de fondo utilizando geocompuestos bentoníticos (GCL):

- ✓ ASTM D5889 Standard Practice For Quality Control of GCLs.

- ✓ ASTM D5887 Standard Test Method for Measurement of Index Flux through Saturated GCL Specimens Using a Flexible Wall Permeameter.
- ✓ ASTM D5890 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of GCLs.
- ✓ ASTM D5891 Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Liner Component of GCLs.
- ✓ ASTM D5993 Standard Test Method for Measuring Mass per Unit of GCLs.
- ✓ ASTM D6243 Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of GCL by Direct Shear Method.

Estos documentos proveen información sobre esta tecnología y presentan casos de aplicación que resultaron exitosos.

2.3.9 Normativas nacionales

En nuestro país aún no existe legislación que establezca criterios de diseño para la disposición de residuos en rellenos sanitarios. Sin embargo debe tenerse en cuenta la legislación nacional, provincial y municipal vigente.

En el programa “Córdoba Limpia” presentado por el Gobierno de la Provincia de Córdoba se establecen las características que debe tener la fosa de disposición final aprobadas por la resolución 372/01. Se plantea la utilización de sistemas compuestos por suelo compactado (arcilla, bentonita, arcilla mezcla, suelo cemento, suelo compactado) y películas sintéticas (geomembranas de cloruro de polivinilo PVC, de polietileno de alta densidad, baja o media, de polietileno clorado CPE, polietileno clorosulfonado CSPE, etc).

También se especifica que para la compactación de la barrera debe utilizarse compactación mecánica en la base de la fosa al 95% del Ensayo Proctor Modificado, luego y por encima de esta base la utilización de mezclas de suelo-arcilla (bentonita), con un espesor mínimo de 0,20 m de suelo tratado y una proporción media del orden del 5% en peso de bentonita agregada al suelo, se dará una pendiente final que facilite el drenaje de los lixiviados que descienden desde la masa de residuos hasta encontrar esta barrera de muy baja permeabilidad. Por encima de dicha barrera se coloca un elemento drenante (medio poroso o ductos), y por encima aún, suelen colocarse elementos de protección (naturales o sintéticos).

Ordenanza 9612: Residuos

Tiene como objeto regular, en el ámbito del Municipio de la Ciudad de Córdoba, la generación, manipulación, operación, transporte, tratamiento y disposición final de las distintas categorías de residuos.

En el artículo 24 se establece que se procederá al tratamiento y disposición final de los residuos procesándolos en fosas que se excavarán en el predio del enterramiento sanitario respetando los siguientes puntos:

- a) Los acuíferos y suelos deberán protegerse de la contaminación causada por el percolado impermeabilizando la base de las fosas. Para esto deberán escarificarse y compactarse. Una vez nivelada la superficie, deberá impermeabilizarse con membrana de PVC (Geomembrana de Polivinilo) o PEAD (Polietileno de Alta Densidad) o CSPE (Polietileno cloro Sulfonado) de un espesor mínimo de 1,40 mm con un ancho mínimo de 6,30 m,

posteriormente se cubrirá con geotextil de espesor mínimo de 3 mm y capa de 0,40 m de espesor, de suelo compactado.

- b) Los líquidos lixiviados deberán ser extraídos a través de un sistema de filtros percoladores, los cuales permitirán el drenaje del efluente a través de lechos formados por fracciones gruesas.

2.4 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE BARRERAS EN RELLENOS SANITARIOS

El propósito de este apartado es dar una idea de los factores físicos y químicos que influyen en la migración subsuperficial de los contaminantes disueltos. Para ello se considera el comportamiento de solutos no reactivos y de solutos que experimentan reacciones durante la migración subsuperficial. Los principales procesos que afectan a los contaminantes bajo la superficie pueden agruparse en 3 categorías:

1. Procesos de transporte: Incluyendo difusión, advección y dispersión.
2. Procesos químicos de transferencia de masa: Incluyendo sorción y desorción, disolución y precipitación, oxidación y reducción, reacciones ácido base, intercambio iónico, volatilización, hidrólisis, etc.
3. Procesos biológicos (biodegradación).

Estos procesos ocurren bajo diferentes condiciones hidráulicas y químicas, las cuales pueden existir ya sea naturalmente o ser aplicadas externamente en el suelo o los sistemas subterráneos (USEPA, 1989). En este apartado nos detendremos en los procesos de transporte y los de transferencia de masa.

2.4.1 Procesos de transporte

El punto de partida común en el desarrollo de ecuaciones diferenciales para describir el transporte de solutos en materiales porosos, consiste en considerar el flujo del soluto dentro y fuera de un volumen elemental, dentro del dominio del flujo. (Freeze & Cherry, 1979). La declaración de la conservación de la masa para este volumen elemental es:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tasa neta de} \\ \text{cambio de} \\ \text{masa de soluto} \\ \text{dentro del elemen -} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de} \\ \text{solute} \\ \text{fuera del} \\ \text{elemento} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de} \\ \text{solute en} \\ \text{el} \\ \text{elemento} \end{array} \right] \pm \left[\begin{array}{c} \text{Pérdida o} \\ \text{ganancia de masa} \\ \text{desouto debido} \\ \text{a reacciones} \end{array} \right]$$

Los procesos físicos que controlan el flujo dentro y fuera de un volumen elemental son la *advección*, *difusión* y la *dispersión*. En este caso se desarrollaran estos conceptos teniendo en cuenta que se trata de contaminantes no reactivos, es decir, aquellos que no son influenciados por reacciones químicas o procesos microbiológicos.

2.4.1.1 Advección

La advección es el proceso en el cual el contaminante se mueve por agua que fluye debido a gradientes hidráulicos. La velocidad del agua subterránea está dada por la Ley de Darcy, que establece que:

$$V = k \cdot i$$

Donde V es la velocidad de descarga, k es la conductividad hidráulica e i es el gradiente hidráulico.

En el caso de transporte de contaminantes, la ecuación se escribe como:

$$V_s = \frac{k \cdot i}{n}$$

Donde V_s es la velocidad de infiltración y n la porosidad. Se tienen 2 tipos de porosidad en los problemas de transporte de contaminantes. La porosidad efectiva n_e se define como el volumen de vacíos por donde efectivamente se mueve la mayor parte del flujo. La velocidad efectiva excluye los poros no-inteconectados y los que constituyen “callejones sin salida” por lo que $n_e < n$. Por otro lado, la porosidad total incluye el agua inmóvil que se encuentra en los poros y contienen soluto, y deben tenerse en cuenta cuando se determina la masa total del sistema. En la práctica, se asume que la porosidad total es igual a la porosidad efectiva.

Para ser precisos, la velocidad del flujo se obtiene por:

$$V_s = \frac{k \cdot i}{n_e}$$

Bajo condiciones de flujo unidimensional y en estado estacionario, la masa del flujo contaminante debida a la advección (F_a) está dada por:

$$F_a = V \cdot C = n_e \cdot V_s \cdot C$$

Donde C es la concentración de contaminante disuelto. Bajo condiciones de flujo uniforme, el transporte advectivo se describe por:

$$\frac{dC}{dt} = -V_s \frac{dC}{dx}$$

La solución de esta ecuación establece que si un contaminante de concentración C_0 es introducido en agua subterránea en movimiento, en un tiempo t se transportará a una distancia $x = V_s \cdot t$ debido al proceso de advección. Esto se observa en la Figura 27:

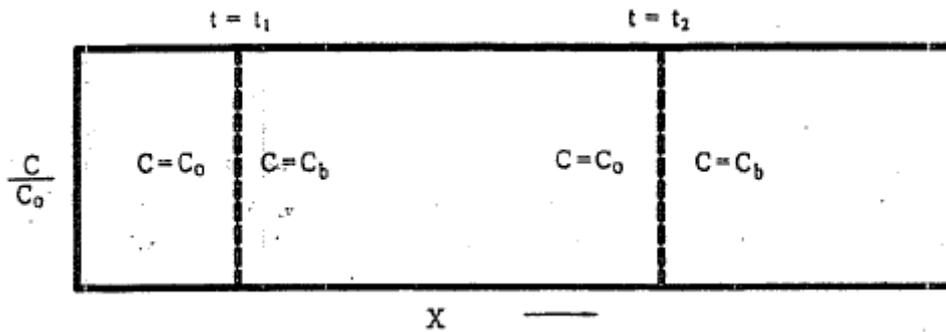


Figura 27: Proceso de advección (Sharma & Reddy, 2004).

Donde:

C_0 = concentración al inicio

C_b = concentración a la salida

2.4.1.2 Difusión

El proceso de difusión, también llamado difusión molecular es aquel en el cual los contaminantes se mueven por gradientes de concentración. Este proceso puede ocurrir incluso cuando el fluido no está en movimiento o está fluyendo en la dirección opuesta a la del movimiento del líquido dentro de los poros del suelo. La difusión se caracteriza a través de la primera Ley de Fick. Para condiciones de flujo unidimensional, ésta se expresa como:

$$F_d = -D_m \frac{dC}{dx}$$

Donde F_d es el flujo de masa difusivo por unidad de área por unidad de tiempo, D_m es el coeficiente de difusión molecular y $\frac{dC}{dx}$ el gradiente de concentración. El valor de D_m no varía significativamente para diferentes suelos y combinaciones de contaminantes y va desde 1×10^{-9} a 2×10^{-9} m²/s (Mitchell, 1976).

De la primera Ley de Fick y la ecuación de continuidad se obtiene la segunda Ley de Fick, que está dada por:

$$\frac{dC}{dt} = D_m \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right)$$

Para la condición inicial $C(x,0)=0$ y las condiciones de borde $C(0,t)=C_0$ y $C(\infty,0)$, la solución de la ecuación está dada por (Crank, 1956):

$$C(x,t) = C_0 \cdot \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D^*t}} \right)$$

Donde C_0 representa la concentración inicial del contaminante, la cual se asume constante y erfc es la función error complementaria. El proceso de difusión se representa en el siguiente gráfico (Figura 28):

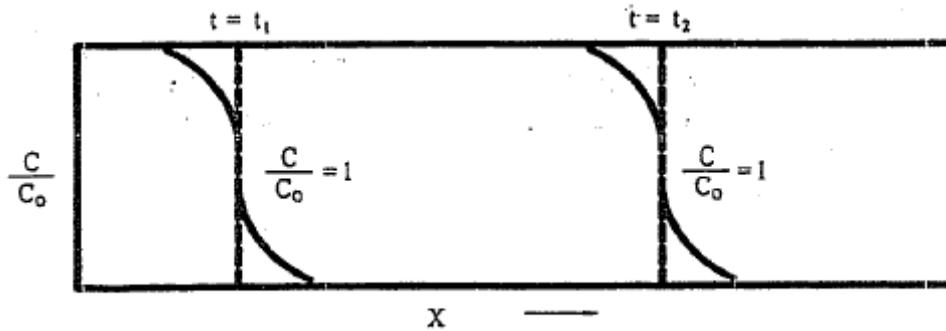


Figura 28: Proceso de difusión (Sharma & Reddy, 2004).

2.4.1.3 Dispersión

A nivel microscópico, la velocidad del agua puede variar de un punto a otro y puede ser más alta o más baja que la velocidad promedio. Esta diferencia de velocidades se debe a diversos factores:

- Tamaño de los poros: La velocidad del agua es inversamente proporcional al tamaño de los poros.
- Longitud del trayecto: Mientras mayor es el largo del trayecto, menor será la velocidad del fluido.
- Fricción en los poros: El agua que fluye más cerca de las paredes minerales de los granos que forman los poros posee velocidades más bajas debido a la fricción.

Debido a esta diferencia de velocidades, se produce un mezclado a lo largo de la trayectoria del flujo, lo que se conoce como dispersión hidrodinámica o simplemente dispersión. El mezclado que ocurre a lo largo de la dirección de la trayectoria del flujo se denomina dispersión longitudinal. Los contaminantes también se esparcen en direcciones normales a la dirección del flujo, lo que se conoce como dispersión transversal. En resumen, podemos decir que la dispersión es el proceso en el cual el flujo tiende a desviarse de las trayectorias lineales propuestas por la ley de Darcy (trayectoria advectiva) (Figura 29).

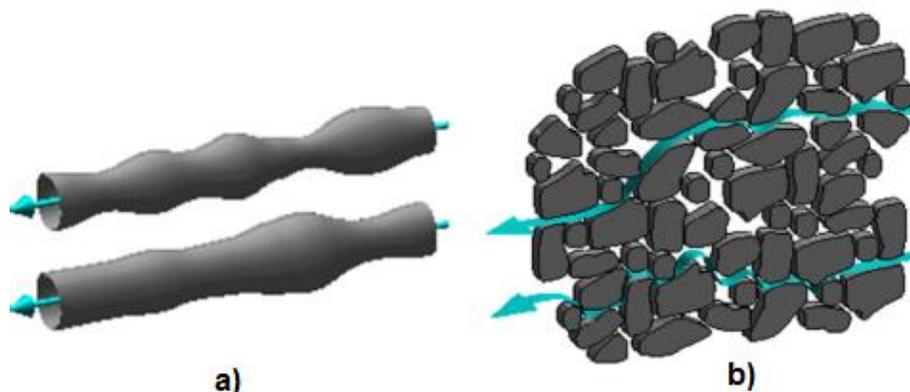


Figura 29: Trayectorias del flujo. a) Trayectorias del flujo lineales asumidas por la Ley de Darcy, b) Trayectorias reales del flujo (Hornberger et al., 1998).

Ambas componentes de dispersión son funciones de la velocidad promedio. La dispersión longitudinal y transversal se definen de la siguiente manera:

$$D_x = \alpha_x V_s$$

$$D_y = \alpha_y V_s$$

Donde α_x es el coeficiente de dispersividad longitudinal, α_y el coeficiente de dispersividad transversal y V_s la velocidad de infiltración promedio. Generalmente, la difusión molecular y la dispersión se combinan y se definen la dispersión hidrodinámica longitudinal y transversal D_x^* y D_y^* respectivamente:

$$D_x^* = \alpha_x V_s + D_m$$

$$D_y^* = \alpha_y V_s + D_m$$

Donde:

$$\alpha_x = 3,28 \times 0,32 \times ((L \times 0,3048)^{0,83})$$

$$\alpha_y = 0,1\alpha_x ; \alpha_z = 0,1\alpha_y$$

La Figura 30 representa el proceso de dispersión para diferentes tipos de fuentes contaminantes. La Figura 30(a) ilustra lo que ocurre si se tiene una fuente de contaminación continua y constante, mientras que la Figura 30(b) muestra como se produce el proceso para el caso de una fuente puntual instantánea. Conforme el trazador es transportado a lo largo de la trayectoria de flujo, se esparce en todas las direcciones en el plano horizontal. En la Figura 30 (b) la masa total del trazador en el régimen de flujo no cambia, pero ocupa un volumen mayor del medio poroso. Además, esta misma figura muestra que la zona del trazador desarrolla una forma elíptica a medida que el mismo es transportado a través del sistema. Esto ocurre porque el proceso de dispersión mecánica es anisotrópico. La dispersión es más fuerte en la dirección del flujo (dispersión longitudinal) que en la dirección normal a la línea de flujo (dispersión transversal).

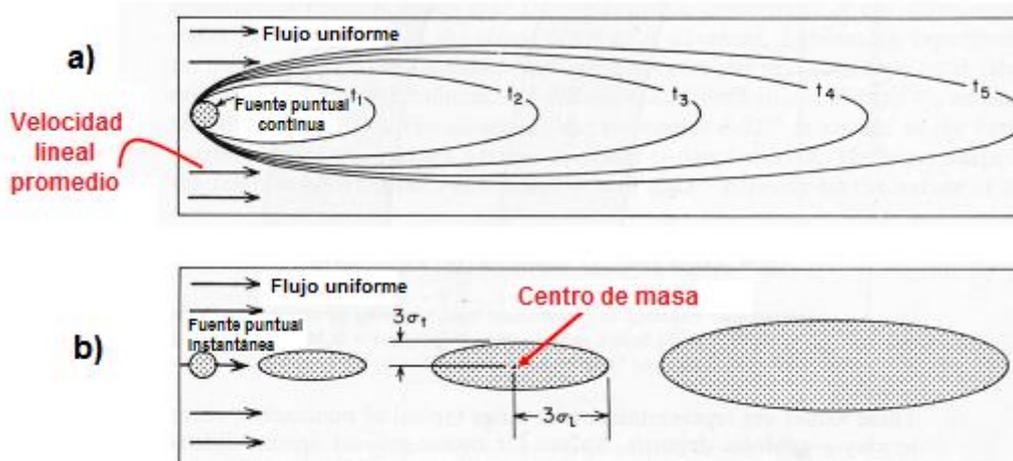


Figura 30: Propagación de un trazador en un campo de flujo uniforme bidimensional en una arena isotrópica. (a) Alimentación continua del trazador con la condición inicial de función variable; (b) fuente puntual instantánea. (Freeze & Cherry, 1979).

La zona en la que se encuentra el 99.7% de la masa contaminante es descrita por el elipsoide con las siguientes dimensiones medidas desde el centro de la masa:

$$3\sigma_x = \sqrt{2D_x t}$$

$$3\sigma_y = \sqrt{2D_y t}$$

Donde σ es la desviación estándar de la distribución de la concentración. Esto puede observarse en la Figura 30(b).

2.4.2 Procesos químicos de transferencia de masa

Los procesos de transferencia de masa que son importantes a la hora de evaluar el transporte de contaminantes debajo de la superficie son sorción y desorción, disolución y precipitación, oxidación y reducción, intercambio iónico, volatilización e hidrólisis. En este apartado centraremos nuestra atención en los procesos de sorción/desorción y precipitación ya que son los más relevantes teniendo en cuenta las características de las barreras que estamos estudiando. En caso de que los demás procesos sean relevantes puede encontrarse mayor información en Sharma & Reddy.

2.4.2.1 Sorción y desorción

La sorción (o retardo) es el proceso en el que los contaminantes se pegan a las partículas minerales y la materia orgánica del suelo. La sorción engloba varios procesos como la adsorción, la sorción química y la absorción.

La adsorción consiste en que un contaminante queda pegado a una superficie sólida. La sorción química hace referencia a que los contaminantes se incorporan a la superficie del suelo por reacciones químicas, mientras que en la absorción el contaminante difunde dentro de las partículas y es adsorbido a superficies interiores. Generalmente nos interesa el efecto combinado de todos estos procesos, lo que se conoce como sorción. La sorción define la distribución del contaminante entre la fase líquida y la fase sólida, por lo que también se la conoce como partición. La desorción, lo opuesto a la sorción, se refiere a contaminantes que se despegan de partículas minerales y materia orgánica del suelo.

La Figura 31 muestra que si se tiene un contaminante que no reacciona con el medio físico, el centro de masa del mismo llegaría a la salida de la barrera en un tiempo t_c , en cambio, si el contaminante tiene la posibilidad de reaccionar con el medio físico y adsorberse, éste irá quedando retenido, entonces cuando el flujo de agua pasa, el contaminante no lo hace, apareciendo éste a un tiempo mayor, t_c^* .

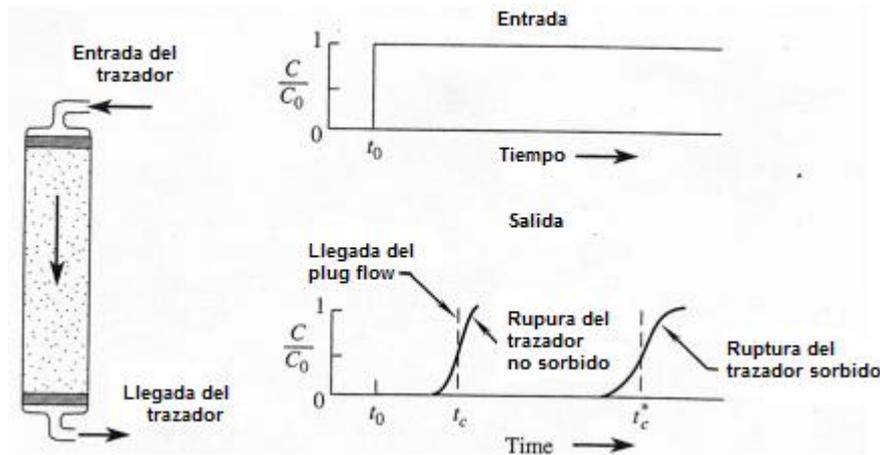


Figura 31: Proceso de sorción. Comparación de los tiempos t_c y t_c^* (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

De esta forma, podemos determinar experimentalmente el *factor de retardo R* a través de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{t_c^*}{t_c} = \frac{v}{v_c}$$

De la misma forma, el factor *R* puede calcularse comparando las distancias que se desplazó el contaminante que reacciona con el medio físico y la que se desplazó el que no lo hace (Figura 32):

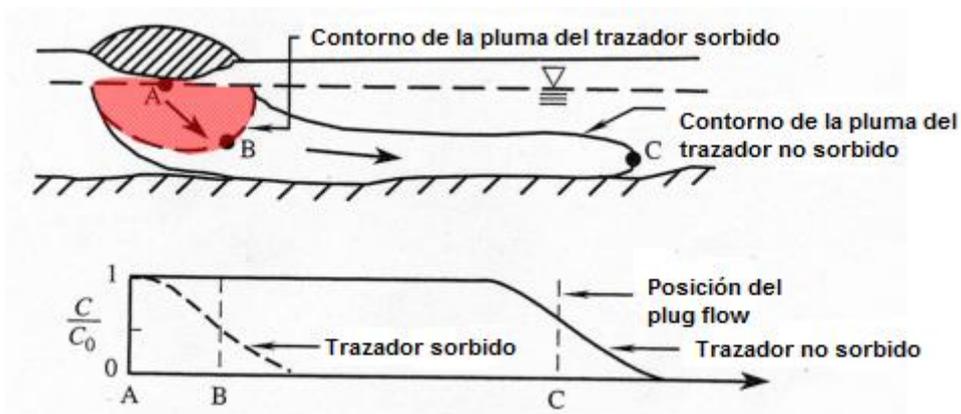


Figura 32: Proceso de sorción. Comparación de las distancias AB y AC (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

Entonces:

$$R = \frac{\text{Distancia AC}}{\text{Distancia AB}} = \frac{v}{v_c}$$

Muchos factores afectan la sorción de contaminantes en suelos. Estos incluyen:

- Características del contaminante: solubilidad en agua, polaridad, coeficiente de partición octanol-agua.
- Características del suelo: mineralogía, permeabilidad, porosidad, textura, homogeneidad, contenido de carbón orgánico, carga superficial.

- Características del medio fluido: pH, contenido de sales, contenido de carbono orgánico disuelto.

La relación entre los contaminantes sorbidos en los sólidos del suelo (S) y el que está presente en el agua que se encuentra en los poros del suelo (C) en equilibrio se conoce como isoterma. El término isoterma hace referencia a condiciones de temperatura constante. Entre las más utilizadas se encuentran (Figura 33):

- Isotermas lineales
- Isotermas de Freundlich
- Isotermas de Langmuir

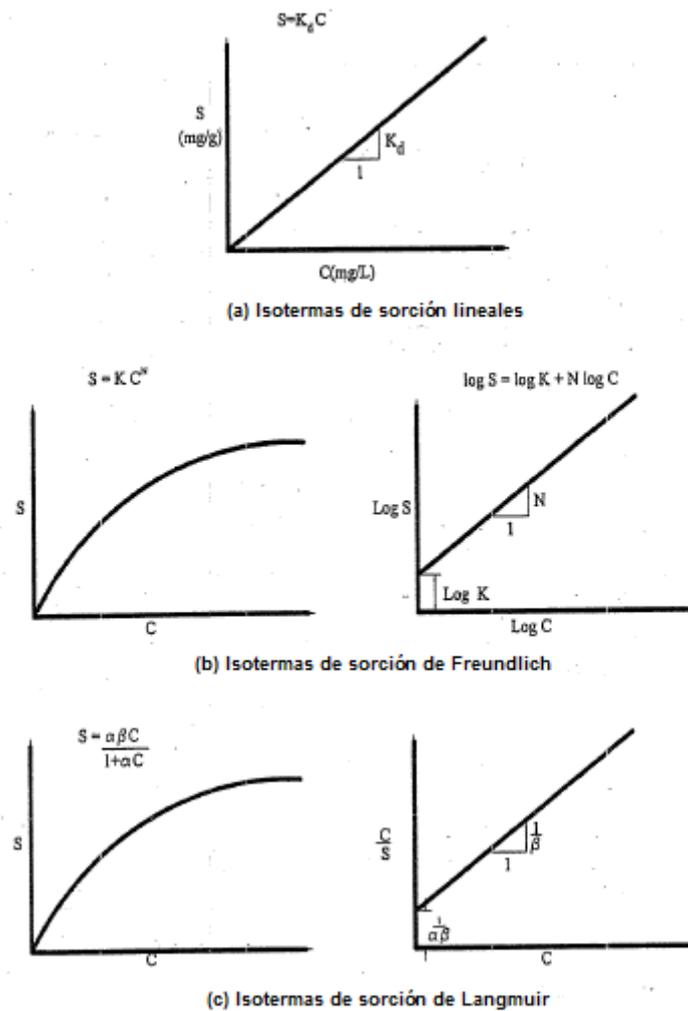


Figura 33: Tipos de isotermas (Sharma & Reddy, 2004).

Isotermas lineales

Las isotermas lineales se expresan matemáticamente como:

$$S = K_d C$$

Donde S es la masa de contaminante sorbida por unidad de peso seco de sólido, C es la concentración de contaminante en solución en equilibrio y K_d es el coeficiente de partición, el cual se utiliza para determinar el *factor de retardo*, R:

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{n} K_d$$

Donde n y ρ_d son la porosidad y la densidad seca. Utilizando el coeficiente de retardo, la velocidad del contaminante V_{cont} está dada por:

$$V_{cont} = \frac{V_s}{R}$$

R generalmente es mayor a 1, por lo tanto esta ecuación muestra que la migración del contaminante es menor que el flujo de agua. Las isothermas lineales son las más utilizadas para determinar la migración de contaminantes debido a su simplicidad. Sin embargo, generalmente es válido utilizarlas en rangos de bajas concentraciones de contaminante.

Isotermas de Freundlich

Para mayores concentraciones del contaminante, se utilizan las isothermas de Freundlich que se expresan como:

$$S = KC^N$$

Donde K y N son constantes. Para calcular K y N la ecuación anterior se hace lineal a representando el $\log C$ vs. $\log S$. La pendiente de la línea recta representa la constante N y la ordenada al origen representa $\log K$. el factor de retardo R esta dado por:

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{n} KNC^{N-1}$$

La velocidad del contaminante V_{cont} puede calcularse de la misma forma que para las isothermas lineales.

Isotermas de Langmuir

Estas isothermas también representan una relación no lineal entre S y C, fueron desarrolladas basándose en el concepto de que una superficie solida posee un numero finito de de sitios de sorción. La sorción no ocurre si todos los sitios de sorción están llenos. Matemáticamente, se expresan como:

$$S = \frac{\alpha\beta C}{1 + \alpha C}$$

Donde α es una constante de adsorción relacionada a la energía de enlace, β es la máxima cantidad de contaminante que puede ser adsorbido por el sólido. Para determinar estos dos parámetros, se representa C/S vs. C obteniéndose una línea recta. La pendiente de la recta es $1/\beta$ y la ordenada al origen representa $1/\alpha\beta$. El factor de retardo está dado por:

$$R_R = 1 + \frac{\rho_d}{n} \frac{\alpha\beta}{(1 + \alpha C)^2}$$

La velocidad del contaminante V_{cont} puede calcularse de la misma forma que para las isothermas lineales.

Todas estas isothermas son validas para condiciones de equilibrio. Para la mayoría de las situaciones esta suposición es válida, sin embargo, cuando la tasa de cambio de la concentración debida a la sorción es significativamente mayor que los otros procesos, especialmente advección y dispersión, se necesitan modelos de sorción para condiciones de desequilibrio.

2.4.2.2 Precipitación y disolución

Las reacciones de precipitación y disolución incluyen compuestos químicos en fases sólidas y se describen por una constante de equilibrio K. En muchas reacciones donde la actividad del sólido reaccionante es igual a 1, una comparación del tamaño relativo de la constante de equilibrio provee una idea aproximada acerca de la solubilidad del sólido en agua pura. Los minerales de los grupos carbonatos, silicatos y aluminios poseen baja solubilidad.

Cuando se tienen iones presentes en la solución, la solubilidad del sólido puede diferir de la que se tendría en agua pura. La solubilidad aumenta con las no idealidades de la solución y disminuye con el efecto del ión común. Generalmente, la solubilidad aumenta cuando aumenta la fuerza iónica, ya que otros iones en solución reducen la actividad del ión involucrado en la reacción.

El efecto del ión común se produce cuando la solución posee los mismos iones que luego serán liberados cuando el sólido se disuelva. La presencia del mismo ión indica que menor cantidad de sólido es capaz de disolverse antes de que la solución alcance la saturación con respecto a ese ión. Por lo tanto, en este caso la solubilidad de un sólido será menor.

2.4.3 Transporte de contaminantes y modelación

El modelado de transporte de contaminantes que incorporan los procesos descritos anteriormente se realiza para determinar las concentraciones del contaminante en zonas expuestas a los mismos teniendo en cuenta un análisis de riesgos y para evaluar y/o diseñar sistemas efectivos de aislación de residuos y sistemas de remediación in situ (Sharma & Reddy, 2004).

Consideraremos que el flujo se mueve en 3 dimensiones x, y, z asumiendo:

- Porosidad media homogénea
- Porosidad media isotrópica
- Porosidad media saturada
- Flujo en estado estacionario
- Se aplica la Ley de Darcy

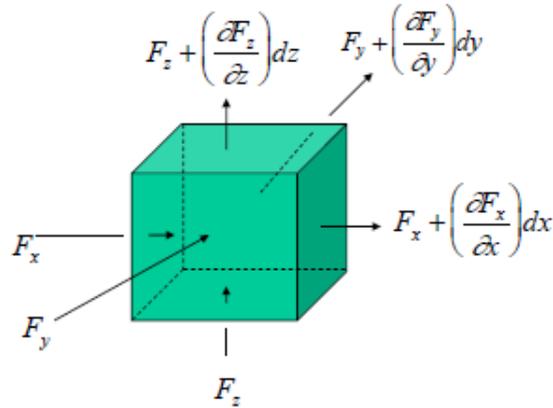


Figura 34: Direcciones del transporte de contaminantes (Material de clases Ingeniería Ambiental III).

Donde F representa el transporte de masa o transporte de solutos.

2.4.3.1 Ecuación de advección-dispersión

En la Figura 35 se muestra el experimento clásico que se utiliza para ilustrar el significado físico de la forma unidimensional de la Ecuación de advección-dispersión. En este experimento, un trazador no reactivo a concentración C_0 se introduce continuamente en un régimen de flujo en estado estacionario en el extremo aguas arriba de una columna rellena por un medio granular homogéneo. Para fines ilustrativos, se asume que la concentración del trazador en la columna antes de la introducción del trazador es cero. Es conveniente expresar la concentración del trazador en la columna como una concentración relativa, definida como C/C_0 , donde C es la concentración en la columna o en la salida.

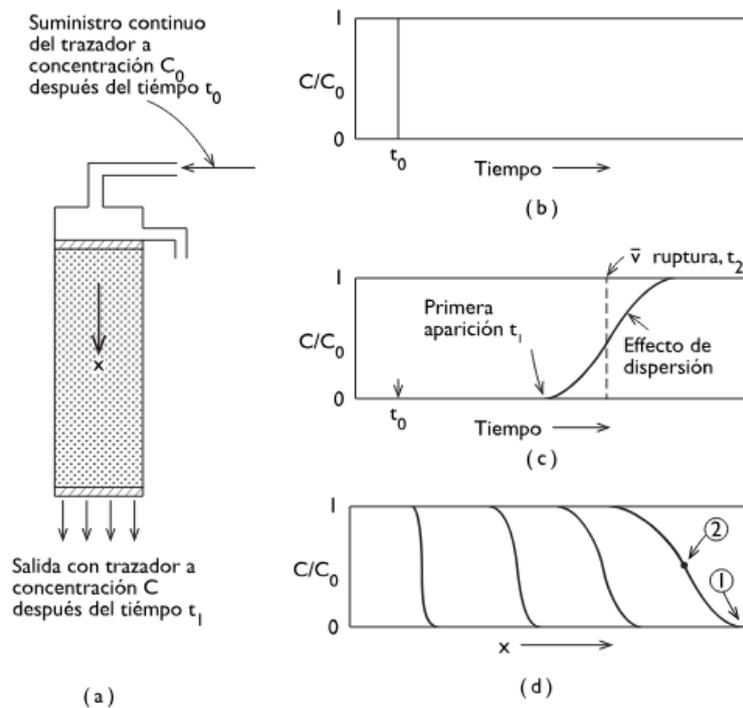


Figura 35: Dispersión longitudinal de un trazador que pasa a través de una columna de medio poroso (Freeze & Cherry, 1979).

La entrada del trazador se puede representar como una función variable, como se muestra en la Figura 35(b). La relación entre la concentración y el tiempo del flujo de salida de la columna, conocida como la curva de ruptura, se muestra en la Figura 35(c). Si se asume que el trazador se mueve a través de la columna sin dispersión mecánica o difusión molecular, el frente del trazador pasará como un tapón o flujo de pistón y saldrá de la columna como una función variable. Esta condición se muestra como una línea vertical discontinua en la Figura 35(c). En cambio, en situaciones reales, la dispersión mecánica y la difusión molecular ocurren y la curva de ruptura se extiende haciendo que el trazador comience a aparecer en el flujo de salida de la columna (al tiempo t_1) antes de la llegada del agua que viaja a la velocidad de v (tiempo t_2). Esto está representado en la Figura 35(c).

La Figura 35(d) muestra “imágenes” instantáneas de la interfaz de dispersión dentro de la columna en varios momentos antes de la ruptura. El frente del trazador se extiende a lo largo de la trayectoria del flujo. La amplitud del perfil aumenta con la distancia del viaje. Las posiciones representadas por los puntos 1 y 2 en la Figura 35(d) corresponden a los tiempos t_1 y t_2 en la Figura 35(c). La dispersión mecánica y la difusión molecular hacen que algunas de las moléculas trazadoras se muevan más rápido que la velocidad lineal media del agua y que algunas se muevan más lentamente. La velocidad lineal media del agua en la columna se determina dividiendo la tasa de entrada de agua (Q) por nA , donde A es la sección transversal de la columna y n es la porosidad (Freeze & Cherry, 1979).

El perfil de distribución de la concentración y la curva de ruptura de los trazadores o contaminantes que migran a través de materiales porosos es causada tanto por dispersión mecánica como por difusión molecular. La Figura 36 muestra un perfil de concentración para las condiciones experimentales representadas.

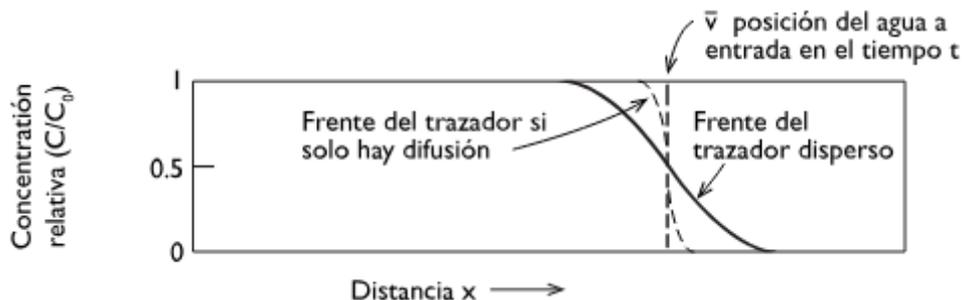


Figura 36: Contribución de la difusión molecular y la dispersión mecánica a la distribución de un frente de concentración en una columna con una entrada de función variable (Freeze & Cherry, 1979).

Para el desarrollo de la ecuación de advección-dispersión se asume que los componentes son no reactivos, disueltos en materiales saturados, homogéneos, isotrópicos, bajo estado estacionario y flujo uniforme. Además, considerando que la dispersión sigue la Ley de Fick, teniendo en cuenta que la misma no es estrictamente válida cerca de la fuente contaminante. Entonces, la dispersión en la dirección x se expresa como:

$$f_D = -D_x n \frac{dC}{dx}$$

Donde D_x es el coeficiente de dispersión en la dirección x .

Expresando los siguientes términos en unidades de masa por unidad de área y por unidad de tiempo, se tiene:

$$\text{transporte por advección} = n v_x C$$

$$\text{transporte por dispersión} = -D_x n \frac{dC}{dx}$$

Sumando los términos, obtenemos la siguiente ecuación de transporte en la dirección x:

$$F_x = n v_x C - D_x n \frac{dC}{dx}$$

Muchos modelos se basan en las siguientes ecuaciones diferenciales parciales derivadas del principio de conservación de la masa (ecuación de continuidad), por el cual la tasa neta de cambio de la masa del contaminante dentro de un volumen de poros es igual a la diferencia entre el flujo de contaminante dentro y fuera del volumen teniendo en cuenta la pérdida o ganancia de contaminante debido a reacciones químicas y biológicas (Freeze & Cherry, 1979; Zheng & Bennett, 2002).

Podemos expresar la cantidad total del contaminante que ingresa al cubo elemental como la suma del flujo de masa en las tres coordenadas x, y, z:

$$F_x dydz + F_y dx dz + F_z dx dy$$

La diferencia entre la cantidad que entra y sale del cubo elemental se expresa como:

$$\left(\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta F_z}{\delta z} \right) dx dy dz$$

Para un contaminante no reactivo, la diferencia de contaminante que entra y sale del cubo elemental es igual a la cantidad acumulada dentro del elemento.

La tasa de variación de la masa en el elemento se expresa como:

$$n \left(\frac{\delta C}{\delta t} \right) dx dy dz$$

Igualando las ecuaciones anteriores y dividiendo por $dV=dx dy dz$ se obtiene:

$$-\left(\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta F_z}{\delta z} \right) = n \left(\frac{\delta C}{\delta t} \right)$$

Sustituyendo los flujos en las tres dimensiones y despreciando n se obtiene:

$$\frac{dC}{dt} = \left[\frac{\delta}{\delta x} \left(D_x \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D_y \frac{\delta C}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(D_z \frac{\delta C}{\delta z} \right) \right] - \left[\frac{\delta}{\delta x} (V_{sx} C) + \frac{\delta}{\delta y} (V_{sy} C) + \frac{\delta}{\delta z} (V_{sz} C) \right]$$

Resolviendo y reordenando los términos se obtiene la ecuación general de transporte en tres dimensiones:

$$\frac{dC}{dt} = \left[D_x \frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} + D_y \frac{\delta^2 C}{\delta^2 y} + D_z \frac{\delta^2 C}{\delta^2 z} \right] - \left[V_{sx} \frac{\delta C}{\delta x} + V_{sy} \frac{\delta C}{\delta y} + V_{sz} \frac{\delta C}{\delta z} \right]$$

Analizándolo como un elemento unidimensional, la ecuación se expresa como:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} - V_{sx} \frac{\delta C}{\delta x}$$

Si además tenemos en cuenta los efectos de las reacciones químicas, las transformaciones biológicas, alguna inyección adicional de contaminante y la desintegración radiactiva, se tiene:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} - V_{sx} \frac{\delta C}{\delta x} \pm \frac{q_s C_s}{n} \pm \sum \frac{R_n}{n}$$

Término fuente/sumidero
Término debido a reacciones químicas

En este caso, el término de fuente/sumidero es cero.

Considerando que en el medio poroso se genera una sorción del soluto, un nuevo término debe ser agregado a la ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} - V_{sx} \frac{\delta C}{\delta x} - \frac{\rho_d \delta S}{n \delta t}$$

Donde ρ_d es la densidad media del medio y S la cantidad de soluto sorbido por masa de sólido.

Teniendo en cuenta el factor de retardo en la ecuación, se obtiene la *ecuación de advección dispersión con adsorción y retardo*:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{D_x \delta^2 C}{R \delta^2 x} - \frac{V_{sx} \delta C}{R \delta x}$$

En este trabajo, el retardo puede atribuirse a la adsorción que puede producirse en presencia de arcillas, en este caso, de bentonita, y como se presenta en apartados posteriores, a la precipitación de metales producto de la variación del pH de la barrera al adicionar escorias.

2.4.3.2 Soluciones unidimensionales

Se asumen las siguientes condiciones de frontera:

- $C(L,0) = L \geq 0$
- $C(0,t) = t \geq 0$
- $C(\infty,0) = t \geq 0$

Para las mismas, Ogata & Banks (1961) propusieron la siguiente solución:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - V_s t}{\sqrt{4D_x t}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{V_s x}{D_x} \right) \left(\frac{x - V_s t}{\sqrt{4D_x t}} \right)$$

En la mayoría de los casos el segundo término se desprecia para facilitar los cálculos, obteniendo:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - V_s t}{\sqrt{4D_x t}} \right)$$

Donde:

$$\operatorname{erfc}(B) = 1 - \operatorname{erf}(B)$$

$$\operatorname{erf}(B) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^B (e^{-z^2}) dz$$

2.4.3.3 Soluciones bidimensionales

Contaminación continua

Para el caso de una fuente de contaminación continua con concentración C_0 , Hantush, (1956) & Fetter (1999) propusieron la siguiente solución:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 \left(\frac{Q}{b}\right)}{4\pi\sqrt{D_x D_y}} \exp\left(\frac{V_s x}{2D_x}\right) [W(0, B) - W(t_D, B)]$$

Donde:

$$t_D = \frac{V_s^2 t}{D_x}$$

$$B = \sqrt{\frac{V_s^2 x^2}{4D_x^2} + \frac{V_s^2 y^2}{4D_x D_y}}$$

Donde b representa el ancho del acuífero, t_D es una forma adimensional del tiempo. Valores para $W(t_D, B)$ están dados en Hantush (1956) & Fetter (1999).

Contaminación puntual instantánea

Para el caso de una fuente de contaminación puntual e instantánea, Fetter, 1999 propuso la siguiente solución:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 A}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \exp \left[-\frac{[(x - x_0) - V_x t]^2}{4D_x t} - \frac{(y - y_0)^2}{4D_y t} \right]$$

En caso de que exista algún proceso de *transferencia de masa* como sorción o precipitación, se propone:

$$C(x, y, t) = \frac{m}{4\pi D_t} \exp \left(-\frac{(x - vt)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} - kt \right)$$

Donde:

k = decaimiento de primer orden (t^{-1})

$m = C_0 A$

$$D = \sqrt{D_x D_y}$$

2.4.3.4 Soluciones tridimensionales

Para una contaminación puntual instantánea, la concentración en cualquier punto en el espacio y en el tiempo pueden obtenerse como: (Bedient et al. 1994):

$$C(x, y, z, t) = \frac{C_0 V_0}{8(\pi t)^{\frac{3}{2}}(D_x D_y D_z)^{1/2}} \exp \left[-\frac{[(x - x_0) - V_s t]^2}{4D_x t} - \frac{(y - y_0)^2}{4D_y t} - \frac{(z - z_0)^2}{4D_z t} \right]$$

Donde V_0 es el volumen original de contaminante inyectado instantáneamente. Esta ecuación asume fenómenos de advección, difusión y dispersión, pero no tiene en cuenta los efectos de sorción y las demás reacciones.

La concentración máxima que se produce en el centro de gravedad de la pluma contaminante está dada por:

$$C_{max} = \frac{C_0 V_0}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{D_x D_y D_z}}$$

2.5 SÍNTESIS

En este capítulo se presentaron los principales aspectos teóricos necesarios para llevar a cabo este trabajo. Se mostraron las propiedades de los limos loésicos compactados, como su origen, su formación, composición, sus propiedades físicas y mecánicas y la conductividad. Además, se mostró cómo se mejoran las propiedades de estos suelos mediante la adición de bentonita, donde la de mayor importancia para el proyecto considerado en esta práctica supervisada es la conductividad hidráulica.

Se describieron las barreras de fondo de los rellenos sanitarios ya que son el objeto de estudio de este trabajo. Se presentó su configuración, los materiales que se utilizan para su construcción, se muestran diferentes sistemas de geocompuestos bentoníticos y los requerimientos exigidos por las normativas utilizadas alrededor del mundo. Se presentan además ecuaciones para el cálculo del espesor de la geomembrana y el factor de seguridad para la protección contra rasgadura y punzonamiento.

Se describen los procesos de advección, difusión y dispersión, que son los que gobiernan el transporte de contaminantes a través de barreras. Además se tienen en cuenta los procesos de transferencia de masa, especialmente la sorción/desorción y la precipitación que son los que poseen mayor incidencia para los casos analizados en este trabajo. Se presenta la ecuación de advección dispersión, la cual es una de las principales ecuaciones utilizadas para la modelación del transporte de contaminantes en medios porosos. Se analiza la ecuación de advección dispersión con retardo teniendo en cuenta la adsorción que puede producirse estando en presencia de arcillas.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presentan los materiales ensayados, equipos y procedimientos utilizados para la obtención de las propiedades de interés de las mezclas de suelo y escoria, relevantes para los controles y diseño de barreras aislantes. Se exponen las principales características de los limos loésicos, la escoria y fluidos utilizados. Se describe la preparación de muestras y los procedimientos utilizados en los ensayos de: conductividad hidráulica, gravedad específica, sales solubles, peso unitario y variación de pH.

3.1 Materiales utilizados

Para el trabajo experimental se utiliza un limo loésico, escorias siderúrgicas y liziviado proveniente del relleno sanitario de piedras blancas.

3.1.1 Propiedades del limo

El limo loésico fue obtenido de una excavación a cielo abierto a una profundidad de 2 metros por debajo del manto orgánico, en las inmediaciones de la Universidad Nacional de Córdoba. El limo de esta región es típico de las llanuras pampeanas. El origen de estos suelos se remonta a partículas de cenizas volcánicas originadas en la cordillera de los Andes y la Patagonia Argentina. Éstas fueron transportadas por acciones tanto glaciares como fluviales hacia el norte de la Patagonia y luego transportadas por acción de los vientos provenientes del sur, sudoeste, hacia el centro del país (Teruggi, 1957; Zárate, 2003). La distribución granulométrica típica de estos suelos en peso comprenden entre 1,5 a 10% de arenas, entre el 40 y 80 % de limos y una fracción arcillosa de entre 7 y 25 % (Teruggi, 1957; Francisca, 2007).

Los componentes minerales principales son: plagioclasa, cuarzo, ortoclasa, vidrio volcánico, feldespatos alterados y fragmentos de rocas volcánicas. La plagioclasa es el mineral más abundante. El carbonato de calcio se encuentra en el loess de dos formas: como concreciones y como partículas distribuidas en la masa de sedimentos (Teruggi, 1957).

En la Tabla 10 se ilustran las características del limo muestreado y en la Tabla 11 se muestra la mineralogía del limo loésico.

Tabla 10: Propiedades físicas del limo (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).

Parámetro	Valor	Normativa
Gravedad específica (Gs)	2,64	ASTM D854-83
Contenido de humedad (w%)	18,28	ASTM D2216-90
d ₅₀	0,05mm	
d ₁₀	0,0008mm	
%<0,074mm	61,4	
%<0,002mm	20,9	
Coefficiente de uniformidad (Cu)	87,5	D422
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,45	D422
Límite líquido (LL)	25,3	ASTM D4318-84
Índice plástico (IP)	8	ASTM D4318-84
Clasificación unificada USCS	CL-ML	ASTM D2487-90

Tabla 11: Mineralogía difracción por rayos X (Méndez, 2013).

Mineralogía Limo Loésico	
Minerales arcillosos + Mica [%]	40%
Cuarzo [%]	24%
Plagioclasa [%]	26%
Calcita [%]	8%
Feldespato Potásico [%]	< 1%

En la Figura 37 se observa una imagen del limo obtenida de un microscopio electrónico de barrido (SEM), mientras que en la Figura 38 se muestra la granulometría del limo loésico.

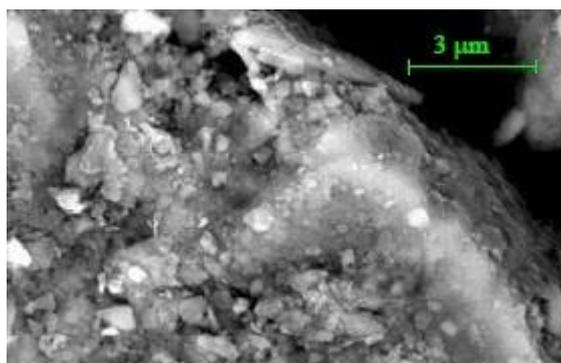


Figura 37: Imagen SEM de Limo (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).

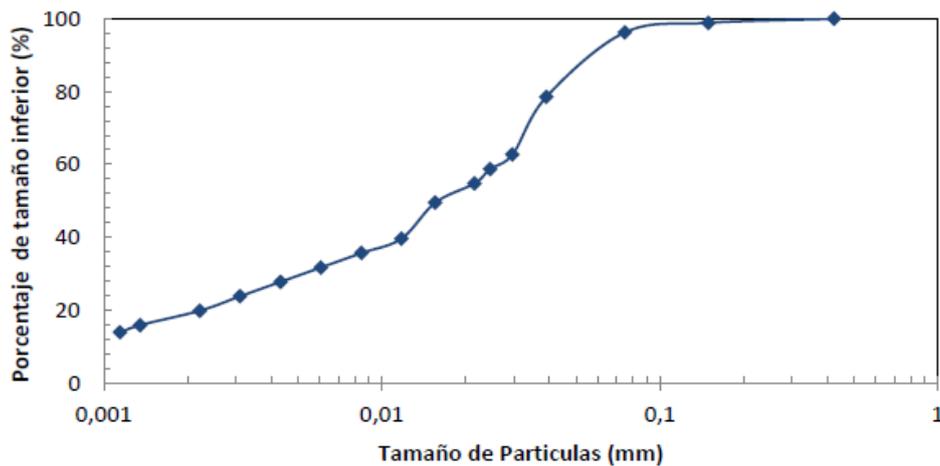


Figura 38: Distribución granulométrica del limo (Méndez, 2013).

3.1.2 Propiedades de la escoria

Las escorias siderúrgicas son un subproducto de la industria del acero y son reutilizadas fundamentalmente como fundente, mientras que otras aplicaciones recientes lo relacionan con la producción de cemento y asfalto, y en la construcción de bases y sub-bases de carreteras. Debido a sus propiedades físico-químicas, suelen hallarse nuevas aplicaciones de manera cotidiana, como en el tratamiento de aguas residuales, recuperación de hierro, secuestro de CO_2 o fertilizante. Debido a su alcalinidad, también puede ser usada en el tratamiento de metales, ya que genera la precipitación de los mismos.

La escoria siderúrgica puede obtenerse en distintos puntos del proceso de elaboración del acero. En Argentina, Techint S.A. es la principal productora de aceros laminados en caliente y frío, generando escorias en sus altos hornos y en el proceso de fundición de su acería mediante el proceso de fundición básica al oxígeno (BOF por sus siglas en inglés), siendo esta última la que se utiliza en este trabajo.

Los principales constituyentes de la escoria BOF son silicio, aluminio, calcio y magnesio, sumando aproximadamente un 95% de su composición, con componentes minoritarios de manganeso, hierro y azufre. Mineralógicamente suele estar constituido por merwinita ($3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$), olivino ($2\text{MgO}\cdot 2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), $\alpha\text{-C}_2\text{S}$, C_4AF ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), C_2F ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), cal libre (CaO), MgO, FeO y C_3S ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), y la fase RO (una solución sólida de $\text{CaO}\text{-FeO}\text{-MnO}\text{-MgO}$).

La composición química de las escorias utilizadas en el presente trabajo se presenta en la Tabla 12. Puede observarse que la mayor variación la presentan los compuestos de hierro (Fe, FeO y Fe_2O_3), lo cual puede deberse a variaciones en el proceso y a los descartes en la colada del acero. En la Tabla 13 se presentan las características físicas de las escorias siderúrgicas.

Tabla 12: Composición química de la escoria utilizada (Glatstein, Francisca, 2015).

Compuesto	Porcentaje
Compuestos de Hierro	8,5 - 27,2
CaO	37,6 - 44,8
SiO ₂	35 - 37,3
Al ₂ O ₃	9,3 - 14,7
MgO	5,6 - 9,6
K ₂ O	0,41
Na ₂ O	0,2 - 0,3
S	0,4
MnO	0,4 - 0,7
TiO ₂	0,4 - 0,6
Basicidad (%CaO/%SiO ₂)	1,1 - 1,2

Tabla 13: Propiedades físicas de las escorias (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).

Parámetro	Valor	Normativa
Gravedad específica (Gs)	3,16	ASTM D854-83
d ₅₀	1,5mm	
d ₁₀	0,127mm	
%<0,074mm	37	
%<0,002mm	0	
Coefficiente de uniformidad (Cu)	19,4	D422
Coefficiente de curvatura (Cc)	0,63	D422
Límite líquido (LL)	NP	ASTM D4318-84
Índice plástico (IP)	NP	ASTM D4318-84
Clasificación unificada USCS	SP-SM	ASTM D2487-90

En la Figura 39 se observa una imagen de la escoria obtenida de un microscopio electrónico de barrido (SEM).

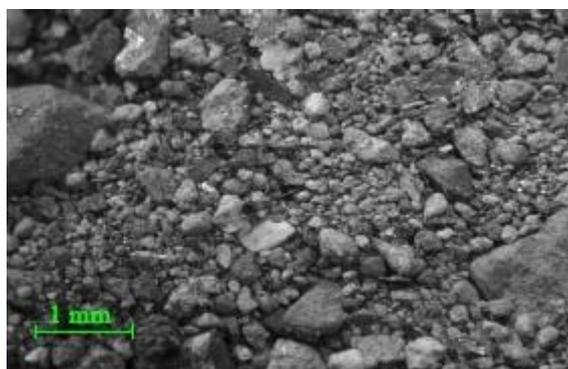


Figura 39: Imagen SEM de la escoria (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).

3.1.3 Propiedades del lixiviado

Los lixiviados de los rellenos sanitarios consisten en uno de los fluidos contaminantes más difíciles de estudiar debido a su variación temporal y espacial, y a la vez, factores como la temperatura y las precipitaciones modifican su volumen y su actividad bacteriana. La Tabla 14 resume las principales características químicas de un lixiviado promedio.

Tabla 14: Propiedades del lixiviado (Francisca, Glatstein, 2010).

Parámetro	Lixiviado real
pH	5.20
TDS (mg/L)	15590
EC (μS/cm)	33800
Viscosidad a 20°C (cP)	1.40
Densidad a 20°C (g/cm ³)	1.04
Cu ²⁺ (mg/L)	6.01
Zn ²⁺ (mg/L)	9.51
Ni ²⁺ (mg/L)	2.00
Cd ²⁺ (mg/L)	0.36
Na ⁺ (mg/L)	645-29200*
Ca ²⁺ (mg/L)	42-2880*
K ⁺ (mg/L)	70-2786*
Mg ²⁺ (mg/L)	59-3860*
Fenoles (mg/L)	3.45-26*
N Orgánico (mg/L)	24-852*
DOC (mg/L)	17.400-93.700*

3.2 Características del modelo

Se simuló numéricamente el transporte de contaminantes a través de una barrera de fondo de un relleno sanitario. Para ello se desarrollaron modelos numéricos unidimensionales considerando *advección y difusión con adsorción y retardo*. En todos los análisis y modelaciones realizadas se consideró que el término de fuente/sumidero es irrelevante para nuestro análisis por lo que se desprecia.

La ecuación de advección difusión con adsorción se expresa como:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} - V_{sx} \frac{\delta C}{\delta x} - \frac{\rho_d}{n} \frac{\delta S}{\delta t}$$

En los casos en los que la cantidad de soluto sorbida no depende de la concentración, su remoción se encuentra representada mediante un modelo de isoterma lineal, el cual resulta un modelo simplificado, pero simple y útil a bajas

concentraciones. En este caso, el transporte en el medio poroso sufrirá un retardo (R) definido por:

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{n} K_d$$

Teniendo en cuenta el factor de retardo, tenemos:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{D_x}{R} \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - \frac{V_{sx}}{R} \frac{\delta C}{\delta x}$$

Asumimos como condición inicial:

- $C(x,0) = 0$

Las condiciones de borde son:

- $C(0,t) = C_0 \quad t > 0$
- $\frac{\delta C_{(\infty,t)}}{\delta x} = 0 \quad t > 0$

La particularidad de este trabajo radica en los mecanismos de remoción de metales propios de la escoria, y la configuración que debe tener la barrera reactiva. Dentro de los mecanismos de remediación analizados se incluyen la precipitación y la sorción, siendo ambos fuertemente dependientes del pH de la solución.

Consideraremos la percolación a través de una barrera de suelo compactado (CCL). En este caso, la velocidad del flujo se calcula como:

$$v = \frac{k * i}{n}$$

Se utilizará la solución de Ogatta & Banks, (1961):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - V_s t}{\sqrt{4D_x t}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{V_s x}{D_x} \right) \left(\frac{x - V_s t}{\sqrt{4D_x t}} \right)$$

Donde:

$x = vt$; C/C_0 =concentración relativa.

En todos los casos se simuló el transporte de contaminantes determinando el tiempo necesario para que el mismo atravesase la barrera. De acuerdo a lo recomendado en la literatura se determinó el tiempo de retardo o tiempo para el cual la barrera es eficiente reteniendo los metales, el cual es por definición el tiempo para el cual la concentración a la salida es igual al 50% de la concentración a la entrada ($C/C_0=0.5$).

3.3 Ensayos experimentales

3.3.1 Determinación de la Gravedad específica

La gravedad específica es la relación entre el peso de un determinado volumen de partículas de suelo y el peso de un volumen igual de agua destilada a 4°C. Es una

propiedad de las partículas del suelo que depende de la composición mineralógica. Es una expresión adimensional.

$$G_s = \frac{\frac{W_d}{V}}{\frac{W_w}{V}} = \frac{W_d}{W_w}$$

Donde:

W_d = peso del suelo seco

W_w = peso del agua

V = volumen

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua destilada a 4°C. Se utiliza un recipiente aforado y el principio de Arquímedes.

Procedimiento:

1. Se pesa un matraz aforado de 100 cm³ (W_m).
2. Se toma suelo secado a estufa y se lo tamiza por el tamiz N°10. Del pasante se separan 30 gramos.
3. Se introduce el suelo en el matraz y se lo pesa obteniéndose ($W_{md} = W_m + W_d$).
4. Se agrega agua destilada para cubrir el suelo. Se procede a desairarlo con la aplicación de vacío mediante una bomba durante 10 minutos. Se debe cuidar de que no haya pérdida de partículas por arrastre de la corriente producida por la bomba.
5. Se agrega agua destilada hasta el enrase y se lo pesa obteniéndose W_{mdw} .
6. Se limpia el matraz y se lo enrasa con agua destilada obteniéndose W_{mw} .
7. Se necesita tomar la temperatura (T) del agua durante el ensayo.

Cálculos:

Se calcula el peso del suelo:

$$W_d = W_{md} - W_m$$

El peso del volumen de agua a la temperatura T se calcula como:

$$W_{wt} = W_{mw} + W_d + W_{mdw}$$

Como se trata de agua a temperatura de 4°C, se debe realizar una corrección:

La gravedad específica a la temperatura T será:

$$G_{wt} = \frac{\gamma_{wt}}{\gamma_w(4^\circ C)} = \frac{W_{wt}}{W_w} \therefore W_w = \frac{W_{wt}}{G_{wt}}$$

Los valores de G_{wt} se encuentran tabulados en la Tabla 15 en función de T.

Tabla 15: Gravedad específica del agua.

Gravedad específica del agua							
°C	Gw	°C	Gw	°C	Gw	°C	Gw
0	0.9999	11	0.8996	22	0.9978	33	0.9947
1	0.9999	12	0.9995	23	0.9976	34	0.9944
2	1.0000	13	0.9994	24	0.9973	35	0.9941
3	1.0000	14	0.9993	25	0.9971	36	0.9937
4	1.0000	15	0.9991	26	0.9968	37	0.9934
5	1.0000	16	0.999	27	0.9965	38	0.993
6	1.0000	17	0.9988	28	0.9963	39	0.9926
7	0.9999	18	0.9986	29	0.996	40	0.9922
8	0.9998	19	0.9984	30	0.9957		
9	0.9998	20	0.9982	31	0.9954		
10	0.9997	21	0.998	32	0.9951		

3.3.2 Determinación del contenido de humedad

Se denomina humedad del suelo a la relación entre el peso del agua de una masa de suelo y el peso del suelo seco, expresada en porcentaje.

$$w\% = \frac{W_w}{W_d} \times 100$$

Para los fines prácticos, es la determinación del peso del agua extraída de un suelo por secado a estufa a una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$., refiriéndola al peso del suelo remanente luego del secado.

Procedimiento:

1. Se toma un pesafiltro vacío de tamaño adecuado y se lo pesa (W_c).
2. Se agrega el suelo en el pesafiltro y se lo pesa (W_1).
3. Se coloca el pesafiltro en estufa hasta obtener temperatura constante. Se lo deja entre 12 y 18 horas.
4. Se saca el pesafiltro con el suelo seco de la estufa y se lo pesa, obteniéndose W_2 .

Cálculo:

Peso del agua: $W_w = W_1 - W_2$

Peso del suelo seco: $W_d = W_2 - W_c$

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c}$$

3.3.3 Determinación de la conductividad hidráulica

Procedimiento:

Se realizaron ensayos en muestras de limo, escoria y limo mezclado con 20% de escoria.

1. Lo primero que se debe hacer es medir la altura y el diámetro del cilindro a utilizar. En nuestro caso, los ensayos de conductividad hidráulica fueron realizados en celdas de acrílico de 45 mm de diámetro y 100 mm de altura. El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos del ensayo de carga variable con flujo ascendente descrito en la norma ASTM D5856.
2. Se pesa el pesafiltro vacío.
3. Se prepara el suelo o la mezcla a ensayar. Los materiales se secan a 105 °C en estufa durante 24 horas.
4. Se pesa el pesafiltro + suelo seco.
5. Se procede a la humectación utilizando un contenido de humedad cercano al óptimo para cada muestra. En el caso de la mezcla limo + 20% escoria, se obtuvo un contenido de humedad óptimo del 19% de la curva de compactación.
6. Se pesa el pesafiltro + suelo húmedo.
7. Como paso siguiente se pesa el permeámetro vacío y el cilindro vacío.
8. Se procede a preparar las probetas. Tanto en la parte superior como en la parte inferior del cilindro se colocan redes metálicas (pueden ser mosquiteras) para evitar la migración de partículas. Las muestras humedecidas fueron compactadas en tres capas directamente en las celdas de permeado, utilizando dos energías de compactación diferentes, asegurándose de raspar el suelo entre cada capa para generar una interfaz óptima. Estas energías no fueron estandarizadas, si no que la compactación se realizó manualmente con distintas intensidades, obteniéndose variaciones en el peso unitario seco. La probeta debe quedar completamente llena.
9. Se pesa el cilindro lleno, se arma el permeámetro y se cierra la celda.
10. Se pesa el permeámetro cerrado.
11. Se procede a saturar la muestra. Se conecta el puerto inferior de la celda con una probeta aforada y se hacen pasar aproximadamente 5 volúmenes porales de 170 ml, en total unos 850 ml.
12. Cuando se completa la saturación, se conecta el puerto inferior a una bureta, colocando algún recipiente que recolecte el agua que sale por el puerto superior. Es muy importante asegurarse de que no queden burbujas de aire dentro de la manguera porque esto genera errores importantes en las mediciones. Además se debe controlar que no se estrangule la manguera. Se debe medir el gradiente hidráulico utilizado y se aconseja realizar mediciones con diferentes gradientes.
13. Comienza a medirse el tiempo que tarda en descender un determinado volumen. El ensayo culmina cuando se observa que luego de repetidas mediciones, los valores de la conductividad hidráulica se mantienen constantes.
14. Una vez finalizado el ensayo, se pesa el cilindro lleno. Con el contenido del cilindro se procede a realizar el ensayo de contenido de humedad.

En la Figura 40 se muestra el ensayo de conductividad hidráulica.



Figura 40: Ensayo de conductividad hidráulica. a) Muestra escoria, b) Muestra limo + 20% escoria.

Cálculos:

$$k = 2,3 \cdot \frac{a}{A} \cdot l \cdot \left(\frac{\log H_1 - \log H_2}{t_2 - t_1} \right) \quad [cm/seg]$$

Donde:

a=sección transversal del tubo (cm²)

A=sección transversal de la muestra (cm²)

l=altura del cilindro

H1=altura de agua inicial (cm)

H2=altura de agua final (cm)

t1= tiempo inicial del ensayo (seg)

t2=tiempo final del ensayo (seg)

3.3.4 Determinación del peso unitario

El peso unitario de un suelo se define como la relación entre el peso del suelo y su volumen. Este último está formado por los elementos constitutivos de la estructura del suelo, es decir, las partículas sólidas y espacios llenados por fluidos.

$$\gamma = \frac{W_s}{V}$$

Donde:

γ = peso unitario

W_s = peso del suelo

V = volumen

Para caracterizar una masa de suelo dado, se refiere a la propiedad a su estado seco, es decir, se busca eliminar el agua de las mediciones ya que es una magnitud variable. Entonces, definimos el peso unitario seco.

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V}$$

Donde:

γ_d = peso unitario seco

W_d = peso del suelo seco

Procedimiento:

Para realizar este ensayo se utilizó el cilindro de 45 mm de diámetro y 100 mm de altura que compone el permeámetro de los ensayos de conductividad hidráulica.

Pasos:

1. Se pesa el cilindro vacío (W_1).
2. Una vez que se llena el cilindro con la muestra y se la compacta, se pesa el cilindro lleno (W_2).

Cálculos:

Se calcula el peso del suelo húmedo.

$$W_s = W_2 - W_1$$

Se calcula el volumen del cilindro:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde:

r = radio del cilindro de acrílico

h = altura del cilindro

Se calcula el peso unitario seco teniendo en cuenta la humedad óptima utilizada para la preparación de la muestra (19%):

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \%w}$$

3.3.5 Determinación de Sales Solubles

La determinación de sales solubles se realizó a muestras formadas sólo por escoria. Se utilizaron la mitad de todas las cantidades y medidas especificadas por el manual de Geotecnia II de la FCEFyN – UNC.

Procedimiento:

1. Del suelo pasante Tamiz N° 10, tomar una muestra de escoria.
2. Disgregar bien este suelo hasta que pase totalmente por el tamiz N° 40 y llevarlo a estufa para el secado (en este caso, como el suelo a utilizar es escoria pura, este paso no es necesario).
3. Tomar 50 gr de suelo.
4. Colocar el suelo en una probeta de 500 cm³.
5. Agregar 250cm³ de agua destilada revolviendo cuidadosamente el suelo con una varilla de vidrio para evitar grumos.
6. Una vez vertida el agua destilada, agitar enérgicamente por 5 minutos.
7. Tapar y dejar en reposo por 24 horas.
8. A las 24 horas, observar el suelo. Si hay sales, el agua está completamente clara y limpia. En cambio, si el líquido está turbio y con partículas en suspensión, indica que no está floculado, lo que significa que el contenido de sales es menor al 0,1%.
9. En el caso de que el agua esté clara y limpia, flocula y contiene sales. Se toman 50 cm³ de la solución teniendo mucho cuidado de no tocar el sólido sedimentado.
10. Se pesa una cápsula de porcelana completamente seca y limpia.
11. Se vierte el contenido en la cápsula y se la coloca en la estufa hasta la evaporación total del agua.
12. Se pesa la cápsula seca.
13. Una vez que se realizó la primera medición, se procede a cambiar el agua de la probeta extrayendo 50 ml teniendo mucho cuidado de no tocar el material sedimentado. Se agrega agua destilada hasta completar los 250 cm³. Se repite el procedimiento 5 veces.

Cálculos:

$$Ps\% = \frac{5}{P_{SS}}(P - T) \times 100$$

Donde:

P_{SS} = peso del suelo

P=Tara de la cápsula mas sal

T=Tara de la cápsula

3.3.6 Determinación de la variación del pH del lixiviado

La determinación de la variación del pH se determinó para muestras de escoria, limo, arena y bentonita utilizando lixiviado proveniente del relleno sanitario de Piedras Blancas. El objeto de estas determinaciones fue evaluar posibles variaciones de pH del líquido en presencia de distintos contenidos de los materiales sólidos antes mencionados.

- Procedimiento para escorias, arena y limo:
 1. Se toma un vaso de precipitados de 600 ml.
 2. Se agregan 400 ml de lixiviado.
 3. Se mide el pH del lixiviado puro.
 4. Se comienza a agregar escoria de a cantidades pequeñas (en este caso comenzamos agregando de a 5 gramos).
 5. Agitar enérgicamente por 1 minuto.
 6. Medir el pH.
 7. Repetir el procedimiento hasta observar que el pH se estabiliza. En caso de observar que a medida que se sigue agregando escoria el pH varía pero en cantidades muy pequeñas, comenzar a agregar cantidades más grandes.

- Procedimiento para bentonita:
 1. Se toman 50 gramos de bentonita y se le colocan 500 ml de agua destilada para obtener un porcentaje de humedad del 1000%.
 2. Se agita enérgicamente hasta obtener una mezcla homogénea.
 3. Dejar reposar 24 horas.
 4. Se mide el pH del lixiviado puro.
 5. Con una pipeta tomar 5 ml y agregarlos al lixiviado. Agitar durante 1 minuto y medir el pH.
 6. Repetir este procedimiento hasta observar que el pH se estabiliza.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Gravedad específica

4.1.1 Limo

A continuación se presentan los datos obtenidos del procedimiento detallado en el capítulo 3:

Tabla 16: Datos para el cálculo de gravedad específica del limo.

		Peso (gr)
Peso matraz vacío	Wm	48.15
Peso matraz + suelo	Wmd	78.12
Peso matraz + suelo + agua	Wmdw	166.32
Matraz + agua	Wmw	147.68

De tabla se obtiene el dato de la gravedad específica del agua a la temperatura ambiente:

Dato: $G_{wt}(23^{\circ}\text{C}) = 0.9976$

$$W_d = W_{md} - W_m = 78.12\text{gr} - 48.15\text{gr} = 29.97\text{ gr}$$

$$W_{wt} = W_{mw} + W_d - W_{mdw} = 147.68\text{gr} + 29.97\text{gr} - 166.32\text{gr} = 11.33\text{gr}$$

$$W_w = \frac{W_{wt}}{G_{wt}} = \frac{11.33\text{gr}}{0.9976} = 11.357\text{gr}$$

$$G_{wt} = \frac{W_{wt}}{W_w} = \frac{11.33\text{gr}}{11.357\text{gr}} = 0.9976$$

Se procede a calcular la gravedad específica del limo:

$$G_s = \frac{W_d \cdot G_{wt}}{W_{wt}} = \frac{29.97\text{gr} \times 0.9976}{11.33\text{gr}} = 2,639 \cong \mathbf{2,64}$$

Se obtiene un valor de gravedad específica del limo de 2,64, lo que se acerca mucho al valor predeterminado para el limo que resulta de 2,65.

4.1.2 Escoria

A continuación se presentan los datos obtenidos para el caso de la escoria pura:

Tabla 17: Datos para el cálculo de gravedad específica de la escoria.

		Peso (gr)
Peso matraz vacio	Wm	65,57 gr
Peso matraz + suelo	Wmd	95,5 gr
Peso martraz + suelo + agua	Wmdw	185,43 gr
Matraz + agua	Wmw	164,94 gr

De tabla se obtiene el dato de la gravedad específica del agua a la temperatura ambiente:

Dato: $G_{wt}(27^{\circ}\text{C}) = 0.9965$

$W_d = W_{md} - W_m = 95,5\text{gr} - 65,57\text{gr} = 29,93\text{gr}$

$W_{wt} = W_{mw} + W_d - W_{mdw} = 164,94\text{ gr} + 29,93\text{ gr} - 185,43\text{ gr} = 9,44\text{ gr}$

$$W_w = \frac{W_{wt}}{G_{wt}} = \frac{9,44\text{ gr}}{0,9965} = 9,47\text{gr}$$

$$G_{wt} = \frac{W_{wt}}{W_w} = \frac{9,44\text{ gr}}{9,47\text{ gr}} = 0,9965$$

Se procede a calcular la gravedad específica de la escoria:

$$G_s = \frac{W_d \cdot G_{wt}}{W_{wt}} = \frac{29,93\text{gr} \cdot 0,9965}{9,44\text{gr}} = 3,159 = \mathbf{3,16}$$

Podemos observar que el valor de la gravedad específica es bastante alto, lo que implica que la escoria contiene hierro.

4.1.3 Limo mas 20% escoria

A continuación se presentan los datos obtenidos para el caso de la mezcla limo – escoria:

Tabla 18: Datos para el cálculo de la gravedad específica del limo+escoria.

		Peso (gr)
Peso matraz vacio	Wm	65.71
Peso matraz + suelo	Wmd	95.72
Peso matraz + suelo + agua	Wmdw	183.86
Matraz + agua	Wmw	165.05

De tabla se obtiene el dato de la gravedad específica del agua a la temperatura ambiente:

Dato: $G_{wt}(26^{\circ}\text{C}) = 0.9968$

$W_d = W_{md} - W_m = 95.72\text{gr} - 65.71\text{gr} = 30.01\text{gr}$

$$W_{wt} = W_{mw} + W_d - W_{mdw} = 165.05\text{gr} + 30.01\text{gr} - 183.86\text{gr} = 11.2\text{gr}$$

$$G_{wt} = \frac{W_{wt}}{W_w} = \frac{11.2\text{gr}}{11.24\text{gr}} = 0.9968$$

$$W_w = \frac{W_{wt}}{G_{wt}} = \frac{11.2\text{gr}}{0.9968} = 11.24\text{gr}$$

Se procede a calcular la gravedad específica de la mezcla:

$$G_s = \frac{W_d \cdot G_{wt}}{W_{wt}} = \frac{30.01\text{gr} \times 0.9968}{11.2\text{gr}} = 2,671 \cong 2,67$$

Se observa que el valor de la gravedad específica de la mezcla presenta variaciones muy pequeñas con respecto a la del limo debido al bajo porcentaje de escorias utilizado.

4.2 Conductividad hidráulica, peso unitario y humedad

En esta sección se muestran resultados de los ensayos de conductividad hidráulica, realizados sobre muestras de limo, escoria y limo + 20% escoria.

A continuación se presentan los resultados de las muestras de limo.

Tabla 19: Resultados muestras de limo.

Probeta	Vol (ml)	t (seg)	k (cm/seg)	Kmedio	w%	γd(gr/cm3)
Menos compactada	10	19800	2.97x10 ⁻⁶	2.737x10 ⁻⁶	20.9	1.52
	24	54000	2.61x10 ⁻⁶			
	9	20100	2.63x10 ⁻⁶			
Más compactada	12	79200	8.80x10 ⁻⁷	7.957x10 ⁻⁷	15.66	1.63
	10	84900	6.92x10 ⁻⁷			
	3	21600	8.15x10 ⁻⁷			

Finalmente, la conductividad hidráulica que surge del promedio de las dos energías de compactación es de 1.77x10⁻⁶ cm/seg.

Seguidamente se presentan los resultados de las muestras de escoria.

Tabla 20: Resultados muestras de escoria.

Probeta	H1	H2	Vol (ml)	t (seg)	k (cm/seg)	kmedio	yd(gr/cm3)
Menos compactada	50	30	20	136	2.17×10^{-3}	1.91×10^{-3}	1.87
	50	15	35	466	1.49×10^{-3}		
	50	30	20	141	2.09×10^{-3}		
	100	80	20	56	2.30×10^{-3}		
	100	65	35	119	2.09×10^{-3}		
	100	55	45	176	1.96×10^{-3}		
	150	130	20	44	1.88×10^{-3}		
	150	115	35	89	1.73×10^{-3}		
	150	100	50	142	1.65×10^{-3}		
Más compactada	50	40	10	80	1.61×10^{-3}	1.38×10^{-3}	2.11
	50	30	20	201	1.47×10^{-3}		
	50	20	30	388	1.36×10^{-3}		
	100	85	15	68	1.38×10^{-3}		
	100	75	25	129	1.29×10^{-3}		
	100	65	35	201	1.24×10^{-3}		
	150	130	20	61	1.36×10^{-3}		
	150	115	35	128	1.20×10^{-3}		
	150	100	50	203	1.15×10^{-3}		

Finalmente, la conductividad hidráulica que surge del promedio de las dos energías de compactación es de 1.65×10^{-3} cm/seg, por lo que se observa que su comportamiento hidráulico es similar al de una arena.

Luego, se presentan los resultados de las mezclas de limo + 20% escoria.

Tabla 21: Resultados de muestras de limo + 20% escoria.

Probeta	H1	H2	Vol (ml)	t (seg)	k (cm/seg)	Kmedio	γd(gr/cm3)
Menos compactada	210	179.2	30.8	85920	1.07x10 ⁻⁶	2.15x10 ⁻⁶	1.58
	210	172.4	37.6	68400	1.67x10 ⁻⁶		
	210	192.2	17.8	29700	1.72x10 ⁻⁶		
	210	179.5	30.5	25500	3.56 x10 ⁻⁶		
	210	168.6	41.4	74220	1.71x10 ⁻⁶		
	210	160.4	49.6	112500	1.38x10 ⁻⁶		
	210	194.3	15.7	15900	2.82x10 ⁻⁶		
	210	179.3	30.7	28080	3.25x10 ⁻⁶		
Más compactada	190	162.8	27,2	65580	1.36x10 ⁻⁶	1.28 x10 ⁻⁶	1.75
	162.8	157.9	4,9	18000	9.81x10 ⁻⁶		
	157.9	156.4	1,5	4200	1.31x10 ⁻⁶		
	190	185.5	4,5	13320	1.04x10 ⁻⁶		
	182.6	181.4	1,2	2880	1.32x10 ⁻⁶		
	180	177.6	2,4	5880	1.32x10 ⁻⁶		
	177.6	175.9	1,7	4380	1.27x10 ⁻⁶		
	200	197.9	2,1	4380	1.39x10 ⁻⁶		
197.9	192.2	5,7	11220	1.51x10 ⁻⁶			

Finalmente, la conductividad hidráulica que surge del promedio de las dos energías de compactación es de 1.65×10^{-6} cm/seg.

En la Figura 41 se muestra que la adición de 20% de escoria no modifica de manera significativa el comportamiento hidráulico del limo. Además, la dependencia entre k y γd es mayor para las muestras de limo.

Podemos observar que los valores promedio de conductividad hidráulica en todas las muestras no alcanzan los valores requeridos por la reglamentación vigente (1.10^{-7} cm/s), por lo que definitivamente se necesita un material que reduzca el valor de k a los valores requeridos por la normativa internacional.

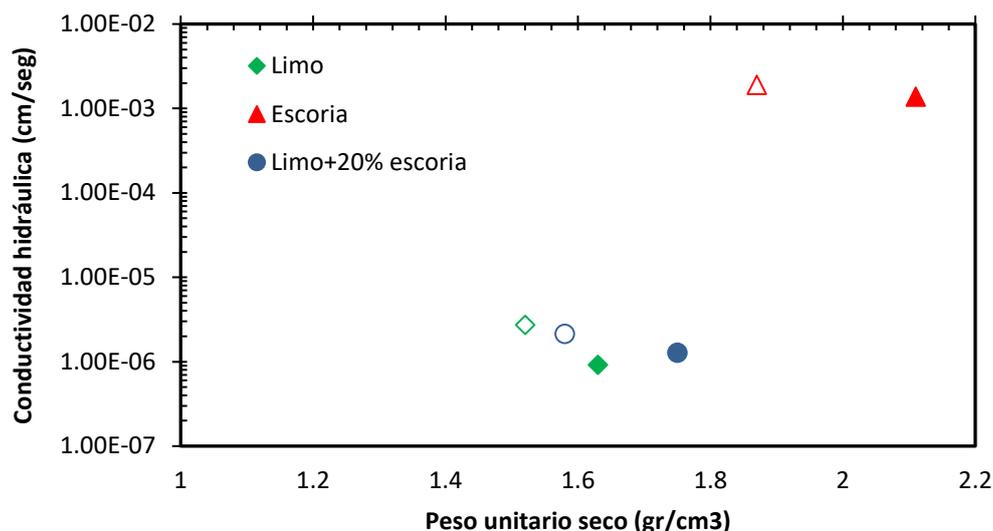


Figura 41: Relación entre la conductividad hidráulica y el peso unitario seco de muestras de limo, escoria y una mezcla de los mismos.

Por otro lado, se prepararon dos probetas gemelas simultáneamente utilizando la mezcla limo + 20% escoria (se utilizó el mismo proceso descrito anteriormente). Se procedió a cerrar todos los puertos de una de ellas y se la colocó en la cámara húmeda dentro de una bolsa de nylon durante 28 días para observar si se producían cementaciones. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 22: Resultados de muestras gemelas.

Probeta	K	Kmedio	γ_d	e	W inicial	%Sat inicial
(1)	1.07×10^{-7}	1.95×10^{-6}	1.64	0.63	19%	81%
	1.67×10^{-6}					
	1.72×10^{-6}					
	3.56×10^{-6}					
	1.71×10^{-6}					
	1.38×10^{-6}					
	2.83×10^{-6}					
(2) 28 días en cámara húmeda	5.06×10^{-7}	6.04×10^{-7}	1.63	0.64	19%	79%
	5.70×10^{-7}					
	3.75×10^{-7}					
	6.37×10^{-7}					
	7.88×10^{-7}					
	5.01×10^{-7}					
	7.02×10^{-7}					

La Tabla 22 muestra que el valor de la conductividad hidráulica de la muestra que estuvo 28 días en la cámara húmeda es menor que la de la probeta que no lo estuvo, esto nos puede indicar que se produjeron reacciones a nivel microscópico, que pueden atribuirse a las reacciones puzolánicas identificadas por Mozejco & Francisca (2018), y que estarían produciendo una reducción de vacíos de las muestras. Esta

reducción de vacíos se manifiesta macroscópicamente como una reducción en la conductividad hidráulica.

La Figura 42 ilustra como varía la conductividad hidráulica en el tiempo para las dos probetas. Se observa que el valor de la misma se mantiene relativamente constante con el tiempo.

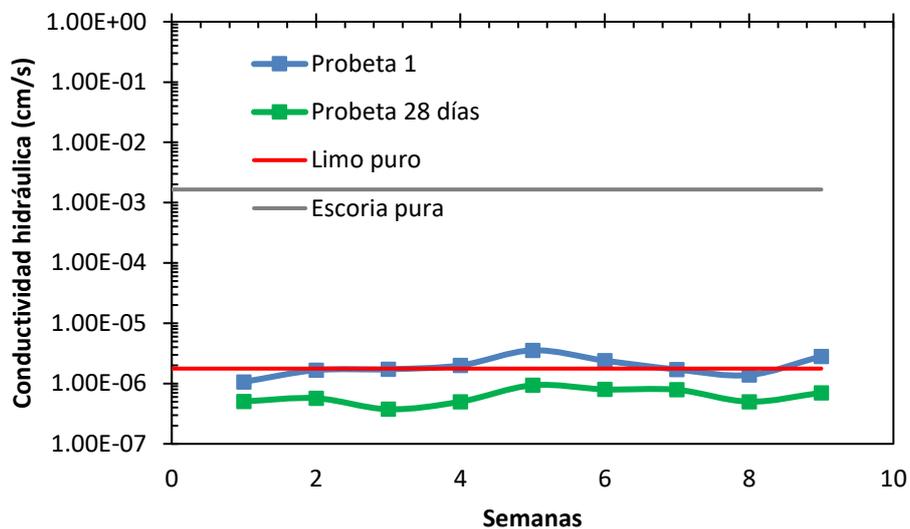


Figura 42: Variación de la conductividad hidráulica con el tiempo.

Además, se midió la variación del pH en función del tiempo para ambas probetas. En las Figuras 43 y 44 se presentan los resultados obtenidos para la probeta 1 y 2 respectivamente. El término pHe indica el pH a la entrada de la probeta, y el término pHs, el pH a la salida de la misma.

Probeta 1

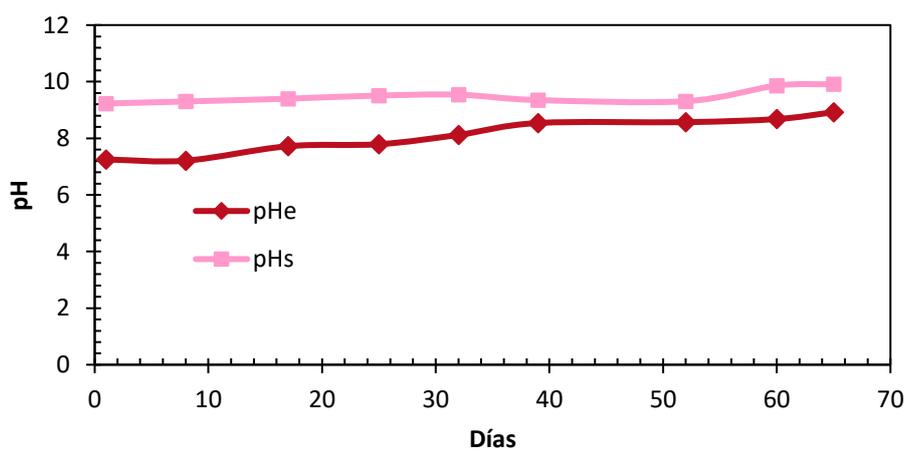


Figura 43: Variación del pH con el tiempo (Probeta 1).

Probeta (2) - Cementada

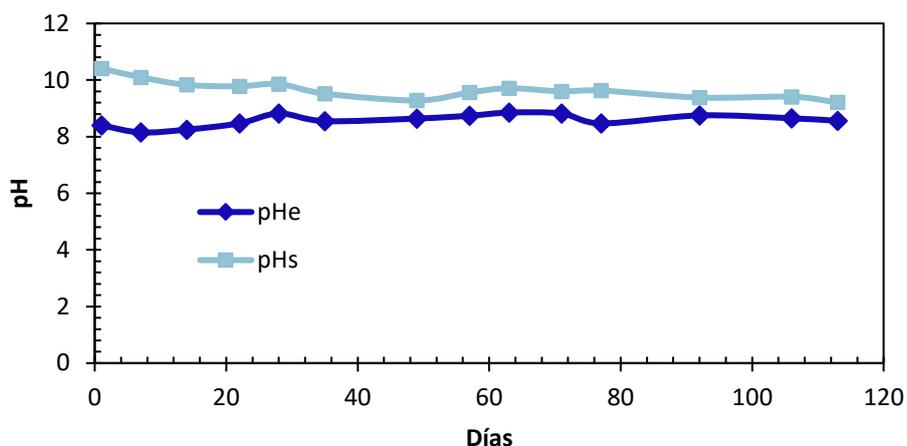


Figura 44: Variación del pH con el tiempo (Probeta 2).

4.3 Sales solubles

Al realizar el ensayo de determinación de sales solubles, se observó que el agua estaba clara y limpia, lo que indica que flocula y hay presencia de sales. En consecuencia, se continuó con el ensayo tomando muestras de agua determinando el contenido de sales solubles totales mediante la técnica de evaporación.

A continuación se presentan los resultados de la determinación de sales solubles realizadas sobre las muestras de escoria.

Tabla 23: Resultados determinación de sales solubles.

Medición	T	P	%Ps
1	97.97	98.01	0.4
2	97.97	98	0.3
3	97.97	98	0.3
4	96.53	96.55	0.2
5	97.97	97.99	0.2

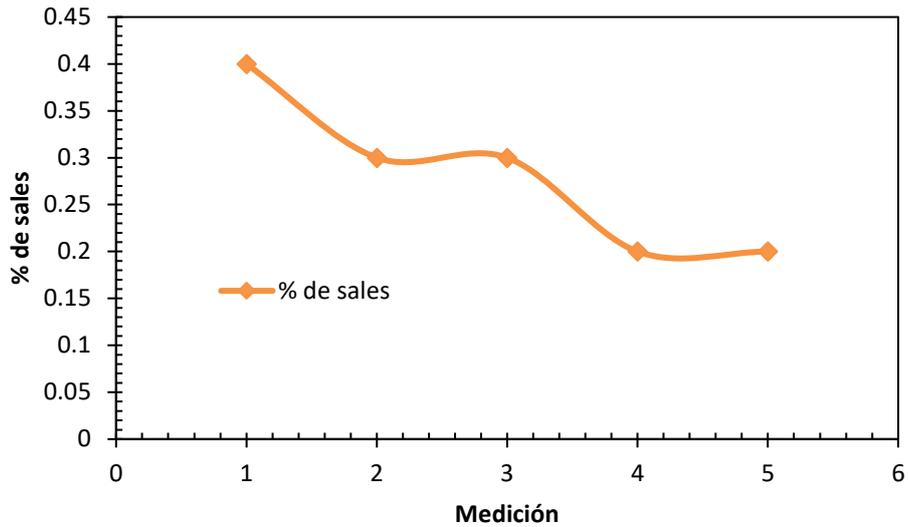


Figura 45: Disminución del porcentaje de sales mediante diluciones.

Se observa que el porcentaje de sales disminuye con las diluciones, pero se necesitan más de 5 diluciones para eliminar por completo las sales presentes. Haciendo aproximaciones, se eliminaría el porcentaje de sales en la medición número 7 u 8.

4.4 Variación del pH del lixiviado

4.4.1 Escorias

A continuación se presentan los resultados de la variación del pH del lixiviado mediante el agregado de escorias.

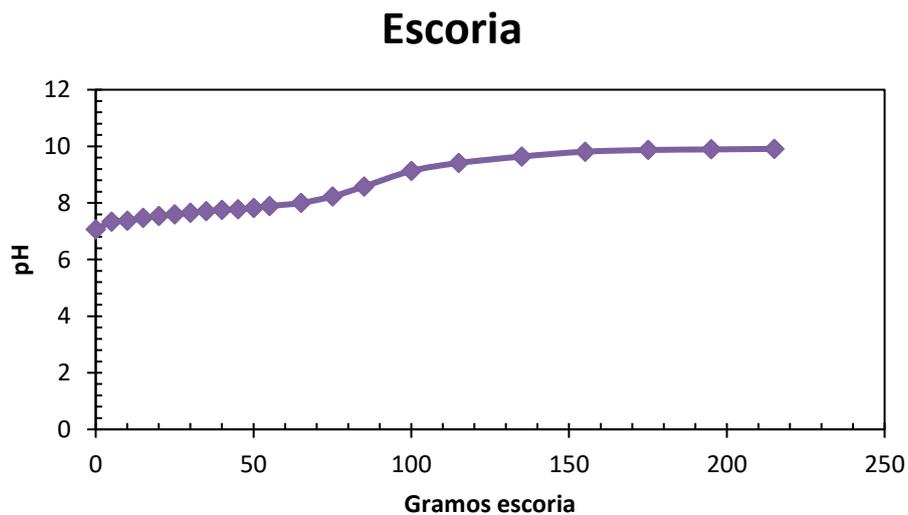


Figura 46: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de escorias.

Se observa que inicialmente el lixiviado posee un pH cercano a 7. Mediante el agregado de aproximadamente 220 gramos de escorias se logró estabilizar el pH en un valor muy cercano a 10.

4.4.2 Arena fina

A continuación se muestra la variación del pH del lixiviado mediante el agregado de pequeñas cantidades de arena fina.

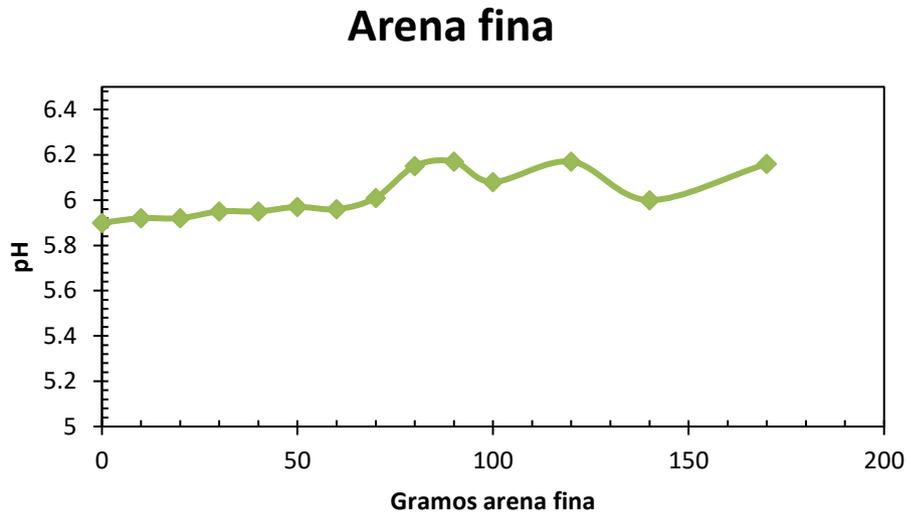


Figura 47: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de arena fina.

Se observa que prácticamente la arena fina y el lixiviado no reaccionan, manteniéndose el pH entre 5.9 y 6.15.

4.4.3 Limo

En la Figura 48 se muestra la variación del pH del lixiviado mediante el agregado de limo.

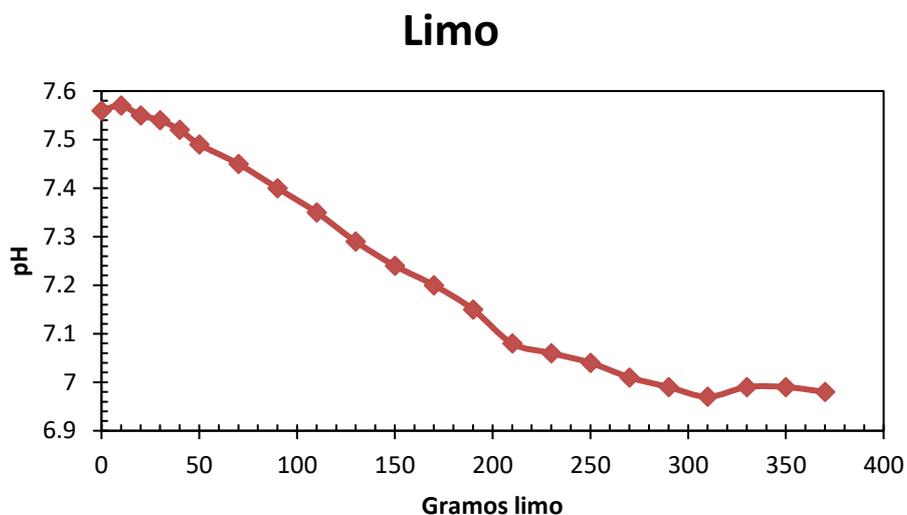


Figura 48: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de limo.

Se observa que el pH del lixiviado fue descendiendo hasta neutralizarse, esto sucede debido a que la mezcla busca su pH de equilibrio.

4.4.4 Bentonita

A continuación se muestran los resultados de la variación del pH mediante el agregado de bentonita.

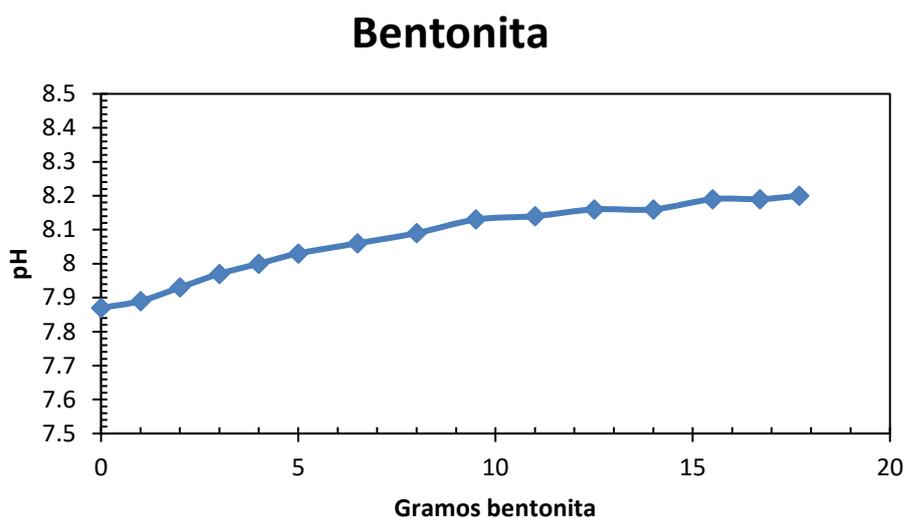


Figura 49: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de bentonita.

Se observa que el pH va en aumento hasta que, con aproximadamente 18 gramos de bentonita se estabiliza en 8.2 unidades de pH.

A partir de todos los resultados de pH obtenidos se desprende que la presencia de escorias tiene un rol fundamental en el incremento del pH del líquido. Este resultado es muy importante ya que los valores de pH de equilibrio medidos se encuentran dentro del rango de valores de pH para los cuales se produciría la precipitación de la mayoría de los metales pesados presentes en un lixiviado.

4.5 Modelación numérica

Los tiempos de permeado para las distintas condiciones se analizaron comparando los tiempos requeridos para que el centro de masa del lixiviado atraviese la barrera. En el caso de las barreras de limo con arcilla esto ocurre cuando la concentración al final de la barrera es igual al 50% de la concentración inicial ($C/C_0 = 0,5$), mientras que para el caso de barreras con escorias viene dado por el momento en el cual el pH a la salida de la barrera alcanza el pH de solubilización y se libera el pulso contaminante.

A continuación se ilustran los resultados que se producirían en la barrera modificando diferentes parámetros en la modelación.

4.5.1 Variación del espesor de la barrera

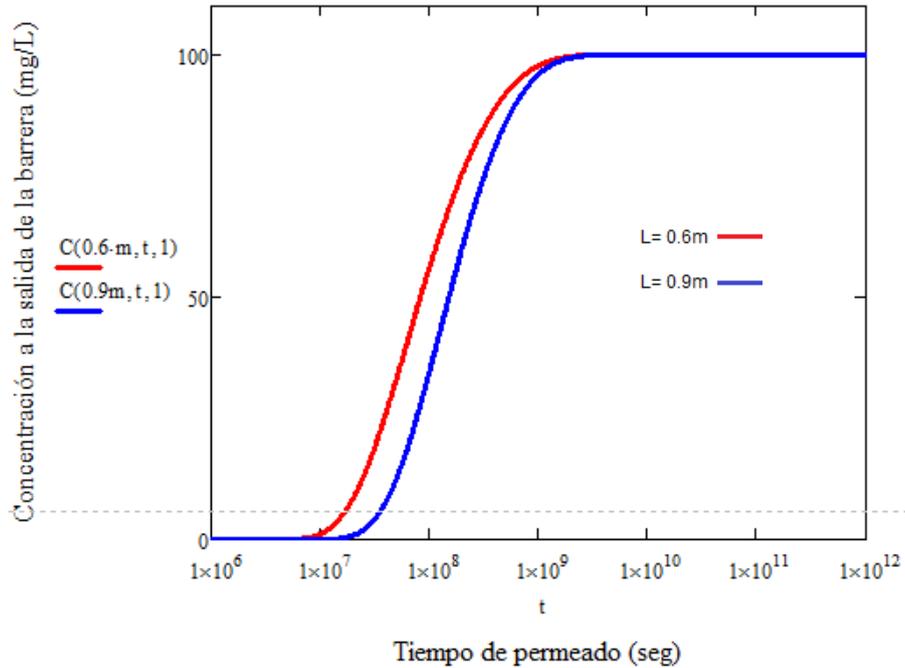


Figura 50: Variación del tiempo de permeado con el espesor de la barrera. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9}$ m²/s, $n=0,4$, $R=1$.

Se observa que si se aumenta el espesor de la barrera, se obtienen tiempos de permeado mayores, es decir, el centro de masa del lixiviado atraviesa la barrera en tiempos mayores. A su vez, está comprobado que el aumento en el espesor de la barrera de fondo promueve un pH elevado por más tiempo, lo que a su vez provoca una mayor acumulación de metal precipitado en la barrera debido a la mayor cantidad de líquido permeado (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018). Adicionalmente, debido a la mayor cantidad de metal precipitado, una vez que se neutraliza el pH, el pico de concentración liberado al final de la barrera resulta mayor (Figura 51).

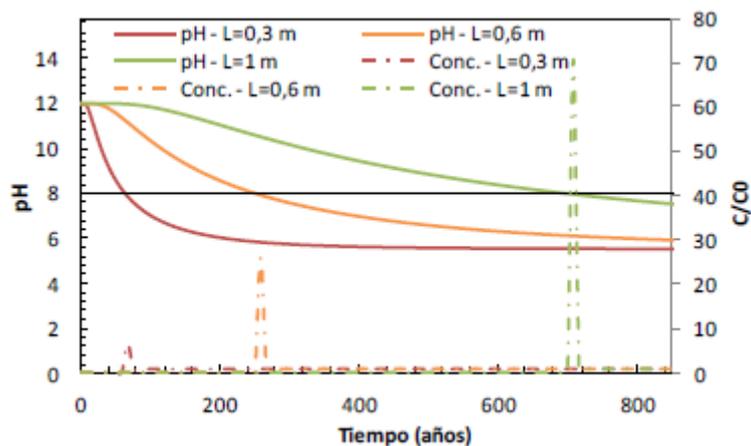


Figura 51: Variación del pH y la concentración con el espesor de la barrera. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $H_w=0,3$ m, $DL=2,9 \times 10^{-9}$ m²/s, $n=0,4$, $CNA_{escoria}=100$ gH+/kg y $pH_p=8$. (Glatstein, 2014).

4.5.2 Variación de la altura de lixiviado

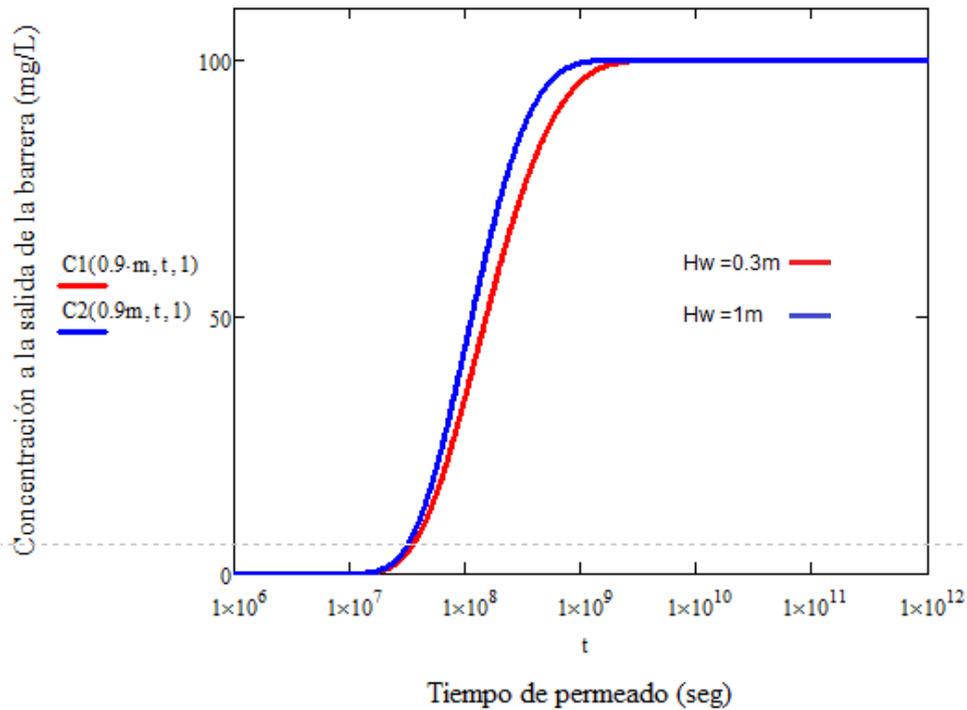


Figura 52: Variación del tiempo de permeado con la altura de lixiviado; a) $H_w=0.3\text{m}$, b) $H_w=0.6\text{m}$. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0.9\text{m}$, $DL=2.5 \times 10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$, $n=0.4$.

Se utilizaron valores de altura de lixiviados de 0,3 m (el regulado) y de 1 m, asumiendo un mal manejo en el sistema de extracción de los mismos. Se observa que al aumentar la altura de lixiviado, los tiempos de permeado disminuyen debido a que al tener mayor cantidad de líquido, el centro de gravedad del mismo atraviesa la barrera más rápidamente.

4.5.3 Variación del Factor de retardo “R” con el porcentaje de escoria

La Figura 53 muestra la conductividad hidráulica obtenida cuando varía el porcentaje de bentonita utilizada. Se observa que con un porcentaje de bentonita de entre 5 y 10 % se obtiene la conductividad hidráulica exigida por normativa de $1 \times 10^{-7}\text{cm}/\text{seg}$.

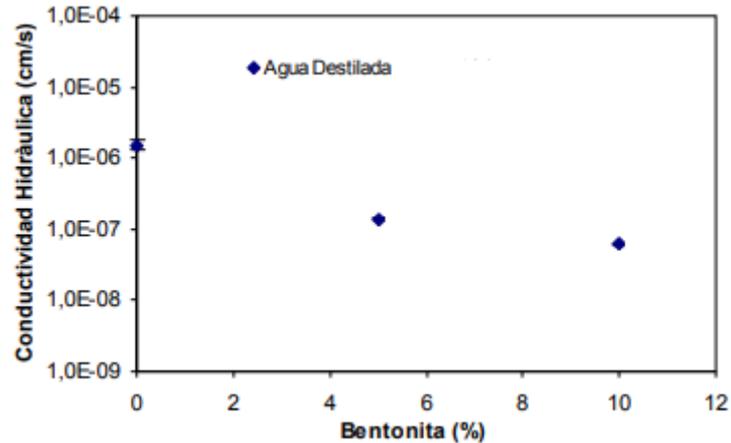


Figura 53: Variación de la conductividad hidráulica con el porcentaje de bentonita.

Sabiendo que una muestra limosa no genera retardo, es decir $R=1$, que la bentonita pura genera un retardo $R=10$, y la escoria pura un retardo $R=100$, podemos realizar los siguientes cálculos utilizando porcentajes de bentonita de entre el 5 y 10%.

Tabla 24: Retardos generados por los materiales puros.

Material	R
LIMO	1
BENTONITA	10
ESCORIA	100

Tabla 25: Retardos obtenidos utilizando 5% de Bentonita.

Material	Combinación de R	R
Limo + 5% B	$1*1+0.05*10$	1.5
Limo + 5% B + 20% E	$1.5+0.2*100$	21.5

Tabla 26: Retardos obtenidos utilizando 10% de Bentonita.

Material	Combinación de R	R
Limo + 10% B	$1*1+0.1*10$	2
Limo + 10% B + 20% E	$2+0.2*100$	22

A través de la Tabla 25 se procede a graficar el porcentaje de escorias vs. el factor de retardo obtenido con un 0% y un 20% de las mismas. Asumiendo que la relación es lineal, se traza una recta que permite obtener el factor de retardo de mezclas con diferentes porcentajes de escoria. La Figura 54 muestra la relación obtenida. Se procedió a realizar el análisis utilizando sólo el 5% de bentonita debido a que los resultados obtenidos son muy similares a los que se obtienen utilizando el 10% de la misma. Los resultados se muestran en la Tabla 27.

L + 5%B + X%E

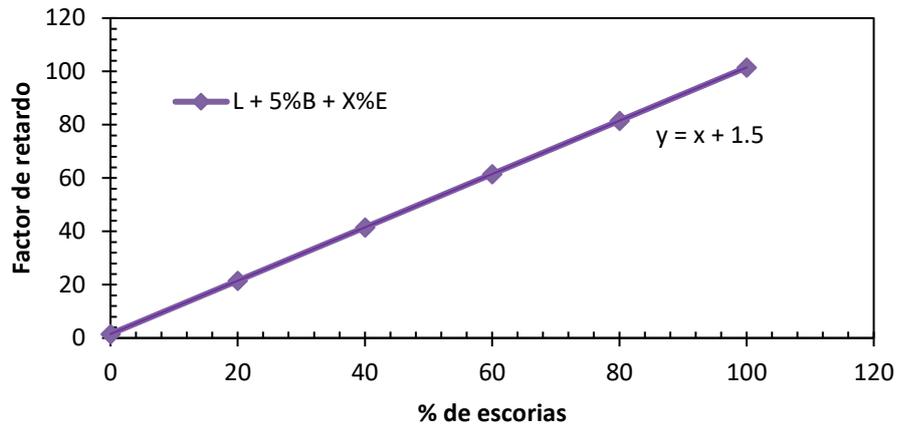


Figura 54: Variación del factor de retardo R con el porcentaje de escorias.

Tabla 27: Resultados del factor de retardo para cada porcentaje de escorias.

%Escoria	R
0	1.5
20	21.5
40	41.5
60	61.5
80	81.5
100	101.5

En la Figura 55 se modeló la concentración a la salida de la barrera en función del tiempo de permeado teniendo en cuenta porcentajes de escorias de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% utilizando los factores de retardo obtenidos en la Tabla 26.

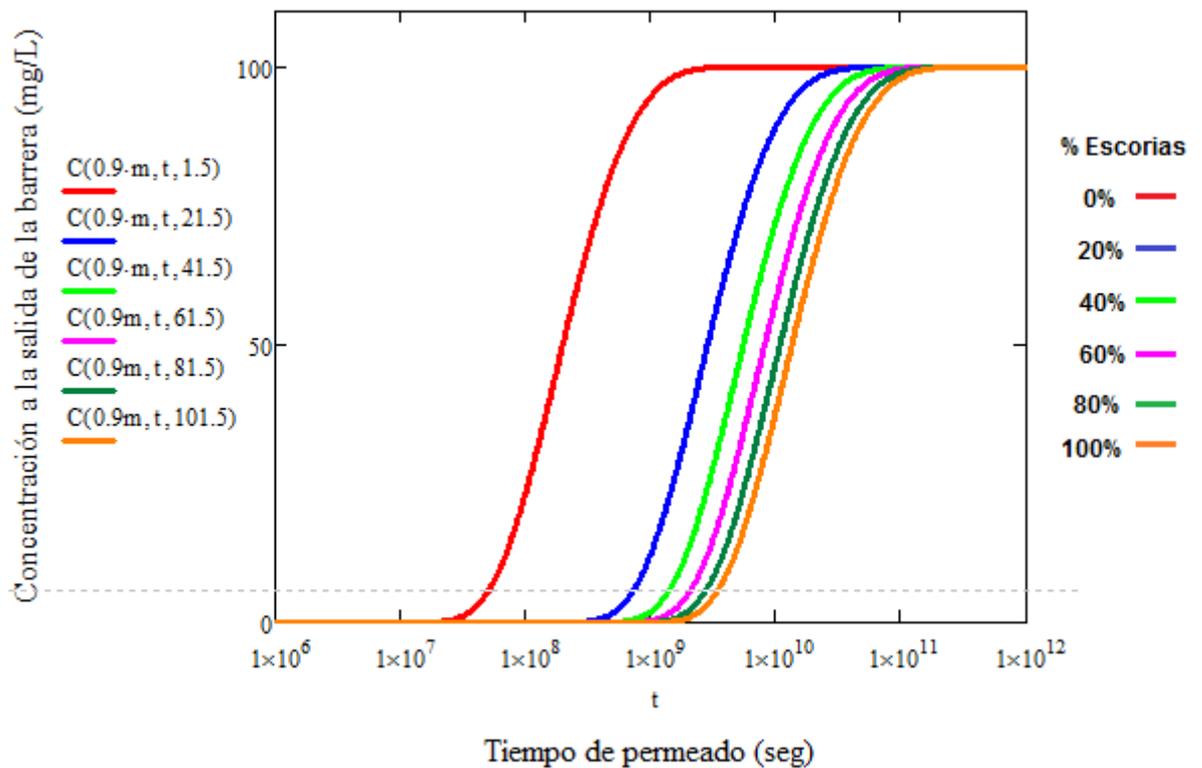


Figura 55: Variación del factor de retardo con el porcentaje de escorias. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0,9$ m, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$.

A continuación, en la Tabla 28 se presentan los tiempos de permeado obtenidos para cada porcentaje de escorias.

Tabla 28: Tiempos de permeado para los diferentes porcentajes de escoria.

Propiedades						
%Escoria	R	k(m/s)	L (m)	Hw (m)	tpermeado (seg)	tpermeado (años)
0	1.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	2.25×10^{-8}	7.13
20	21.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	3.18×10^{-9}	100.84
40	41.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	6.19×10^{-9}	196.28
60	61.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	9.25×10^{-9}	293.32
80	81.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	1.22×10^{-10}	386.86
100	101.5	1×10^{-9}	0.9	0.3	1.53×10^{-10}	485.16

La Figura 56 ilustra el tiempo de permeado medido en años para cada porcentaje de escorias utilizado.

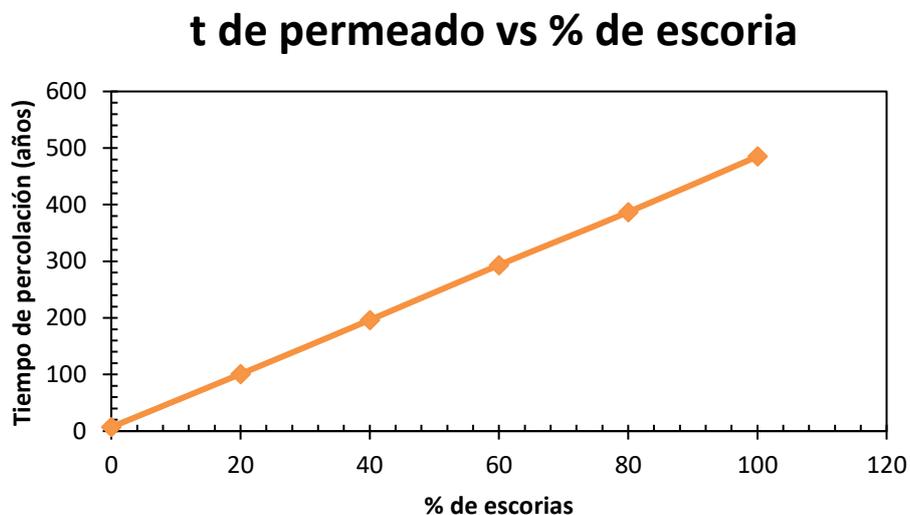


Figura 56: Tiempo de remediación obtenido para cada % de escorias.

Consideramos que el tiempo de percolación óptimo para este tipo de obras es de 200 años, por lo que interpolando en la gráfica, se obtiene que el porcentaje de escorias requerido para que el contaminante sea retenido en la barrera por esa cantidad de tiempo es de 40.6%. Se utilizará un porcentaje del 40% para facilitar los cálculos. Utilizando un 20% se obtiene un tiempo de remediación de 100 años, la cual es una alternativa que también puede considerarse aceptable.

Utilizar un 100% de escorias no sería factible debido a que aumentaría considerablemente la conductividad hidráulica por lo que debería agregarse mayor cantidad de bentonita para lograr el valor requerido por normativa.

4.5.4 Concentraciones de metales pesados en función del tiempo

En el Capítulo 3 se detallaron las concentraciones de los metales pesados presentes en el lixiviado de un relleno sanitario. A continuación, en la Figura 57 se muestra la relación entre la concentración a la salida de la barrera y el tiempo de permeado para el Cd, Cu, Ni y Zn. La Tabla 29 muestra las concentraciones obtenidas transcurridos los 200 años.

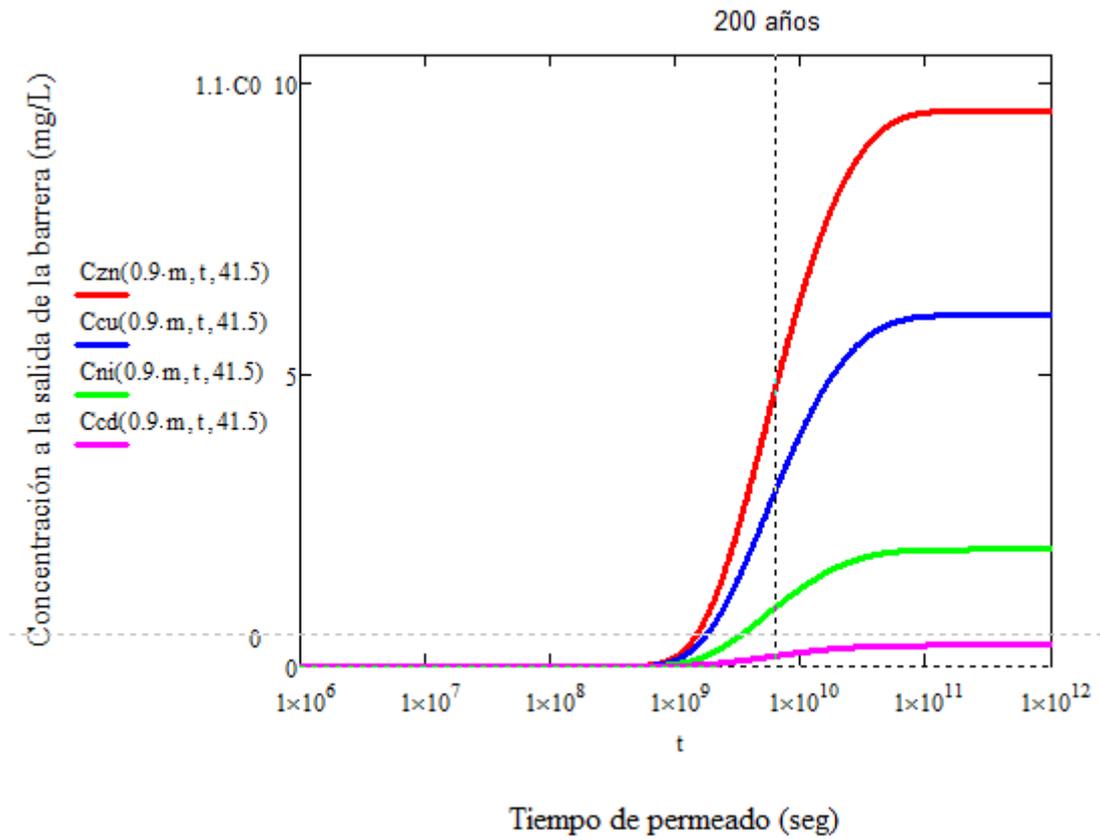


Figura 57: Concentración de metales en función del tiempo. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0,9$ m, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$.

Tabla 29: Concentraciones de los metales pesados más importantes luego de 200 años.

Metal pesado	Cinicial [mg/lit]	C200 años [mg/lit]
Cu^{+2}	6.01	3.03
Zn^{+2}	9.51	4.78
Ni^{+2}	2	1.01
Cd^{+2}	0.36	0.18

CAPÍTULO 5: CASO PRÁCTICO PROYECTO CORMECOR

5.1 Introducción

En el presente capítulo describiremos resumidamente el proyecto de CORMECOR. Consiste en un complejo ambiental para el tratamiento, procesamiento, reciclaje y disposición final de residuos sólidos urbanos. En particular, el estudio se centra en la evaluación de las barreras de fondo de las celdas para la disposición final de los residuos. Se analizarán cuales son las ventajas que se obtendrían de utilizar escorias siderúrgicas en la construcción de sus barreras de fondo. Se realiza un estudio numérico y económico para que a partir de los resultados obtenidos se pueda evaluar la implementación de los mismos en la construcción de una celda piloto con barreras especiales de alta eficiencia en la retención de metales pesados.

5.2 Objetivos del proyecto

El proyecto CORMECOR S.A. consiste en la construcción y de un Complejo Ambiental de Tratamiento, Valorización y Disposición final de los residuos sólidos urbanos del Área Metropolitana de Córdoba teniendo en cuenta una proyección de 30 años.

Este proyecto pretende contribuir a la preservación del ambiente y reducir la contaminación ambiental a través de una correcta gestión, valorización y disposición final de los residuos sólidos urbanos que se generan en el Área Metropolitana de Córdoba, definida desde la ciudad central y su área de influencia de primer grado, es decir, las localidades y el área rural comprendidas en un radio de 50 km medidos desde el km 0 (Plaza San Martín, Córdoba Capital).

5.3 Características generales del proyecto

El complejo contendrá 4 plantas de recuperación de diferentes residuos valorizables:

1. Planta de neumáticos fuera de uso (NFU)
2. Planta de Separación Mecánica (SM)
3. Planta de Residuos de Obra, Demoliciones y Voluminosos (RO,D y V)
4. Planta de Compostaje (CO)

Además se tendrá una planta de tratamiento de lixiviados, una planta de biogás y un sitio de disposición final que consiste en un Relleno Sanitario Controlado.

El complejo CORMECOR se basa en las recomendaciones de la USEPA para rellenos sanitarios de residuos municipales. El proyecto contempla la construcción de dos módulos para la disposición de residuos sólidos domiciliarios dejando un sector de expansión para un posible tercer módulo. Una vez que los residuos pasan por todas las plantas de valorización, el rechazo se enviará a estos módulos para su disposición final (Figura 58).



Figura 58: Imagen ilustrativa del predio.

Para el cálculo se utilizó una tasa de generación de 1.35 kg/hab/día, que surge de la información de ingreso de residuos y población del 2013. Además se tuvo en cuenta una tasa de crecimiento anual de generación de residuos del 2%. Se tuvo en cuenta una densidad de residuos estabilizados de 0.85 tn/m³. Teniendo en cuenta todo esto, se determinó que la capacidad necesaria del módulo para la disposición final de los residuos en un periodo de 30 años el cual resulta igual a 37.300.000 m³.

5.3.1 Especificaciones de los módulos

Las dimensiones del módulo I serán de 668 metros x 938 metros mientras que los del módulo II serán de 671.7 metros x 930 metros. Ambos tendrán una profundidad máxima de 25 metros y una altura máxima en cúspide de 20 metros. Los taludes adoptados son 1V:3H interior y 1V:2H exterior. La aislación de base consistirá en una barrera artificial de suelo de baja permeabilidad de 0.6 metros de espesor compuesta por suelo-bentonita con un coeficiente $k=1.10^{-7}$ cm/seg. Sobre la misma se colocará una membrana de polietileno de alta densidad HDPE de 2 milímetros de espesor. La misma será cubierta por una capa de suelo seleccionado y compactado de 0.3 metros de espesor.

La cobertura final se diseño con un espesor total de 1.2 metros, estando compuesta de arriba hacia abajo de la siguiente manera:

- 20 cm de suelo vegetal
- 80 cm de suelo de baja permeabilidad
- 20 cm de suelo compactado

Finalmente, el volumen neto del módulo I es de 15.600.000 m³ y el del módulo II es de 15.500.000 m³. Los módulos serán divididos por Bermas de Separación que serán impermeabilizadas artificialmente mediante membranas HDPE. Se construirán 4 bermas y 8 sectores. Las bermas tendrán una altura variable de entre 1.8 metros y 2.5 metros.

5.4 Cálculo del caudal de lixiviado atravesado por la barrera

Como se dijo anteriormente, el permeado a través de la barrera compuesta (CCL+GM) se desarrolla a través de huecos en la misma. En este caso asumimos

condiciones de contacto buenas, por lo que para el cálculo se utilizará la siguiente ecuación de Giroud:

$$Q = 0.21h_w^{0.9}a^{0.1}k_s^{0.74} \left[1 + 0.1 \left(\frac{h_w}{H_s} \right)^{0.95} \right]$$

a) Considerando condiciones controladas de alturas de lixiviado:

$$h_w = 0.3 \text{ m}$$

$$a = 290 \text{ mm}^2$$

$$k_s = 2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

$$H_s = 0.6 \text{ m}$$

$$Q = 0.21 \times (0.3 \text{ m})^{0.9} \times (2.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2)^{0.1} \times (2 \times 10^{-11} \text{ m/s})^{0.74} \left[1 + 0.1 \left(\frac{0.3 \text{ m}}{0.6 \text{ m}} \right)^{0.95} \right]$$

$$Q = 4 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.035 \frac{\text{lt}}{\text{dia}}$$

$$Q \times nd = 0.035 \frac{\text{lt}}{\text{dia}} \times 5 \frac{\text{defectos}}{\text{ha}} = 0.173 \frac{\text{lt}}{\text{ha.dia}}$$

Tabla 30: Caudal que atraviesa la barrera con condiciones controladas de lixiviados.

Módulos	Área (m2)	Área (ha)	Q(lt/ha.día)	Q(lt/día)	Q p/ celda (lt/día)
I	563628.80	56.36	0.173	9.75	1.22
II	561894.36	56.19	0.173	9.72	1.22
TOTAL	1125523.2			19.47	2.43

b) Considerando condiciones no controladas de alturas de lixiviado:

$$h_w = 1 \text{ m}$$

$$a = 290 \text{ mm}^2$$

$$k_s = 2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

$$H_s = 0.6 \text{ m}$$

$$Q = 0.21 \times (1 \text{ m})^{0.9} \times (2.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2)^{0.1} \times (2 \times 10^{-11} \text{ m/s})^{0.74} \left[1 + 0.1 \left(\frac{1 \text{ m}}{0.6 \text{ m}} \right)^{0.95} \right]$$

$$Q = 1.31 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.113 \frac{\text{lt}}{\text{dia}}$$

$$Q \times nd = 0.113 \frac{\text{lt}}{\text{dia}} \times 5 \frac{\text{defectos}}{\text{ha}} = 0.565 \frac{\text{lt}}{\text{ha.dia}}$$

Tabla 31: Caudal que atraviesa la barrera con condiciones no controladas de lixiviados.

Módulos	Área (m2)	Área (ha)	Q(lt/ha.día)	Q(lt/día)	Q p/ celda (lt/día)
I	563628.80	56.36	0.565	31.85	3.98
II	561894.36	56.19	0.565	31.75	3.97
TOTAL	1125523.2			63.59	7.95

En la Figura 59 se representa la concentración en función del tiempo de permeado para los dos escenarios posibles calculados anteriormente y también para

una altura máxima de lixiviados de 5 metros que se obtuvo de bibliografía internacional.

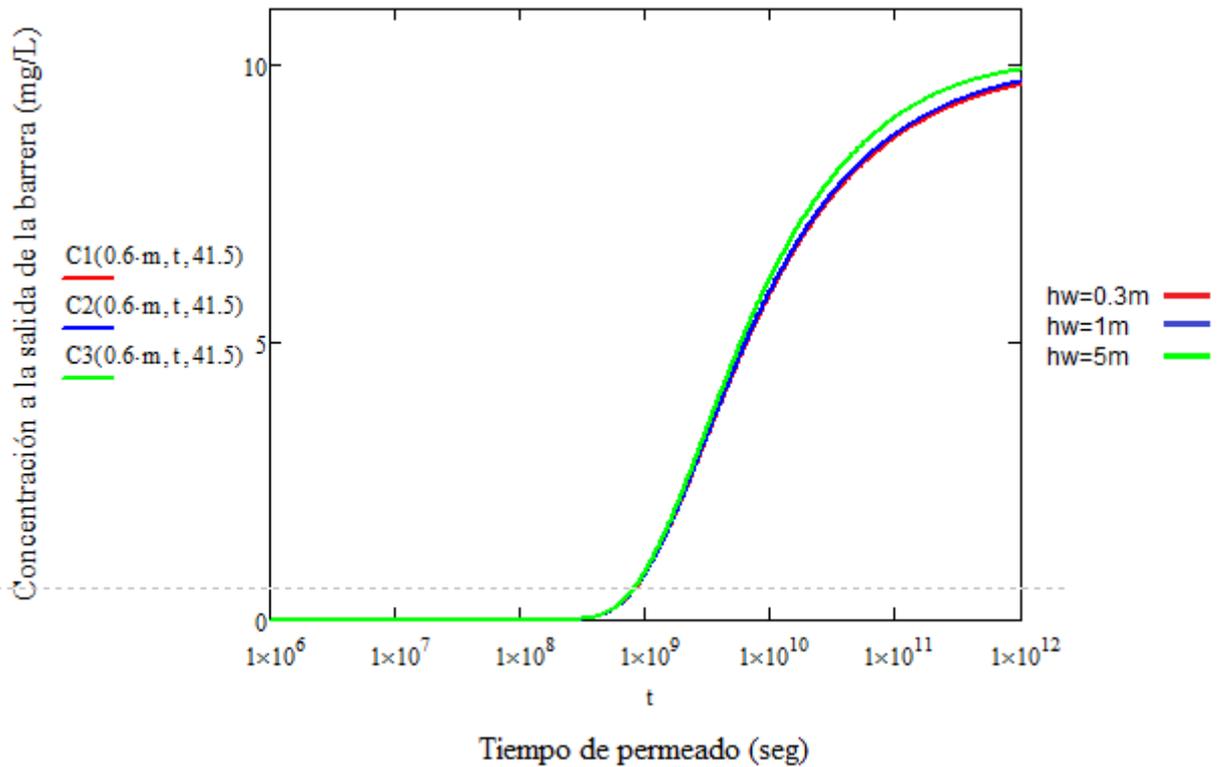


Figura 59: Concentración a la salida de la barrera para el caso CORMECOR variando la altura de lixiviado. Se asume $k=2 \times 10^{-11} \text{m/s}$, $L=0,6\text{m}$, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $R=41.5$, $n=0.4$.

5.5 Incorporación de escorias siderúrgicas en barreras de fondo

5.5.1 Concentración de los metales pesados en función del tiempo

La Figura 60 muestra la concentración de los metales pesados más importantes que están presentes en el lixiviado de los rellenos sanitarios. La línea fina representa la concentración para un retardo $R=21.5$ producido por un 20% de escorias, mientras que la línea gruesa muestra la concentración para un retardo $R=41.5$ producido por un 40% de escorias. Estos resultados numéricos se generaron a partir de la implementación de la solución de difusión – advección presentada en el Capítulo 2.

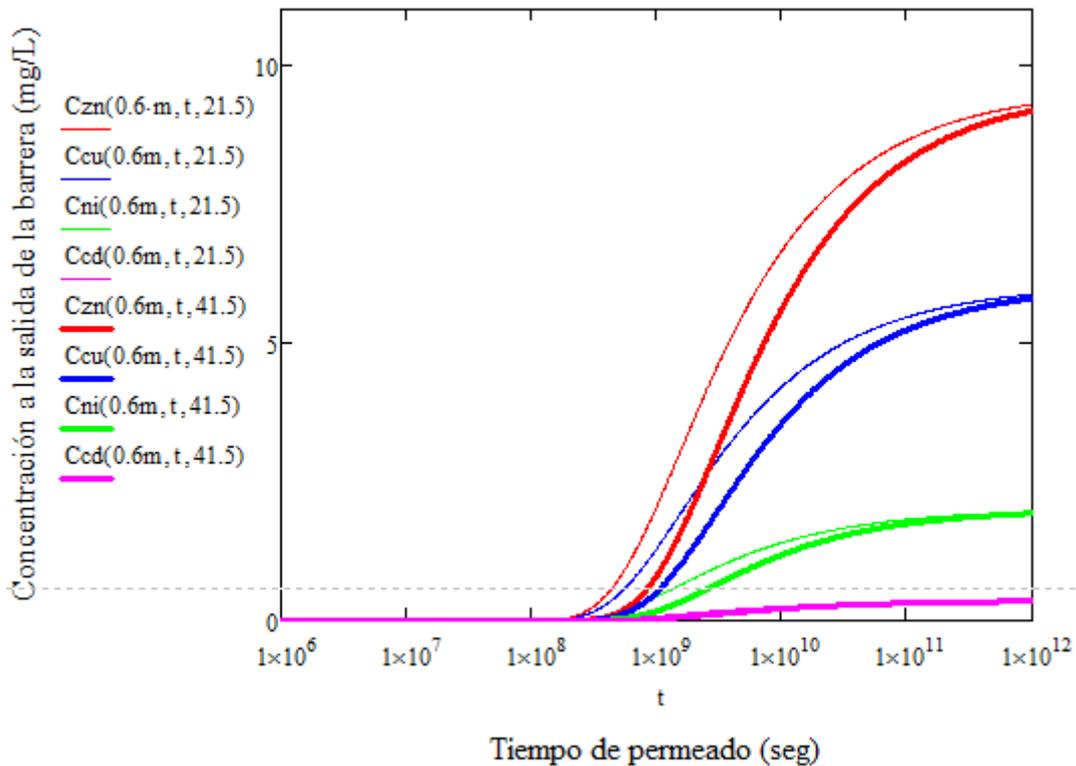


Figura 60: Concentración de los metales pesados en función del tiempo de permeado para retardos de 21.5 y 41.5. Se asume $k=2 \times 10^{-11} \text{m/s}$, $L=0.6\text{m}$, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0.4$, $H_w=0.3\text{m}$.

Podemos observar que si se utiliza un 40% de escorias, la gráfica se desplaza hacia la derecha, lo que indica un mayor tiempo de permeado, es decir, los metales pesados serán retenidos por más tiempo y el centro de gravedad del contaminante atravesará la barrera en un tiempo mayor.

5.5.2 Separación de los drenes colectores de lixiviados

Asumiendo que se tiene una altura de lixiviados controlada, se procede a calcular la separación de los drenes colectores:

$$h_{w\max} = 0.3\text{m}$$

$$q = 2.5\text{mm/día} = 2.89 \times 10^{-8} \text{m/s}$$

$$k = 1 \times 10^{-3} \text{cm/s} = 1 \times 10^{-5} \text{m/s (material granular)}$$

$$\text{Pendiente} = 3\% = \phi = 1.72^\circ$$

$$c = \frac{q}{k} = \frac{2.89 \times 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.89 \times 10^{-3}$$

Utilizando la ecuación descrita en el Capítulo 2:

$$L = \frac{2 \times h_{\max}}{\sqrt{c} \cdot \left[\frac{\tan^2 \phi}{c} + 1 - \left(\frac{\tan \phi}{c} \right) \cdot \sqrt{\tan^2 \phi + c} \right]}$$

$$L = \frac{2 \times 0.3m}{\sqrt{2.89 \times 10^{-3}} \cdot \left[\frac{\tan^2 1.72}{2.89 \times 10^{-3}} + 1 - \left(\frac{\tan 1.72}{2.89 \times 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\tan^2 1.72 + 2.89 \times 10^{-3}} \right]}$$

$$L = 16.58m \rightarrow L = 17m$$

5.5.3 Cómputo métrico para celda piloto

En este apartado se realiza el cómputo métrico para la construcción de un sector del módulo I al que le llamaremos celda. El objetivo consiste en determinar cuánto aumentaría el costo de la barrera al agregar escorias siderúrgicas.

A continuación en la Tabla 32 detallamos las dimensiones de los módulos I y II:

Tabla 32: Superficie de los módulos.

Módulos	Dimensiones (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)
I	668 x 938	626.584	3212
II	671.7 x 930	624.681	3203.4
TOTAL		1.251.265	6415.4

Teniendo en cuenta que el terraplén perimetral posee una altura promedio de 3.8m, que el talud exterior es 2H:1V, el talud interior es 3H:1V y que el ancho de coronamiento es de 12m:

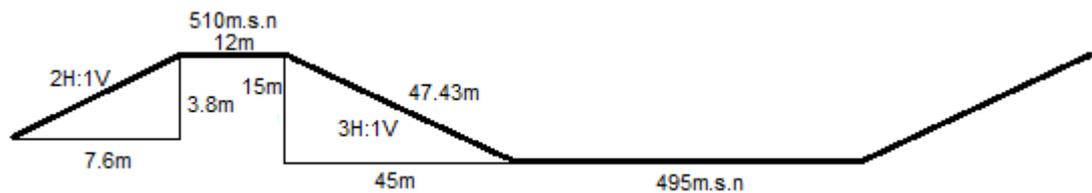


Figura 61: Dimensiones de los módulos.

Distancia total horizontal: $12m + 7.6m = 19.6m$

Superficie sin barrera: $19.6m \times 3212m$ (perímetro) = $62955.2m^2$

Calculamos que la superficie efectiva donde se colocará la barrera es de:

$$626584m^2 - 62955.2m^2 = 563628.8m^2$$

Tabla 33"Volumen efectivo donde se coloca la barrera.

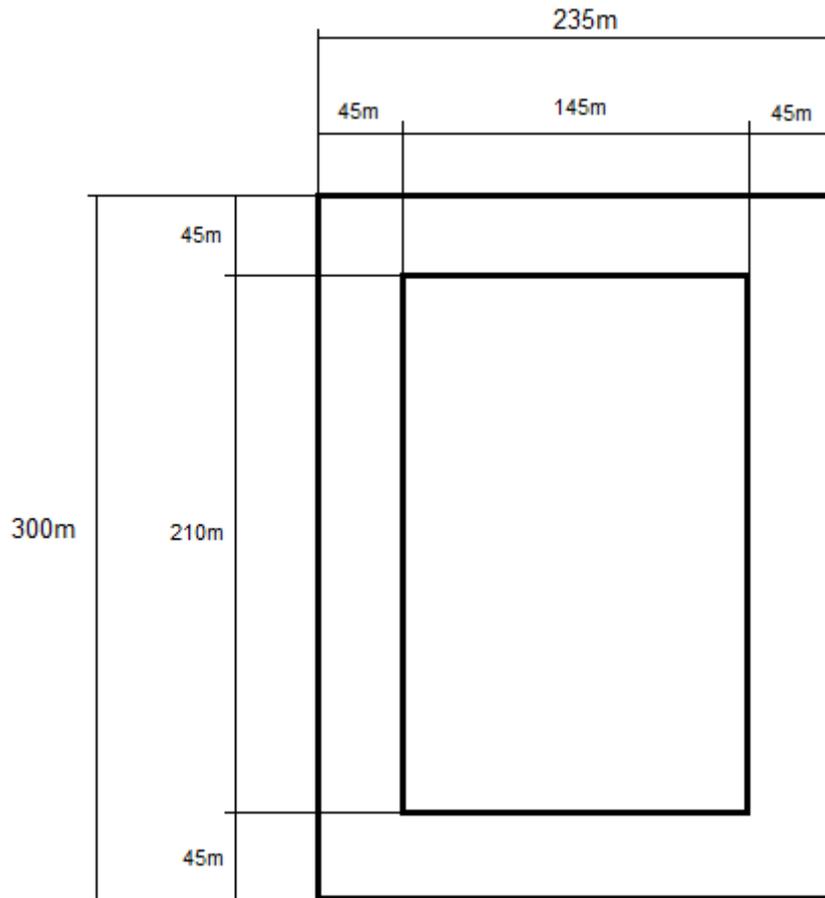
Módulos	Área	Área efectiva	Vol. Efectivo
I	626584	563628.80	338177.28
II	624681	561894.36	337136.62
TOTAL	1251265	1125523.16	675313.90

Específicamente, para una celda obtenemos:

$$563628.8\text{m}^2 / 8 = 70453.6\text{m}^2.$$

Se propone una celda de 235mx300m² con una superficie de 70500m².

Analizando la celda:



Se obtiene:

$$\text{Área} = (47.43\text{m} + 145\text{m} + 47.43\text{m}) \times (47.43\text{m} + 210\text{m} + 47.43\text{m}) = 73123.72\text{m}^2.$$

Adicionamos un 20% más para evitar falta de materiales.

$$73123.72\text{m}^2 \times 1.2 = 87748.46\text{m}^2.$$

Tabla 34: Masa total necesaria para una celda.

CELDA 1 (sin escorias)					
Módulos	Área (m ²)	Vol total (m ³)	Peso unitario (KN/m ³)	Peso (N)	Masa total (tn)
I	87748.46	52649.08	15.8	831855464	84796.68

CELDA 1 (con escorias)					
Módulos	Área (m ²)	Vol total (m ³)	Peso unitario (KN/m ³)	Peso (N)	Masa total (tn)
I	87748.46	52649.08	16.6*	873974662	89090.18

*De manera preliminar se adopta el peso unitario de la mezcla de limo con 20% escorias.

Tabla 35: Toneladas necesarias para la construcción de una celda.

CELDA 1 (sin escorias)		Porcentajes	
		100	5
Módulos	Masa p/celda (tn)	Masa limo (tn)	Masa bentonita (tn)
I	84796.68	84796.68	4239.83

CELDA 1 (con 20% escorias)		Porcentajes		
		100	5	20
Módulos	Masa p/celda (tn)	Masa limo (tn)	Masa bentonita (tn)	Masa escoria (tn)
I	89090.18	71272.14	3563.61	14254.43

CELDA 1 (con 40% escorias)		Porcentajes		
		100	5	40
Módulos	Masa p/celda (tn)	Masa limo (tn)	Masa bentonita (tn)	Masa escoria (tn)
I	89090.18	61441.50	3072.08	24576.60

En la Figura 62 se presentan los tipos de barreras que se van a computar. La primera barrera es una versión mejorada de la propuesta en el proyecto CORMECOR. Cuenta con la incorporación de un geotextil sobre la geomembrana y una capa drenante de 20 cm compuesta por material granular con drenes colectores de lixiviados de 110mm de diámetro y 5.3mm de espesor. La incorporación del geotextil es fundamental ya que es una práctica que protege a la geomembrana de cualquier elemento punzante que pueda dañarla y/o pincharla generando huecos por donde el lixiviado puede filtrarse. Las buenas prácticas y la costumbre a nivel internacional establecen la colocación de un geotextil por encima de la geomembrana por razones técnicas justificadas. La segunda barrera es idéntica a la primera con la incorporación de escorias siderúrgicas en la capa de suelo y bentonita. En el cómputo métrico se calculan los costos para una barrera con 20% escorias y otra con 40% escorias para poder realizar una comparación.

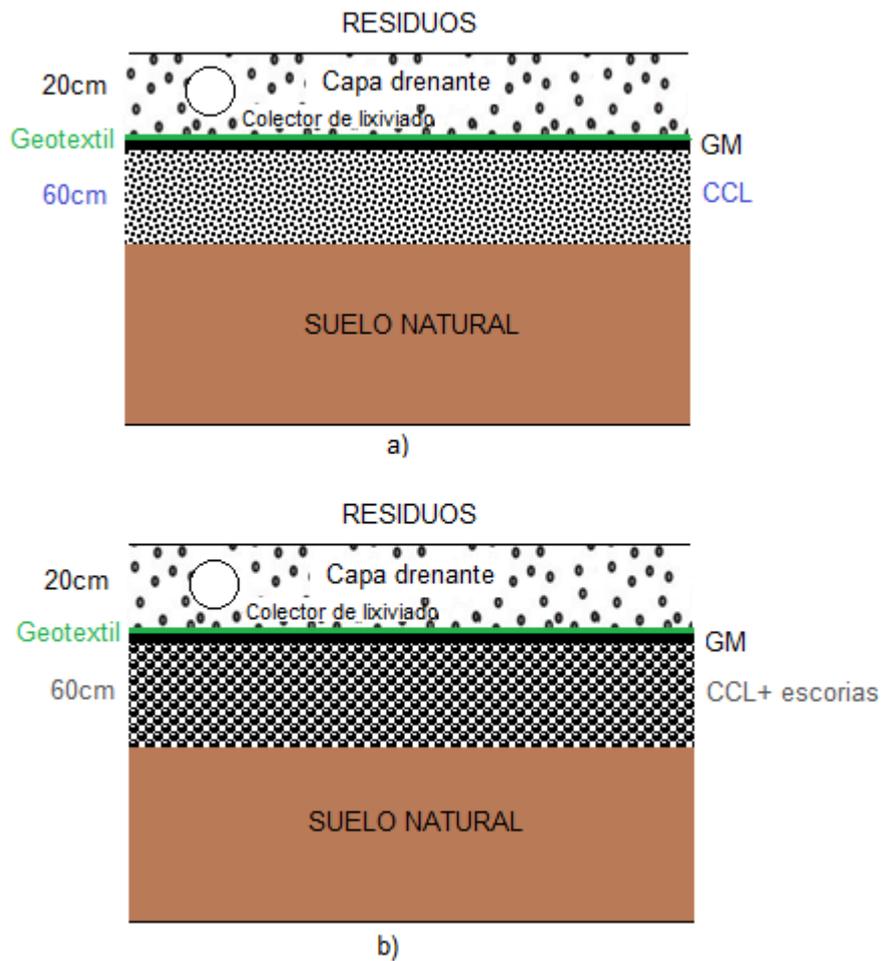


Figura 62: Tipos de barreras que se calculan en el cómputo métrico.

A continuación se presenta el cómputo métrico para los distintos tipos de barreras. Los costos unitarios se consultaron en las siguientes empresas:

- Bentonita: Bentonitas del Lago
- Geomembranas y geotextil: Coripa
- Escorias: Holcim
- Gravas: Palmar Sur
- Drenes colectores: Sanitarios Belgrano.

BARRERA TRADICIONAL						
	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT.	Costo unitario	ITEM	Costo rubro
3	IMPERMEABILIZACIÓN DE FONDOS Y TALUDES					
3.1	Impermeabilización de suelo con bentonita (60cm)	tn	5087.80	\$5070/tn	\$ 25,795,146.00	\$ 79,252,028.41
3.2	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm lisa	m2	41600.00	\$246.48/m2	\$ 10,253,568.00	
3.3	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm rugosa	m2	55455.00	\$271.13/m2	\$ 15,035,514.15	
3.4	Geotextil	m2	97055.00	\$61.61/m2	\$ 5,980,529.10	
3.5	Capa drenante (Gravas 20cm)	m2	17549.69	\$1230/m2	\$ 21,586,121.16	
3.6	Caños D:110mm espesor 5.3mm	m	2200.00	\$273.25/m	\$ 601,150.00	

BARRERA CON 20% ESCORIAS						
	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT.	Costo unitario	ITEM	Costo Rubro
3	IMPERMEABILIZACIÓN DE FONDOS Y TALUDES					
3.1	Impermeabilización de suelo con bentonita (60cm)	tn	4276.33	\$5070/tn	\$ 21,680,993.10	\$ 95,691,558.05
3.2	Agregado de escorias en la capa CCL	tn	17105.3	\$1200/tn	\$ 20,526,360.00	
3.3	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm lisa	m2	41600.00	\$246.48/m2	\$ 10,253,568.00	
3.4	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm rugosa	m2	55455.00	\$271.13/m2	\$ 15,035,514.15	
3.5	Geotextil	m2	97055.00	\$61.62/m2	\$ 5,980,529.10	
3.6	Capa drenante (Gravas 20cm)	m2	17549.69	\$1230/m2	\$ 21,586,118.70	
3.7	Caños D:110mm espesor 5.3mm	m	2300.00	\$273.25/m	\$ 628,475.00	

BARRERA CON 40% ESCORIAS						
	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT.	Costo unitario	ITEM	Costo Rubro
3	IMPERMEABILIZACIÓN DE FONDOS Y TALUDES					
3.1	Impermeabilización de suelo con bentonita (60cm)	tn	3686.5	\$5070/tn	\$ 18,690,555.00	\$ 119,214,399.95
3.2	Agregado de escorias en la capa CCL	tn	39199.7	\$1200/tn	\$ 47,039,640.00	
3.3	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm lisa	m2	41600.00	\$246.48/m2	\$ 10,253,568.00	
3.4	Impermeabilización con geomembrana HDPE 2mm rugosa	m2	55455.00	\$271.13/m2	\$ 15,035,514.15	
3.5	Geotextil	m2	97055.00	\$61.62/m2	\$ 5,980,529.10	
3.6	Capa drenante (Gravas 20cm)	m2	17549.69	\$1230/m2	\$ 21,586,118.70	
3.7	Caños D:110mm espesor 5.3mm	m	2200.00	\$273.25/m	\$ 628,475.00	

Para el cómputo se utilizó un 20% extra de escorias y bentonita para evitar falta de material por algún error de cálculo. La Tabla 36 resume los resultados del cómputo métrico e indica en qué porcentaje se incrementa el costo para cada una en relación a la barrera tradicional.

Tabla 36: Tabla resumen de los costos de la barrera.

Tipo de barrera	Costo	Aumento Porcentual
Barrera original	\$ 79,252,028.41	0%
Barrera con 20% escorias	\$ 95,691,558.05	21%
Barrera con 40% escorias	\$ 119,214,399.95	50%

El cómputo métrico de la barrera de fondo nos muestra que el agregado de un 20% de escorias siderúrgicas eleva el precio en un 21%, mientras que el 40% de escorias lo eleva en un 50%. Estos porcentajes pueden parecer significativos si se analiza sólo el costo de la barrera por separado, sin embargo, si se analiza el precio global de la obra, el porcentaje que representa el costo de la barrera es muy pequeño. Teniendo en cuenta que el costo actualizado de todo el complejo ambiental de acuerdo a lo recopilado por el representante técnico de CORMECOR oscila en \$715.200.000, el incremento en el costo de la barrera de fondo debido a las mejoras propuestas en este trabajo significan en un 5.6% de aumento para el proyecto global del complejo ambiental (Tabla 37).

Tabla 37: Porcentaje que representa el costo de las diferentes barreras frente al costo total de la obra.

Tipo de barrera	Costo	% del Costo Total	Aumento porcentual
Barrera original	\$ 79,252,028.41	11.08%	-
Barrera con 20% escorias	\$ 95,691,558.05	13.38%	2.3%
Barrera con 40% escorias	\$ 119,214,399.95	16.67%	5.6%

La alternativa óptima es la de incorporar el 40% de escorias. De esta forma, con un gasto extra del 5.6% del costo total se logra retener los metales pesados contenidos en el lixiviado por un tiempo de 200 años (dos veces el tiempo de permeado obtenido con el 20% de escorias). El gasto que implica incorporar las escorias siderúrgicas en la barrera de fondo realmente se justifica teniendo en cuenta los beneficios que garantizan las mismas sobre las aguas subterráneas.

5.6 Conclusiones

En este proyecto se plantea evaluar el potencial uso de limos loésicos para la construcción de barreras de fondo en rellenos sanitarios, mejorando las mismas mediante la incorporación de escorias siderúrgicas. De esta manera se propone reutilizar un residuo proveniente de la industria de la acería con el objeto de mejorar el comportamiento hidráulico y reactivo de las mismas. Se simuló numéricamente el transporte de contaminantes a través de una barrera de fondo de un relleno sanitario. Para ello se desarrollaron modelos numéricos unidimensionales considerando *advección y difusión con adsorción y retardo*. Las principales conclusiones obtenidas se resumen a continuación:

- El agregado de escorias siderúrgicas en las barreras de fondo permite aumentar el pH del lixiviado de aproximadamente 7 a 12 unidades de pH. Esto genera la precipitación de los metales pesados y por consiguiente, la retención de los mismos en la barrera.

- El tiempo de permeado aumenta con el porcentaje de escorias. Se genera un retardo en la aparición de la pluma contaminante, permitiendo retener los metales pesados por un tiempo de hasta 200 años (incorporando un 40% de escorias).

- Se producen mejoras en la compactación generándose un aumento en la resistencia de los suelos limosos. El mismo se debe a reacciones puzolánicas que se desarrollan dentro de la matriz de suelo por la presencia de escorias. Estas reacciones producen una reducción de vacíos, lo que genera una reducción en la conductividad hidráulica.

- Como propuestas de mejora de la barrera de fondo se propone la incorporación de un geotextil por encima de la geomembrana para protegerla de cualquier elemento punzante que pueda pincharla o dañarla permitiendo que los lixiviados se filtren. Esta práctica es fundamental, es por ello que a nivel internacional se adopta esta medida por razones técnicas sumamente justificadas. Además, se incorpora una capa

drenante de material granular donde se colocan drenes colectores de lixiviados de 110mm de diámetro y 5.3mm de espesor. Los caños deben ser lo suficientemente gruesos para evitar el pandeo que podría producirse debido a la elevada presión que soportan los mismos.

-El costo que genera el agregado de este material en las barreras puede parecer significativo si se analiza sólo el costo de la barrera por separado. Sin embargo, analizando el costo total de la obra, se determinó que el agregado de un 40% de escorias siderúrgicas genera un aumento de sólo el 5.6% del costo total. El gasto que implica incorporar este material en la barrera realmente se justifica teniendo en cuenta que se logra proteger las aguas subterráneas de la contaminación generada por los lixiviados por un tiempo muy extenso.

Teniendo en cuenta que la generación de residuos está aumentando en el tiempo se pretende resaltar la importancia de reutilizar un material que para muchas industrias es considerado un residuo. De esta forma, en este trabajo se logró encontrar una nueva aplicación para las escorias siderúrgicas, permitiendo de esta forma alargar el ciclo de vida del material y darle una utilidad más sustentable protegiendo el medioambiente.

APÉNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes minerales para cada una de las fracciones (Teruggi, 1957 y Sayago et. al 2001).....	15
Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas típicas de los limos loésicos argentinos (Francisca et al. 2002).	17
Tabla 3: Factores que afectan la conductividad hidráulica de un suelo (Montoro y Francisca, 2011).	18
Tabla 4: Resultados ensayos de conductividad hidráulica de un suelo limoso (Méndez, 2013).	19
Tabla 5: Resultados de conductividad hidráulica en muestra de lim+6% bentonita (Méndez, 2013).....	24
Tabla 6: Ecuaciones para el cálculo del flujo a través de defectos (Touze-Foltz, Giroud, 2003).	33
Tabla 7: Valores de MFs, MFPD y MFA (Material de Clases Ingeniería Ambiental III).35	
Tabla 8: Valores de los factores de reducción RFCR y RFCBD (Material de Clases Ingeniería Ambiental III).....	35
Tabla 9: Principales GCL disponibles en los Estados Unidos (EPA, 2001).	37
Tabla 10: Propiedades físicas del limo (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).....	58
Tabla 11: Mineralogía difracción por rayos X (Méndez, 2013).	58
Tabla 12: Composición química de la escoria utilizada (Glatstein, Francisca, 2015)...	60
Tabla 13: Propiedades físicas de las escorias (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).60	
Tabla 14: Propiedades del lixiviado (Francisca, Glatstein, 2010).	61
Tabla 15: Gravedad específica del agua.....	64
Tabla 16: Datos para el cálculo de gravedad específica del limo.	71
Tabla 17: Datos para el cálculo de gravedad específica de la escoria.	72
Tabla 18: Datos para el cálculo de la gravedad específica del limo+escoria.	72
Tabla 19: Resultados muestras de limo.	73
Tabla 20: Resultados muestras de escoria.	74
Tabla 21: Resultados de muestras de limo + 20% escoria.....	75
Tabla 22: Resultados de muestras gemelas.	76
Tabla 23: Resultados determinación de sales solubles.....	78
Tabla 24: Retardos generados por los materiales puros.....	84
Tabla 25: Retardos obtenidos utilizando 5% de Bentonita.	84
Tabla 26: Retardos obtenidos utilizando 10% de Bentonita.	84
Tabla 27: Resultados del factor de retardo para cada porcentaje de escorias.	85
Tabla 28: Tiempos de permeado para los diferentes porcentajes de escoria.	86
Tabla 29: Concentraciones de los metales pesados más importantes luego de 200 años.....	88
Tabla 30: Caudal que atraviesa la barrera con condiciones controladas de lixiviados.91	
Tabla 31: Caudal que atraviesa la barrera con condiciones no controladas de lixiviados.	91
Tabla 32: Superficie de los módulos.	94
Tabla 33"Volumen efectivo donde se coloca la barrera.....	94
Tabla 34: Masa total necesaria para una celda.....	95
Tabla 35: Toneladas necesarias para la construcción de una celda.	96
Tabla 36: Tabla resumen de los costos de la barrera.....	98
Tabla 37: Porcentaje que representa el costo de las diferentes barreras frente al costo total de la obra.....	99

APÉNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Problemas generados por la disposición incontrolada de residuos (http://ec.gc.ca/eauwater/3F93145A-2C1E-4D4C-A8A7-B94B59E998F2/a5f8e.gif).....	12
Figura 2: Distribución de Loess y loessoides (adaptado de Zárate, 2003).	14
Figura 3: Modos de transporte de partículas (adaptado de Sayago et al., 2001).....	14
Figura 4: Estructura del loess (a), Fotografía de con microscopio electrónico de un macroporo en la estructura del loess, (b) Fotografía de con microscopio electrónico de las partícula de arena y limo alrededor de un macroporo, (c) Esquema de la fábrica de los loess de Argentina (Rinaldi et al 2001).	16
Figura 5: Influencia de la humedad de amasado en el peso unitario seco en ensayos de conductividad hidráulica (Méndez, 2013).	18
Figura 6: Influencia del contenido de humedad de amasado en la conductividad hidráulica del limo (Méndez, 2013).	19
Figura 7: Estructura de la monmorilonita (Das, 2001).	20
Figura 8: Formación de la doble capa difusa (Material de clases Ingeniería Ambiental III).	21
Figura 9: Hidratación de los iones (Material de clases Ingeniería Ambiental III).....	21
Figura 10: Variación del peso unitario seco del limo+6% de bentonita en función de la humedad de amasado (Méndez, 2013).....	22
Figura 11: Comparación de histogramas del logaritmo de la conductividad hidráulica para el caso de los limos compactados y mezclas compactadas de limo-bentonita (Francisca, 2013).....	23
Figura 12: Influencia en el contenido de humedad de amasado en la conductividad hidráulica del limo y limo+6% de bentonita (Méndez, 2013).....	23
Figura 13: Principales capas de una barrera inferior de un relleno sanitario (Francisca, 2013).	26
Figura 14: Sistemas de barrera inferior a) Barrera simple, b) Barrera individual compuesta, c) Barrera doble (Hauser, 2009).	27
Figura 15: Geomembranas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).	28
Figura 16: Geotextiles (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).	28
Figura 17: Geomallas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).....	28
Figura 18: Geomallas (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).....	29
Figura 19: Fenómeno de hinchamiento en geocompuestos bentoníticos (Material de clases de Ingeniería Ambiental III).	30
Figura 20: Configuración general de barreras de GCL (EPA, 2001).....	30
Figura 21: Fijación de arcilla al geotextil. a) Unión con adhesivos, b) Unión con costuras, c) Unión con punzonado (EPA, 2001).....	31
Figura 22: Sistema de barrera compuesta (Material de clases Ingeniería Ambiental III).	31
Figura 23: Comparación de lixiviado recolectado debajo de barreras de suelos compactados y barreras compuestas (Melchior and Miehllich, 1994).	32
Figura 24: GCL (EPA, 2001).	36
Figura 25: Sistemas de barreras fondo Europeas y Americanas para RSU (Chai y Miura, 2002).	38
Figura 26: Sistemas de barreras fondo Japonesas para RSU (Chai y Miura, 2002)....	38
Figura 27: Proceso de advección (Sharma & Reddy, 2004).....	42
Figura 28: Proceso de difusión (Sharma & Reddy, 2004).	43

Figura 29: Trayectorias del flujo. a) Trayectorias del flujo lineales asumidas por la Ley de Darcy, b) Trayectorias reales del flujo (Hornberger et al., 1998).	43
Figura 30: Propagación de un trazador en un campo de flujo uniforme bidimensional en una arena isotrópica. (a) Alimentación continua del trazador con la condición inicial de función variable; (b) fuente puntual instantánea. (Freeze & Cherry, 1979).....	44
Figura 31: Proceso de sorción. Comparación de los tiempos t_c y t_c^* (Material de clases Ingeniería Ambiental III).....	46
Figura 32: Proceso de sorción. Comparación de las distancias AB y AC (Material de clases Ingeniería Ambiental III).....	46
Figura 33: Tipos de isotermas (Sharma & Reddy, 2004).....	47
Figura 34: Direcciones del transporte de contaminantes (Material de clases Ingeniería Ambiental III).	50
Figura 35: Dispersión longitudinal de un trazador que pasa a través de una columna de medio poroso (Freeze & Cherry, 1979).....	50
Figura 36: Contribución de la difusión molecular y la dispersión mecánica a la distribución de un frente de concentración en una columna con una entrada de función variable (Freeze & Cherry, 1979).....	51
Figura 37: Imagen SEM de Limo (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).	58
Figura 38: Distribución granulométrica del limo (Méndez, 2013).	59
Figura 39: Imagen SEM de la escoria (Glatstein, Francisca, Tembrás, 2018).	60
Figura 40: Ensayo de conductividad hidráulica. a) Muestra escoria, b) Muestra limo + 20% escoria.....	66
Figura 41: Relación entre la conductividad hidráulica y el peso unitario seco de muestras de limo, escoria y una mezcla de los mismos.	76
Figura 42: Variación de la conductividad hidráulica con el tiempo.....	77
Figura 43: Variación del pH con el tiempo (Probeta 1).	77
Figura 44: Variación del pH con el tiempo (Probeta 2).	78
Figura 45: Disminución del porcentaje de sales mediante diluciones.....	79
Figura 46: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de escorias.	79
Figura 47: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de arena fina.....	80
Figura 48: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de limo.	80
Figura 49: Variación del pH del lixiviado mediante el agregado de bentonita.	81
Figura 50: Variación del tiempo de permeado con el espesor de la barrera. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$, $R=1$	82
Figura 51: Variación del pH y la concentración con el espesor de la barrera. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $H_w=0,3$ m, $DL=2,9 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$, $CNA_{escoria}=100 \text{gH}^+/\text{kg}$ y $pH_p=8$. (Glatstein, 2014).	82
Figura 52: Variación del tiempo de permeado con la altura de lixiviado; a) $H_w=0.3$ m, b) $H_w=0.6$ m. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0,9$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$	83
Figura 53: Variación de la conductividad hidráulica con el porcentaje de bentonita.	84
Figura 54: Variación del factor de retardo R con el porcentaje de escorias.....	85
Figura 55: Variación del factor de retardo R con el porcentaje de escorias. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0,9$ m, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$	86
Figura 56: Tiempo de remediación obtenido para cada % de escorias.	87
Figura 57: Concentración de metales en función del tiempo. Se asume $k=1 \times 10^{-9}$ m/s, $L=0,9$ m, $H_w=0,3$ m, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0,4$	88
Figura 58: Imagen ilustrativa del predio.	90

Figura 59: Concentración a la salida de la barrera para el caso CORMECOR variando la altura de lixiviado. Se asume $k=2 \times 10^{-11} \text{m/s}$, $L=0,6 \text{m}$, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $R=41.5$, $n=0.4$	92
Figura 60: Concentración de los metales pesados en función del tiempo de permeado para retardos de 21.5 y 41.5. Se asume $k=2 \times 10^{-11} \text{m/s}$, $L=0,6 \text{m}$, $DL=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, $n=0.4$, $H_w=0.3 \text{m}$	93
Figura 61: Dimensiones de los módulos.	94
Figura 62: Tipos de barreras que se calculan en el cómputo métrico.....	97

REFERENCIAS

Agencia Córdoba Ambiente (2001). "Diagnóstico Provincial de los Sistemas de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos". Gobierno de la Provincia de Córdoba.

Agencia Córdoba Ambiente (2001). "Términos de referencia para las instalaciones para el destino final de residuos domiciliarios o asimilables". Gobierno de la Provincia de Córdoba.

Das Braja M. (2001). "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica". Pp 3-6.

Chai, J. C. y Miura, N. (2002). "Comparing the performance of landfill Liner systems" Journal Mater Cycles Waste Manag. Vol. 4. pp. 135 – 142.

Code of Federal Regulations (1991), "Title 40 CFR". Part 258. United States.

Francisca F.M. (2013). "Flujo y transporte de contaminantes a través de barreras de Limos Pampeanos compactados". Anales de la Academia Nacional de Ingeniería de la República Argentina, ISSN 1850-5473, Tomo IX., pp. 129-150.

Francisca F.M., Glatstein D.A. (2010). Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. Appl.Clay Sci. 49,187.

Francisca F.M., Glatstein D.A., Nieva, P.M. (2009). "Conductividad hidráulica de limos compactados y estabilizados con bentonita y zeolita". III Congreso Interamericano de Residuos Sólidos de Aidis. Pp 4.

Francisca F.M., Glatstein D.A. (2015): Influence of pH on cadmium, copper, and lead removal from wastewater by steel slag, Desalination and Water Treatment.

Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, Capítulo 9.

Glatstein D.A. (2014). "Comportamiento de materiales reactivos en barreras permeables para la retención de contaminantes". Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba.

Glatstein D.A., Francisca F.M. y Tembrás, C. (2018). "Reutilización de escorias siderúrgicas en barreras reactivas para la retención de contaminantes". Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica – Salta/Argentina.

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Sistemas de Información, Clima y Agua. Estadísticas de Precipitaciones (Serie 1960-2011).

Méndez, P. (2013) "Aptitud de Limos Pampeanos y Arenas mejorados con bentonita para su aplicación en barreras de cobertura en Rellenos Sanitarios". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba.

Mozejco C.A., Francisca F.M. (2018). "Caracterización mecánica de los suelos loésicos de Córdoba estabilizados con escorias siderúrgicas". Pp 7.

Sharma H.D. y Reddy K.R. (2004). *Geoenviromental Engineering: Site remediation, waste containment and Emerging Waste Management Technologies*.

Rocca, R. J.; Redolfi, E. R. y Terzariol, R. E. (2006). "Características Geotécnicas de los Loess de Argentina". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2). Pp. 149 – 166.

Rowe, R.K. "Short- and long-term leakage through composite liners". (2012). The 7th Arthur Casagrande Lecture.

Touze-Foltz N. and Giroud. J.P. "Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects". *Geosynthetics International*, 2003, 10, No. 6. Pp 216-218.

United States Environmental Protection Agency, EPA530-F-97-002 (2001). "Geosynthetic Clay Liners Used in Municipal Solid Waste Landfills".

USEPA (U.S. Enviromental Protection Agency). *Transport and Fate of Contaminants in the Surface* EPA/625/4-89/019, USEPA, Washington, DC, 1989.