

MEMORIAS DE CÁLCULO

- CÁLCULO ESPESOR GEOMEMBRANA
- CÁLCULO ESPESOR GEOTEXTIL
- CÁLCULO GENERACION DE LIXIVIADOS
- VOLUMENES CORTE Y RELLENO



Proyecto:

**AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA CELDA 2 DEL RELLENO
SANITARIO METROPOLITANO DE CHIHUAHUA**

CÁLCULO DE ESPESOR DE GEOMEMBRANA

Aspectos Generales

El crecimiento de la generación de residuos sólidos ha provocado una serie de Impactos socioeconómicos, ambientales y sanitarios adversos. Por ventajas económicas, el método de relleno sanitario es ampliamente aceptado como un tratamiento adecuado de residuos sólidos. Además de sus ventajas económicas, los rellenos minimizan afectaciones al medio ambiente y otros inconvenientes, y permite que los desechos se degraden condiciones controladas hasta su eventual transformación en material relativamente inerte y estabilizado.

La utilización de revestimientos sintéticos (geomembrana) para cubrir la base y los taludes de las trincheras y celdas en las cuales se disponen los residuos en los rellenos sanitarios en los últimos años, ha ido en aumento en nuestro país. Esto se debe principalmente a su disponibilidad y diversidad se han incrementado y que los costos de suministro e instalación se han reducido, de tal forma que representan una opción competitiva en términos económicos, sin reducir el nivel de seguridad en cuanto al grado de impermeabilización.

Las geomembranas son un tipo de material geosintético impermeables, utilizado ampliamente como sistema de revestimiento en rellenos sanitarios a nivel mundial, principalmente en Estados Unidos. Actualmente existen varios tipos de plásticos que se emplean para el mismo fin, incluyendo el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno de alta densidad (HDPE), el cual es el material preferido para ser empleado en diversas etapas del manejo integral de residuos, incluyendo la disposición final.

Las propiedades de la geomembrana deben conocerse para seleccionar el nivel máximo de resistencia a la tracción requerido, cuando se emplea como revestimiento en la base de una celda. Por otro lado, uno de los parámetros de los materiales de la geomembrana es la durabilidad, que es una función de su espesor. De hecho, la resistencia y la durabilidad dependen del espesor.

El espesor mínimo requerido de las geomembranas depende del uso y de las regulaciones locales asociadas en cada país, sin embargo, suele estar relacionado en el ámbito práctico, con la búsqueda de una vida útil más larga implícita y la selección o determinación del mismo, se encuentra en función de las características de sitio específico de colocación.

El espesor o grosor es una propiedad básica de las geomembranas que se emplea generalmente para su identificación y clasificación, así como en las todas las fases de

producción y vida útil, fabricación y diseño. También las propiedades mecánicas y resistencia a la transmisión de fluidos con que se fabrican las geomembranas, son afectadas por el espesor.

Para la determinación del espesor de una geomembrana; se requiere calcular los valores numéricos de varias propiedades, tales como la resistencia a la tracción y el ángulo de fricción de la interfaz entre este material y el suelo que cubre.

La capacidad de resistencia a la tracción de una geomembrana es un valor significativo, que sirve para determinar la estabilidad de un sistema de revestimiento en un relleno sanitario, lo anterior debido a que el revestimiento podría romperse como resultado de la existencia de tensiones de tracción resultantes del peso de los residuos sobre la citada geomembrana. La resistencia y durabilidad a largo plazo de una geomembrana en términos de impermeabilidad y resistencia química a los lixiviados también es una función de la tensión de tracción y del espesor.

Por lo tanto, es importante evaluar la tensión y la tracción en una geomembrana, inducida por el peso de los diversos materiales que se depositan encima de ella. A la fecha se han llevado a cabo un número significativo de investigaciones relacionadas con la caracterización de geomembranas, la mayoría enfocados en la determinación de los ángulos de fricción.

Por ejemplo, existen investigaciones relacionadas con el comportamiento de las geomembranas y otros componentes sintéticos de revestimiento en rellenos sanitarios, con la resistencia al corte. Los resultados obtenidos indican que dicha resistencia se ve reforzada modificando la textura de la superficie de la geomembrana. Por tanto, en la selección de un tipo de recubrimiento sintético es importante evaluar la tensión en la geomembrana, inducida por el arrastre hacia abajo de la cubierta debido a las fuerzas de fricción en los materiales que las componen.

Por otro lado, existe un nuevo método analítico que considera el tipo de desplazamiento o deformación esperada en un revestimiento de un relleno sanitario, para la estimación de la tensión en dichos materiales.

En el mercado actual, incluso mexicano, las geomembranas se fabrican con espesores que van de 1 mm a 3 mm. La selección óptima del grosor de un recubrimiento sintético para el fondo y taludes de celdas en relleno sanitarios, significa la determinación del intervalo de espesor, que permita obtener un resultado excelente de dicho material respecto de un peso mínimo y con resistencias (tensión) acorde al esfuerzo que será sometido.

En los rellenos sanitarios modernos, un sistema de revestimiento sintético o natural, es un componente obligatorio. En general, un sistema de revestimiento se compone de capas de barrera impermeabilizante (naturales o sintéticas), material de drenaje y cubierta que cumplen el propósito de separar los residuos dispuestos y/o lixiviados, del suelo subyacente y por ende, de las aguas subterráneas, evitando su contaminación.



La geometría de un relleno sanitario que incluye el área de tierra disponible; la profundidad máxima de las celdas y trincheras y el ángulo de inclinación con que se construyen, además del volumen de residuos sólidos, se consideran parámetros importantes en el diseño del revestimiento de dichas áreas de disposición de residuos. Todos éstos son factores que influyen en la determinación y selección del tipo de revestimiento sintético que será empleado en un relleno sanitario, principalmente en cuanto a su espesor.

El objetivo principal del presente análisis es determinar el espesor apropiado de la geomembrana que debe emplearse, respecto de las condiciones del sitio de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua empleando los resultados y análisis estadísticos y analíticos del estudio denominado Experimental Analytical Simulation Method In Landfill Geomembrane Liner Design (Shakeri, et al 2012).

Fundamentos y Simulaciones Teóricas (Método Analítico)

Las geomembranas en pendientes experimentan tensión cuando las fuerzas de fricción sobre ellas están desequilibradas. El espesor de la geomembrana está relacionado con la presión ejercida sobre ella. Los materiales de desecho, que se colocan en las laderas de los rellenos sanitarios, tienden a deslizarse hacia abajo debido al peso. La tensión (T) en geomembrana es una función del peso de los residuos sobre la geomembrana (W), los ángulos de fricción de la interfaz superior e inferior que se mueven (δu , δi) entre la capa de suelo y la geomembrana y también el ángulo de inclinación (β); como se muestra en la siguiente ecuación.

$$T = f(W, \delta u, \delta i, \beta) \dots \dots \dots (1)$$

La tensión en una geomembrana se calcula a través de la ecuación siguiente:

$$T = \sigma_{all} \times t \dots \dots \dots (2)$$

Donde T es la tensión presente en la geomembrana y β es el ángulo de la pendiente de los taludes recubiertos con geomembrana en el relleno sanitario. El valor de σ_{all} está determinado por la prueba de tracción. La tensión se resuelve en los componentes horizontales, que deben ser resistidos por las fuerzas de corte. Además, la componente vertical que se supone que se disipa a lo largo de la distancia de movilización X, debe agregarse a la tensión normal impuesta por los residuos sólidos dispuestos (y el suelo, si corresponde). Estas relaciones se muestran en la ecuación siguiente.

$$T \cos \beta = F \delta u + F \delta i + F \delta T \dots \dots \dots (3)$$

Donde $F_{\delta u}$ y $F_{\delta l}$ son fuerzas de fricción entre la capa superior y la capa inferior con la geomembrana y el suelo respectivamente, y $F_{\delta T}$ es la tensión normal impuesta por el ángulo de fricción de los residuos sólidos dispuestos (capa superior).

Tomando como base lo anterior, T puede simplificarse de la siguiente forma.

$$T = \frac{\sigma_n \times (\tan \delta_u + \tan \delta_l)}{\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_l} \dots\dots (4)$$

Considerando las ecuaciones (2) y (4) es posible obtener la fórmula general que se utiliza para calcular el espesor del revestimiento sintético o geomembrana en un relleno sanitario y que se muestra en la ecuación siguiente:

$$t = \frac{\sigma_n \times (\tan \delta_u + \tan \delta_l)}{\sigma_{\text{all}} (\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_l)} \dots\dots\dots (5)$$

Como parte del Experimental Analytical Simulation Method in Landfill Geomembrane Liner Design (Shakeri, et al 2012), se emplearon dos softwares, el ANSYS v. 11 para resolver las ecuaciones (4) y (5), obteniendo valores de magnitud para la tensión y el espesor de la geomembrana, y el MATHCAD v. 15 para analizar el comportamiento del revestimiento de la base y taludes en un relleno sanitario, bajo condiciones geométricas determinadas.

Como se ha citado, las ecuaciones teóricas (4 y 5) se utilizaron para calcular el grosor del revestimiento del relleno sanitario. Los valores óptimos de espesor se utilizaron para desarrollar la geometría del relleno en la versión 11 de ANSYS y las propiedades mecánicas de los materiales asignados al material del revestimiento. Además, se aplicaron condiciones de frontera simétricas a lo largo de los bordes del revestimiento, a través del sistema de coordenadas en tres direcciones (es decir, X, Y, Z). Los modelos simétricos ofrecieron una mejora impresionante en el tiempo de ejecución del cálculo con el software ANSYS y también en una escala de condición real en el revestimiento de rellenos. Finalmente, se aplicaron las fuerzas ejercidas (es decir, la fuerza normal y la fuerza de fricción debidas al peso de los residuos y la fricción entre el revestimiento y el suelo).

Considerando diversas combinaciones geométricas para un relleno sanitario al resolver la ecuación (5) con el software MATHCAD v.15, se obtuvieron 289 resultados de espesor de geomembrana. Dichos resultados fueron filtrados imponiendo restricciones simples como: grosor mínimo en el intervalo común entre 1 mm y 3 mm (espesores disponibles en el mercado), un mayor ángulo de inclinación con un ángulo de pendiente limitado y también una mayor cantidad de desechos sólidos para tener más capacidad de relleno sanitario.

Los resultados obtenidos indican que pequeñas variaciones en los valores de tensión y el ángulo de fricción, provocados por cambios en el peso y altura de los residuos dispuestos y el ángulo en el talud de las celdas, afectan de manera importante al espesor, resultando valores en un rango muy amplio y fuera de los materiales disponibles en el mercado.

Para resolver lo anterior, se empleó un modelo de regresión lineal múltiple entre el espesor (t) y las otras variables que lo afectan (altura de residuos (H), longitud de geomembrana sobre el borde de talud (x) y el ángulo o inclinación del talud (β)). El cálculo fue desarrollado empleando el software Stat Graphic v. 15, teniendo como resultado la ecuación (6), que incluye la implementación de constantes de correlación y se aplica bajo las condiciones expuestas en la tabla posterior, ajustadas a los espesores de materiales de geomembrana de HDPE disponibles en el mercado.

$$t = -3.12791 + 0.0092044x + 0.0328967\beta + 0.0903692H \dots \dots \dots (6)$$

VALOR DE t	RECOMENDACIÓN
Si $t < 0$ (cualquier valor negativo)	No es necesario el empleo de geomembrana*
$0 < t < 2$	Emplear geomembrana de 1 mm
$t > 2$	Emplear geomembrana de 3 mm

*En este caso puede optarse por emplear revestimiento de 1 mm, si las condiciones de permeabilidad del terreno y la profundidad del nivel de aguas subterráneas lo requieren. Debe recordarse que la recomendación sólo obedece a las condiciones mecánicas y geométricas del relleno sanitario en análisis.

Cálculo del Espesor de Geomembrana de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua

Para el cálculo del espesor recomendado de geomembrana para ser utilizado como parte del arreglo de impermeabilización de la base y taludes de la Ampl. de la Celda 2 del RSM de Chihuahua, se empleará la ecuación siguiente:

$$t = -3.12791 + 0.0092044x + 0.0328967\beta + 0.0903692H \dots \dots \dots (6)$$

Donde t: Espesor de Geomembrana,
 x: Longitud de Geomembrana sobre el borde de talud
 β : Ángulo o inclinación del talud
 H: Altura de los residuos por disponer

Los valores de diseño de la Ampl. de la Celda 2 del RSM de Chihuahua son:

x: 00.60 m
 β : 27.0 °

H: 1443-1417= 26.00 m

Sustituyendo valores:

$$t = -3.12791 + 0.0092044 (0.6) + 0.0328967 (27.0) + 0.0903692 (26)$$

$$t = -3.12791 + 0.00552264 + 0.8882109 + 2.3496$$

$$t = -3.12791 + 3.24333355$$

$$t = 0.11542355 \text{ (Valor Menor a 1)}$$

NO REQUIERE GEOMEMBRANA O PUEDE EMPLEARSE UNA GEOMEMBRANA DE 1 MM DE ESPESOR.



Proyecto:

**AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA CELDA 2 DEL RELLENO
SANITARIO METROPOLITANO DE CHIHUAHUA**

CÁLCULO DE GRAMAJE DE GEOTEXTIL

Generalidades

Los geotextiles se pueden definir como un material textil plano, permeable y polimérico, que se emplea en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. Los polímeros utilizados en la fabricación de geotextiles suelen ser de origen sintético debido a su mayor durabilidad frente a los naturales. Los principales son las poliamidas, poliésteres y las poliolefinas (polietileno y polipropileno).

Las primeras referencias de la utilización moderna de geotextiles datan de los años 60 y se refieren a la construcción de obras marítimas en Holanda. Comenzaron a emplearse en funciones de drenaje y filtración. A partir de ese momento, la tecnología de diseño y aplicación se va desarrollando tanto en Europa como en Estados Unidos y se consiguen nuevas funciones para otros campos de la obra civil, como son el refuerzo y separación del terreno

Un momento clave en la historia de estos materiales fue la aparición de la palabra "geotextil" en el año 1977. En un Simposio Internacional sobre el empleo de textiles en la Geotecnia celebrado en París, J.P. Giroud bautizó a estos productos con ese nombre. A partir de entonces, se organizan conferencias y congresos para avanzar en el desarrollo tecnológico y la normativa a aplicar sobre estos materiales.

Los geotextiles se caracterizan por desarrollar varias funciones simultáneas una vez colocados en el terreno. Esta propiedad les garantiza una posición ventajosa frente a otros sistemas o productos que existen en el mercado:

- Filtración: El geotextil retiene las partículas de grano fino al fluir el agua de la capa de grano fino a la capa de grano grueso.
- Separación: Separa dos capas de suelo de diferentes propiedades físicas (granulometría, plasticidad, consistencia) y así evita la mezcla de materiales.
- Drenaje: El geotextil conduce y evacua líquidos (agua) e incluso gases en su mismo plano.
- Refuerzo: Aumenta la capacidad portante (resistencia al corte) del suelo y la estabilidad en la construcción.
- Protección: El geotextil protege a membranas y otros productos relacionados contra ataques físicos (perforaciones y desgaste).

Además de estas funciones, los geotextiles presentan una serie de ventajas que son la causa del espectacular aumento del empleo de estos productos en todo el mundo a lo largo de los últimos 15 años; entre las más importantes destacan:



114

1



- Facilidad de puesta en obra.
- Son económicos.
- Permiten ahorros de tiempos de ejecución.
- Posibilitan soluciones medioambientales correctas.
- Ofrecen muchas variantes y posibilidades de uso.

Clasificación de los Geotextiles

Existen varias formas de clasificar los geotextiles y productos relacionados con geotextiles, pero la que más define su tipo de aplicación es el método de fabricación utilizado.

Existen principalmente dos tipos de geotextiles dependiendo de los métodos más comunes de fabricación que son:

1. Geotextiles Tejidos

Son aquellos formados por cintas de alta resistencia. Están conformados mediante cintas de polipropileno en sentido de urdimbre (sentido longitudinal) y de trama (sentido transversal). Es el tejido más simple y eficiente, conocido también como uno arriba y uno abajo, dando como resultado una estructura plana.



Su resistencia a la tracción es de tipo biaxial (en los dos sentidos de su fabricación). Gracias a su estructura y las características de las cintas empleadas, son reconocidos por tener altas resistencias y bajas deformaciones; su aplicación está orientada al refuerzo de vías, muros, terraplenes y cimentaciones.

Sus funciones principales son de separación, refuerzo y estabilización.

2. Geotextiles No Tejidos



Se forman a partir de un entrelazado de fibras o filamentos de polipropileno mezclados aleatoriamente, conformando una capa con altas propiedades de filtración y drenaje.



Los Geotextiles fabricados por este proceso tienen buenas características mecánicas e hidráulicas, gracias a su estructura tridimensional, gran elongación (pueden estirarse desde un 40% hasta un 120% o más, antes de entrar en carga de rotura) lo que les proporciona muy buena adaptabilidad a las discontinuidades de los terrenos, unas excelentes propiedades para protección, (suele denominarse efecto colchón) así como buenas funciones de filtración y separación.

Funciones:

- Filtración.
- Drenaje.
- Protección.
- Separación.
- Estabilización y Repavimentación.

Funciones Principales de los Geotextiles

1. Separación.

El término "separación" se define de la siguiente forma: "Impedir que suelos de diferentes tipos y/o materiales de terraplenado se mezclen gracias a la interposición de un geotextil o un producto de naturaleza similar".

Los principales campos de aplicación de un geotextil utilizado como separador se concentran en los proyectos de construcción de carreteras y de vías férreas. La utilización de un geotextil preserva y mejora la integridad y el aspecto funcional de los distintos materiales utilizados. De hecho, cuando se coloca una cimentación de material granular sobre un suelo blando y se aplica una carga vertical, intervienen dos mecanismos.

116

3

En primer lugar, el geotextil impide la pérdida de material en el suelo blando de la plataforma (Figura 1). Un refrán característico de los ingenieros describe muy bien este riesgo: "10 kilos de piedras colocados sobre 10 kilos de barro, al final terminan siendo 20 kilos de barro". El geotextil permite encerrar la cimentación de material granular y obtener de este modo un mayor grado de compactación, que se traduce en una mayor capacidad de carga.

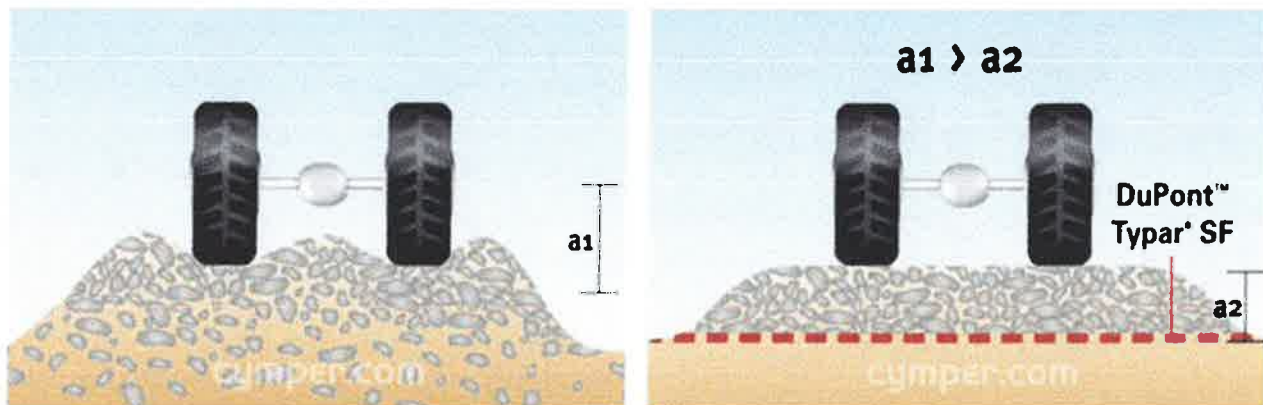


Fig. 1. Sin geotextil (izquierda): Pérdida de material granular en suelo blando de plataforma. Con geotextil (derecha): Sin pérdida de material granular y mayor compactación.

Por otra parte, impide que la cimentación de material granular resulte contaminada por el suelo de la plataforma, evitando que se reduzca la capacidad de carga. La migración de partículas finas del suelo hacia los fragmentos limpios se produce especialmente por el efecto de fuerzas dinámicas. Este fenómeno se denomina "efecto de bombeo". Las partículas finas actúan como un lubricante entre los fragmentos de mayor tamaño y podrían reducir notablemente la resistencia a la cizalladura de éstos.

Del mismo modo, los fragmentos no contaminados seguirán ejerciendo con eficacia su función de drenaje y mantendrán una mayor resistencia a los efectos de la expansión como consecuencia de las heladas.

En su función de separador, un geotextil puede:

- Impedir la reducción de la capacidad de carga, causada por la mezcla de granos finos de la infraestructura con el basamento de fragmentos granulares de mayor tamaño.
- Aumentar la capacidad de carga impidiendo la pérdida de fragmentos granulares en el interior de la infraestructura lodosa mullida y aumentando el grado de compactabilidad.
- Reducir los efectos de la expansión como consecuencia de las heladas, que deteriora las carreteras.
- Evitar tener que excavar en suelos lodosos.
- Permitir conservar la capacidad de drenaje del basamento de fragmentos granulares.

- Impedir la migración de partículas finas, especialmente por el efecto de las cargas dinámicas.

2. Estabilización y refuerzo

Son muchas las aplicaciones en las que los geotextiles desempeñan una función de estabilización o de refuerzo. Los geotextiles, que ejercen una función de estabilización, aportan al suelo cualidades de resistencia a la tracción. De esta forma, solucionan la ausencia de resistencia a la tracción en el suelo, cuando éste se ve sometido a cargas verticales.

Existen tres mecanismos distintos que permiten a un geotextil estabilizar el basamento de materiales granulares y mejorar su resistencia a la deformación permanente por el efecto de cargas repetitivas (como se muestra en la figura 2 siguiente):

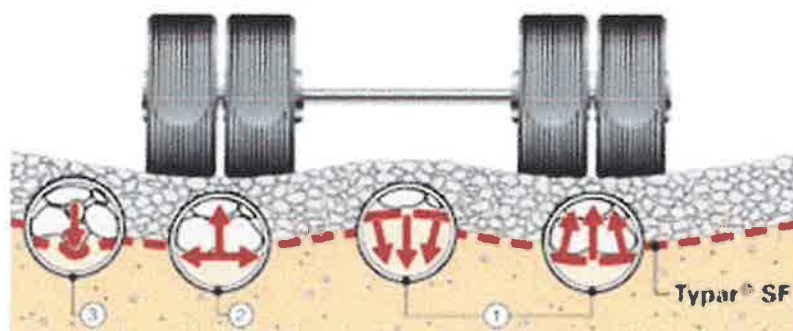


Fig. 2. Mecanismos de Estabilización. 1. Retención; 2. Contención Membrana Local; 3. Efecto de Refuerzo

Cuanto más alto sea el módulo inicial del geotextil, más eficaces resultarán estos mecanismos. Los geotextiles con un módulo inicial bajo presentan importantes deformaciones y se caracterizan por una retención, un efecto de membrana o un refuerzo local escaso. Factores muy a tener en cuenta, como un módulo inicial alto y una elongación notable les permiten resistir a deformaciones locales, así como a la perforación.

- **Retención y contención**

Como se muestra en la ilustración de la Figura 2, existen dos tipos de capacidad de retención. La primera se refiere a la curvatura inversa del geotextil en cada lado de paso de las ruedas, que ejercen una presión hacia abajo. El paso de las ruedas provoca una sobrecarga que aplana las deformaciones y aplica una fuerza de compresión sobre el subsuelo. Lo mismo sucede en rellenos sanitarios en donde el carácter heterogéneo de los residuos, ejerce una carga no homogénea.

La segunda forma de retención es la que ofrece el geotextil cuando las partículas del materia granular se dispersan por los efectos de la carga. El geotextil proporciona un armazón de tracción a la capa de éste material. Esta contención aumenta la resistencia

[Firma]

118

5

[Firma]

y el módulo, lo que a su vez hace que se reduzca la fuerza de compresión sobre la infraestructura, distribuyendo mejor la carga bajo la presión, ya sea de las ruedas o de los vectores de carga en un relleno sanitario.

- **Efecto de membrana**

El efecto de membrana actúa de manera eficaz cuando se coloca un geotextil sobre un suelo deformable y se aplican cargas verticales. El esfuerzo de tracción en el suelo se transmite al geotextil, aliviando las cargas sobre el subsuelo, que es incapaz de absorber dicho esfuerzo. Esta fuerza sobre el plano se equilibra con la componente horizontal de la carga proveniente de la difusión de las cargas verticales aplicadas.

Por consiguiente, este efecto tiene una importancia fundamental en la construcción de carreteras provisionales o celdas de confinamiento de residuos, sin preparación de la base, ya que permite reducir la formación de roderas de forma considerable u hondonadas de carga. Cuanto más alto sea el módulo inicial del geotextil, mayor será la posibilidad de reducir la formación de roderas u hondonadas.

- **Refuerzo local**

Las cargas que se ejercen sobre las piedras consideradas por separado pueden ser las causantes de los fallos localizados en la infraestructura. Todo geotextil caracterizado por un módulo inicial elevado permite distribuir la carga, reducir la tensión y ejercer una fuerza de resistencia al desplazamiento.

Una capacidad de alargamiento considerable evita la perforación del geotextil a nivel local, puesto que le permite extenderse alrededor de una piedra susceptible de poder penetrarlo.

3. Filtración

El término "filtración" se define de la siguiente forma: soporte del suelo o de otras partículas sujeto/as a fuerzas hidráulicas al tiempo que permite el paso de líquidos a través o en un geotextil o un producto asemejado a los geotextiles.

Por lo general, el tamaño de las aberturas y la permeabilidad permiten describir las propiedades de filtración del geotextil. Por este motivo, el tamaño de los poros de un geotextil eficaz ha de ser suficientemente pequeño como para retener las partículas de suelo más grandes, a fin de impedir el fenómeno de erosión. Las partículas de suelo pequeñas son las primeras que deben atravesar el geotextil. Tras la evacuación de éstas últimas, las partículas más grandes se acumulan contra el geotextil, formando de este modo un filtro natural graduado que reduce progresivamente la erosión interna hasta la desaparición de la misma. Si el tamaño de los poros de un geotextil es demasiado pequeño, las partículas pequeñas no se pueden expulsar, ocasionando así la formación de una barrera de suelo natural caracterizada por una escasa permeabilidad (Figura 3).

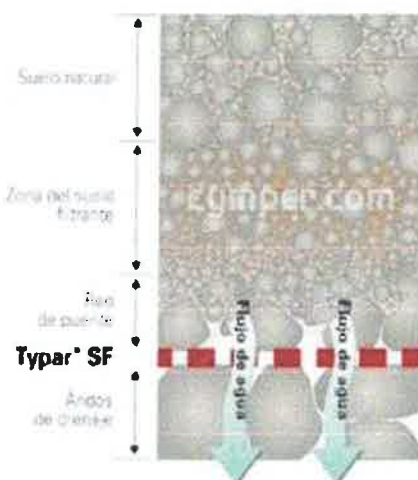


Fig. 3. Formación de Filtro Natural de Suelo por encima del Geotextil debido a baja porosidad de éste.

Un filtro geotextil eficaz debe tener poros con formas y tamaños diferentes, caracterizados por un reparto similar a la distribución granulométrica del suelo.

A menudo se pasa por alto que en un sistema de cimentación sobre terreno granular (Figura 4), la permeabilidad de la capa menos permeable, determina la permeabilidad de todo el sistema. Normalmente, el suelo presenta una permeabilidad significativamente menor que la del geotextil.

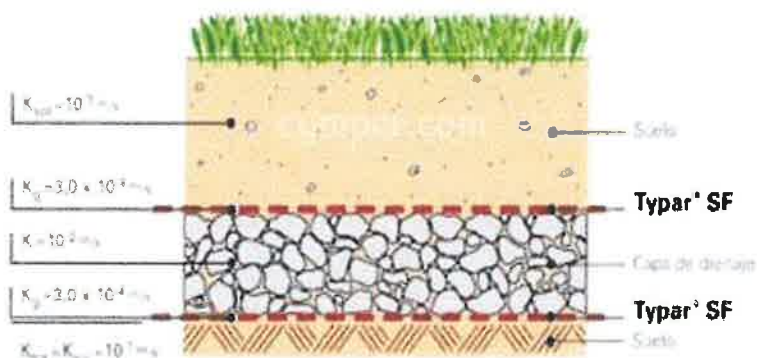


Fig. 4. Sistema de drenaje, suelo y geotextil con diferentes permeabilidades.

En la permeabilidad de un geotextil también influye su capacidad de compresión. Por lo general, los geotextiles espesos están sometidos a una compresión que ha de tenerse en cuenta a la hora de especificar la permeabilidad que se exige de ellos. En estos casos el espesor constituye más una propiedad descriptiva que de diseño.

La función de filtración está asociada a la construcción de presas, a la lucha contra la erosión, al drenaje de carreteras y del subsuelo. En este tipo de construcciones, el geotextil sustituye a un filtro convencional de lechos granulares. En los rellenos sanitarios

pr

[Firma]

ésta característica es deseable, pues al margen de proteger a la geomembrana, evita la erosión del material granular y permite la filtración y paso de los lixiviados.

En un sistema de lucha contra la erosión en una ribera o en una pendiente de tierra, se utilizan habitualmente materiales de gran volumen (gaviones/escolleras) o losas de hormigón a modo de protección contra el flujo de agua o la acción de las olas. La erosión de las partículas pequeñas se impide gracias a la utilización de un geotextil como filtro.

4. Drenaje

Antiguamente, el flujo de aguas se controlaba de forma tradicional y éstas se evacuaban por medio de materiales naturales calibrados. En los últimos 30 años, se ha extendido el uso de los filtros geotextiles para aumentar la capacidad de drenaje natural de los suelos impermeables o bien a través del uso de revestimientos sintéticos por medio de geomembranas.

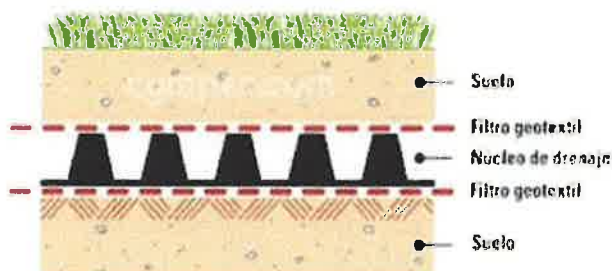


Fig. 5. Elemento compuesto de drenaje.

Un geotextil no se debe utilizar como capa de drenaje directo, ya que aunque su capacidad de drenaje se pueda medir en laboratorio con agua limpia, en condiciones reales, en un lugar determinado, (retención de suelo en el interior de la estructura), la capacidad de drenaje resulta imprevisible. También es importante que los sistemas de drenaje puedan mantener una capacidad drenante adecuada para que resulten eficaces a largo plazo, incluso cuando se encuentren sometidos a una intensa presión por parte del terreno. Para evitar la colmatación y la contaminación de la capa drenante, se debe incorporar siempre un filtro en el sistema de drenaje. Los sistemas de drenaje artificiales que incluyen un filtro geotextil han demostrado su eficacia como solución alternativa más económica que los sistemas de drenaje de arena, los pozos filtrantes y otros sistemas tradicionales.

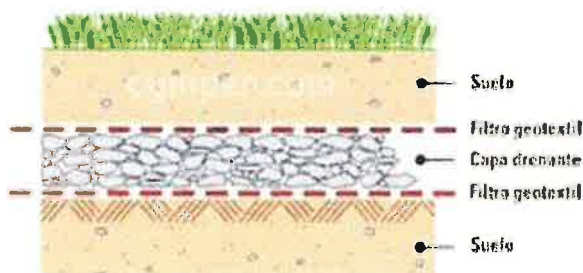


Fig. 6. Capa convencional de drenaje con material granular.

Habitualmente, las capas de drenaje o drenajes geosintéticos se elaboran a partir de un núcleo revestido con filtros geotextiles. Es imprescindible que el material filtrante presente una calidad y unas propiedades físicas constantes, una resistencia y una durabilidad excepcionales, una resistencia satisfactoria a las tensiones ejercidas durante la instalación y un rendimiento de filtración óptimo a largo plazo. El funcionamiento incorrecto o los fallos prematuros de un sistema de drenaje pueden ocasionar en la estructura en cuestión problemas funcionales y de seguridad. En el mejor de los casos, un fallo de drenaje originará reparaciones costosas y molestias derivadas. Por ello, es esencial utilizar un material de filtración que pueda funcionar con eficacia a largo plazo, incluso en las condiciones de terreno más difíciles.

6. Protección

El término "protección" se define de la siguiente forma: "Función consistente en impedir o limitar los daños localizados que afectan a un elemento o a un material determinado empleando un geotextil o un producto que se asemeje a los geotextiles"

Por lo general, los geotextiles se emplean para la protección de las geomembranas en las descargas, para la colocación de tejados, en depósitos y en los proyectos hidráulicos, así como en celdas y taludes de rellenos sanitarios.

Las propiedades más importantes de un geotextil con respecto a su función de protección son la resistencia a la perforación y la uniformidad del producto (es decir, la ausencia de puntos débiles). Además, las pruebas de resistencia a la perforación mediante clavos han demostrado que propiedades como el espesor y el peso específico del producto no pueden garantizar por sí solas una eficacia de protección óptima.

6. Resistencia al Deterioro Durante la Instalación

El geotextil no podrá seguir cumpliendo sus funciones si se destruye durante o inmediatamente después de la instalación. Los análisis efectuados demuestran que el periodo crítico en el ciclo de vida de un geotextil tiene lugar principalmente durante el proceso de colocación, antes que en etapas posteriores. El 95% de los daños se producen habitualmente en la fase de instalación. Con frecuencia, son sencillamente el resultado de daños ocasionados por impactos recibidos durante la descarga y por la compactación del material granular. Por lo general, si el geotextil sobrevive a estos daños sufridos en el transcurso de la instalación, también podrá resistir las tensiones a las que se verá sometido durante su uso normal.

Se ha realizado un trabajo considerable para tratar de comprender la relación existente entre las propiedades físicas de un geotextil de separación y su rendimiento real sobre el terreno. Estos estudios han confirmado la existencia de una correlación estrecha entre la capacidad de un geotextil de absorber la energía del impacto y su susceptibilidad al

pn

122

[Signature]

deterioro durante la instalación.

Las siguientes figuras muestran las distintas formas de fallos de un geotextil y la importancia de una capacidad elevada de absorción de la energía:

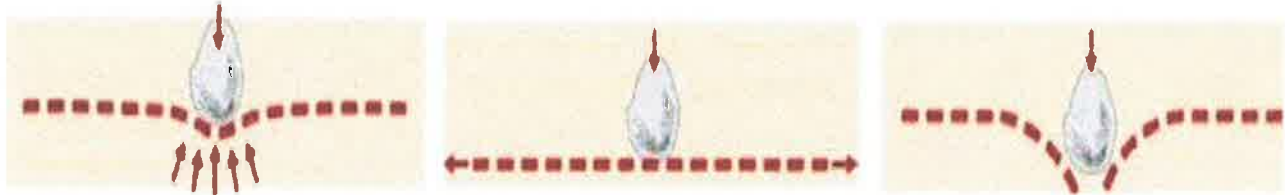


Fig. 7. Diferentes tipos de resistencia del Geotextil: Elongación (izquierda); Directa (Centro) y Falla (Derecha).

7. Absorción de energía

El potencial de absorción de energía (W) de un geotextil se puede describir como la combinación de su elongación y de la resistencia que aplica. El siguiente gráfico (Figura 8) ilustra este concepto: en él se muestran las diferentes formas de potencial de absorción de energía real y teórica, definido anteriormente por la superficie que se encuentra bajo la curva.

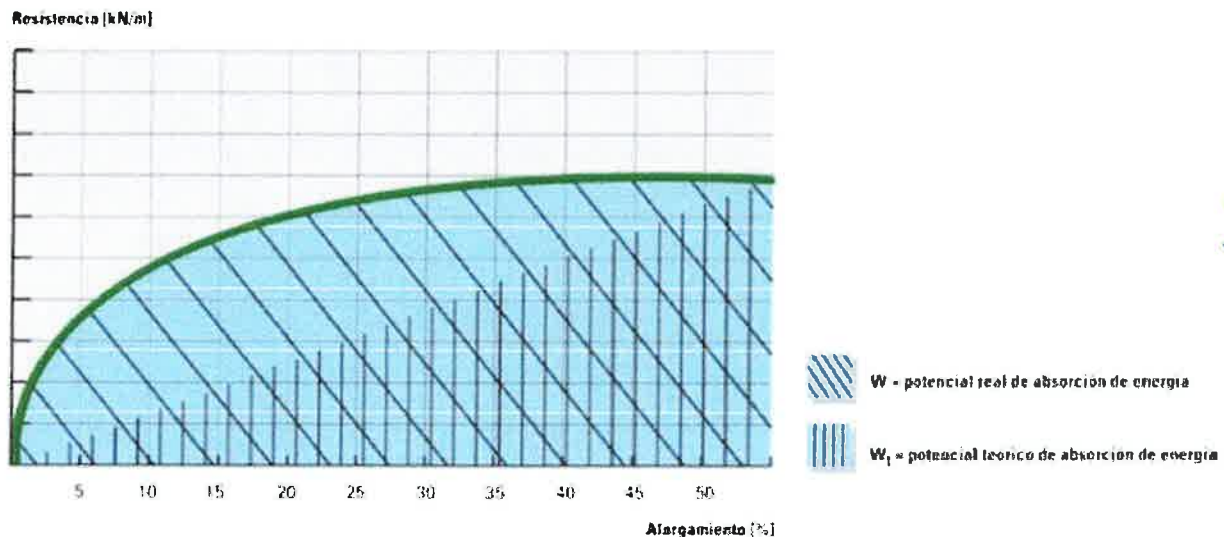


Fig. 8. Comparativa del potencial real y teórico de absorción de energía de un geotextil.

Son varias las especificaciones a nivel nacional que están incorporando el concepto de absorción de energía. En cualquier caso, algunas especificaciones se basan más en los valores teóricos, que en el cálculo de la superficie bajo la curva $W = \int T * \epsilon$. Este cálculo se simplifica mediante la fórmula $Wt = 1/2 T * \epsilon$. El resultado se traduce en una absorción teórica de energía (Wt) para determinados productos, sensiblemente más elevada, mientras que para otros, la absorción teórica de energía es menor que el potencial real de absorción de energía, medido durante la prueba de resistencia a la tracción.

Determinación del Gramaje del Geotextil de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua

Para determinar el gramaje y las características (propiedades) del geotextil para la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua, se tomaron como fundamento los resultados y acciones ejecutadas en los documentos siguientes:

- 1) Recomendaciones para la elección del geotextil según las Normas Técnicas para Carreteras y Vertederos de Vizcaya. Diputación Foral de Bizkaia. Departamento de Obras y Servicios Públicos y Transporte. Dentro del Proyecto Vertedero de RNP de Iruatxeta, Mallabia, Bizkaia. 2001.
- 2) Designing with Geosynthetics. Prentice Hall Publishing Co. Englewood Cliffs, NJ. 1998 Koerner, R.M.
- 3) A Comprehensive Analysis of the Measurement Techniques used to Determine Geotextile Opening Size. Blond et al. 2015. Geosynthetics Conference Memories.

Como parte de las labores ejecutadas, fueron establecidas las características requeridas por los geotextiles empleados para diversos usos, entre ellos como parte de los elementos de cobertura en la base de las celdas de disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios y en los taludes de las mismas.

De igual forma, y a partir de la caracterización de las propiedades requeridas en los geotextiles para los diversos usos, fueron sometidos a una serie de pruebas estandarizadas, que incluyeron la determinación de las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, resistencia al punzonamiento estático y perforación dinámica, resistencia al arrancamiento y al desgarro), hidráulicas, absorción de energía, resistencia al impacto, radiación UV y resistencia química, resistencia a la temperatura, entre otras. Los resultados conjuntos indican que existen tres categorías de uso de geotextiles en rellenos sanitarios, con características particulares, los cuales se presentan en la tabla siguiente.

Propiedades	Unidad	USO DE GEOTEXTIL EN RELLENO SANITARIO								
		Separación y Filtración de Sellado			Separación y Protección de Taludes y Geomembrana			Protección sin Geomembrana		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Descriptivas										
Gramaje	g/m²	135	155	180	200	220	250	260	290	310
Espesor (2kN/m²)	Mm	0.45	0.47	0.48	0.49	0.57	0.59	0.65	0.73	0.74
Espesor (200kN/m²)	Mm	0.37	0.39	0.40	0.40	0.48	0.53	0.59	0.69	0.69
Mecánicas										
Absorción de Energía	kJ/m²	3.6	3.7	4.5	5.8	6	7.4	8.6	9.8	11.0
Tensión	kN/m	8.5	9.0	10.3	12.6	13.1	16.5	20.0	21.3	23.5
Elongación	%	52	52	52	52	52	55	55	55	55
Punzado	N	1200	1250	1575	1800	1850	2350	2900	3150	3400
Punzado Dinámico	Mm	33	29	27	30	22	25	22	16	17
Resistencia Arrancar	N	725	750	900	1050	1100	1400	1680	1750	1950
Resistencia Desgarre	N	320	370	370	335	420	410	430	600	500
Hidráulicas										
Apertura tamaño 90	µm	130	120	100	90	80	80	75	70	70
Permeabilidad	10 ⁻³ m/s	50	50	40	25	35	18	12	15	11
Flujo	l/(m²s)	80	75	70	50	60	35	23	30	20
Permeabilidad 200 kN/m²	10 ⁻⁴ m/s	1.8	2.0	1.8	1.2	1.4	1.2	1.0	1.2	1.0
Características Relleno Sanitario										
Recepción RSU	Ton/día	> 50	50< <100	>100	> 100	> 500	> 1000	> 50	50< <100	>100
Altura Máxima	M	>30	30< <50	>50	<30	30< <50	>50	>30	30< <50	>50
Compactación	Kg/m³	500	850	>850	> 600	> 750	>850	500	850	>850

Considerando las condiciones de uso del geotextil para la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua, así como las características de diseño y operativas, este concuerda con el empleado para **Separación y Protección de Taludes y Geomembrana**, con ingreso diario de residuos muy superior a las 100 toneladas, pero con una altura total menor a 30 metros, así como una compactación por encima de los 600 Kg/m³, dentro de los cuales el recomendado es el identificado con el número 4 y que corresponde a un geotextil cuyo gramaje es de 200 gramos por metro cuadrado.

Proyecto:

**AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA CELDA 2 DEL RELLENO
SANITARIO METROPOLITANO DE CHIHUAHUA**

CÁLCULO DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

Antecedentes

El lixiviado es un agua residual compleja, con considerables variaciones en la composición y el flujo volumétrico (Trebouet et. al., 2001). La calidad de los lixiviados es determinada fundamentalmente por la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en el relleno sanitario, por los procesos de reacción bioquímica que tienen lugar en el mismo, por las condiciones de manejo y por las condiciones ambientales, principalmente en cuanto a la precipitación pluvial y la temperatura ambiente (Ehring, 1999; Borzacconi et. al., 1996).

A partir de lo anterior, es fácil suponer que los lixiviados son líquidos altamente contaminantes que se producen como resultado de la percolación del agua a través de los RSU confinados y también por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, los cuales pueden impactar la calidad de los mantos freáticos o acuíferos.

Un lixiviado "típico" contiene una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos, debido a reacciones químicas y bioquímicas, produciéndose inclusive gases como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3).

Se estima que aun cuando se controle el ingreso de agua pluvial o las condiciones climáticas y el balance hídrico indique que no hay percolación, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los residuos confinados, principalmente en la fracción orgánica, generada por la actividad microbiana, aun cuando éstos pueden ser contenidos en el interior de la masa de residuos, gracias a su capacidad de retención, conocida como "Capacidad de Campo".

Los lixiviados son subproductos de la operación normal de los rellenos sanitarios, que pueden contener una amplia diversidad de contaminantes; las prácticas tradicionales de manejo de los rellenos sanitarios se basan principalmente, en la caracterización físico-química, debido a su relación con la toxicidad. En general, la composición de los lixiviados depende de la edad del sitio de disposición. Un relleno sanitario relativamente joven, presenta concentraciones muy altas de DBO₅, Carbono Orgánico Total, DQO y Sólidos Suspendidos Totales, Iones Mayores (Ca, Na y Cl), así como Alcalinidad, Dureza Total y Sulfatos.

De acuerdo con lo anterior, la concentración y composición de contaminantes en el lixiviado pueden ser muy diferentes, de acuerdo con las condiciones antes mencionadas, pero principalmente la edad del relleno. De hecho, las características de los lixiviados varían incluso dentro de un mismo relleno sanitario dado que pueden coexistir etapas aerobias de los frentes de trabajo de los rellenos, con las fases acidogénicas hacia el interior de los residuos dispuestos en las primeras semanas de operación del relleno y con las metanogénicas que siguen a la fase ácida.

De esta forma, la composición de un lixiviado es función del tipo de RSU y RME que lo generan, de las condiciones climatológicas del sitio, de las condiciones que prevalecen hacia el interior del sitio de disposición final (eventos químicos y biológicos, contenido de humedad, temperatura, pH), así como de la edad y/o grado de estabilización de los residuos sólidos e incluso del método operativo empleado en la disposición final (McBean et al., 1995).

Mecanismos de Formación de los Lixiviados

Los lixiviados son producidos mayoritariamente cuando la humedad entra en contacto con los residuos sólidos, disolviendo los contaminantes en la fase líquida. Las fuentes de entrada de humedad al sitio de disposición final y por tanto promotoras de la generación de lixiviados principalmente las siguientes:

- Precipitación pluvial
- Evapotranspiración
- Forma de operación del sitio
- Existencia, tipo y composición química de los materiales empleados para la cubierta de los residuos (intermedia y final)
- Pendiente superficial del material de cobertura.
- Degradación de la materia orgánica contenida en los residuos
- Existencia y tipo de barreras entre los residuos y el agua en zonas húmedas o pantanosas
- Espesor de los residuos depositados y la cubierta intermedia y final
- Codisposición de residuos o lodos de tratamiento de aguas
- Capacidad de campo de los residuos
- Codisposición de residuos líquidos
- Reacciones físico-químicas y biológicas
- Cantidad de materia biodegradable

De la precipitación (P), que cae directamente sobre el relleno sanitario una parte se desvía, y otra parte se infiltra (I) en la superficie del relleno, tanto en los residuos no cubiertos, así como en las cubiertas diaria, media y final.

Una parte de la infiltración compensará la deficiencia de almacenamiento de humedad del suelo (la diferencia entre capacidad de campo y el contenido de humedad), el remanente, después de satisfacer la demanda de evapotranspiración (EVTP) y humedad del suelo (Hs), se moverá hacia los estratos bajos, formando percolados (PERC) y posteriormente lixiviados. En la Figura 1 se presenta un esquema de la formación de lixiviados.

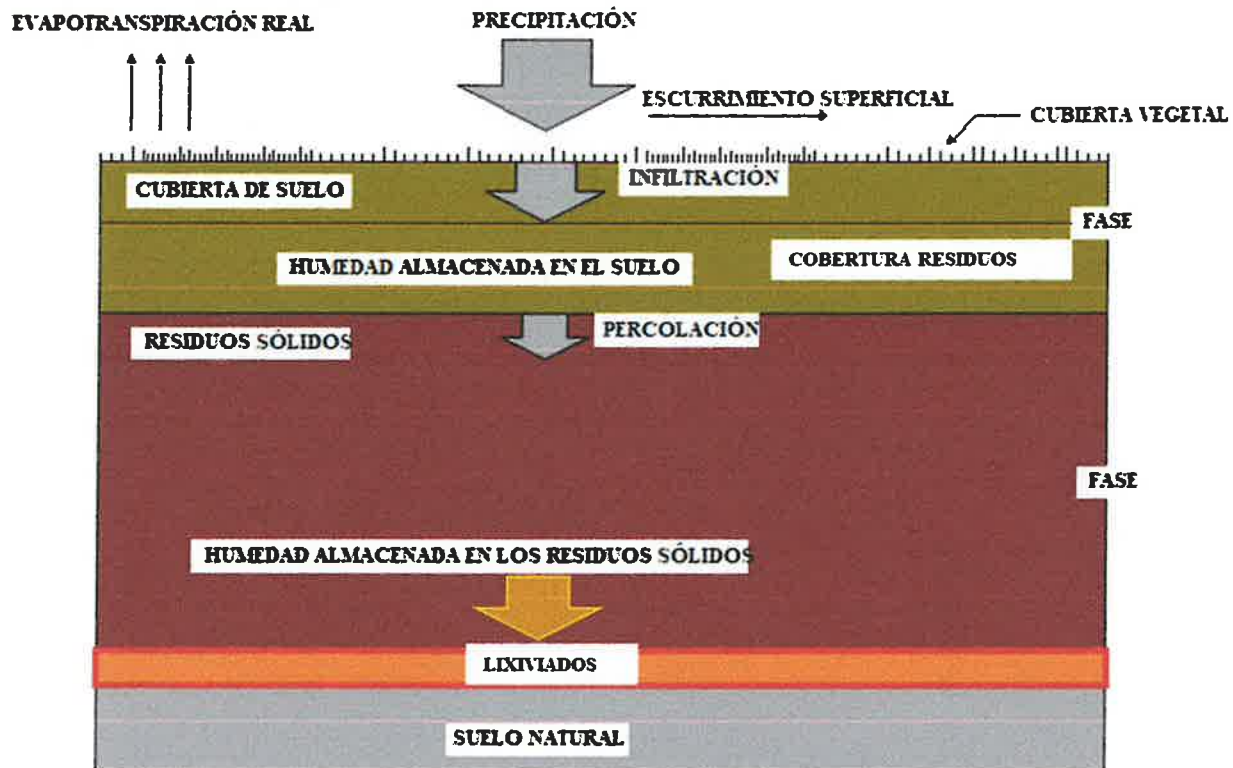
Los lixiviados se generan en las distintas etapas de la descomposición de los RSU, aunado también a la percolación de agua de lluvia, por lo que su composición física y química depende en gran medida de la composición de los mismos residuos.



127



Figura 1 Formación de Lixiviados



Fuente: Propia Estudio de Generación de Lixiviados, 2023

Métodos de Estimación de Gasto de Lixiviados

La estimación del volumen potencial de lixiviados que se generan anualmente es de suma importancia para analizar el posible efecto al subsuelo y a los cuerpos de agua subterránea, así como dimensionar las obras e instalaciones para el manejo adecuado de éstos.

Los líquidos a lo largo de su transcurso sobre los residuos sólidos; absorben y diluyen compuestos contaminantes presentes que, si se logran infiltrar a través de las capas del suelo y llegar a los mantos freáticos, pueden contaminar y degradar su calidad. De aquí que se debe estimar el volumen de dichos percolados por medio de algún método, que como se ha citado, esta estimación también es importante para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de manejo, control, tratamiento y monitoreo de los mismos.

Para la estimación de la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos a nivel mundial, los que parten del análisis del balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área total del relleno sanitario. Existen diferencias entre los modelos aplicados que se caracterizan por el uso de diferentes factores de generación. En algunos casos los análisis y resultados por más de un método, son complementarios bajo circunstancias particulares.

Algunos de los más usados son los siguientes:

- Método de Thornthwaite y Mather
- Modelo Suizo
- Modelo HELP
- Método de Balance Estequiométrico de Residuos

Sin embargo, es importante destacar que el Método de Thornthwaite es el más usado, por considerar una mayor cantidad de variables, principalmente en cuanto a aspectos climatológicos, así como aspectos que tienen que ver con la operación, temporalidad, espesor y características hidráulicas del material de cobertura de los residuos.

En el presente análisis se aplicó el método de C. W. Thornthwaite y J.R Mather para determinar la percolación que incide en la generación de lixiviados, por considerarse el más completo e integral de las circunstancias que se presentan en la generación de lixiviados en un sitio de disposición final de residuos.

Método de Thornthwaite- Mather

- Aspectos Generales

El concepto de balance hídrico se deriva del concepto de balance de materia, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado. Sintéticamente puede expresarse por la fórmula general siguiente:

$$Estado_{t+1} = Estado_t + \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^M Salidas_j$$

Para la determinación del balance hídrico se debe hacer referencia al sistema analizado.

Estos sistemas pueden ser, entre otros:

- ✓ Una cuenca hidrográfica;
- ✓ Un embalse;
- ✓ Un lago natural;
- ✓ Una laguna de oxidación
- ✓ Una celda de un Relleno Sanitario.

El Análisis del Balance Hídrico en un Relleno Sanitario se realiza como si fuera una cuenca hidrográfica. El estado inicial (en el instante t) de la cuenca o parte de esta, para efecto del balance hídrico, puede definirse como la disponibilidad actual de agua en las varias posiciones que esta puede asumir, como por ejemplo: volumen de agua circulando en los



ríos, arroyos y canales; volumen de agua almacenado en lagos, naturales y artificiales; en pantanos; humedad del suelo; agua contenida en los tejidos de los seres vivos; todo lo cual puede definirse también como la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Las entradas de agua a la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas:

- ✓ Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones;
- ✓ Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas;
- ✓ Transvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a:
 - Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se sitúa en otra cuenca, esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos, donde se construyen presas en varios de ellos, y se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica;
 - Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial se encuentra fuera de la cuenca, esta situación es cada vez más frecuente, al crecer las ciudades, el agua limpia debe irse a buscar cada vez más lejos, con mucha frecuencia en otras cuencas. Un ejemplo muy significativo de esta situación es la conurbación de la Ciudad de México.

Las salidas de agua de la cuenca pueden darse de las siguientes formas:

- ✓ Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego;
- ✓ Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.;
- ✓ Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos;
- ✓ Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas;
- ✓ Derivaciones para consumo humano y en la industria;
- ✓ Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, para fines prácticos, se suelen separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.

- *Balance Hídrico y Lixiviados en Rellenos Sanitarios.*

El lixiviado se genera como consecuencia de la humedad de la basura y la infiltración y percolación de líquidos externos, principalmente precipitaciones pluviales. Un correcto diseño del relleno debe prever una cobertura superior que incluya capas impermeables y capas drenantes para minimizar el porcentaje de lluvia infiltrado. Dicha cobertura debe presentar las pendientes adecuadas a los efectos de facilitar la escorrentía. A su vez, deben preverse un manejo separado de las aguas pluviales superficiales y del lixiviado que sale del relleno, considerando una conducción adecuada para este último.

En cuanto a la parte inferior del relleno, debe asegurarse una impermeabilización total que impida la infiltración al subsuelo, con la consecuente contaminación de las aguas subterráneas que ello trae aparejado. Una correcta operación del relleno implica compactación y cobertura diarias, que minimicen la exposición abierta de los residuos sólidos depositados en las celdas de confinamiento y la posibilidad de infiltración de aguas externas.

La "calidad del lixiviado", por llamarle de alguna forma, depende de factores tales como la composición de la basura y las condiciones en que opera el relleno: grado de compactación, grado de humedad, etc. A su vez, y como producto de la actividad biológica que se desarrolla dentro del relleno, varía en el tiempo, tendiendo con el transcurso de los años y la estabilización de la basura a concentraciones cada vez menores de contaminantes. El producto de la concentración de materia orgánica por el caudal nos dará una serie de datos en el tiempo de la carga del efluente que permitirán el dimensionamiento del Sistema de Tratamiento, si fuera el caso.

La estimación del volumen potencial de lixiviados que se generan anualmente es de suma importancia para analizar el posible efecto al subsuelo y a los cuerpos de agua subterránea, en caso de un derrame o fuga de éstos líquidos, ya sea en la base o taludes de las plataformas o en alguno de los componentes del sistema de manejo y tratamiento de los mismos.

Los líquidos a lo largo de su escurrimiento al interior de los residuos sólidos dispuestos; absorben y diluyen compuestos contaminantes presentes, que, si se logran infiltrar a través de las capas del suelo y llegar a los mantos freáticos, pueden contaminarse y degradar su calidad. De aquí que se debe estimar el volumen de dichos percolados, por otra parte, dicha estimación también es importante para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de captación, conducción, tratamiento y monitoreo del mismo.

- *Precipitación Pluvial.*

De acuerdo con lo establecido en Estudios Hidrológicos previos, la información de precipitación total anual y total mensual, así como de temperaturas, se tomaron de los registros de la estación QIJCH Observatorio Chihuahua, a cargo del Departamento de Hidrometría y Climatología de la Comisión Nacional del Agua en Chihuahua. La citada estación climatológica se localiza en el municipio de Chihuahua, Chihuahua, se encuentra activa y presenta información para un periodo de observación de 63 años (1960-2023).

Con el objetivo de determinar una carga hidráulica constante en el área de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua, a partir de la precipitación, se obtuvo el promedio cuadrático de los meses del año, determinándose de este modo un valor promedio de precipitación media anual de 410.4 mm. En la tabla 1 se presentan los valores de precipitación obtenidos:

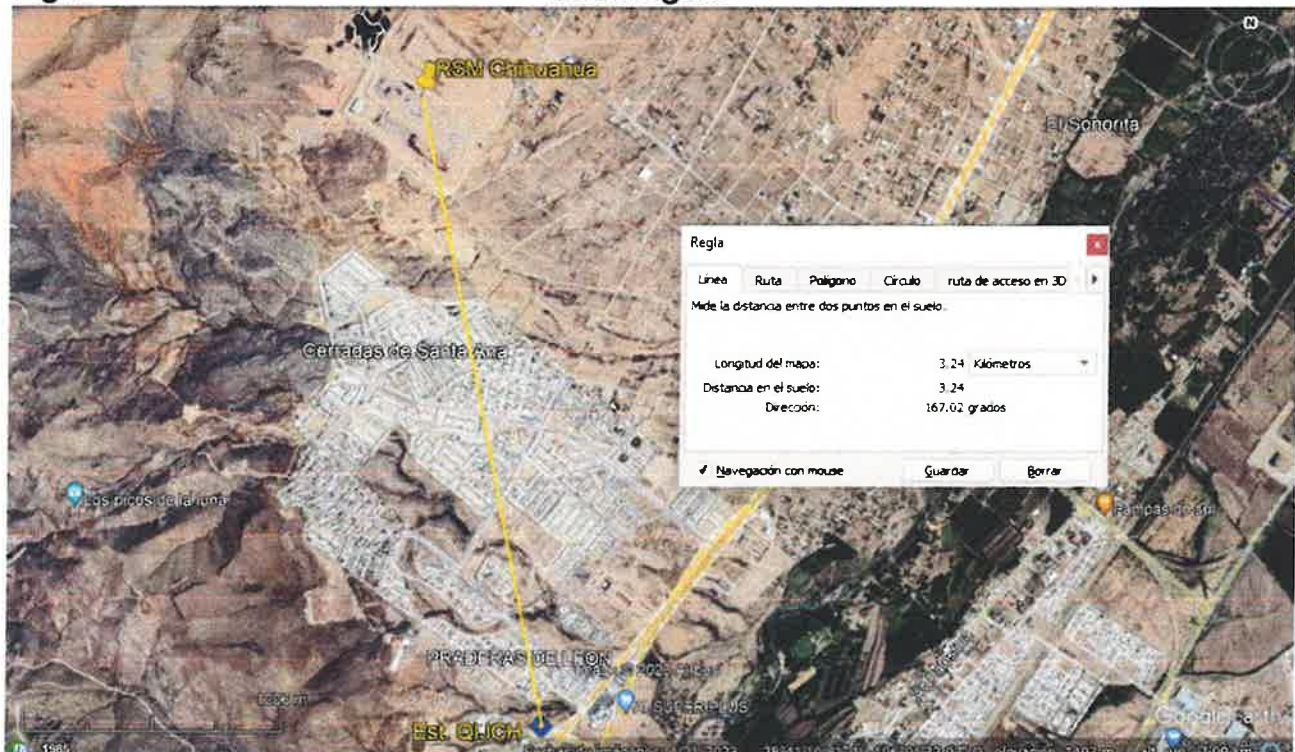
Tabla 1 Datos Estación QIJCH

Estación	Periodo de Observación	Precipitación Media Anual (mm)
QIJCH Observatorio Chihuahua	1960-2023	410.4

Fuente: CONAGUA.

La estación climatológica denominada QIJCH Observatorio Chihuahua, se ubica en la porción Centro Oriente de la ciudad de Chihuahua en las coordenadas geográficas 28°39'25" Norte y 106°05'08" Oeste, con una elevación media de 1402 msnm. Depende completamente del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA) y opera desde el mes de enero de 1960, y se localiza a 3.24 km del Sitio de Proyecto de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua.

Figura 2 Ubicación de la Estación Climatológica QIJCH Observatorio Chihuahua.



Fuente: Propia con base en Google Earth, 2023 y Servicio Meteorológico Nacional

- *Escorrimento Superficial.*

El primer cálculo necesario para determinar el volumen del lixiviado es el escurrimiento superficial que se determina con la expresión:

$$E = K_e * P$$

Donde:

E= Escorrimento superficial mensual en mm

K_e = Coeficiente de escurrimiento

P= Precipitación pluvial en mm

Para el empleo de la expresión anterior, es preciso determinar el coeficiente de escurrimiento, factor determinado por las características que conforman el material térreo a ser colocado conformando la cobertura intermedia y final, así como el tipo de suelo presente en el sitio de proyecto. Como se establece en el Estudio Hidrológico, el Coeficiente de Escorrimento se fijó en 0.60, dada la naturaleza de baja permeabilidad y consolidación, así como la pendiente dominante hacia el suroriente. Incluso este valor podría ser más alto en cuanto al escurrimiento, sin embargo en un escenario de contingencia, se ha optado por el valor citado.

Reiterando lo anterior, con el propósito de simular condiciones muy desfavorables a fin de determinar el volumen potencial máximo de líquido percolado, así como el material y espesor de la cubierta final para el máximo control de la producción de lixiviados.

- *Evapotranspiración.*

Es necesario conocer la evapotranspiración que ocurre en la zona, que a manera de análisis se interpreta como una pérdida de humedad en el suelo, por la acción de evaporación y transpiración de los vegetales, en el balance hídrico se toma como salida de agua hacia la atmósfera causada principalmente por las temperaturas alcanzadas en el lugar. Para el cálculo de este parámetro, se utiliza en primer término, la fórmula de C. W. Thornthwaite que se expresa en índices mensuales "i".

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

i_j = Índice mensual.

T_j = Temperatura media mensual, en °C.

por la fórmula:

$$EP_j = 1.6 \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Donde:

EP = Evapotranspiración potencial mensual, en cm (no corregida).
 T = Temperatura media mensual, en °C.
 I = Sumatoria de los índices mensuales.

$$a = 675 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

$$EVTP = E \cdot K_c$$

Donde:

$EVTP$ = Evapotranspiración potencial ajustada en mm
 E = Evapotranspiración potencial mensual no ajustada en mm
 K_c = Factor de corrección que depende de la latitud del lugar

En la Tabla 2 se presentan los valores medios mensuales de las temperaturas y precipitaciones, así como los datos máximos mensuales de esta última, los cuales serán empleados para fines de cálculo, a fin de alcanzar un valor máximo de referencia, caso contrario, los resultados arrojan valores negativos, los cuales son congruentes con los registros de la estación climatológica QIJCH, en donde la evaporación total es superior a la precipitación media.

Tabla 2 Temperatura y Precipitación Media Mensual y Precipitación Máxima Mensual

MES	PRECIPITACION MEDIA MENSUAL P_j (mm.)	PRECIPITACIÓN MÁXIMA MENSUAL $Max P_j$	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL T_j (°c)
ENERO	9.60	47.50	8.69
FEBRERO	5.70	21.00	11.14
MARZO	5.20	12.50	14.33
ABRIL	8.40	48.80	17.79
MAYO	16.30	35.00	20.38
JUNIO	37.50	59.50	25.84
JULIO	100.40	158.60	26.16
AGOSTO	100.90	212.00	23.79
SEPTIEMBRE	79.20	196.50	21.08
OCTUBRE	26.20	73.00	16.40
NOVIEMBRE	10.40	16.70	12.30
DICIEMBRE	10.60	44.00	9.12

Fuente: Unidad de Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA).

for

134 *[Signature]*

Balance Hídrico por el Método de Thornthwaite

Para dicha evaluación se requiere de un análisis detallado de las condiciones existentes en el sitio, tanto superficial como climatológico. Se considera que el balance de agua es apropiado, debido a que esta técnica se basa en la relación entre la precipitación, la evapotranspiración y el escurrimiento, así como la humedad que se almacena en la cubierta final y en los residuos sólidos

- *Disponibilidad de humedad del suelo*

Una de las condiciones necesarias para que los lixiviados se percolen al subsuelo, es que los estratos del sitio de disposición final ó las capas de los suelos por donde atraviesen los lixiviados, se hallen completamente saturadas de humedad. Por ello es indispensable conocer la disponibilidad de humedad del suelo de la zona de estudio, mediante las evapotranspiraciones que ocurren, los escurrimientos superficiales y las infiltraciones que por consecuencia se dan.

Con el proceso de infiltración hacia el suelo, éste comienza a humedecerse hasta que el agua satura por completo a la capa del suelo, rebasando la capacidad de campo. Es entonces cuando el agua comienza a percolarse, degradando el acuífero. Por lo que respecta a la capacidad de campo, tanto del material de cubierta como de los residuos sólidos, se debe entender como el máximo contenido de humedad que se puede retener en un campo gravitacional sin que se tenga percolación.

- *Evapotranspiración Real*

La evapotranspiración real es la estimación de la evaporación y transpiración que se da en la zona de estudio por las temperaturas alcanzadas en el suelo y su vegetación. Para esto es necesario tomar en cuenta factores tales como la humedad del suelo, la infiltración, y la evapotranspiración potencial "ajustada" de acuerdo a la latitud.

Para que exista evapotranspiración real es necesario que la infiltración que ocurre en el suelo sea mayor que la evapotranspiración potencial ajustada. Es entonces, cuando las evapotranspiraciones se igualan. Por otro lado, si consideramos que la evapotranspiración ajustada (EC_j) es mayor a la infiltración (I_j); entonces la evapotranspiración real (ER_j) se determina mediante:

$$ER_j = I_j - DHS_j$$

Si $I_j - EC_j > 0$;

o bien,

$$ER_j = EC_j$$

Si $I_j - EC_j < 0$

Donde:

ER_j = Evapotranspiración real, en mm.
 EC_j = Evapotranspiración potencial ajustada, en mm.
 DHS_j = Variación de la humedad del suelo, en mm.
 I_j = Infiltración, mm.

Una vez conocidas las precipitaciones medias mensuales y el escurrimiento se calculan las infiltraciones mensuales paralelamente con las temperaturas promedio mensuales y la latitud se calcula la evapotranspiración potencial, a partir de la diferencia entre estos valores podemos comenzar a calcular el balance de agua para el espesor de cubierta determinado en el proyecto.

El valor de la capacidad de absorción de humedad del suelo (donde la humedad necesaria del suelo, está satisfecha) se obtuvo de la diferencia entre la capacidad de campo del material de cubierta intermedia y el punto de marchitamiento. Valor que, multiplicado por el espesor de cubierta ya establecido, nos define hasta donde el suelo retendrá humedad, una vez sobrepasando dicho valor se presenta un exceso de humedad que al percolar arrastra las sustancias presentes en los residuos lixiviándolos hacia el acuífero subyacente

- *Percolación*

La percolación es el resultado final que se obtiene en el análisis completo de la disponibilidad de humedad del suelo. El cálculo de este componente se efectúa aplicando la siguiente expresión:

$$PERC = I_j - DHS_j - ER_j$$

Donde:

$PERC$ = Percolación mensual, en mm.
 DHS_j = Variación en la humedad del suelo, en mm.
 ER_j = Evapotranspiración real, en mm.

Cabe mencionar que, si la precipitación es muy grande y el cambio de humedad del suelo es positivo, la percolación resultante aumenta.

Resultados de Balance Hídrico

En la Tabla 3 se presenta el resultado del Balance Hídrico General para el Sitio de Proyecto de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua.

Tabla 3 Balance Hídrico General de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua
BALANCE DE AGUA (AMPL CELDA 2 RSM CHIHUAHUA)

PARAMETRO	MES											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
PRECIPITACION P_i (mm.)	47.50	21.00	12.50	48.80	35.00	59.50	158.60	212.00	196.50	73.00	16.70	44.00
ESCURRIMIENTO $ES = (K_p \cdot P_i)$ (mm.)	28.50	12.60	7.50	29.28	21.00	35.70	95.16	127.20	117.90	43.80	10.02	26.40
INFILTRACION $I_P = ES_i$ (mm.)	19.00	8.40	5.00	19.52	14.00	23.80	63.44	84.80	78.60	29.20	6.68	17.60
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA $EQ = K_p \cdot EP_i$ (mm.)	1.69	2.51	4.54	6.86	9.44	14.14	14.99	12.17	9.06	5.63	3.11	1.85
DIFERENCIA JEQ (mm.)	17.31	5.89	0.46	12.66	4.56	9.66	48.45	72.63	69.54	23.57	3.57	15.75
CAPACIDAD DE ABSORCION DEL SUELO (ESPESOR 30 CM.) $HS = 60mm / 30CM$	34.50	28.14	0.00	0.00	4.56	60.00	60.00	60.00	52.59	60.00	60.00	57.15
DIFERENCIA DE CAPACIDADES MIES A MIES CHS_i (mm)	0.00	28.14	-28.14	28.14	-23.58	83.58	-23.58	83.58	-30.99	90.99	-30.99	88.14
EVAPOTRANSPIRACION REAL $ER = EQ_i$ SI $JEQ > 0$ $ER = CHS_i$ SI $JEQ < 0$ (mm.)	1.69	2.51	4.54	6.86	9.44	14.14	14.99	12.17	9.06	5.63	3.11	1.85
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL MENSUAL $EP = 1.6(10)/n^*$ (mm.)	1.78	2.79	4.41	6.53	8.36	12.86	13.15	11.07	8.89	5.63	3.34	1.94
PERCOLACION MENSUAL $PERC. = CHS_i - ER_i$ (mm.)	17.31	-22.25	28.60	-15.48	28.14	-73.93	72.04	-10.96	100.53	-67.43	34.57	-72.39
PERCOLACION ANUAL =												
	18.75											mm/año

Fuente: Elaboración Propia con base en Unidad de Servicio Meteorológico Nacional.

De la tabla anterior se desprende que la percolación es de 18.75 mm/año, lo que corresponde a 0.051 mm/día. Tomando este último valor, se estimará la cantidad potencial de lixiviados a generarse dentro de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua, empleando la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{A \times I}{1000}$$

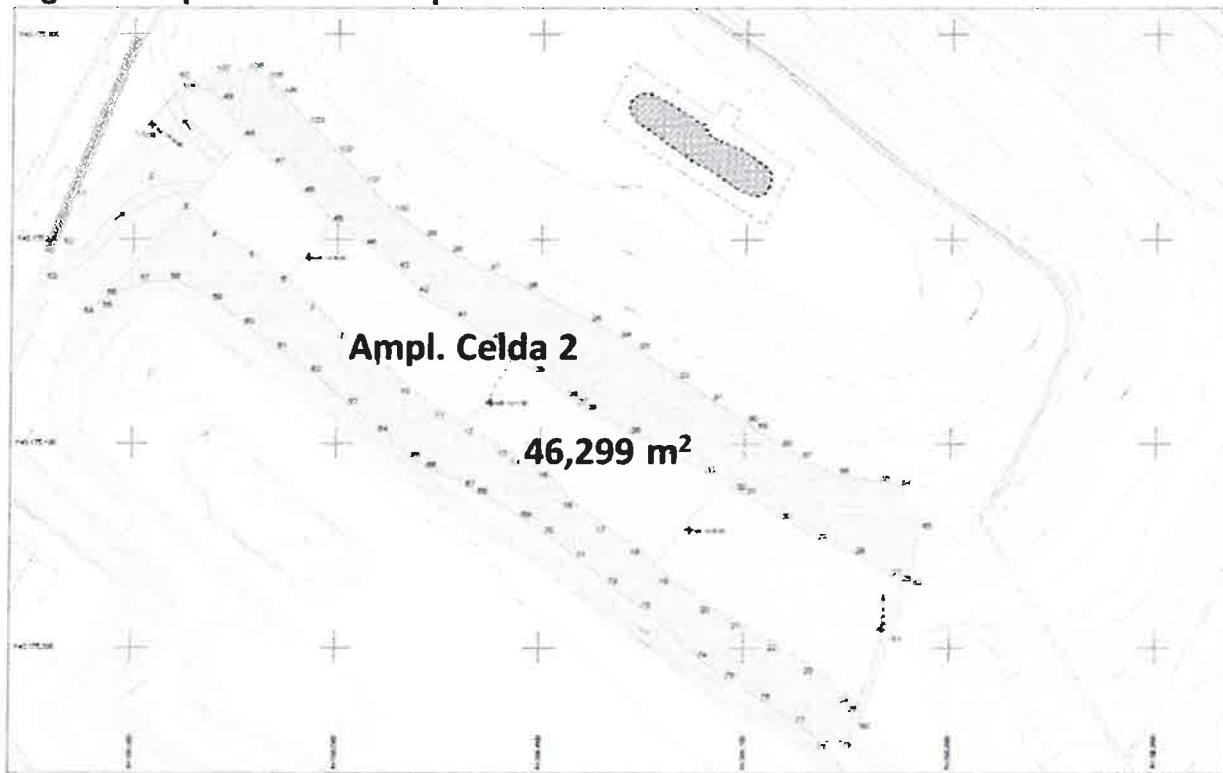
Donde:

- Q = Gasto de diseño de lixiviados, en m³/día.
A = Área neta de disposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario, en m².
I = Percolación, en mm/día.

Para la aplicación de la formula anterior es necesario la utilización de la superficie de tiro, por lo cual a continuación se indican las superficies estimadas por celdas, de acuerdo con un diseño propuesto, determinando su respectivo gasto potencial de lixiviado:

- I= 0.051 mm/día
I= 0.000051 m/día
A= 46,299 m² (Superficie Ampl. Celda 2)

Figura 3 Superficie de la Ampliación de la Celda 2 del RSM de Chihuahua



Fuente: Elaboración Propia Estudio de Generación de Lixiviados, 2023.

for

[Handwritten signatures and marks]

Tabla 4 Gastos Potenciales de Generación de Lixiviados por Celda

Celda	Área (m ²)	Q (m ³ /día)
Ampl Celda 2	46,299.00	2.38
Total		2.38

Fuente: Elaboración Propia Estudio de Generación de Lixiviados, 2023.

Debe tenerse mucho cuidado con el manejo de la generación de lixiviados, ya que no es constante por las condiciones climáticas (época de lluvias) e inclusive las condiciones extremas (tormentas y granizadas), de hecho el cálculo teórico (ideal) además no considera que los desechos se van depositando paulatinamente y que igualmente se va alcanzando la capacidad de campo por lotes y la posterior generación de lixiviado.

Es necesario dar un estimado de producción de lixiviado con respecto del tiempo. En este sentido, se considerará que la producción de lixiviados ocurre a lo largo de la vida útil, contados a partir del llenado total de la primera celda diaria.

También se debe tener en cuenta que la operación que se pretende llevar a cabo, disminuirá o en el mejor de los casos, evitará que la percolación se presente.

Concluyendo, el Balance Hídrico arroja una producción de lixiviado que oscilará alrededor de los 2.38 m³/día, lo que traducido a valores anuales significa 868.70 m³ aproximadamente.

Lo anterior significa una generación moderada a baja de lixiviados, completamente manejable a través de sistemas tradicionales, mediante Cárcamos de Almacenamiento y Riego y Recirculación, para lo cual se recomienda una operación quincenal.

A partir de lo anterior, nominalmente se estarían generando poco más de 33 m³ en 14 días, por lo que sería necesario un cárcamo con capacidad nominal de 32 m³, cuyas medidas operativas sería 4.00m x 4.00m x 2.00m.

Volúmenes Corte - Relleno

CADENAMIENTO	VOLUMEN TOTAL		VOLUMEN BASE		VOLUMEN CELDA 1		VOLUMEN CELDA 2	
	CORTE	RELLENO	CORTE	RELLENO	CORTE	RELLENO	CORTE	RELLENO
0+000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	206.80	0.00
0+020.00	1,309.59	202.35	26.99	202.35	1,844.82	0.00	0.00	0.00
0+040.00	1,572.77	305.33	22.10	305.33	1,636.42	0.00	0.00	0.00
0+060.00	1,976.06	467.21	33.26	467.21	1,943.62	0.00	57.40	0.00
0+080.00	2,235.53	773.71	25.28	773.71	1,783.42	0.00	255.20	0.00
0+100.00	1,837.35	1,143.99	11.61	1,122.80	1,857.62	0.00	0.00	21.19
0+120.00	1,857.85	1,626.48	4.67	1,403.30	2,127.82	0.00	0.00	223.18
0+140.00	2,161.75	1,887.48	0.00	1,682.42	2,319.22	0.00	52.60	205.06
0+160.00	1,884.43	2,012.37	0.60	1,789.85	1,664.62	0.00	0.00	222.52
0+180.00	1,812.87	2,041.09	0.60	1,837.26	2,161.82	0.00	90.80	203.83
0+200.00	2,328.70	1,854.95	0.21	1,854.95	2,445.82	0.00	68.80	0.00
0+220.00	2,627.77	1,376.81	7.85	1,376.81	2,738.22	0.00	0.00	0.00
0+240.00	2,858.79	682.33	347.17	461.68	2,320.62	0.00	0.00	220.65
0+246.23	845.89	174.56	263.56	0.00	878.37	0.00	16.00	174.56
0+260.00	1,884.54	345.77	342.60	0.00	1,579.37	0.00	0.00	345.77
0+280.00	2,818.18	535.66	328.43	0.00	2,538.22	0.00	0.00	535.66
0+300.00	3,169.07	365.29	293.34	8.27	2,773.22	0.00	0.00	357.02
0+320.00	3,550.64	393.14	552.58	8.27	2,742.22	0.00	0.00	384.87
0+340.00	3,713.90	447.45	742.31	0.00	2,704.62	0.00	24.40	447.45
0+360.00	3,865.36	239.75	910.41	0.00	2,676.02	0.00	35.40	239.75
0+380.00	3,803.71	163.54	1,323.97	0.00	1,923.62	0.00	13.40	163.54
0+400.00	3,420.86	256.74	1,633.68	0.00	1,560.22	0.00	0.00	256.74
0+420.00	3,913.54	310.57	1,891.27	0.00	2,328.82	0.00	0.00	310.57
0+440.00	5,077.83	292.32	3,387.15	0.00	1,007.62	0.00	0.00	292.32
0+450.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL:	60,526.90	17,898.98	12,149.68	13,294.21	47,556.42	0.00	820.80	4,604.75