

Evaluación de metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios: caso de estudio para el proyecto de un parque solar en la Cárcava I del relleno “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga

Leidy Yarit Díaz Armenta

Leydy Consuelo Peñaranda Salazar

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchan Jaimes

PhD. En Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica

Codirector

Álvaro Viviescas Jaimes

PhD. En Ingeniería de la Construcción

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físicomecánicas.

Escuela de Ingenierías Civil

Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

Agradezco especialmente a mi madre que siempre me apoyo con gran esfuerzo y nunca perdió la fe a pesar de las dificultades por las que tuve que pasar para alcanzar este importante logro, igualmente a mis hermanas quienes me ayudaron de distintas maneras y que asumen este logro como suyo. Finalmente, quiero agradecerles a mis amigos quienes siempre estuvieron a mi lado en los momentos difíciles.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a los docentes de la escuela de ingeniería Civil por la excelente formación académica presentada durante el pregrado, por todo el esfuerzo para que nuestra formación personal y profesional para que este llena de buenos conocimientos y entendimiento en el campo de la ingeniería.

A los directores del Proyecto de grado el Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D. y Álvaro Viviescas Jaimes Ph.D. por todo su apoyo y orientación durante los cursos de proyecto de grado para poder cumplir satisfactoriamente los objetivos propuestos en el Plan de Trabajo.

A los miembros del jurado por darnos su aprobación para continuar nuestras vidas en el campo laboral y contribuir con excelentes ideales para continuar la temática del trabajo de grado en futuros proyectos.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	17
1. Objetivos.....	20
1.1 Objetivo General.....	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Generalidades.....	21
2.1. El relleno sanitario El Carrasco.....	21
2.2. Cárcava I .....	22
2.3. Zona de estudio .....	22
2.4. Caracterización de los residuos sólidos urbanos .....	23
3. Fases del proceso de asentamiento en residuos sólidos .....	24
4. Estructura de soporte del panel solar .....	27
4.1 Zapatas de apoyos.....	29
5. Capacidad portante método de Brinch Hansen (1970) .....	33
6. Asentamientos basados en la teoría de elasticidad .....	34
7. Asentamientos por consolidación primaria y secundaria.....	35
7.1 Consolidación primaria.....	35
7.2 Consolidación Secundaria.....	35
8. Modelo de predicción de asentamientos de RSU según Hettiarachchi.....	36
8.1 Predicción total del asentamiento de vertederos por el modelo.....	37

9. Separación entre hileras de paneles solares .....	38
10. Cargas distribuidas en la superficie de una masa semi-infinita.....	40
11. Procedimiento para los resultados de capacidad de carga por unidad de área (q).....	41
11.1 Cargas soportadas por la estructura .....	41
11.1.1 Modelado de la estructura en SAP2000.....	43
11.2 Resultado del cálculo de capacidad portante .....	46
12. Resultados para el cálculo de asentamientos elásticos .....	49
13. Valores para el cálculo de consolidación primaria y secundaria.....	52
13.1 Relación de vacíos .....	52
13.2 Resultados de consolidación primaria y secundaria .....	54
14. Incidencias de cargas vecinas .....	58
15. Valores para el cálculo de consolidación método de Hettiarachchi.....	62
16. Asentamientos diferenciales .....	64
17. Conclusiones.....	66
Referencias Bibliográficas.....	68
Apéndices.....	73

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Caracterización típica de los RSU – área metropolitana. ....	24
Tabla 2. Peso total de la estructura metálica de cuatro paneles. ....	28
Tabla 3. Peso total de la estructura metálica de seis paneles. ....	29
Tabla 4. Valores de presión de diseño del viento. ....	31
Tabla 5. Valores de coeficiente para el espectro sísmico. ....	32
Tabla 6. Resultado de periodo fundamental aproximado $T_a$ . ....	32
Tabla 7. Resultados de coeficientes para el cálculo de fuerza horizontal equivalente para estructura de cuatro paneles solares. ....	41
Tabla 8. Resultados de coeficientes para el cálculo de fuerza horizontal equivalente para estructura de seis paneles solares. ....	42
Tabla 9. Valores máximos de fuerza y momentos en la estructura de cuatro paneles solares. ....	43
Tabla 10. Valores máximos de fuerza y momentos en la estructura de seis paneles solares. ....	44
Tabla 11. Valores de excentricidades y dimensiones de la zapata aislada para la estructura de cuatro paneles solares. ....	44
Tabla 12. Valores de excentricidades y dimensiones de la zapata aislada para la estructura de seis paneles solares. ....	45
Tabla 13. Valor total de fuerza vertical actuante en estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	45
Tabla 14. Valor total de fuerza vertical actuante en estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	46
Tabla 15. Valores para el cálculo de capacidad portante. ....	47

Tabla 16. Cálculo y conclusión del soporte del suelo para estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	48
Tabla 17. Cálculo y conclusión del soporte del suelo para estructura de soporte de seis paneles solares. ....	48
Tabla 18. Valores aproximados de estratos. ....	50
Tabla 19. Módulo de elasticidad del suelo ecuación de Bowles (1987). ....	51
Tabla 20. Resultado de factor de forma (Steinbrenner 1934). ....	51
Tabla 21. Cálculo de asentamiento elásticos para estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	52
Tabla 22. Cálculo de asentamiento elásticos para estructura de soporte de seis paneles solares. ....	52
Tabla 23. Valores del peso específico y resultados calculados de $e_o$ y $\gamma_{sat}$ del suelo. ....	53
Tabla 24. Valores de esfuerzo efectivo para estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	54
Tabla 25. Valores de esfuerzo efectivo para estructura de soporte de seis paneles solares. ....	55
Tabla 26. Resultados de asentamientos primario para estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	55
Tabla 27. Resultados de asentamientos primario para estructura de soporte de seis paneles solares. ....	56
Tabla 28. Valores de asentamientos secundarios de la Figura 18 Y 19. ....	58
Tabla 29. Valores de fuerzas actuantes en estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	60
Tabla 30. Valores de fuerzas actuantes en estructura de soporte de seis paneles solares. ....	60
Tabla 31. Incidencia de esfuerzo por cargas vecinas para estructura de cuatro paneles solares. .	61
Tabla 32. Incidencia de esfuerzo por cargas vecinas para estructura de seis paneles solares. ....	62

Tabla 33. Resultado de asentamientos totales, para estructura de soporte de cuatro paneles solares. .....	63
Tabla 34. Resultado de asentamientos totales, para estructura de soporte de cuatro paneles solares. .....	63
Tabla 35. Diferencia de asentamientos totales entre la zapata de esquina 1 y 2 de la Figura 19.	65
Tabla 36. Diferencia de asentamientos totales entre la zapata de central 1 y 2 de la Figura 20..	65

### Lista de Figuras

Figura 1. Zonas clausuradas, post-Clausurada y en Operación del vertedero sanitario El Carrasco. .....	21
Figura 2. Imagen Satelital antigua celda I localizada en el vertedero sanitario.....	23
Figura 3. Diagrama esquemático de la idealización de vertederos para la estimación de asentamientos.....	25
Figura 4. Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995).....	27
Figura 5. Dimensiones de estructura de panel solar. ....	28
Figura 6. Ilustración del refuerzo de la cimentación superficial.....	29
Figura 7. Ilustración de la cimentación superficial para estructura de cuatro paneles solares. ....	30
Figura 8. Ilustración de la cimentación superficial para estructura de seis paneles solares. ....	30
Figura 9. Ilustración de altura y separación mínima de hileras de paneles solares. ....	38
Figura 10. Resultado de separación de hileras de paneles solares.....	39
Figura 11. Visualización 3D del parque solar en estructura de cuatro y seis paneles solares. ....	39
Figura 12. Carga vertical uniforme.....	40
Figura 13. Dimensiones y localización de los cimientos de la estructura de cuatro paneles solares. .....	42
Figura 14. Dimensiones y localización de los cimientos de la estructura de seis paneles solares.	43
Figura 15. Orientación de inclinación del terreno. ....	48
Figura 16. Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de cuatro paneles solares. ....	57
Figura 17. Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de seis paneles solares. .....	57

Figura 18. Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de seis paneles solares. .....	59
Figura 19. Ilustración de zapatas esquineras a evaluar. ....	61
Figura 20. Ilustración de zapatas centrales a evaluar.....	61
Figura 21. Grafica de resultados de asentamientos para estructuras de soporte. ....	64

### Lista de Apéndices

Apéndice 1. Presión neta de diseño con las respectivas combinaciones para barlovento y sotavento .....	73
Apéndice 2. Combinaciones de cargas. SAP2000 .....	74
Apéndice 3. Combinaciones de cargas. SAP2000 .....	74
Apéndice 4. Resultado de reacciones para la combinación de carga 1.2D+Ey+L de la estructura de soporte de cuatro paneles solares .....	75
Apéndice 5. Resultado de reacciones para la combinación de carga 1.2D-Ey+L de la estructura de soporte de seis paneles solares. ....	76
Apéndice 6. Tomografía de resistividad eléctrica 2D, con la delimitación de las diferentes zonas geo-eléctricas .....	77
Apéndice 7. Parámetros obtenidos de apiques realizados en el carrasco con ensayos de corte directo .....	77
Apéndice 8. Relaciones de los parámetros fuerza de corte movilizada en un rango de deformaciones con la edad de llenado de los RSU .....	78
Apéndice 9. Dimensiones de la cimentación .....	79
Apéndice 10. Datos del factor de seguridad, nivel de desplante y pendiente del terreno .....	79
Apéndice 11. Cálculo de la carga distribuida de la cimentación .....	79
Apéndice 12. Resultado de factores de capacidad portante .....	80
Apéndice 13. Resultado de k y de la sobre carga $q = \gamma * Df * \cos(\beta)$ de Brinch Hansen, 1970 .....	80
Apéndice 14. Resultado de factores de profundidad .....	80
Apéndice 15. Resultado de factores de forma .....	81
Apéndice 16. Cálculo de fuerzas vertical y horizontales .....	81

Apéndice 17. Resultados de factor de inclinación.....	81
Apéndice 18. Resultado de factor de inclinación de superficie.....	82
Apéndice 19. Resultado de factor de inclinación de base inclinada.....	82
Apéndice 20. Resultado de capacidad portante.....	82
Apéndice 21. Resultados de factores de capacidad de carga con el paso de los años para estructura de cuatro paneles solares.....	83
Apéndice 22. Resultados de factores de capacidad de carga con el paso de los años para estructura de seis paneles solares.....	84
Apéndice 23. Definiciones básicas y relaciones de fase para medios porosos para rellenos sanitarios.....	85
Apéndice 24. Valor del peso específico sólido.....	86
Apéndice 25. Localización de apiques en El Carrasco.....	86
Apéndice 26. Límites de humedad, limite plástico y contenido de humedad.....	87
Apéndice 27. Grafica de índices de compresión en vertederos sanitarios.....	87
Apéndice 28. Grupo de propiedades de los desechos solidos.....	88
Apéndice 29. Parámetros de compresibilidad.....	88

## Glosario

Se han identificado términos que conceptualizan todo lo relacionado con rellenos sanitarios y otras actividades específicas mediante la exposición de los conceptos fundamentales de la investigación.

**Almacenamiento de residuos sólidos:** Acumulación de depósitos y residuos sólidos de manera temporal en determinado lugar, para su recolección por la persona prestadora con fines de aprovechamiento o de disposición final (Guarin Villamizar & Gomez Plata, 2013).

**Asentamientos diferenciales:** El asentamiento diferencial se refiere al proceso en el que el material de desecho se descompone a diferentes velocidades en todo el relleno sanitario, lo que resulta en un asentamiento desigual del límite del relleno sanitario (Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills, 2014).

**Asentamientos uniformes:** Se refiere a un proceso en el que el material de desecho en el vertedero se descompone de manera uniforme y da como resultado que el nivel de la tapa del vertedero se asiente a tasas similares o uniformes en grandes áreas (Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills, 2014).

**Biogás:** Según la norma R.A.S. 2000, el término biogás se utiliza para señalar a toda mezcla de gases bioenergéticos provenientes de residuos orgánicos, es producido por la descomposición y degradación de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias (proceso en ausencia de oxígeno). (Galvis S & Gomez A, 2014)

**Cárcavas:** Es una concavidad del talud en terrenos blandos o arcillosos formada por la erosión de corrientes de agua.

**Celda:** Infraestructura ubicada en el terreno sanitario para almacenar residuos sólidos, la mayoría está constituida de tierra reforzada con geomembranas de polietileno que protegen el suelo de infiltraciones de lixiviados.

**Parque solar:** Son inmensas áreas de tierra, equipadas de paneles solares interconectados, con objeto de captar grandes cantidades de luz solar y transformarla en energía eléctrica. Un parque solar de cuatro hectáreas puede contar con unos cuatro mil paneles fotovoltaicos de 250 watts cada uno, provistos de soportes que permiten variar la inclinación de los paneles entre 15 y 45° (¿Que es un parque solar?, s.f.)

**Relleno sanitario:** Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería (Empresa De Aseo De Bucaramanga S.A. – ESP EMAB Pliego De Condiciones, 2017).

## Resumen

**Título:** Evaluación de metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios: caso de estudio para el proyecto de un parque solar en la Cárcava I del relleno “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga \*

**Autor:** Leidy Yarit Díaz Armenta y Leydy Consuelo Peñaranda Salazar \*\*

**Palabras Clave:** Biodegradación, Esfuerzos, Residuos Urbanos, Geotecnia, Geofísica, Refracción Sísmica, Asentamientos, Relleno Sanitario.

**Descripción:** Este proyecto propone, desde el punto de vista geotécnico, la prefactibilidad para la recuperación y la construcción de un parque solar sobre la zona clausurada Cárcava I, antigua celda I de disposición final de residuos sólidos “El Carrasco”, utilizando modelos matemáticos basados en conceptos de los efectos de la fluencia mecánica y la biodegradación dependiente del tiempo, para el cálculo de la capacidad última y los asentamientos del vertedero bajo carga incremental por medio de una investigación bibliográfica. Los parámetros del modelo se calculan en función de la compresión unidimensional usando los resultados de estudios geofísicos, geotécnicos, geológicos y datos teóricos disponibles de la literatura publicada.

El resultado de la investigación apunta a que este tipo de suelo puede soportar fallas de capacidad portante en un rango de tiempo de 10 años a pesar de que estos terrenos contienen residuos sólidos urbanos que genera la variación de resistencia al corte a causa del alto contenido de materia orgánica. Por otra parte, los resultados de las ecuaciones de dos modelos de asentamientos para vertederos sanitarios indican que el suelo es altamente deformable para la instalación sistemas fotovoltaicos.

La investigación bibliográfica permite concluir que el vertedero sanitario contiene altos asentamientos en los primeros años de su clausura por lo tanto, es indispensable esperar que estos asentamientos se optimicen para dar la viabilidad a la construcción de un parque fotovoltaico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchan Jaimes. PhD. En Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica. Codirector: Álvaro Viviecas Jaimes. PhD. En Ingeniería de la Construcción.

**Abstract**

**Title:** Evaluation of available methodologies for the calculation of bearing capacity and settlements in sanitary landfills: case study for the project of a solar park in the gully and the “El Carrasco” landfill in the city of Bucaramanga\*

**Author(s):** Leidy Yarit Díaz Armenta y Leydy Consuelo Peñaranda Salazar\*\*

**Key Words:** Biodegradation, Stress, Urban Waste, Geotechnics, Geophysics, Seismic Refraction, Settlements, Landfill.

**Description:** This project proposes, from the geotechnical point of view, the pre-feasibility for the recovery and construction of a solar park on the closed area Cárcava I, ancient Celda I for the final disposal of solid waste "El Carrasco", using mathematical models based on concepts of the effects of mechanical creep and time-dependent biodegradation, for the calculation of the ultimate capacity and the settlements of the landfill under incremental load by means of a bibliographic investigation. The model parameters are calculated based on one-dimensional compression using the results of geophysical, geotechnical, geological studies and theoretical data available from the published literature.

As a result, this type of soil can withstand failures of bearing capacity in a time range of 10 years even though these lands contain solid urban waste that generates the variation in resistance to cutting due to the high content of organic matter. On the other hand, the results of the equations of two settlement models for sanitary landfills indicate that the soil is highly deformable for the installation of photovoltaic systems.

The bibliographic research allows us to conclude that the sanitary landfill contains high settlements in the first years of its closure, therefore it is essential to hope that these settlements are optimized to give the viability to the construction of a photovoltaic park.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de Ingenierías físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchan Jaimes. PhD. En Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica. Codirector: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD. En Ingeniería de la Construcción.

## Introducción

El relleno sanitario El Carrasco está ubicado en el kilómetro 5 Vía Girón, es el destino final de todos los residuos urbanos del área metropolitana de Bucaramanga y otros municipios. En el año de 1977 inició sus operaciones como un botadero a cielo abierto sin licenciamiento para procesos de disposición de residuos sólidos hasta mediados del año 2003 cuando se implementó el plan de manejo técnico ambiental. Actualmente, para dar cumplimiento al plan de contingencia, muchas celdas y zonas localizadas en El Carrasco se encuentran en desmantelamiento, clausura, posclausura y abandono, decretados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En ese contexto el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) de la Universidad Industrial de Santander ha venido desarrollando numerosos estudios sobre El Carrasco, precisamente en uno de ellos se propone la construcción de un parque solar teniendo en cuenta las siguientes tres líneas de investigación: la primera de estas líneas se enfoca en un estudio del entorno y tecnología con el “Estado actual del aprovechamiento de rellenos sanitarios clausurados para generación de energías renovables”; las otras dos líneas de investigación están encargadas del estudio técnico, cuyos componentes son “La caracterización geotécnica en el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco mediante el uso de ensayos geofísicos” y la presente investigación que consiste en el desarrollo de “La ingeniería conceptual para evaluar la instalación de un parque solar en el sitio de disposición final de residuos sólidos El carrasco” (Pérez Lozano, 2019, p. 15).

Los vertederos están conformados por suelos heterogéneos que contienen desechos peligrosos mezclados con residuos ordinarios y pueden causar enfermedades en localidades vecinas, así como a los trabajadores que se encargan de su gestión (Disposición Final de Residuos Sólidos, 2015); igualmente, experimentan asentamientos después de su cierre, lo cual produce

daños significativos en las estructuras y otras instalaciones construidas en este tipo de terreno (Tahmoorian & Khabbaz, 2020). Estos rellenos sanitarios sufren de alta compresibilidad bajo la influencia de alguna carga externa o por efecto de su propio peso debido al proceso de vertido y la biodegradación del material orgánico. De ahí que los espacios de disposición final de residuos sólidos se determinen como una estructura deformable que transfiere sus cargas a capas inferiores.

A medida que se acerca la edad límite del vertedero, es probable que la tasa de asentamiento disminuya o sea insignificante, por esa razón los desarrolladores de parques solares en rellenos sanitarios generalmente evitan la generación de proyectos en estos sitios hasta dos o tres años después de su clausura, debido a la alta tasa de asentamiento esperada durante los primeros años después del cierre (Disposición Final de Residuos Sólidos, 2015). De acuerdo con la Norma Sismo Resistente NSR-10, los asentamientos totales calculados para 20 años en construcciones aisladas no pueden ser superiores a 30 cm siempre y cuando no afecten las instalaciones vecinas.

Se recomienda monitorear y evaluar los datos reales, ya que algunos rellenos sanitarios pueden continuar experimentando altas tasas de desplazamiento durante más de cinco años. También se puede aprovechar un pronóstico de asentamiento en la fase de diseño para proyectar los efectos del peso del sistema Fotovoltaico en la etapa del relleno sanitario. Por esta razón el proyecto plantea un modelo del panel solar y su cimientado para calcular peso propio y excentricidad causada por efecto sísmico y viento.

Este proyecto presenta metodologías de enfoque de investigación cuantitativa para calcular la capacidad portante con el método de Brinch Hansen (1970), utilizando los factores de capacidad debido a la cohesión y sobrecarga se obtienen en función del ángulo de fricción para el cálculo de la capacidad de carga que requiere los parámetros de resistencia guiados de los resultados obtenidos de ensayo triaxial drenado en el vertedero de Suzhou (Zhan, Ling, & Chen, 2008), así

mismo, busca calcular el comportamiento geotécnico del suelo con las fórmulas de asentamientos basados en la teoría de elasticidad (Das, 2011), asentamientos por consolidación primaria y secundaria. (Moreno P, 2013) y modelo de predicción de asentamientos de residuos sólidos urbanos (RSU) de Hettiarachchi (Tahmoorian & Khabbaz, 2020); con datos extraídos de los resultados de investigaciones anteriores como uso de tomografía de resistividad eléctrica (Parra Saavedra, 2019), Refracción Sísmica y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) (Guerra Pabón, 2020) y Análisis geofísico (Quirós Gómez, 2019). Lo anterior tiene como propósito evaluar una posible prefactibilidad por concepto ingenieril al relleno sanitario desde un punto de vista geotécnico para sustituir su uso de disposición final a un parque solar.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar al menos dos metodologías para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios, tomando como caso de estudio el proyecto de parque solar en la cárcava I del relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Calcular la capacidad portante del suelo de soporte a corto y largo plazo, teniendo en cuenta aspectos como la degradación de las propiedades de resistencia y condiciones de carga excéntrica por viento y sismo.

Evaluar la carga de cada panel solar, su distribución en la zona y la incidencia de las cargas vecinas al cimiento analizado para obtener una aproximación del incremento de esfuerzos que permita estimar los asentamientos inmediatos y a largo plazo utilizando modelos constitutivos disponibles en la literatura para este tipo de materiales.

Evaluar los asentamientos producidos por una configuración de paneles solares típica con base en al menos dos modelos de comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo disponibles en la literatura.

Analizar la prefactibilidad desde el punto de vista geotécnico de la eventual construcción de un parque de este tipo en la zona estudiada.

## 2. Generalidades

### 2.1. El relleno sanitario El Carrasco

El relleno sanitario El Carrasco, se encuentra ubicado en la Ciudad de Bucaramanga a 500 metros de la autopista principal. Esta zona contiene un área aproximada de 93 hectáreas, en donde existen adecuadas 3 Cárcavas y 4 celdas (EJ ATLAS, 2014).

El vertedero sanitario El Carrasco es el lugar de disposición final de los residuos sólidos provenientes de Bucaramanga y de otros 15 municipios (Piedecuesta, Floridablanca, Girón, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Betulia, Suratá, Santa Barbara, California, Matanza, Los Santos, Tona y Zapatoca), según se menciona en el Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos PGIRS 2016-2017. Mensualmente recibe un promedio de 31000 toneladas de residuos sólidos, es decir, 1020 toneladas diarias (Mora Abril, 2019, p. 14).

Según el AUTO No 07715 de la Autoridad Nacional De Licencias Ambientales de 2018, los lugares Clausurados son la Celda 1, Zona ZEM y la Nueva Zona; los posts clausurados son el Parque Contemplativo, Zona 1, Zona 2, Antiguo Botadero a Cielo Abierto, Celda 2 y Celda 3. Estos lugares mencionados están ilustrados en la figura 1.

### Figura 1

*Zonas clausuradas, post-Clausurada y en Operación del vertedero sanitario El Carrasco*



*Nota:* Recuperado de Autoridad Nacional De Licencias Ambientales, AUTO No 07715 del 2018.

## **2.2. Cárcava I**

Está compuesta por la celda 1 y celda 2 (ilustrada en la Figura 2). Surgió en el año 1985 donde se iniciaron trabajos en el área denominada Cárcava I en sustitución al antiguo botadero a cielo abierto. Posteriormente, la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB ordenó el cierre y clausura definitiva de la celda transitoria a partir del 16 de marzo del 2011, para dar cumplimiento a la resolución 1328 de 10 de noviembre de 2010 (Torrado G & Rondón), después de la disposición de 1.300.000 toneladas de residuos con una extensión de 17 hectáreas, sin embargo, ese mismo año se retomó su uso hasta el año 2016 donde fue clausurada de forma definitiva (Resolución N°00520, 2018).

## **2.3. Zona de estudio**

La zona de estudio es la antigua Celda I, localizada en la Cárcava I del vertedero sanitario El Carrasco. Según la Autoridad Nacional de Licencias de Ambiente en esta celda se dispusieron residuos en el año 2012 bajo la segunda emergencia sanitaria, la cual consistía en acatar la orden de cierre definitivo impuesta por parte del Tribunal Administrativo de Santander desde año 2011, de modo que se emitió el Decreto 190 del 30 de septiembre de 2013 para garantizar la prestación del servicio público de aseo en la ciudad. No obstante, la alcaldía de Bucaramanga mediante la aprobación del decreto 158 de 2015 prorrogó la declaratoria de existencia de situación de riesgo de calamidad pública por el término de 24 meses, lo que permitió seguir haciendo uso de las celdas 1 y 2, Cárcava 1 (AUTO N° 07715, 2018).

En este lugar de disposición final de residuos sólidos diariamente se depositaban capas de 0,5 metros de forma escalonada mediante la conformación de terrazas y celdas habilitadas por periodos, el relleno posee una altura promedio de 5 metros. La celda 1 se encuentra clausurada (Franco A, Meza J, & Almeida, 2018) y cuenta con una extensión de 2.2 hectáreas

aproximadamente. Actualmente, está en proceso de revegetalización cuyo material de cobertura está hecho con geomembranas y una capa de material arcilloso con cubierta vegetal separado por bermas, esto protege el suelo de la infiltración del agua y evita la emisión de gases tóxicos. (Resolución N°00520, 2018).

## Figura 2

*Imagen Satelital antigua celda I localizada en el vertedero sanitario*



*Nota:* Imagen tomada y editada de Google Earth 2020.

### 2.4. Caracterización de los residuos sólidos urbanos

Los RSU depositados en vertederos normalmente contienen varios componentes físicos, como residuos de alimentos, papel, madera, textiles, plástico, metal y vidrio. A continuación, en la Tabla 1 se ilustra los porcentajes de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

**Tabla 1**

*Caracterización típica de los RSU – área metropolitana.*

RESIDUOS		PORCENTAJE GENERAL DE RESIDUOS		
		MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
RESIDUOS ORGÁNICOS	RES. DE COMIDA	17.3	41.8	33.3
	PAPEL	1.5	9.2	3.7
	CARTÓN	1.7	15.7	5.7
	PLÁSTICO	4.1	23.3	8.8
	TEXTIL	1.8	12.1	4.5
	GOMA	0.3	9.4	1.7
	CUERO	0.2	15.7	2.7
	RES. DE JARDÍN	2	17	8.4
	MADERA	0.5	7.8	3.5
	MISCELÁNEOS	6	27.7	15.8
	TOTAL			88.2
	RESIDUOS INORGÁNICOS	VIDRIO	1.6	7.7
METAL		0.8	5.2	2.1
CERÁMICA		0.5	2.5	1.1
SUCIEDAD Y CENIZAS		0.3	1.7	0.7
RES. ESPECIALES Y PELIGROSOS		2.3	6.1	4.5
TOTAL			11.8	

*Nota.* Porcentajes de residuos sólidos tomado del acuerdo con el Plan De Gestión De Residuos Sólidos Bucaramanga PGIRS- 2016-2017

### 3. Fases del proceso de asentamiento en residuos sólidos

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 tienen sus espacios distribuidos en todo el volumen. El medio poroso más parecido a los del residuo sólido 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 (Florez Acuña, 2018).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) tienen una alta compresibilidad y pueden generar una compresión notable bajo la influencia de una sobrecarga y la biodegradación de orgánicos. Los RSU tienen influencia negativa en la integridad de la estructura interna a medida que el asentamiento se desarrolla gradualmente con el proceso de depósito en vertederos (wu, Wenjie, Xuecheng, & Yunmin, 2017).

El modelo propuesto por Hettiarachchi 2005 considera que los vertederos son muy susceptibles a los asentamientos por causa del contenido de gases, así como la producción y distribución de humedad. Además, el vertedero está compuesto por tres fases por eso Tahmoorian & Khabbaz, 2020 afirma: gaseosa, líquida y una matriz sólida deformable que involucran residuos rápidamente degradables (desperdicios de alimentos y de jardín), residuos moderadamente degradables (papel, cartón, madera, textiles y cuero), desechos lentamente degradables (por ejemplo, plástico y caucho) y desechos no degradables (por ejemplo, vidrio, restos de metal, suciedad) que conforman la fase sólida (p. 4), como se detalla en la Figura 3.

### Figura 3

*Diagrama esquemático de la idealización de vertederos para la estimación de asentamientos*



*Nota:* Diagrama esquemático de la idealización de vertederos para la estimación de asentamientos traducida de Tahmoorian & Khabbaz, 2020.

De acuerdo con la Figura 3  $V_s$  es el volumen de la matriz sólida,  $V_w$  es el volumen del agua y  $V_g$  volumen de los gases. A partir de la Figura 3. Se propone que el volumen total tiene los siguientes componentes (Tahmoorian & Khabbaz, 2020):

$$V = V_s + V_w + V_g$$

(Ecuación. 1),

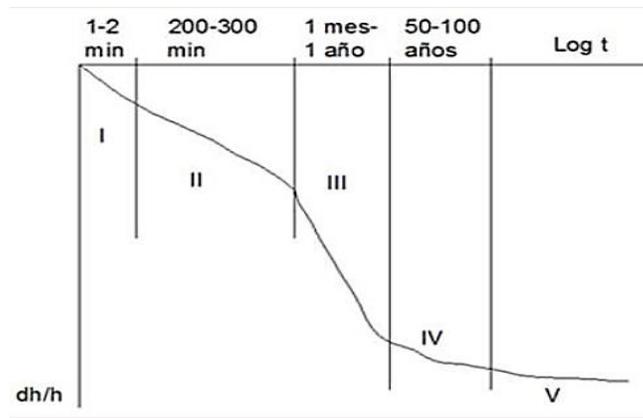
De acuerdo con el libro “Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios”, el comportamiento de los asentamientos en los rellenos sanitarios comprende 5 etapas:

1. Compresión física y flujo plástico por la distorsión mecánica, doblamiento, choque y reorientación de partículas.
2. Asentamiento no uniforme debido a la migración de pequeñas partículas a los vacíos entre a las grandes partículas.
3. Comportamiento viscoso y fenómeno de consolidación que involucra tanto el esqueleto sólido como las partículas o sus componentes.
4. Asentamiento por descomposición debido a la biodegradación de los componentes orgánicos.
5. Colapso por procesos fisicoquímicos (corrosión, oxidación, degradación de componentes inorgánicos). Deformación residual (Rivera Vásquez, 2012, p. 20).

Conforme con las cinco fases de la determinación de asentamientos teóricos en un relleno sanitario (Rivera Vásquez, 2012) mencionados anteriormente se puede ilustrar en la Figura 4 la variación de la curva de compresibilidad con el paso del tiempo (Yepes García & Villarraga Herrera, Analysis of settlements in landfills La Pradera and Curva de Rodas, 2016).

**Figura 4**

*Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995).*



*Nota:* Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995), tomado de Yepes García & Villarraga Herrera, 2016.

#### 4. Estructura de soporte del panel solar

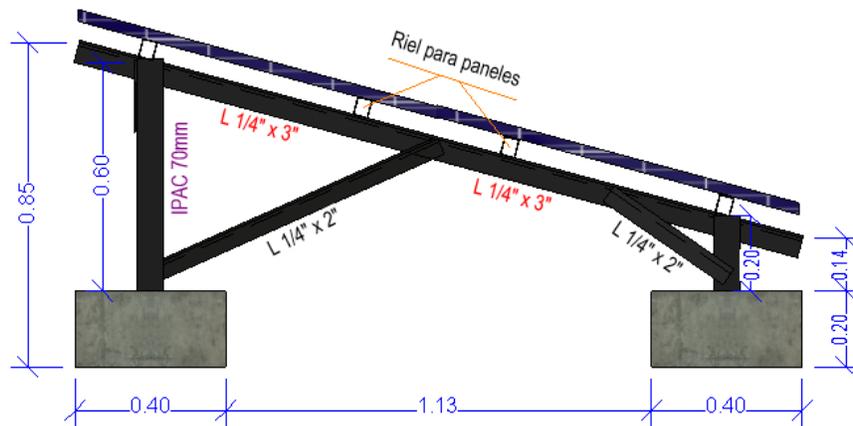
Este trabajo de investigación compara dos estructuras de soporte una con seis paneles solares y otra con cuatro paneles solares (Figura 7 y 8) ambas contiene seis columnas de apoyos tres con una altura de 0.2 [m] en el punto más bajo para contacto con el suelo y las otras con de 0.60 [m] (Figura 5), está hecha con tubería estructural cuadrada IPAC de 70x70x4, las vigas están hechas con perfiles angulares L 1/4" X 3" y las riostras son de perfiles angulares de 1/4" X 2" (Estos perfiles están tomados del catálogo de Agofer), los perfiles transversales de la Figura 5 son rieles para paneles solares. El panel solar para utilizar es el 335 W ZXP6-LD72 (znshinesolar, s.f.) (Panel seleccionado por el grupo de investigación INME para futuro estudio de campo) cuyas dimensiones son: 1978 x 992 x 30 mm, su potencia es de 350 W, el tipo de Célula del panel solar

es policristalino y su peso es de 25,5 kg, estos paneles contienen una inclinación 15° sobre la estructura de soporte.

Para el cálculo de asentamientos se consideran las cargas permanentes, en la Tabla 2 se calcula el peso de la estructura de soporte de los cuatro paneles solares y en la Tabla 3 el peso total de la estructura de seis paneles solares.

**Figura 5**

*Dimensiones de estructura de panel solar*



**Tabla 2**

*Peso total de la estructura metálica de cuatro paneles*

Sección	Peso [kg/m]	Long [m]	Peso [kg]
tubería estructural cuadrada IPAC 70mm	8.0	2.4	19.4
ángulo l 1/4" x 3"	7.3	5.9	43.2
ángulo l 1/4" x 2"	4.8	7.1	33.7
Riel de aluminio para el panel solar	0.8	16.2	12.2
<b>total, de la estructura de soporte</b>			108.5
Sección	Peso [kg]	Cantidad	Peso total
Panel Znshinesolar 335 zxp6-ld72 325-345w	25.5	4	102.0

**Tabla 3**

*Peso total de la estructura metálica de seis paneles*

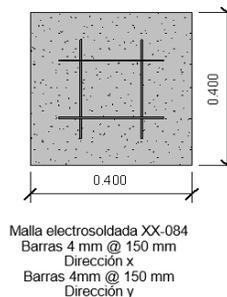
Sección	peso [kg/m]	Long [m]	peso [kg]
tubería estructural cuadrada IPAC 70mm	8.0	2,4	19.4
ángulo l 1/4" x 3"	7.3	5,9	43.2
ángulo l 1/4" x 2"	4.8	9,0	42.7
riel de aluminio para el panel solar	0.8	24,2	18.2
<b>total, de la estructura de soporte</b>			123.5
Sección	peso [kg]	cantidad	peso [kg]
panel Znshinesolar 335 zxp6-ld72 325-345w	25.5	6	153.0

#### 4.1 Zapatas de apoyos

Ambas estructuras contienen seis zapatas de apoyos cuadradas y de concreto (Figura 7 y 8) cuyas dimensiones son de 0.4x0.4 metros y posee un espesor de 20 cm (Figura 6) con 70 mm de recubrimiento; este cimiento contiene refuerzo de malla. El peso total del concreto más el refuerzo es de 78,5 kg por cada zapata aislada debido a que la fundación no posee nivel de desplante estas necesitan ser pesada para sostener la estructura, es importante agregar el peso de la cimentación al cálculo de asentamientos.

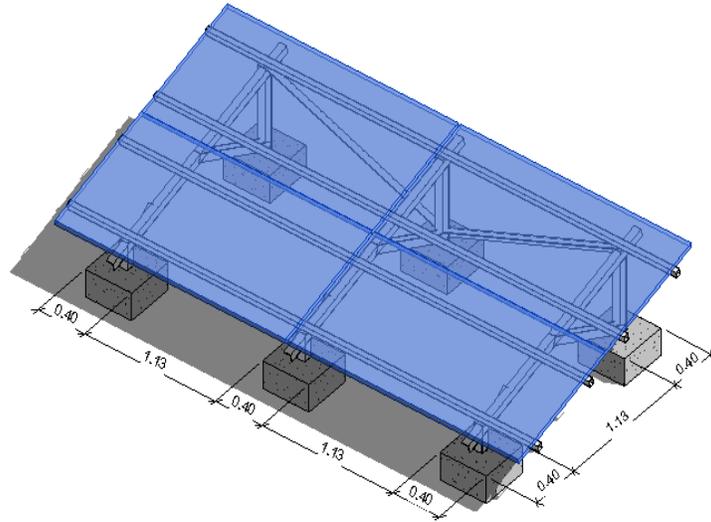
#### Figura 6

*Ilustración del refuerzo de la cimentación superficial*

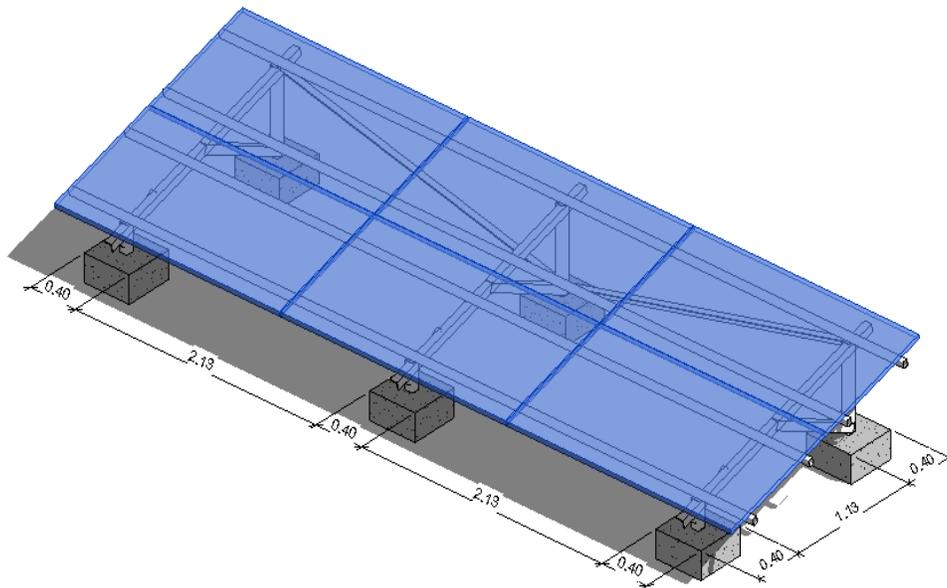


**Figura 7**

*Ilustración de la cimentación superficial para estructura de cuatro paneles solares*

**Figura 8**

*Ilustración de la cimentación superficial para estructura de seis paneles solares*



**Cargas accidentales:** Las cargas accidentales son aquellas que afectan los elementos estructurales y pueden ocurrir en algún momento por fenómenos naturales como los sismos y ráfagas de viento. El valor de la presión del viento sobre la estructura según Apéndice 2, es  $p=201,75$  [N/m<sup>2</sup>] (Pérez Lozano, 2019), donde  $p$  es la presión neta del diseño.

Este estudio también proporcionó los datos correspondientes a los coeficientes de presión a una altura  $z$  (Apéndice 5), la presión neta de diseño con las respectivas combinaciones para barlovento y sotavento (Apéndice 6 y 7), en donde indica la carga por unidad de área de presión y succión de viento (Tabla 4).

**Tabla 4**

*Valores de presión de diseño del viento*

Wcp	Wcs
[kPa]	[kPa]
0.202	0.213

*Nota.* Datos tomados de pasantía de investigación (Apéndice 1) elaborado en Excel (Pérez Lozano, 2019).

Wcp = Carga de presión del viento.

Wcs = Carga de succión del viento.

Para la carga de sismo se utilizó el capítulo A de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 con la cual se realiza el cálculo de coeficientes de espectro sísmico en un suelo tipo F encontrados en la Tabla 5 y en la Tabla 6 incluye el valor del periodo de la estructura.

**Tabla 5***Valores de coeficiente para el espectro sísmico*

Parámetros espectro de diseño	
Tipo de suelo	F
Coefficiente de Aceleración (Aa)	0.25
Coefficiente de Velocidad (Av)	0.25
Coefficiente de Amplificación periodos cortos (Fa)	1.45
Coefficiente de Amplificación periodos intermedios (Fv)	3
Coefficiente de importancia (I)	1

*Nota.* Valores tomados de la Norma Sismo Resistente NSR-10.

**Tabla 6***Resultado de periodo fundamental aproximado Ta*

<b>Cu= 1,75-1,2AvFv</b>	0,9	
<b>Ct</b>	0,072	Tabla A.4.2-1
<b>A</b>	0,8	Tabla A.4.2-1
<b>h= Altura total</b>	0,662	m
<b>N=número de pisos</b>	1	
<b>Ta=Ct*h<sup>α</sup></b>	0,052	seg
<b>Ta= 0,1N</b>	0,1	seg
<b>Tmáx= CuTa</b>	0,050	

**Cargas temporales:** Cargas temporales son las cargas relacionadas con la construcción, el uso o mantenimiento de la estructura. En el diseño se asume un operario con un peso de 125 [kg] (Pérez Lozano, 2019), la carga en el modelo se consideró como una carga distribuida para la estructura de cuatro paneles su valor es de 0,15 kN/m<sup>2</sup> y el de seis paneles es de 0,10kN/m<sup>2</sup>.

**Carga de granizo:** La carga de granizo  $G$  es el valor de la carga distribuida de diseño para cubiertas con inclinación mayor a  $15^\circ$  es del  $0,5 \text{ kN/m}^2$ , según el Capítulo B de la norma NSR-10, esta se debe considerar en regiones con más de 2000 m.s.n.m. o en lugares de menor altura donde la autoridad municipal lo requiera.

### 5. Capacidad portante método de Brinch Hansen (1970)

La capacidad portante o capacidad última de carga del suelo,  $q_u$ , es la limitante de la resistencia del suelo, con la particularidad de que si la variación de carga por unidad de área ( $q$ ) que está aplicando en la cimentación de una estructura es igual a  $q_u$ , el suelo tendrá una falla repentina en sus apoyos de cimentación, además la superficie de falla del suelo se propagará hasta el exterior del terreno; para las cimentaciones superficial la carga última ocurre con un asentamiento del 15% a 25% de la longitud del ancho de la cimentación  $B$  (Rondón & Torrado, p.22). Este fenómeno ocurre con una falla cortante en el suelo debido al punzonamiento. En el caso de las cimentaciones inclinadas se tiene en consideración varios factores que se encuentra reflejados en la ecuación 2 de Brinch Hansen 1970.

Para suelos C- $\emptyset$

$$q_{ult} = CN_c S_c d_c i_c g_c b_c + \underline{q} N_q S_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

(Ecuación 2)

Donde:

$N_c, N_q, N_\gamma$  = Factores de capacidad portante

$S_c, S_q, S_\gamma$  = Factores de forma

$d_c, d_q, d_\gamma$  = Factores de profundidad

$i_c, i_q, i_\gamma$  = Factores de inclinación

$g_c, g_q, g_\gamma$  = Inclinación de la superficie

$b_c, b_q, b_\gamma$  = Factores de base (Base inclinada)

$\underline{q} = \gamma D_f \cos \cos (\beta)$  Sobrecarga equivalente, para vertederos sanitarios no existe nivel de desplante Df.

## 6. Asentamientos basados en la teoría de elasticidad

Estos asentamientos inmediatos suceden horas después de aplicar la carga en cualquier tipo de suelos húmedos, secos y saturados; basado en la teoría de elasticidad el cálculo contiene los factores de módulo elástico y la relación de Poisson del suelo (Moreno P, 2013).

$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} I_s I_f [m]$$

(Ecuación 3), (Das, 2011)

Donde

$S_e$ =Asentamiento

$q_o$ = Presión neta aplicada a la cimentación [N/m<sup>2</sup>]

$\nu_s$ = Modulo de Poisson del suelo

$E_s$ = Módulo de Young promedio debajo de la cimentación [N/m<sup>2</sup>]

$B'$ = Base/2 para el centro y base para la esquina [m]

$I_s$ = Factor de forma (Steinbrenner 1948)

$I_f$ = Factor de profundidad (Fox 1948)

$\alpha$ = 4 si es el cálculo es al centro de la zapata y 1 si es en la esquina.

## 7. Asentamientos por consolidación primaria y secundaria.

### 7.1 Consolidación primaria

Según Sowers (1973) la compresión primaria está relacionada con los asentamientos que experimenta un relleno sanitario ocurre en un lapso inferior a 30 días, debido a la rápida disipación de presiones en los poros por factores de degradación en los RSU (Turcumán & Ibañez, 2013). La magnitud de la compresión primaria se expresa por la ecuación 5 (Sowers 1973 como se citó en Moreno P, 2013):

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_o} H_o * \log \frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}}$$

(Ecuación 5),

Donde:

$S_p$ = asiento al final de la consolidación primaria

$H_o$ =Altura inicial del terreno

$C_c$ = coeficiente de compresibilidad

$\sigma_{vo}$  = presión efectiva previa en el relleno

$\Delta\sigma_{vo}$ = sobrecarga efectiva

$e_o$  = índice de poros

$C_c = 0.15e_o$  Bajo contenido en materia orgánica (Sowers, 1973).

$C_c = 0.55e_o$  Alto contenido en materia orgánica (Sowers, 1973).

### 7.2 Consolidación Secundaria.

En el asiento secundario, el mecanismo que rige esta etapa se basa en los procesos de degradación que se desarrollan al interior del relleno. La compresión secundaria no depende del

proceso de carga, pues en este caso, la variable dependiente del tiempo mayor a 30 días (Moreno P, 2013). La magnitud de la compresión secundaria se expresa por la ecuación 6 (Sowers 1973 como se citó en Moreno P, 2013):

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_o} H * \log \frac{t_2}{t_1}$$

(Ecuación 6)

Donde:

$S_s$  = asiento por consolidación secundaria al tiempo  $t_2$ .

$H_o$  = altura del relleno al tiempo  $t_1$ .

$C_\alpha$  = coeficiente de compresión secundaria.

$\sigma_{vo}$  = presión efectiva previa en el relleno.

$C_\alpha = 0.03e_o$  condiciones desfavorables (Sowers, 1973).

$C_\alpha = 0.09e_o$  condiciones favorables (Sowers, 1973).

## 8. Modelo de predicción de asentamientos de RSU según Hettiarachchi

Este modelo incluye la contribución de la biodegradación de la materia orgánica en los vertederos sanitarios, combina la compresión inmediata y la compresión secundaria dependiente del tiempo. Según Hettiarachchi (2005), la ecuación básica para el cálculo de la compresión mecánica se puede expresar como:

$$\varepsilon_m = C * \log \left( \frac{\sigma' + \delta\sigma'}{\sigma'} \right)$$

(Ecuación 7)

Donde  $C^*$  es el parámetro de compresibilidad clasificado como  $C_c$  es el índice de compresión y  $C_s$  es el índice de hinchazón (Apéndice 29), y  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo, y  $\delta\sigma'$  es a diferencia de esfuerzo efectivo. Dado que depositar una nueva capa de desechos aumenta la tensión de sobrecarga y la pérdida de masa debido a la biodegradación (Tahmoorian & Khabbaz, 2020). Además, la ecuación principal utilizada para estimar el asentamiento inducido por la biodegradación se puede definir como:

$$\varepsilon_b = (1 - n_i) \sum_{j=1}^4 f_{sj} (G_{si}/G_{sj}) (1 + w_j(t)G_{sj}) [1 - \exp(-\lambda_j t)]$$

(Ecuación 8), (Hettiarachchi, 2005).

Donde  $n_i$  es la porosidad inicial vertedero,  $W_j$  es contenido de agua gravimétrico,  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $G_{si}$  es la gravedad específica global inicial de residuos sólidos,  $G_{sj}$  es la gravedad específica del j-ésimo grupo de sólidos residuales,  $\lambda_j$  es la constante cinética de primer orden por el j-ésimo grupo, y  $f_{sj}$  es la fracción de sólidos inicial para cada grupo de residuos. Donde los valores de esta constante están en el Apéndice 28 organizados por sus correspondientes grupos.

### 8.1 Predicción total del asentamiento de vertederos por el modelo.

Como se discutió anteriormente, este modelo asume que el relleno sanitario contiene cuatro grupos de propiedades de los desechos sólidos (Figura 3). Por último, se suman los asentamientos calculados en grupos de la matriz sólida degradable para la obtención del asentamiento total en el relleno sanitario con base en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_b$$

(Ecuación 9), (Tahmoorian & Khabbaz, 2020).

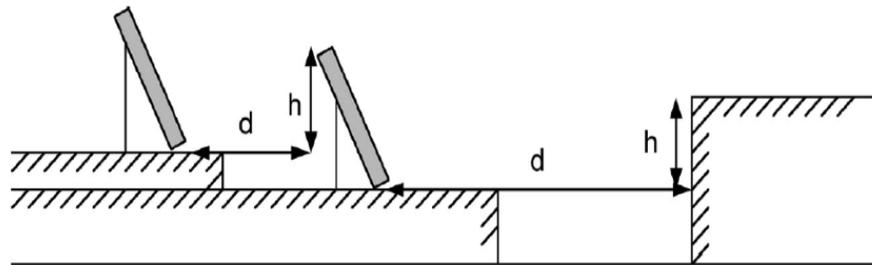
Donde  $\epsilon$  es el asentamiento total;  $\epsilon_m$  ecuación básica para el cálculo de la compresión mecánica y  $\epsilon_b$  es el asentamiento inducido por biodegradación.

### 9. Separación entre hileras de paneles solares

Los módulos fotovoltaicos se deben ubicar garantizando la condición más favorable por eso es importante considerar la separación mínima entre hileras para evitar el sombreado entre paneles (Figura 9), esta distancia según el Pliego de Condiciones Técnica de Energía Solar Fotovoltaica está determinada por la ecuación 10 (Pérez Lozano, 2019) resultado ilustrado 2D en la Figura 10 y vista en 3D en la Figura 11.

#### Figura 9

*Ilustración de altura y separación mínima de hileras de paneles solares*



*Nota.* Ilustración de altura y separación mínima de hileras de paneles solares, tomado del sitio web *BLOG Tecnosol*.

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \text{latitud})}$$

(Ecuación 10)

Donde

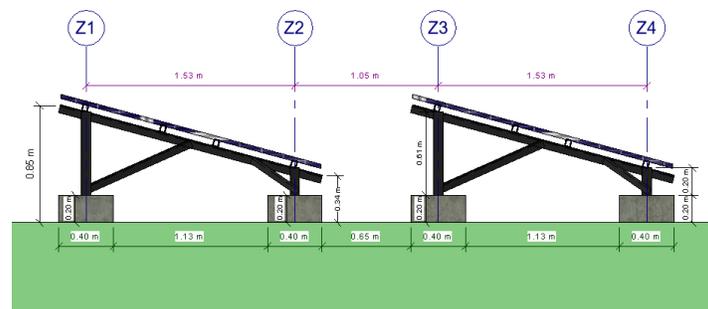
$d$ = distancia mínima, resultado del valor es de 0,65m

$h$ = altura del panel solar con respecto a la horizontal el cual es 0.85 m.

Latitud de Bucaramanga es 7.11392 (Municipio de Colombia, s.f.).

### Figura 10

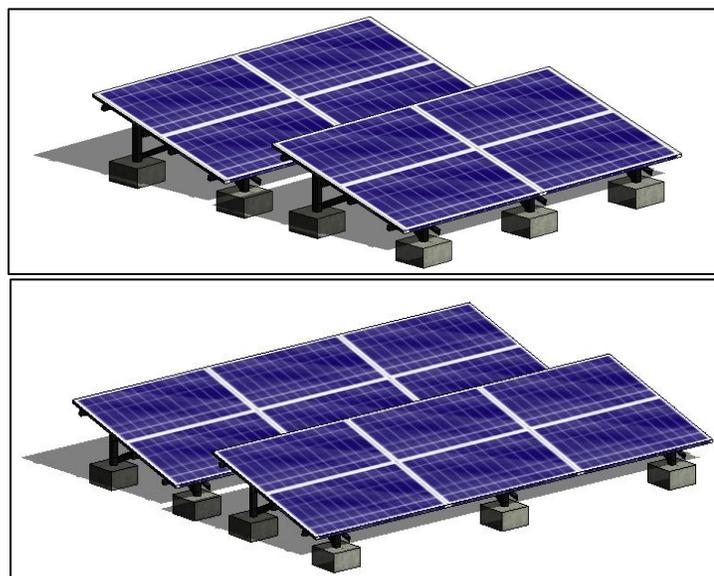
*Resultado de separación de hileras de paneles solares*



*Nota.* Elaboración por parte de los autores en Revit 2019.

### Figura 11

*Visualización 3D del parque solar en estructura de cuatro y seis paneles solares*



### 10. Cargas distribuidas en la superficie de una masa semi-infinita

Todas las construcciones que imparten cargas sobre el suelo donde son emplazadas producen compresión y resistencia a la tracción en el terreno alterando la presión de poros, es importante tener en cuenta que este tipo de comportamiento se incluye el cálculo de incidencias de esfuerzo por cargas vecinas (ver la ecuación 11 de Poulos & Davis, 1974) donde se calcula el incremento de esfuerzo vertical debajo de la carga distribuida cuyo ángulo  $\delta$  y  $\alpha$  están ilustrados en la Figura 12.

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos \delta + \sin \delta \cos (\alpha + 2\delta)]$$

(Ecuación 11)

$P$ = Esfuerzo emitido por la carga externa

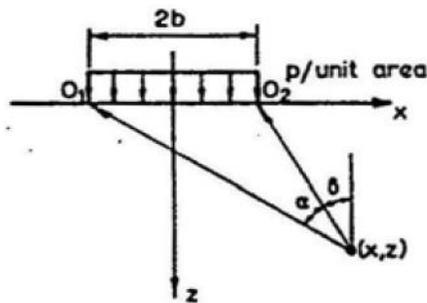
$\alpha$ = Angulo ilustrado en la Figura 12.

$\delta$ = Angulo ilustrado en la Figura 12.

$\sigma_z$ = Incremento de esfuerzo vertical.

#### Figura 12

*Carga vertical uniforme*



*Nota.* Esfuerzo causado por una carga de franja (ancho y longitud finitos), tomado de *Soluciones elásticas para mecánica de suelos y rocas* de Poulos & Davis, 1974, (cap. 3).

## 11. Procedimiento para los resultados de capacidad de carga por unidad de área (q)

### 11.1 Cargas soportadas por la estructura

Es indispensable que la estructura de soporte resista lo suficiente la combinación de efectos producidos por cargas de viento o sismo para esto se estima la respuesta sísmica de la estructura. Como paso inicial se utiliza el modelo matemático llamado Fuerza Sísmicas Horizontal Equivalente establecida por la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 que incluye el cortante de base sísmico  $V_s$ , la masa de la estructura  $M$ , el período de vibración  $T_c$  (Valor de  $T_c$  es de 0.052 para dos tipos de configuración de paneles solares, tomado de la Tabla 6), y un coeficiente de umbral de daño del 2% para el tipo de suelo F. En la Tabla 7 y Tabla 8 están los resultados de los coeficientes de la fuerza sísmica horizontal equivalente para digitar en el modelamiento de las estructuras en el software estructural Sap2000.

#### Tabla 7

*Resultados de coeficientes para el cálculo de fuerza horizontal equivalente para estructura de cuatro paneles solares*

Tc [s]	Sa	M [kN]	Vs [kN]	Fx=Fy [kN]
0.052	0.906	3.81	3.45	3.45

**Tabla 8**

*Resultados de coeficientes para el cálculo de fuerza horizontal equivalente para estructura de seis paneles solares*

Tc	Sa	M	Vs	Fx=Fy
[s]		[kN]	[kN]	[kN]
0.052	0.906	5.16	4.68	4.68

Tc = período de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante y la parte descendente del mismo.

Sa = valor del espectro de aceleraciones de diseño para un período de vibración dado.

Máxima aceleración horizontal de diseño expresada como porcentaje de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un período de vibración T.

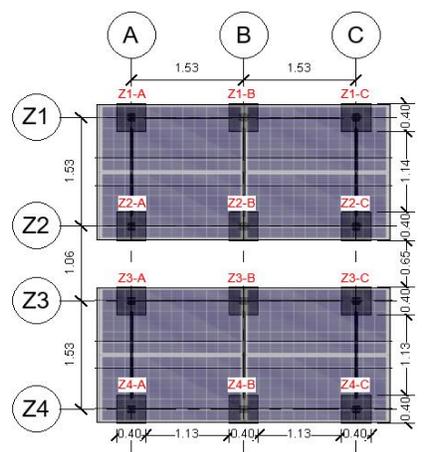
Vs = Cortante sísmico de base.

M = Masa de la estructura, Capítulo A de la NSR-10.

Fx = Fy = Fuerza sísmica horizontal.

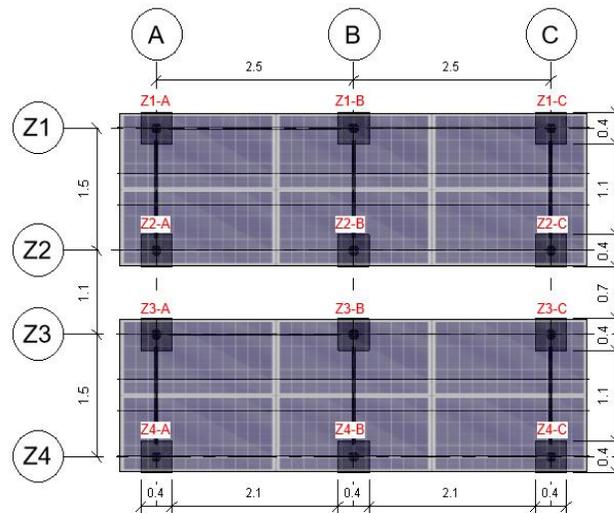
**Figura 13**

*Dimensiones y localización de los cimientos de la estructura de cuatro paneles solares*



**Figura 14**

*Dimensiones y localización de los cimientos de la estructura de seis paneles solares*



### 11.1.1 Modelado de la estructura en SAP2000

En las Figura13 y Figura 14 se encuentran las dimensiones de apoyos y separación al igual que los nombres de cada cimiento que contiene la estructura en una vista superior y en la Tabla 9 y 10 están los valores de fuerzas y momentos máximos de los dos modelos de estructura de paneles solares con sus respectivas combinaciones de cargas mayoradas (Apéndice 2 y 3). Los resultados fueron obtenidos gracias al modelado en el software estructural SAP2000.

**Tabla 9**

*Valores máximos de fuerza y momentos en la estructura de cuatro paneles solares*

Zapata	Combinación	F3 [kN]	M1 [kN-m]	M2 [kN-m]
Z2-A	1.2D-Ey+L	1.03	-	-
Z2-C	1.2D-Ey+L	-	0.09	-
Z2-C	1.2D-Ex+L	-	-	0.13

**Tabla 10**

*Valores máximos de fuerza y momentos en la estructura de seis paneles solares*

Zapata	Combinación	F3 [kN]	M1 [kN-m]	M2 [kN-m]
Z2-B	1.2D-Ey+L	1.54	-	-
Z2-C	0.9D-Ey	-	0.29	-
Z2-A	1.2D-Ex+L	-	-	0.38

F3 = Fz = Fuerza máxima vertical en dirección z.

M1 = Mx = Momento máximo en dirección x.

M2 = My = Momento máximo en dirección y.

D = Carga muerta.

Ey = Sismo en dirección y.

Ex = Sismo en dirección x.

L = Carga viva.

Los siguientes cuadros de la Tabla 11 y 12 contienen resumen de las fuerzas y momentos máximos (Tabla 9 y 10), para el cálculo de las excentricidades que contribuyeron con la estimación de las dimensiones de la cimentación cuadrada que trasfiere las cargas de la estructura al suelo.

**Tabla 11**

*Valores de excentricidades y dimensiones de la zapata aislada para la estructura de cuatro paneles solares*

Fz	Mx	My	ex	Ey	d	Lx= Ly	Af
[kN]	[kN-m]	[kN-m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]
1.03	0.09	0.13	0.09	0.12	0.20	0.40	0.16

**Tabla 12**

*Valores de excentricidades y dimensiones de la zapata aislada para la estructura de seis paneles solares*

Fz	Mx	My	ex	Ey	D	Lx= Ly	Af
[kN]	[kN-m]	[kN-m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]
1.54	0.29	0.38	0.19	0.24	0.20	0.40	0.16

Fz = Fuerza máxima vertical en dirección z.

ex = Excentricidad en dirección x.

ey = Excentricidad en dirección y.

d = espesor de la cimentación.

Lx = Ly = Dimensiones longitudinales de la cimentación.

Af = Área aferente de la zapata.

En la Tabla 13 y Tabla 14 se encuentra los resultados de la carga puntual la cual es la suma de la fuerza máxima vertical Fz más el de la carga de la cimentación, otro resultado es la carga por unidad de área que consiste en dividir la carga puntual sobre el área de la zapata; Este valor de carga distribuida se utiliza para el cálculo de capacidad portante de un terreno para confirmar que la estructura de soporte de paneles solares no produzcan un fallo por cortante o asentamientos diferenciales en dicho terreno.

**Tabla 13**

*Valor total de fuerza vertical actuante en estructura de soporte de cuatro paneles solares*

Fz	Carga cimentación	Q	q
[kN]	[kN]	[kN]	[kPa]
1.03	0.77	1.80	11.25

**Tabla 14**

*Valor total de fuerza vertical actuante en estructura de soporte de cuatro paneles solares*

Fz	Carga cimentación	Q	q
[kN]	[kN]	[kN]	[kPa]
1.56	0.77	2.31	14.44

Q = Carga puntual.

q = Carga por unidad de área=  $Q/A_f$

## 11.2 Resultado del cálculo de capacidad portante

El Carrasco es considerando un terreno en estado de saturación, el estudio de tomografía eléctrica encontró que el suelo contiene baja resistividad (Parra Saavedra, 2019), por esa razón se consideró que el nivel freático coincide con la superficie del terreno (Apéndice 6), en donde para el cálculo de la capacidad de carga mediante la ecuación de Hansen, esta humedad no afectará la transmisión de cargas de la estructura en donde descansa la cimentación del panel solar, debido a que su nivel de desplante coincide con la superficie del terreno.

Por medio de un estudio previo (Quirós Gómez, 2019), en donde se realizaron ensayos de Corte Directo, a través de la toma de muestras por Rotopercusión, Apiques y SPT, además, teniendo en cuenta las características dinámicas del suelo en los diferentes puntos de estudio, se encontraron los valores promedios de peso específico de 13.41[kN/m<sup>3</sup>], el ángulo de fricción de 28.85[°] y una cohesión de 25.88[kPa] (Apéndice 7). Por otra parte, según un estudio de caracterización de resistencia al corte de los residuos sólidos urbanos del vertedero de Suzhou en China (Zhan, Ling, & Chen, 2008) se demuestra que los RSU exhibieron un comportamiento de endurecimiento por deformación axial y esfuerzo desviador. Como los parámetros de resistencia sufren cambios en el tiempo; degradación de la cohesión, incremento en la fricción más los

resultados de los estudios elaborados en China, se realizaron los ajustes mostrados en la Tabla 15 que exponen estos parámetros para la zona de estudio (ver detalle Apéndice 8) donde se usa como referencia los resultados de prueba compresión triaxial con niveles de deformación a un porcentaje de presión del 10%.

De la ecuación de la capacidad de carga por el método de Hansen (ecuación 2), el cual considera ciertos factores, entre estos incluye la inclinación del terreno (Figura 15), los cuales permiten calcular la carga última del suelo ( $q_u$ ), para que gracias al factor de seguridad se estimara la carga del suelo admisible ( $q_{adm}$ ), que al ser mayor que la carga por unidad de área de la estructura ( $q$ ), se concluye que el suelo al variar el tiempo y sus parámetros físicos soporta la estructura bajo este estudio (Tabla 16 y 17). El factor de seguridad mínimo para rellenos sanitarios es  $FS=3$  (Zhan, Ling, & Chen, 2008) ya que es un terreno crítico para el cálculo de carga del suelo admisible y de acuerdo con los resultados ambas estructuras cumplen.

**Tabla 15**

*Valores para el cálculo de capacidad portante*

	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	C [kPa]
A la fecha	13.41	28.9	25.9
Próximo 5° año	13.41	36.4	26.9
Próximo 8° año	13.41	44.3	18.9
próximo 11° año	13.41	44.3	3.0

$\gamma$  = Densidad del terreno.

$\phi$  = Angulo de fricción del suelo.

C = Cohesión del suelo.

**Figura 15***Orientación de inclinación del terreno**Nota.* Imagen tomada y editada de Google Earth.**Tabla 16***Cálculo y conclusión del soporte del suelo para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

SUELO F	$q_u$ [kPa]	$q_{adm}$ [kPa]	$q$ [kPa]	Conclusión del suelo
Fecha actual	797.2	265.7	11.3	Soporta la estructura
Próximo 5° años	1712.2	570.7	11.3	Soporta la estructura
próximo 8° años	3040.0	1013.3	11.3	Soporta la estructura
próximo 11° años	444.3	148.1	11.3	Soporta la estructura

**Tabla 17***Cálculo y conclusión del soporte del suelo para estructura de soporte de seis paneles solares*

SUELO F	$q_u$ [kPa]	$q_{adm}$ [kPa]	$q$ [kPa]	Conclusión del suelo
Fecha actual	640.7	213.6	14.4	Soporta la estructura
Próximo 5° años	1372.6	457.5	14.4	Soporta la estructura
Próximo 8° años	2386.3	795.4	14.4	Soporta la estructura
Próximo 11° años	338.4	112.8	14.4	Soporta la estructura

Por medio de cálculos matemáticos se haya los valores exactos de los factores de capacidad de carga que depende de las propiedades volumen-masa y propiedades de resistencia al corte y la inclinación del suelo (ver resultados de factores de capacidad de carga del Apéndice 9 hasta Apéndice 22). Es importante considerar de carga vertical y horizontal generadas por sismos y vientos ya que generan cargas actuantes excéntricas.

Los resultados de la carga última con base a la Ecuación 2, donde los factores de forma y otras ecuaciones de factores de capacidad de da carga depende del ángulo de fricción del suelo, cabe aclarar que en la Tabla 15 aumenta de un valor de  $28^\circ$  a  $43^\circ$  en un periodo de 11 años por esa razón en la tabla 16, la capacidad de carga admisible aumenta hasta el octavo año, mientras la cohesión disminuyó de 25.9 kPa a 3.0 kPa. Debido a que es un proceso metodológico para estimar los valores tomado como referencia los resultados de la prueba triaxial de un estudio de campo y de laboratorio del vertedero Suzhou (Zhan, Ling, & Chen, 2008) que implica un proceso de descomposición de la materia orgánica en vertedero sanitario y también por efecto de cargas incremental, en cambio un suelo que no contiene residuos sólidos el ángulo de fricción siempre permanece constante con el paso de los años a causa de que no son afectados por factores de endurecimiento por deformación y aumento de edad del llenado en los vertederos.

## **12. Resultados para el cálculo de asentamientos elásticos**

Mediante el estudio previo de “*caracterización geotécnica de la Cárcava I, antigua celda I*” (Guerra P., 2019), el cual determinó cuatro estratos del suelo ilustrados indicados en la Tabla 18 con respecto a un estudio geofísico realizado en dicho sitio, estos datos fueron tomados de un

estudio de Refracción Sísmica y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) realizados en El Carrasco.

**Tabla 18** Valores aproximados de estratos

Estratos	Rango de profundidad en metros
1	0,00 – 1.7
2	2.7 – 2.9
3	2.9 – 5.1
4	> 5.1

*Nota.* Tomado de Caracterización geotécnica de la Cárcava I Guerra Pabón, 2020.

Debido a la heterogeneidad del suelo, contiene diferentes valores de módulo de elasticidad que varían según la profundidad del terreno. Para el cálculo del módulo elástico equivalente total se utiliza la ecuación 10 de Bowles (1987). cuyo resultado están en la Tabla 19.

$$E_s \text{ total} = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{\underline{z}}$$

(Ecuación 10), (Das, 2011)

$E_{s(i)}$  = módulo de elasticidad del suelo dentro de una profundidad  $\Delta z$ , valores tomados de estudio de caracterización geotécnica Guerra Pabón, 2020.

$\underline{z}$  = H o 5B, el que sea menor

$\gamma$  = Peso específico húmedo

$E_s$  = Módulo de elasticidad

$\Delta Z$  = Espesor del estrato

**Tabla 19***Módulo de elasticidad del suelo ecuación de Bowles (1987)*

Profundidad	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_s$ [Mpa]	$\Delta Z$ [m]	$E_s * \Delta Z$	$E_s$ [Mpa]
[0-1.7]	13.41	855.0	1.7	1816.8	385.9
[1.7-2.9]	13.28	375.7	0.3	112.7	

**Tabla 20***Resultado de factor de forma (Steinbrenner 1934)*

Z [m]	B' [m]	n'	m'	V poisson	Is
2	0.5	10	1	0.50	0.498

$H = 5B$ , B es el ancho del cimiento

$B'$  = mitad de longitud del ancho del cimiento

Is= es factor de forma Steinbrenner, 1934 (Das, B.2011, p. 246)

$n'$  y  $m'$ = coeficientes para calcular If. (Das, B.2011, p. 246-247)

V = relación de Poisson del suelo (Guerra Pabón, 2020).

De acuerdo con el resultado de módulo de elasticidad dentro de una profundidad  $\Delta z$  (Tabla 19) y el factor de forma (Tabla 20), se obtiene resultado de asentamientos basados en la teoría de elasticidad de la ecuación 3 cuyos valores están en la Tabla 21 y Tabla 22.

**Tabla 21**

*Cálculo de asentamiento elásticos para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

qo [KN/m <sup>2</sup> ]	A	B' [m]	v poisson
11.24	4	0.2	0.50
Es [KN/m <sup>2</sup> ]	Is	If	Se [mm]
3.86 E+02	0.498	0.98	8.56

**Tabla 22**

*Cálculo de asentamiento elásticos para estructura de soporte de seis paneles solares*

qo [KN/m <sup>2</sup> ]	A	B' [m]	v poisson
14.37	4	0.2	0.50
Es [KN/m <sup>2</sup> ]	Is	If	Se [mm]
3.86 E+02	0.498	0.98	10.93

### 13. Valores para el cálculo de consolidación primaria y secundaria.

#### 13.1 Relación de vacíos

Los valores teóricos con respecto a la relación de vacíos para los vertederos sanitarios están en un rango de 1 a 13 (Ver valores de relación de vacíos en el Apéndice 23). Para el cálculo de relación de vacíos se considera la ecuación 12, donde el cálculo de la gravedad específica del suelo se tomó el promedio del valor máximo y mínimo del Apéndice 24 los cuales fueron 1.03 y 2.47 que son valores típicos en los rellenos sanitarios.

Para hallar la relación de vacíos (ecuación 12) se despeja de la ecuación de índice de vacíos (ecuación 11), cuyos resultados están en la Tabla 23. Fórmula para la relación de peso específico:

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e}$$

(Ecuación 11) (Das, 2011)

$$e = \frac{G_s\gamma_w - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$$

(Ecuación 12) (Das, 2011)

Donde

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos de suelo 1.75, promedio del valor máximo y mínimo del Apéndice 24.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua (valor igual 9.8 KN/m<sup>3</sup>)

$e$  = Relación de vacíos (resultados de la ecuación 12 en la Tabla 23.)

$\gamma_{sat}$  = Peso específico saturado del suelo (Resultados en la Tabla 24.)

**Tabla 23**

*Valores del peso específico y resultados calculados de  $e_o$  y  $\gamma_{sat}$  del suelo*

Estrato	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$e_o$
1 [1-1.7]	13.41	1.04
2 [1.7-2.9]	13.28	1.12
3 [2.9-5.1]	13.19	1.17
4 [>5.1]	13.28	1.12

*Nota.* Valores del peso específico tomado y editados de estudio geotécnico (Guerra Pabón, 2020).

### 13.2 Resultados de consolidación primaria y secundaria

El esfuerzo efectivo es la diferencia del esfuerzo total y la presión de agua (Ver resultados de esfuerzo efectivos en la Tabla 24 y 25) que sufre el lugar a causa de una sobre carga, para el cálculo del esfuerzo efectivo se debe considerar el peso específico saturado debido a que estudios realizados en el Carrasco establecieron este terreno en estado de saturación (Parra Saavedra, 2019; Quirós Gómez, 2019), además se asume que el nivel freático está en la superficie del terreno. Luego se procede a la obtención de los valores de consolidación primaria para cada estructura (Tabla 26 y 27), donde se utiliza la ecuación 5 y un coeficiente de compresibilidad de  $C_c = 0.55e_o$  según Apéndice 27 donde ilustra la regresión lineal que sufren los vertederos sanitarios cuando contienen alto contenido en materia orgánica.

**Tabla 24**

*Valores de esfuerzo efectivo para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

<b>Estrato</b>	<b><math>\Delta H</math> [m]</b>	<b><math>\gamma_{sat}</math> [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\sigma</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>u</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\sigma'</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>
0	0.0	0.0	10.6	0.00	11.2
1	1.7	13.4	33.4	16.7	17.4
2	1.2	13.3	49.3	28.4	21.6
3	2.2	13.2	78.3	50.0	29.0
4	2.0	13.3	104.9	69.6	36.0

**Tabla 25**

*Valores de esfuerzo efectivo para estructura de soporte de seis paneles solares*

<b>Estrato</b>	<b><math>\Delta H</math> [m]</b>	<b><math>\gamma_{sat}</math> [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\sigma</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>u</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\sigma'</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>
0	0.0	0.00	12.9	0.00	14.4
1	1.7	13.4	35.7	16.7	20.5
2	1.2	13.3	51.6	28.4	24.7
3	2.2	13.2	80.6	50.0	32.2
4	2.0	13.3	107.2	69.6	39.1

Donde

$\sigma$ = esfuerzo total unidades en kN/m<sup>2</sup>

$u$ = Presión de poros unidades en kN/m<sup>2</sup>

$\sigma'$ = Esfuerzo efectivo kN/m<sup>2</sup> unidades en kN/m<sup>2</sup>

**Tabla 26**

*Resultados de asentamientos primario para estructura de soporte de cuatro paneles solares.*

<b>H [m]</b>	<b><math>E_o</math></b>	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\sigma_{vo}</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta\sigma_{vo}</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>S_p</math> [cm]</b>
5.0	1.17	0.65	27.70	11.24	22.0

**Tabla 27**

*Resultados de asentamientos primario para estructura de soporte de seis paneles solares.*

<b>H [m]</b>	<b>E<sub>o</sub></b>	<b>C<sub>c</sub></b>	<b>σ<sub>vo</sub> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Δσ<sub>vo</sub> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Sp [cm]</b>
5.0	1.17	0.65	30.83	14.37	24.7

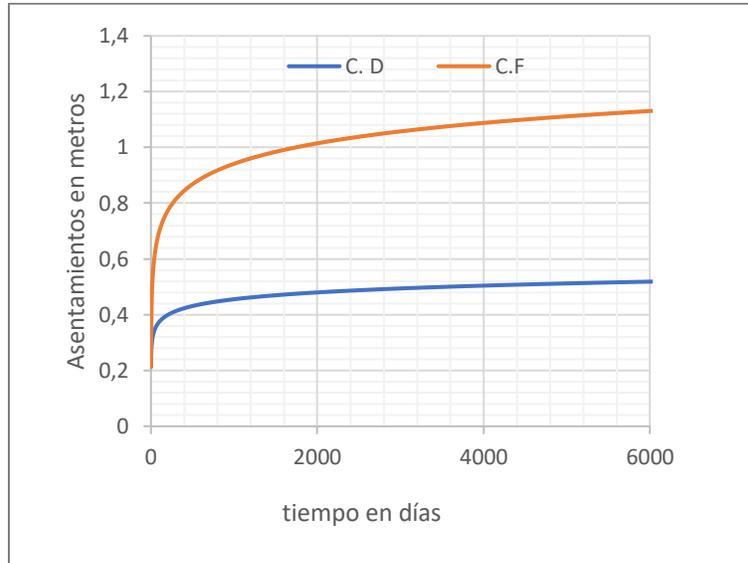
H= altura del vertedero equivale a 5 metros (Resolución N°00520, 2018)

σ<sub>vo</sub>= Esfuerzo vertical efectivo estimado en la Tabla 26 y 27 dependiendo el tipo de estructura para una altura de 5 metros.

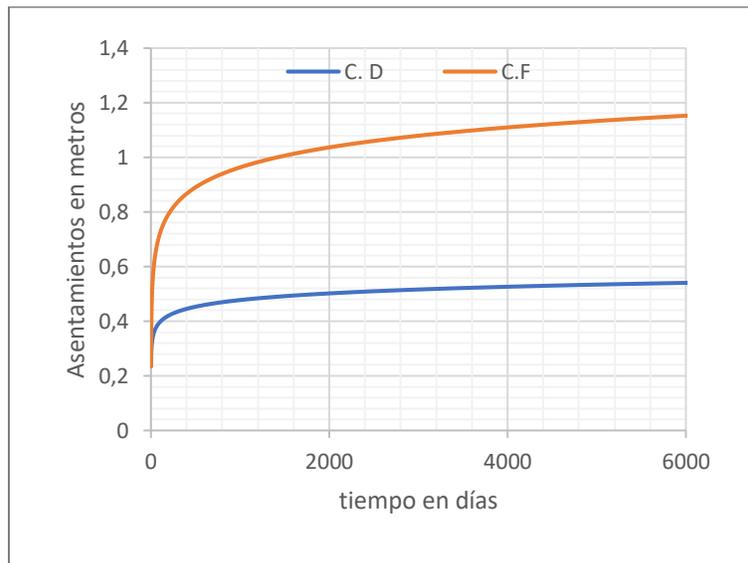
Para el cálculo de consolidación secundaria se acude a la ecuación 6 que incluye el factor de consolidación secundario, para este parámetro se trabaja con dos escenarios posibles teniendo en cuenta la incertidumbre de su magnitud donde se utiliza los dos índices de compresión secundaria ilustrada en el Apéndice 27. En la Figura 16 y Figura 17 se puede observar que existe dos curvas que da un rango de deformaciones una tiene el índice de compresión condición desfavorables CD en función al índice de poros  $C_{\alpha} = 0.03e_o$  y condición favorable CF también depende de la relación de vacíos  $C_{\alpha} = 0.09e_o$ . Para los resultados de asentamientos secundarios están ilustrados en la Tabla 28.

**Figura 16**

*Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

**Figura 17**

*Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de seis paneles solares*



**Tabla 28**

*Valores de asentamientos secundarios de la Figura 18 Y 19*

<b>Asentamientos totales unidad en metros</b>				
<b>Tiempo (Días)</b>	<b>Estructura se cuatro paneles solares</b>		<b>Estructura de seis paneles solares</b>	
	<b>CD</b>	<b>CF</b>	<b>CD</b>	<b>CF</b>
	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>
1	0,01	0,01	0,01	0,01
10	0,15	0,15	0,16	0,33
100	0,38	0,71	0,41	0,73
1000	0,46	0,95	0,49	0,98
3650	0,51	1,08	0,54	1,11
5000	0,52	1,12	0,55	1,15

#### **14. Incidencias de cargas vecinas**

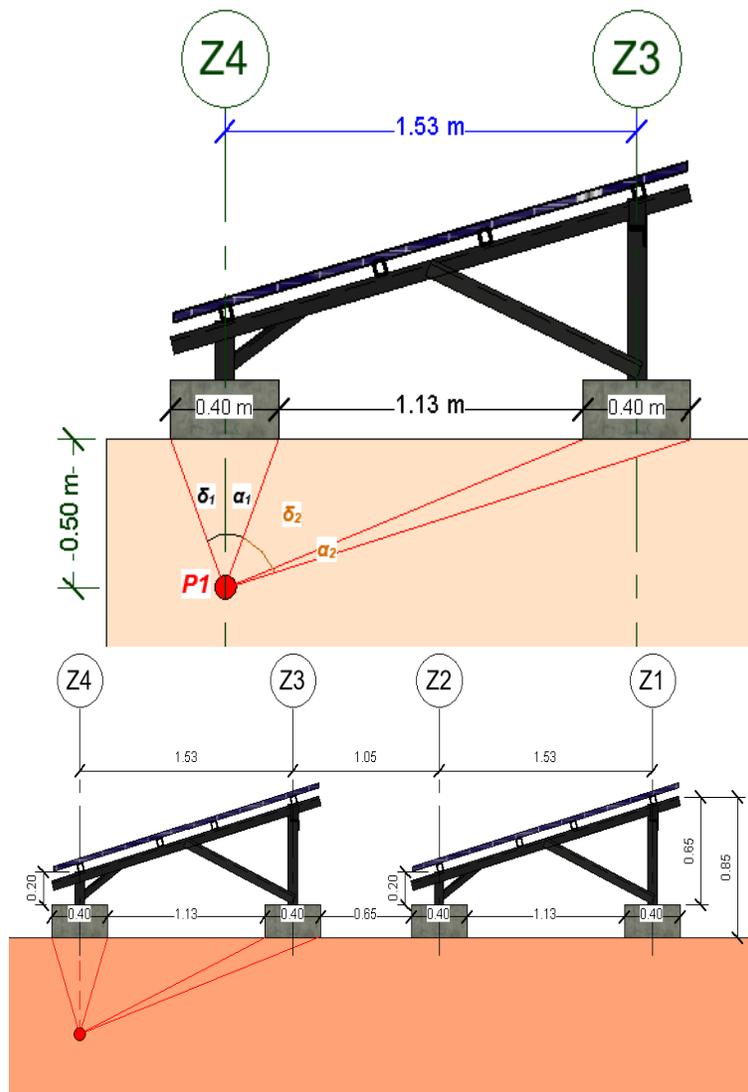
A continuación, se presenta, a través de representaciones gráficas, el resultado de la incidencia de cargas vecinas por medio de la ecuación 11: en la Figura 18 se ilustra perfil lateral de las dos estructuras de soporte de los sistemas fotovoltaicos y los ángulos correspondiente a cargas vecinas para el cálculo de la ecuación ya mencionada; en la Figura 13 y Figura 14 están los nombres y ubicación de las seis zapatas. Cabe recalcar que ambas estructuras poseen las mismas dimensiones de cimientos, solo varían la separación y números de paneles solares que soporta.

De acuerdo con la Figura 18, el punto P1 señala donde se va a evaluar la incidencia de cargas vecinas. Esto depende del cimiento que se analice. El punto de apreciación está centralizado debajo de las zapatas analizadas, las cuales van a ser centrales o esquineras (Figura 19 y 20). Para

el análisis es necesario conocer los valores las fuerzas actuantes que inciden en cada zapata que se encuentran en la Tabla 29 y 30 en donde se tiene en cuenta el resultado de la combinación de cargas 1.2D-Ey+L (Tabla 9 y 10), emitidos por el programa estructural Sap2000.

### Figura 18

*Grafica de asentamientos secundarios para estructura de soporte de seis paneles solares*



A continuación, para hallar los esfuerzos inducidos por las cargas externas se determina la variación de los esfuerzos verticales a diferentes profundidades del suelo utilizado la ecuación 11 del método de Poulos y Davis incluyendo la incidencia de cargas vecinas. Las cargas varían debido a que cada estructura de soporte contiene diferente de combinación de sismo en la Tabla 29 es encuentran los resultados de fuerzas verticales actuante (Apéndice 4) y también en la Tabla 30 (Apéndice 5), luego de estas fuerzas se calcula la sobrecarga incluyendo el peso del cimiento, después se calcula incrementos de esfuerzo con zapatas vecinas que lo rodean la zapata a analizar (Tabla 31 y 32) Para calcular el incremento de esfuerzos a una profundidad  $z$  debajo el área cargada ubicado dentro de estas superficies inclinada.

**Tabla 29**

*Valores de fuerzas actuantes en estructura de soporte de cuatro paneles solares*

Zapata	Fz [kN]	Zapata	Fz [kN]	Zapata	Fz [kN]
Z1-A	0.56	Z1-B	1.03	Z1-C	0,60
Z2-A	0,06	Z2-B	0,10	Z2-C	0,02
Z3-A	0,56	Z3-B	0.26	Z3-C	0.25
Z4-A	0.06	Z4-B	0.10	Z4-C	0,76

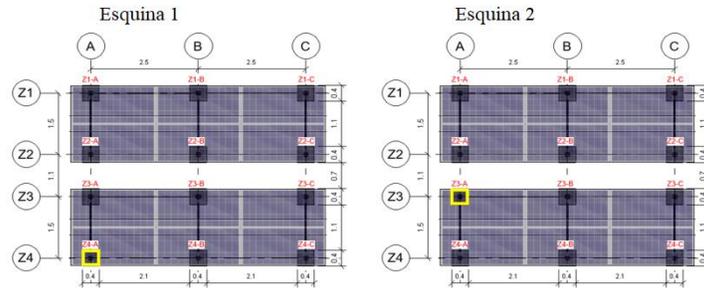
**Tabla 30**

*Valores de fuerzas actuantes en estructura de soporte de seis paneles solares.*

Zapata	Fz [kN]	Zapata	Fz [kN]	Zapata	Fz [kN]
Z1-A	0.68	Z1-B	0.26	Z1-C	0.10
Z2-A	1.53	Z2-B	1.53	Z2-C	1.01
Z3-A	0.68	Z3-B	0.68	Z3-C	0.10
Z4-A	1.53	Z4-B	1.53	Z4-C	1.01

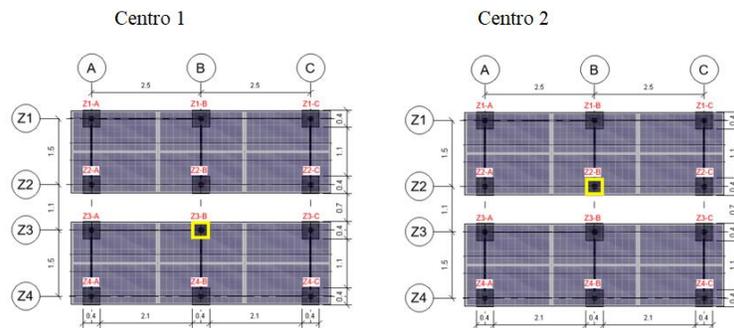
**Figura 19**

*Ilustración de zapatas esquineras a evaluar*



**Figura 20**

*Ilustración de zapatas centrales a evaluar*



**Tabla 31**

*Incidencia de esfuerzo por cargas vecinas para estructura de cuatro paneles solares.*

Profundidad del suelo [m]	Incremento de esfuerzos $\sigma_z$ [kN/m <sup>2</sup> ] en las zapatas			
	Z4-A	Z3-A	Z3-B	Z2-B
0,5	1,3	2,2	2,9	1,7
1,5	1,3	2,3	2,9	3,1
2,5	1,5	2,1	3,1	3,7
3,5	1,5	2,2	2,9	3,5
4,5	1,4	1,9	2,6	3,1

**Tabla 32**

*Incidencia de esfuerzo por cargas vecinas para estructura de seis paneles solares.*

Profundidad de suelo [m]	Incremento de esfuerzos $\sigma_z$ [kN/m <sup>2</sup> ] en las zapatas			
	Z4-A	Z3-A	Z3-B	Z2-B
0,5	3,4	2,4	1,9	3,5
1,5	1,8	2,4	2,9	2,6
2,5	1,7	2,3	3,7	2,9
3,5	1,7	2,7	4,0	3,0
4,5	1,5	2,6	3,8	2,9

### 15. Valores para el cálculo de consolidación método de Hettiarachchi.

Para los asentamientos en vertederos con el método de Hettiarachchi (ecuación 7, 8 y 9), se utilizando los parámetros de comprensibilidad (Apéndice 29) y el grupo de propiedades de los desechos sólidos (Apéndice 28). Las demás constantes de la ecuación 8 que no depende de la biodegradación contiene valores definidos como la gravedad específica de los sólidos de suelo  $G_s=1.75$  (Apéndice 18), la relación de vacíos  $e_o=1.17$  (Tabla 22) y el contenido de humedad es del 15% (Apéndice 25 y 26). La Tabla 33 y Tabla 34 contiene los resultados de asentamientos en unidad de metros que incluye esfuerzo inducido por carga externa y efecto de carga propia que soporta el cimiento (Figura 21).

Los resultados de la Tabla 33 y Tabla 34 están los valores de los asentamientos de cuatro zapatas, las cuales cada una incluye en sus cálculos la diferencia de esfuerzo efectivo  $\delta\sigma'$  por acción de incidencia de cargas vecinas (ver resultados en la Tabla 31 y 32) de cuatros zapatas para

analizar ilustrados en la Figura 19 y Figura 20, a continuación se nombra las zapatas a analizar la primera es la zapata de esquina Z4-A que contiene tres zapatas vecinas (los cimientos Z3-A, Z3-B, Z4-B), la segunda zapata de esquina Z3-A que contiene cinco zapatas vecinas (los cimientos Z2-A, Z2-B, Z3-A, Z4-A y Z4-B), y por último se nombran las zapatas centrales Z3-B y Z2-B que están rodeadas de ocho cimientos vecinos, ilustración de sus asentamientos en unidad de metros en la Figura 21.

**Tabla 33**

*Resultado de asentamientos totales, para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

<b>Asentamientos [metro] de las zapatas</b>				
<b>Días</b>	<b>Z4-A</b>	<b>Z3-A</b>	<b>Z3-B</b>	<b>Z2-B</b>
1	0,07	0,06	0,07	0,07
10	0,07	0,06	0,07	0,07
100	0,07	0,06	0,07	0,07
1000	0,10	0,08	0,10	0,10
3650	0,41	0,40	0,41	0,41
5000	0,71	0,70	0,71	0,71

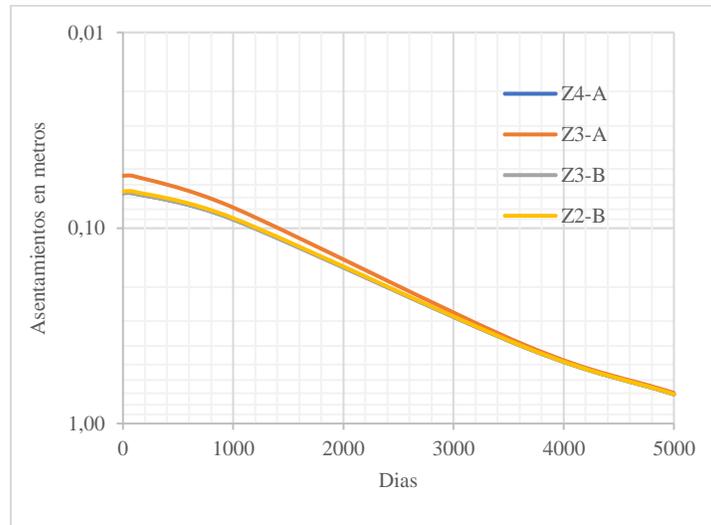
**Tabla 34**

*Resultado de asentamientos totales, para estructura de soporte de cuatro paneles solares*

<b>Asentamientos [metro] de las zapatas</b>				
<b>Días</b>	<b>Z4-A</b>	<b>Z3-A</b>	<b>Z3-B</b>	<b>Z2-B</b>
1	0,07	0,05	0,07	0,06
10	0,07	0,05	0,07	0,06
100	0,07	0,05	0,07	0,07
1000	0,09	0,08	0,09	0,09
3650	0,41	0,40	0,41	0,41
5000	0,71	0,70	0,71	0,71

**Figura 21**

*Grafica de resultados de asentamientos para estructuras de soporte*



## 16. Asentamientos diferenciales

Es la diferencia de asientos entre dos puntos o desestabilización de la cimentación de la estructura a evaluar debido a que el terreno posee diferentes características geotécnicas o por sobrecarga por sobreelevación, se debe tener en cuenta este comportamiento del suelo ya que puede producir daños a las instalaciones fotovoltaicas a futuro. Para el cálculo de los asentamientos diferenciales se restan los resultados de asentamientos de dos zapatas a analizar (valores de los asentamientos por incidencia de cargas vecinas está en la tala 33 y 34), estos cimientos están ilustrados en la Figura 19 donde se muestra un panel solar que comparte dos zapatas nombradas esquinas 1 y 2 (los cimientos Z4-A y Z3-A), y lo mismo sucede con la Figura 20 ilustra dos cimientos nombrados centro 1 y centro 2 (Los cimientos Z3-B y Z2-B). Los resultados de la diferencia de asentamientos están la Tabla 35 y Tabla 36 que los valores no mayores a 14 [mm].

**Tabla 35**

*Diferencia de asentamientos totales entre la zapata de esquina 1 y 2 de la Figura 19*

<b>DIFERENCIA DE ASENTAMIENTOS</b>		
<b>Días</b>	<b>Estructura de cuatro paneles solares [mm]</b>	<b>Estructura de seis paneles solares [mm]</b>
1	14.0	12.3
10	14.0	12.3
100	14.0	12.3
1000	13.5	11.8
3650	12.8	11.2
5000	12.8	11.1

**Tabla 36**

*Diferencia de asentamientos totales entre la zapata de central 1 y 2 de la Figura 20*

<b>DIFERENCIA DE ASENTAMIENTOS</b>		
<b>Días</b>	<b>Estructura de cuatro paneles solares [mm]</b>	<b>Estructura de seis paneles solares [mm]</b>
1	1.0	1.4
10	1.0	1.4
100	1.0	1.4
1000	1.0	1.4
3650	0.9	1.3
5000	0.9	1.3

## 17. Conclusiones

En el proyecto se evaluó la capacidad portante del suelo de soporte a corto y largo plazo en condiciones drenadas para dos tipologías de soporte de paneles, teniendo en cuenta la posible variación de las propiedades de resistencia. Los resultados sugieren que, en el intervalo de tiempo de 10 años, los factores de seguridad son mayores que 3.0, por lo tanto, no se espera un estado de falla general de capacidad.

Para el cálculo de asentamientos totales en las dos configuraciones de soporte analizadas, se calcularon los asentamientos inmediatos, por consolidación primaria y por consolidación secundaria, utilizando coeficientes disponibles en la literatura, con magnitudes de asentamientos inmediatos entre 8.6mm y 10.9mm, por consolidación primaria de 22 y 24.7cm y por consolidación secundaria entre 0.5m y 1.15m. Estos resultados evidencian, la importancia de los asentamientos diferidos en el tiempo y la variabilidad de sus resultados dependiendo de los coeficientes escogidos.

Por otra parte, se utilizó el modelo de cálculo de Hettiarachchi 2005, que permite tener en cuenta la influencia del contenido de materia orgánica y su degradación en el tiempo y adicionalmente, teniendo en cuenta la influencia de las cargas vecinas. Los resultados de los asentamientos totales para este modelo dan como resultado para una ventana de tiempo de 10 años alrededor de 0.70 m. Estos resultados en conjunto con el análisis anterior sugieren que, dentro de esta ventana de tiempo, no se requiere realizar algún proceso de intervención, dado que los procesos de degradación están activos y pueden afectar la configuración de paneles solares. Adicionalmente, ante la variación de los coeficientes se presentan variaciones en el tiempo en términos de los asentamientos diferenciales, llegando incluso a 1.28 cm a los 10 años, con lo cual, es necesario evaluar desde el punto de vista estructural las implicaciones de este fenómeno.

Los resultados sugieren que para la implementación de un parque solar fotovoltaico en la zona de estudio desde el punto de vista geotécnico, es necesario dejar que los procesos de degradación de la materia orgánica se normalice y proceda un cambio de vacío inducido por la pérdida de masa relacionado con la descomposición (Chen, Xu, Ling, Zhan, & Gao , 2019), para esto es importante realizar varios monitoreo de campo en el vertedero sanitario para medir el asentamiento vertical, las deformaciones de refuerzo y las presiones de tierra verticales de RSU reforzado, debido a que este tipo de terreno se diferencian de los suelos convencionales en términos de componentes físicos, formas y tamaños de partículas y propiedades de los suelos de vertederos reforzados pueden variar de los suelos reforzados convencionales, teniendo en cuenta que se consiguen presentar asentamientos  $> 30\text{cm}$  y que adicionalmente, alcanzan a generar asentamientos diferenciales importantes maximizados por la heterogeneidad del depósito.

**Referencias Bibliográficas**

- (Febrero de 2017). Obtenido de [https://www.bucaramanga.gov.co/Inicio/download/PLIEGO\\_CONDICIONES.pdf](https://www.bucaramanga.gov.co/Inicio/download/PLIEGO_CONDICIONES.pdf)
- AGM. (s.f.). *BLOG Tecnosol*. Obtenido de <https://tecnosolab.com/noticias/distancia-entre-filas-de-paneles-solares/>
- AUTO N° 07715. (2018). Autoridad Nacional De Licencias Ambientales.
- Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills*. (2014). USA: Createspace Independent Publishing Platform. Recuperado el [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-03/documents/best\\_practices\\_siting\\_solar\\_photovoltaic\\_final.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-03/documents/best_practices_siting_solar_photovoltaic_final.pdf) de Diciembre de 2020
- Brinch Hansen, J. (1970). Revised and extended formula for bearing capacity,. *Bulletin No. 28*. Obtenido de <http://materias.fi.uba.ar/6408/Brinch%20Hansen%20-%20An%20extended%20formula%20for%20bearing%20capacity.pdf>
- Chen, Y., Xu, W., Ling, D., Zhan, L., & Gao, W. (13 de Noviembre de 2019). A degradation–consolidation model for the stabilization behavior of landfilled municipal solid waste. *EL SEVIER*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103341>
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (Septima edición ed.). (P. L. Rosa, Ed.)
- (2015). *Disposición Final de Residuos Sólidos*. Informe Nacional.
- EJ ATLAS*. (13 de Mayo de 2014). Obtenido de <https://ejatlas.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>

- Florez Acuña, B. L. (2018). *Desarrollar un modelo analítico para predecir los asentamientos, para evaluar la capacidad de un relleno sanitario*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Franco A, L. J., Meza J, M. A., & Almeida, J. E. (25 de Octubre de 2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Situación de la disposición final de residuos sólidos*, 15(1), 180-193. doi:<https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>
- Galvis S, C. Y., & Gomez A, L. (2014). *Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás que se produce en el relleno sanitario "El Carrasco" y su adaptabilidad en un entorno de una microred eléctrica*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías Físio-Mecánica, Bucamanga.
- Guarin Villamizar, O., & Gomez Plata, S. (14 de Agosto de 2013). Caracterización e implementación de un método fisicoquímico para el tratamiento del lixiviado proveniente del relleno sanitario el carrasco. *Innovaciencia Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1, 23. doi:10.15649/2346075X.212
- Guerra Pabón, B. B. (2020). *Caracterización geotécnica de la Cárcava I, antigua Celda I del sitio de disposición final de residuos sólidos "El Carrasco"*. Tesis de grado, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.
- Hettiarachchi, C. H. (2005). *Mechanics of biocell landfill settlements*. Degree of, New Jersey Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Estados Unidos. Obtenido de <https://digitalcommons.njit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1752&context=dissertations>

- HG Ingeniería y Construcciones S.A.S.* (s.f.). Obtenido de <https://www.hgingeneria.com.co/que-es-un-parque-solar/>
- Mora Abril, J. A. (2019). *Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario "El Carrasco, en Bucaramanga"*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Santander, Bucaramanga.
- Moreno P, L. A. (2013). *Metodología de diseño de estabilidad de taludes para rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos*. Tesis de pregrado, Univeridad del Bío-Bío, Departamento de ingeniería civil. Obtenido de [http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1404/1/Moreno\\_Pradena\\_Luis\\_Alfredo.pdf](http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1404/1/Moreno_Pradena_Luis_Alfredo.pdf)
- Municipio de Colombia.* (s.f.). Obtenido de <https://www.municipio.com.co/municipio-bucaramanga.html>
- Parra Saavedra, S. A. (2019). *Uso de tomografía de resistividad eléctrica para la determinación de las direcciones de flujo de la pluma de contaminantes generada en el vertedero "el Carrasco"*. Universidad Industrial de Santander, Departamento de geología, Bucaramanga.
- Pérez Lozano, A. K. (2019). *Pasentía de investigación: ingeniería conceptual para evaluar la instalación de un parque solar fotovoltaico en el sitio de disposición de un parque solar fotovoltaico en el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco*. Tesis de pregrado, Universidad industrial de santander, Escuela Físico Mécania, Bucaramanga.
- Poulos, H., & Davis, E. (1974). *elastic solutions for soil and rock mechanics*. Obtenido de <http://www.usucger.org/PandD/Chapter%203.pdf>
- Quirós Gómez, M. F. (2019). *Análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga*. Tesis de

maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Bucaramanga.

Resolución N°00520. (2018). *Autoridad Nacional De Licencias Ambientales*. Bucaramanga.

Rivera Vásquez, I. (2012). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios*. Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela De Ingeniería En Construcción.

Rondón, J. A., & Torrado, L. M. (s.f.). *Ingeassas*. Obtenido de <https://www.dropbox.com/s/dv7279jroz7e241/CAPACIDAD%20DE%20CARGA.pdf?dl=0>

Tahmoorian, F., & Khabbaz, H. (Enero de 2020). Performance comparison of a MSW settlement prediction model in Tehran landfill. *EL SERVIER*, Vol(254). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109809>

Torrado G, L. M., & Rondón, J. A. (s.f.). *INGEASSAS*. Obtenido de <https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>

Turcumán, M., & Ibañez, J. P. (2013). *Sensibilidad paramétrica de los modelos de Sowers, Meruelo y Gandola*. Informe, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería, San Juan. Obtenido de <http://www.redisa.net/doc/artSim2013/OtrosTemasSobreResiduosSolidos/Sensibilidad%20Modelos%20Sowers,%20Meruelo%20y%20%20Gandola.pdf>

wu, G., Wenjie, X., Xuecheng, B., & Yunmin, C. (2017). A practical approach for calculating the settlement and storage capacity. *EL SEVIER*, 69, 202–214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.048>

Yepes García, J. A. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera*. Tesis de maestría en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.

Yepes García, J. A., & Villarraga Herrera, M. R. (6 de diciembre de 2016). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Redalyc.org*, 24-33. doi:10.15446/rbct.n43.61433

Zhan, T., Ling, W., & Chen, Y. (4 de abril de 2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *ELSEVIER*, 97(3 a 4), 97-111. doi:10.1016/j.enggeo.2007.11.006

znshinesolar. (s.f.). (P. s. ZXP6-LD72, Productor) Obtenido de <https://es.znshinesolar.com/producto/zxp6-ld72/>

## Apéndices

En este proyecto es importante tener en cuenta las cargas de vientos ya que la estructura de soporte de paneles solares debe soportar todo tipo de cargas ambientales para que las instalaciones fotovoltaicas estén es estado óptimo de trabajo y no ocurran daños a futuro, en la pasantía de investigación (Pérez Lozano, 2019) donde calcula los resultados de diseño de presión de viento en El Carrasco donde en el Apéndice 1. Muestra los resultados de carga de viento a presión y succión.

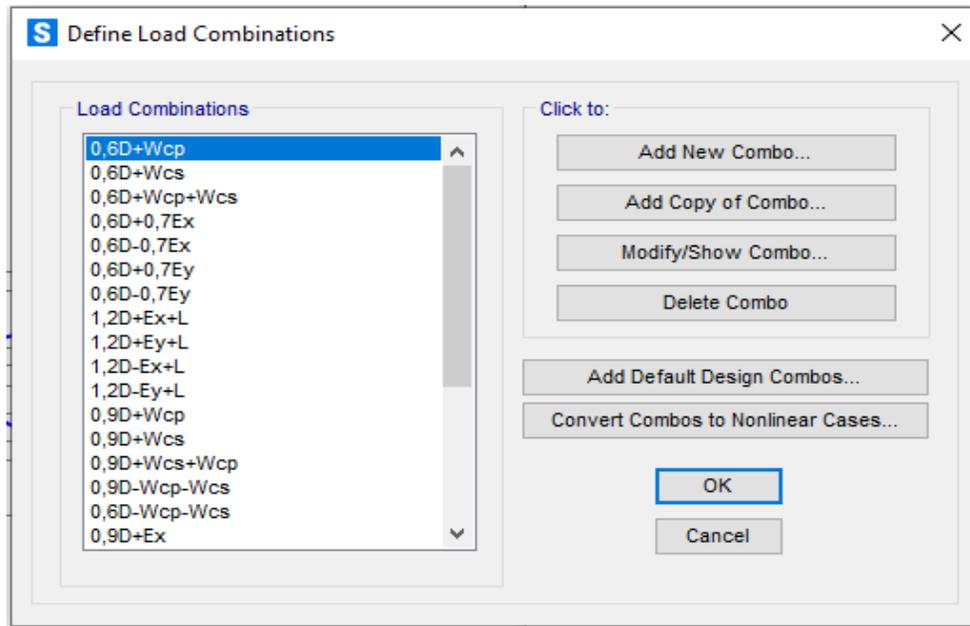
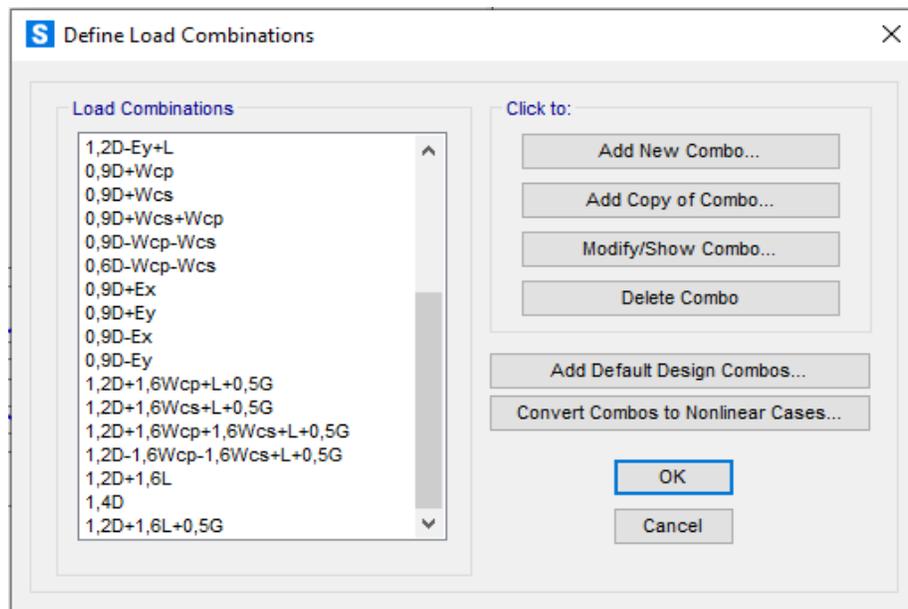
### Apéndice 1

*Presión neta de diseño con las respectivas combinaciones para barlovento y sotavento*

Dirección del viento (ANGULO DE 15°)			
G(Factor de efecto ráfaga)		0,85	
A		0°	180°
pnw	-100,874823	pnw	145,708077
pnl	-145,708077	pnl	179,333018
Cnw	-0,9	Cnw	1,3
Cnl	-1,3	Cnl	1,6
B		0°	180°
pnw	-212,957959	pnw	201,749645

*Nota.* Tabla tomada de pasantía de investigación de Pérez Lozano, 2019, (p. 53)

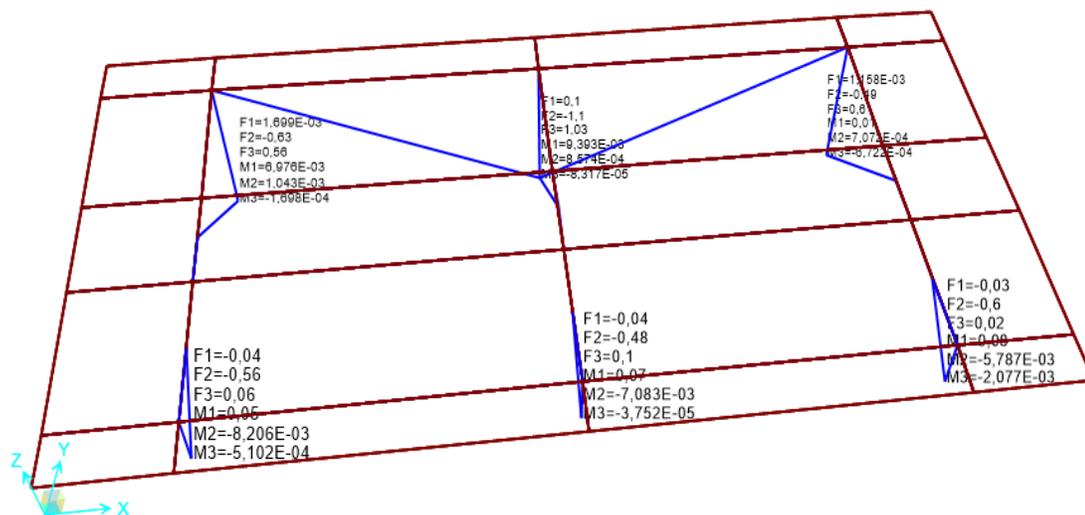
En el Apéndice 2 y 3 son las combinaciones que se utilizaron para modelar la estructura de cuatro y seis paneles, donde: D es la carga muerta, Wcp es la presión del viento, Wcs es la succión del viento, Ex es el sismo en dirección X, Ey es el sismo en dirección Y, L es la carga viva y G es carga de granizo.

**Apéndice 2***Combinaciones de cargas. SAP2000***Apéndice 3***Combinaciones de cargas. SAP2000*

El Apéndice 4 son el resultado de las reacciones de la combinación de carga  $1.2D+Ey+L$  para la estructura de soporte de cuatro paneles solares ya que contiene la reacción máxima de la fuerza en dirección z y el Apéndice 5 contiene los resultados resultado de las reacciones de la combinación de carga  $1.2D-Ey+L$  para la estructura de soporte de seis paneles solares, las fuerzas están en unidad de kN y los momentos están en unidad de kN-m, F1 es fuerza en dirección X, F2 es fuerza en dirección Y, F3 es fuerza en dirección Z, M1 es el momento en dirección X, M2 es el momento en dirección Y, M3 es el momento en dirección Z.

#### Apéndice 4

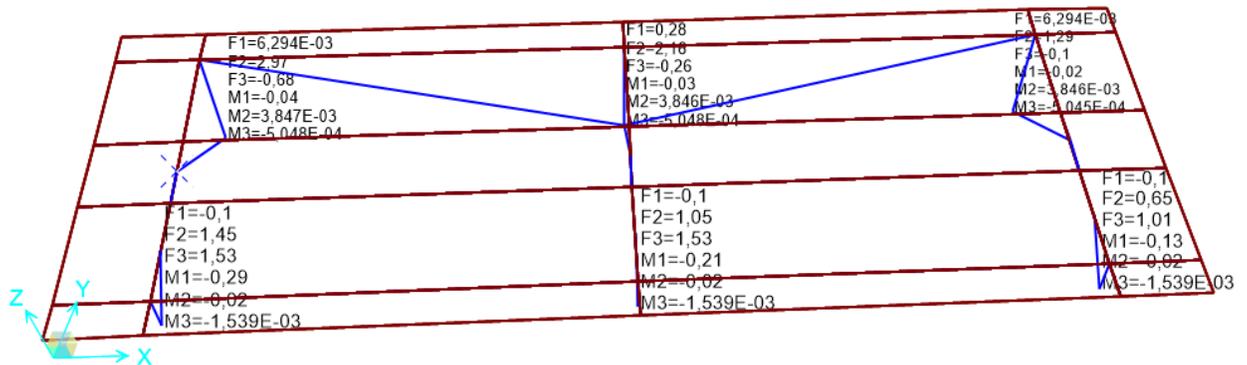
*Resultado de reacciones para la combinación de carga  $1.2D+Ey+L$  de la estructura de soporte de cuatro paneles solares*



*Nota.* Imagen con los valores de reacciones de apoyo de la estructura de soporte de cuatro paneles solares tomada del software estructural Sap2000.

## Apéndice 5

Resultado de reacciones para la combinación de carga 1.2D-Ey+L de la estructura de soporte de seis paneles solares.



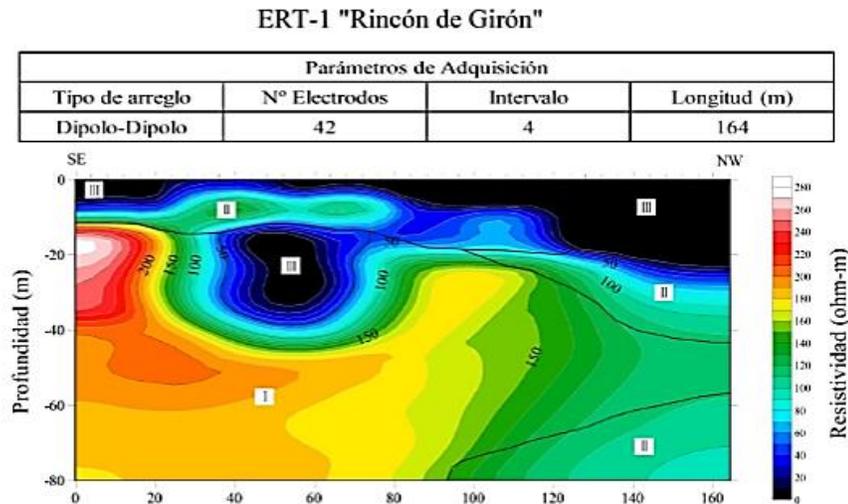
*Nota.* Imagen con los valores de reacciones de apoyo de la estructura de soporte de seis paneles solares tomada del software estructural Sap2000.

De acuerdo con un estudio de tomografía de resistividad eléctrica donde se determinó que le suelo está completamente saturado y que por el carrasco es atravesado por el acuífero de Bucaramanga a 20 metros de profundidad, el siguiente texto es tomado tesis de estudio de tomografía eléctrica (Parra Saavedra, 2019) donde se adquiere la Apéndice 6: "ERT-2 vía porvenir- Anillo Vial. Zona 1: 150-380 ohm-m cuerpo de gravas saturadas a partir de la comparación del modelo invertido y el modelo directo, Zona II, 30-150 ohm-m identificadas como lentes de arenas saturados y zona III ohm-m pueden corresponder a limos saturados o un nivel somero de rocas saturadas en fluidos contaminados

por lixiviados"

## Apéndice 6

*Tomografía de resistividad eléctrica 2D, con la delimitación de las diferentes zonas geo-eléctricas*



*Nota.* Imagen de resultado de tomografía eléctrica tomado de tesis de grado de Parra Saavedra, 2019, (p. 40).

En el Apéndice 7 se promedia valores de los resultados de los parámetros obtenidos por medio de ensayos de corte directo entre otros para tomar un valor realista tomado en campo, estos apiques están ilustrados en Apéndice 25 y 26.

## Apéndice 7

*Parámetros obtenidos de apiques realizados en el carrasco con ensayos de corte directo*

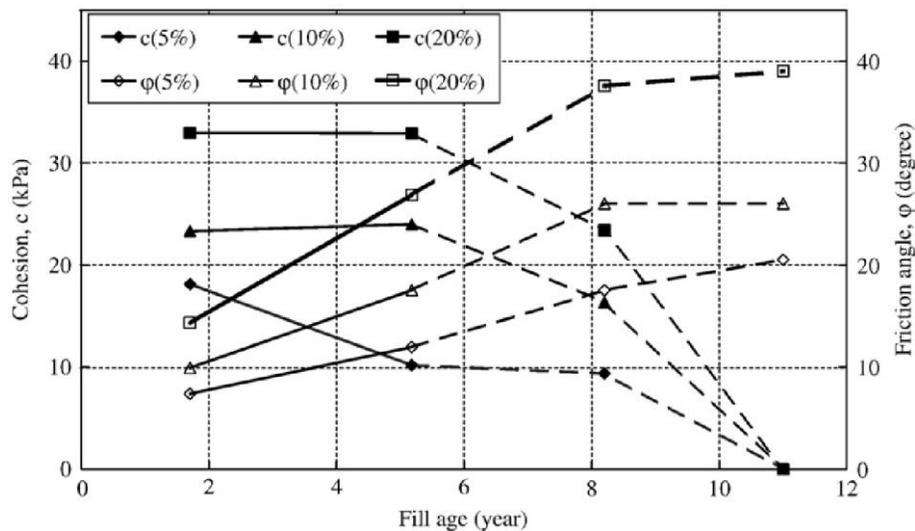
Resultado	Angulo fricción grados	de Cohesión en $\text{kg/cm}^2$	Peso específico $\text{g/cm}^3$	# de página donde está la información
<b>1</b>	30,93	0,39	2,01	60
<b>2</b>	31,32	0,20	1,04	61
<b>3</b>	24,30	0,18	0,97	62
<b>Promedio</b>	28,85	0,26	1,34	

*Nota.* Resultado de valor promedio del ángulo de fricción, Cohesión y peso específico tomado de “análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga” tomado de Quirós Gómez, 2019, (p. 60-62).

En el Apéndice 8 se ilustra los cambios de la cohesión y ángulo de fricción del suelo del vertedero sanitario Suzhou en china, donde se determinaron gracias a un ensayo triaxial con porcentajes del 5%, 10% y 20%.

### Apéndice 8

*Relaciones de los parámetros fuerza de corte movilizada en un rango de deformaciones con la edad de llenado de los RSU*



*Nota.* Relaciones de los parámetros de resistencia al corte movilizados en un rango de deformaciones con la edad de llenado de los RSU tomado de Zhan, Ling, & Chen, 2008 (p. 104)

El Apéndice 9 se ilustra las dimensiones de la cimentación donde "B" y "L" son el largo y ancho de la zapata y "A" es el área. En el Apéndice 10 se ilustra los siguientes factores: "F. S" es el factor de seguridad, "Df" es el nivel de desplante (altura del suelo sobre la cimentación) y por último la pendiente máxima del terreno.

**Apéndice 9***Dimensiones de la cimentación*

<b>B</b>	<b>L</b>	<b>A</b>	<b>Espesor</b>
[m]	[m]		[m]
0,40	0,40	0,16	0,20

**Apéndice 10***Datos del factor de seguridad, nivel de desplante y pendiente del terreno*

<b>B=L</b>	<b>F.S</b>	<b>Df</b>	<b>Pendiente</b>
[m]		[m]	[°]
0,40	3,00	0,00	10,00

En el Apéndice 11 se calcula la carga distribuida de la cimentación donde, "F3" es la reacción vertical a causa de carga excéntrica de sismo y viento, la "carga cimentación" es el peso de la zapata, "Q" es la suma de F3 y carga cimentación, y "q" es la carga distribuida la cual es Q dividida por el área de la cimentación.

**Apéndice 11***Cálculo de la carga distribuida de la cimentación*

<b>Tipo de estructura</b>	<b>F3</b> [kN]	<b>Carga cimentación</b> [kN]	<b>Q</b> [kN]	<b>q</b> [kPa]
4 paneles solares	1,030	0,77	1,800	11,250
6 paneles solares	1,540	0,77	2,310	14,438

Para el cálculo de la capacidad portante del método de Hansen incluye el factor de inclinación del terreno, factor de forma y profundidad, factores de inclinación, factores de inclinación de superficie y base. Los resultados de estas ecuaciones están en los Apéndices del 12 al 19.

### Apéndice 12

*Resultado de factores de capacidad portante*

Tipo de estructura	Nc	Nq	N $\gamma$
4 paneles solares	27,54	16,17	12,54
6 paneles solares	27,54	16,17	12,54

### Apéndice 13

*Resultado de k y de la sobre carga  $q = \gamma * D_f * \cos(\beta)$  de Brinch Hansen, 1970*

B [m]	K	D <sub>f</sub> [m]	B [°]	Sobre carga (q)
0,40	0,00	0,00	0	0,00

### Apéndice 14

*Resultado de factores de profundidad*

Tipo de estructura	dc	dq	dy
4 paneles solares	1,00	1,00	1,00
6 paneles solares	1,00	1,00	1,00

**Apéndice 15***Resultado de factores de forma*

Tipo de estructura	Sc	Sq	S $\gamma$
4 paneles solares	1,59	1,55	0,6
6 paneles solares	1,59	1,55	0,6

En el Apéndice 16, el coeficiente "H" es la fuerza horizontal que ejerce el nivel de desplante Df, pero como la cimentación no posee Df entonces no existe fuerza horizontal generada por terreno inclinado, sin embargo, se sustituirá por la fuerza horizontal generada por sismo o viento.

**Apéndice 16***Cálculo de fuerzas vertical y horizontales*

Tipo de estructura	B	H	V
	[°]	[kN]	[kN]
4 paneles solares	0	1,90	11,25
6 paneles solares	0	3,85	14,44

**Apéndice 17***Resultados de factor de inclinación*

Tipo de estructura	ic	iq	i $\gamma$
4 paneles solares	0,76	0,77	0,69
6 paneles solares	0,61	0,63	0,52

**Apéndice 18***Resultado de factor de inclinación de superficie*

Tipo de estructura	gc	Gq	g $\gamma$
4 paneles solares	1,00	1,00	1,00
6 paneles solares	1,00	1,00	1,00

**Apéndice 19***Resultado de factor de inclinación de base inclinada*

Tipo de estructura	bc	Bq	b $\gamma$
4 paneles solares	0,93	0,000016	0,000000
6 paneles solares	0,93	0,000016	0,000000

**Apéndice 20***Resultado de capacidad portante*

Tipo de estructura	qu [kPa]	F.S	qadm [kPa]	q [kPa]	Conclusión del suelo
4 paneles solares	797,188	3,00	265,73	11,25	Soporta la estructura
6 paneles solares	640,725	3,00	213,57	14,43	Soporta la estructura

En los Apéndices 21 y 22 están la variación de los factores de capacidad de carga según la ecuación capacidad portante del método de Hansen en un lapso de 11 años.

**Apéndice 21**

*Resultados de factores de capacidad de carga con el paso de los años para estructura de cuatro paneles solares*

<b>Factores de capacidad de carga</b>	<b>A la fecha</b>	<b>5° año variación</b>	<b>8° año variación</b>	<b>11° año variación</b>
<b>Nc</b>	27,54	52,28	123,05	123,05
<b>Nq</b>	16,17	39,47	121,16	121,16
<b>N<math>\gamma</math></b>	12,54	42,47	176,00	176,00
<b>Sc</b>	1,59	1,76	1,98	1,98
<b>Sq</b>	1,55	1,74	1,98	1,98
<b>S<math>\gamma</math></b>	0,60	0,60	0,60	0,60
<b>Dc</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Dq</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>D<math>\gamma</math></b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Ic</b>	0,76	0,74	0,71	0,65
<b>Iq</b>	0,77	0,75	0,71	0,66
<b>I<math>\gamma</math></b>	0,69	0,67	0,61	0,55
<b>Gc</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Gq</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>G<math>\gamma</math></b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Bc</b>	0,93	0,93	0,93	0,93
<b>Bq</b>	0,000016	0,000000	0,000000	0,000000
<b>B<math>\gamma</math></b>	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

**Apéndice 22**

*Resultados de factores de capacidad de carga con el paso de los años para estructura de seis paneles solares*

<b>Factores de capacidad de carga</b>	<b>A la fecha</b>	<b>5° año variación</b>	<b>8° año variación</b>	<b>11° año variación</b>
<b>Nc</b>	27,54	52,28	123,05	123,05
<b>Nq</b>	16,17	39,47	121,16	121,16
<b>N<math>\gamma</math></b>	12,54	42,47	176,00	176,00
<b>Sc</b>	1,59	1,76	1,98	1,98
<b>Sq</b>	1,55	1,74	1,98	1,98
<b>S<math>\gamma</math></b>	0,60	0,60	0,60	0,60
<b>Dc</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Dq</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>D<math>\gamma</math></b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Ic</b>	0,61	0,60	0,56	0,50
<b>Iq</b>	0,63	0,61	0,56	0,50
<b>I<math>\gamma</math></b>	0,52	0,49	0,43	0,37
<b>Gc</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Gq</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>G<math>\gamma</math></b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Bc</b>	0,93	0,93	0,93	0,93
<b>Bq</b>	0,000016	0,000000	0,000000	0,000000
<b>B<math>\gamma</math></b>	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Para el cálculo de relación de vacíos se utiliza el Apéndice 23 donde están los valores de densidad relativa de los sólidos  $G_s$  típicos de los vertederos sanitarios, para luego encontrar el valor promedio del valor máximo y mínimo en el Apéndice 24, en el Apéndice 25 se encuentra ilustrada los apiques que se tomaron como muestra de acuerdo con un estudio de análisis geofísico para ilustrar sus resultados en el Apéndice 26 donde se puede analizar que el contenido de humedad aproximado es del 15%.

### Apéndice 23

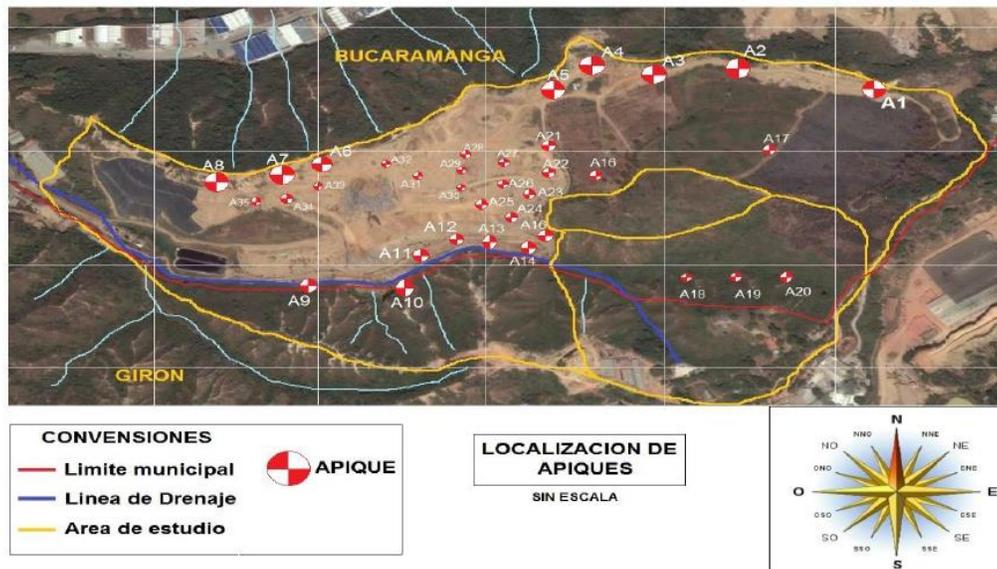
#### *Definiciones básicas y relaciones de fase para medios porosos para rellenos sanitarios*

Parámetro y símbolo	Definición	Ecuación	Valores Típicos	Referencia
Densidad relativa de los sólidos, $G_s$	Densidad de sólidos / densidad del agua	$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	1.03 – 1.75	Silva & García (2001) Reddy, Hettiarachchi, Gangathulasi, & Bogner (2011) Zhan, Zhan, Lin, Luo, & Chen (2014)
			1.09 – 2.47	
			1.73 – 1.95	
Relación de vacíos, $e$	volumen de vacíos / volumen de sólidos	$e = \frac{V_v}{V_s}$	1.0 – 13.0	Zhan et al. (2014)
Porosidad, $n$	volumen de vacíos / volumen total	$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{e}{(1 + e)}$	47 – 58%	Zornberg, Jernigan, Sanglerat, & Cooley (1999) Beaven (2000)
			30 – 64%	
Volumen específico, $v$	volumen total / volumen de sólidos	$v = \frac{V_t}{V_s} = (1 + e)$ $= \frac{1}{(1 - n)}$		
Porosidad drenable o efectiva, $n_e$	volumen de agua drenable / volumen total	$n_e = \frac{V_{w-d}}{V_t}$	3 – 10%	Oweis, Smith, Ellwood, & Greene (1990) Knox (1992) citado por Beaven et al. (2008) Zornberg et al. (1999) Beaven (2000)
			10 – 20%	
			5 – 15%	
			2 – 25%	
Contenido gravimétrico de agua, $w$	masa del agua / masa de sólidos	$w = \frac{M_w}{M_s}$	15 – 40%	Tchobanoglous, Vigil, & Theisen (1994) Reddy, Hettiarachchi, Parakalla, Gangathulasi, & Bogner (2009) Stoltz, Gourc, & Oxarango (2010) Reddy et al. (2011)
			44 – 100%	
			23 – 130%	
			54 – 84%	

*Nota.* Modelo para estimar asentamientos en el relleno, tomado de *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera* de Yepes García, 2015, (p. 45).

**Apéndice 24***Valor del peso específico sólido*

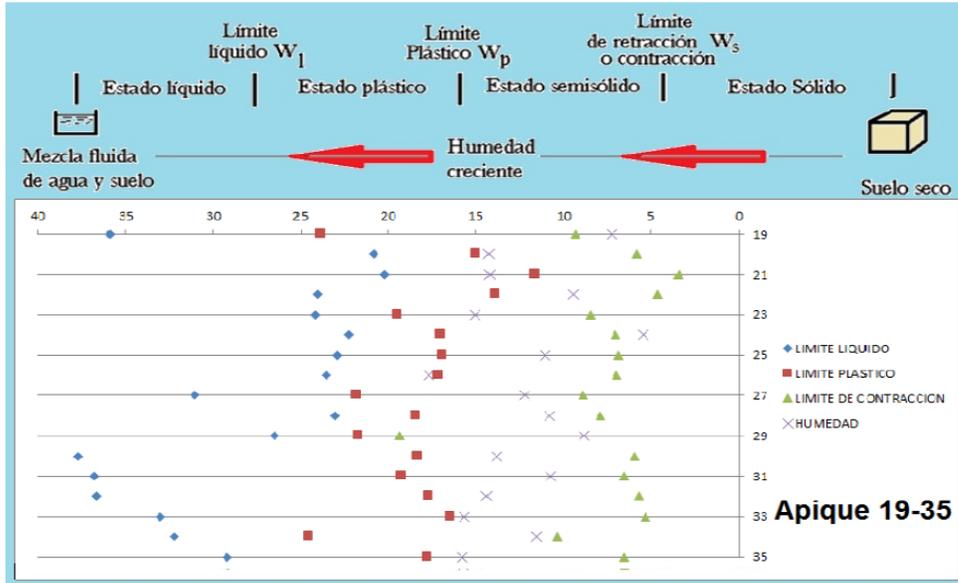
<b>Valor min</b>	1,03
<b>Valor máx.</b>	2,47
<b>promedio</b>	1,75

*Nota.* Datos tomados del Apéndice 25**Apéndice 25***Localización de apiques en El Carrasco*

*Nota.* Localización de sondeos y ensayos SPT realizados en El Carrasco tomado de Quirós Gómez, 2019, (p. 66).

**Apéndice 26**

*Límites de humedad, límite plástico y contenido de humedad*

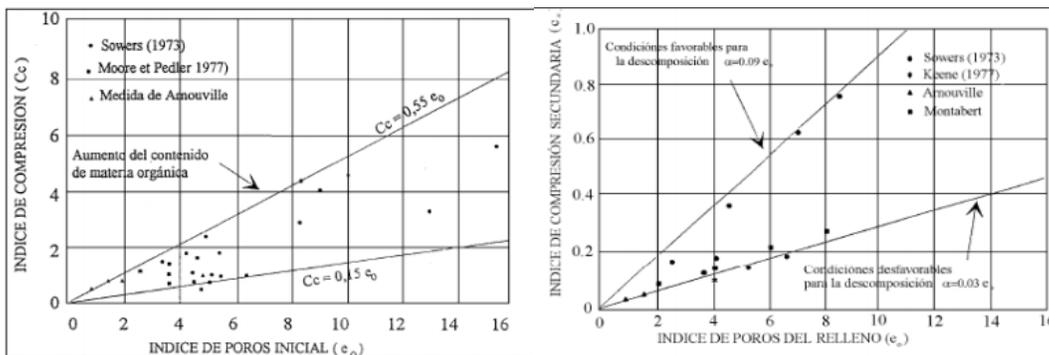


*Nota.* Estado del suelo (Límites de consistencia de los suelos) en El Carrasco tomado de Quirós Gómez, 2019, (p. 57).

Cuadro de la obtención de la compresión primaria  $C_c$  está en función de la relación de vacíos y el coeficiente de compresión secundaria  $C_\alpha$  también se encuentra en función de índice de poros ilustrado en el Apéndice 27.

**Apéndice 27**

*Grafica de índices de compresión en vertederos sanitarios*



*Nota.* Grafica de índices de compresión primaria y secundaria en vertederos sanitarios, tomado de Moreno P, 2013, (p. 47)

Para el cálculo de asentamientos por factores de degradación de residuos sólidos urbanos con la fórmula en ecuación 7 y 8 se utiliza las propiedades de los desechos sólidos de Tettiarachchi 2005 (Apéndice 28) y parámetros de compresibilidad (Apéndice 29) los tiempos de degradación de los cuatros grupos (Fig. 3).

### Apéndice 28

*Grupo de propiedades de los desechos solidos*

Group	Non-degradable waste (1)	Slow degradable waste (2)	Moderately Degradable waste (3)	Highly degradable waste (4)
Initial fraction ( $f_s$ )	0.35	0.25	0.25	0.15
Specific gravity ( $G_s$ )	3.0	2.0	1.2	1.0
Decay constant ( $\lambda$ , 1/days)	0.0	0.00001	0.0001	0.001

*Nota.* Tettiarachchi 2005.

### Apéndice 29

*Parámetros de compresibilidad*

Time (days)	Compression ratio ( $C_c^*$ )	Swelling ratio ( $C_s^*$ )
$< 2 \times 10^2$	0.205	0.069
$2 \times 10^2 - 2 \times 10^3$	0.184	0.067
$2 \times 10^3 - 2 \times 10^4$	0.174	0.064
$> 2 \times 10^4$	0.163	0.043

*Nota.* Tettiarachchi 2005.