

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

BLANCA LISSETH FLOREZ ACUÑA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, Departamento de ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2018

Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

Blanca Lisseth Flórez Acuña

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Geotécnica

Director:

I.C. Msc. Manuel Roberto Villarraga Herrera

Línea de Investigación:

Geotecnia de rellenos sanitarios

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, Departamento de ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2018

(Dedicatoria o lema)

Mi madre Elvanys Acuña, y mi Hermano Dusty Meléndez Acuña, por ser esas voces de aliento que necesito escuchar cuando quedo sin fuerzas para luchar por todos mis sueños.

Agradecimientos

Solo en mi vida tengo claro una cosa, que todo lo que tengo y soy, es gracias a la infinita misericordia de Dios, por permitir guerrear todas las batallas de la vida con él, y por abrirme cada puerta que se me cierra. Toda la honra es para ti Dios y virgen de Santa Marta.

A mi Madre Elvanys Acuña y hermano Dusty Melendez Acuña, por el apoyo incondicional durante mi posgrado.

Manuel Roberto Villarraga Herrera, tutor de tesis y gerente de INTEINSA, sobre él declaro en el nombre de Dios abundancia de bendiciones por la calidad de ser humano que es, por confiar en mí, y escucharme un día cuando sentí por primera vez que no era capaz de lograr este sueño. Por su paciencia de explicarme y de enseñarme.

INTEINSA, empresa que me aporó toda la información de la instrumentación geotécnica para poder desarrollar mi tesis.

A mis amigos, Linda Montero, Eliana Rodas, Tatiana ternera, Eduin Cuello y Oscar Vargas, por ser esa carga de energía diaria que me brindaban para seguir por este sueño.

Mi jefe Cesar Castaño Arbeláez, por permitirme tomar espacio de la empresa, para sacar adelante esta meta.

Resumen

El relleno sanitario es la técnica más utilizada en el país para la disposición de los residuos sólidos urbanos (R.S.U.), que bien manejada resulta ser menos perjudicial para el medio ambiente, y sin ocasionar molestias o peligros para la salud, y seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar los R.S.U. en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable. Los residuos sólidos urbanos luego de ser depositado, se deben cubrir temporal o diariamente con una capa de tierra o un material impermeable; y una vez se alcance su capacidad máxima deben ser cubiertos con una cobertura impermeable. (Sued & Mennella, 1984)

El municipio de Medellín, su Área Metropolitana y algunas localidades vecinas han venido depositando sus residuos sólidos en dos sectores autorizados pertenecientes a Empresa Varias de Medellín E.S.P, primero en la Curva de Roda que finalizó su operación 2002, y actualmente el relleno sanitario La Pradera que consta de varios vasos que son: La Carrilera, La Música, Altaír, así como La Piñuela y Cumbres, estos dos últimos vasos se encuentran en la etapa de proyección.

Por otra parte, Colombia solo cuenta con dos rellenos sanitarios de gran envergadura y con un adecuado seguimiento y monitoreo, Doña Juana de Bogotá, y en antes mencionado La Pradera en Medellín. Medellín tiene un reporte de más de 20 años de información instrumental, que incluye: topografía, piezómetros, sensores de asentamiento, estaciones meteorológicas, así como el control de medición de los caudales de lixiviados.

De acuerdo con los registros de la instrumentación en los rellenos sanitarios de la Curva de Rodas y La Pradera se registran asentamientos progresivos durante la operación del relleno y posteriormente después del cierre. Estos asentamientos pueden llegar a estar entre el 40% y el 60% de la altura de los RSU depositados. Al considerar estos asentamientos en la evaluación de la capacidad de los rellenos sanitarios se optimiza su aprovechamiento y se reducen sensiblemente los efectos ambientales de su construcción.

X Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario

El concepto de rendimiento representa el número de toneladas o unidad de peso que se puede colocar dentro de una unidad volumétrica (Metro cúbico).

El objetivo de este estudio es establecer un modelo analítico con base en teorías de consolidación de suelos que permita evaluar la magnitud de los asentamientos en los rellenos sanitarios, y de esta manera establecer el rendimiento proyectado para rellenos sanitarios nuevos, considerando las características de los RSU del país.

Palabras clave: Asentamientos, rellenos sanitarios, residuos sólidos, rendimiento, compresibilidad, y viscosidad intergranular.

Abstract

The landfills are the technic more employed in Colombia for the disposal of urban solid waste (U.S.W), this practice developed in an appropriate manner, turns out to be less harmful to the environment, with lesser discomfort caused or danger to health, and public safety. Engineering principles are used to confine the U.S.W. in an area the smallest possible, reducing the volume to the minimum, and thus have a greater capacity for disposal of waste. Through this technic, solid waste must be covered temporarily or daily with a soil layer or some waterproof material. Once the landfill capacity is reached is necessary to close with a waterproof cover. (Sued & Mennella, 1984)

The municipality of Medellin, its Metropolitan Area and some neighboring localities have been disposing of the solid waste in two authorized sectors of Empresa Varias de Medellin E.S.P. The first, Curva de Rodas, which completed the operation in 2002, and the second, the current La Pradera sanitary landfill, which has several vessels: La Carrilera, La Música, Altair, also La Piñuela and Cumbres, these last two vessels are in the projection stage.

On the other hand, Colombia only has two large landfills that have an adequate monitoring, Doña Juana in Bogotá and the La Pradera in Medellín, as previously mentioned. Regarding Medellin, the municipality has a reports of more than 20 years of information related to geotechnical instrumentation, which includes: topography, piezometers, settlement sensors, meteorological stations, also the control of leachate flow measurement.

According to the records of the instrumentation in the sanitary landfills of the Curva de Rodas and La Pradera, progressive settlements were recorded during the operation of the landfill and later after the closure for the case of Curva de Rodas. These settlements can reach 40% and 60% of the height of the disposed U.S.W. Considering such magnitude of settlements in the evaluation of the capacity of landfills, their performance can be optimized, like the environmental effects are significantly reduced. The concept of

performance represents the number of tons or unit of weight that can be placed inside a volumetric unit (cubic meter).

The objective of this study is to establish an analytical model based on soil consolidation theories that allow the evaluation of the magnitude of settlements in sanitary landfills, and in this way establish the projected performance for new sanitary landfills, considering the characteristics of the U.S.W. from the country.

Keywords: settlement, landfills, solid waste, compressibility, compressibility and intergranular viscosity

Contenido

Pág.

Resumen	IX
Lista de figuras.....	XVI
Lista de tablas	XIX
Introducción.....	1
1. Objetivos, Alcance del trabajo y Metodología	3
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.1.3 Alcance del trabajo	3
1.1.4 Metodología a utilizar.....	4
2. Antecedentes.....	7
3. Marco teórico.....	15
3.1 Relación de fase en los residuos sólidos urbanos	16
3.2 Contenido de agua.....	21
3.3 Porosidad total en los residuos solidos.....	22
3.4 Porosidad de drenaje	23
3.5 Asentamiento a corto y largo plazo.....	23
3.6 Factores que influyen en los asentamientos.....	23
3.7 Estabilidad de los taludes en un relleno sanitario .¡Error! Marcador no definido.	
3.8 Métodos de análisis de estabilización.....¡Error! Marcador no definido.	
3.9 Características de los RSU.	24
3.10 Emisión biogás.....	25
3.11 Teoría de Consolidación de Terzaghi	27
3.12 Consolidación modelo de Zeevaert	28
3.12.1 Teoría de consolidación de Zeevaert.....	28
3.12.2 Modelo Kelvin	30
3.12.3 Unidad Z.....	33
3.13 Relación de la teoría de consolidación de Zeevaert con los RSU.....	38
3.14 Curvas de consolidación	39
4. Ubicación del relleno sanitario La Pradera	41
4.1 Generalidades.....	41
4.2 Localización del Relleno sanitario La Pradera	42
4.3 Vida Útil de Relleno.....	43

5. Etapas del relleno sanitario la Pradera.....	44
5.1 Etapa operacional.....	47
5.2 Etapa de tratamiento.....	50
6. Sistema de instrumentación	52
6.1 Instrumentación geotécnica	52
6.2 Sensor de asentamiento	54
6.3 Piezómetros.....	55
6.4 Estación meteorológica.....	56
6.5 Medidores de caudales lixiviados.....	57
6.6 Inclínómetros	60
7. Comportamientos que conllevan a producir los Asentamientos en los RSU....	63
7.1 Tipos de Asentamientos en los RSU.....	64
7.2 Factores que afectan el comportamiento de los RSU.....	65
7.3 Fases de descomposición de RSU	66
8. Resultados	68
8.1 Relación de la teoría de consolidación con los RSU	68
8.2 Instrumentación geotécnica utilizada para el cálculo de los asentamientos por descomposición y consolidación.....	69
8.3 Esfuerzos, presiones de poros, cotas de residuos y temperaturas interna de la masa de los RSU en los rellenos sanitarios La Pradera – Vaso la Música y Curva de Rodas.....	71
8.4 Temperaturas de los rellenos sanitarios La pradera Vaso la Música y Curva de Rodas.....	76
8.4.1 Temperatura Relleno sanitario La Pradera Vaso La Música.	76
8.4.2 Temperatura Curva de Rodas.	77
8.5 Modelo para estimar los asentamientos en una columna de RSU, que numéricamente es equivalente al modelo de consolidación primaria y consolidación secundaria que lo define como viscosidad intergranular.....	78
8.6 Comportamiento bioquímico y Físico de los RSU de la ciudad de Medellín y su Área Metropolitana.	91
8.7 Cálculo del Factor de rendimiento.....	95
9. Conclusiones y recomendaciones	100
9.1 Conclusiones	100
9.2 Recomendaciones	103
A. Anexo: correlaciones – análisis de datos obtenidos en los resultados del modelo.	104
B Anexo: Asentamientos debido a la descomposición y consolidación de La Pradera y Curva de Rodas. a) PZM 15 C Consolidación, b) Factores Biológicos, c) PZM 46 Consolidación, d) Factores Biológicos, e) PZM 22-1 Consolidación, f) PZM 22-1 Factores Biológicos, g) PZM 11-2 Consolidación, h) PZM 11-2 Factores Biológicos.	109
C Anexo. Asentamientos debido a Factores Biológicos y consolidación de La Pradera y Curva de Rodas en una misma gráfica. a) PZM 40B, PZM 15C, PZM 46, PZM 22-1, PZM 12-2.....	114

D Anexo: Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música, La Pradera y Curva de Rodas. a) PZM 46 Vaso La Musica, b) PZM 15, c) PZM 11-2, d) PZM 22-1.....	118
10. Bibliografía	121

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Evolución de la composición física de los residuos sólidos de la ciudad de Medellín. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	8
Figura 2-2. Composición física de los residuos sólidos de la ciudad de Santa Fé de Bogotá relleno sanitario Doña Juana. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	8
Figura 2-3. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico y control topográfico PCT-2. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	10
Figura 2-4. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico control topográfico PCT-3. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	10
Figura 2-5. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico control topográfico PCT-11. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	11
Figura 2-6. Asentamiento del relleno sanitario La Pradera por medio del modelo hiperbólico y el control topográfico PCT-4 y PTC-5. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007) .	11
Figura 2-7. Asentamiento del relleno sanitario La Pradera por medio del modelo hiperbólico y el control topográfico PCT-8 y PTC-11. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	12
Figura 2-8. Relación entre altura de residuos y asentamiento último (Curva de Rodas). Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	12
Figura 2-9. Relación entre altura de residuos y asentamiento último (La Pradera). Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)	13
Figura 2-10. Clasificación temporal de los diferentes mecanismos de asentamiento. Adaptado de (McDougall, 2008). Tomado de (Yepes García, 2015)	14
Figura 3-1. Diagrama de fases en rellenos sanitarios. Adaptado de (Zekkos, 2008)	16
Figura 3-2. Medio poroso trifásico. Adaptado de (Zekkos, 2008)	17
Figura 3-3: Mecanismos y factores de influencia en los asentamientos de rellenos sanitarios. Adaptado de (Zekkos, 2008)	24
Figura 3-4: Analogía del Resorte. Tomado de (Gómez Paniagua, 2009)	28
Figura 3-5. Estructura mezclada de arcilla limosa. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)	30
Figura 3-6. Modelo Reológico de Unidad Kelvin. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)	31
Figura 3-7. Modelo Reológico de Unidad Z. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)	34
Figura 3-8. Componente Elasto Plástico y plasto-viscoso en la compresión de un suelo sedimentado. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)	37
Figura 3-9. Curva de comprensibilidad. Adaptado de (Umaña Romero, 2008)	40
Figura 4-1. Vista General Relleno Sanitario La Pradera. Adaptado de Imagen satelital tomada de Google Earth.	41

Figura 4-2. Ubicación Municipio Don Matías. Modificado de Tomada de https://espanol.mapsofworld.com/continentes/mapa-de-sur-america/colombia/antioquia.html	42
Figura 5-1. Etapas operacional del relleno sanitario La Pradera. Adaptado de (Bloquesautocad, 2019) y (Pavimentar, 2016).....	45
Figura 5-2. Etapas de tratamientos del relleno sanitario La Pradera. Adaptado de (Zekkos, 2008)	46
Figura 5-3. Recipientes para depositar la basura. Adaptado de (Area metropolitana del valle Aburrá, 2006)	47
Figura 5-4. Chimeneas del relleno sanitario la Pradera, vaso La Música ya clausurado. Octubre de 2017.....	50
Figura 6-1. Detalle de instalación de celda de asentamiento. Adaptado de (Alva Hurtado & Escalaya Advincula, 2011)	54
Figura 6-2. Piezómetro de hilo vibrátil. Adaptado de (Suarez, 2009)	55
Figura 6-3. Piezómetro de hilo vibrátil. Octubre 2017.	56
Figura 6-4. Sistema de instrumentación Estación meteorología. Adaptado de http://www.tecnologiayambiente.com.ar/estaciones-meteorologicas/	57
Figura 6-5. Monitoreo de la Estación meteorología. Octubre 2017	57
Figura 6-6. Localización de sitios de aforo en el Relleno Sanitario La Pradera	58
Figura 6-7. Caudal promedio de lixiviado total en los Vasos La Música, La Carrilera y Altaír.....	60
Figura 6-8. Sistema de instrumentación Inclinómetro. Adaptado: http://muchik.com/ques-un-inclinometro	61
Figura 6-9. Inclinómetro, octubre 2017	61
Figura 6-10. Instalación de tubería para los sondeos desplazamientos con el inclinómetro, octubre 2017.	62
Figura 7-1. Diagrama de fases de un suelo y los RSU. Adaptado de (Zekkos, 2008)	64
Figura 7-2. Fases de descomposición de los RSU. Adaptado de (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)	66
Figura 8-1. Llenado de los vasos de RSU. Vaso la Música, La Pradera. a) Llenado de los RSU a Carga Constante hasta un tiempo. b) Llenado de los RSU por un tiempo, luego se le impone más carga.	70
Figura 8-2. Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 40B. Vaso La Música La Pradera.....	73
Figura 8-3. Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 15C. Vaso La Música La Pradera.....	74
Figura 8-4 . Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 17A. Vaso La Música La Pradera.....	75
Figura 8-5. Temperatura promedio anual La Pradera vaso La Música.....	77
Figura 8-6. Temperatura promedio anual después de clausurado el relleno Curvas de Rodas.....	78
Figura 8-7: Ubicación de todos los piezómetros de Vaso La Música.	79
Figura 8-8: Columnas de residuos urbanos, de los piezómetros de referencia del vaso de La Música.....	80

Figura 8-9. Esquemmatización Columna de RSU 82
Figura 8-10 . Comportamiento del asentamiento debido a Factores Biológicos y consolidación del Vaso La Música PZM 40B-La Pradera. 86
Figura 8-11. Comportamiento del asentamiento debido a Factores Biológicos y Consolidación de Curva de Rodas PZM 12-2..... 87
Figura 8-12. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música PZM 40B La Pradera. 90
Figura 8-13. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música PZM 12-2, La Pradera..... 90
Figura 8-14. Fases de descomposición de los RSU relleno sanitario La Pradera. a) Gas. b) Lixiviado. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)..... 93
Figura 8-15: Curva de Consolidación. Adaptada por (Zeevaert L. , 1983) 97
Figura 8-16: variación del Factor de Rendimiento con respecto a la altura de la columna RSU y el proceso constructivo. 99

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Ecuaciones de relación de fase. Adaptado de (Zekkos, 2008)	17
Tabla 3-2. Contenido de agua de los componentes individuales de los residuos Sólidos. Adaptado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)	19
Tabla 3-3. Contenido de agua en los RSU Medellín. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)	20
Tabla 3-4. Contenido de agua en los RSU Bogotá. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)	21
Tabla 3-5. Rango de la composición de Biogás generado en relleno sanitario. Adaptado de (Velez Pereira & Camargo Caicedo, 2009)	26
Tabla 4-1. Capacidad y Fechas de inicio y clausurado del Relleno Sanitario La Pradera.	43
Tabla 6-1. Instrumentación del relleno sanitario La Pradera.....	53
Tabla 6-2. Caudal promedio mensual de lixiviados por vasos de octubre de 2017 a octubre de 2018	59
Tabla 8-1: Temperaturas anuales Vaso La Música	76
Tabla 8-2. Resumen de los cálculos de asentamientos por descomposición y consolidación del relleno sanitario La Pradera- Vaso La Música.	84
Tabla 8-3. Resumen de los cálculos de asentamientos por descomposición y consolidación del relleno sanitario Curva de Rodas.	84
Tabla 8-4. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música, La Pradera.	88
Tabla 8-5. Datos utilizados en el modelo analítico para el cálculo del asentamiento, Curva de Rodas.....	89
Tabla 8-6: Calculo del Factor de Rendimientos.....	98

Introducción

La cantidad de residuos generados por las ciudades es cada vez mayor. Este volumen genera importantes problemas de salud pública, y medioambientales por los que existe cada vez mayor preocupación ciudadana en el manejo, y la disposición de dichos productos.

En el Relleno Sanitario La Pradera ubicado en Don Matías, lugar que autorizó la corporación Corantioquia a Empresas Varias de Medellín E.S.P, se disponen los residuos sólidos urbanos del Municipio de Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y 22 localidades vecinas; este entró en operación el 6 de junio del año 2003, recibiendo originalmente 1.860 T/día de basuras y actualmente cerca de 3000 T/día. (Empresas Varias de Medellín, 2010)

Para 1951, el municipio de Medellín contaba con 400 mil habitantes, y la producción de RSU estaba alrededor de 100 toneladas, del cual no se tenía lugar autorizado o reglamentado para su disposición final. (Empresas Varias de Medellín, 2009)

Entre los años 1955 a 1976, los RSU de Medellín eran depositados en un lote entre el puente Colombia y vía al mar, sector occidente. Pero para el año 1977, se trasladó hacia el norte de la ciudad para el sector de Moravia, se hizo con el propósito de tener un relleno sanitario oficial. Dicho objetivo no se logró debido a que no se cumplió con el reglamento vigente a la fecha. Esto trajo como consecuencia que en ese sector se volviera un foco de contaminación para la ciudad. (Empresas Varias de Medellín, 2009)

Lo anterior conllevó a que se iniciaran estudios y diseños, para conformar el relleno sanitario Curva de Rodas, que inició su operación en el año 1984 con una licencia para recibir 12.000.000 de toneladas con una vida útil 22 años.

El número de habitantes del Municipio de Medellín es de 2.5 millones (DANE, 2009) y según el reporte de EMVARIAS S.A, de este municipio se reciben en promedio en el relleno sanitario La Pradera 1.860 toneladas / días de RSU, adicionalmente ingresan otras 1.054 toneladas/ días de RSU de 32 municipios aledaños. (Empresas Varias de Medellín, 2010)

En la composición de los RSU que ingresan al relleno sanitario La Pradera, prevalece la materia orgánica con un promedio 65%, (Empresas Varias de Medellín, 2009) lo cual es

un factor importante en la generación de los asentamientos; por tanto, este aspecto debe ser tenido en cuenta al momento de realizar el análisis del comportamiento de los asentamientos, así como el análisis comparativo con otros estudios. (Yepes García, 2015) Para el análisis de los asentamientos en los RSU, en la presente investigación se utilizó la teoría de consolidación del Dr. Zeevaert que está conformada por dos estructuras reológicas: unidad kelvin “K” que representa a los microporos, y unidad “Z” a los sub microporos, que están en un estado completamente saturada. Esta teoría se relaciona con el comportamiento de los rellenos sanitarios de la siguiente forma: La consolidación primaria con la disipación de los excesos de la presión de poros que se va generando a medida que se va aplicando carga vertical de los RSU y la consolidación secundaria en los suelos está relacionada con el proceso de drenaje de las aguas viscosas, que para los RSU puede ser numéricamente equivalente con el proceso de descomposición de los residuos.

Obteniendo los asentamientos se puede estimar el rendimiento de un relleno sanitario, el cual es un término que se puede emplear para calcular la capacidad real de un relleno sanitario que presente unas condiciones climáticas, y una composición de residuos. La capacidad de un relleno sanitario suele expresarse en términos de toneladas. Dicha capacidad está ligada al concepto de rendimiento, el cual a su vez está en función del nivel de compactación de los RSU al momento de la disposición, y de los asentamientos que estos experimenten a través del tiempo: a medida que aumentan la compactación y los asentamientos, mayor será el número de toneladas que pueden disponerse. (Yepes García, 2015)

1. Objetivos, Alcance del trabajo y Metodología

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Proponer un modelo analítico con factores influyentes para predecir los asentamientos, y el rendimiento de los rellenos sanitarios para la disposición de los residuos sólidos urbanos (R.S.U), que permita hacer una evaluación más precisa de la vida útil, y la capacidad de futuro rellenos sanitarios. Esta metodología se calibra con base en los datos de los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Proponer un modelo matemático que permita predecir la magnitud de los asentamientos y el rendimiento esperado en los rellenos sanitario, considerando aspectos ambientales de la zona en donde son depositados los residuos sólidos urbanos, y propiedades de los rellenos sanitarios urbanos tales como composición, peso unitario, sistema de compactación, generación de gases y lixiviados.
- Conocer el valor o el rango del rendimiento de un relleno sanitario, el cual se define como la cantidad de toneladas de RSU que se pueden colocar a través del tiempo por m³ de RSU, evaluando los parámetros de composición de los residuos, velocidad de infiltración, sistema de drenaje y el clima.
- Calibrar el modelo con la información instrumental disponible para los rellenos sanitarios Curva de Roda y La Pradera.

1.1.3 Alcance del trabajo

4 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario

El propósito de esta investigación es realizar un modelo analítico que demuestre que la capacidad en un relleno sanitario que actualmente se calcula con base en el peso unitario de los RSU compactados, realmente está relacionada con los asentamientos a través del tiempo, ya sea por la combinación de la descomposición de la materia orgánica o por consolidación, y por la compactación al momento de su colocación final, que es generada in situ, liberando espacio que será ocupado por más RSU, a este espacio se le conoce como factor de rendimiento, lo cual quiere decir que la capacidad de un relleno debería ser medida por tonelada / m³, por lo anterior podría incrementar hasta un 50 % de la capacidad debido a que los asentamientos finales pueden alcanzar entre el 10% y el 50% de la altura inicial del relleno.; (Sowers, 1975) Edgers et al., 1992; (Wall, 1995); y (El-Fadel, 1999). Debido a estos asentamientos se incrementa la vida útil del relleno, lo cual se ha comprobado con base en los datos de instrumentación instalada en diferentes rellenos sanitarios.

1.1.4 Metodología a utilizar

- **Revisión del estado del arte:** Consiste en la revisión bibliográfica de la literatura, relacionada con todos los factores que influyen para predecir los asentamientos y el rendimiento de residuos sólidos urbanos (RSU) de los rellenos sanitarios.
- **Recolección y análisis de datos de instrumentación de los Rellenos sanitarios.** En esta etapa se recopila la información de los datos de los sistemas de instrumentación instalados en los rellenos sanitarios Curva de Roda y La Pradera de propiedad de Empresas Varias de Medellín E.S.P, que servirán para realizar el modelo analítico para predecir los asentamientos y factores de rendimiento.
- **Realización del modelo.** se realizará un modelo analítico que contenga los factores influyentes para que se genere asentamiento, con base en la teoría de consolidación. (Zeevaert L. , 1983)
- **Validación del modelo Analítico.** Después de tener el modelo se valida con base a los datos obtenidos de la instrumentación Curva de Roda y La Pradera.

- ***Elaboración del documento final.*** Etapa final, donde se organizará el documento, que mostrará los resultados obtenidos.

2. Antecedentes

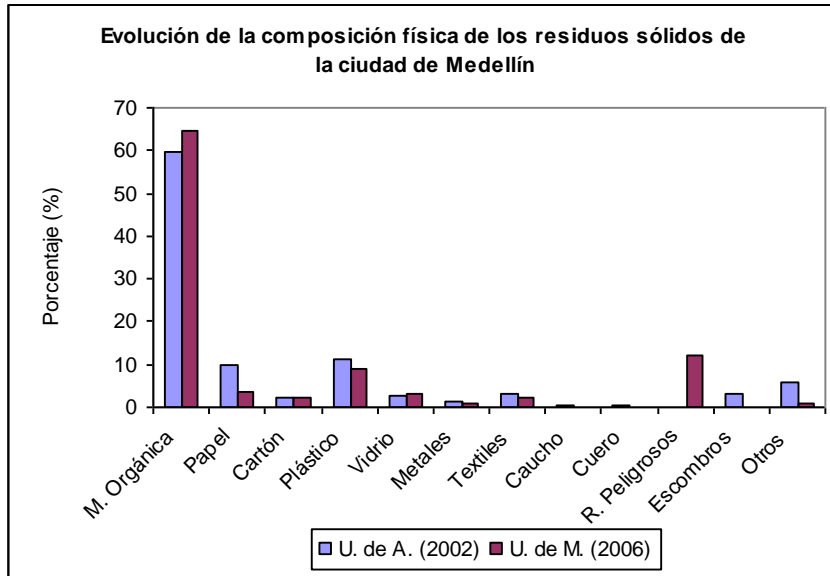
Los rellenos sanitarios más grandes en nuestro país son el Doña Juana de la ciudad de Bogotá, Curva de Roda y La Pradera (parque ambiental que contempla varios vasos: La carrilera, La música, Altaír, La Piñuela y Cumbres) de la ciudad de Medellín, Área Metropolitana, y algunas localidades vecinas. Estos últimos cuentan con un amplio sistema de instrumentación, instalados algunos de ellos hacen más de 20 años, con un fin de controlar la seguridad y los asentamientos, y miden entre otros aspectos: presión de poros, temperatura interna de la masa de los RSU, asentamientos, deformaciones y caudales de los lixiviados.

Existen trabajos de diferentes empresas, y universidades de caracterización, predicción de asentamiento a corto y largo plazo de los RSU. En Doña Juana tuvieron trabajos realizados por Valencia E (2000); Espinosa A. y González A.J (2001); Villarraga M.; Rodríguez J. y Velandia E. (2001); Valverde J. y Sandoval J. (2005). Para el relleno sanitario la Pradera y curva de Roda por la empresa INTEINSA (2006), Universidad de Antioquia entre (1998-2000), las empresas INTEGRAL S.A (2001); HIDROSUELOS (2002) e INTEINSA (2005); Villarraga M.; Ordóñez Carlos (2007); y Villarraga M.; Yepes Jorge (2015).

El último trabajo de caracterización fue “Estudio de producción y caracterización de residuos generados en el sector residencial y por estratos socio económico de la ciudad de Medellín y sus cinco corregimientos” realizado por la Universidad de Medellín en el año 2006, contratado directamente para Empresas Varias de Medellín E.S.P. (Ordóñez Ante, 2007)

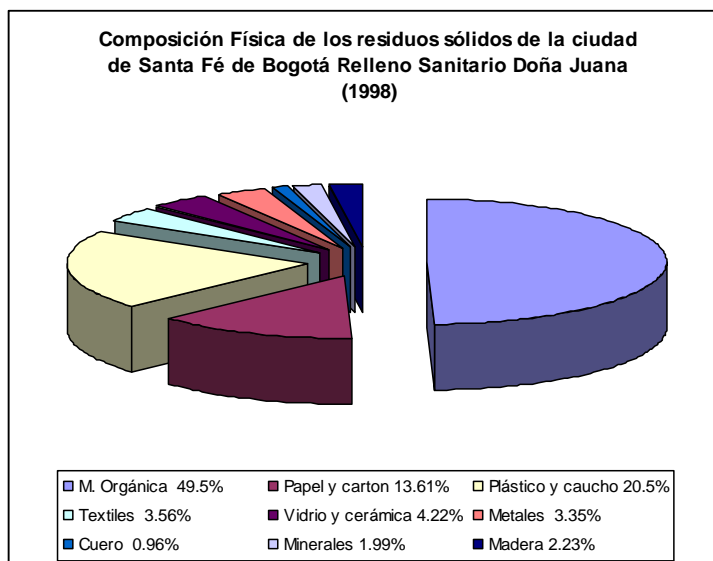
La Universidad de Antioquia y Universidad de Medellín, obtuvieron la composición física de los residuos de la ciudad de Medellín en los años 2002 y 2006, que se puede observar en la Figura 2-1. ENVARIAS realizan descripciones periódicas de la composición de los RSU del relleno sanitario La Pradera.

Figura 2-1. Evolución de la composición física de los residuos sólidos de la ciudad de Medellín. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)



(Velandia Parra, 2000) y (Valverde N & Sandoval Ch, 2004) presentan los datos de la composición física de los RSU del relleno Doña Juana del año 1998 como se muestra en la **Figura 2-2**.

Figura 2-2. Composición física de los residuos sólidos de la ciudad de Santa Fé de Bogotá relleno sanitario Doña Juana. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)



Con los datos anteriores se realizó un comparativo entre los residuos sólidos de Medellín con los de la ciudad Bogotá, el cual se puede observar, que a pesar de que los estudios no fueron realizados el mismo año, se ve con claridad que para ambas ciudades el porcentaje de residuos sólidos más alto corresponde a la materia orgánica, para Medellín está entre 59.48% - 64.82% y Bogotá 49.5% , siguiéndole el papel y cartón 12.02 %- 13.61% , luego plástico y caucho en 11.73% - 0.03% y 20.5%, textiles 3.22% - 3.56%, vidrio y cerámica 2.65% - 4.22%, Metales 1.31% - 3.35%, cuero 0.34% -0.96%, otros 6.03% - 4.44%. (Ordóñez Ante, 2007)

Esta caracterización de los RSU es importante porque los lixiviados y los gases son producto de la descomposición de los residuos orgánicos, cabe resaltar que el gas es expulsado por las chimeneas y los lixiviados son evacuados, conllevando pérdida del volumen que se reflejan en la producción de los asentamientos.

Otro de los tantos factores que influyen en el asentamiento son: la compactación inicial, las características de los desechos, el grado de descomposición, y los efectos de la consolidación cuando el lixiviado y el gas salen de los RSU compactados. (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)

Para (Ordóñez Ante, 2007), en su Proyecto de investigación el objetivo principal era “Verificar y calibrar un modelo geotécnico que permita conocer el comportamiento real de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera”. Donde utilizo puntos de control topográficos, instalado en los rellenos de la empresa varias de Medellín E.S.P, logrando correlacionar el modelo hiperbólico con los asentamientos registrados por la topografía instalada en el sitio, donde se evidencio que existe una buena aproximación entre los datos arrojado por el modelo hiperbólico con los datos topográficos.

En las gráficas **Figura 2-3, Figura 2-4, Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7** reportadas por (Ordóñez Ante, 2007) , en su investigación, se observa cómo va disminuyendo el asentamiento gradualmente con el tiempo. También estas graficas presentan un comportamiento asintótico con una recta paralela al eje de las abscisas, la asíntota se aproxima al valor definido como asentamiento último (Sult). (Ordóñez Ante, 2007)

Figura 2-3. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico y control topográfico PCT-2. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)

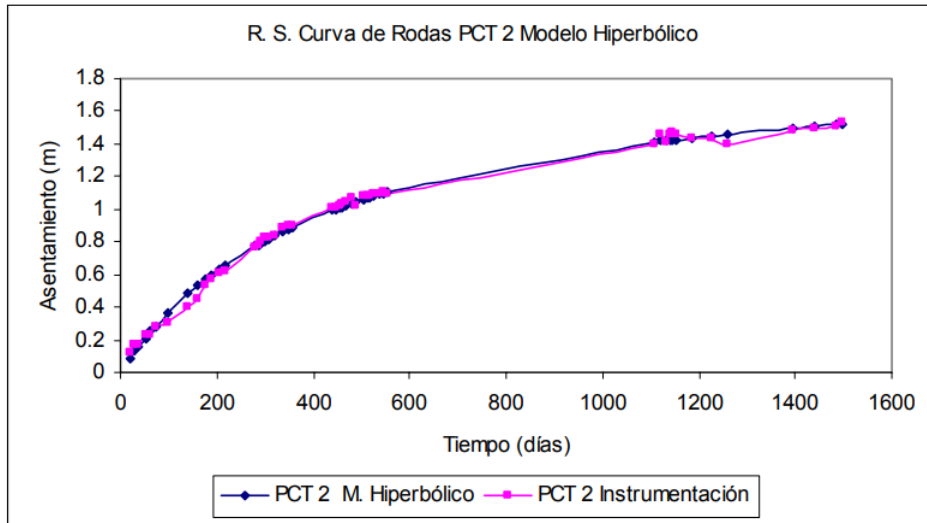


Figura 2-4. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico control topográfico PCT-3. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)

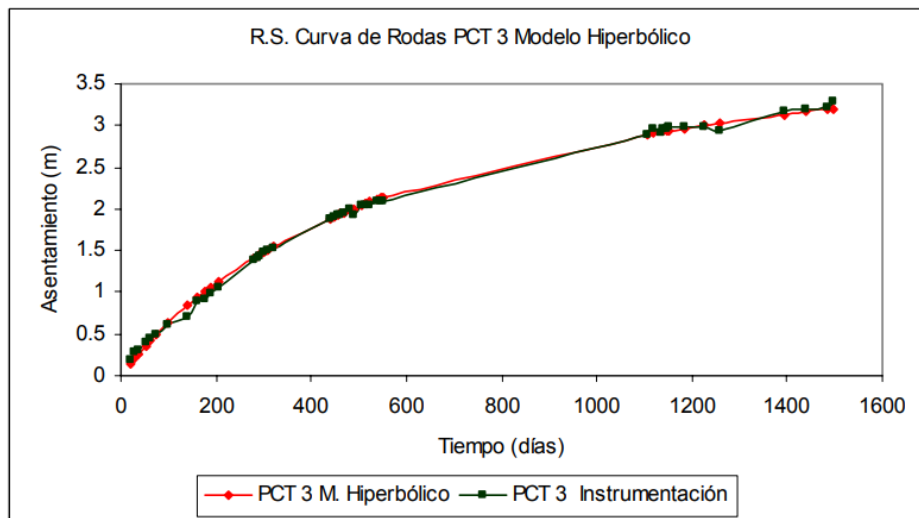


Figura 2-5. Asentamiento del relleno sanitario Curva de rodas por medio del modelo hiperbólico control topográfico PCT-11. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)

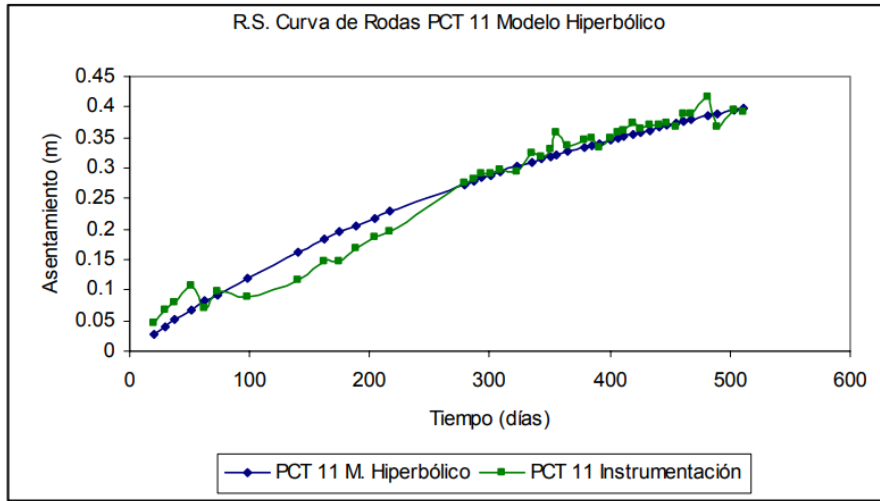


Figura 2-6. Asentamiento del relleno sanitario La Pradera por medio del modelo hiperbólico y el control topográfico PCT-4 y PCT-5. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)

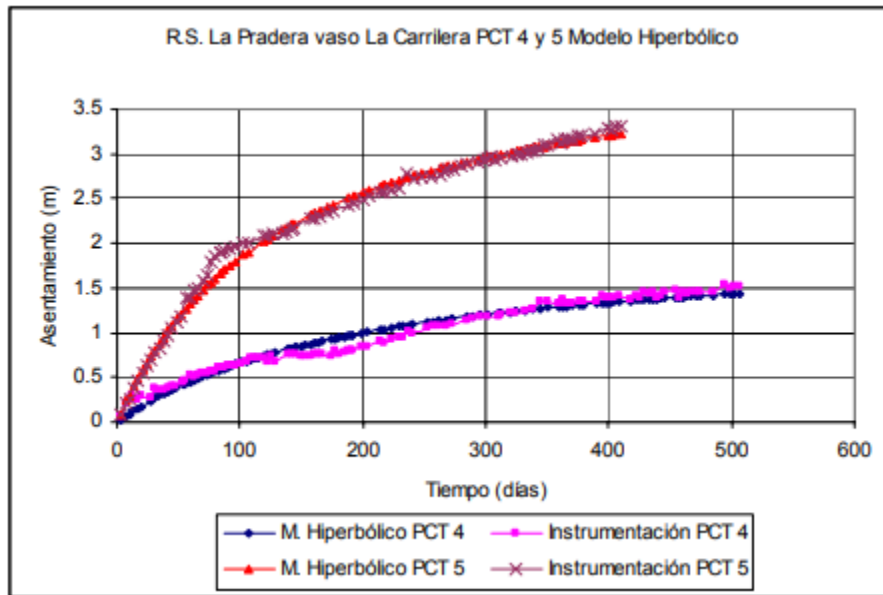
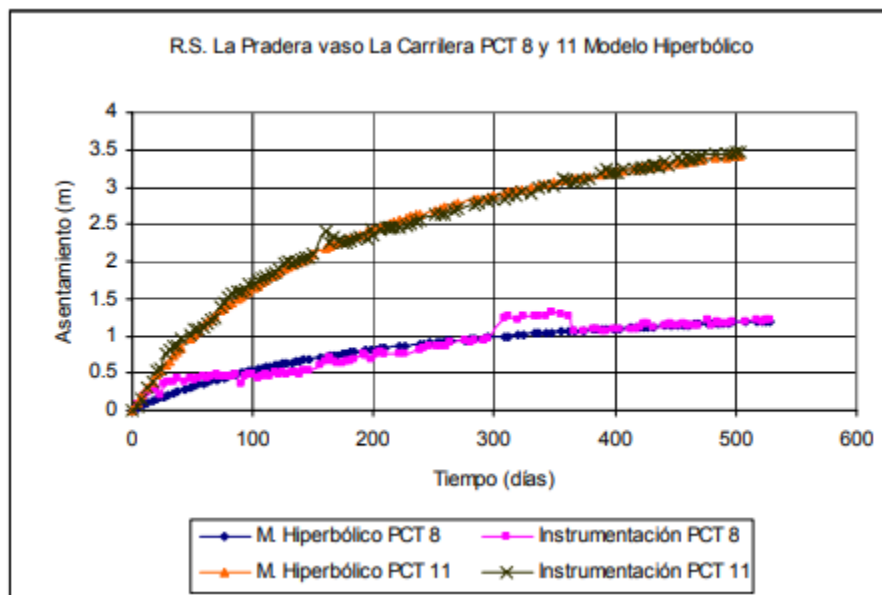


Figura 2-7. Asentamiento del relleno sanitario La Pradera por medio del modelo hiperbólico y el control topográfico PCT-8 y PTC-11. Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)



También se sus resultados (Ordóñez Ante, 2007) observó que existe una relación directamente proporcional entre los asentamientos que se han registrado en los rellenos Sanitarios Curva de Rodas, y La Pradera, y la altura de los residuos como se ve en la **Figura 2-8** y **Figura 2-9**.

Figura 2-8. Relación entre altura de residuos y asentamiento último (Curva de Rodas). Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)

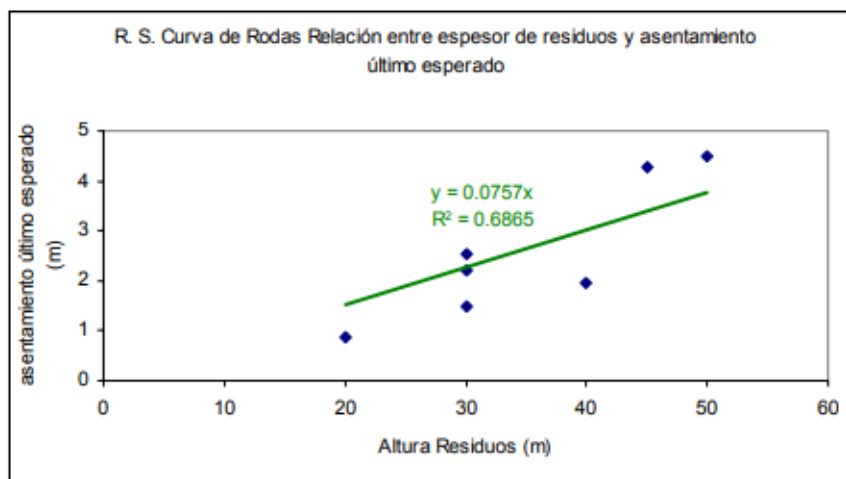
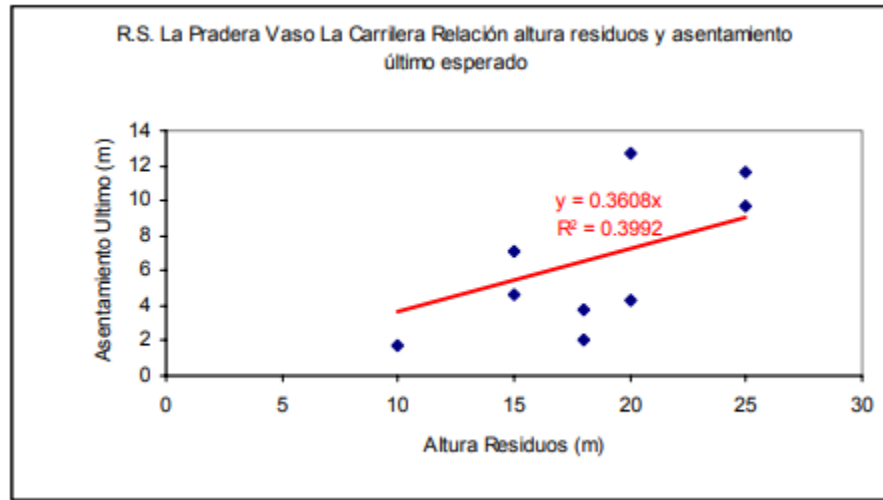


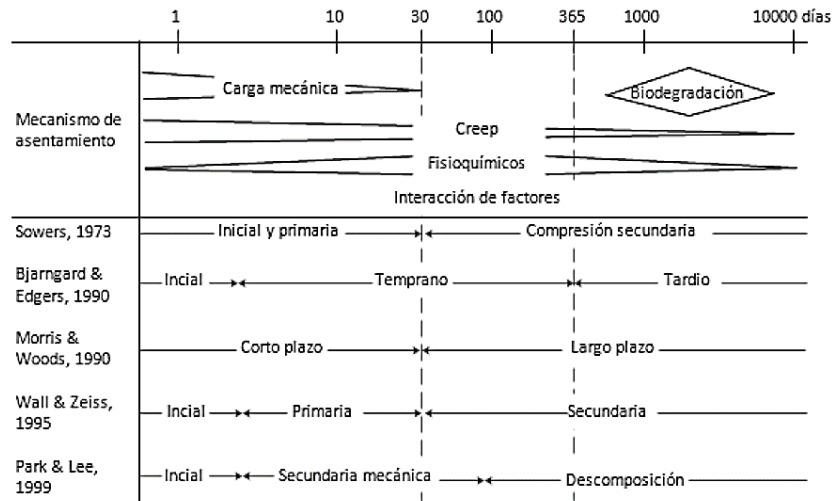
Figura 2-9. Relación entre altura de residuos y asentamiento último (La Pradera). Tomado de (Ordóñez Ante, 2007)



Otro de los investigadores que logro recopilar información de varios autores con relación al tiempo que actúan los distintos mecanismos de asentamiento fue (McDougall, 2008). Teniendo en cuenta la **Figura 2-10**, durante los primeros 30 días después de la colocación de los residuos en el sitio de disposición final, los asentamientos se dan principalmente por las cargas debidas al propio peso de los residuos, esta etapa se denomina inicial o asentamientos primarios y puede ser descrito a partir de modelos carga – asentamiento. (Yepes García, 2015)

Trascurrido el primer mes los mecanismos mecánicos creep, físico-químicos y de biodegradación se hacen importantes, dando inicio a la etapa llamada a largo plazo o asentamientos secundarios, la cual se puede prolongar por más de 30 años. Las tasas de los asentamientos por creep van disminuyendo a través del tiempo, los efectos de la biodegradación se hacen fuertes a partir del año de la disposición en otros países, mientras que los efectos producidos por los mecanismos físico-químicos y desagregación son de menor impacto respecto a la biodegradación, y se considera que también decaen en el tiempo. Por lo anterior el modelamiento de esta etapa exige modelos en función del tiempo. (Yepes García, 2015)

Figura 2-10. Clasificación temporal de los diferentes mecanismos de asentamiento. Adaptado de (McDougall, 2008). Tomado de (Yepes García, 2015)



3. Marco teórico

Como se dijo inicialmente en el documento, el relleno sanitario es la técnica más usada en el país para la disposición de los residuos sólidos urbanos sin ocasionar molestias o peligros para la salud y seguridad pública. (Sued & Mennella, 1984)

Los RSU sufren una serie de transformaciones biológicas, y fisicoquímicas que tienen efectos negativos sobre el medio ambiente. Debido a lo anterior los RSU son depositados sobre suelos impermeabilizados con el propósito de prevenir la infiltración de los lixiviados generados durante la descomposición de los residuos sólidos. El lixiviado es el líquido que ha percolado a través de los desechos, al igual es el líquido que se produce por la descomposición de la materia orgánica, y que dentro de él se producen los gases y por convección tienden a subir mientras que los lixiviados tienen a bajar. (Robles Martínez, 2008)

Los lixiviados son recolectados y evacuados internamente por un sistema de filtros, que los conducen mediante tuberías a otro espacio donde puedan ser tratados para disminuir su carga contaminante. El proceso de descomposición de los residuos sólidos también produce gases, los cuales son evacuados al exterior a través de los mismos filtros internos que transportan los lixiviados, conducidos a las tuberías verticales (chimeneas), para evitar que salga a la superficie, por lo anterior es una de las razones por las que se impermeabiliza. La evacuación de los fluidos producidos por los residuos sólidos urbanos (lixiviados y gases) reduce la acumulación de presiones de poros al interior del relleno, que pueden afectar su estabilidad. Una vez finaliza la disposición de los RSU, se procede a instalar una cobertura con tierra o con un material impermeable, y se construye un sistema para el manejo de las aguas lluvia, que ayuda a controlar la infiltración de aguas lluvias, las cuales incrementan la producción de lixiviados. (Yepes García, 2015)

3.1 Relación de fase en los residuos sólidos urbanos

Los RSU al igual que los suelos, están conformados por una estructura porosa, que está conformada por partículas orgánicas e inorgánicas, de la que se generan vacíos, que son ocupados por líquidos o gases. Así como los suelos tienen relación de fases por su estructura porosa, los residuos sólidos también. El material depositado en un relleno sanitario, es conocido como residuos sólidos urbanos, que presenta un medio poroso con materia sólida, y espacios distribuidos en todo el volumen. El medio poroso más parecido a los del residuo sólido en cuanto a su estructura, porosidad, y contenido de gas, es el suelo no saturado. Aunque los residuos sólidos son más complejos debido a la acción e interacciones biológicas y químicas, y a la variación de su composición y propiedades en el tiempo. (Zekkos, 2008)

Al igual que los suelos, los RSU tienen diagrama de fases figura 3-1: (Zekkos, 2008)

- Fase solidos Orgánico
- Fase solidos Minerales
- Fase agua retenida (líquida).
- Fase agua drenable (liquida).
- Fase gas.

Figura 3-1.Diagrama de fases en rellenos sanitarios. Adaptado de (Zekkos, 2008)

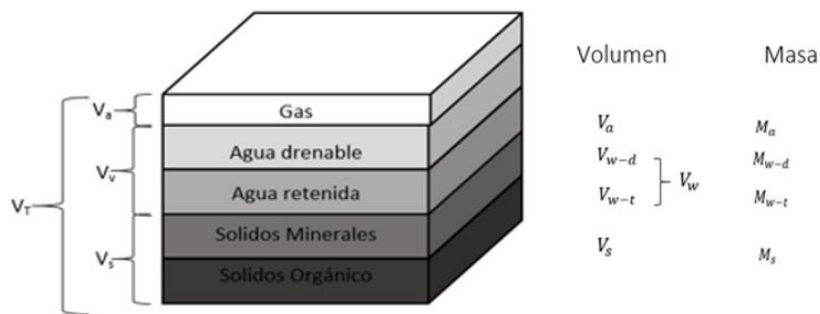


Figura 3-2. Medio poroso trifásico. Adaptado de (Zekkos, 2008)

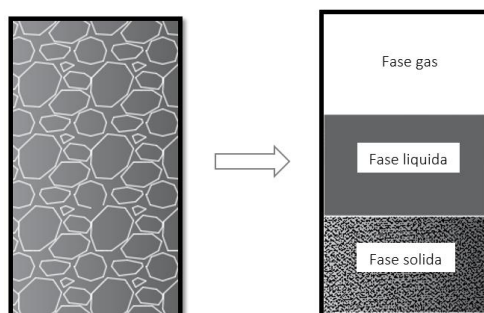


Tabla 3-1: Ecuaciones de relación de fase. Adaptado de (Zekkos, 2008)

Parámetros y símbolos	Definición	Ecuaciones
Relación de vacío, e	Volumen de vacío / volumen de sólido	$e = \frac{V_v}{V_s}$
Porosidad, n	volumen de vacío / volumen total	$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{e}{(1 + e)}$
Volumen específico, V	Volumen total/ volumen de sólido	$v = \frac{V_t}{V_s} = (1 + e) = \frac{1}{(1 - n)}$
Drenaje o porosidad efectiva	Volumen de agua drenaje / volumen total	$n_e = \frac{V_{w-d}}{V_t}$
Contenido de agua gravitacional, W	Masa de agua / masa de sólido	$w = \frac{M_w}{M_s}$
Contenido de agua volumétrica, θ	Volumen de agua / Volumen total	$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{W * G_s}{(1+e)}$
Grado de saturación, S	Volumen de agua/ Volumen de vacío	$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W * G_s}{e}$
Contenido de gas, G	Volumen de gas / Volumen de vacío	$G = \frac{V_g}{V_v} = 1 - S$

- 18 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

Tabla 3-1: Ecuaciones de relación de fase. Adaptado de (Zekkos, 2008)

Parámetros y símbolos	Definición	Ecuaciones
Densidad aparente, ρ aparente	Masa total/ total de volumen	$\rho_{aparente} = G_s * \rho_w * \frac{(1 + w)}{V}$ $= (G_s + e) * \frac{\rho_w}{V}$
Densidad seca, ρ seca	la densidad aparente que tendría un desecho en la misma proporción de vacío, pero seco ($W=0$)	$\rho_{seca} = \frac{G_s * W}{V}$

Se presenta entonces en la **Figura 3-1** el diagrama de fases para los RSU como un medio poroso, en el cual el agua puede ser drenable o retenida. En el primer caso hace referencia al agua que ha sido absorbida por materiales como papel, cartón y textiles, de los cuales puede ser liberada; en el segundo caso se trata del agua que ha quedado atrapada dentro de elementos como botellas o latas, imposibilitando su liberación. (Yepes García, 2015)

Los R.S.U. consisten en una amplia gama de materiales altamente variables con una amplia distribución de tamaños. La naturaleza y distribución de los poros depende tanto de la densidad como de la composición. La mayoría de las clasificaciones no determinan de forma rutinaria el contenido de agua ni de los componentes individuales de los desechos. El conocimiento del contenido de agua de un residuo es esencial en términos geotécnicos para una amplia gama de aplicaciones. Se utiliza en la determinación de las densidades de los residuos, y las tensiones verticales inducidas por el propio peso dentro de un relleno sanitario.

También es un componente esencial de un balance hídrico, influyendo en factores como la capacidad de absorción de un residuo. Los datos de contenido de agua para una gama de materiales fueron resumidos por Tchobangolous para países desarrollados, y se reproducen en la **Tabla 3-2**. Estos datos dan una indicación del rango probable de contenido de agua de residuos. (Beaven, 2000)

Tabla 3-2. Contenido de agua de los componentes individuales de los residuos Sólidos.
Adaptado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)

Tipos de residuos	Rangos	Contenido de humedad
		% En peso húmedo Típico
Residencial (no compactado)		
Desechos de comida	50-80	70
Papel	4-10	6
Cartulina	4-8	5
Plástica	1-4	2
Textiles	6-15	10
Caucho	1-4	2
Cuero	8-12	10
Desechos de jardín	30-80	20
Madera	15-40	20
Vidrio	1-4	2
Latas	2-4	3
Aluminio	2-4	2
Otros metales	2-4	3
Suciedad, cenizas, etc.	6-12	8
despojos mortales	6-12	6
Basura	5-20	15
Comercial		
Desechos de alimentos (húmedos)	50-80	70

Con los porcentajes de contenido de agua de los RSU, que se registran en la **Tabla 3-2** , y la composición física de los RSU de Medellín y de Bogotá se calculó el contenido de agua de cada ciudad.

En las tablas **Tabla 3-3** registra el contenido de humedad de los RSU de Medellín con un valor aproximado del 50%, y

Tabla 3-4 registra el de Bogotá con un 40%, esto indica que en la ciudad de Medellín se produce más materia orgánica, indicando que puede existir más asentamiento por descomposición en Medellín que en Bogotá.

Tabla 3-3. Contenido de agua en los RSU Medellín. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)

COMPOSICIÓN FISICA DE LOS RSU DE MEDELLIN	Rangos	Contenido		Contenido		Contenido
		humedad % En peso húmedo Típico	REPORTE U. DE ANTIOQUIA Can	humedad % En peso húmedo Típico	REPORTE UNIVERSIDAD DE MEDELLIN	humedad % En peso húmedo Típico
Residencial (no compactado)				43,8		47,06
Desechos de comida	50-80	70	60	42,0	65	45,5
Papel	4-10	6	10	0,6	5	0,3
Cartulina	4-8	5	3	0,2	3	0,15
Plástica	1-4	2	12	0,2	10	0,2
Textiles	6-15	10	3	0,3	2	0,2
Caucho	1-4	2	0,5			
Cuero	8-12	10	0,5	0,1		
Desechos de jardín	30-80	20				
Madera	15-40	20				
Vidrio	1-4	2	3	0,1	4	0,08
Latas	2-4	3	2	0,1		
Aluminio	2-4	2	2			
Otros metales	2-4	3	2	0,1	1	0,03
Suciedad, cenizas, etc.	6-12	8				
despojos mortales	6-12	6	0		10	0,6
Basura	5-20	15	2	0,3		
Comercial						
Desechos de alimentos (húmedos)	50-80	70				

Tabla 3-4. Contenido de agua en los RSU Bogotá. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982)

COMPOSICIÓN FISICA DE LOS RSU DE BOGOTA		Contenido de humedad % En peso húmedo Típico		Contenido de humedad % En peso húmedo Típico	
Tipos de residuos	Rangos				
Residencial (no compactado)				37,0	
Desechos de comida	50-80	70	49,5	34,7	
Papel	4-10	6	13,61	0,8	
Cartulina	4-8	5			
Plástica	1-4	2	20,5	0,4	
Textiles	6-15	10	3,56	0,4	
Caucho	1-4	2			
Cuero	8-12	10	0,96	0,1	
Desechos de jardín	30-80	20			
Madera	15-40	20	2,23	0,4	
Vidrio	1-4	2	4,22	0,1	
Latas	2-4	3			
Aluminio	2-4	2	2,07	0,04	
Otros metales	2-4	3	3,35	0,1	
Suciedad, cenizas, etc.	6-12	8			
despojos mortales	6-12	6			
Basura	5-20	15			
Comercial					
Desechos de alimentos (húmedos)	50-80	70			

3.2 Contenido de agua

El contenido de agua en los RSU, puede contener en sus macroporos agua que drenan libremente, y también agua absorbida en los microporos que están dentro de los

22 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

componentes que conforman a los residuos sólidos por ejemplo materia orgánica, el papel, cartón, textiles, etc. El contenido de agua en RSU de un relleno sanitario puede variar su contenido de agua inicial recolectada. (Zekkos, 2008)

Aunque también habrá momentos en que dicho contenido de agua puede disminuir ya sea debido a la compactación, agua consumida por el proceso anaeróbico, o por el secado capilar. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993) informa que el contenido de agua varía en los residuos sólidos entre un 15%-40% en su peso húmedo para países industrializados, teniendo en cuenta que este rango puede variar ya sea por las condiciones climáticas, y la composición del RSU, ya que por lo general el porcentaje más representativo está en la materia orgánica. (Zekkos, 2008)

La distribución y el movimiento del agua, dentro de los residuos sólidos es muy importante por dos razones: Primero, a medida que el lixiviado pasa a través de los desechos puede disolver o transportar sustancias que pueden causar contaminación a las aguas subterráneas. Segundo, el agua y el flujo de agua son esenciales para la descomposición bioquímica de sustancias orgánicas, y necesario para la Lixiviación de compuestos solubles. (Zekkos, 2008)

El flujo y distribución de agua en vertedero es complicado por:

- Los desechos son materiales heterogéneos.
- Hay variedad de tamaños, formas de partículas y sus poros.
- Desechos son anisotrópicos.

3.3 Porosidad total en los residuos solidos

La porosidad de los RSU se puede definir como la relación de volumen de vacío dividido por volumen total. En (Zekkos, 2008) se anota que para rellenos sanitarios compactados se han determinado porosidades entre 58% y 47% a densidades entre 0.17 ton/m³ y 0.30 t/m³. No es claro si estas densidades corresponden a pesos húmedos o secos, sin embargo, se consideran bajas.

3.4 Porosidad de drenaje

La porosidad de drenaje se define como la cantidad de agua que drena libremente por la unidad de volumen. La porosidad drenaje está dada por la diferencia entre contenido de agua volumétrica saturada, y la capacidad volumétrica en campo. Hay que tener en cuenta que la capacidad en campo variara según la densidad de desecho. Dicha porosidad drenaje se puede medir en laboratorio o en campo por prueba de bombeo o balance hídrico. (Zekkos, 2008)

Entender el flujo de fluido en los residuos sólidos no es fácil, sin embargo, es posible aplicarle los principios hidrológicos, y la mecánica de suelo, teniendo cuidado con las relaciones de fases por las siguientes razones.

- En los rellenos sanitarios han utilizado definiciones de diferentes disciplinas que tienen significados diferentes.
- El gas y lixiviado es un factor de muchas complicaciones ya que se genera in situ.
- Reducción de volumen por la degradación permanente, es un factor que poco involucran en otras áreas que están relacionadas con el flujo de fluido a través de medios porosos.

3.5 Asentamiento a corto y largo plazo.

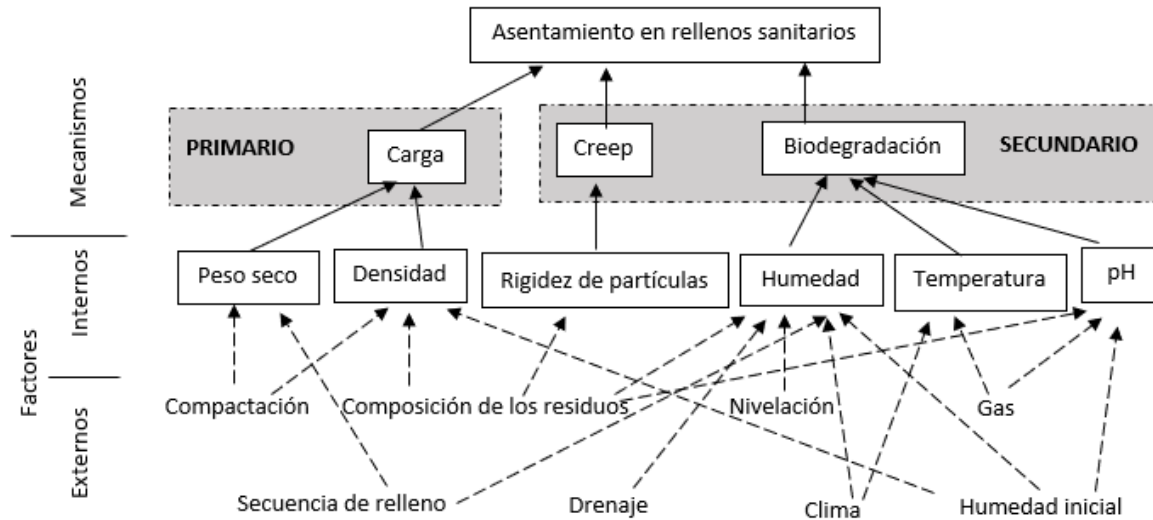
Un relleno sanitario sufre asentamientos que pueden llegar un 25% a un 50% del espesor original. Se puede apreciar asentamientos a corto plazo, en la etapa del llenado, que con el pasar del tiempo presenta continuidad en los asentamientos durante su operación, cierre y uso futuro de vertederos.

3.6 Factores que influyen en los asentamientos.

En la **Figura 3-3**, se puede observar algunos factores primarios y secundarios que influye en el asentamiento. Dichos factores están divididos en factores externos e internos. Los factores internos son aquellos que se definen el peso seco, la densidad, rigidez de las partículas, humedad, temperatura, pH, y los factores externos son inherentes al sitio final

que son la compactación, composición de los residuos, secuencia de llenado, nivelación, drenaje, clima, gas, y humedad inicial. (Zekkos, 2008)

Figura 3-3: Mecanismos y factores de influencia en los asentamientos de rellenos sanitarios. Adaptado de (Zekkos, 2008)



Merz and Stone, 1962 citados por (McDougall, 2008); En su investigación observaron que debido a las condiciones aeróbicas representaban un asentamiento tres veces mayor que el anaeróbico. (Sowers, 1975) comprobó que mantener un lugar seco puede detener la descomposición. También reconoció que la circulación del agua puede detener la descomposición debido a la inhibición (microbiano) del producto.

3.7 Características de los RSU.

Los residuos sólidos no son un material geológico como lo es el suelo, y su estructura varía según el tipo de residuo que lo ha generado. Aunque se puede expresar su comportamiento mecánico en términos aparente de fricción y cohesión; dicha cohesión aparente, es un parámetro de fricción que representa el refuerzo lateral presente en los residuos sólidos, que es análogo al suelo reforzado de cohesión aparente. El efecto del

refuerzo aparente en los desechos permite que el material soporte las deformaciones de cizallamiento. (Daniel, 1993)

3.8 Emisión biogás

El biogás se genera del lixiviado, y lo conforma el Metano CH_4 , y Dióxido de Carbono CO_2 . Los componentes del biogás dependen de las características de los RSU, volumen de residuo, de la composición de los RSU, el contenido de la materia orgánica, humedad, compactación y edad del relleno sanitario. Lo que hace variar la emisión de biogás es el tiempo y las condiciones ambientales.

Los RSU sufren una descomposición que varía con el tiempo y van sufriendo etapas debido a: (Velez Pereira & Camargo Caicedo, 2009)

- Temperatura.
- Oxígeno.
- Característica del residuo.
- Tiempo o edad de relleno sanitario

Los mayores componentes del biogás como se registran en la **Tabla 3-5** es el Metano CH_4 y el Dióxido de Carbono CO_2 . Aunque el Metano es el segundo contribuyente en el calentamiento global. Muchos países han implementado el aprovechamiento del biogás para transformarlo en energía ayudando a disminuir los gases de efecto invernadero producido por el relleno sanitario. (Velez Pereira & Camargo Caicedo, 2009)

- 26 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

Tabla 3-5. Rango de la composición de Biogás generado en relleno sanitario. Adaptado de (Velez Pereira & Camargo Caicedo, 2009)

Parametros	unidad	Rango de variacion
Metano	%CH ₄	30-65
Dioxido de carbono	%CO ₂	20-40
Nitrogeno	%N ₂	5-40
Hidrogeno	%H ₂	1-3
Oxigeno	%O ₂	0-5
Argon	%AR	0-0,4
Sulfuro de hidrogeno	%H ₂ S	0-0,01
sulfato total	%S	0-0,01
cloruro total	%Cl	0,005
temperatura	°c	10-40
contenido de humedad	% humedad relativa	0-100
Masa	Kg/m ³	1,1-1,28
Nivel de energia minimo	MJ/Nm ³	10,8-23,3

La tierra ha venido presentando cambio en su temperatura, debido a múltiples factores que de una manera contribuyen al cambio climático, uno de esos factores son los gases de efecto invernadero. Cómo se conocen los rellenos sanitarios son el punto final donde llegan los RSU y que debido a su descomposición generan múltiples componentes contaminantes como los gases, el gas Metano CH₄, el cual se sigue produciendo incluso posterior al cierre del relleno sanitario. La temperatura de la tierra es la relación entre la energía que recibe del sol y el calor almacenado e irradiado por la tierra, del que influye mucho el hombre por contribuir de forma consciente o inconsciente durante sus actividades diarias a generar gases invernadero. (Pinzon Uribe, 2010)

La alimentación del hombre en siglos anteriores era más sana y su proceso de descomposición era sencilla, al igual era práctico con las herramientas que necesitaba para subsistencia diaria, utilizando lo que existía en su entorno de origen natural (madera,

hueso, algodón, etc.). Pero a medida que el tiempo pasa el hombre va buscando medios que le faciliten cubrir sus necesidades sin desgastarse.

Se estima que el incremento de los RSU inició en la Edad media, debido al crecimiento de la población. También para ese tiempo no existía lugar para la disposición final de los RSU, lo que permitió que los RSU fueran arrojados a las calles, generando vectores de transmisiones de enfermedades, lo cual genero preocupación a las autoridades encargadas del medio ambiente.

Por primera vez se dio a conocer los rellenos a cielo abierto en el siglo XX, pero sin ningún tratamiento, el cual ocasionó contaminación en las capas inferiores del suelo, contaminando las aguas subterráneas producto del lixiviado que proviene de la descomposición de los residuos, los gases y los malos olores. Aunque en el año 70 las condiciones cambiaron desde el punto de vista que el grupo de gestión ambientalista se preocupara y estableciera normas que mejoraran el proceso de disposición de los residuos, implementando métodos ingenieriles, como el de compactar por medio de capas, proteger la cimentación de relleno para evitar infiltración del lixiviado, y cubrir con una membrana la parte superior de los recibos. (Pinzon Uribe, 2010)

3.9 Teoría de Consolidación de Terzaghi

Los suelos presentan reducción en su volumen, ya sea por compactación o por consolidación. La compactación se hace con el fin de densificar el suelo para lograr mejorar la resistencia al esfuerzo cortante, disminuir su compresibilidad y su permeabilidad, esto se produce de una forma mecánica. Mientras que la consolidación es algo natural que toma tiempo ya sea de forma lenta o rápida, y depende mucho de la permeabilidad del suelo y de la compresibilidad del material. (Gómez Paniagua, 2009)

Terzaghi (1995), estableció tres clases de consolidación y son:

- **Consolidación instantánea o inicial:** Expulsión del gas que llena los vacíos del suelo, y se da de forma rápida.
- **Consolidación primaria:** Expulsión del agua de los poros de la masa y acompañada por la transferencia de la carga, que de ser soportada por el agua intersticial pasa a serlo por el esqueleto sólido del suelo.

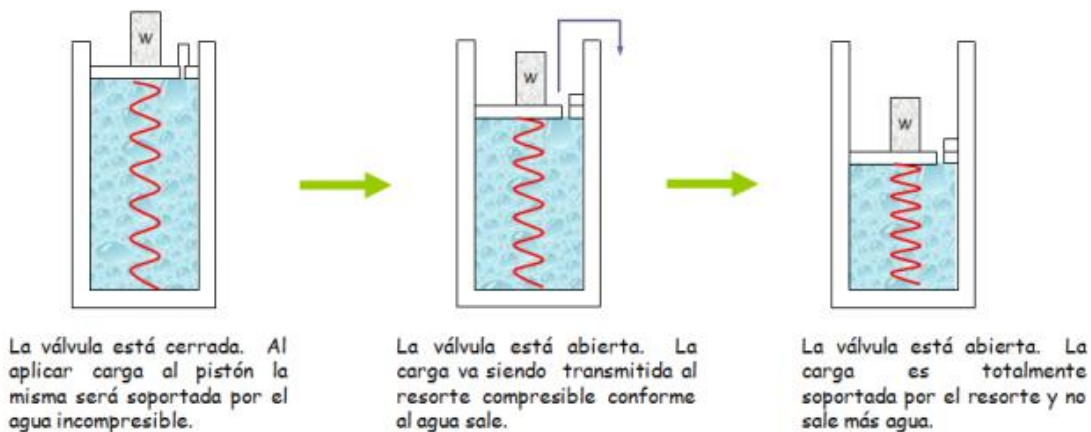
- 28 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

- **Consolidación secundaria:** principalmente al reajuste de la estructura interna de la masa de éste, después de que la mayor parte de la carga ha sido transferida del agua intersticial al esqueleto sólido del suelo.

ANALOGÍA DEL RESORTE

El suelo al aplicársele una carga, esta carga inicialmente es soportada por el agua de los poros debido a que el agua es prácticamente incompresible mientras que el suelo si lo es. Por esto, las partículas del suelo establecen entre si mayor contacto y van tomando gradualmente parte de la carga. Donde el suelo experimenta una reducción de volumen que se supone que es igual al volumen de agua desalojado. Al cabo de cierto tiempo la carga es totalmente soportada por el suelo y cesa la expulsión de agua. (Gómez Paniagua, 2009)

Figura 3-4: Analogía del Resorte. Tomado de (Gómez Paniagua, 2009)



3.10 Consolidación modelo de Zeevaert

3.10.1 Teoría de consolidación de Zeevaert

Según la teoría de consolidación del Dr. Zeevaert los suelos presentan dos propiedades:

- Elasto plástica.

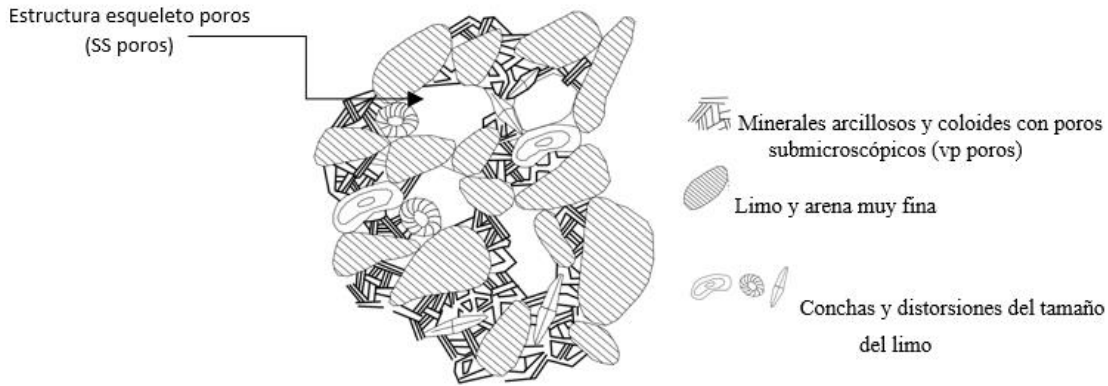
- Alta viscosidad intergranular

Este fenómeno de viscosidad intergranular es importante para suelos finos, y muy finos con baja permeabilidad como son: Arcillas, Arcillas limosas, limos arcillosos. (Zeevaert L. , 1983)

Terzaghi (1995) en su teoría de consolidación explica el fenómeno hidrodinámico de expulsión del agua gravitacional de los poros de la estructura esquelética, en la que no se considera el efecto de la viscosidad intergranular. A través de la teoría de la consolidación de Terzaghi se busca una relación aproximada para el cambio en la relación de vacíos en el tiempo para suelos saturados, y para un incremento del esfuerzo sostenido.

La consolidación en un estrato arcilloso **Figura 3-5**, presenta dos procesos simultáneos que son: deformación Elasto plástica, fenómeno hidrodinámico de expulsión de agua debido al exceso de las presiones intersticiales provocadas por la aplicación de una carga vertical, conocida por la teoría de consolidación de Terzaghi o consolidación primaria de Terzaghi, y por otro parte deformación plasto viscosa descrita por Zeevaert, o consolidación secundaria, que se produce por la reacomodación de partículas debido al efecto viscoso, la magnitud de esas deformaciones decrece con el tiempo,. El comportamiento del suelo puede reducirse a dos modelos: uno representado por la unidad Kelvin que simula la estructura esquelética (granos microscópicos) y el segundo, representado por la unidad Z, que simula la aglomeración de minerales arcillosos y coloides (granos submicroscópicos), que exhiben viscosidad intergranular no lineal. Ambas estructuras se encuentran saturadas. El cambio de volumen de estos dos sistemas se debe a un incremento de esfuerzos. (Zeevaert L. , 1984)

Figura 3-5. Estructura mezclada de arcilla limosa. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)



El suelo al ser sometido a un incremento de carga unitaria presentara un cambio volumétrico tanto en la estructura primaria $\Delta\epsilon_{ep}$ como la secundaria $\Delta\epsilon_{vp}$, dando como resultado el cambio volumétrico total. (Zeevaert L. , 1984)

Ecuación 1

$$\Delta\epsilon_v = \Delta\epsilon_{ep} + \Delta\epsilon_{vp}$$

3.10.2 Modelo Kelvin

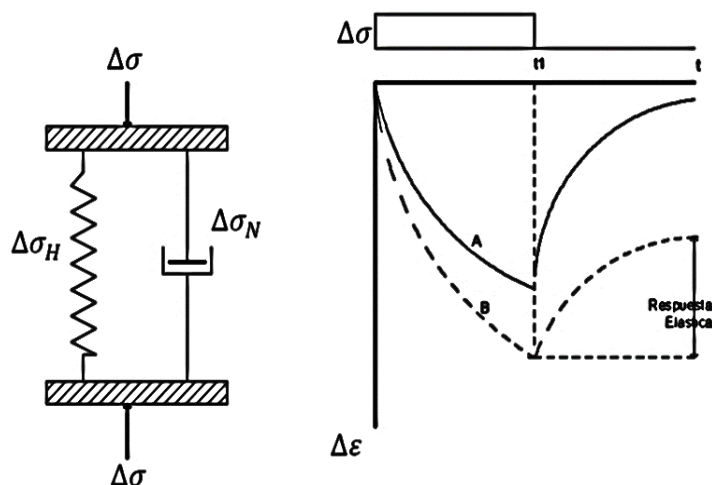
La unidad Kelvin es la conformación de dos elementos en paralelo, una es la unidad de Hooke que es un elemento resistente y capaz de tomar la carga permanente al final del proceso primario, y otra es la unidad de Newton que es el amortiguamiento de fluidez lineal.

Figura 3-6. (Zeevaert L. , 1984)

La unidad elástica no se deforma inmediatamente, si no gradualmente a medida que el elemento viscoso lo permita, de tal manera que después de un tiempo largo alcance una deformación elástica total bajo un esfuerzo, una vez se elimine el esfuerzo aplicado, sufrirá un incremento en la relación de vacío en función al tiempo (**Figura 3-6**, curva A). Este fenómeno se observa en los suelos debido al efecto hidrodinámico de expulsión de agua

gravitacional de los poros según la teoría de consolidación. Tras la eliminación del esfuerzo, sólo la respuesta elástica es retardada por la fluidez lineal, como se muestra por la curva B. (Zeevaert L. , 1983)

Figura 3-6. Modelo Reológico de Unidad Kelvin. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)



La unidad Kelvin **Figura 3-6** contendrá los elementos Elasto plástico capaces de tomar un incremento de esfuerzo. Su comportamiento es igual al modelo reológico de Terzaghi, excepto que el valor de α_e representa el comportamiento elástico que se convertirá en α_{ep} como el parámetro que representará el comportamiento Elasto plástico bajo el incremento de esfuerzo. (Zeevaert L. , 1983)

Para este modelo reológico la condición de equilibrio es:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 2} \quad \Delta\sigma &= \Delta\sigma_H + \Delta\sigma_N \\ \Delta\epsilon &= \Delta\epsilon_H = \Delta\epsilon_N \end{aligned}$$

De esfuerzo – deformación volumétrica unitaria

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 3} \quad \Delta\epsilon_H &= \alpha_e \cdot \Delta\sigma_H \\ \Delta\epsilon_N &= \phi_a \cdot \Delta\sigma_N \cdot t \end{aligned}$$

$\phi_a = \text{viscosidad del material}$

$\alpha_e = \text{Representando el comportamiento elastico}$

α_{ep} = representando el comportamiento elasto

– plastico bajo el incremento de esfuerzo

Resolviendo $\Delta\epsilon$ se tiene la siguiente ecuación diferencial de primer orden con coeficiente:

Ecuación 4
$$\Delta\epsilon + \frac{\phi_a}{\alpha_e} \Delta\epsilon = \phi_a \cdot \Delta\sigma$$

Se integra:

Ecuación 5
$$\Delta\epsilon = \alpha_e \cdot \Delta\sigma \cdot (1 - e^{-\phi_a t / \alpha_e})$$

Si se tiene un número grande de unidades, distribuimos el término de la sumatoria debemos sumar todas las contribuciones que hace el término α_e por lo tanto:

Ecuación 6
$$\Delta\epsilon = \Delta\sigma \cdot (\sum \alpha_e - \sum \alpha_e e^{-\phi_a t / \alpha_e})$$

Se define la variable $\alpha_{ep} = \sum \alpha_e$ y lo sustituimos solo en el primer término como:

Ecuación 7
$$\Delta\epsilon = \alpha_{ep} \cdot \Delta\sigma \cdot \left(1 - \sum \frac{\alpha_e}{\alpha_{ep}} e^{-\phi_a t / \alpha_e}\right)$$

Tenemos por otro lado la ecuación establecida por Terzaghi en su teoría de consolidación:

Ecuación 8
$$\Delta\epsilon = m_{ep} \cdot \Delta\sigma \cdot \left(1 - \sum \frac{2}{M} e^{-M \cdot T_V}\right)$$

En donde $T_V = C_V \cdot t / H^2$ es el factor tiempo primario, y $M = (2m - 1)^2 \pi^2 / 4$

Existe una equivalencia entre el modelo de kelvin y Terzaghi analizando las ecuaciones 7 y 8, de la cual se deduce:

Ecuación 9
$$\frac{\alpha_e}{\alpha_{ep}} = \frac{2}{M} \quad y \quad \frac{\phi_a}{\alpha_e} = \frac{M C_V}{H^2}$$

Donde se obtiene:

Ecuación 10

$$m_{ep} = \alpha_{ep} \quad y \quad \frac{\phi_a}{\alpha_{ep}} = \frac{2C_V}{H^2}$$

Del análisis anterior queda establecido para la compresión el uso de la función de Terzaghi;
 $F(T_V)$

Ecuación 11

$$\Delta\epsilon_{ep} = m_{ep} \cdot \Delta\sigma \cdot F(T_V)$$

$\Delta\epsilon_{ep}$ = Deformación volumétrica – Elasto plástica.

$\Delta\sigma$ = Incremento de esfuerzo.

m_{ep} = Coeficiente de compresibilidad volumétrica – Elasto plástico

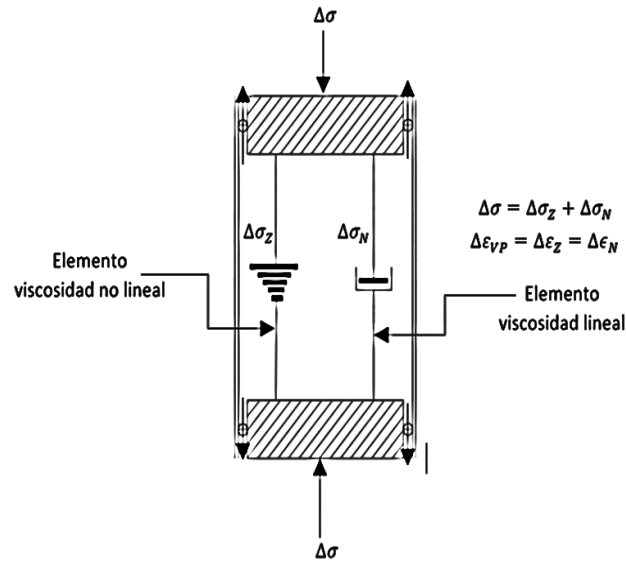
$F(T_V)$ = Grado de consolidación

3.10.3 Unidad Z

El modelo reológico designado unidad Z por Dr. Leonardo Zeevaert, es muy similar al modelo reológico de Kelvin, el cual consta de dos elementos en paralelos, uno hace referencia a una fluidez newtoniano viscosa no lineal que representa la fluidez intergranular que disminuye con el tiempo, y el otro representa un amortiguamiento newtoniano de fluidez que retarda la deformación volumétrica unitaria de la estructura secundaria. **Figura 3-7.** (Zeevaert L. , 1983)

- 34 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

Figura 3-7. Modelo Reológico de Unidad Z. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)



Para este modelo reológico la condición de equilibrio es:

Ecuación 12

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_N$$

$$\Delta\epsilon_{VP} = \Delta\epsilon_z = \Delta\epsilon_N$$

Además, las expresiones de un elemento de viscoso no lineal:

Ecuación 13

$$\frac{d}{dt} \Delta\epsilon_{VP} = \left(\phi_f + \frac{a}{b+t} \right) \Delta\sigma_z$$

y para un elemento de viscosidad lineal:

Ecuación 14

$$\frac{d}{dt} \Delta\epsilon_{VP} = \phi_a \Delta\sigma_N$$

El parámetro ϕ_a hace referencia a la fluidez del agua gravitacional en los poros. De las ecuaciones 13 y 14 despejamos $\Delta\sigma_z$ y $\Delta\sigma_N$, para luego sustituirla en la ecuación 12, y así se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 15
$$\Delta\sigma = \left[\frac{1}{\phi_f + \frac{a}{b+t}} + \frac{1}{\phi_a} \right] \frac{d}{dt} \Delta\epsilon_{VP}$$

Realizando operaciones algebraicas las siguientes expresiones se pueden escribir:

Ecuación 16
$$A = \left(b + \frac{a}{\phi_f} \right) \frac{\phi_f \cdot \phi_a}{\phi_f + \phi_a}, \quad B = b + \frac{a}{\phi_f + \phi_a}$$

$$\phi_{af} = \frac{\phi_f \cdot \phi_a}{\phi_f + \phi_a}$$

Resolviendo lo anterior se obtiene la siguiente ecuación diferencia:

Ecuación 17
$$\frac{d}{dt} \Delta\epsilon_{VP} = \left[\frac{1}{B+t} + \phi_{af} \frac{t}{B+t} \right] \Delta\sigma$$

Ahora integramos:

Ecuación 18
$$\Delta\epsilon_{VP} = \left[(A - \phi_{af}B) \log(B+t) + \phi_{af} \cdot t \right] \Delta\sigma + C$$

Considerando la aplicación de una carga instantánea $\Delta\sigma$, $t = 0$ y $\Delta\epsilon_{VP} = 0$; entonces llamamos $A_1 = (A - \phi_{af}B)$, de lo anterior puede ser escrito de la siguiente manera:

Ecuación 19
$$\Delta\epsilon_{VP} = \left[A_1 \log \frac{B+t}{B} + \phi_{af} \cdot t \right] \Delta\sigma$$

El ϕ_{af} representa una fluidez lineal creep, sin embargo, para suelos lateralmente confinado, el valor de ϕ_{af} es despreciable:

Ecuación 20
$$A = A_1 = a, \quad B = b + \frac{a}{\phi_a}, \quad \phi_{af} = 0$$

Ecuación 21
$$\Delta\epsilon_{VP} = a \log \frac{b + \frac{a}{\phi_a} + t}{b + \frac{a}{\phi_a}} \cdot \Delta\sigma$$

- 36 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.
-

Sustituyendo de la ecuación 10 reemplazamos en 11 y se obtiene la ecuación del comportamiento intergranular plasto-viscoso con fluidez lineal:

Ecuación 22

$$\Delta\epsilon_{VP} = a \log \frac{\frac{a}{\phi_a} + t}{\frac{a}{\phi_a}} \cdot \Delta\sigma$$

El retardo de la deformación volumétrica por efecto de la viscosidad lineal y viscosidad no lineal, de una carga aplicada rápida y sostenida es la obtenida por medio de los modelos reológico del modelo de kelvin y unidad Z como se van a escribir a continuación:

- a) Retardo del comportamiento Elasto plástico, con viscosidad lineal de la teoría de Terzaghi:

Ecuación 23

$$\Delta\epsilon_{ep} = m_{ep} \Delta\sigma F(T_v)$$

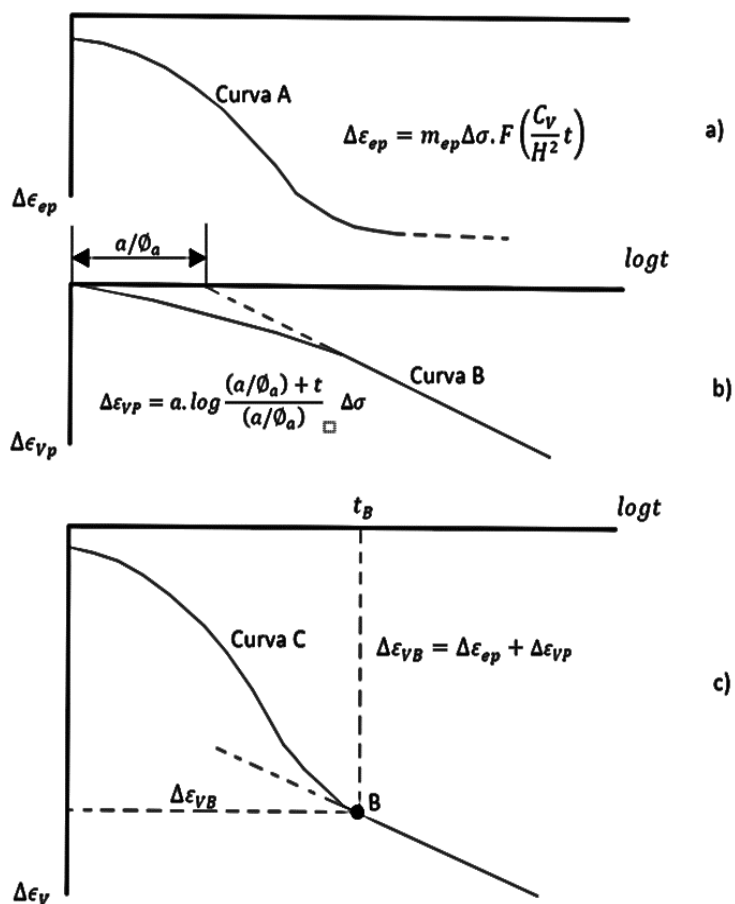
- a) Retardo del comportamiento intergranular plasto-viscoso con fluidez lineal de la unidad Z:

Ecuación 24

$$\Delta\epsilon_{VP} = a \log \frac{\frac{a}{\phi_a} + t}{\frac{a}{\phi_a}} \cdot \Delta\sigma$$

De las ecuaciones anteriores obtenemos las siguientes graficas:

Figura 3-8. Componente Elasto Plástico y plasto-viscoso en la compresión de un suelo sedimentado. Adaptado de (Zeevaert L. , 1983)



Podemos decir que la deformación volumétrica total es igual a:

Ecuación 25
$$\Delta \epsilon_v = \Delta \epsilon_{ep} + \Delta \epsilon_{vp}$$

A partir de la deducción obtenida de Kelvin- Terzaghi, los parámetros se definen como:

m_{ep} = Coeficiente de compresibilidad volumétrica representando el fenómeno Elasto plástico

m_{vB} = Coeficiente de compresibilidad volumétrica incluyendo Elasto plástico y viscosidad intergranular en el tiempo t_B

$m_t = 2.31 a$ Coeficiente de viscosidad intergranular obtenida a partir de la pendiente de la ley logarítmica de la base 10 que representa el comportamiento de consolidación secundaria: $m_t = \frac{C_t}{2H} \Delta\sigma$

$\Delta\epsilon_v$ =deformación volumétrica total

$\Delta\epsilon_{ss} = \Delta\epsilon_{ep}$ = deformación volumétrica Elasto plástica

$\Delta\epsilon_{vp}$ =deformación volumétrica viscosidad intergranular

$\Delta\sigma$ =incremento de esfuerzo

$$\beta = \frac{m_t}{m_{ep}} \quad y \quad \alpha = \frac{m_t}{m_{vB}}$$

La aparente fluidez lineal es $\phi_a = 2m_{ep} \frac{C_v}{H^2}$

Reemplazamos

Ecuación 26
$$\Delta\epsilon_v = \left\{ m_{ep} \Delta\sigma F\left(\frac{C_v}{H^2} t\right) + m_t \log \left[1 + \frac{4.62}{\beta} \left(\frac{C_v}{H^2} t\right) \right] \right\} \Delta\sigma$$

Donde $T_v = \frac{C_v}{H^2} t$

Ecuación 27
$$\Delta\epsilon_v = \left\{ m_{ep} \Delta\sigma F(T_v) + m_t \log \left[1 + \frac{4.62}{\beta} (T_v) \right] \right\} \Delta\sigma$$

3.11 Relación de la teoría de consolidación de Zeevaert con los RSU.

Para el Dr. Zeevaert la estructura de los suelos está conformada por dos estructuras reológicas diferentes que son: unidad kelvin “K” que representa a los microporos, y unidad “Z” a los sub microporos, que están en un estado completamente saturada. Los microporos hacen referencia a la estructura del suelo que están relacionado con la consolidación primaria que presenta una fluidez lineal, y una compresión debido al retardamiento hidrodinámico llamado fenómeno Elasto plástico, que lo produce el agua gravitacional que

hay entre los microporos, generando un cambio volumétrico que finaliza cuando se disipación el exceso de presión de poros del agua dentro de los poros y microporos, alcanzando así un grado de consolidación. Aun así, se muestra la continuidad de pequeños cambios volumétricos que se le denomina consolidación secundaria, en este caso el agua de los microporos presenta unas fuerzas de atracción o fuerzas electromagnéticas muy fuertes que generan el agua viscosa que está adherida en los sub microporos que forman aglomeraciones entre los microporos, dicha magnitud disminuye con el tiempo, y este comportamiento se conoce como fenómeno viscos plásticos. (Zeevaert L. , 1983)

Para que se genere el proceso de drenaje del agua viscosa que está entre los sub microporos a los microporos esta depende de la temperatura, y la mineralogía de las partículas y se requieren grandes esfuerzos.

Estas dos estructuras están conectadas en serie lo cual quiere decir que dicha carga que sea sometida, el cambio volumétrico que genere será la sumatoria de consolidación primaria y secundaria son simultaneas.

La anterior conceptualización puede ser numéricamente equivalente con los RSU, la consolidación primaria presentaría el mismo comportamiento debido a la disipación de los excesos de la presión de poros que se va generando a medida que se va aplicando carga vertical de los RSU. La consolidación secundaria en los suelos está relacionada con el proceso de drenaje de las aguas viscosas, que se hace numéricamente equivalente al proceso de descomposición de los residuos, donde se puede asociar a un proceso retardado en el tiempo no como un proceso físico debido a grandes esfuerzos, si no a un proceso químico por la descomposición de los RSU.

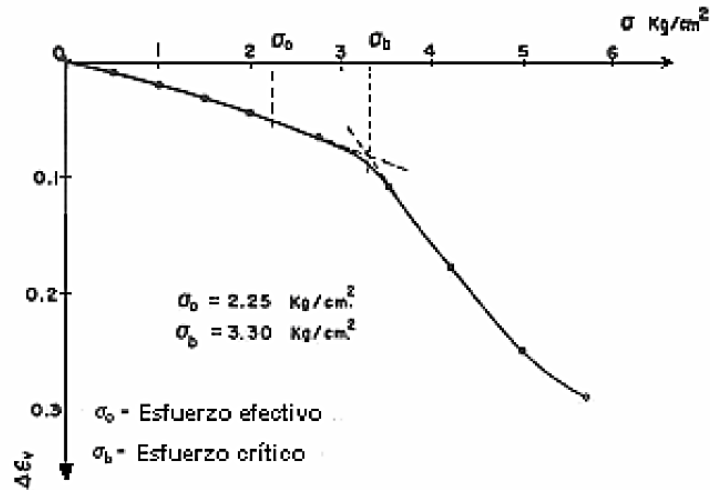
3.12 Curvas de consolidación

Una curva típica de compresibilidad se muestra en la **Figura 3-9**, la cual está graficada en escala logarítmica. La parte recta de la curva representa la compresión del suelo hasta el punto σ_b , donde se presenta un cambio notable de pendiente, al cual se refiere Zeevaert como el esfuerzo crítico. En este nivel de esfuerzos la estructura del suelo sufre un colapso seguido por un nuevo comportamiento estructural, el esfuerzo crítico σ_b está usualmente localizado en la parte derecha del esfuerzo efectivo σ_o por lo cual muestra características típicas de un suelo preconsolidado. Zeevaert ha encontrado que en lugares donde la

40 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

reducción de los niveles piezométricos del agua ha incrementado el esfuerzo efectivo, se observa un incremento del esfuerzo crítico, siendo siempre mayor que el esfuerzo efectivo. (Umaña Romero, 2008)

Figura 3-9. Curva de compresibilidad. Adaptado de (Umaña Romero, 2008)



4. Ubicación del relleno sanitario La Pradera

4.1 Generalidades

El relleno sanitario La Pradera se encuentra ubicado en el municipio de Don Matías Departamento de Antioquia a 57 Km de la ciudad de Medellín, inició sus operaciones el 6 de junio de 2003 y atiende los municipios de Medellín, Guadalupe, Barbosa, Itagüí, Sabaneta, Salgar, Cisneros, Heliconia, Caldas, la Estrella, Bello, Copacabana, Girardota, Guarne, Santa Rosa de Osos, El Retiro, San Jerónimo, Fredonia, Carolina, Rionegro, Gómez Plata, Titiribí, Venecia, y Yolombó . (Empresas Varias de Medellín, 2014)

Figura 4-1. Vista General Relleno Sanitario La Pradera. Adaptado de Imagen satelital tomada de Google Earth.



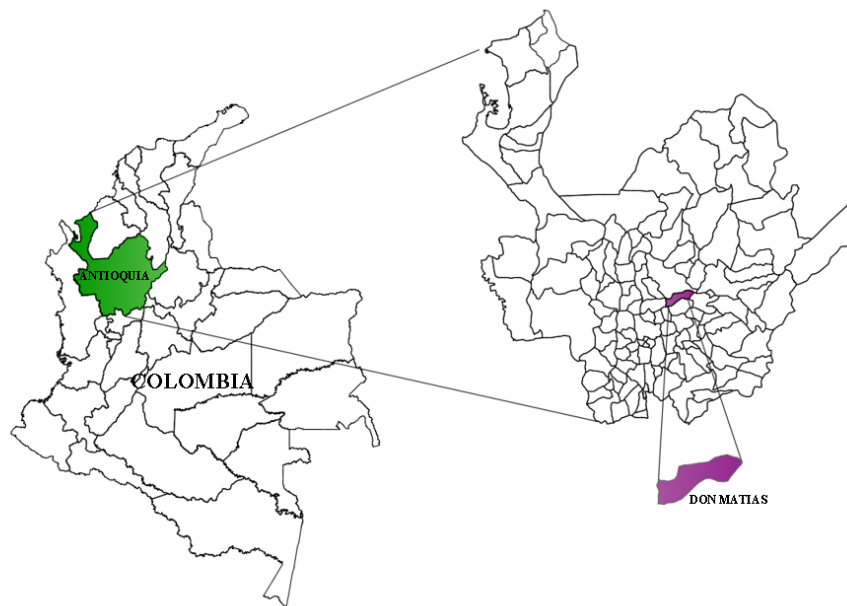
- 42 Desarrollar un Modelo analítico para predecir los asentamientos y los factores de rendimientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario.

Se encuentra situado en un lote de 354 hectáreas en las fincas La Pradera y Altair, operación de 3000 ton/día.

4.2 Localización del Relleno sanitario La Pradera

Está ubicado en jurisdicción del municipio de Don Matías al noroeste del departamento de Antioquia aproximadamente a 60 kilómetros de la cabecera municipal de Medellín en las coordenadas 869600 N. 1.213.400 E del IGAC, y una elevación media de 1.100 msnm en inmediaciones del municipio de Barbosa, vereda La Pradera, en un área aproximada de 22.8 hectáreas delimitadas por las subcuentas de las quebradas La Música al noroeste del lote y la Piñuela al suroeste.

Figura 4-2. Ubicación Municipio Don Matías. Modificado de Tomada de <https://espanol.mapsofworld.com/continentes/mapa-de-sur-america/colombia/antioquia.html>



4.3 Vida Útil de Relleno

En el caso del Relleno Sanitario la Pradera, cuenta con 3 vasos cada uno con diferentes capacidades:

Tabla 4-1. Capacidad y Fechas de inicio y clausurado del Relleno Sanitario La Pradera.

NOMBRE DEL VASO	FECHAS DE INICIO DE OPERACIÓN	FECHAS FINALES DE CLAUSURADOS	CAPACIDAD DEL VASO M3	REFERENCIAS
Carrilera	Junio 2013	Julio 2004	545.454	(INTEINSA I. , 2019)
Música	Julio 2004	Noviembre 2015	3.598.946	(INTEINSA I. I., 2017)
Altaír	Noviembre 2015	Operando	5.543.500	(INTEINSA I. I., 2017)
Cumbre- La Piñuela	Proyección			(INTEINSA I. I., 2017)

Para la disposición de los residuos según las licencias otorgadas por CORANTIOQUIA.

5. Etapas del relleno sanitario la Pradera

Los residuos sólidos se producen directamente de las diversas actividades desarrolladas por el hombre, originado desde el hogar hasta la industria, incluyendo las actividades comerciales, académicas, agrícolas entre otras. Dichos residuos se pueden clasificar en: Residuos sólidos biodegradables, reciclables, inertes, comunes, peligrosos. (Area metropolitana del valle Aburrá, 2006)

La ciudad de Medellín a lo largo de su historia ha contado con diferentes lugares para disponer los residuos, como Moravia, Curva de rodas, y actualmente el destino final de los RSU es el relleno sanitario La Pradera lugar ubicado en el municipio Don Matías. (Area metropolitana del valle Aburrá, 2006)

La **Figura 5-1** se puede observar el ciclo de producción y disposición de los residuos sólidos, iniciando por la generación, origen o producción, continuando con el proceso de recolección, transporte, reciclaje y almacenamiento. Cada una de las etapas se describen a continuación.

Figura 5-1. Etapas operacional del relleno sanitario La Pradera. Adaptado de (Bloquesautocad, 2019) y (Pavimentar, 2016).

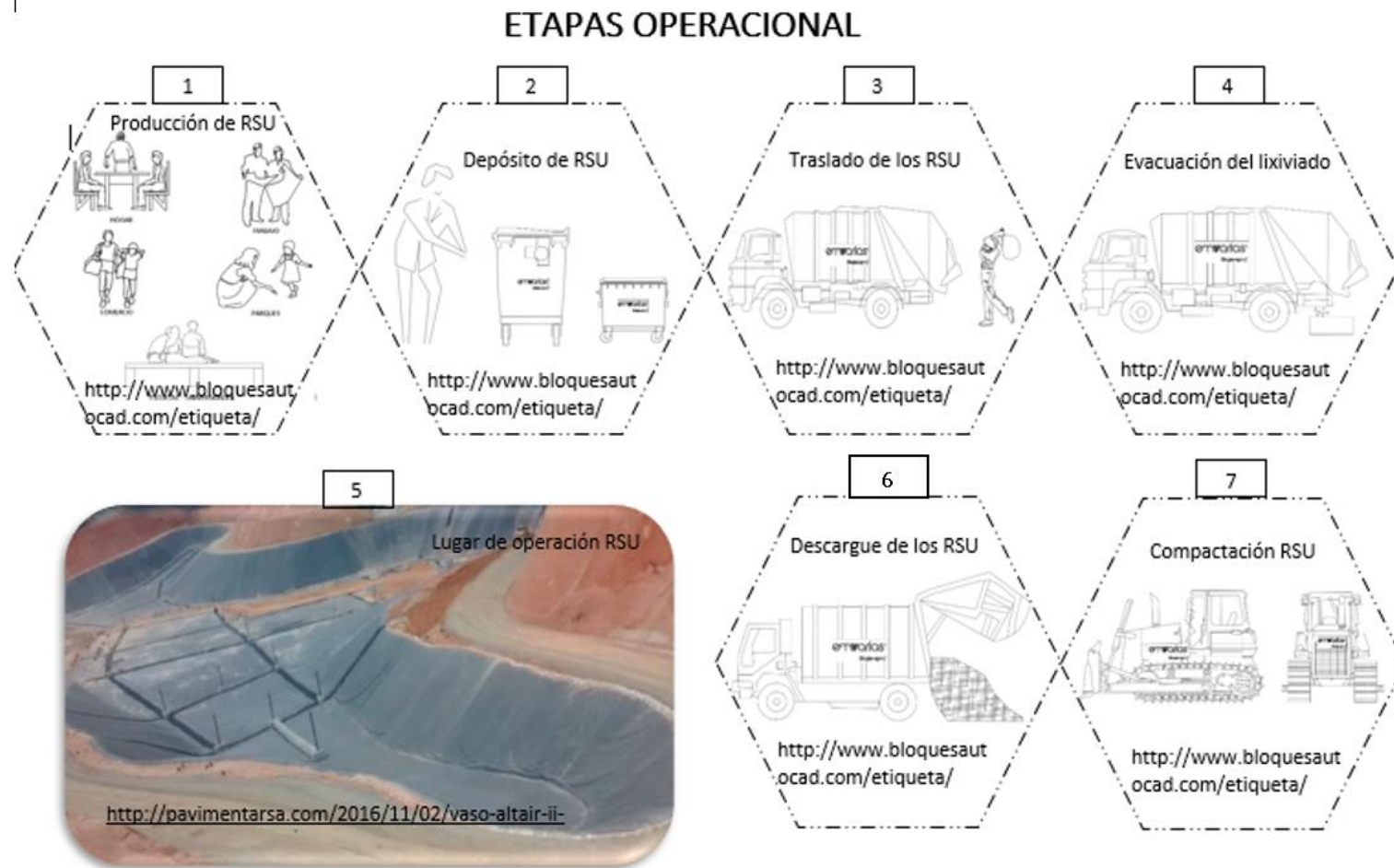
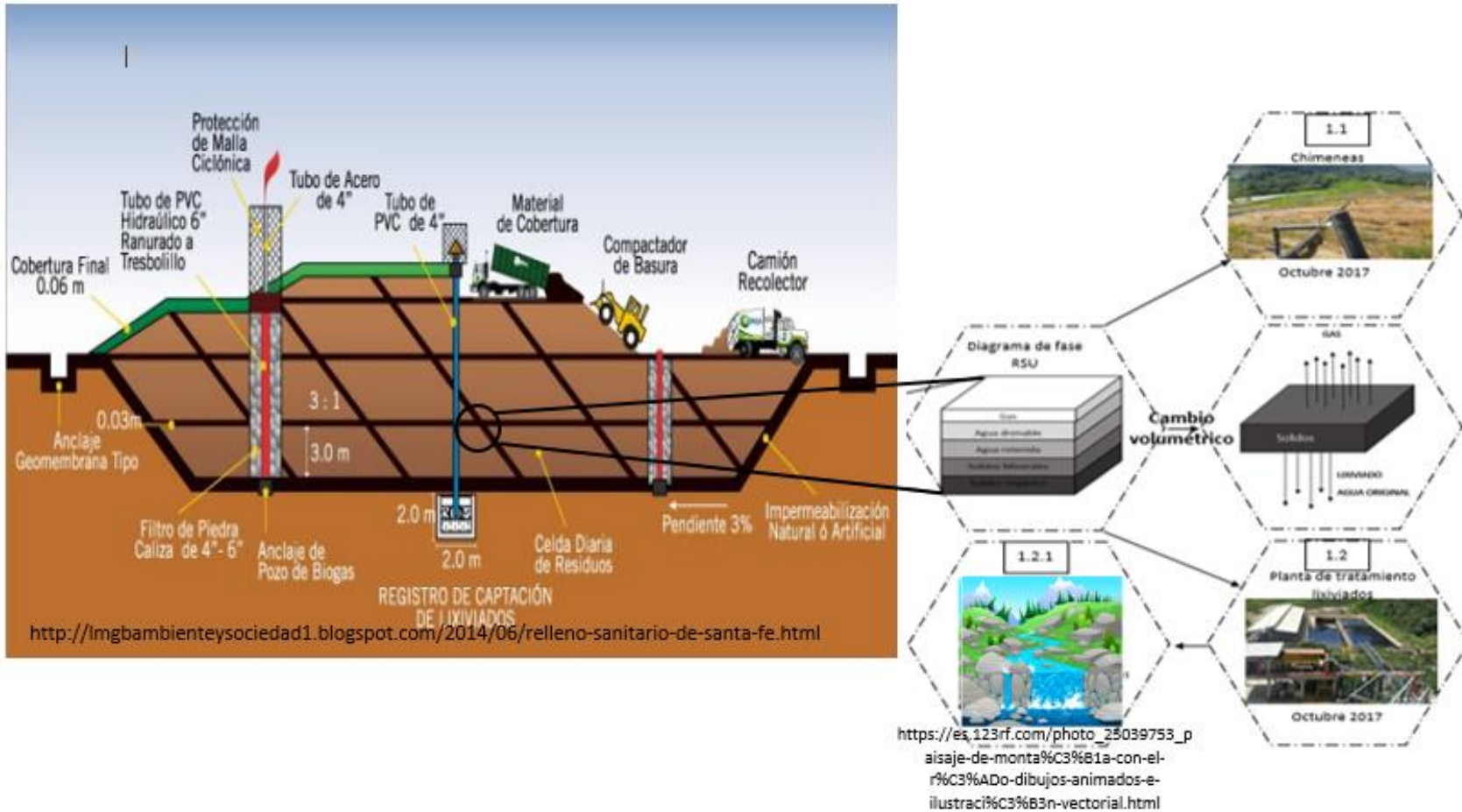


Figura 5-2. Etapas de tratamientos del relleno sanitario La Pradera. Adaptado de (Zekkos, 2008)

ETAPAS DE TRATAMIENTOS



5.1 Etapa operacional

1. Inicio de producción de los residuos.

Todos los días el ser humano produce residuos sólidos como subproducto de operaciones necesarias para sus necesidades. El incremento de la población es directamente proporcional a esas necesidades lo que indica que a diario será mayor el volumen de residuos que llegaran al relleno sanitario. Igualmente, la evolución de las zonas urbanas o rurales con alguna densidad poblacional, cambia la dinámica de producción de residuos, como por ejemplo variar la mayor proporción de orgánicos a reciclables.

2. Primer punto deposito Desecho de los residuos

En las ciudades hay puntos locales de recolección, en esquinas, edificios, unidades residenciales o estratégicamente ubicados, que tiene como nombre recolector de RSU, en ocasiones es, común encontrar los residuos sólidos con una clasificación primaria, como se muestra en la **Figura 5-3**, lo cual es ideal debido a que permite el máximo aprovechamiento para reutilizar algunos objetos, así eliminar adecuadamente y optimizar el proceso.

Figura 5-3. Recipientes para depositar la basura. Adaptado de (Area metropolitana del valle Aburrá, 2006)



3. Recolección de los desechos sólidos en diferentes lugares de la ciudad.

En el caso de la ciudad de Medellín la empresa encargada de mantener la ciudad limpia y disponer los vehículos para recolector los desechos sólidos es Emvarias. Hay diferentes empresas encargas de suplir la demanda en otros municipios del departamento de Antioquia aledañas al Valle de Aburra, pero el destino final es el mismo, el relleno sanitario La Pradera. Los municipios autorizados de verter en el relleno sanitario son: (Empresas Varias de Medellín, 2014)

- Medellín
- Barbosa
- Bello
- Caldas
- Cisneros
- Carolina
- Copacabana
- Fredonia
- Girardota
- Gómez plata
- Guarne
- Guadalupe
- Heliconia
- Itagüí
- La Estrella
- El Retiro
- Rionegro
- Sabaneta

- Salgar
- Titiribí
- Venecia
- San Jeronimo
- Yolombo

4. Primera evacuación de lixiviado crudo.

Una vez terminado el proceso de recolección, al llegar al relleno los vehículos que contienen los residuos sólidos realizan una primera parada en los cárcamos, los cuales se encuentra localizados transversal al eje de la vía, La Pradera cuenta con dos vías de acceso y dos cárcamos, uno en cada vía. Los cárcamos cumplen con la funcionalidad de captar el lixiviado crudo que contiene partículas gruesas proveniente de los residuos, este lixiviado, es producido durante el recorrido en la ciudad y transporte al relleno, buscando disminuir la humedad de los residuos sólidos antes de ser descargados en el relleno.

5. Lugar de operación de relleno

Antes de que el recolector realice la evacuación de los residuos sólidos, en el sitio de operación, deben estar lista la etapa de adecuar, que consiste en perfilar los taludes, instalación de la geomembrana, los filtros, en cada intersección de los filtros de la base localizados longitudinal y transversalmente, formando una retícula, en cada intersección de los filtros se coloca una chimenea y una parte de la instrumentación geotécnica.

6. Organización y compactación de los residuos sólidos.

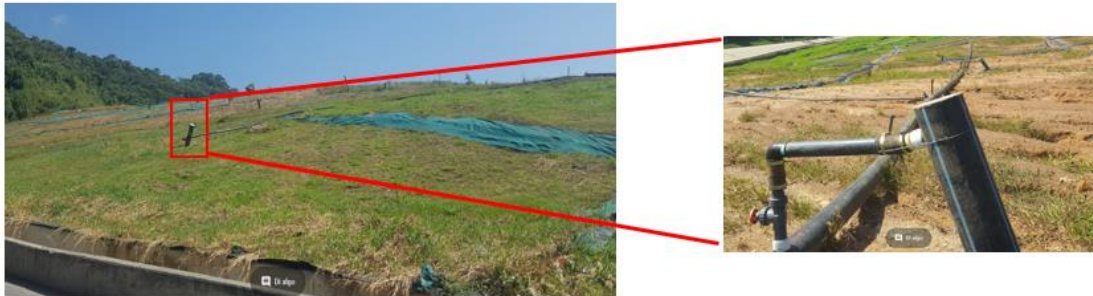
Con la ayuda del bulldozer se mueve la basura, para luego ser compactada con el cilindro vibrocompactador pata de cabra.

5.2 Etapa de tratamiento

1.1 Tratamiento del gas

El gas es proveniente de la descomposición de la materia orgánica, depositada en el relleno sanitario. Esta es tratada por medio de unas chimeneas que al salir el gas al aire libre este es quemado para minimizar la contaminación al medio ambiente.

Figura 5-4. Chimeneas del relleno sanitario la Pradera, vaso La Música ya clausurado. Octubre de 2017



1.2 Tratamiento del lixiviado

Cada una de las etapas que se lleva a cabo en un relleno sanitario son importantes, en el caso del tratamiento del lixiviado que requiere de unos procesos químicos debido a la carga contaminante, para lograr obtener un resultado final que cumpla con la normativa para ser vertido finalmente en el río. Esto se realiza por medio de una **planta de tratamiento de lixiviado** que tiene la función de recibir todo el caudal que sea generado en el relleno. El diseño de estas plantas además de considerar el caudal, tiene en cuenta otros elementos fundamentales como es la composición de la basura, la forma de operación del relleno y las condiciones climáticas del lugar, que afectan directamente la producción del lixiviado, tanto en cantidad, el tiempo de generación, composición química y biológica.

El relleno sanitario La Pradera dispone de una planta de tratamiento de lixiviado que recibe un caudal de 12 litros/min, proveniente de los tres vasos Carrilera, Altair y La música.

6. Sistema de instrumentación

6.1 Instrumentación geotécnica

Según (Dunnicliff, 1982), el nacimiento de la instrumentación geotécnica, como una herramienta para ayudar a las observaciones de campo, se produjo en los años 1930 y 1940. Lo fundamental de tener el relleno sanitario instrumentado, es garantizar su operación, permitiendo monitorear los diversos equipos que arrojan diversas variables, que directa o indirectamente están asociadas con la estabilidad de los vasos. Entre estos equipos de monitoreo se encuentran

- Puntos de control topográfico
- Sensores de asentamiento
- Piezómetro de hilo vibrátil
- Estación meteorológica
- Caudales de lixiviados
- Inclínómetros
- Termómetros.

Tabla 6-1. Instrumentación del relleno sanitario La Pradera.

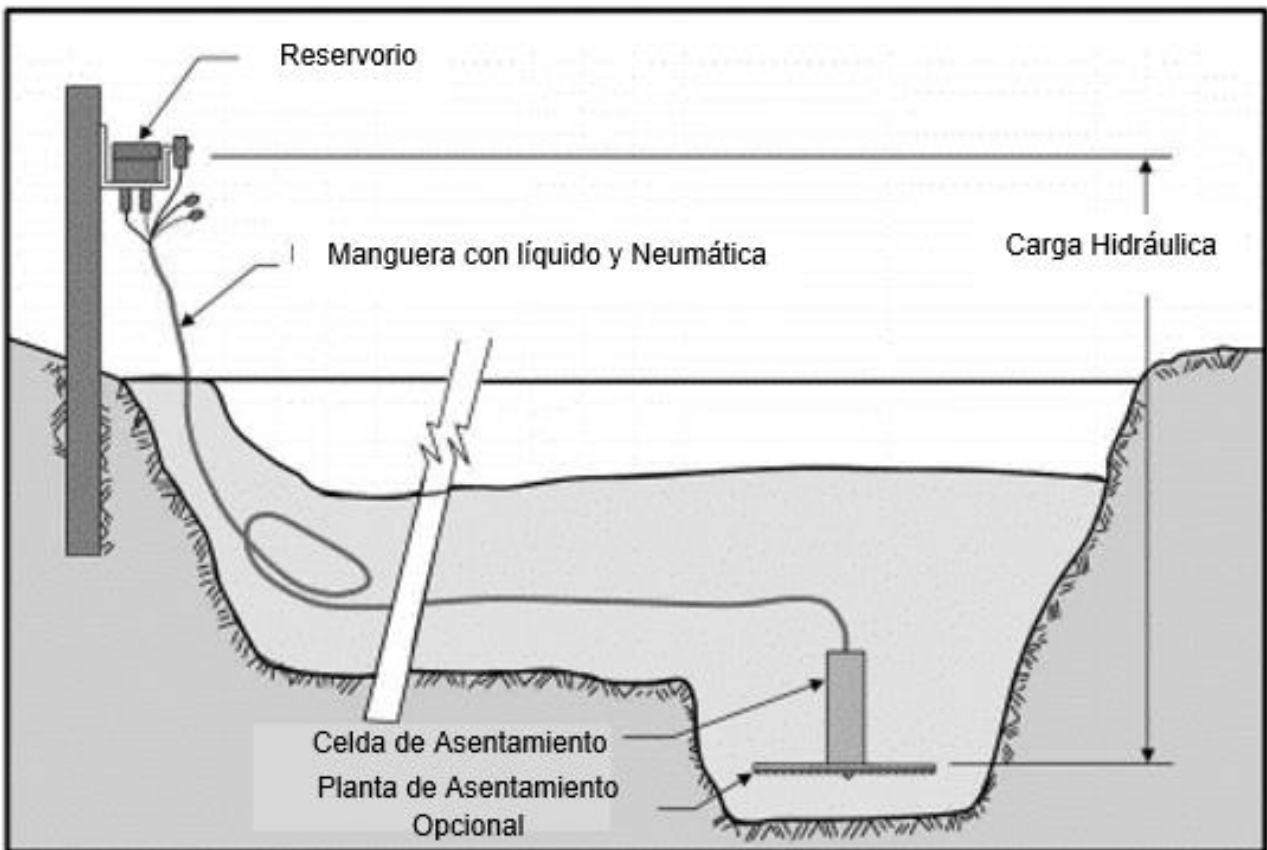
Instrumento	Ubicación	Objetivo principal
Piezómetros de alambre vibrátil	Residuos solidos	Mide presión de poro en el interior del relleno.
	Fundación	Controlar la cota piezométrica, ya que se puede generar infiltración de lixiviado.
	Dique contención	
Inclinómetros	Dique contención	Controlar estabilidad del dique
	Alrededor del vaso	Controlar los desplazamientos para prevenir un deslizamiento.
Pozos de observación	Alrededor del vaso	Medir las presiones de poro alrededor de cada vaso y las contaminaciones.
Celdas de asentamientos	Residuos solidos	Medir las deformaciones internas del relleno.
Termómetros	Residuos Solidos	Mide temperatura en el interior del relleno. Este termómetro va internamente en el equipo de Piezómetro de alambre vibrátil.

Monitoreo de los movimientos de masas inestables. Los métodos basados en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Su fundamento se basa en la medida de las variaciones de las coordenadas de una serie de puntos durante un determinado intervalo de tiempo. Para ello se han de repetir las medidas de las coordenadas (-X, -Y, -Z) de los puntos de control, varias veces, en diferentes instantes, para así determinar si se ha producido o no variación en cualquiera de las tres direcciones del sistema de referencia. (Castrillon Torres & Quintero Franco, 2012)

6.2 Sensor de asentamiento

La celda de asentamiento VW es un aparato utilizado para medir asentamientos dentro de terraplenes, rellenos y suelos de cimentación. Proporcionan un punto único de medida de asentamiento. La celda de asentamiento consiste de tres componentes: un tubo lleno de líquido, un transductor de presión y un reservorio de líquido. Un extremo del tubo está conectado al transductor de presión, el cual está embebido en el suelo. El otro extremo del tubo está conectado a un reservorio, el cual está localizado a una altura superior en suelo estable, lejos de la actividad de la construcción. (Alva Hurtado & Escalaya Advincula, 2011)

Figura 6-1. Detalle de instalación de celda de asentamiento. Adaptado de (Alva Hurtado & Escalaya Advincula, 2011)



6.3 Piezómetros

Los piezómetros son instrumentos empleados para monitorear las presiones del agua, necesarios en los controles de colocación del material de relleno, la predicción de la estabilidad de los taludes, el monitoreo de la infiltración y la verificación de modelos de flujo. (Alva Hurtado & Escalaya Advincula, 2011)

Piezómetro de Hilo Vibrátil consisten en un diafragma metálico que separa la presión del agua del sistema de medida, un filtro poroso que actúa de material permeable y que permite el paso del agua desde el exterior al interior del piezómetro, un cable tensionado que está unido al punto central de un diafragma que puede ser metálico o de cauchos especiales. Las deflexiones del diafragma ocasionan cambios en la tensión del cable, la cual es medida por la frecuencia de vibración del cable y convertida en presión. (Suarez, 2009)

El principal uso de los piezómetros de hilo vibrátil, se relaciona con la facilidad para incorporarlos a los sistemas automáticos de adquisición de datos y la posibilidad de transmitirlos a grandes distancias. (Suarez, 2009)

En todos los vasos de La Pradera están distribuidos los piezómetros en la masa de residuos, fundación y en el dique de contención. Permitiendo monitorear las presiones y las temperaturas.

Figura 6-2. Piezómetro de hilo vibrátil. Adaptado de (Suarez, 2009)

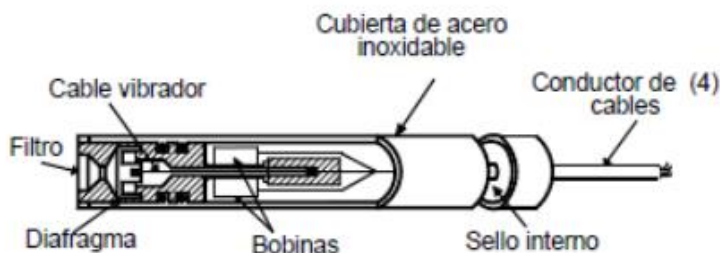


Figura 6-3. Piezómetro de hilo vibrátil. Octubre 2017.



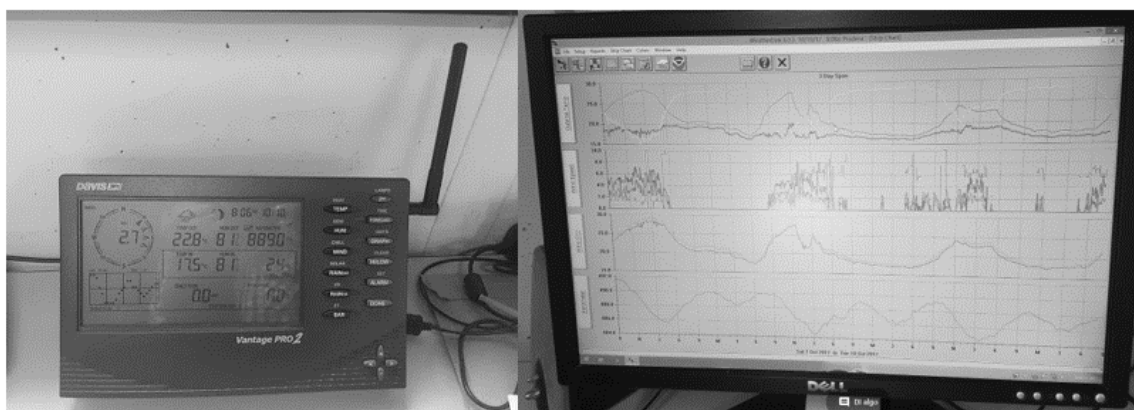
6.4 Estación meteorológica

Para el seguimiento de las variables ambientales (precipitación, temperatura, humedad y presión barométrica) se cuenta con dos estaciones meteorológicas RainWise: una modelo MKIII en Curva de Rodas y otra modelo WS2000 en La Pradera. Estos equipos están equipados con telemetría inalámbrica y alimentación con energía solar, y son capaces de actualizar datos cada 2 segundos. (Yepes García, 2015)

Figura 6-4. Sistema de instrumentación Estación meteorología. Adaptado de <http://www.tecnologiayambiente.com.ar/estaciones-meteorologicas/>



Figura 6-5. Monitoreo de la Estación meteorología. Octubre 2017



humedad, la presión barométrica, la velocidad y la dirección del viento.

6.5 Medidores de caudales lixiviados

El lixiviado que se produce en el vertedero, a causa del líquido que expulsan los residuos durante su descomposición y por el agua que se infiltra dentro del relleno, y que percola a través de las capas, debe manejarse por un sistema de recolección y remoción de lixiviados, para prevenir la acumulación de estos líquidos en el interior del relleno, y transportarlos hasta una planta de tratamiento. Para el control de los lixiviados el sistema

de manejo de estos contaminantes, se considera como el principal requerimiento en el diseño y operación de un relleno sanitario. Para lograr un control sobre los riesgos que implica la producción de lixiviados, un vertedero debe contar con varios tipos de capas que impidan la infiltración y/o permitan el drenaje adecuado de los lixiviados hasta el sistema de recolección. Muchos materiales, en su mayoría fabricados, se emplean para este propósito, como las capas de membranas flexibles llamada geomembranas. Para el drenaje de los lixiviados se utilizan los filtros y/o tuberías. (Vargas Guerrero, 2009)

El relleno sanitario la pradera tienes diferentes puntos de aforos para las lecturas del caudal de lixiviados como se puede ver en la **Figura 6-6**. Estas lecturas se realizan a diario a la misma hora, en el horario 6:00 am y las 8:00 am, de tal forma que dichas lecturas sean compatibles entre sí.

Figura 6-6. Localización de sitios de aforo en el Relleno Sanitario La Pradera



En la **Tabla 6-2** y

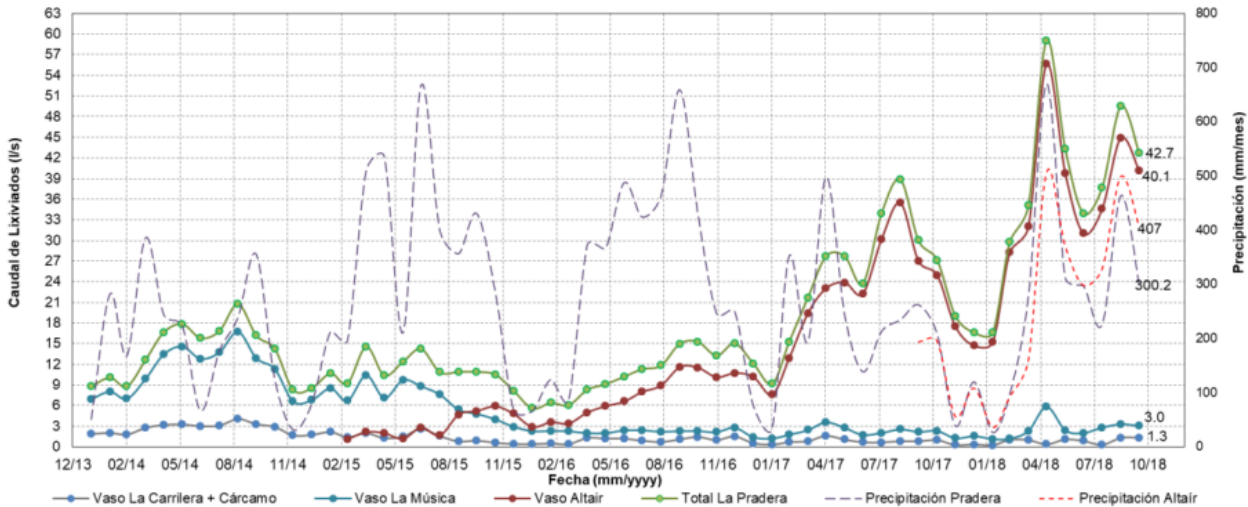
Figura 6-7, se puede observar entre mayor sea las precipitaciones, mayor caudal del lixiviado, indicando que los caudales de lixiviados están relacionados directamente con la magnitud de las lluvias. Sin embargo, el caudal de lixiviado también depende de otros factores como son:

- la composición de los residuos.
- Edad de los RSU.
- las condiciones climáticas.
- las actividades de bombeo de lixiviados, entre otros.

Tabla 6-2. Caudal promedio mensual de lixiviados por vasos de octubre de 2017 a octubre de 2018

Mes	Precipitación Pradera (mm)	Precipitación Altair (mm)	Música (l/s)	Carrilera + Cárcamo (l/s)	Altair (l/s)	Total (l/s)
Noviembre 2017	208	195	2.31	0.99	24.97	27.13
Diciembre 2017	39	54	1.25	0.27	17.51	19.03
Enero 2018	121	108	1.55	0.35	14.71	16.61
Febrero 2018	27	36	1.14	0.25	15.23	16.62
Marzo de 2018	97	93	1.18	1.02	28.25	29.72
Abril de 2018	279	161	2.30	1.00	32.00	35.1
Mayo de 2018	670	507	5.80	0.38	55.65	59.06
Junio de 2018	312	370	2.4	1.1	39.8	43.3
Julio de 2018	297	298	2.0	0.9	31	33.9
Agosto de 2018	226	329	1.7	1.4	35.0	36.7
Septiembre de 2018	464	499	3.3	1.3	44.9	49.5
Octubre de 2018	300	407	3.0	1.3	40.7	42.7

Figura 6-7. Caudal promedio de lixiviado total en los Vasos La Música, La Carrilera y Altaír



6.6 Inclínómetros

Ayala, C. y Andreu, P. (2006) afirman que los inclinómetros permiten medir movimientos horizontales a lo largo de la vertical de un sondeo, y por tanto detectar la zona de movimientos más críticos, su evolución y la velocidad de los mismos. Son en consecuencia, equipos de gran utilidad para la detección de superficies de deslizamiento en taludes. Los inclinómetros deben alcanzar la zona estable situada debajo del plano de rotura más profundo. Estos aparatos constan de un torpedo que baja por una tubería especial previamente instalada en el interior del sondeo. (Castrillon Torres & Quintero Franco, 2012)

Con los inclinómetros se logran determinar principalmente tres aspectos:

- **Profundidad** hasta la cual están ocurriendo los movimientos.
- **Dirección** hacia la cual se dan los movimientos.
- **Velocidad** a la cual se dan los movimientos.

Figura 6-8. Sistema de instrumentación Inclínómetro. Adaptado: <http://muchik.com/que-es-un-inclinometro>.



En el relleno sanitario de La Pradera se tienen instalados inclinómetros en el terreno natural y en los diques de contención con el objetivo de realizar control de posibles desplazamientos, y asentamientos en el terreno. (INTEINSA I. , 2019)

Figura 6-9. Inclínómetro, octubre 2017

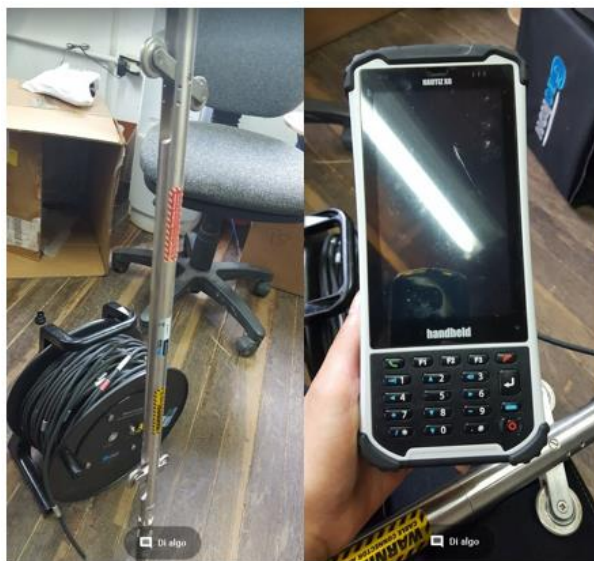


Figura 6-10. Instalación de tubería para los sondeos desplazamientos con el inclinómetro, octubre 2017.



7. Comportamientos que conllevan a producir los Asentamientos en los RSU

La consolidación se define como la compresión de un volumen de masa de suelo, como consecuencia del incremento en los esfuerzos efectivos debido a una carga estática. El Dr. Terzaghi habla de tipos de consolidación. (Gómez Paniagua, 2009):

- Consolidación inicial o instantánea: Expulsión, y compresión del aire que llena los vacíos del suelo.
- Consolidación primaria: Se da por expulsión del agua dentro de los poros del suelo.
- Consolidación secundaria: Reacomodamiento de las partículas, ante esfuerzos constantes.

Mientras que el Dr. Zeevaert 1984 introduce un nuevo tipo de consolidación, llamada consolidación por viscosidad intergranular. (Zeevaert L. , 1984)

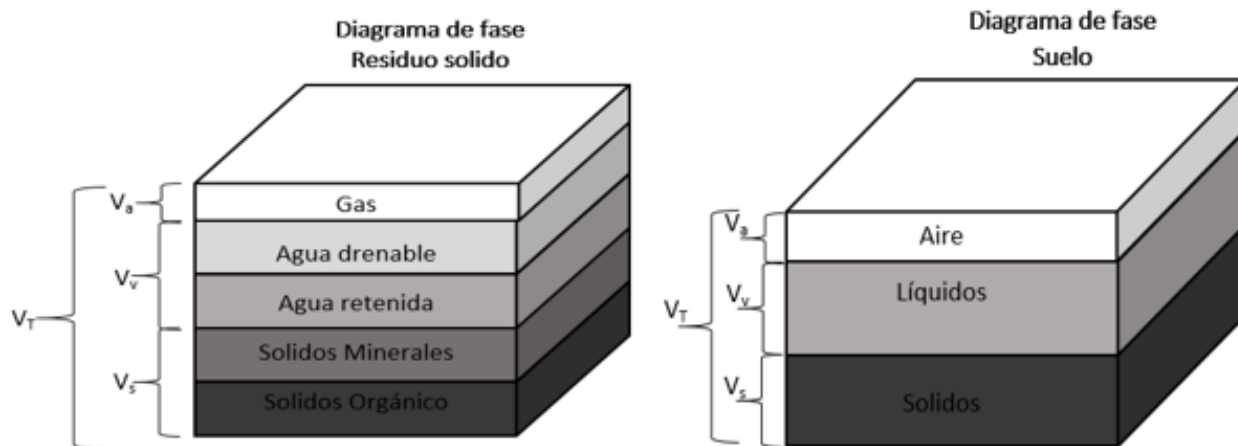
- Consolidación por viscosidad intergranular: el suelo está compuesto por dos estructuras llamadas macro, y micro partículas, donde las micro partículas hacen parte de las macro partículas, originando dos tamaños de poros, que son, poros grandes que forman entre las macro partículas, y poros pequeños entre las micro partículas. Las macros partículas se deforma, al igual que el conjunto de las micro partículas, lo que dice Dr. Zeeavaert es que depende de la deformabilidad o rigidez de la partícula una se pueden deformar más que las otras.

Teniendo en cuenta el concepto, y los diferentes tipos de consolidación se puede analizar que el suelo al igual que los RSU, al pasar el tiempo puede presentar cambios volumétricos.

Así como el suelo presenta un diagrama de fases por su estructura interna, los RSU también, como se puede ver en la **Figura 7-1**. La diferencia importante entre estos dos

diagramas de fase es que, las características de los sólidos en los RSU varían en el tiempo, a diferencia de los sólidos en un suelo que no cambian.

Figura 7-1. Diagrama de fases de un suelo y los RSU. Adaptado de (Zekkos, 2008)



7.1 Tipos de Asentamientos en los RSU

Los RSU presentan cambios volumétricos que se definen por diferentes tipos de asentamientos, y que pueden ocurrir de forma simultánea:

- **Asentamientos inmediatos:** por su peso propio, durante la disposición final del residuo, y por compactación, asociados a la expulsión de aire.
- **Asentamiento por factores biológicos:** asentamientos asociados a la degradación de la materia orgánica y a la producción y expulsión de gases y lixiviado.
- **Asentamientos por expulsión de fluidos:** proceso por consolidación, debido a la expulsión del agua traída por los RSU (agua original), más los fluidos que se originan por la descomposición de la materia orgánica, como son los gases y los lixiviados, que también son expulsados.

7.2 Factores que afectan el comportamiento de los RSU.

Los RSU presentan procesos de descomposición microbiana, y liberación de agentes contaminantes que se pueden presentar en estado sólido (polvo), líquido (lixiviado), y gaseoso (biogás). (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

El lixiviado, y biogás dependen exclusivamente del proceso de descomposición de la materia orgánica de los RSU, del cual están asociados directamente a factores internos y externos que son:

- **Condiciones climáticas y meteorológicas en el sitio:** Estas condiciones hacen referencia a la Precipitación, temperatura, y el viento.

La precipitación juega un papel determinante en la generación de lixiviado, ya que está asociado directamente con la magnitud de las lluvias.

La temperatura externa es fundamental en la velocidad de descomposición de la materia orgánica.

La temperatura interna está asociada a la temperatura externa, más el incremento de la temperatura, producto de la descomposición de la materia orgánica.

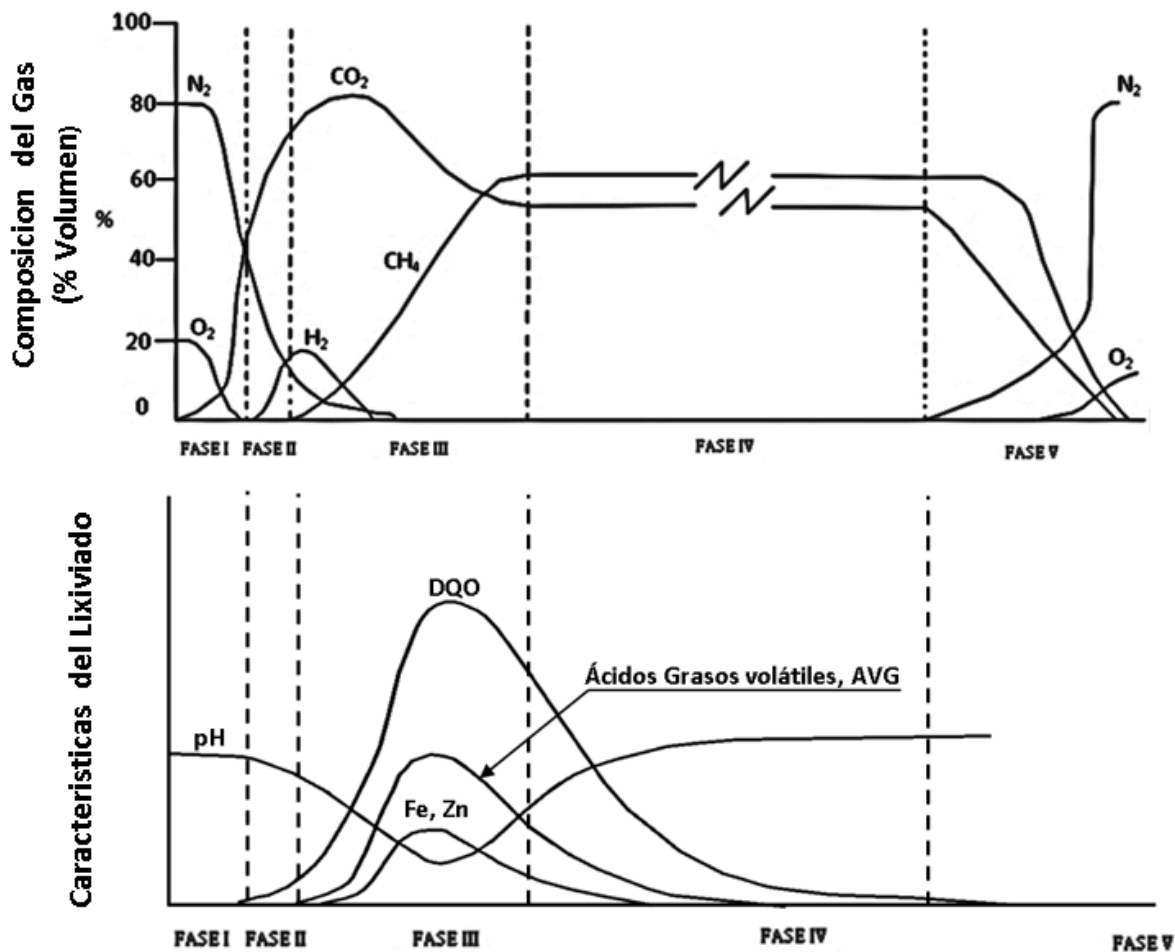
- **Propiedades Bioquímicas de los residuos:** Está relacionada con la composición química de los residuos, y el calor de reacción de los diversos procesos de transformación.
- **Forma de la disposición final de los residuos:** Hace referencia a la tecnología de compactación, y la cubierta final que se le coloca.
- **Edad del relleno:** teniendo en cuenta el tiempo de operación del relleno se puede considerar en qué etapa de maduración están los residuos sólidos, ya que a largo plazo van disminuyendo su comportamiento.

Los rellenos sanitarios nunca serán estables desde el punto de vista químico, debido a los cambios internos por la descomposición de la materia orgánica, que producen gases y lixiviados que están atrapados en la estructura interna de los RSU. (Gonzalez G. & Espinosa S., 2001a)

7.3 Fases de descomposición de RSU

En un relleno sanitario, después de ser depositado los RSU, sufren unas ciertas transformaciones que se pueden asociar a etapas de descomposición de la materia orgánica. Dicha descomposición va relacionada por procesos aerobios, y anaerobios. Estos procesos de descomposición se clasificaron en 5 fases que son: (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

Figura 7-2. Fases de descomposición de los RSU. Adaptado de (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)



Fase I: Es conocido como fase o etapa aerobia, se da en presencia del oxígeno, debido al aire atrapado entre los poros de los RSU. El producto de esta fase se consume rápido el oxígeno, e inicio de la producción del bióxido de carbono. El oxígeno empieza a consumirse rápidamente al igual que el nitrógeno por el proceso de nitrificación, por la descomposición aerobia de la materia orgánica, y producir bióxido de carbono. Dando lugar a una elevación de temperatura alrededor de 60 °C, comportamiento exotérmico, que evapora la humedad, y debido a esto hay poca presencia de lixiviado. Esta etapa se da en un par de semanas, y finaliza cuando todo el oxígeno se allá consumido. (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

Fase II: El proceso de anaerobios, cuando la fermentación empieza generar lixiviado con un alto contenido de ácidos orgánicos, y el pH presenta un descenso significativo. En esta fase el biogás está constituido por bióxido de carbono, nitrógeno, y un porcentaje pequeño de hidrogeno. (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

Fase III: En esta etapa se inicia la producción del metano, es conocida como una etapa metanogénicas intermedias, totalmente anaeróbica. La presencia del bióxido de carbono decrece, los ácidos grasos volátiles son transformados en biogás, y su concentración en el lixiviado disminuye, y existe un aumento en el pH. (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

Fase IV: Etapa conocida como metanogénicas estables, donde el metano alcanza su máxima producción, con una concentración estable en el biogás de 55 % en volumen, y el bióxido de carbono, es menor que el metano, al igual es estable entre un 40%-50 %. (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

Fase V: Etapa final donde los RSU, se estabilizan con un carácter aerobio, El metano decrece al igual que el dióxido de carbono y se sustituye por nitrógeno y el oxígeno aparece por la introducción de aire a través de las capas superficiales. Por lo anterior la generación de biogás han disminuido significativamente, debido a que los nutrientes se han diluido en el medio líquido durante las fases anteriores y los medios solidos que quedan en medio solido son de una degradación lenta. (Kiss Kofalusi & Encarnacion Aguilar, 2006)

8. Resultados

Los asentamientos son el cambio gradual del volumen de una masa debido a una carga, pueden ser a corto o largo plazo. Los RSU por su composición física, presentan asentamientos inmediatos, asentamientos por factores biológicos, y asentamientos por expulsión de fluidos. En la ciudad de Medellín, los RSU tienen una composición principalmente de materia orgánica con un 59%, plásticos 11.3 %, papel y cartón 12%, cartón y textiles 3.2%, cauchos 0.4%, vidrio 2.7%, metales 1.3%, y otros componentes 0,6%. Se consideraron dos tipos de asentamiento; unos producidos por la descomposición de la materia orgánica, debidos a su descomposición y a la expulsión de los productos de la descomposición (gases y lixiviado), y otros asentamientos asociados a la consolidación y el peso propio de los RSU.

8.1 Relación de la teoría de consolidación con los RSU

De acuerdo a (Zeevaert L. , 1983) los suelos están conformados por dos estructuras reológicas diferentes que son: la unidad Kelvin "K" que representa los microporos, y la unidad "Z" los sub-microporos, ambas estructuras son consideradas en un estado completamente saturado. Los microporos hacen referencia a la estructura del suelo que están relacionada con la consolidación primaria que presenta una fluidez lineal, y una compresión debido a la expulsión del agua gravitacional entre los microporos, generando

un cambio volumétrico y finalizando con la disipación el exceso de presión de poros del agua dentro de los microporos.

Por otra parte, se presenta la ocurrencia de cambios volumétricos denominados consolidación secundaria; en este caso, el agua de los sub-microporos presenta unas fuerzas de atracción o fuerzas electromagnéticas muy fuertes que generan el agua viscosa adherida que es mucho más difícil de expulsar, y a este comportamiento se le conoce como fenómeno visco plástico. (Zeevaert L. , 1983)

En el caso de los RSU, el agua viscosa estaría representada por el agua que forma parte de la materia orgánica, cuya liberación está asociada a la descomposición de esta materia, para lo cual la temperatura juega un papel preponderante.

Las dos estructuras reológicas están conectadas en serie es decir que el cambio volumétrico generado será la sumatoria de consolidación primaria y secundaria, debido a la aplicación de la carga.

La anterior conceptualización puede ser numéricamente equivalente con los RSU, la consolidación primaria presentaría el mismo comportamiento anteriormente mencionado debido a la disipación de los excesos de la presión de poros generados por la aplicación de carga vertical de los RSU y la producción de gases y lixiviado. La consolidación secundaria que en los suelos está relacionada con el proceso de drenaje de las aguas viscosas, en los RSU puede ser numéricamente equivalentemente al proceso de descomposición de la materia orgánica de los residuos, asociando a un proceso retardado en el tiempo por un proceso químico de la descomposición de los RSU, más que por un proceso físico debido a grandes esfuerzos.

8.2 Instrumentación geotécnica utilizada para el cálculo de los asentamientos por descomposición y consolidación.

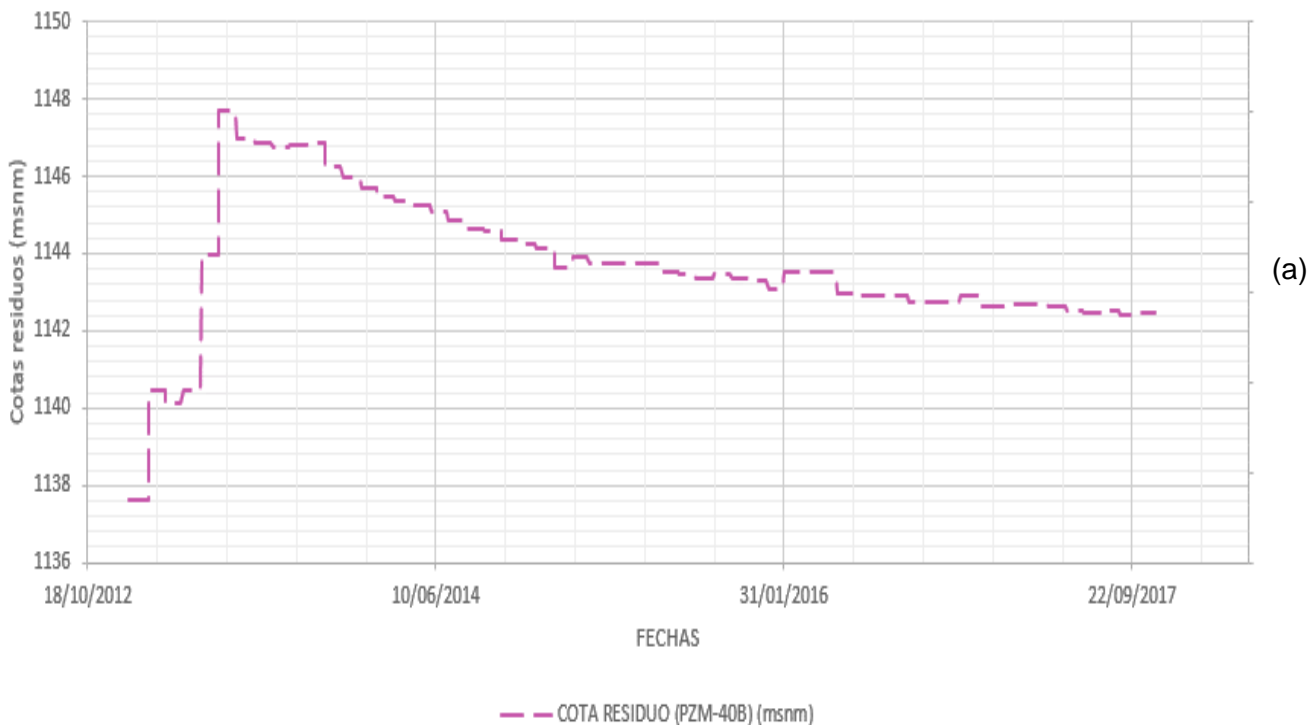
Los equipos de instrumentación que se utilizó usaron para el análisis y calibración del modelo propuesto fueron los registros topográficos y los piezómetros: **PZM-40B, PZM-46C, PZM-15C, PZM-17A** del Relleno sanitario La Pradera y se validó con los piezómetros **PZM11-2, PZM22-1, PZM12-2** del relleno Curva de Rodas. También se tuvieron en cuenta

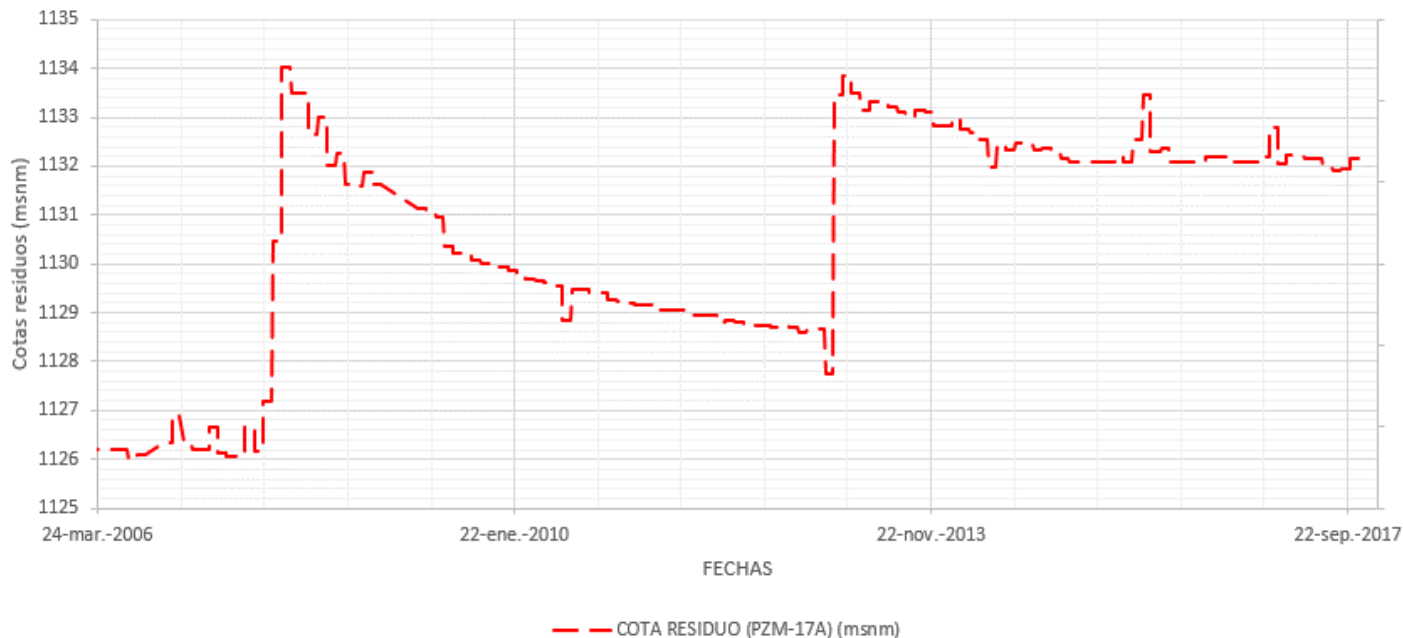
los cálculos e información plasmada en los trabajos de investigación, de (Ordóñez Ante, 2007) y (Yepes García, 2015), donde se obtuvieron valores de coeficientes de compresibilidad volumétrica, permeabilidades y coeficientes de consolidación de los RSU, utilizados en el modelo propuesto.

La instrumentación geotécnica de los rellenos de Medellín, se instaló acorde al avance del proceso de construcción de los vasos; generalmente lo que se busca en el momento del llenado es que se haga por capas distribuido por zonas, de tal forma que exista uniformidad hasta alcanzar la cota siguiente en toda la zona de llenado. Sin embargo, se pueden presentar dos casos al momento del llenado:

- **Caso 1.** Llenado continuo hasta llegar a la cota superior lo más uniforme posible como se muestra en la **Figura 8-1-(a)**.
- **Caso 2.** Llenado continuo por un periodo de tiempo determinado, suspendiendo la colocación de RSU durante el siguiente periodo de tiempo, y luego se retoma el llenado sobre la misma columna de RSU, generando incremento de carga como se muestra en la **Figura 8-1-(b)**.

Figura 8-1. Llenado de los vasos de RSU. Vaso la Música, La Pradera. a) Llenado de los RSU a Carga Constante hasta un tiempo. b) Llenado de los RSU por un tiempo, luego se le impone más carga.





(b)

La **Figura 8-1 (a)**, representa la ejecución de un llenado continuo durante un periodo de tiempo inicial, después de un tiempo de no depositar residuos, se produce un asentamiento muy rápido al principio con pérdida de velocidad paulatina en el tiempo. La **Figura 8-1(b)** tiene el mismo comportamiento de la **Figura 8-1(a)**, pero se observa una réplica del proceso inicial, debido a que se volvieron a disponer RSU sobre la misma columna de RSU, haciendo que la cota de residuo tenga nuevamente una elevación y luego inicie el descenso de la curva.

8.3 Esfuerzos, presiones de poros, cotas de residuos y temperaturas interna de la masa de los RSU en los rellenos sanitarios La Pradera – Vaso la Música y Curva de Rodas.

En las **Figura 8-2**, **Figura 8-3** y **Figura 8-4** se muestran ejemplos del comportamiento de los RSU durante el proceso de llenado de los Rellenos sanitarios. En primer lugar, se observa a corto plazo, un asentamiento rápido debido a la expulsión de aire, después se empiezan a registrar incrementos en la temperatura y en las presiones de poros en respuesta al incremento de las columnas de residuos. Cuando los residuos se saturan, se pasa de una condición aeróbica a un proceso anaeróbico, momento en el cual se activan las bacterias y sube aún más la temperatura produciendo una combinación de presiones

por la generación del biogás y del lixiviado. En el proceso anaeróbico, es decir sin presencia de oxígeno, se produce Metano y Dióxido de Carbono.

Esta etapa se resalta en los recuadros con líneas punteadas, mostrados en las **Figura 8-2**, **Figura 8-3** y **Figura 8-4**, pueden observarse asentamientos rápidos debido principalmente a la descomposición de la materia orgánica de los RSU de la ciudad de Medellín. Luego sigue decreciendo la curva lentamente por la disipación de presiones de poros, a medida que los esfuerzos son transmitidos a las partículas sólidas, aumentan los esfuerzos efectivos, lo cual es precisamente lo que ocurre durante la consolidación. En ese último proceso la actividad bacteriana comienza a disminuir, indicando la descomposición total, en esta etapa también se genera expulsión del lixiviado.

En la **Figura 8-4** al aplicar de nuevo las cargas se produce un incremento de las presiones de poros, debido a que las sobrecargas comprimen los gases y los residuos se comportan como si estuviera saturados.

Figura 8-2. Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 40B. Vaso La Música La Pradera

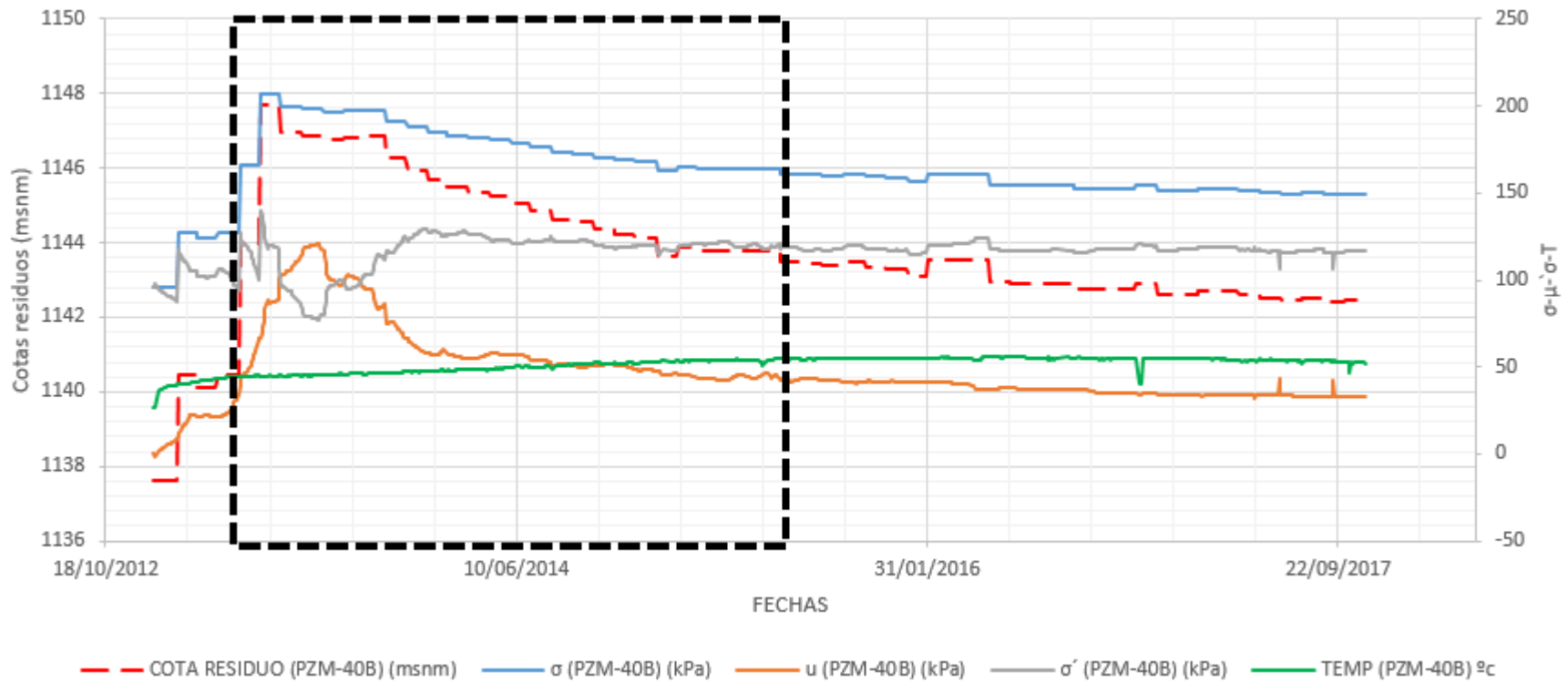


Figura 8-3. Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 15C. Vaso La Música La Pradera

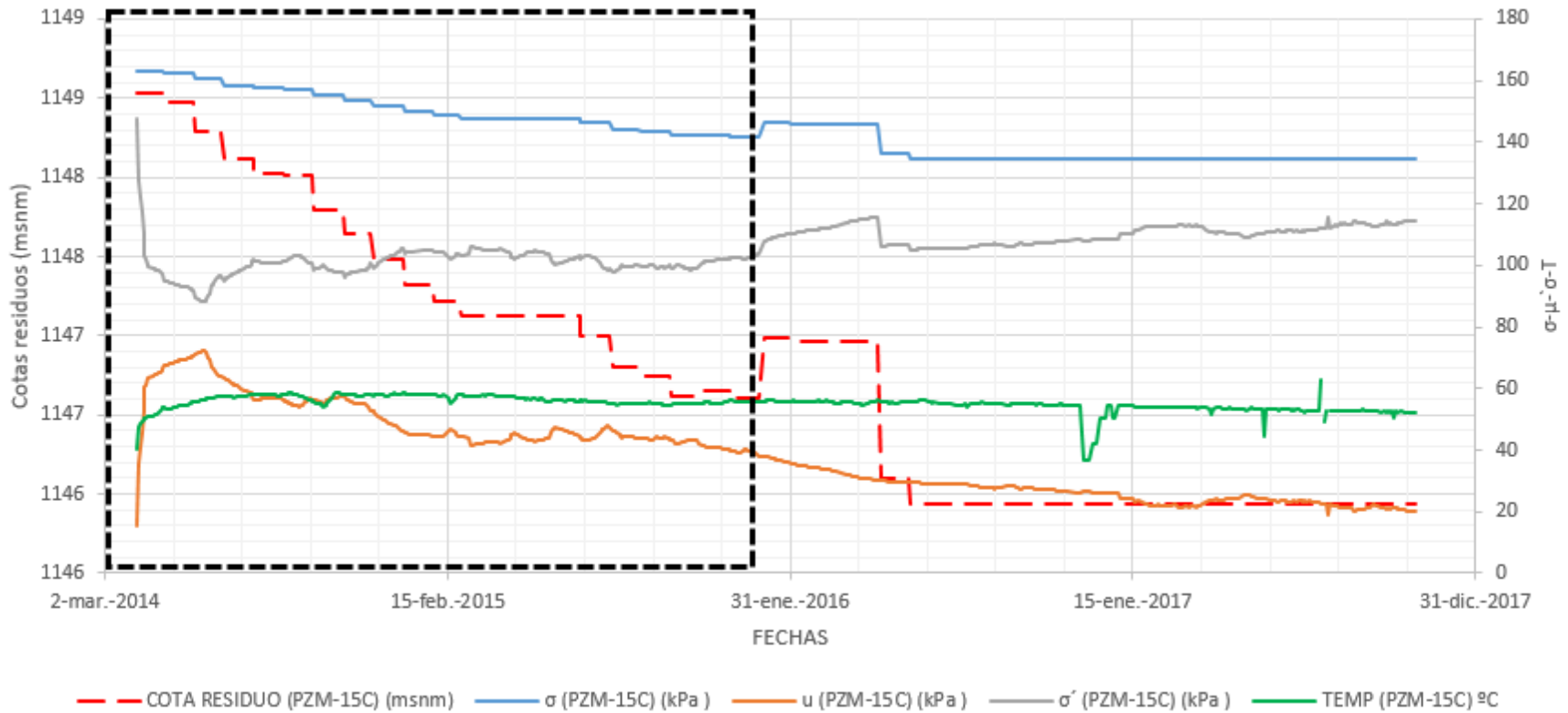
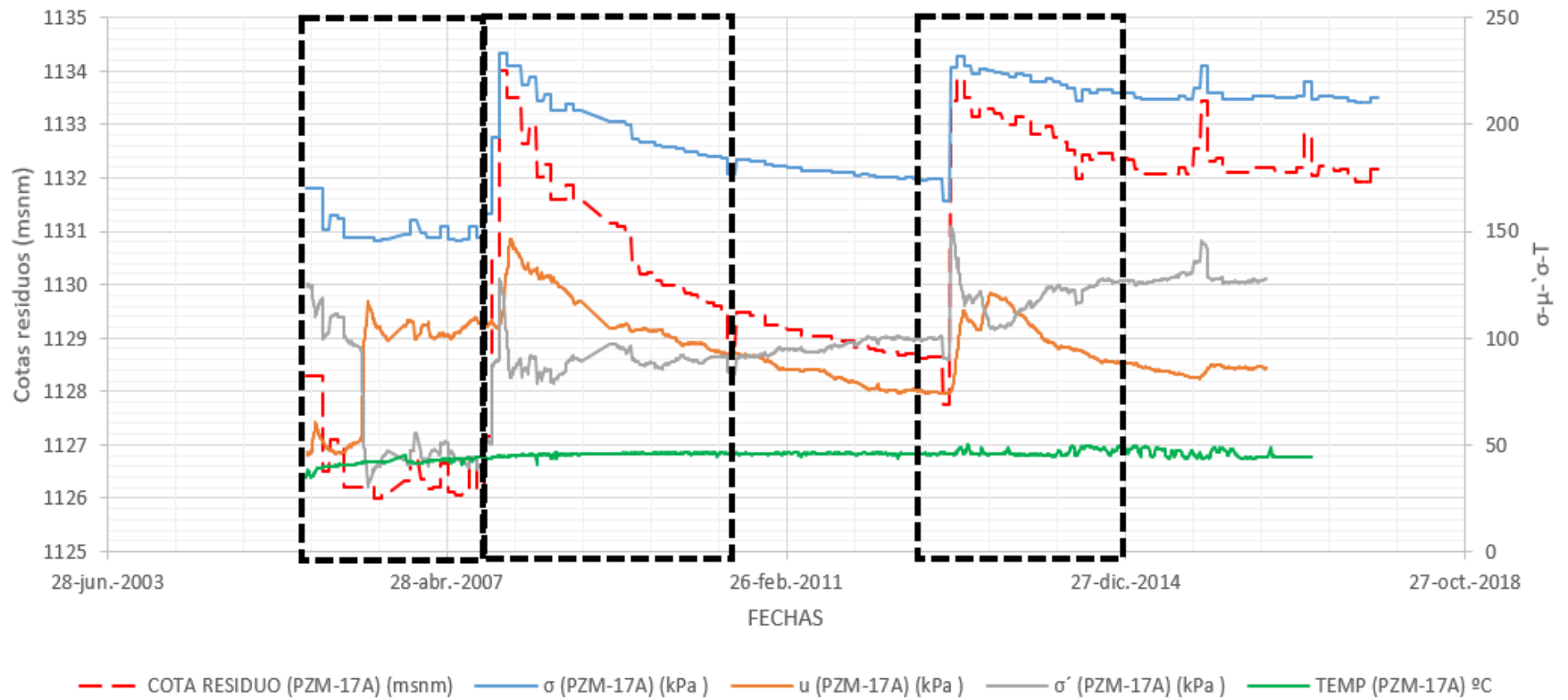


Figura 8-4 . Comportamiento de los esfuerzos, presión de poro, cota de residuo y temperatura del PZM- 17A. Vaso La Música La Pradera



8.4 Temperaturas de los rellenos sanitarios La pradera Vaso la Música y Curva de Rodas.

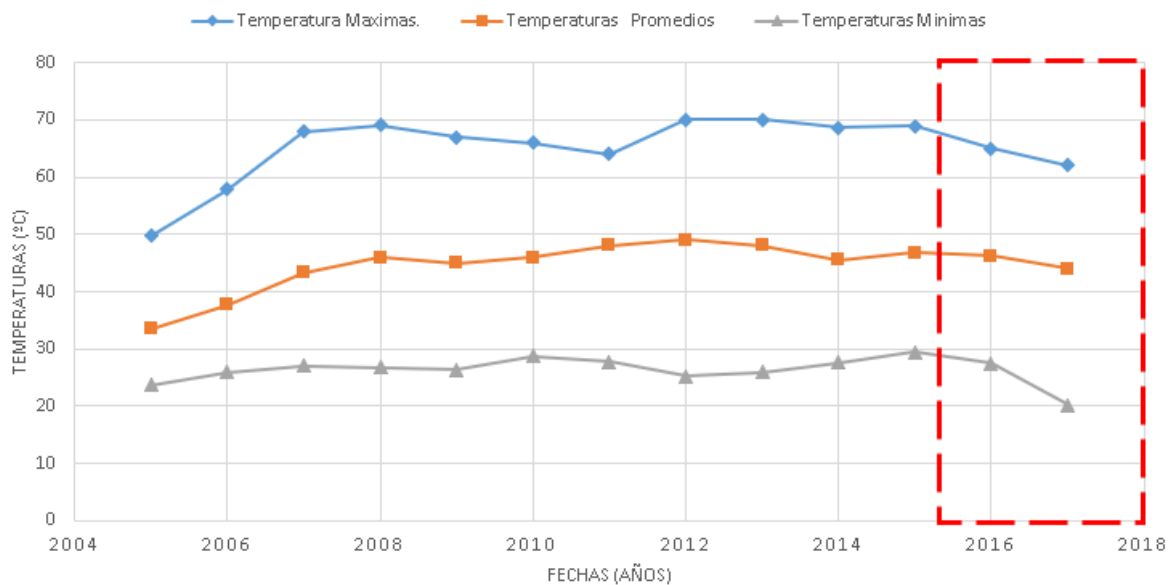
8.4.1 Temperatura Relleno sanitario La Pradera Vaso La Música.

En la **Tabla 8-1**, se observa la variación de las temperaturas del vaso la Música donde las máximas temperaturas estuvieron entre 50 °C a 70 °C como se observa en la **Figura 8-5**, periodo, durante el cual se presentan los máximos asentamientos debido a la descomposición de la materia orgánica que generó la producción del Metano, Dióxido de Carbono y lixiviados. Esto indica que la temperatura es reflejo del proceso bacteriano. Posterior al cierre del vaso en el año 2015, se observa una reducción de las temperaturas, de tal forma que para el año 2017 se registró una temperatura promedio de 44°C y una máxima de 62 °C.

Tabla 8-1: Temperaturas anuales Vaso La Música

TEMPERATURAS ANUAL VASO LA MUSICA													
ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Temperatura máxima.	49,8	57,8	68,0	69,0	67,0	66,0	64,0	70,0	70,0	68,6	68,9	65,0	62,0
Temperaturas Promedios	33,5	37,8	43,3	46,0	45,0	46,0	48,0	49,0	48,0	45,5	46,7	46,3	44,0
Temperaturas mínimas	23,7	26,0	27,0	26,8	26,4	28,7	27,7	25,2	26,0	27,6	29,5	27,5	20,2

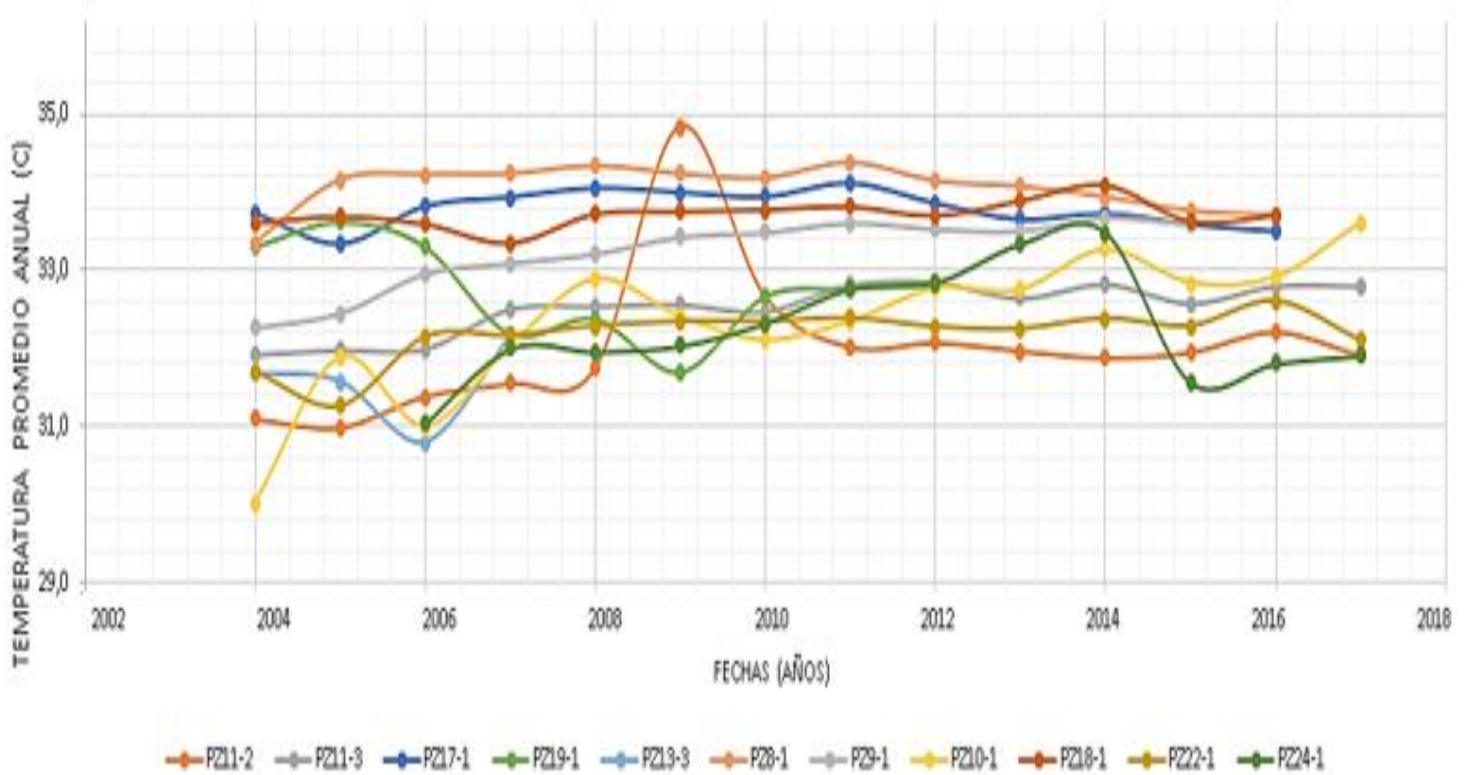
Figura 8-5. Temperatura promedio anual La Pradera vaso La Música



8.4.2 Temperatura Curva de Rodas.

El relleno sanitario Curvas de Rodas inicio operación en el año 1984, y fue clausurado en el año 2002. En la **Figura 8-6** se observan registros de la temperatura posterior a su clausura, que muestran como la temperatura muestra unos valores relativamente constantes con ligeros descensos, de donde se puede decir que el relleno se estabilizó.

Figura 8-6. Temperatura promedio anual después de clausurado el relleno Curvas de Rodas



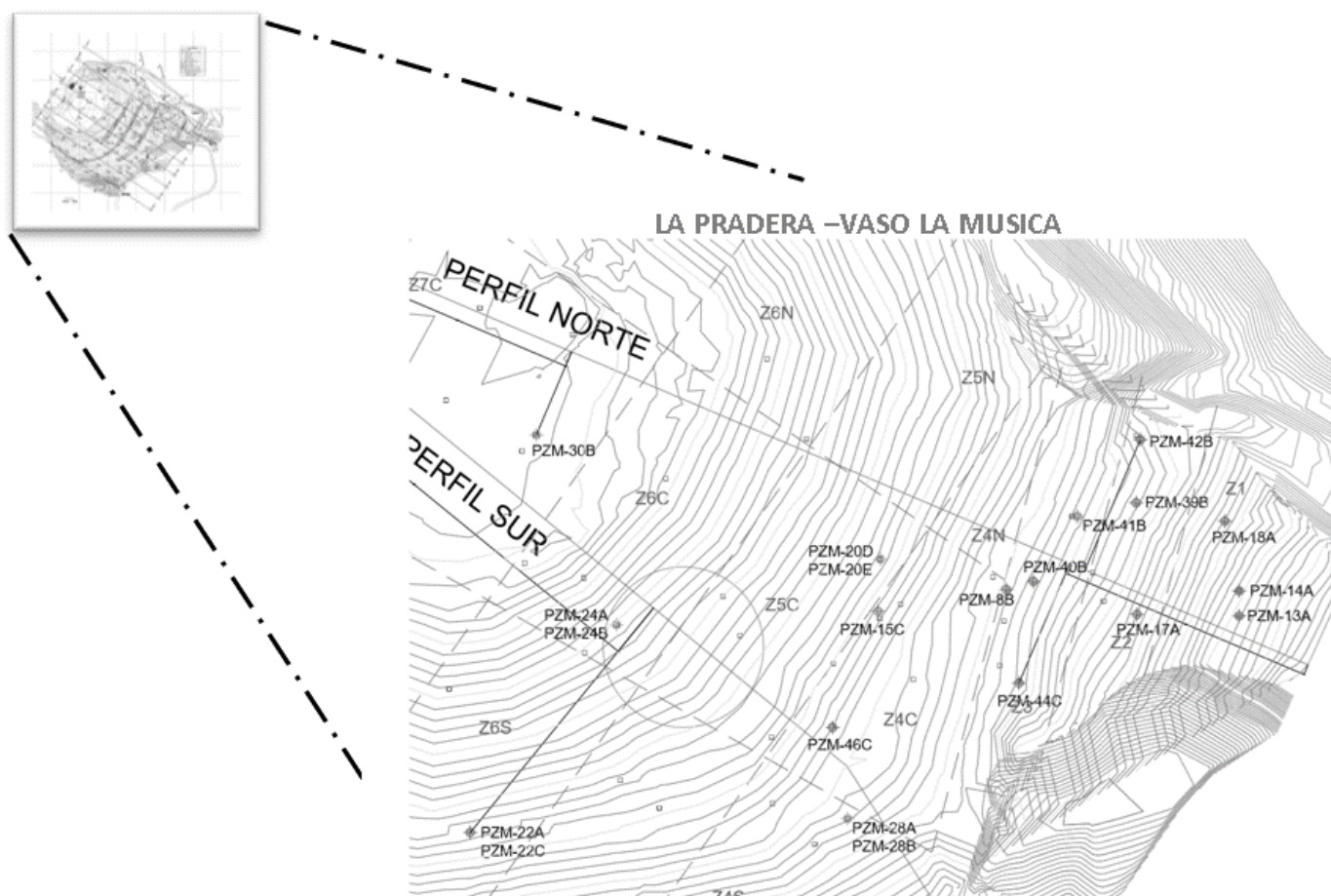
8.5 Modelo para estimar los asentamientos en una columna de RSU, que numéricamente es equivalente al modelo de consolidación primaria y consolidación secundaria que lo define como viscosidad intergranular.

Para calibrar el modelo que numéricamente es equivalente al comportamiento de los RSU de la ciudad de Medellín, se utilizó la información proveniente de puntos de control superficial y los datos de los piezómetros localizados en proximidades de los puntos de control.

- **Punto de control de Topografía.**

La **Figura 8-7** presenta la ubicación de todos los piezómetros del vaso La Música que se instalaron a medida que se incrementó la cota de residuo, esta conformación se realizó por medio de capas uniformes, tomando un registro con puntos topográficos de la cota de residuos compactados la cual puede disminuir por descomposición y consolidación de los RSU.

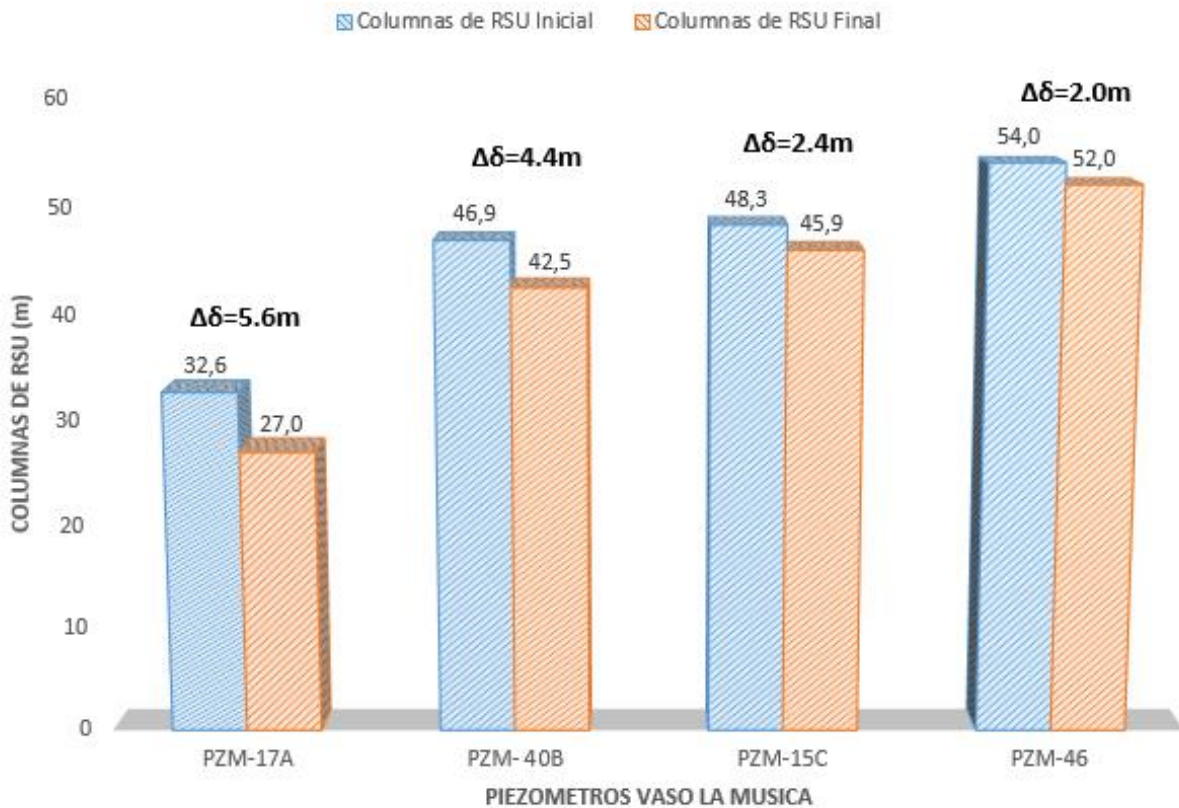
Figura 8-7: Ubicación de todos los piezómetros de Vaso La Música.



En la **Figura 8-8** se muestran los piezómetros de referencia para determinar las columnas de los RSU del vaso La Música, en la **Figura 8-8** las barras azules corresponden a las alturas de los RSU cuando finaliza su llenado. Las barras naranjas representan las alturas finales de llenado de los RSU, después de la disminución debido a la descomposición de la materia orgánica y la consolidación, la cual se denomina columnas RSU por

asentamientos. Esa diferencia de alturas es la registrada en la **Figura 8-8** como asentamiento por diferencia de cotas de residuos. Se observa en la **Figura 8-8** un promedio de los asentamientos totales en el Vaso la Música que están alrededor de 2m a 6m.

Figura 8-8: Columnas de residuos urbanos, de los piezómetros de referencia del vaso de La Música.



- **Piezómetros de hilo vibrátil.**

Los piezómetros registran los cambios en las presiones de poros, al inicio se registran presiones altas debido a la saturación y a la descomposición de los RSU, con el tiempo se disipan las presiones de poros por la evacuación del lixiviado y gas, permitiendo que las

presiones vayan disminuyendo y transmitiendo la carga a las partículas sólidas, generando una mayor estabilidad al relleno

Para el cálculo de los asentamientos presentados en los rellenos se basa en la teoría del (Zeevaert L. , 1983) de viscosidad intergranular en suelos finos saturados:

$$\text{Ecuación 28 } \Delta\epsilon_v = \left\{ m_{ep} \Delta\sigma F \left(\frac{C_v}{H^2} t \right) + m_t \log \left[1 + \frac{4.62}{\beta} \left(\frac{C_v}{H^2} t \right) \right] \right\} \Delta\sigma$$

La **Ecuación 28** multiplicada por el espesor compresible ΔH , se determinó los asentamientos, de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 29 } \Delta\delta = \left\{ m_{ep} \Delta\sigma F \left(\frac{C_v}{H^2} t \right) + m_t \log \left[1 + \frac{4.62}{\beta} \left(\frac{C_v}{H^2} t \right) \right] \right\} \Delta\sigma * \Delta H$$

Donde:

m_{ep} = Coeficiente de compresibilidad volumétrica representando el fenómeno Elasto plástico

m_t = Coeficiente de compresibilidad volumétrica viscosidad intergranular

$\Delta\epsilon_v$ = Deformación volumétrica total.

$\Delta\delta$ = Asentamiento total.

$\Delta\epsilon_{vp}$ = Deformación volumétrica viscosidad intergranular

$\Delta\sigma$ = Incremento de esfuerzo total

C_v = Coeficiente de consolidación

$F(T_v)$ = Grado de consolidación.

β = Factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular

T_v = Factor de tiempo primario. Donde $T_v = \frac{C_v}{H^2} t$

t = tiempo diario de los registrado de los piezómetros (pzm)

ΔH = Espesor compresible.

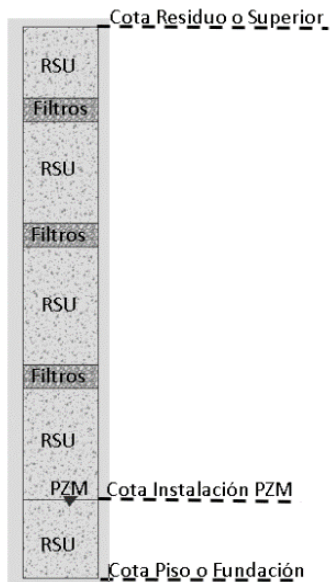
h es la altura de drenaje de los fluidos.

Cada uno de los parámetros nombrados anteriormente fue calculado con base en la instrumentación geotécnica instalada en los rellenos desde el año 2015 y datos de investigaciones anteriores como (Ordóñez Ante, 2007) y (Yepes García, 2015)

De estos parámetros el m_{ep} está relacionado con los asentamientos por consolidación y m_t con los asentamientos por factores biológicos.

El presente estudio se desarrolla con los registros de los piezómetros y puntos de controles topográficos de los rellenos sanitario La Pradera (vaso La Música) y Curva de Rodas.

Figura 8-9. Esquematización Columna de RSU



En la **Figura 8-9** se observan tres cotas muy importantes para los cálculos de los asentamientos, cota de piso o de fundación, cota de instalación y cota de residuo o cota superior. La cota de piso o de fundación menos la cota de residuo que es la cota que va subiendo por el incremento de las capas depositadas y compactadas, permite determinar la altura para calcular los esfuerzos totales que experimentan los RSU. La diferencia entre

la cota de residuo o superior y la cota piso o de fundación es la altura del estrato compresible.

Con cada incremento de cota de residuo o cota superior menos cota piso o cota de fundación, multiplicado por el peso unitario de RSU que se tomó del ensayo de densidad en el terreno reportando por (INTEINSA I. I., 2017) se calcularon los esfuerzos totales que experimenta las columnas de los RSU, y a partir de los registros de las presiones de poros obtenidos con los piezómetros, restando los esfuerzos totales y las presiones se calcula los esfuerzos efectivos que son los indicadores del cambio volumétrico. También se determinó el grado de consolidación, indicador del porcentaje de carga transmitido a las partículas sólidas y de líquido evacuado, este cálculo se realizó con los esfuerzos totales y las presiones de poros, utilizando la **Ecuación 30**.

Ecuación 30

$$U\% = 1 - \frac{U}{\sigma}$$

El módulo de compresibilidad volumétrica de (Yepes García, 2015) fue empleado para determinar los asentamientos por consolidación. Ya con el módulo de compresibilidad, esfuerzo total, grado de consolidación y el incremento del espesor del estrato compresible se calculó el asentamiento por consolidación, dicho asentamiento finaliza cuando se disipan las presiones de poro.

Para el cálculo del asentamiento secundario primero se calculó el factor C_v con la **Ecuación 31** en función de permeabilidad k , compresibilidad volumétrica de viscosidad intergranular m_t y peso unitario del agua γ_w . El parámetro k fue tomado a partir de los rangos reportado por (Knochenmus, 1998). Y el m_t se calculó con La **Ecuación 32** que es la magnitud relativa del fenómeno viscoso en función del m_{ep} y m_t , de esta ecuación se conoce el m_{ep} obtenido de (Yepes García, 2015) que se utilizó para el asentamiento por consolidación o expulsión de fluidos, y β se calibró en función a los rangos planteado por (Zeevaert L. , 1983) entre 0,1 – 1,2 hasta alcanzar el valor correspondiente a la resta entre el asentamiento topográfico y el asentamiento primario.

Ecuación 31

$$C_v = \frac{k}{m_t * \gamma_w}$$

Ecuación 32

$$\beta = \frac{m_{ep}}{m_t}$$

Otro de los parámetros para el cálculo del asentamiento por descomposición es el T_v , que se calculó con la **Ecuación 33**. El h es la altura de drenaje de los fluidos, valor que se asumió de 10 m considerando la separación entre las capas de filtros en el relleno.

Ecuación 33

$$T_v = \frac{C_v}{h^2} * t$$

Tabla 8-2 y Tabla 8-3, resumen los parámetros previamente descritos, con los respectivos resultados.

Tabla 8-2. Resumen de los cálculos de asentamientos por descomposición y consolidación del relleno sanitario La Pradera- Vaso La Música.

Nombres PZM	Cotas Residuos	Cotas Instalaciones PZM	Cotas Fundacion	Instalaciones PZM	Maximas presiones poros	Esfuerzos promedios Totales	Asentamientos por topografia	$\Delta\varepsilon_{epf}$	$\Delta\varepsilon_{vpf}$	$\Delta\varepsilon_{vf}$	m_{ep}	m_t
	<i>msnm</i>	<i>msnm</i>	<i>msnm</i>	Años	kPa	kPa	m	m	m	m	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{1}{kPa}$
PZM 17A	1133	1112,8	1100	2008	140	202	5,7	1,2	4,4	5,6	0,000065	0,000078
PZM 40B	1147	1128,86	1100	2013	86	486	4,4	1,3	3,2	4,4	0,000055	0,000066
PZM 15C	1148	1133,7	1100	2014	72	143	2,3	0,6	1,7	2,3	0,000085	0,000102
PZM 46	1154	1138	1100	2014	99	164	2,0	0,6	1,5	2,1	0,000070	0,000084

Tabla 8-3. Resumen de los cálculos de asentamientos por descomposición y consolidación del relleno sanitario Curva de Rodas.

Nombre PZM	Cota Residuo	Cota Instalacion PZM	Cota Fundacion	Instalaciones PZM	Maxima presion poro	Esfuerzos promedio Total	Asentamientos por topografia	$\Delta\varepsilon_{epf}$	$\Delta\varepsilon_{vpf}$	$\Delta\varepsilon_{vf}$	m_{ep}	m_t
	<i>msnm</i>	<i>msnm</i>	<i>msnm</i>	Años	<i>kPa</i>	<i>msnm</i>	m	m	m	m	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{1}{kPa}$
PZM-12	1602,0	1568,4	1530	2002	128	333	3,7	0,9	2,8	3,7	0,00007	0,000007
PZM-11	1582,5	1557,5	1530	2001	133	240	3,5	0,7	2,7	3,4	0,00007	0,000007
PZM-22	1572,8	1549,3	1530	2001	129	237	2,3	0,5	1,7	2,3	0,00005	0,000005

En el suelo a mayor esfuerzo se presenta mayor asentamiento y menor módulo de compresibilidad volumétrica, debido a que el suelo se va volviendo más rígido a medida que se van disipando el exceso de presiones de poro. En comparación con los suelos, los rellenos sanitarios dentro de su masa tienen un componente físico que es la materia orgánica, como se observa las **Tabla 8-2** y **Tabla 8-3**, los asentamientos totales mayores no solo se presentan por carga máxima, sino que también influye el comportamiento bioquímico de la materia orgánica.

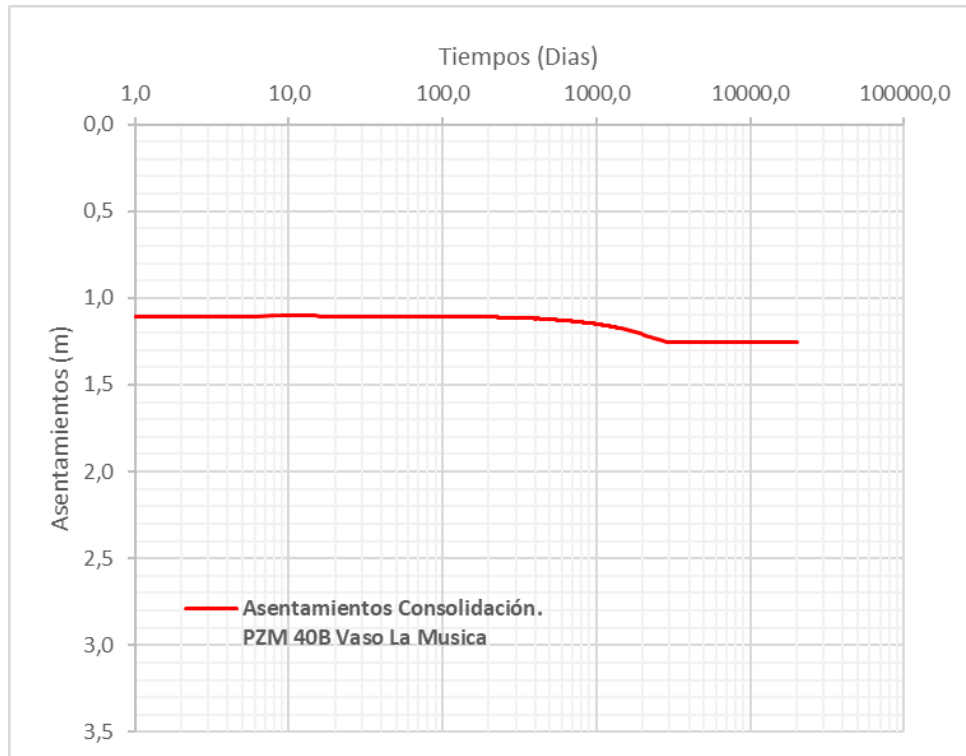
Esta explicación se ve clara en las **Figura 8-10** y **Figura 8-11** que es el PZM 17 A del vaso La Música y el PZM 22-1 de Curva de Rodas; los mayores asentamientos no se dieron donde se presentó mayor esfuerzo, si no donde mayor tiempo ha transcurrido o donde el proceso de descomposición este avanzado, de lo cual se puede inferir que el proceso anaeróbico y aeróbico tiene un efecto importante en el proceso de cambio volumétrico del relleno.

Los mayores asentamientos que se presentan a corto plazo en los rellenos de la ciudad de Medellín oscilan en un tiempo de 2 a 3 años como se ven en las **Figura 8-10** y **Figura 8-11**, representadas por los asentamientos por descomposición o factores biológicos, luego continúan asentamiento completamente por consolidación.

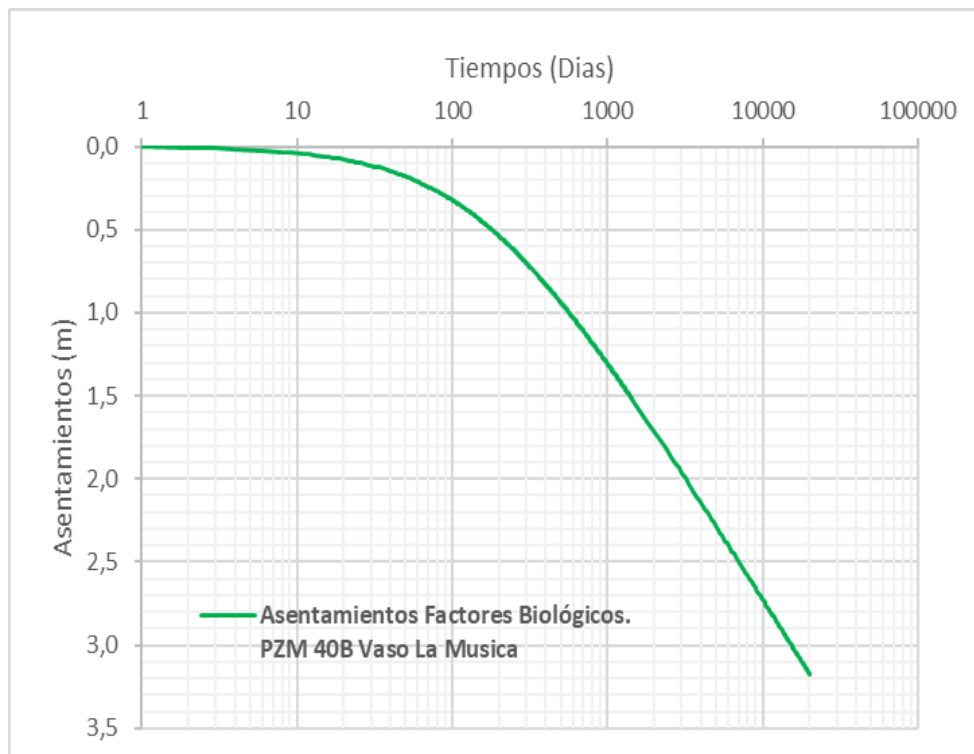
La **Figura 8-10- (b)** y **Figura 8-11-(b)** presentan el comportamiento de los asentamientos por factores biológicos y expulsión de fluidos. la **Figura 8-10 –(a)** y **Figura 8-11- (a)** muestran asentamientos por consolidación que son menores a los asentamientos por factores biológicos, en estas graficas se observa un pico debido al incremento de la carga después de un lapso de tiempo de llenado y luego se ve un cambio de pendiente, punto que hace referencia a la disipación completa de exceso de las presiones poros, indicando que el asentamiento por consolidación ha llegado al 100 %.

Los asentamientos más lentos se dan por consolidación y es más lento el proceso, debido a que la materia orgánica ya se descompuso, y solo queda es la expulsión de fluidos. Sin embargo, cuando se hace un incremento de carga en el instante se presentará la deformación Elasto plástico, pero aún se puede apreciar que continua una deformación vertical más lenta si se mantiene la carga.

Figura 8-10 . Comportamiento del asentamiento debido a Factores Biológicos y consolidación del Vaso La Música PZM 40B-La Pradera.

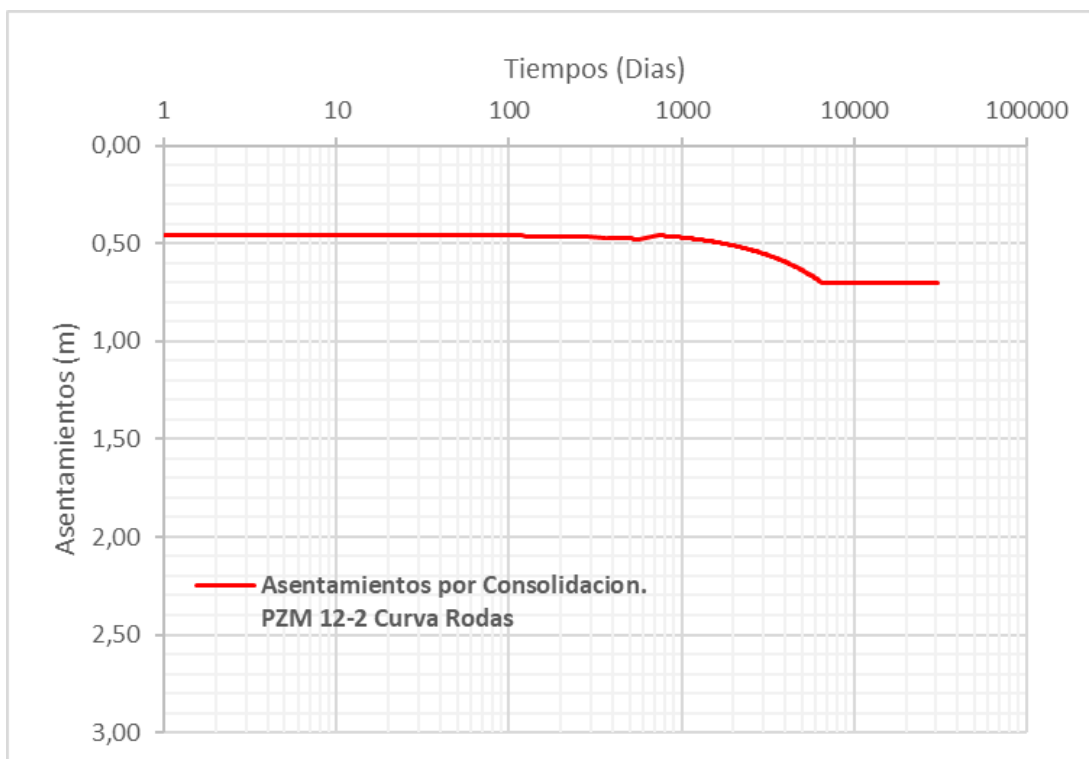


(a)

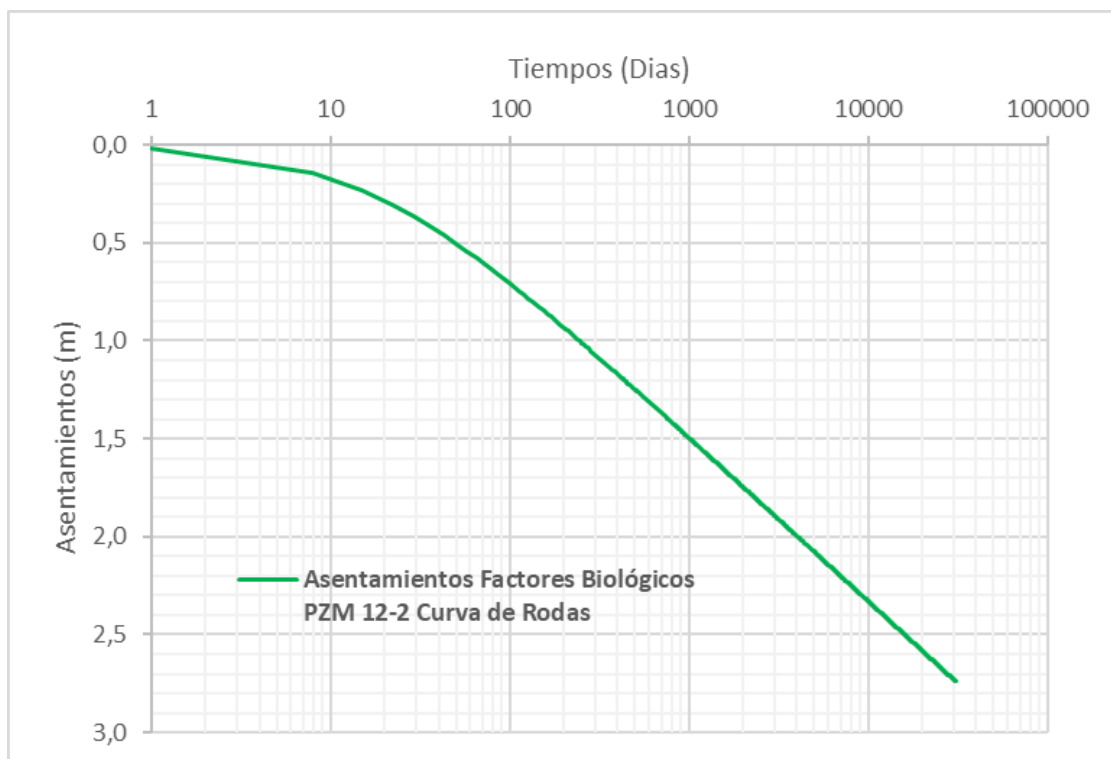


(b)

Figura 8-11. Comportamiento del asentamiento debido a Factores Biológicos y Consolidación de Curva de Rodas PZM 12-2.



(a)



(b)

Para que estos asentamientos por consolidación se reproduzcan, el rango del coeficiente de compresibilidad es entre $0,0001$ a $0,00009$ $1/kPa$, donde la compresibilidad volumétrica de los RSU es mayor en los asentamientos por descomposición que por consolidación, obteniendo una magnitud relativa de viscosidad intergranular de $\beta = 1,2$, por medio de la calibración realizada de la **Ecuación 29**, y este análisis se observa en la **Tabla 8-4**.

Tabla 8-4. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música, La Pradera.

EMPRESAS VARIAS DE MEDELLIN									
RELLENO SANITARIO LA PRADERA									
Nombres piezometros	Asentamientos por Topografía	β	$\Delta\varepsilon_{epf}$	$\Delta\varepsilon_{vpf}$	$\Delta\varepsilon_{vf}$	m_{ep}	m_t	C_v	k
	m		m	m	m	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{m^2}{dia}$	$\frac{m}{dia}$
PZM 17A	5,7	0,1	1,2	0,4	1,6	0,00007	0,00001	10,0	7,E-04
		0,2	1,2	0,7	1,8	0,00007	0,00001	5,0	7,E-04
		0,4	1,2	1,1	2,3	0,00007	0,00003	2,5	7,E-04
		0,6	1,2	1,5	2,7	0,00007	0,00004	1,7	7,E-04
		0,8	1,2	1,8	3,0	0,00007	0,00005	1,3	7,E-04
		1,0	1,2	2,1	3,3	0,00007	0,00007	1,0	7,E-04
		1,2	1,2	4,4	5,6	0,00007	0,00008	0,8	7,E-04
PZM 40B	4,4	0,1	1,3	0,5	1,8	0,00006	0,00001	2,0	1,E-04
		0,2	1,3	0,9	2,2	0,00006	0,00001	1,0	1,E-04
		0,4	1,3	1,5	2,8	0,00006	0,00002	0,5	1,E-04
		0,6	1,3	2,0	3,3	0,00006	0,00003	0,3	1,E-04
		0,8	1,3	2,5	3,7	0,00006	0,00004	0,3	1,E-04
		1,0	1,3	2,8	4,1	0,00006	0,00006	0,2	1,E-04
		1,2	1,3	3,2	4,4	0,00006	0,00007	0,2	1,E-04
PZM 15C	2,3	0,1	0,6	0,3	0,9	0,00009	0,00001	4,7	4,E-04
		0,2	0,6	0,5	1,1	0,00009	0,00002	2,4	4,E-04
		0,4	0,6	0,8	1,4	0,00009	0,00003	1,2	4,E-04
		0,6	0,6	1,1	1,7	0,00009	0,00005	0,8	4,E-04
		0,8	0,6	1,3	1,9	0,00009	0,00007	0,6	4,E-04
		1,0	0,6	1,5	2,1	0,00009	0,00009	0,5	4,E-04
		1,2	0,6	1,7	2,3	0,00009	0,00010	0,4	4,E-04
PZM 46	2,0	0,1	0,6	0,3	0,9	0,00007	0,00001	3,6	3,E-04
		0,2	0,6	0,4	1,1	0,00007	0,00001	0,7	1,E-04
		0,4	0,6	0,7	1,3	0,00007	0,00003	0,4	1,E-04
		0,6	0,6	1,0	1,6	0,00007	0,00004	0,2	1,E-04
		0,8	0,6	1,2	1,8	0,00007	0,00006	0,2	1,E-04
		1,0	0,6	1,3	1,9	0,00007	0,00007	0,1	1,E-04
		1,2	0,6	1,5	2,1	0,00007	0,00008	0,1	1,E-04

Tabla 8-5. Datos utilizados en el modelo analítico para el cálculo del asentamiento, Curva de Rodas.

EMPRESAS VARIAS DE MEDELLIN									
RELLENO SANITARIO CURVA DE RODAS									
Nombres piezómetros	Asentamientos por Topografía	β	$\Delta\varepsilon_{epf}$	$\Delta\varepsilon_{vpf}$	$\Delta\varepsilon_{vf}$	m_{ep}	m_t	C_v	k
	m		m	m	m	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{1}{kPa}$	$\frac{m^2}{dia}$	$\frac{m}{dia}$
PZM 22	2,3	0,10	0,51	0,25	0,76	0,000050	0,000005	7,6	4,E-04
		0,20	0,51	0,45	0,96	0,000050	0,00001	3,8	4,E-04
		0,40	0,51	0,78	1,28	0,000050	0,00002	1,9	4,E-04
		0,60	0,51	1,06	1,56	0,000050	0,00003	1,3	4,E-04
		0,80	0,51	1,31	1,81	0,000050	0,00004	1,0	4,E-04
		1,00	0,51	1,54	2,04	0,000050	0,000050	0,8	4,E-04
		1,20	0,51	1,75	2,25	0,000050	0,00006	0,6	4,E-04
PZM 11-2	3,7	0,10	0,92	0,43	1,35	0,000073	0,0000073	3,4	3,E-04
		0,20	0,92	0,75	1,67	0,000073	0,0000146	1,7	3,E-04
		0,40	0,92	1,28	2,20	0,000073	0,0000292	0,9	3,E-04
		0,60	0,92	1,73	2,65	0,000073	0,0000438	0,6	3,E-04
		0,80	0,92	2,12	3,04	0,000073	0,0000584	0,4	3,E-04
		1,00	0,92	2,47	3,39	0,000073	0,000073	0,3	3,E-04
		1,20	0,92	2,79	3,71	0,000073	0,0000876	0,3	3,E-04
PZM 12-2	3,5	0,10	0,70	0,38	1,08	0,000070	0,000007	18,6	1,E-03
		0,20	0,70	0,67	1,37	0,000070	0,000014	9,3	1,E-03
		0,40	0,70	1,18	1,88	0,000070	0,000028	4,6	1,E-03
		0,60	0,70	1,62	2,32	0,000070	0,000042	3,1	1,E-03
		0,80	0,70	2,02	2,72	0,000070	0,000056	2,3	1,E-03
		1,00	0,70	2,39	3,09	0,000070	0,000070	1,9	1,E-03
		1,20	0,70	2,74	3,44	0,000070	0,000084	1,5	1,E-03

En la **Figura 8-12**, se observa el comportamiento de la sumatoria de los dos asentamientos por consolidación y factores biológicos. Donde se observa la calibración del β entre los parámetros 0,1-1.2 planteado por siendo más compresible el 1.2. Si se compara los RSU y el suelo, son más compresibles los RSU. **Figura 8-12** permite identificar el valor del parámetro β para los RSU de Medellín, que no es tan amplio como para los suelos, aunque cada relleno sanitario se puede comportar diferente debido a que cada ciudad su composición física, clima, entre otros factores cambia y este parámetro puede ser más amplio.

Figura 8-12. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música PZM 40B La Pradera.

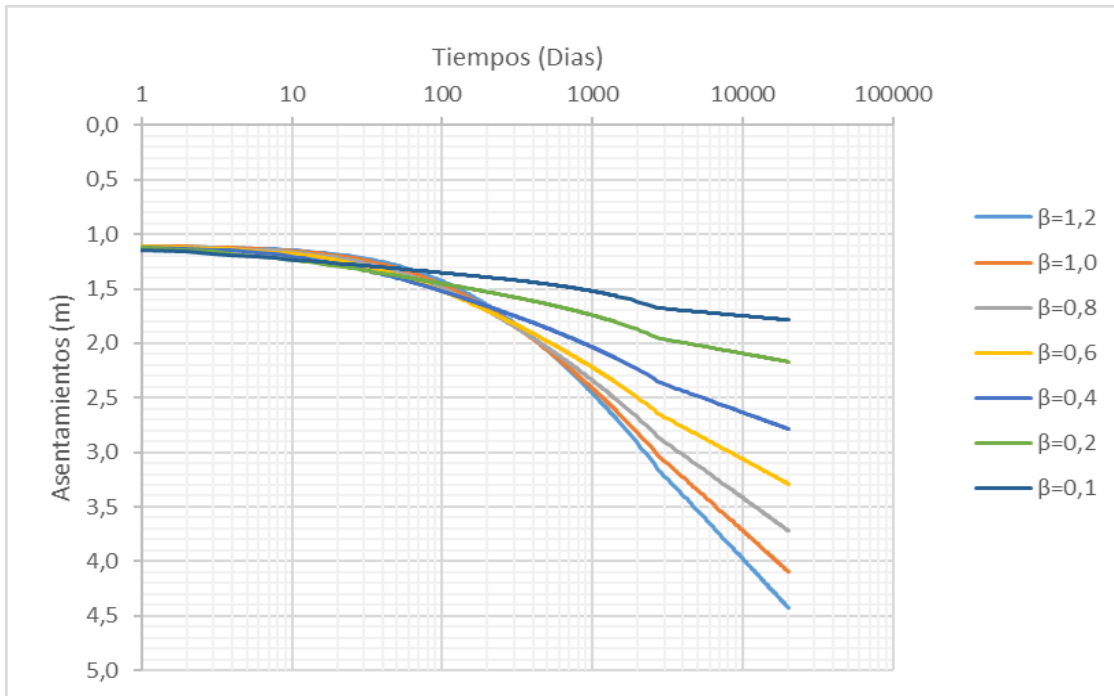
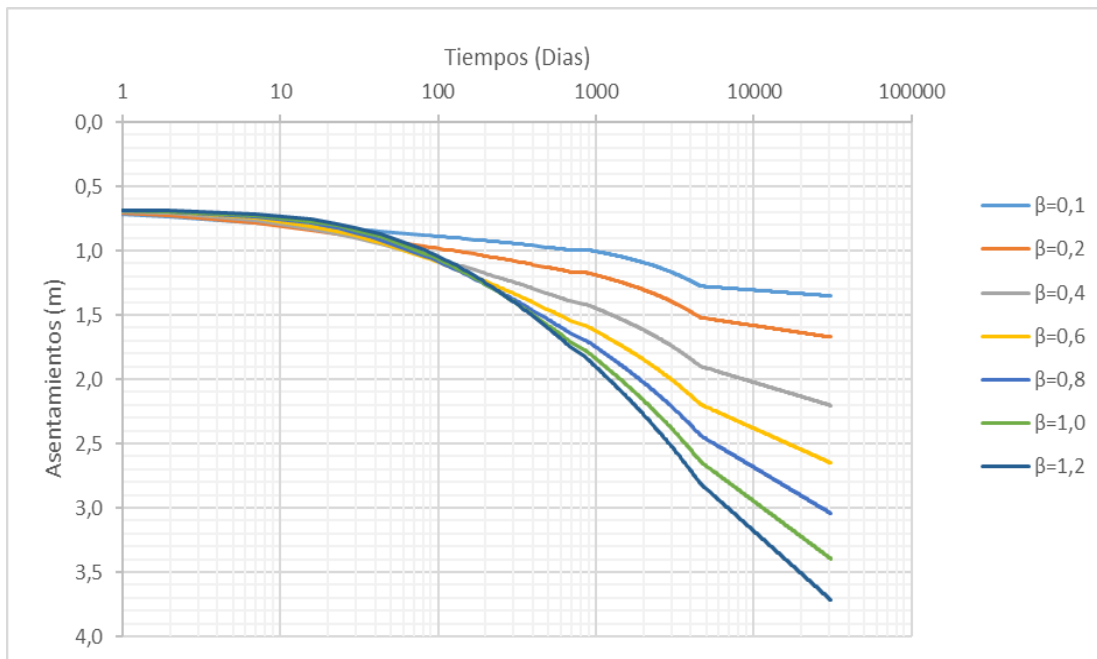


Figura 8-13. Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música PZM 12-2, La Pradera.



8.6 Comportamiento bioquímico y Físico de los RSU de la ciudad de Medellín y su Área Metropolitana.

El comportamiento en un relleno sanitario se relaciona con procesos bioquímico aerobio y anaerobio, que van transcurriendo en diferentes etapas, **Tabla 8-4** se superponen las curvas de asentamiento y temperatura con las etapas o fases de descomposición que presentan los Rellenos Sanitarios de acuerdo con (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982); se observa que en un periodo relativamente corto se alcanza una condición anaeróbica debido a la ausencia del oxígeno, por el agotamiento del aire al inicio del proceso. En los rellenos esta condición anaeróbica se produce como consecuencia de la saturación de los RSU por efecto de la compactación y la colocación de carga, debido al alto contenido natural de agua que contienen nuestros RSU. Todas las fases son importantes ya que una conlleva a la activación de la otra, pero cabe resaltar que en las *fases II y fase III* es donde mayor descomposición se genera, por la elevación de la temperatura, iniciando la producción de Metano y Dióxido de carbono, componentes del gas producto de la actividad bacteriana, y de lixiviado. Esto da lugar a un asentamiento muy rápido y grandes, por la descomposición de la materia orgánica que es la que presenta mayor porcentaje de composición física de los RSU de la ciudad de Medellín.

En la **Tabla 8-4** se observa el incremento de la temperatura que a los 100 días alcanza a 35 °C, luego continuo con temperaturas entre 40 °C a 70 °C, donde la descomposición está en su máxima expresión, luego se esperaría que continúe disminuyendo la temperatura como lo registra el relleno sanitario Curvas de Rodas , que ya fue clausurado en el año 2002 y registra temperaturas constantes entre 30 °C y 20 °C; lo que indica que la temperatura de los vasos de la Pradera posiblemente tendrán este mismo comportamiento, indicando que el proceso de asentamiento aun continua de forma paulatinamente pero ya por consolidación, más que por descomposición de la materia orgánica, la cual ya finalizo su proceso.

Se habla de dos procesos un bioquímico que hace énfasis a las reacciones químicas que presentan internamente la masa de los RSU y físico a los esfuerzos que experimentan al momento que se la imponiendo carga por medio de capas.

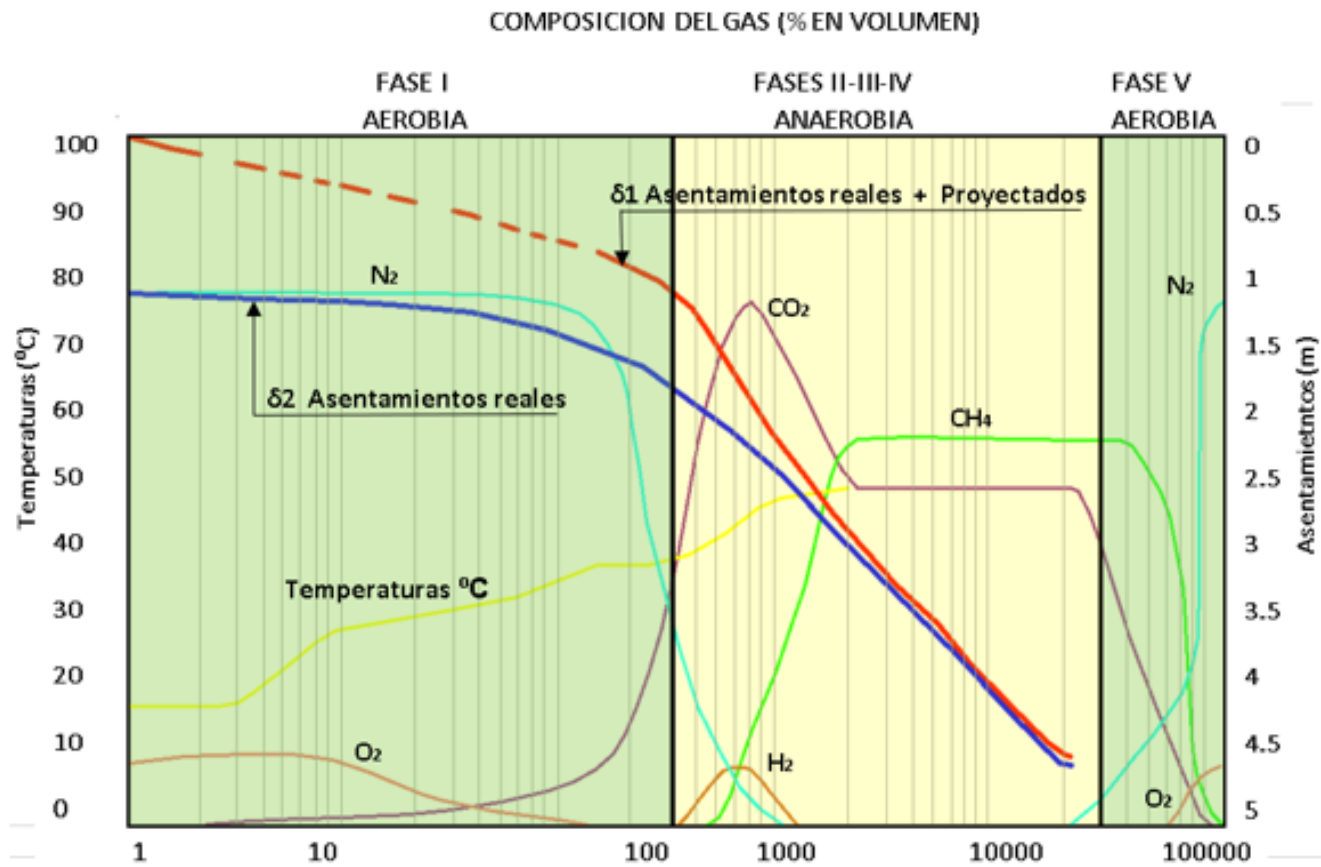
Estos dos procesos (consolidación y Biológicos) se relacionan debido a que se dan simultáneamente, ya que al colocarse más RSU, se incrementa la carga, a su vez representa más masa de la que va sufrir un proceso químico por el incremento de temperatura que se va presentar, ya sea por las fases anaerobio o aerobio, permitiendo un cambio volumétrico.

La **Tabla 8-4** de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982), se modificó para adaptarle los asentamientos y temperaturas con el fin de describir el comportamiento durante el proceso de descomposición.

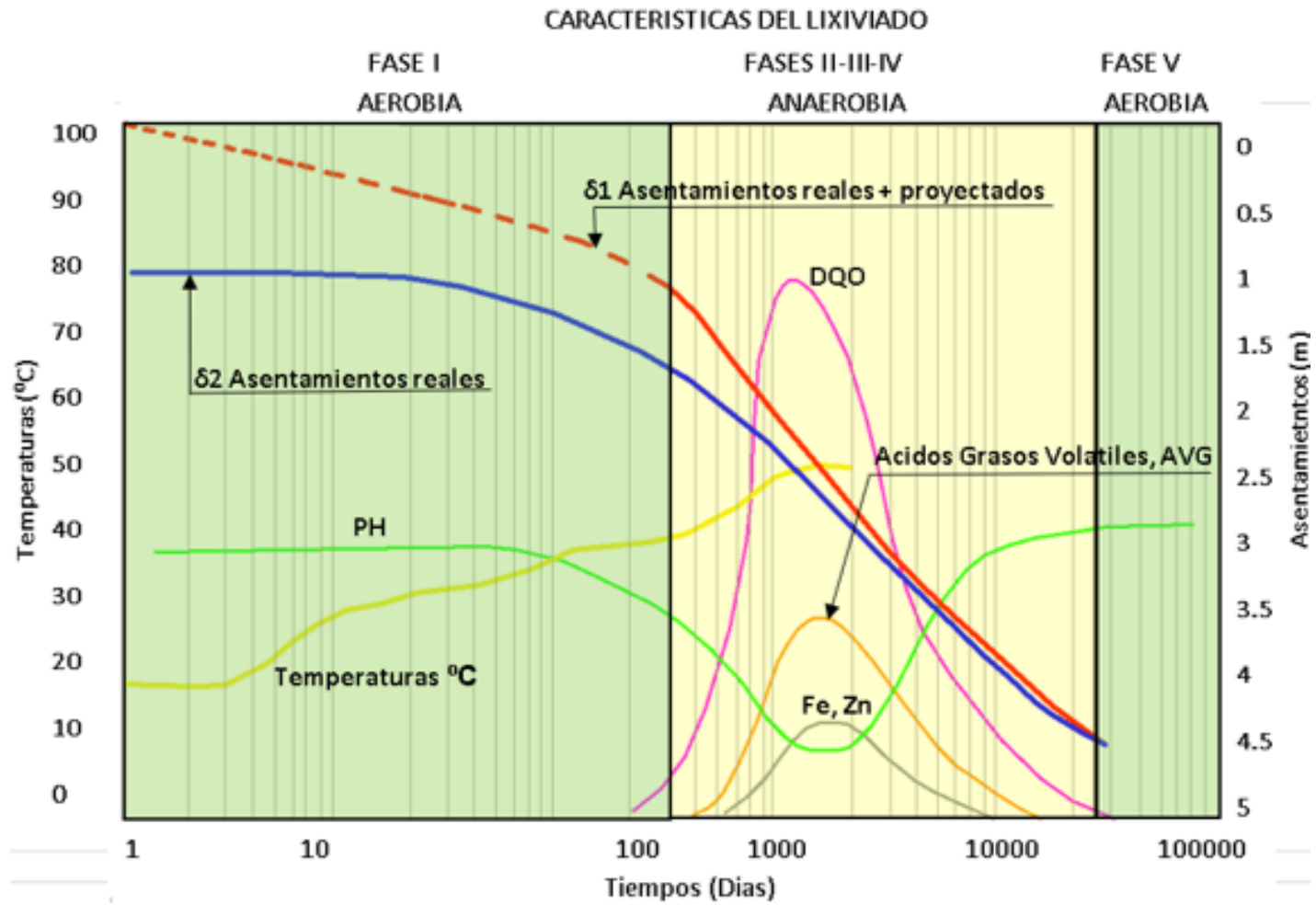
La línea amarilla hace referencia a la temperatura, se observa el incremento durante la etapa aerobia. A medida que se incrementa la temperatura da paso al proceso anaeróbico.

La línea azul son los asentamientos de una columna de RSU la cual es la misma que la línea continua color roja en diferentes escalas debido a la fecha de inicio, la idea de la línea azul es para poder apreciar el descenso de la curva, y la línea ponteadada roja es la proyección de la curva roja.

Figura 8-14. Fases de descomposición de los RSU relleno sanitario La Pradera. a) Gas. b) Lixiviado. Modificado de (Tchobanoglous, Theissen, & Eliassen, 1982).



(a)



(b)

8.7 Cálculo del Factor de rendimiento.

La relación S/H define el espesor final de una capa de RSU una vez han concluido los asentamientos, con diferencia en la altura inicial del proceso. Por lo tanto, se considera una columna unitaria, medida inicial que puede tener tal columna de RSU para que al final del proceso esta dimensión sea equivalente a la altura de diseño. (Yepes García, 2015)

Con los parámetros C_v , m_t , m_{ep} , y k , calculados en la sección anterior para la calibración del modelo que numéricamente es equivalente al comportamiento de los RSU de la ciudad de Medellín, se puede proyectar los asentamientos y así poder estimar la capacidad real que tendrá el relleno sanitario.

Una columna de RSU de 46.88m, se dividió en 4 capas que simularían el proceso de llenado. Dicho proceso de llenado se realizó para diferentes tiempos para conocer el comportamiento de los asentamientos y así calcular *factor de rendimiento*.

Se determinó entonces a partir de la teoría de consolidación y viscosidad intergranular los asentamientos para intervalos de 3, 6, 12, 18, 24, 36 y 48 meses, luego de conocer los asentamientos se calculó el *factor de rendimiento* con la **Ecuación 34**, obteniendo los resultados que se presentan en la **Tabla 8-6**.

Ecuación 34
$$\text{Factor de rendimiento} = 1 + \frac{\sum \delta}{H}$$

Donde:

$\sum \delta$: Sumatoria de los asentamientos calculados por cada intervalo de tiempo.

H : Altura de la columna.

Para el cálculo de factor de rendimiento se hizo en una columna RSU, donde se tomó la altura de la columna de RSU y se dividió en 4, y se evaluó para intervalos de 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48, y 84 meses.

Caso 1: Cálculo de factor de rendimiento para una columna de RSU de 46,88 m para un proceso constructivo de 6 meses.

- Asentamiento 1 por Factor Biológico - Teoría de Dr. Zeevaer

$$\Delta\delta_2 = \left\{ m_t \log \left[1 + \frac{4.62}{\beta} (T_v) \right] \right\} \Delta\sigma * \Delta H$$

PASO 1: Coeficiente de compresibilidad volumétrica viscosidad intergranular. m_t

El m_t se obtuvo despejándolo de la **Ecuación 1**, y conociendo el β obtenido de la calibración del modelo y m_{ep} reportado por.

PASO 2: Factor de tiempo primario T_v . Donde $T_v = \frac{c_v}{h^2} t$

- **Coeficiente de consolidación C_v**

se calculó el factor C_v con la **Ecuación 31** en función de permeabilidad k , compresibilidad volumétrica de viscosidad intergranular m_t y peso unitario del agua γ_w . El parámetro k fue tomado a partir de los rangos reportado por (Knochenmus, 1998).

- **Tiempo del proceso de llenado o constructivo. t**

Para este caso sería de 6 meses.

- **Altura de drenaje de los fluidos h .**

Se asumió una altura de 7m considerando la separación entre las capas de filtros en el relleno.

PASO 3: Factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. β

Valor obtenido de la calibración del modelo $\beta = 1,2$.

PASO 4: Incremento de esfuerzo total $\Delta\sigma$

El peso unitario de los RSU tomado de (INTEINSA I. I., 2017), multiplicado por la altura de la columna del RSU que se está evaluando el asentamiento.

PASO 5: Espesor compresible. ΔH

Es la altura de la columna de RSU.

- Asentamiento 2 por Consolidación - Teoría del Dr Terzaghi:

$$\Delta\delta_1 = \{m_{ep}\Delta\sigma F(T_v)\}\Delta\sigma * \Delta H$$

PASO 1: Coeficiente de compresibilidad volumétrica representando el fenómeno Elasto plástico. m_{ep}

Este parámetro fue tomado de la investigación de.

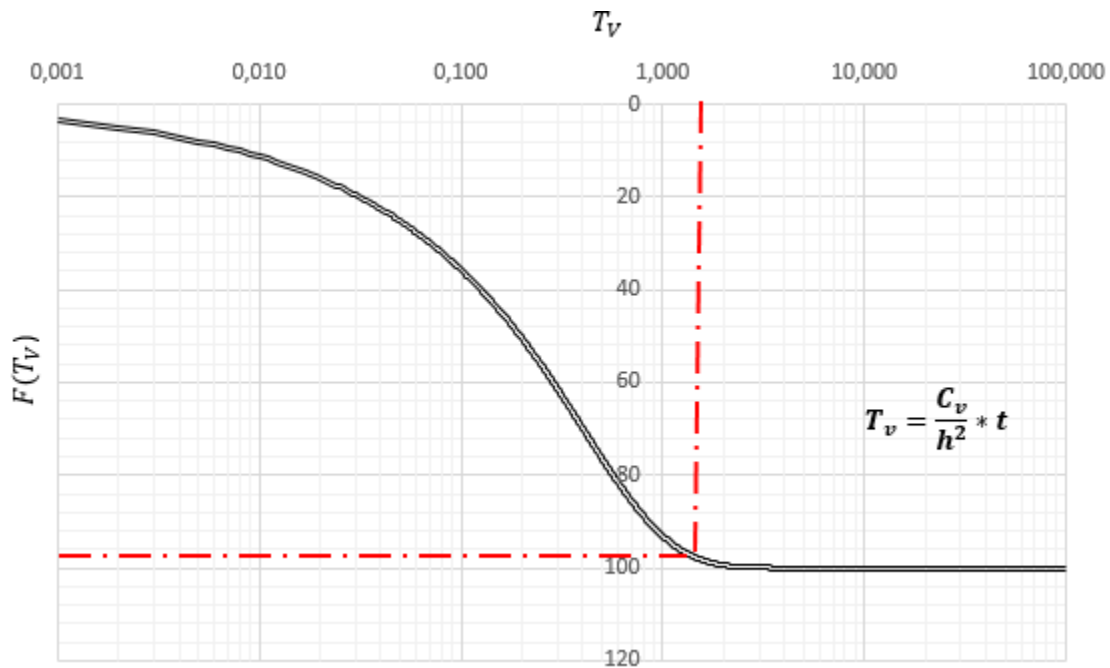
PASO 2: Incremento de esfuerzo total $\Delta\sigma$

El peso unitario de los RSU tomado de (INTEINSA I. I., 2017), multiplicado por la altura de la columna del RSU que se está evaluando el asentamiento.

PASO 3. Grado de consolidación $F(T_v)$.

Con el valor obtenido de T_v para el cálculo del asentamiento por factor biológico se busca en la **Figura 8-15** el grado de consolidación.

Figura 8-15: Curva de Consolidación. Adaptada por (Zeevaert L. , 1983)



PASO 4: Espesor compresible. ΔH

Es la altura de la columna de RSU.

Luego de obtener los asentamientos1 y 2, se utilizó la **Ecuación 34** para el cálculo del factor de rendimiento que sus resultados están reportados en la **Tabla 8-6**.

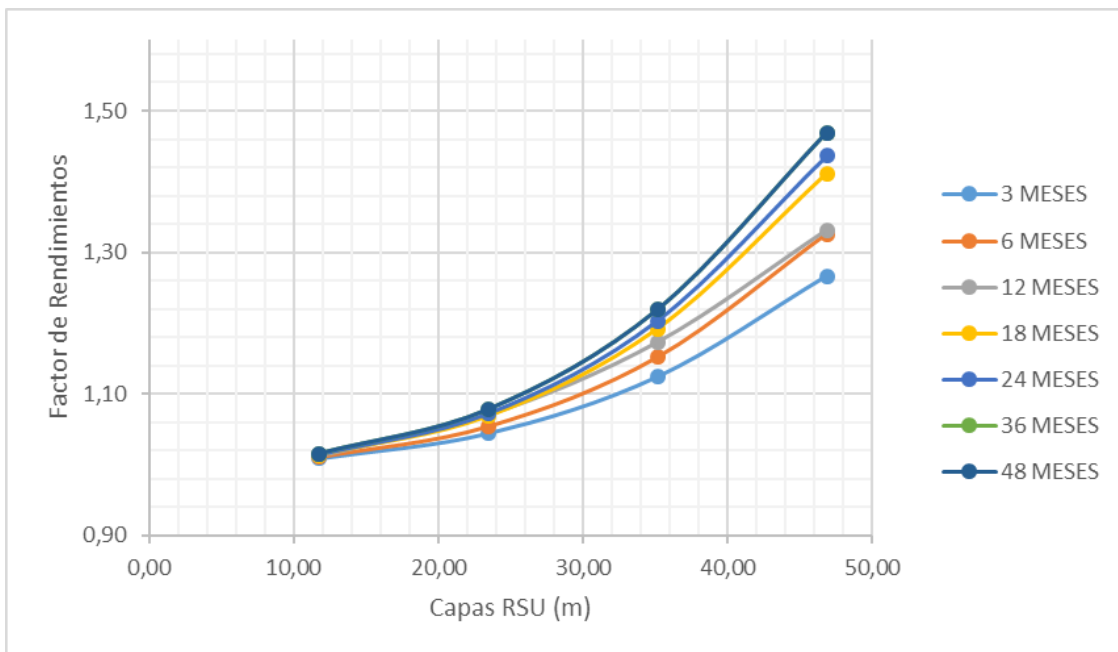
Tabla 8-6: Calculo del Factor de Rendimientos.

		ASENTAMIENTOS POR TERZAGHI					ASENTAMIENTOS POR ZEEVAERT							ASENT TOTAL	FACTOR DE RENDIMIENTO
		ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACION					ASENTAMIENTOS POR DESCOMPOSICION + CONSOLIDACION								
TIEMPO		σ_{total}	U	mep	ΔH	ASENT 2	h	C_v	k	β	mt	T_v	ASENT 1		
mes	dia	kPa	%	$\frac{1}{kPa}$	m	m	m	$\frac{m^2}{dia}$	$\frac{m}{dia}$		$\frac{1}{kPa}$	dia	m	m	
						6,87							5,63	12,51	1,27
3	90	129	0,91	0,00017	11,71	0,23	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	0,827	0,19	0,42	
	90	258	0,91	0,00017	23,44	0,92	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	0,827	0,75	1,67	
	90	387	0,91	0,00017	35,16	2,06	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	0,827	1,69	3,75	
	90	516	0,91	0,00017	46,88	3,67	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	0,827	3,00	6,67	
						7,40							7,86	15,26	1,33
6	180	129	0,98	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	1,653	0,26	0,51	
	180	258	0,98	0,00017	23,44	0,99	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	1,653	1,05	2,04	
	180	387	0,98	0,00017	35,16	2,22	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	1,653	2,36	4,58	
	180	516	0,98	0,00017	46,88	3,95	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	1,653	4,19	8,14	
						7,48							8,08	15,56	1,33
12	360	129	0,99	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	3,306	0,34	0,59	
	360	258	0,99	0,00017	23,44	1,00	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	3,306	1,72	2,72	
	360	387	0,99	0,00017	35,16	2,24	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	3,306	2,58	4,82	
	360	516	0,99	0,00017	46,88	3,99	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	3,306	3,44	7,43	
						7,48							11,81	19,29	1,41
18	540	129	0,99	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	4,959	0,39	0,64	
	540	258	0,99	0,00017	23,44	1,00	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	4,959	1,58	2,57	
	540	387	0,99	0,00017	35,16	2,24	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	4,959	3,54	5,79	
	540	516	0,99	0,00017	46,88	3,99	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	4,959	6,30	10,29	
						7,55							12,90	20,45	1,44
24	720	129	1,00	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	6,612	0,43	0,68	
	720	258	1,00	0,00017	23,44	1,01	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	6,612	1,72	2,73	
	720	387	1,00	0,00017	35,16	2,27	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	6,612	3,87	6,14	
	720	516	1,00	0,00017	46,88	4,03	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	6,612	6,88	10,91	
						7,55							14,44	22,00	1,47
36	1080	129	1,00	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	9,918	0,48	0,73	
	1080	258	1,00	0,00017	23,44	1,01	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	9,918	1,93	2,93	
	1080	387	1,00	0,00017	35,16	2,27	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	9,918	4,33	6,60	
	1080	516	1,00	0,00017	46,88	4,03	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	9,918	7,70	11,73	
						7,55							15,55	23,10	1,49
48	1440	129	1,00	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	13,224	0,52	0,77	
	1440	258	1,00	0,00017	23,44	1,01	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	13,224	2,07	3,08	
	1440	387	1,00	0,00017	35,16	2,27	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	13,224	4,67	6,93	
	1440	516	1,00	0,00017	46,88	4,03	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	13,224	8,29	12,32	
						7,55							17,72	25,27	1,54
84	2520	129	1,00	0,00017	11,71	0,25	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	23,143	0,59	0,84	
	2520	258	1,00	0,00017	23,44	1,01	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	23,143	2,36	3,37	
	2520	387	1,00	0,00017	35,16	2,27	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	23,143	5,32	7,58	
	2520	516	1,00	0,00017	46,88	4,03	7	0,45	9,E-04	1,2	0,00020	23,143	9,45	13,48	

Se observa que la **Tabla 8-6** y **Figura 8-16**, para los diferentes intervalos de tiempo, los asentamientos por consolidación se mantienen constante, mientras los asentamientos por factores biológicos que están asociado a la descomposición y a la producción y expulsión gas y lixiviado incrementan, al igual el *factor de rendimiento*.

También en la **Figura 8-16** se observa que a mayor espesor de RSU y más lento (mayor tiempo) seda el proceso constructivo, mayor es el *factor de rendimiento*.

Figura 8-16: variación del Factor de Rendimiento con respecto a la altura de la columna RSU y el proceso constructivo.



9. Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones

- Los rellenos sanitarios de la ciudad de Medellín y su Área Metropolitana, presentan asentamientos a cortos y largo plazos, estos asentamientos se relacionaron, el de corto plazo a la descomposición de la materia orgánica debido a factores biológicos y el de largo plazo a la consolidación debido a la expulsión de los fluidos.
- Estos asentamientos se relacionan numéricamente equivalente a la teoría de consolidación de Terzagui y la viscosidad intergranular de (Zeevaert L. , 1983), donde los asentamientos por consolidación en los RSU se presentan cuando se disipan los excesos de presiones de poros al momento de la aplicación de cargas verticales, y los asentamientos por descomposición pueden ser numéricamente equivalente al proceso de descomposición de los residuos, asociando a un proceso retardado en el tiempo por un proceso químico de la descomposición de los RSU, más que por un proceso físico debido a grandes esfuerzos.
- En primer lugar, se observa a corto plazo, un asentamiento rápido debido a la expulsión del aire donde se registraron incrementos en las temperaturas y en las presiones de poros en respuesta al incremento de las columnas de residuos.

- Cuando los residuos se saturan, se da el cambio de las dos fases de aeróbico a la fase anaeróbica, punto donde se activan las bacterias y sube aún más la temperatura entre un rango de 40 ° a 70 °, produciendo una combinación de presiones por la generación del gas y del lixiviado.
- Los componentes principales de la composición química del lixiviado y gas es el Metano, Dióxido de carbono y DQO, su mayor producción se presenta durante la fase anaerobia, donde la temperatura está en un rango de 40 °C a 70 °C, y es donde mayor concentración de la descomposición de la materia orgánica se presenta.
- Los asentamientos a corto plazo son mayores con un 70% del asentamiento total, y el asentamiento a largo plazo le corresponde el 30%.
- Los parámetros identificados para el cálculo de asentamientos en los rellenos sanitarios de la ciudad de Medellín y su área metropolitana fueron:
 - 1) El coeficiente de compresibilidad volumétrica está alrededor de $0,0001$ a $0,00009 \frac{1}{kPa}$, pero para los asentamientos a corto plazo o por descomposición su coeficiente de compresibilidad volumétrica es mayor que para los asentamientos a largo plazo o por consolidación.
 - 2) La permeabilidad esta alrededor de 0.001 a $0.0007 \frac{m}{dia}$, valores muy similares a las permeabilidades de las arcillas, lo que muestra la necesidad y la importancia de colocar filtros.
 - 3) La magnitud relativa de viscosidad intergranular fue de $\beta = 1,2$, parámetro que se ajustó para mostrar el comportamiento de la descomposición de los RSU, indicando que los RSU son muy compresibles en respuesta de la descomposición de la materia orgánica.

- 4) El coeficiente de consolidación 0.1 a $2 \frac{m^2}{dia}$ valor amplio debido a la heterogeneidad de los RSU.
- Con la viscosidad intergranular del (Zeevaert L. , 1983) y con los parámetros identificados se puede conocer cuánto se puede asentar un vaso de un relleno sanitario.
 - El contenido de humedad de los RSU de la ciudad de Medellín y su área metropolitana es del 50%, y en la ciudad de Bogotá es un 40%, valores que calculo con los porcentajes de composición física de los RSU, esto indica que en la ciudad de Medellín se produce más materia orgánica, indicando que puede existir más asentamiento por descomposición en Medellín que en Bogotá.
 - Los RUS después de ser depositados inmediatamente entran a la etapa anaeróbica debido a la saturación, por la compactación y la colocación de carga debido al alto contenido natural de agua que contienen nuestros RSU. Con los registros de las temperaturas se puede estimar en qué etapa va el proceso de descomposición de los RSU, teniendo en cuenta la interpretación de la **Figura 8-13**.
 - El *factor de rendimiento* oscila entre 1.25 a 1.5 dependiendo del tiempo que se realice el lleno del vaso de los RSU. Cuando el proceso constructivo del llenado es más lento se registran mayores asentamientos por la descomposición de la materia orgánica más la producción y expulsión de los fluidos (lixiviado y gas), que, por consolidación, pero si se hiciera lo construcción del llenado en 3 meses rápido para una columna de 46.88m, los asentamientos son mayores por consolidación ya que la materia orgánica aún no ha sufrido su proceso químico o su proceso de descomposición.
 - El *facto de rendimiento* se hace más grande cuando la construcción del llenado es lenta.
 - Identificando el rango del factor rendimiento se calcular la capacidad real que tendrá el relleno sanitario.

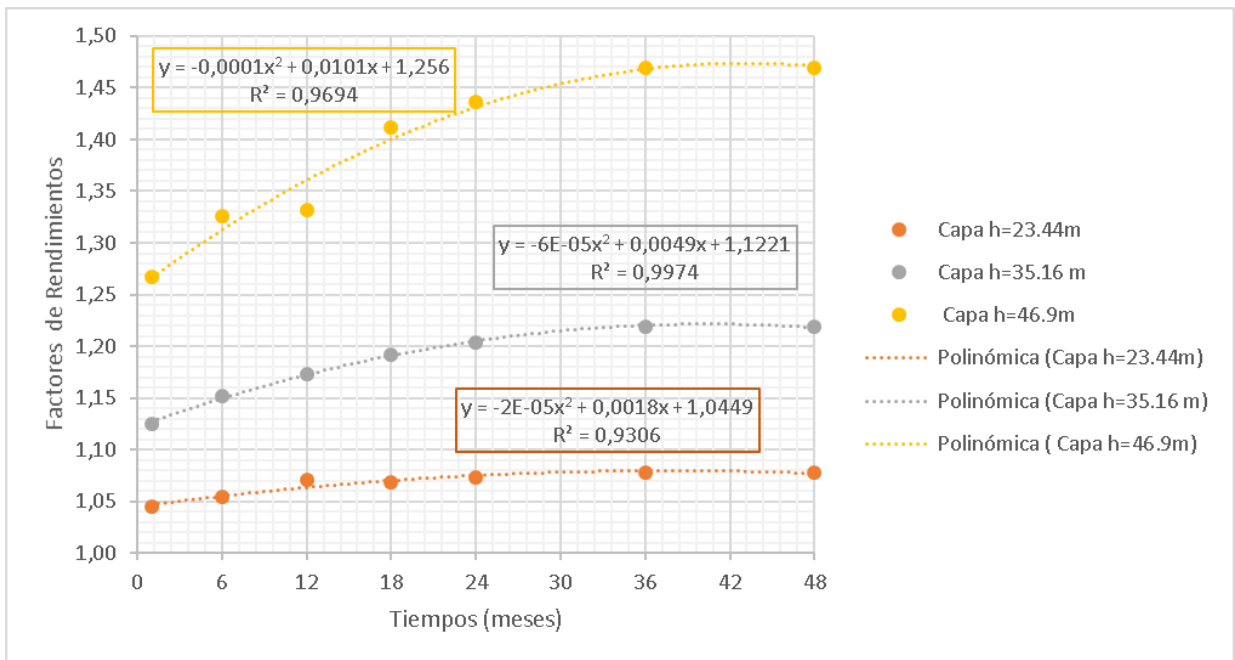
9.2 Recomendaciones

- Revisar el parámetro β para otros rellenos, para conocer el rango y la influencia del contenido de la materia orgánica en otras ciudades.
- Tener más lecturas o registros de piezómetro para ajustar más los parámetros del modelo planteado.
- Analizar la influencia de la temperatura de colocación, condiciones ambientales para el cálculo de los asentamientos por factores biológicos y consolidación.

A. Anexo: correlaciones – análisis de datos obtenidos en los resultados del modelo.

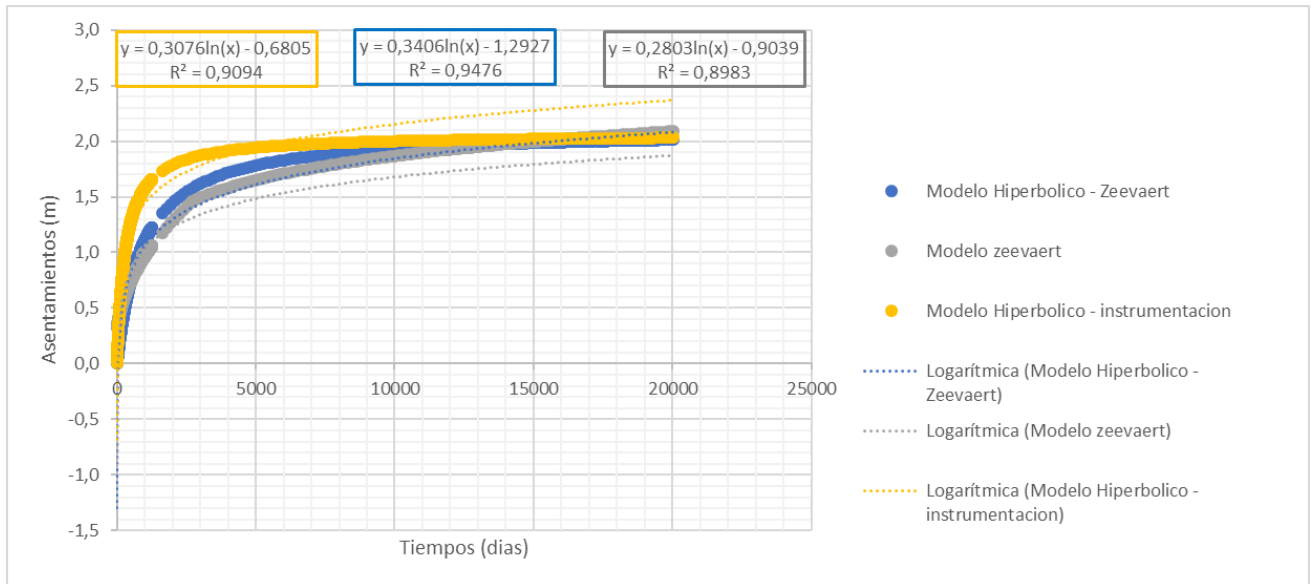
ANÁLISIS 1. En la **Figura A-1** se observa que el factor de rendimiento varía desde 1,05 hasta 1,5 dependiendo del tiempo de ejecución o construcción del vaso y de la altura de la columna. Para columnas de baja altura la variación se puede considerar lineal, pero para alturas de más de 40 m tiende a ser curva y la inflexión ocurre aproximadamente a 24 meses, de donde se puede inferir que el tiempo mínimo para construir el vaso debería ser de 24 meses, periodo a partir del cual la tendencia de aumento del rendimiento es menor.

Figura A-1. Relación del Tiempo constructivo y Factor de Rendimiento para diferentes capas para una columna H= 46.9 m de RSU.



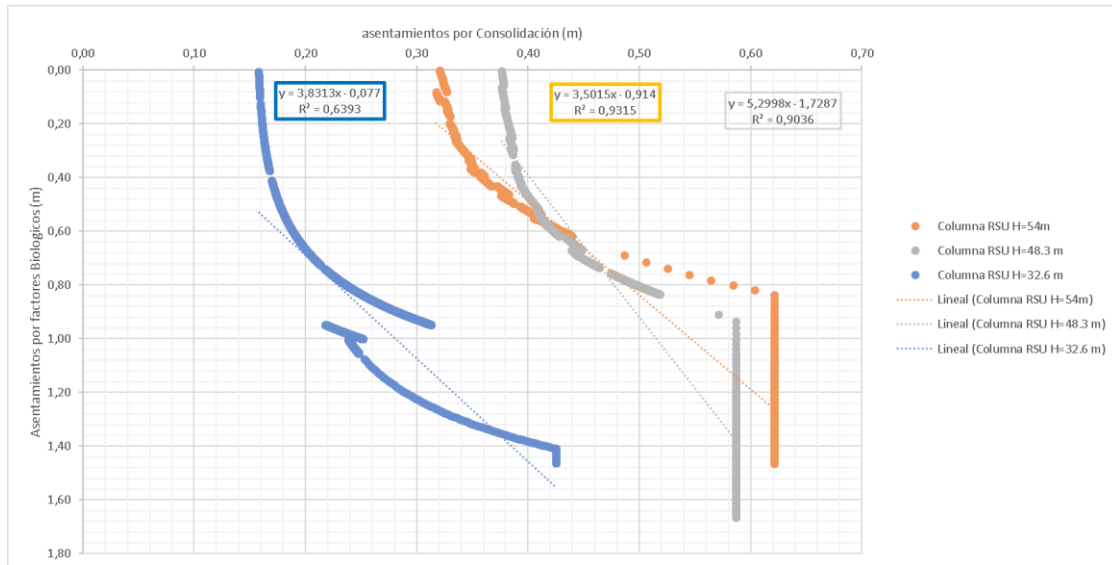
ANÁLISIS 2: En la **Figura A-2**. Se observa claramente que el modelo obtenido en esta investigación por la teoría del Doctor Zeevaert se ajusta al modelo Hiperbólico mostrando el mismo comportamiento verificándose con datos de instrumentación, con la ventaja que se obtiene a partir de un modelo físico que incluye las propiedades de deformabilidad de los residuos.

Figura A-2. Ajuste del modelo con el modelo Hiperbólico e instrumentación para una columna H= 54 m.



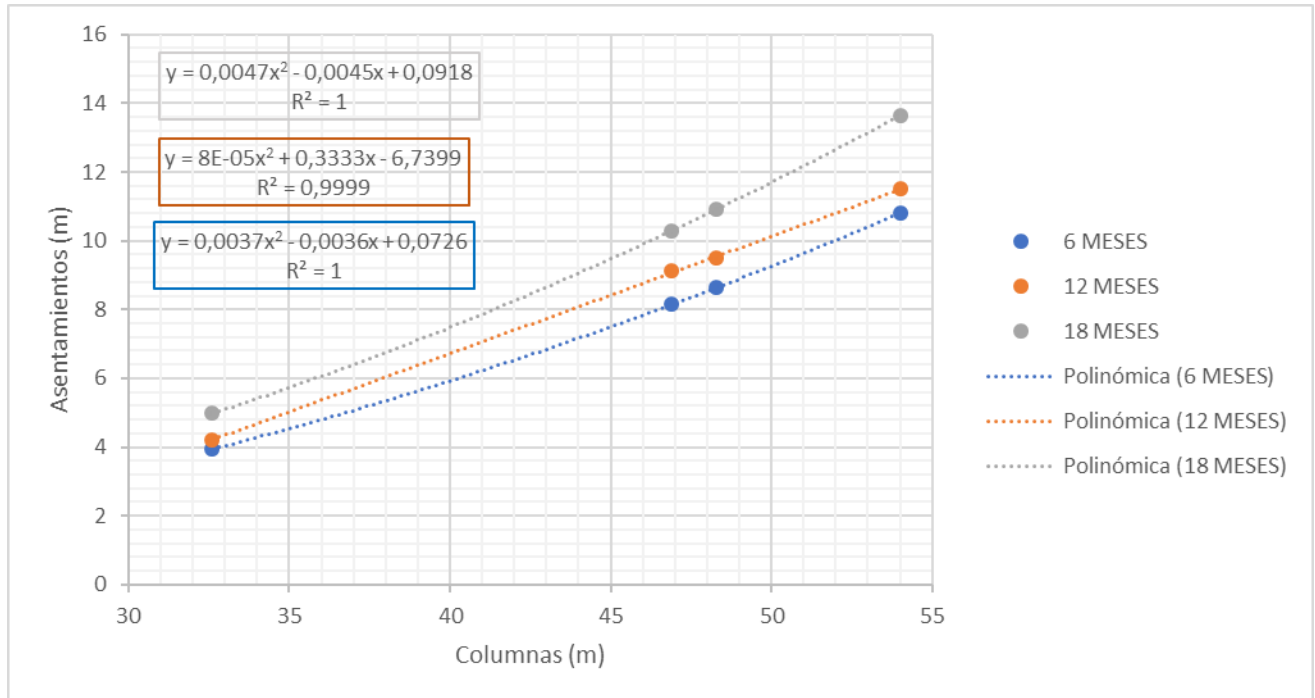
ANÁLISIS 3: En la **Figura A-3** se observa que no existe una relación entre los asentamientos por consolidación y factores Biológico debido a que son dos comportamientos diferentes y que cada columna RSU este proceso sucede en tiempo distintos. Cada columna es un caso particular por su altura, tiempo y forma de llenado.

Figura A-3. Relación de los asentamientos por consolidación y los asentamientos por factores Biológico.

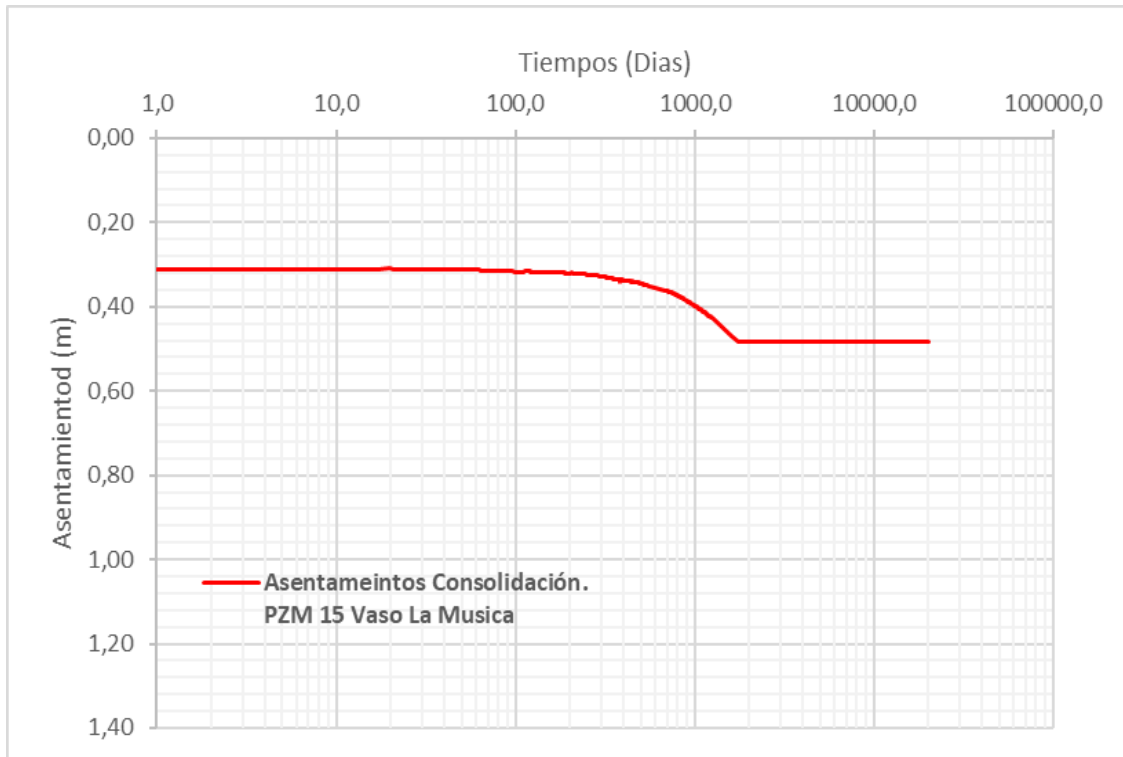


ANÁLISIS 4: la Figura A-4 se puede observar que evaluando las diferentes columnas RSU para un mismo tiempo se puede obtener ecuaciones para el calcular los asentamientos.

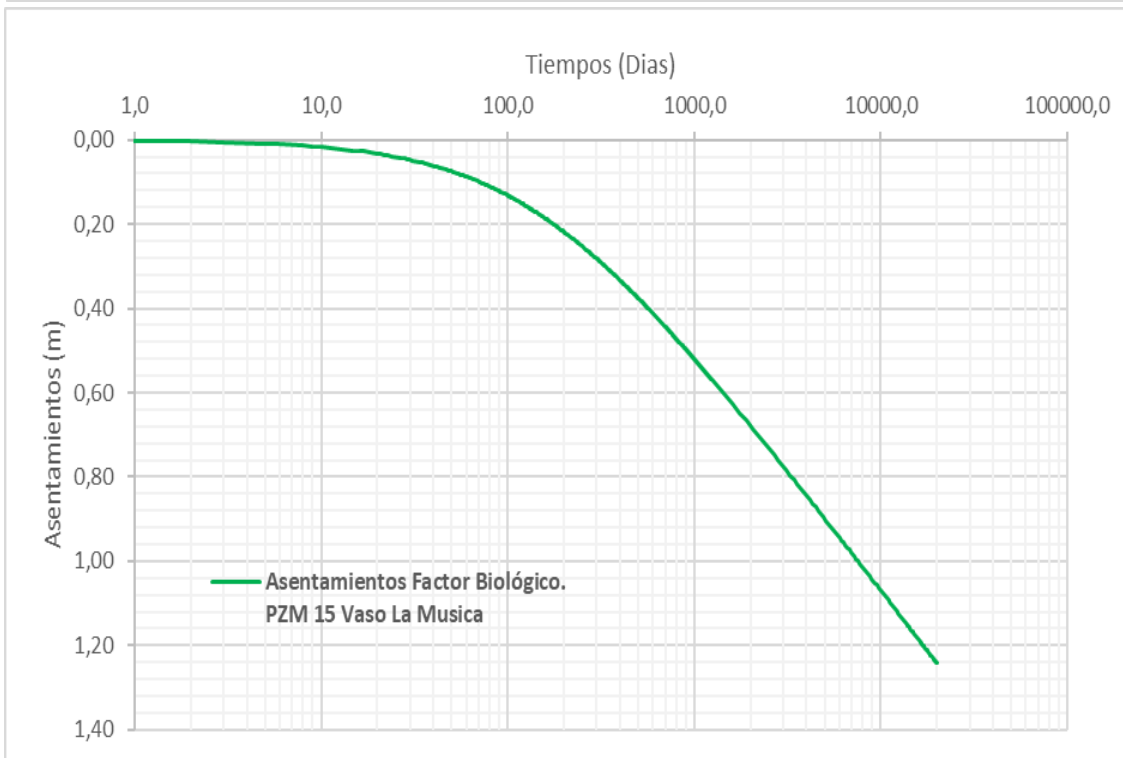
Figura 4. Relación de los asentamientos totales y diferentes alturas de columnas RSU propuesta para el modelo con diferentes tiempos.



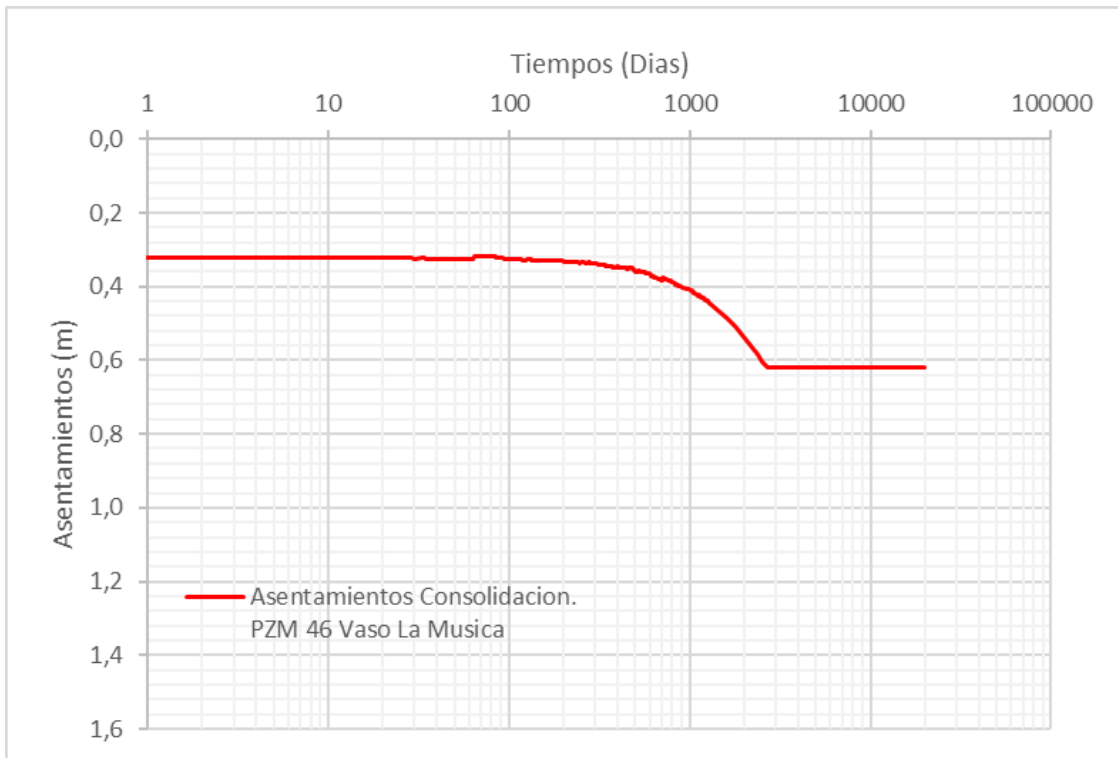
B Anexo: Asentamientos debido a la descomposición y consolidación de La Pradera y Curva de Rodas. a) PZM 15 C Consolidación, b) Factores Biológicos, c) PZM 46 Consolidación, d) Factores Biológicos, e) PZM 22-1 Consolidación, f) PZM 22-1 Factores Biológicos, g) PZM 11-2 Consolidación, h) PZM 11-2 Factores Biológicos.



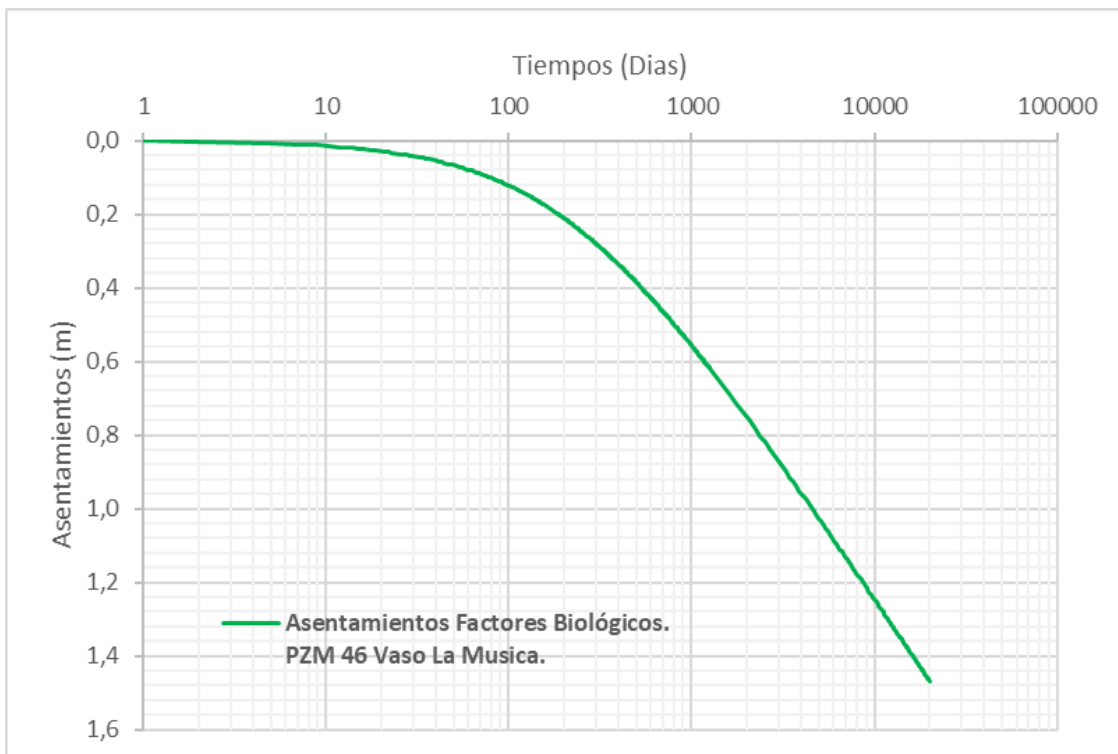
(a)



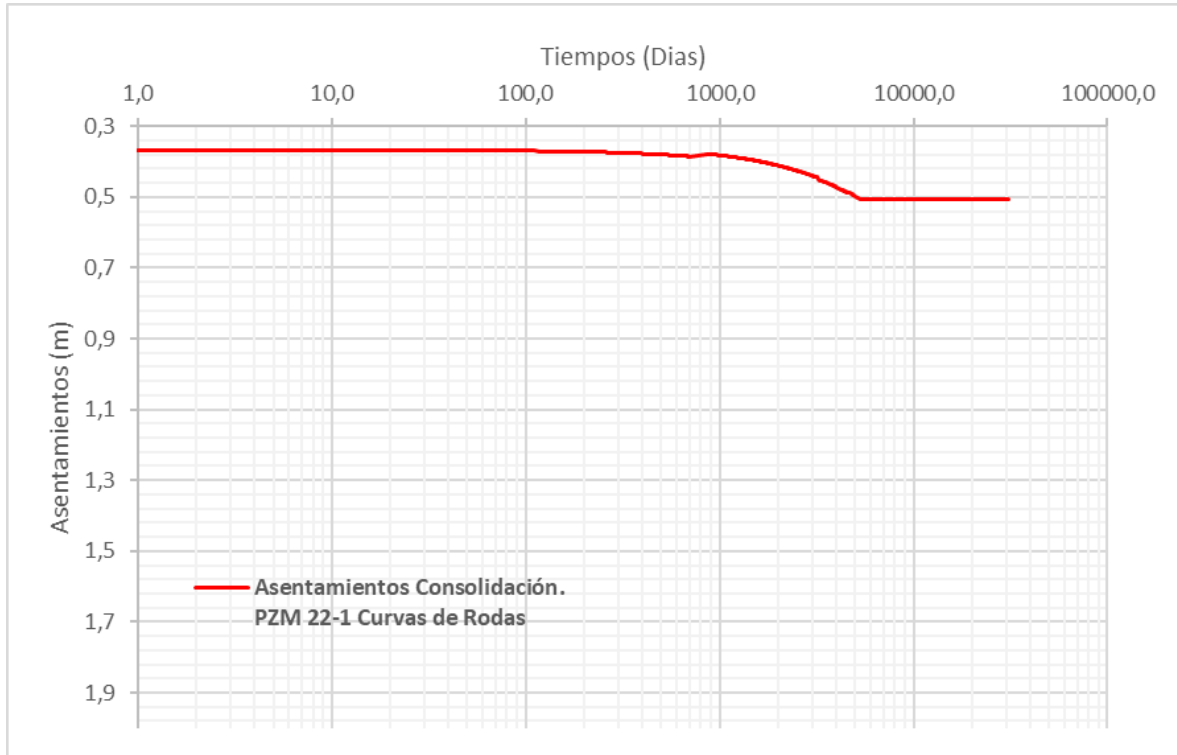
(b)



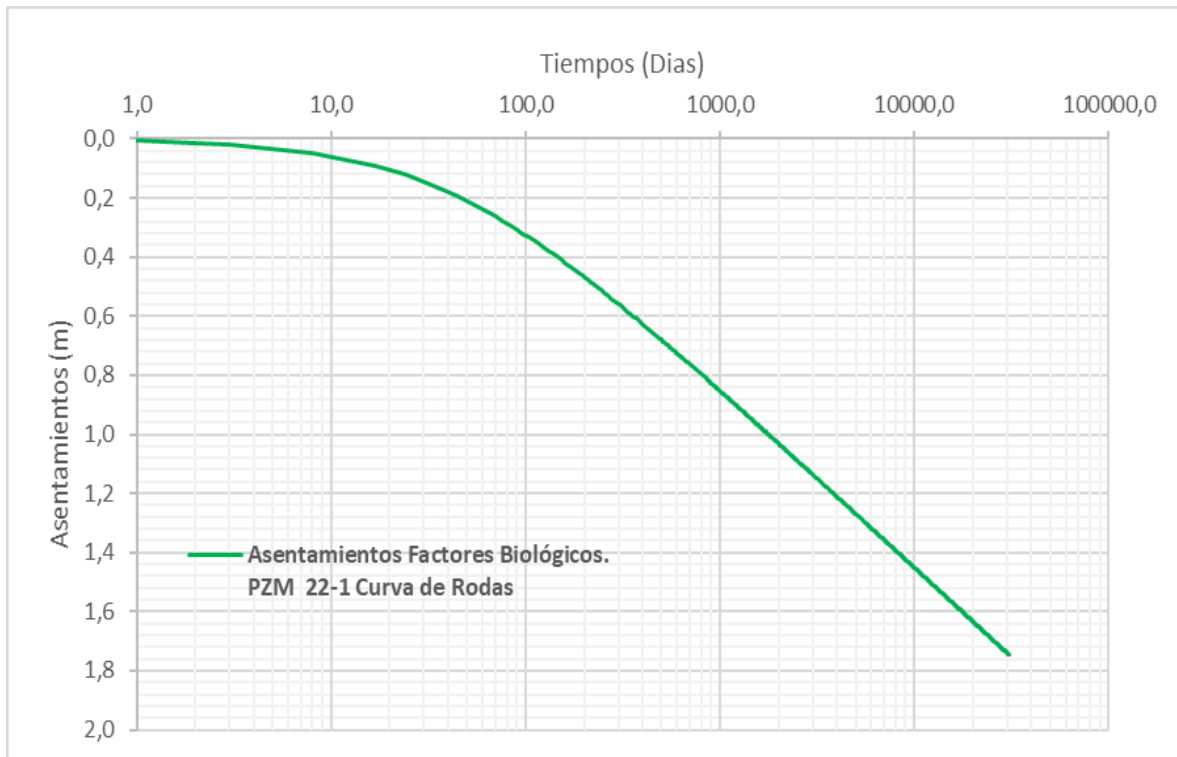
(c)



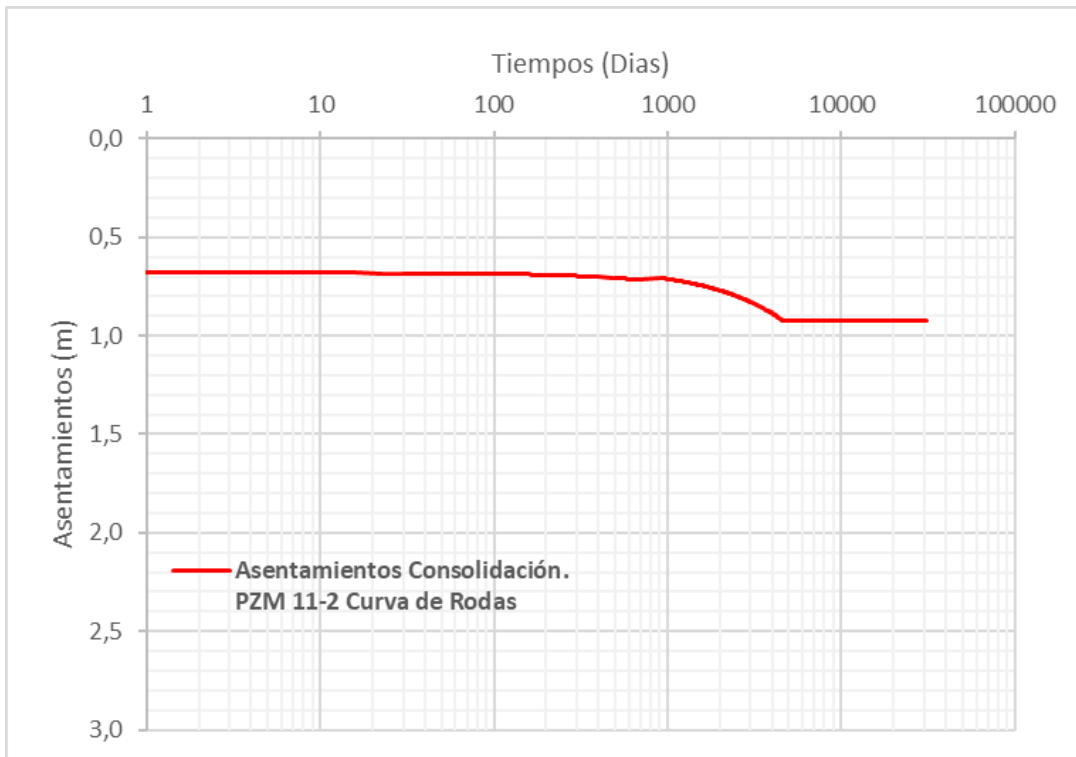
(d)



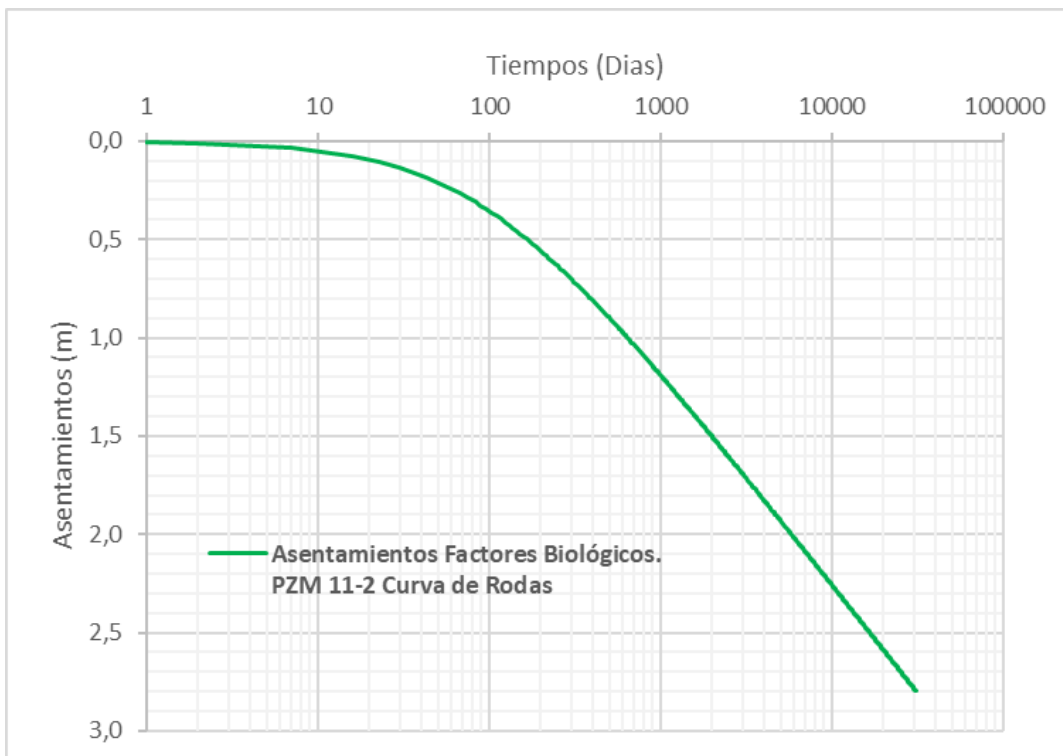
(e)



(f)

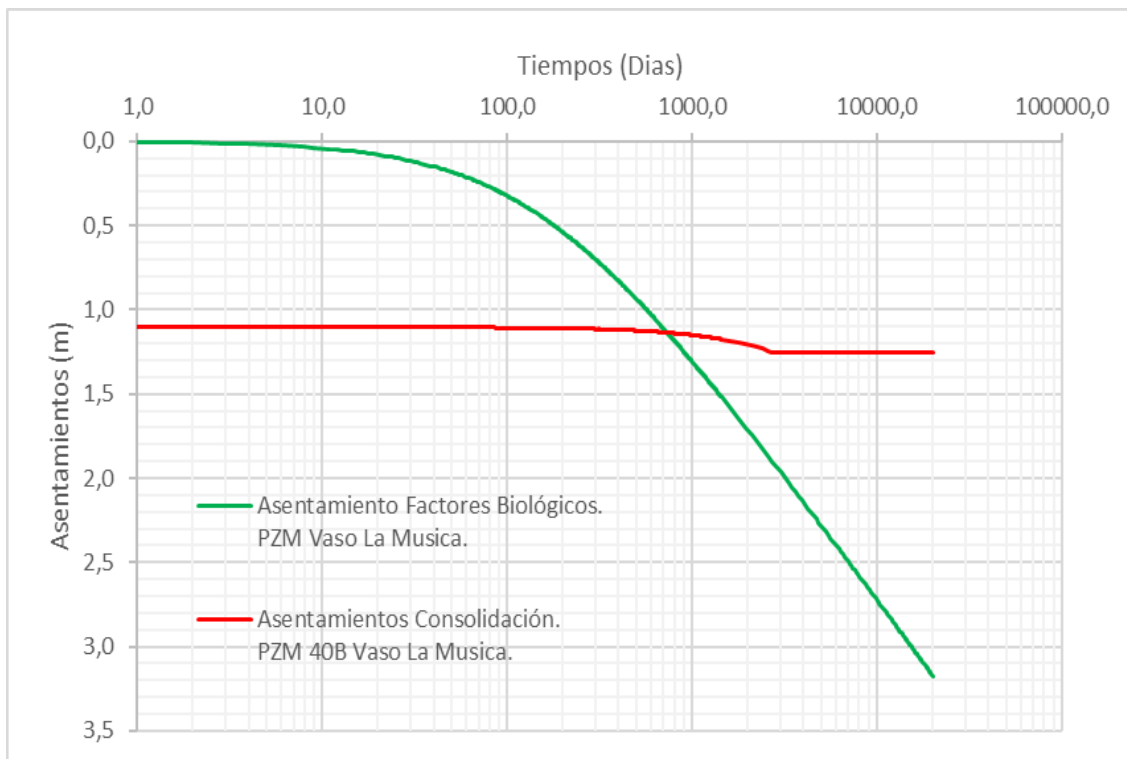


(g)

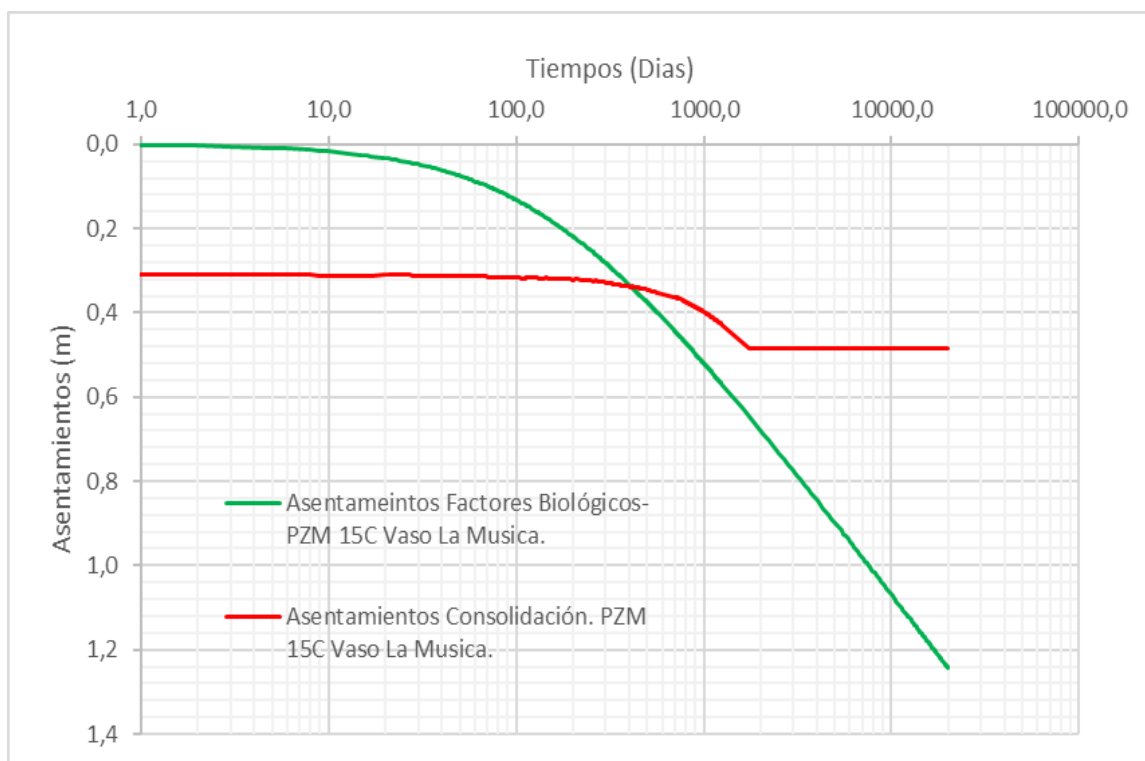


(h)

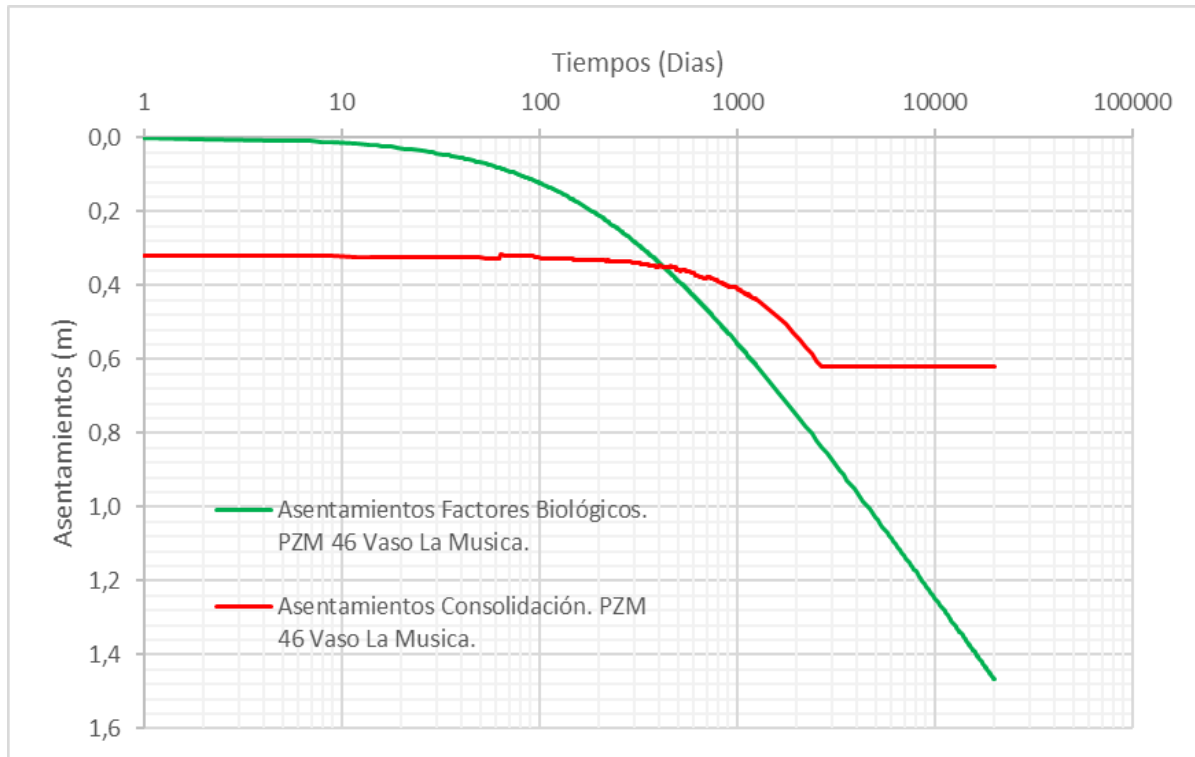
C Anexo. Asentamientos debido a Factores Biológicos y consolidación de La Pradera y Curva de Rodas en una misma gráfica. a) PZM 40B, PZM 15C, PZM 46, PZM 22-1, PZM 12-2.



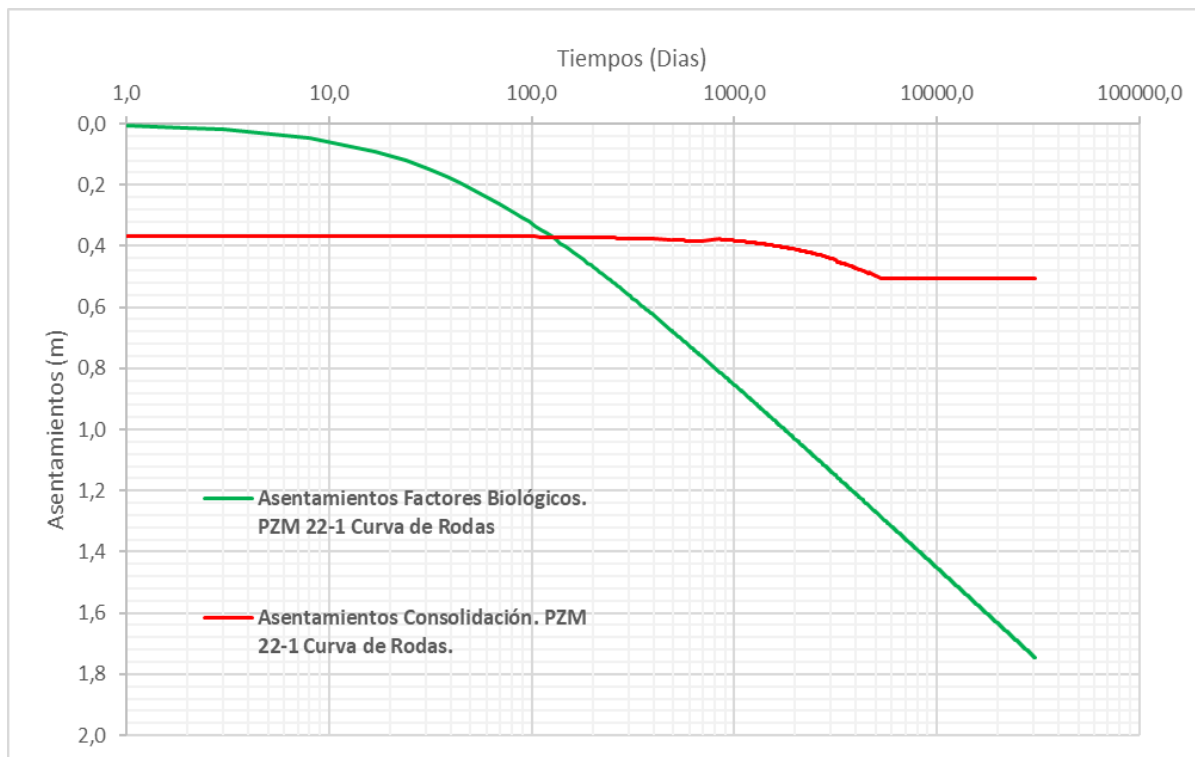
(i)



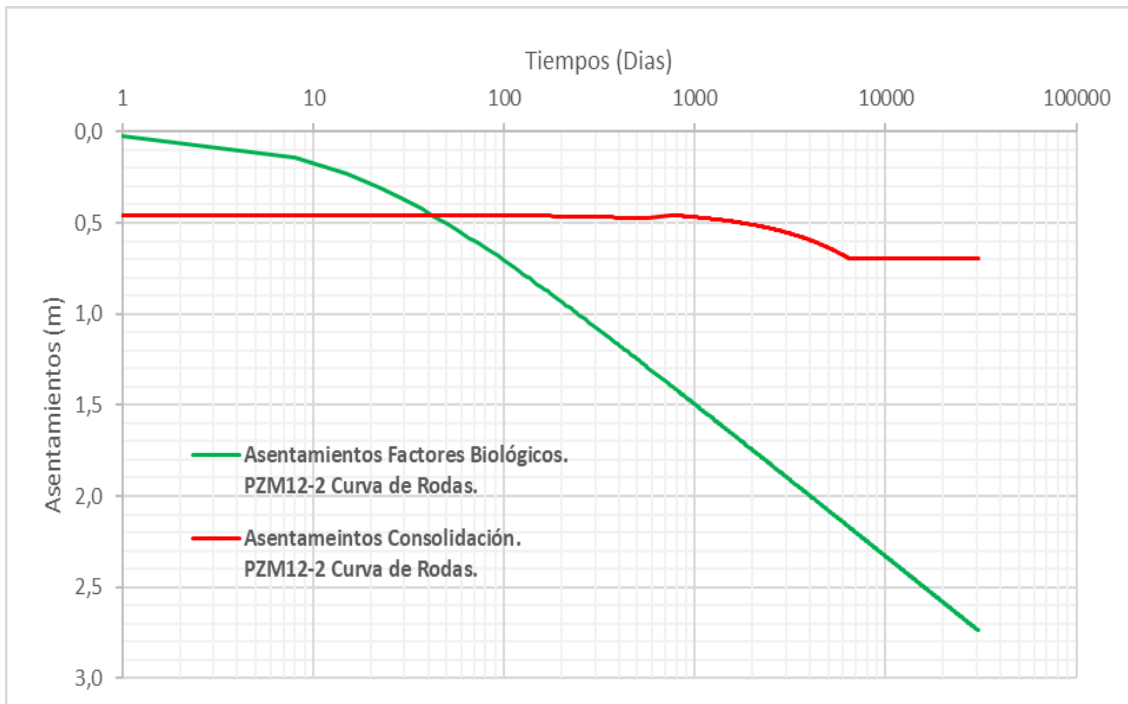
(ii)



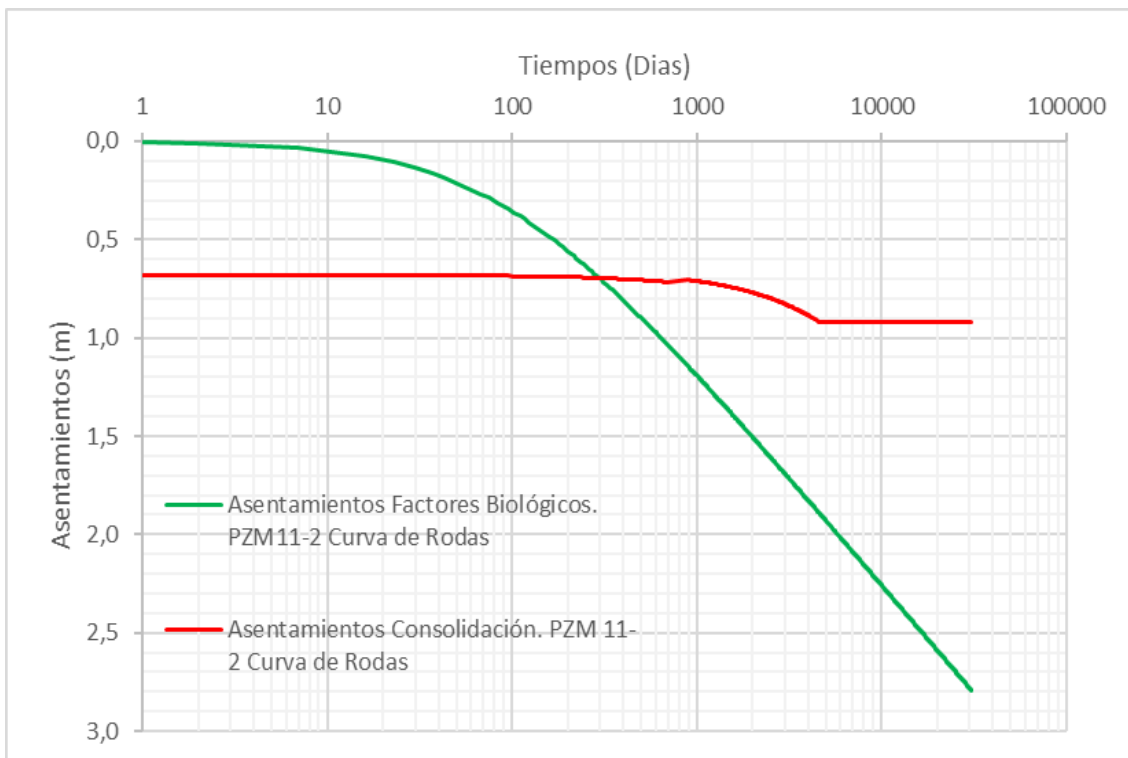
(k)



(l)

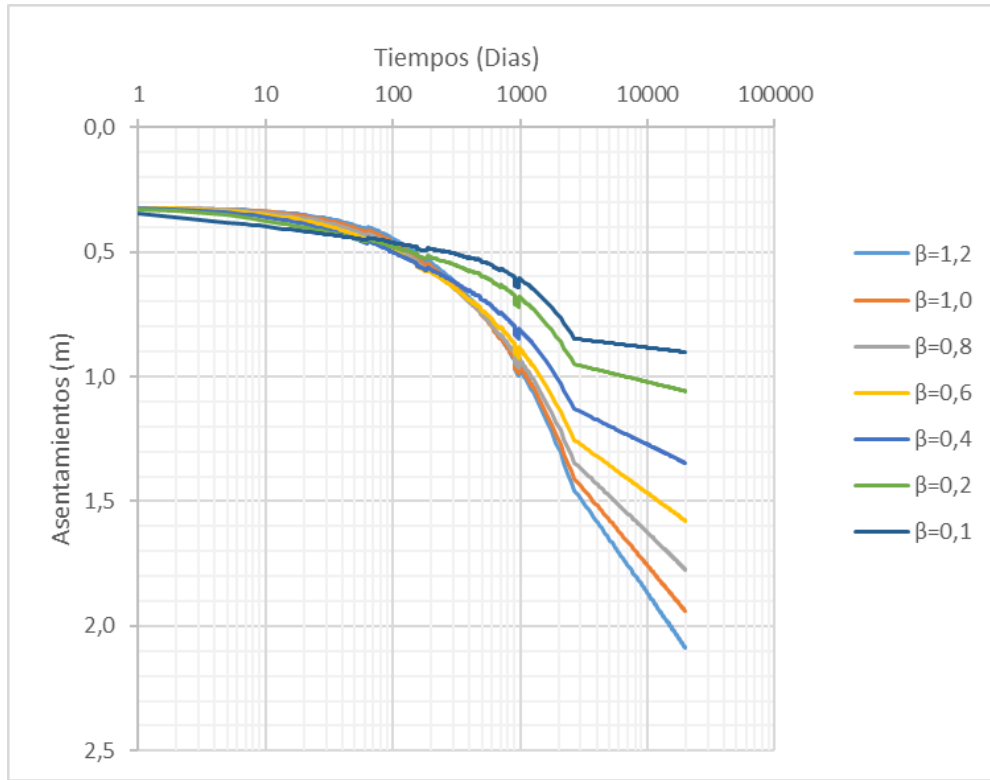


(m)

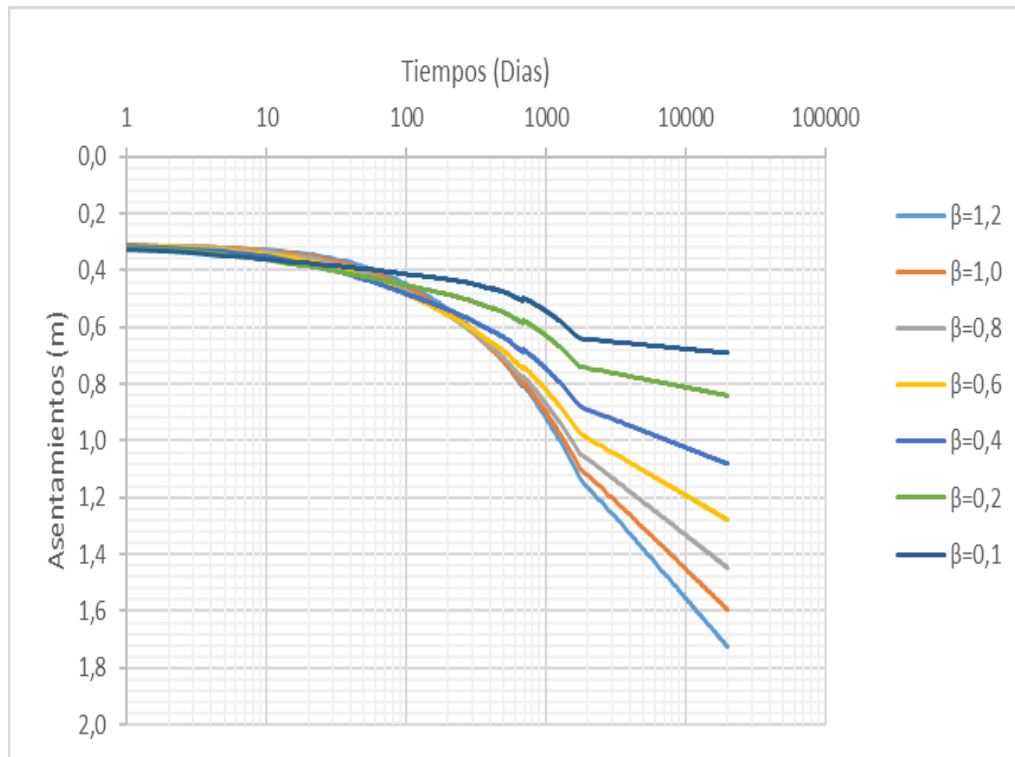


(n)

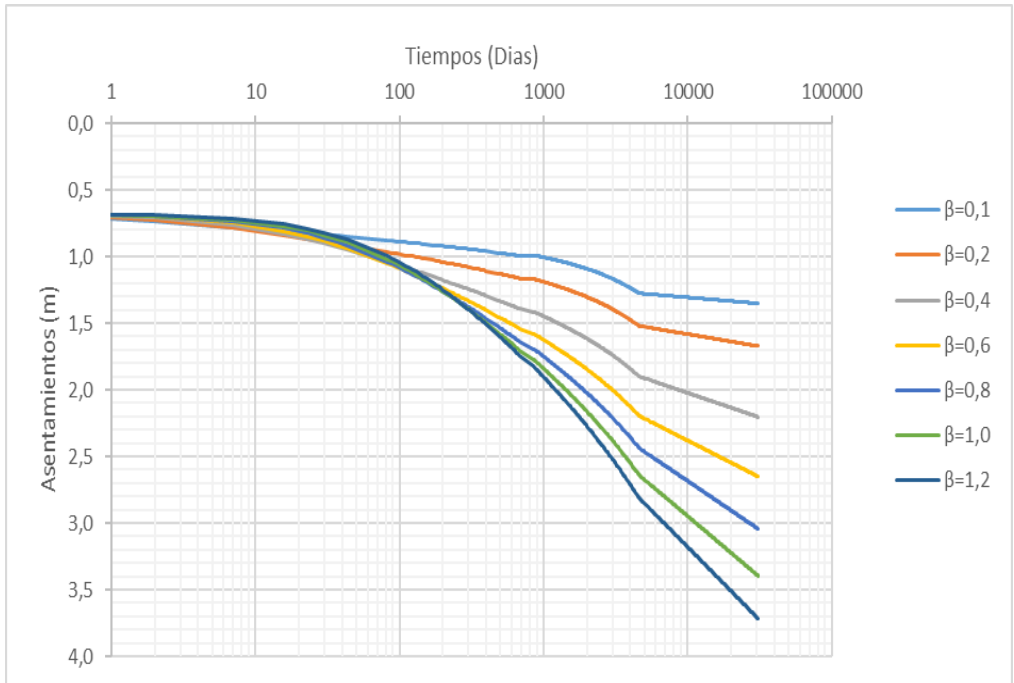
D Anexo: Comportamiento de la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular. Vaso La Música, La Pradera y Curva de Rodas. a) PZM 46 Vaso La Musica, b) PZM 15, c) PZM 11-2, d) PZM 22-1.



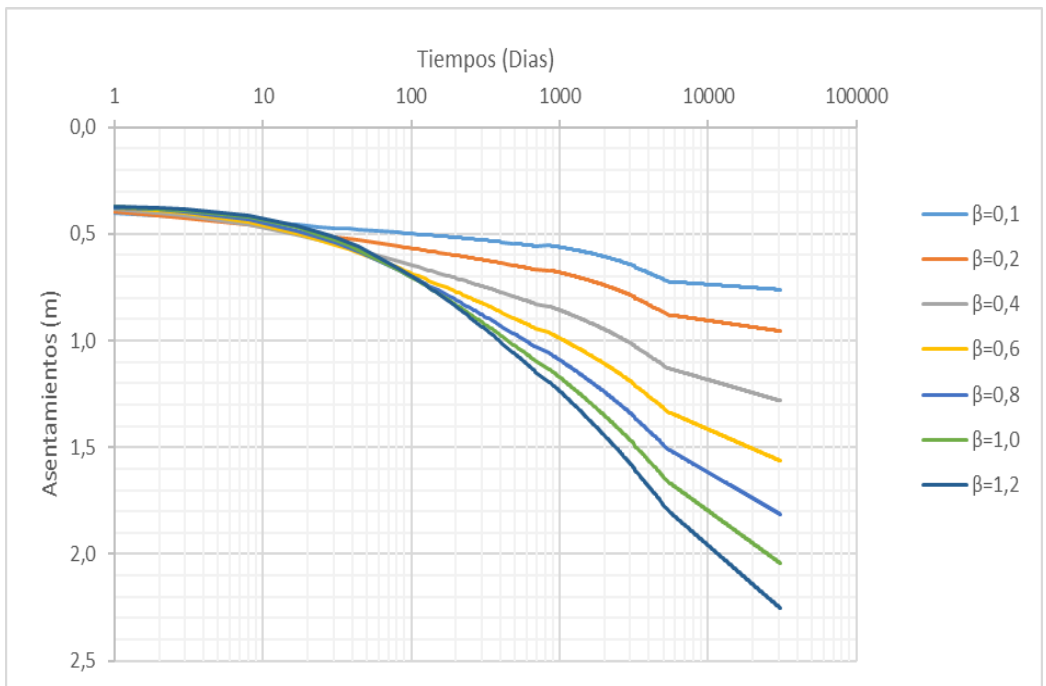
(a)



(b)



(c)



(d)

10. Bibliografía

- Alva Hurtado, J. E., & Escalaya Advincula, M. (2011). Instrumentacion Geotecnica de La Presa Pillones Peru. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, 1–5.
- Area metropolitana del valle Aburrá. (2006). Manual Para El Manejo Integral de Residuos Solidos. 1-47. <https://es.slideshare.net/aeca32/manual-residuos-solidos-22447133>.
- Beaven, R. P. (2000). The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling. *Queen Mary and Westfield College University of London, London.*, <http://qmro.qmul.ac.uk/jspui/handle/123456789/1698>.
- Bloquesautocad. (25 de Junio de 2019). *Bloquesautocad.com- Descarga De Bloques Cad Para Arquitectura*. Obtenido de <https://www.bloquesautocad.com/>
- Castrillon Torres, C., & Quintero Franco, J. D. (2012). Guia de Instrumentacion en Talud Intervenidos por un Proyecto Vial. *Universidad de Medellin - Especializacion en Vias y Transporte*, 1-128.
- CORANTIOQUIA. (2009). Resolucion No. 130TH-1309 -10346. *Corporacion Autonoma Regional del Centro de Antioquia*, 1- 29. <http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/Lists/Administrar%20Contenidos/AllItems/130TH-1309-10346.pdf>.
- DANE. (2009). *Proyecciones Nacionales y departamentales de Poblacion 2005 - 2020. Estudios Postcensales No 7 ISBN 978-958-624-078-9*. Bogota, Colombia: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf.
- Daniel, D. E. (1993). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. New York: Chapman y Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN.
- Dunncliff, J. (1982). *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program - Synthesis of Highway Practice.
- El-Fadel, M. S. (1999). Comparative Assessment of Settlement Models for Municipal Solid Waste Landfill Applications. *Waste Management and Research* 17(5), 347–68.
- Empresas Varias de Medellín, E. (2009). Experiencia en el manejo sustentable de rellenos sanitarios en la ciudad de Medellín. 1-62/ <https://docplayer.es/15061640->

Experiencia-en-el-manejo-sustentable-de-rellenos-sanitarios-en-la-ciudad-de-medellin-empresas-varias-de-medellin-e-s-p.html.

Empresas Varias de Medellín, E. (2010). Descripción de Actividades de Emvarias. <http://www.emvarias.com.co/LinkClick.aspx?fileticket=jgkD044eEvM%3D&portalid=1>.

Empresas Varias de Medellín, E. (2014). Relleno Sanitario La Pradera. Retrieved (<http://www.eevvm.com.co/SitePages/pradera.aspx>).

Gómez Paniagua, E. L. (2009). Notas Mecánica de Suelos y Rocas - Consolidación - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Capítulo 9 . 9-23.

Gómez, E. (2016). 9. Consolidación. Notas de Clase de Mecánica de Suelos y Rocas. *Universidad Nacional de Colombia - Sede de Medellín*, 1–23.

Gomez, E. L. (2016). *Medidas de deformaciones*. Medellín.

Gonzalez G., A., & Espinosa S., A. (2001a). Falla del Relleno Sanitario Doña Juana-Bogotá, Colombia- I- Las Basuras Acumuladas como Material Geotécnico. *III Simposio Panam. de Deslizamientos.*, Vol. 2 pp.405-416- Soc. Col. de Geotecnia-Cartagena.

INTEINSA, I. (2019). Informe de instrumentación y estabilidad mensual I-2553-LP-33-Rev0. *Asesoría técnica y análisis del sistema de instrumentación del relleno sanitario La Pradera*, 1-175.

INTEINSA, I. I. (2017). Estudio para ampliación del vaso Altaír - I-2553-LP-AVA-01-Rev4- Información final- Asesoría técnica e instrumentación para el relleno sanitario La Pradera. 1-89.

INTEINSA, I. I. (2017). Informe con Diseño de conformación para uso del volumen remanente del vaso La Música I-2553-LP-01-Rev7-Asesoría técnica e instrumentación para el relleno sanitario La Pradera. 1-26.

Kiss Kofalusi, G., & Encarnación Aguilar, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica 79- Institución Nacional de Ecología.*, 39-51.

Knochenmus, G. W. (1998). Stability of Municipal Solid Wastes. *Third International Congress on Environmental Geotechnics*, (pp. 977–1000).

McDougall, J. (2008). Settlement: the short and the long of it. In D. Zekos (Ed.). *International Symposium on Waste Mechanics* , (pp. 76–111). New Orleans: ASCE.

- Ordóñez Ante, C. (2007). Calibración de Modelos Geotécnicos Para Simular El Comportamiento de Los Rellenos Sanitarios Curva de Rodas Y La Pradera Medida Mediante Registros de Instrumentación. *Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas - Sede Medellín*, 1-124.
- Pavimentar. (2016). Construcción Del Vaso Altair II En El Relleno Sanitario 'La Pradera. Donmatías – Antioquia. <http://pavimentarsa.com/2016/11/02/vaso-altair>.
- Pinzon Uribe, L. F. (2010). Influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático. *Gestión Integral En Ingeniería Neogranadina*. ISSN: 2145-5759 P, -v.3 .Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia. Facultad de ingeniería, Investigador grupo TAYQUITE, 1-13.
- Robles Martinez, F. (2008). *Generación de biogas y lixiviado en lo rellenos sanitarios*. Mexico.
- Sanino, D. (2017). Paisaje de Montaña Con El Río. Retrieved (https://es.123rf.com/photo_23039753_paisaje-de-montaña-con-el-río-dibujos-animados-e-ilustración-vectorial.html).
- Sowers, G. F. (1975). Settlement of Waste Disposal Fills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(4), 57–58. [Http://Doi.Org/10.1016/0148-9062\(75\)90051-0](http://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90051-0).
- Suarez, J. (2009). Instrumentación y Monitoreo. En *Deslizamientos. Análisis Geotécnico* (Vol. 1, págs. 1-588). U. Industrial de Santander.
- Sued, J., & Mennella, A. H. (1984). Relleno sanitario para grandes conglomerados Urbanos. Aspectos técnico de Aseo - Manual de instrucción. *Programa regional OPS/HPE/CEPIS de mejoramiento de los servicios de aseo Urbano.*, 1-280.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). Integrated Solid Waste Management - Mc Graw-Hill Intl. *Mc Graw-Hill Intl*.
- Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Eliassen, R. (1982). Desechos Sólidos Principios de Ingeniería y Administración. <http://www.bvsde.paho.org/acrobat/desechos.pdf>.
- Umaña Romero, J. L. (2008). Revisión de Algunos Aspectos Relevantes Del Fenómeno de Consolidación Secundaria. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 1-213. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2676/uma%C3%B1aromero.pdf?sequence=1>.
- Valverde N, J. S., & Sandoval Ch, J. D. (2004). Deformabilidad Del Relleno Sanitario de Doña Juana. *Universidad Nacional de Colombia - Sede Santa Fé de Bogotá*.

- Vargas Guerrero, M. (2009). Modelo de Balance Hidrico Para La Estimacion de Los Caudales de Lixiviados Generados En La Operacion Del Rellenos Sanitario Del Centro Industrial del Sur - El Guacal, Heliconia -Antioquia. *Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas -Sede Medellin.*, 1-239.
- Velandia Parra, E. (2000). Ensayos de consolidación en residuos sólidos de la ciudad de Santa Fe de Bogota. *Universidad de los Andes*.
- Velez Pereira, A. M., & Camargo Caicedo, Y. (2009). Emision de Biogas Producidas en Rellenos Sanitario. *II Simposio Iberoamericano de Ingenieria de Residuos - Barranquilla. REDISA*, 1-13.
- Wall, D. K. (1995). Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. *Journal of Environmental Engineering*, 121(3), 214-224. [http://doi.org/ 10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:3\(214\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:3(214)).
- Yepes García, J. A. (2015). Ajuste de Un Modelo Para Estimar Asentamientos En El Relleno Sanitario La Pradera. *Universidad Nacional de Colombia- Facultad de Minas- Escuela de Ingenieria Civil - Sede Medellin*, 1-157.
- Zeevaert, L. (1983). *Foundation Engineering for difficult subsoil conditions* (2 ed.). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Zeevaert, L. (1984). Viscosidad Intergranular en Suelos Finos Saturados. *Division de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingenieria, UNAM*, 1-15.
- Zekkos, D. (2008). *Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing og Municipal Solid Waste*. New Orleans, Louisiana: ASCE - Geotechnical Special Publication No. 209.