The cover features a decorative graphic consisting of several overlapping circles in various shades of blue, arranged in a descending staircase pattern from the top right towards the bottom right. Two thin, light blue lines intersect to form a large 'V' shape that frames the central text.

**Análisis de la Compresibilidad  
de Residuos Sólidos Urbanos  
en Rellenos Sanitarios.  
Modelos Teóricos y su  
aplicación a la Región de Cuyo**

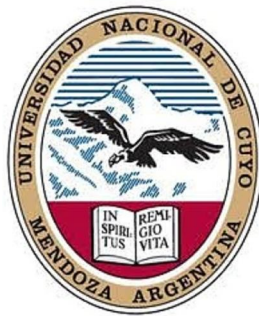
**María H. Turcumán**

**Año 2013**

# **Universidad Nacional de Cuyo**

Facultad de Ingeniería

## **Maestría en Ingeniería Ambiental**



TESIS DE MAESTRÍA

### **ANÁLISIS DE LA COMPRESIBILIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN RELLENOS SANITARIOS. MODELOS TEÓRICOS Y SU APLICACIÓN A LA REGIÓN DE CUYO**

**Autor: María Hortencia Turcumán**

**Director: Dr. Ing. Juan Pablo Ibañez**

**Codirector: Dr. Ing. Jorge Barón**

**Año 2013**

## **RESUMEN**

---

Los rellenos sanitarios son instalaciones físicas realizadas en el subsuelo, preparadas para contener los rechazos provenientes de los residuos sólidos urbanos (RSU), constituyendo de esta forma obras de ingeniería geotécnica diseñadas para reducir el impacto sobre el ambiente y la salud pública. Durante su construcción y después de su clausura, los rellenos sanitarios sufren asientos debido a procesos de consolidación que pueden extenderse en el tiempo. Investigaciones basadas en la Geotecnia Ambiental abordan el estudio de la estabilidad de los rellenos sanitarios, asimilando al RSU compactado como material geotécnico para el análisis de su compresibilidad. Interesa en especial obtener, mediante modelos matemáticos, una estimación de la magnitud y el tiempo asociado a los asientos a corto y largo plazo que sufrirán los mismos, como respuesta a procesos físicos, químicos y biológicos. Esta correcta estimación permitirá realizar un mejor diseño de la obra del relleno sanitario, aumentando así su vida útil.

En el presente trabajo se estudia el caso del llenado del relleno sanitario de Rivadavia, en la Provincia de San Juan. Inicialmente, son analizados propiedades e índices utilizados en la caracterización geotécnica de los residuos sólidos urbanos en general, con el objetivo de evaluar la caracterización de los RSU en la región de Cuyo. Además, se profundiza el estudio de la compresibilidad de los RSU dispuestos en rellenos sanitarios, y los mecanismos físicos y biológicos de la compresión primaria y secundaria desarrollados en la masa de residuo. A partir de este estudio, se presentan modelos teóricos de compresibilidad, y se evalúa su capacidad predictiva de asientos contrastando con datos medidos en rellenos sanitarios.

Para concluir el trabajo, se aplican algunos modelos al caso del relleno sanitario de Rivadavia-SJ, realizando un ajuste de estos modelos en base al histórico de llenado del relleno para una celda específica del mismo. También se realizan predicciones de asientos a futuro y se obtienen conclusiones sobre el tema.

A Jose, mi dulce compañero de vida  
A mi Padre, que me enseñó el amor por el conocimiento  
A mi Madre, que con tanto esfuerzo me apoyó siempre  
A mi otra Madre, mi tía Salima, que es la persona que más creyó en mí  
A mi Hermano Eduardo, con el que comparto esta pasión  
A mis otros Hermanos, Karime, Gordeli, Ivana  
A mis Alumnos de siempre  
Y muy especialmente va dedicado a mis sobrinos Paula, Facundo, Fátima, Karim y Naim

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a mi Director de Tesis, Dr. Juan Pablo Ibañez, que creyó en este tema y se embarcó en este proyecto. Quiero expresar mi respeto al profesional y su persona, por su calidez, sencillez y por haber estado siempre presente.

A mi Codirector, Dr. Jorge Barón, a quien acudí y siempre tuve una respuesta.

A la Maestría en Ingeniería Ambiental, todo su personal docente y administrativos, quienes me recibieron y me dieron mucho aliento para continuar.

A mi Profesor Dr. Marcel Szanto, quien me despertó el interés y me pidió que nunca abandone el tema de la compresibilidad de los residuos.

A mi Profesor Ing. Juan Manuel Fiore, que a su lado aprendí sobre la mecánica de suelos.

Al Instituto de Materiales y Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNSJ, mi casa.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.

A mis compañeros en el Instituto de Materiales y Suelos, docentes y no docentes.

A Cristi y mi familia toda.

A la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.

A mi amiga Ana Ghislane, mi eterna gratitud por su generosidad en compartir conmigo sus conocimientos de los residuos.

A mis amigos, por apoyarme siempre y escucharme, por el cariño.

## ÍNDICE

<i>RESUMEN</i> .....	3
<b>CAPÍTULO I</b> .....	13
<i>I. INTRODUCCIÓN</i> .....	14
I.1.    GENERALIDADES.....	14
I.2.    ANTECEDENTES.....	16
I.3.    OBJETIVOS.....	18
I.3.1.    Generales .....	18
I.3.2.    Específicos.....	18
I.4.    CONTEXTO REGIONAL.....	19
<b>CAPÍTULO II</b> .....	30
<i>II. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS RSU</i> .....	31
II.1.    RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	31
II.1.1.    Introducción .....	31
II.1.2.    Clasificación y composición de los RSU.....	32
II.2.    RELLENOS SANITARIOS .....	35
II.3.    PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RSU.....	36
II.3.1.    Peso Específico .....	37
II.3.2.    Contenido de Humedad .....	40
II.3.3.    Granulometría .....	43
II.3.4.    Permeabilidad .....	44
II.3.5.    Temperatura .....	44
II.4.    COMPRESIBILIDAD .....	45
II.4.1.    Generalidades.....	45
II.4.1.1.    Mecanismos de Compresión.....	46
II.4.2.    Mecánico .....	46
II.4.2.1.    Ravelling.....	48
II.4.2.2.    Bioquímicos .....	48
II.4.3.    Factores que afectan los mecanismos de asentamiento .....	49

<b>CAPÍTULO III</b> .....	51
<i>III. MODELOS TEÓRICOS DE COMPRESIBILIDAD</i> .....	52
III.1.    INTRODUCCIÓN .....	52
III.2.    MODELO DE SOWERS (1973).....	53
III.3.    MODELO DE YEN & SCALON (1975) .....	58
III.4.    MODELO DE GANDOLA (1994).....	60
III.5.    MODELO MERUELO (1995).....	62
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	65
<i>IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE COMPRESIBILIDAD</i> .....	66
IV.1.    INTRODUCCIÓN .....	66
IV.2.    ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	66
IV.2.1.    Modelo de Sowers .....	66
IV.2.1.1. Análisis de la Consolidación Primaria.....	68
IV.2.1.2. Análisis de la Consolidación Secundaria.....	73
IV.2.2.    Modelo Meruelo .....	77
IV.2.3.    Modelo Gandola.....	82
IV.3.    ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS .....	87
<b>CAPÍTULO V</b> .....	91
<i>V. AJUSTE Y PROYECCIÓN DE ASENTAMIENTOS</i> .....	92
V.1.    INTRODUCCIÓN .....	92
V.2.    ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO DE SOWERS .....	92
V.3.    ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO MERUELO.....	105
V.4.    ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO GANDOLA.....	111
V.5.    COMPARACIÓN DE LOS MODELO DE SOWERS Y MERUELO .....	113
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	115
<i>VI. ESTIMACIÓN DE ASENTAMIENTOS DEL RELLENO SANITARIO DE RIVADAVIA. SAN JUAN</i> .....	116
VI.1.    INTRODUCCIÓN .....	116
VI.2.    ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS .....	116

VI.3.	DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO.....	118
VI.3.1.	Relleno Sanitario de Rivadavia. Análisis de los parámetros.....	120
VI.4.	MODELIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO .....	137
VI.4.1.	Modelo de Sowers .....	137
VI.4.2.	Modelo Meruelo .....	152
VI.4.3.	Comparación de los modelos.....	158
<b>CAPÍTULO VII</b>	.....	<b>160</b>
<i>VII. CONCLUSIONES</i>	.....	<i>161</i>
<b>CAPÍTULO VIII</b>	.....	<b>165</b>
<i>VIII. BIBLIOGRAFÍA</i>	.....	<i>166</i>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1 .....	38
Tabla II.2 .....	42
Tabla III.1 .....	61
Tabla IV.1.....	68
Tabla IV.2.....	69
Tabla IV.3.....	71
Tabla IV.4.....	72
Tabla IV.5.....	72
Tabla IV.6.....	73
Tabla IV.7.....	75
Tabla IV.8.....	77
Tabla IV.9.....	79
Tabla IV.10.....	82
Tabla IV.11.....	83
Tabla IV.12.....	85
Tabla V.1.....	93
Tabla V.2.....	95
Tabla V.3.....	96
Tabla V.4.....	97
Tabla V.5.....	98
Tabla V.6.....	100
Tabla V.7.....	101
Tabla V.8.....	103
Tabla V.9.....	106
Tabla V.10.....	108
Tabla V.11.....	110
Tabla V.12.....	111
Tabla VI.1.....	117
Tabla VI.2.....	118

Tabla VI.3.....	119
Tabla VI.4.....	121
Tabla VI.5.....	123
Tabla VI.6.....	124
Tabla VI.7.....	124
Tabla VI.8.....	127
Tabla VI.9.....	132
Tabla VI.10.....	133
Tabla VI.11.....	138
Tabla VI.12.....	141
Tabla VI.13.....	142
Tabla VI.14.....	142
Tabla VI.15.....	143
Tabla VI.16.....	144
Tabla VI.17.....	145
Tabla VI.18.....	146
Tabla VI.19.....	147
Tabla VI.20.....	148
Tabla VI.21.....	151
Tabla VI.22.....	153
Tabla VI.23.....	154
Tabla VI.24.....	155
Tabla VI.25.....	156

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura I.1</b> Ubicación Vertedero en el Departamento de Rivadavia.....	24
<b>Figura I.2</b> Imagen satelital de los sitios de disposición final seleccionados para las Zonas 1, 2, 3, 4 y 5. (Imágenes obtenidas de Google Earth – Elaboración PEGIRSU).....	25
<b>Figura I.3</b> Imagen satelital de los sitios de disposición final seleccionados para las Zonas 6, 7 y 9. (Imágenes obtenidas de Google Earth - Elaboración PEGIRSU) ...	25
<b>Figura I.4</b> Imagen satelital de todos los sitios de disposición final. (Imágenes obtenidas de Google Earth - Elaboración PEGIRSU) .....	26
<b>Figura I.5</b> Esquema de la Planta de Separación. (Elaboración PEGIRSU).....	26
<b>Figura I.6</b> Vista antes de la remediación del Vertedero.....	27
<b>Figura I.7</b> Vista de la futura Planta de Separación.....	28
<b>Figura I.8</b> Vista de la construcción de la base de impermeabilización del fondo del actual Relleno Sanitario .....	28
<b>Figura I.9</b> Vista del actual Relleno Sanitario .....	29
<b>Figura I.10</b> Vista del Vertedero Incontrolado remediado .....	29
<b>Figura II.1</b> Distribución típica del tamaño de los componentes encontrados en los RSU domésticos. Tchobanoglous et al (1994).....	43
<b>Figura III.1</b> Parámetros de compresibilidad para rellenos sanitarios (Sowers, 1973) .....	55
<b>Figura IV.1</b> Valores de asientos para variaciones de $C_c$ .....	69
<b>Figura IV.2</b> Valores de asientos para variaciones de $\sigma_{vo}$ .....	70
<b>Figura IV.3</b> Valores de asientos para variaciones de $\Delta\sigma_{vo}$ .....	71
<b>Figura IV.4</b> Valores de Asientos – Presión Vertical para variaciones de $\sigma_{vo}$ y $\Delta\sigma_{vo}$ .....	72
<b>Figura IV.5</b> Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de $e_o$ .....	74
<b>Figura IV.6</b> Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de $C_\alpha$ .....	76

<b>Figura IV.7</b> Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de $K_h$ .....	79
<b>Figura IV.8</b> Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de $\alpha.COD$ .....	81
<b>Figura IV.9</b> Gráficas Asientos – Tiempo .....	84
<b>Figura IV.10</b> Gráficas Asientos Normalizados – Tiempo .....	86
<b>Figura V.1</b> Valores medidos de asiento para el Punto 12 .....	99
<b>Figura V.2</b> Valores medidos y estimados. Tramo de coincidencia .....	102
<b>Figura V.3</b> Valores medidos y estimados. Tramo de Proyección .....	103
<b>Figura V.4</b> Valores de asientos medidos y calculados. Tramo de coincidencia....	107
<b>Figura V.5</b> Valores medidos y estimados. Tramo de Proyección .....	109
<b>Figura V.6</b> Valores medidos y teóricos .....	112
<b>Figura V.7</b> Asientos obtenidos a través de los modelos de Sowers y Meruelo....	113
<b>Figura VI.1</b> Secuencias constructivas de las celdas en las diferentes etapas en el módulo del relleno sanitario. Imagen PEGIRSU .....	130
<b>Figura VI.2</b> Perfil del Relleno Sanitario – Corte A-A. Imagen PEGIRSU .....	134
<b>Figura VI.3</b> Perfil del Relleno Sanitario – Corte B-B. Imagen PEGIRSU .....	135
<b>Figura VI.4</b> Gráfica Asientos - Tiempo de cada celda C8 en los 3 pisos .....	150
<b>Figura VI.5</b> Gráfica Asientos - Tiempo Total para las celdas C8 .....	152
<b>Figura VI.6</b> Gráfica Asientos - Tiempo de cada celda C8 .....	156
<b>Figura VI.7</b> Gráfica Asientos - Tiempo Total para las celdas C8 .....	157
<b>Figura VI.8</b> Gráfica Asientos - Tiempo para las celdas C8. Sowers y Meruelo....	158

# CAPÍTULO I



## INTRODUCCIÓN

## I. INTRODUCCIÓN

---

### I.1. GENERALIDADES

El problema de eliminar los residuos sólidos producidos por el hombre, viene de tiempos remotos cuando estos se congregaban en tribus y aldeas. La forma de eliminarlos era tirándolos en las calles, en los cursos de agua y terrenos desocupados. Esto trajo como consecuencia, la proliferación de vectores que originaron las grandes plagas como la peste bubónica, la muerte negra, las epidemias, etc. Como consecuencia de estas enfermedades, por ejemplo en el siglo XIV casi la mitad de la población europea murió. *Referencia: Tchobannoglous et al (1994).*

A partir del siglo XIX y durante el siglo XX, la evolución y el aumento vertiginoso de la población alrededor de las grandes urbes debido a un fuerte crecimiento de la industria, hicieron que los residuos también crecieran en forma exponencial. Esto provocó la necesidad de buscar nuevas maneras de eliminar la basura evitando riesgos para las comunidades. A partir de la década del 40 en los Estados Unidos y una década antes en Inglaterra, se comenzaron a utilizar los rellenos sanitarios ó también llamados vertederos controlados como una forma de gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU), donde la ciudad de Nueva York y la ciudad de California fueron las pioneras en el método del vertido controlado sanitario para grandes urbes.

Después de la segunda guerra mundial, este método de deposición de los residuos sólidos se propagó sistemáticamente en el resto de los países del mundo. A partir de entonces, la generalización del uso de los rellenos sanitarios ha llevado a la realización de numerosas investigaciones relacionadas con la mejora de las técnicas de empleo, como la impermeabilización, la compactación y trituración de la basura, el drenaje de los lixiviados, la eliminación de gases, etc. Pero aún quedan muchos aspectos por resolver con lo cual se

siguen realizando grandes investigaciones en torno al tema. En nuestro país, y especialmente en nuestra región, son escasos los antecedentes sobre investigaciones en esta área.

Actualmente, los países más desarrollados están intentando restringir al máximo el uso de los rellenos sanitarios, tratando de emplear nuevas técnicas de vertido, como la incineración, el compostaje y reciclaje que se usan como técnicas complementarias en algunos casos; pero siempre existe un residuo final que va a un relleno sanitario, por lo menos un 50% de los residuos sólidos. En los países en vía de desarrollo es todavía incipiente el empleo de estos rellenos sanitarios ó también llamados vertederos controlados, usándose los vertederos incontrolados sin impermeabilización, sin tratamiento de lixiviados ni eliminación de gases. Pero podríamos decir que existe hoy en estos países una mayor preocupación por los problemas ambientales, con lo cual paulatinamente se está revirtiendo esta situación.

Frente a este nuevo compromiso ambiental, las grandes ciudades, deben afrontar el problema de la escasez de terrenos disponibles con las condiciones aptas para la construcción de un relleno sanitario; condiciones geológicas, geotécnicas, hidrológicas, sociales, económicas, etc. Por este motivo cada vez son más proyectados los rellenos sanitarios en altura, que son verdaderas montañas de basura que llegan algunos hasta los 100m. En estos rellenos, con proyectos más complejos y rigurosos desde el punto de vista técnico, se necesitan además de estudios como la estabilidad de los taludes.

También surge el interés de reutilizar las áreas ocupadas por antiguos rellenos sanitarios, lo que puede resultar muy complejo y costoso. La reutilización de estas áreas son empleadas en muchos casos, como calles, taludes de carreteras, nuevas urbanizaciones, aeropuertos, como el aeropuerto de “La Guardia” en la Ciudad de Nueva York y hasta parques como es el caso del Parque Andre Jarlán en el Barrio Sur de Santiago sobre el antiguo Vertedero La Feria, en la Ciudad de Santiago, Chile. *Referencia: Marcel Szanto.*

El estudio geotécnico cubre aspectos relacionados con la estabilidad del suelo de fundación y la de los taludes. Las características del material para el recubrimiento de los residuos, las condiciones para el sellado de fondo, lateral y superficial de la obra, la determinación de la

resistencia del relleno así como la evolución de los parámetros resistentes con el tiempo, entre otras.

Uno de los principales problemas geotécnicos en los rellenos sanitarios, es la estimación de la magnitud y el tiempo asociado de los asentamientos a corto y largo plazo. Este tipo de problema muy estudiado por los geotécnicos en los suelos, es un tema clásico abordado por la mecánica de suelos. Por tal motivo, se amplía la formulación teórica del problema de asentamientos al campo de los residuos, tratando este material como un suelo y utilizando técnicas de campo y laboratorio similares. Con ciertas modificaciones que incluyen otros parámetros y variables en el estudio.

En los residuos, a diferencia de los suelos, se desarrollan mecanismos físicos, químicos y biológicos que hacen más complejo el estudio de su comportamiento, considerando además su variada composición, dado que cada sociedad produce su propia basura influenciada por el clima, la educación y el nivel de desarrollo. Otros factores importantes en la formación del material RSU son, la técnica de compactación empleada, la edad y composición de los residuos, como también el tiempo, que es una variable de gran relevancia en el análisis del comportamiento de los residuos sólidos para conocer su resistencia y compresibilidad.

Por otro lado, se requiere que estas obras civiles tengan una vida útil lo más larga y segura posible, y esto se consigue reduciendo el volumen de residuos con políticas públicas, además de optimizar la operación de estos emplazamientos para aprovechar al máximo su volumen útil, lo cual se logra con adecuados métodos de compactación y acelerando los procesos de degradación que dan lugar a los asentamientos del RSU, con los que se aumenta el volumen del relleno sanitario.

## **I.2. ANTECEDENTES**

Las primeras publicaciones sobre estudios de la compresibilidad de los rellenos sanitarios es de los años 70, donde Sowers fue el primer investigador que planteó un modelo para predecir estos asentamientos.



Por otro lado, la Universidad de Cantabria en España ha desarrollado un modelo llamado Meruelo que es un programa de simulación dinámica de vertederos de RSU que viene trabajando el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria conjuntamente con investigadores de la Universidad Católica de Valparaíso. Sanchez et al (1991), Arias (1994), Palma (1995).

También el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX – España, ha realizado numerosas investigaciones sobre la Geotecnia Ambiental en vertederos de Madrid, con resultado de importantes tesis doctorales, que han sido de gran contribución al área.

La Universidad Católica de Valparaíso, Chile, a través del Grupo de Residuos Sólidos y el Grupo de Geotecnia, viene desde 1983 haciendo presentaciones nacionales e internacionales sobre sus investigaciones en el tema y ha participado en las etapas de construcción, operación y cierre de la mayor parte de los vertederos de todo Chile, como son el relleno sanitario de Loma Los Colorados, Santa Marta, la Feria entre otros. Siendo de gran importancia el aporte realizado a la comunidad científica internacional los desarrollos de estos investigadores, Dr. Marcel Szanto, Dr. Raul Espinace y Dr. Juan Palma.

En Brasil, existen diversos grupos de investigación de universidades en el área de Geotecnia Ambiental, que realizan proyectos de monitoreo en rellenos experimentales en las ciudades de Belo Horizonte (UFMG, PUC-MG), Rio de Janeiro (PUC-Rio, UFRJ), San Pablo (USP) entre las más importantes. Destacando muy especialmente el Grupo Geotecnia Ambiental y de Residuos Sólidos liderado por el Dr. José Fernando Jucá de la Universidad Federal de Pernambuco, Recife, que además del importante aporte científico a nivel internacional, realiza tareas de cooperación con varias universidades brasileras y extranjeras como es el caso de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza - Argentina.

## **I.3. OBJETIVOS**

### **I.3.1. Generales**

Este trabajo está orientado a estudiar el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos urbanos, determinando su comportamiento resistente y deformacional y así conocer el asentamiento producido en los rellenos sanitarios. Esto sirve como finalidad para el aprovechamiento del área de vertido, aumentando de esta forma la capacidad del relleno sanitario.

El tema central de este trabajo es el estudio de la compresibilidad de los residuos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios, y los mecanismos físicos y biológicos de la compresión primaria y secundaria, desarrollados en la masa de residuo, presentando algunos modelos teóricos de compresibilidad como son el Modelo de Sowers y el Modelo Meruelo.

### **I.3.2. Específicos**

- Analizar las propiedades e índices utilizados en la caracterización geotécnica de los residuos sólidos urbanos.
- Evaluar la caracterización geotécnica de los residuos sólidos urbanos en la región de Cuyo.
- Estudiar la compresibilidad de los residuos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios, y los mecanismos físicos y biológicos de la compresión primaria y secundaria desarrollados en la masa de residuo.
- Presentar modelos teóricos de compresibilidad, y evaluar su capacidad predictiva de asentamientos contrastando con datos medidos en rellenos sanitarios.

## I.4. CONTEXTO REGIONAL

En las Provincias de la Región de Cuyo se está tendiendo paulatinamente a la deposición final de RSU en rellenos sanitarios controlados y bajo normativa de protección ambiental y sanitaria, dejando de lado los tradicionales depósitos a cielo abierto. Tanto la Provincia de San Juan como la de Mendoza acompañan la Política Nacional sobre el tratamiento final de RSU con responsabilidad ambiental, participando del Proyecto Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (PNGIRSU). *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

Particularmente en la Provincia de San Juan, la gestión inadecuada de los RSU en todas sus etapas ha sido uno de los principales problemas ambientales a resolver por el Gobierno de la Provincia, para lo cual, a través de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, se estableció un Programa Estratégico para el ordenamiento del manejo de los residuos sólidos; con lo cual se convocó a todos los Municipios y sectores relacionados con el tema.

La mala gestión de los residuos en la Provincia, se debió a varias causas, como la existencia de depósitos clandestinos en jurisdicciones distintas al espacio físico de generación, a la acumulación de pasivos ambientales ocasionados por la disposición final inadecuada de los Municipios, como también de Grandes Generadores y Transportistas, cuya ocupación data de inicio del siglo pasado. Constituyendo espacios clandestinos instituidos como habituales, los que fueron utilizados como alternativos por transportistas eventuales, públicos y privados.

Lo descripto anteriormente, trajo aparejada la existencia y funcionamiento de basurales a cielo abierto, impactando negativamente en la calidad del aire, las aguas subterráneas y superficiales, los suelos y los paisajes. En estos espacios, la calidad del aire se vio afectada por la generación de material particulado (polvos) y por humos provenientes de incendios tanto intencionales como ocasionales.

La situación hasta el año 2011 en que se inaugura el primer relleno sanitario de la provincia, los RSU del Gran San Juan se depositaban en un vertedero habilitado por la Secretaría de Medio Ambiente donde se vertía más del 80% de los residuos sólidos generados en la

Provincia. Se trataba de un relleno sin impermeabilización y sin tratamiento, situado en la localidad de La Bebida, en el Departamento Rivadavia, en el pedemonte de la Sierra Chica de Zonda, entre las Calles 8 y 9. Este vertedero incontrolado fue saneado.

El Departamento Rivadavia, ubicado en el Valle de Tulum, limita al norte con el Río San Juan, al sur con el Departamento de Pocito, al este con el Departamento Capital, y al oeste con las Sierras de Zonda, Figura I.1. A este vertedero incontrolado iban los residuos sólidos de los Departamentos Rivadavia, Zonda, Ullum, Chimbas y Rawson y desde el mes de setiembre del año 2009 se incorporó Capital, Santa Lucía y Pocito. Estos Departamentos conforman la Región 1.

La Provincia de San Juan gestiona a través de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, más del 80% de la totalidad de los RSU municipales generados, constituyendo el único caso en el país en realizar esto. Asimismo, existen en el resto de la provincia, sitios de vertido “acordado” con los municipios, en tanto se construyan los demás Centros de Tratamiento y Disposición Final correspondientes a las demás Regiones, que son monitoreados en forma permanente por el Área de Fiscalización de la Unidad, manteniendo de esta manera información actualizada en cuanto a diferentes ítems que determinan su correcto uso, en un claro concepto de integralidad del Programa para toda la Provincia de San Juan, agrupados en las siguientes Regiones. *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

#### **Regiones Intermunicipales**

- **Región 1:** Capital, Santa Lucía, Rivadavia, Chimbas, Rawson, Pocito, Ullum, Zonda.
- **Región 2:** Caucete, 25 de Mayo y 9 de Julio.
- **Región 3:** San Martín y Angaco.

#### **Regiones Monomunicipales**

- **Región 4:** Albardón (Villicum).

- **Región 5:** Sarmiento (Puente Alto).
- **Región 6:** Jáchal (Pan de Azúcar).
- **Región 7:** Iglesia (Villa Las Flores y Rodeo).
- **Región 8:** Calingasta (Ex Mina Merino).
- **Región 9:** Valle Fértil (Balde de las Chilcas y Astica).

Por otra parte, cabe aclarar que existen dos sitios habilitados para el depósito de escombros y materiales asimilables, ubicados uno en el Departamento Chimbas, en la intersección noreste de Calle Buenaventura Luna y Fray Justo Santa María de Oro y otro en el Departamento Pocito, ubicado en calle 7 entre Avenida Intendente Uñac y Calle Maurín.

En el marco del Plan Provincial de Clausura de Grandes Basurales Clandestinos, se procedió a clausurar uno de los sitios de mayores dimensiones que fuera utilizado durante décadas por varios municipios, empresas privadas y particulares para el vertido de residuos y que no reviste desde ningún punto de vista las condiciones de aptitud socio-ambientales para el vertido de residuos. También se clausuraron otros sitios no habilitados en los Departamentos Pocito, Rawson, Santa Lucía, Chimbas, Caucete y 9 de Julio. Se realizaron tareas de limpieza del vertedero ubicado en los Departamentos Rivadavia y Sarmiento y se ha colaborado con la Municipalidad de Chimbas en la limpieza de sectores de la Avenida Costanera General Juan Domingo Perón. *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

Otra problemática que se identificó como una compleja circunstancia social es el cirujeo o trabajo informal de los recolectores. Familias enteras manipulaban la basura en los sitios de disposición final, en busca de vidrio, cartón, plástico y metales escasos como el aluminio y cobre y otros elementos de valor. Esos materiales llegaban al vertedero contaminados o se contaminaban en el lugar con agentes patógenos, estimulando la proliferación de enfermedades como hepatitis, diarrea, tifus exantemático, triquinosis, sarna, alergia y hasta HIV, y otra larga lista que crece cotidianamente.

Un aspecto importante a destacar es la irresponsabilidad de algunos generadores de residuos que entre otras acciones trasgresoras no respetan horarios de recolección, arrojan residuos en terrenos baldíos, rutas, calles y canales de riego, mezclan los residuos domiciliarios con restos de demolición, entre otros.

La recolección y la disposición de los residuos domiciliarios, de limpieza, restos de poda y asimilables (residuos verdes) y escombros, se encuentra a cargo de cada uno de los Municipios. En la mayoría de los casos, la recolección es realizada por camiones contratados de caja abierta ó volcadores. No obstante, se observa en la actualidad una tendencia creciente por parte de los municipios a procurar esfuerzos a los fines de contar con vehículos compactadores para realizar la recolección y transporte de sus residuos.

Es conveniente resaltar que los Municipios, deberían incrementar las condiciones de seguridad, requeridas para la recolección y transporte de los residuos sólidos, equipando al personal con la indumentaria adecuada para las tareas que se desarrollan, tal como guantes, barbijos y mamelucos de protección. Además sería oportuno implementar programas de capacitación en higiene y seguridad al personal recolector. Por otra parte, si bien los Municipios se han mostrado interesados en implementar acciones tendientes a mejorar su gestión de residuos sólidos, no han desarrollado aún en la mayoría de los casos, planes de recupero o reciclaje de materiales presentes en los residuos.

A partir del diagnóstico planteado, se propusieron los ejes centrales de la política integral del denominado Programa “Guerra a la Basura”, en el cual se desarrollan estrategias que apuntan al mejoramiento de la gestión integral de los residuos sólidos, con intervención de diferentes Organismos del Estado Provincial, Municipal y la intervención a efectos de coordinación del Organismo Ambiental Provincial, privilegiando: *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

- La realización de controles camineros y la aplicación de la normativa, mediante la fiscalización en diferentes espacios adonde se arrojan residuos clandestinamente.

- El desarrollo de estrategias de articulación con distintas Comunas, a los efectos de ordenar la gestión de los RSU, en todas sus etapas, particularmente la de Disposición Final, que además impulsó el aumento de residuos ingresados a los lugares autorizados. Cabe destacar que este orden se pudo lograr gracias a la predisposición de los Jefes Comunales para avanzar en la solución de la problemática de los residuos.
- Otro hecho significativo en este Programa, es la aplicación del Proyecto de Seguimiento de Trazabilidad, por el cual se estableció un sistema de control de etapas de gestión del residuo en cuanto a la cantidad, composición y procedencia de los mismos, a los fines de disminuir la contaminación que genera esta actividad no regulada.

Por todo lo expuesto, el actual Programa tiene en cuenta la problemática de los residuos sólidos urbanos como política de Estado, con un enfoque multidisciplinario e interinstitucional, desde una perspectiva integral, contemplando las diferentes etapas del circuito de la basura, y el ordenamiento territorial de los Sitios de Disposición Final seleccionados, Figura I.2, Figura I.3 y Figura I.4. En la Figura I.5 aparece representado un esquema de la Planta de Separación de residuos sólidos. *Referencia: "PEGIRSU", Plan Estratégico de Gestión Integral de los RSU. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*

La Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable está operando el primer Relleno Sanitario de la Provincia en el mismo predio del actual vertedero en el Departamento de Rivadavia, la obra se inauguró el 27 de abril de 2011. Y se ha cerrado el antiguo vertedero con un plan de remediación, lo cual ha eliminado los residuos dispersos en grandes cantidades por toda el área y los focos de incendio.

En la Figura I.6 se observa la situación en que se encontraba el lugar de deposición antes de la remediación, en la Figura I.7 se puede ver el galpón donde funcionará la planta de separación y reciclado de los residuos, en la Figura I.8 se observan las obras del nuevo relleno sanitario.

En la Figura I.9 está la vista actual del nuevo Relleno Sanitario en pleno funcionamiento y en la Figura I.10 se observa la remediación del antiguo Vertedero Incontrolado.

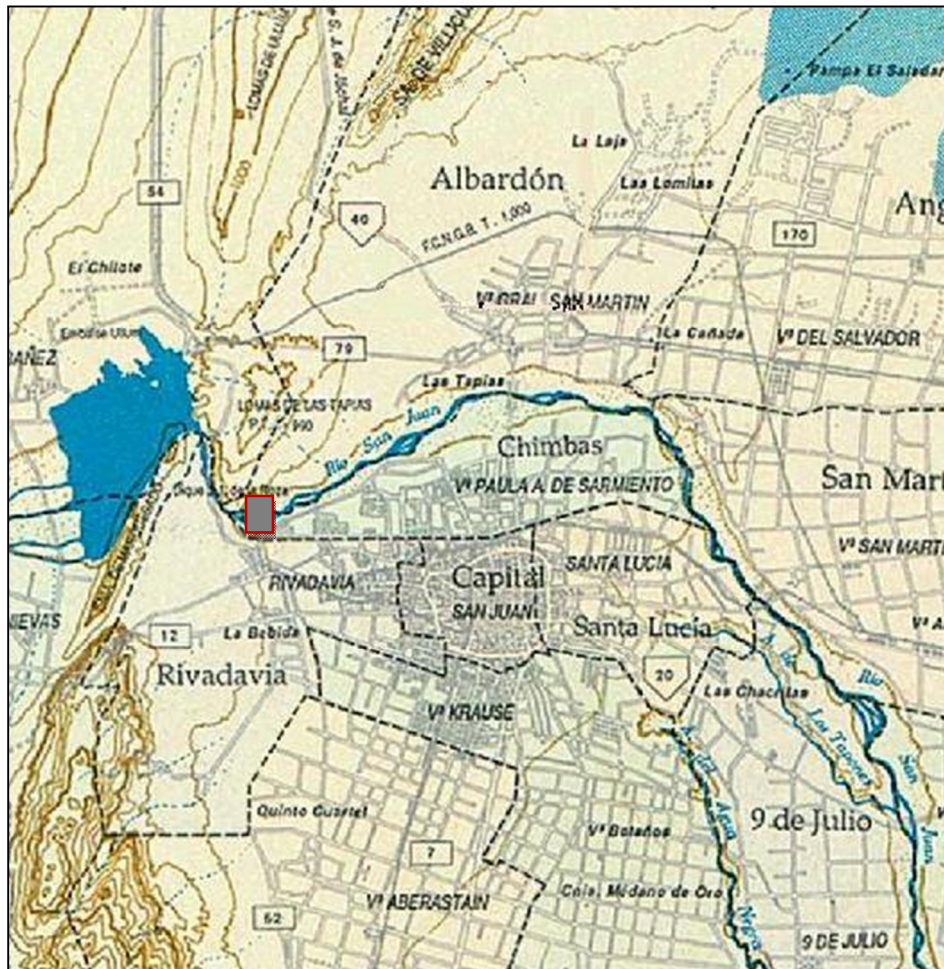


Figura I.1 Ubicación Vertedero en el Departamento de Rivadavia





**Figura I.2** Imagen satelital de los sitios de disposición final seleccionados para las Zonas 1, 2, 3, 4 y 5. (Imágenes obtenidas de Google Earth – Elaboración PEGIRSU)



**Figura I.3** Imagen satelital de los sitios de disposición final seleccionados para las Zonas 6, 7 y 9. (Imágenes obtenidas de Google Earth - Elaboración PEGIRSU)

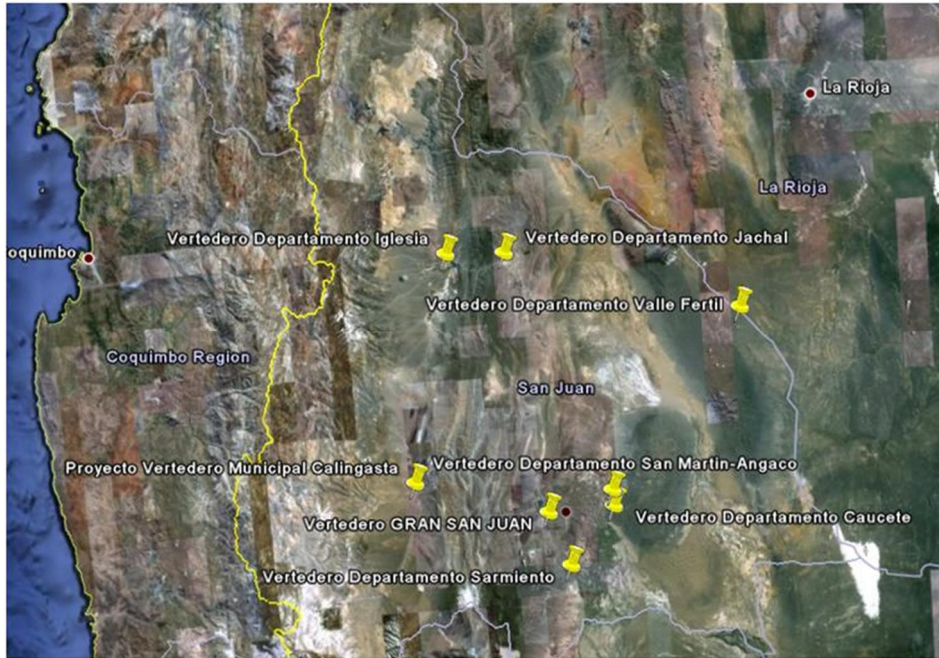


Figura I.4 Imagen satelital de todos los sitios de disposición final. (Imágenes obtenidas de Google Earth - Elaboración PEGIRSU)

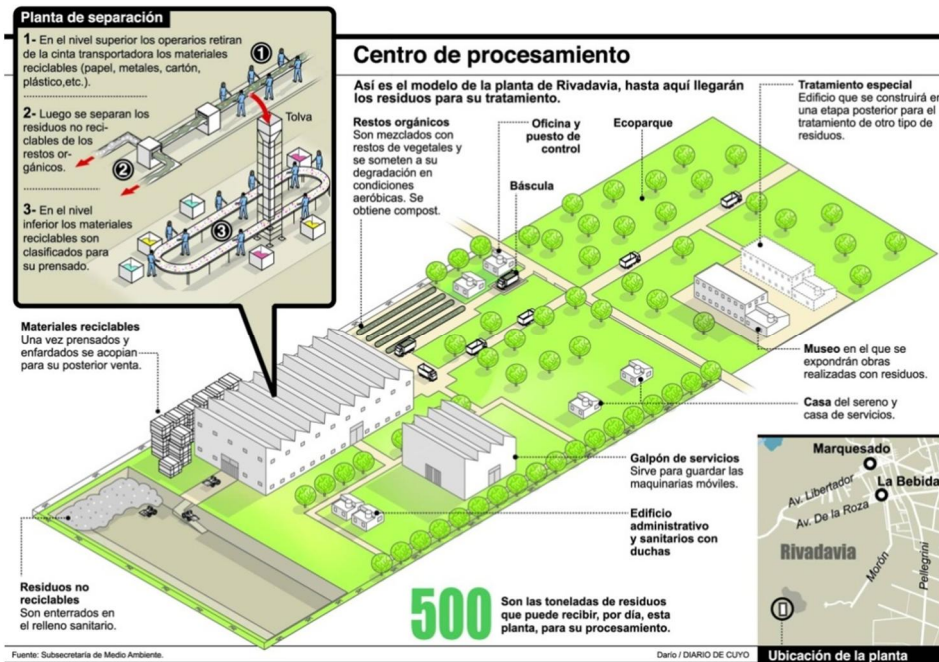


Figura I.5 Esquema de la Planta de Separación. (Elaboración PEGIRSU)



**Figura I.6** Vista antes de la remediación del Vertedero. (Elaboración PEGIRSU)



**Figura I.7** Vista de la futura Planta de Separación



**Figura I.8** Vista de la construcción de la base de impermeabilización del fondo del actual Relleno Sanitario



**Figura I.9** Vista del actual Relleno Sanitario



**Figura I.10** Vista del Vertedero Incontrolado remediado

# CAPÍTULO II



## CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

## **II. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS RSU**

---

### **II.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

#### **II.1.1. Introducción**

Los residuos sólidos son todos los residuos que surgen de las actividades humanas y animales, que normalmente son sólidos y que son desechables como inútiles ó superfluos. El término *residuo sólido* comprende tanto la masa heterogénea de los desechos de la comunidad urbana como la acumulación más homogénea de los residuos agrícolas, industriales y minerales. En este caso está enfocado al ámbito urbano, donde la acumulación de residuos sólidos es una consecuencia directa de la vida. *Referencia: Tchobanoglous et al (1994).*

De acuerdo con Tchobanoglous et al, la definición de residuos sólidos incluyen a todos los materiales sólidos ó semisólidos, que el poseedor no considera de suficiente valor para ser retenidos. Y los orígenes de los residuos sólidos en una comunidad, están generalmente asociados con el uso del suelo y su localización.

La evolución y la fuerte industrialización de este siglo, han colaborado al crecimiento vertiginoso de los residuos, lo cual determina un proceso continuo de deterioro ambiental y representan un serio peligro a la salud pública, ya que su composición heterogénea puede contener agentes biológicos patogénicos ó residuos químicos que pueden llegar al hombre directa ó indirectamente, afectando su salud. Por lo que la relación entre la salud pública y el almacenamiento, recolección y evacuación inapropiadas de los RSU es evidente.

También fenómenos ecológicos, tales como la contaminación del aire, agua y del suelo, han sido atribuidos a la gestión inapropiada de los residuos sólidos urbanos, como también a

residuos mineros. Como es el caso de los lixiviados de basureros y/o vertederos sin tratamiento ó mal diseñados. *Referencia: Tchobanoglous et al (1994).*

Las proyecciones son bastante claras en referencia a las dificultades que acontecen, si se mantiene el patrón vigente de producción y consumo especialmente en países muy industrializados. Lo más problemático puede ser el no aprovechamiento de los residuos y la casi inexistencia de iniciativas en origen de las industrias.

Otro factor interesante es que en el imaginario social todos los productos son reciclables, y este razonamiento las empresas lo promueven, para garantizar mayor credibilidad y eximir de culpa a los consumidores. Es evidente que el reciclaje contribuye a recuperar materiales, sin embargo no puede reducir el flujo de materia, porque no se recicla el total de los productos. *Referencia: Ghislane (2000).*

## **II.1.2. Clasificación y composición de los RSU**

Como clasificación más útil, propuesta por Tchobanoglous et al, de los residuos sólidos tenemos:

- Doméstico
- Comercial
- Institucional
- Construcción y Demolición
- Servicios Municipales
- Plantas de Tratamientos
- Industriales
- Agrícolas



El término residuos sólidos urbanos, RSU; incluye todos los residuos generados por una comunidad, excepto los residuos de procesos industriales y agrícolas.

- Doméstico y Comercial: incluye a los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos provenientes de zonas residenciales y establecimientos comerciales. La fracción orgánica está formada por residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, goma, madera, residuos de jardín. La fracción inorgánica por vidrios, cerámica, latas, aluminio y metales féreos.
- Residuos Especiales: Son los residuos de origen doméstico y comercial que incluyen artículos voluminosos, electrodomésticos, residuos de jardín recogidos en forma separada, baterías, pilas, aceites y neumáticos.
- Institucionales: los de oficinas, escuelas, cárceles y hospitales. Hay que diferenciar de ellos, los residuos de hospitales, clínicas, laboratorios y veterinarias de origen patogénico; estos son manipulados y procesados separadamente de los RSU y van a incineración.
- Construcción y Demolición: puede incluir desde, suciedad, gravas, hormigón, ladrillos, maderas, como también vidrios, aceros y plásticos.
- Servicios Municipales: Barridos de calles, residuos de jardines, plazas, parques, poda, animales muertos y vehículos abandonados.
- Plantas de Tratamiento: Son los residuos sólidos y semisólidos de aguas servidas e instalaciones de tratamiento de residuos industriales. No son recolectados por los Municipios. Los lodos de planta de tratamiento de líquidos cloacales van generalmente al relleno sanitario, también cenizas ó escorias de la incineración.
- Residuos Industriales: son los residuos resultantes del proceso de producción de las industrias, pueden presentarse como cenizas, lodos, aceites, residuos ácidos y alcalinos, metal ferroso, vidrio, plástico, residuos orgánicos, etc.

- Residuos Agrícolas: los rechazos de actividades agrícolas y ganaderas, como cultivos de campo, producción de leche, mataderos, etc.

Desde un punto de vista geotécnico, Grisolia & Napoleoni (1996) definen los residuos sólidos como un medio multifacético, igualmente que los suelos, constituidos por fases sólidas, líquidas y gaseosas, y los clasifican en:

- Materiales inertes estables (metales, vidrios, escombros), cuyo comportamiento es asumido como el de un suelo heterogéneo de granulometría gruesa.
- Materiales altamente deformables (cartón, plástico y textiles) que presentan grandes deformaciones y comportamiento anisótropo.
- Materiales fácilmente degradables (materiales orgánico, vegetales, restos de comidas) que pasan por transformaciones físico-químicas, causando reducción de volumen y generando gases y líquidos.

De acuerdo con Knochenmus et al (1998), la clasificación de los RSU se basa en la evaluación de parámetros como: contenido de humedad, materia orgánica, distribución de los tamaños de las partículas e identificación de las diferentes categorías de residuos contenidas en una muestra.

Hay que tener en cuenta que la composición de los RSU controla los procesos de degradación bioquímicos que gobiernan la producción de gases y lixiviados. Además, la composición al igual que las propiedades físicas y mecánicas varía con el tiempo, como consecuencia de estos procesos.

Composición de los residuos es el término que se utiliza para describir los componentes que constituyen el residuo sólido y está basado generalmente en el peso. La información sobre la composición de los residuos sólidos es importante para evaluar las necesidades de equipos, sistemas y planes de gestión. En una comunidad en general, la proporción doméstica es del orden del 50 al 75%, sobre todo en los países latinos ese porcentaje corresponde a los valores

más altos. Los porcentajes en peso de los residuos sólidos, varían con la estación del año y las horas del día.

La determinación de la composición de los RSU en trabajos de campo no es una tarea sencilla por la heterogeneidad de los mismos. Los procesos estadísticos estrictos son muy difíciles de implementar, por esto los métodos basados en técnicas al azar son los más usuales.

El procedimiento para los RSU domésticos requiere la descarga y el análisis de una cantidad de residuos en una zona controlada de un lugar de evacuación, libre de viento y separada de otras operaciones. Un muestreo, podría ser la carga de un camión que proceda de una ruta típica de recorrido, en un día laborable, en una zona residencial. Se procede a realizar un cuarteo de la carga, se toman los cuartos opuestos hasta obtener una muestra representativa y luego analizarla. *Referencia: Tchobanoglous et al (1994).*

Para una investigación in situ, una muestra de residuos puede ser obtenida de pozos ó cavas exploratorias. Volúmenes de aproximadamente  $1,5\text{m}^3$  de material, son suficientes para la clasificación del residuo como también para determinar las características de resistencia y deformabilidad en ensayos de laboratorio. *Referencia: Marques (2001).*

## II.2. RELLENOS SANITARIOS

Existen varios procesos para eliminar ó disponer los RSU, como son el compostaje, reciclaje, incineración y disposición en Rellenos Sanitarios ó Vertederos Controlados. Pero, ninguno de estos procesos elimina los impactos ambientales causados por la generación exponencial de los residuos.

Los Rellenos Sanitarios son instalaciones físicas realizadas en el subsuelo, que contiene los rechazos procedentes de los residuos sólidos. En la actualidad, los Rellenos Sanitarios ó Vertederos Sanitarios Controlados, se refiere a una obra de ingeniería para la deposición

final de los RSU; diseñada y explotada para minimizar los impactos sobre el ambiente y la salud pública.

Además de ser la técnica más empleada en el mundo para el almacenamiento de los residuos sólidos, los rellenos sanitarios son el elemento final obligatorio en un sistema de gestión integrada de residuos sólidos. Incluso con la implementación de la reducción de residuos, reciclaje, y de las tecnologías de transformación, los rechazos provenientes de los residuos sólidos siguen siendo colocados en rellenos sanitarios. *Referencia: Tchobanoglous et al (1994).*

### II.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RSU

Uno de los grandes desafíos de la ingeniería geotécnica ambiental, es determinar y cuantificar las propiedades geotécnicas de los rellenos sanitarios de RSU. Es importante el conocimiento de estas propiedades para diseñar un sistema de gestión de residuos, como también en el análisis de la estabilidad y en el comportamiento a largo plazo de los rellenos sanitarios.

Los factores que influyen en la determinación de las propiedades geotécnicas del residuo sólido urbano son muy variados, lo que hace difícil su interpretación a la hora de cuantificar los resultados, entre estos factores tenemos. *Referencia: Manassero et al (1996):*

- La heterogeneidad de la basura y su variación respecto a las condiciones climáticas, sociales y culturales de cada región.
- La dificultad para la obtención de muestras representativas tomadas in situ.
- La inexistencia de procedimientos aceptados y contrastados por la comunidad científica, tanto para la toma de muestras como en los ensayos.
- La variación de las propiedades geotécnicas de los residuos con el tiempo, producto de la descomposición biológica.

Las principales Propiedades Físicas a determinar en un relleno sanitario son:

- Peso Específico
- Contenido de Humedad
- Granulometría
- Permeabilidad
- Temperatura

### **II.3.1. Peso Específico**

El peso específico de residuos en un relleno sanitario depende de varios factores como son: la composición, el método de compactación, la degradación con el tiempo y la presión de tapada entre otros.

El peso específico “ $\gamma$ ”, se define como el peso de residuos por unidad de volumen en ( $t/m^3$ ,  $Kg/m^3$ ,  $kN/m^3$ ). En el caso de los RSU, hay que hacer referencia si se trata de RSU compactados ó no compactados.

Los pesos específicos de los residuos sólidos varían notablemente con la localización geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenamiento. En la Tabla II.1 se presentan pesos específicos típicos para varios tipos de residuos tal como son encontrados en los contenedores, compactados ó no compactados.

**Tabla II.1**

Datos típicos de Pesos Específicos y Contenidos de Humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas. Tchobanoglous et al (1994).

Tipos de residuos	Peso específico $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )		Contenido de Humedad w (%)	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Domésticos no compactados				
Residuos de comida (mezclados)	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Cartón	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Textiles	42-101	65	6-15	10
Goma	101-202	131	1-4	2
Cuero	101-261	160	8-12	10
Residuos de jardín	59-225	101	30-80	60
Madera	131-320	237	15-40	20
Vidrio	160-481	196	1-4	2
Latas de hojalata	50-160	89	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	131-1.151	320	2-4	3
Suciedad, cenizas, etc.	320-1.000	481	6-12	8
Cenizas	650-831	745	6-12	6
Basuras	89-181	131	5-20	15
Residuos de jardín domésticos				
Hojas sueltas y secas	30-148	59	20-40	30
Hierba verde suelta y húmeda	208-297	237	40-80	60
Hierba verde húmeda y compactada	593-831	593	50-90	80
Residuos de jardín triturados	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín compostados	267-386	326	40-60	50
Urbanos				
En camión compactador	178-451	297	15-40	20
En vertedero				
Medianamente compactados	362-498	451	15-40	25
Bien compactados	590-742	600	15-40	25

La determinación in situ del peso específico de residuos sólidos es una tarea muy compleja, pudiendo presentarse resultados con grandes dispersiones.

Se han propuesto diferentes métodos, como Landva & Clark (1990) que encontraron más conveniente medir la densidad a través de la prueba del densímetro nuclear, aunque existe un cuestionamiento de hacer uso de los métodos directos empleados en la geotecnia para conocer la densidad de los suelos, ya que los residuos a diferencia de los suelos, presentan varios constituyentes y la media de la densidad dependerá del peso específico, porcentaje, porosidad y contenido de humedad de cada componente individual. Pero el método más simple y confiable consiste en la excavación de un pozo ó trinchera con extracción del material y la determinación del volumen del pozo previa impermeabilización del mismo con una malla sintética. La desventaja de esta técnica, es que está limitada a profundidades de alrededor de los 4m y a la imposibilidad de separar la cobertura, lo que infiere en el resultado del ensayo. *Referencia: Marques (2001), Gachet et al (1998).*

Fasset et al (1994); Kavazanjian et al (1995) y Jesseberger (1996), argumentan que la densidad aumenta con la profundidad como resultado de la consolidación y compresión de la masa de residuos bajo carga (peso propio, actividades de maquinarias y material de cobertura). Fasset et al (1994) indican que la densidad de una capa de residuos pobremente compactada a 10m de profundidad se aproxima al valor de la densidad de una capa de residuos más superficial bien compactada.

Los datos de la literatura técnica muestran rangos muy amplios para los valores de densidades como se detallan a continuación:

*Jesseberger (1996):*

RSU sin compactar  $\gamma = 0,3\text{kN/m}^3$

RSU fuertemente compactados  $\gamma = 18\text{kN/m}^3$

*Sowers (1973):*

RSU sin compactar  $\gamma = 1,2 - 3\text{kN/m}^3$  (e = 15)

RSU compactados  $\gamma = 6\text{kN/m}^3$  ( $e = 2$ )

*Sagasetta (1993):*

RSU sin compactar  $\gamma = 7 - 14\text{kN/m}^3$

RSU compactados  $\gamma = 5 - 12\text{kN/m}^3$

*Fasset et al. (1994):*

RSU mal compactados  $\gamma = 3 - 9\text{kN/m}^3$

RSU medianamente compactados  $\gamma = 5 - 8\text{kN/m}^3$

RSU bien compactados  $\gamma = 9 - 15\text{kN/m}^3$

*Sánchez Alciturri et al (1993)* publica los datos procedentes del Vertedero de Meruelo, Cantabria:

RSU valor inicial  $\gamma = 2\text{kN/m}^3$

RSU compactados  $\gamma = 8 - 10\text{kN/m}^3$

*Watts & Charles (1990):*

RSU compactados en capas de 2m de altura  $\gamma = 5,9\text{kN/m}^3$  a  $\gamma = 6,3\text{kN/m}^3$  incluyendo la cubierta diaria. Sin embargo si la cubierta se realizaba en capas de 0,60m, la densidad aumentaba hasta  $8\text{kN/m}^3$  incluyendo el material de cobertura.

### II.3.2. Contenido de Humedad

El contenido de humedad de los residuos varía con la composición de los mismos, con las condiciones climáticas locales (periodos de lluvias y de sequía), con el método de disposición y con la capacidad de desempeño de los sistemas de drenaje de los lixiviados. *Referencia: Marques (2001)*. El contenido de humedad en general aumenta con la cantidad de materia orgánica presente según Landva & Clark (1990).



Los mecanismos de retención de humedad en la masa de RSU pueden clasificarse como, Zornberg et al (1999):

- a) humedad en el interior de las partículas sólidas
- b) humedad entre partículas, sustentada por las presiones capilares y
- c) la humedad entre partículas, retenida por la cobertura de baja permeabilidad.

El contenido de humedad de los residuos sólidos puede expresarse de dos formas, con el método peso-húmedo ó con el método peso-seco. El método peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de residuos sólidos.

En forma de ecuación, el contenido de humedad peso-húmedo se expresa así:

$$w = \left( \frac{P_{RW} - P_{RS}}{P_{RS}} \right) \times 100 \quad (II.1)$$

Donde:

w = Contenido de humedad (%)

$P_{RW}$  = Peso inicial de la muestra

$P_{RS}$  = Peso de la muestra secada a la temperatura de 60° para evitar quema del material volátil. Gabr & Valero (1995).

Tchobanoglous et al (1994) señalan que en la mayor parte de los rellenos sanitarios en Estados Unidos, el contenido de humedad varía entre el 15% y 40% según la composición de los residuos, la estación del año, las condiciones de humedad y meteorológicas, particularmente la lluvia.

Coumoulos et al (1995) encuentran una tendencia en la que en los primeros 15m hay valores de humedad por encima del 60% mientras que al aumentar la profundidad los datos son menos dispersos y tienden hacia un valor medio del 40%.

Mitchel et al (1996), citando datos de Huitric et al (1979) que dan valores entre el 10 y el 50%. Además dicen que en zonas en las que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, la humedad se encuentra alrededor del 25%.

Sowers coincide con los datos anteriores donde establece que los valores de humedad están entre el 10 y el 50%. Por otra parte Sánchez Alciturri et al (1993) han medido en el Vertedero Meruelo (Santander, España) un valor de humedad del 48%.

En la Tabla II.2 se muestran una serie de valores de humedad adaptados por Claudio Olalla (CEDEX, Madrid – España), tomados como resumen de mediciones realizadas a lo largo de diferentes rellenos sanitarios, valores tomados de la bibliografía internacional.

**Tabla II.2**

Rangos de valores típicos de humedad.

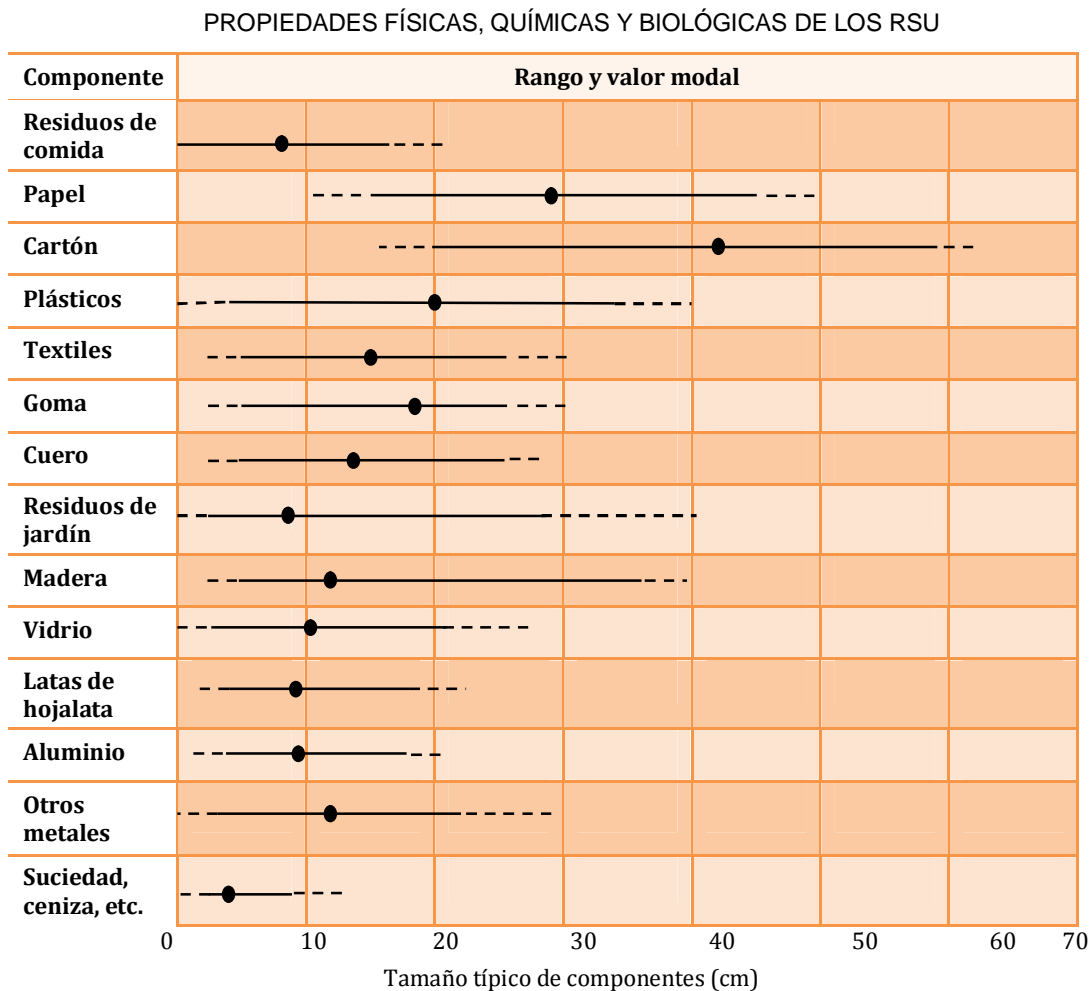
AUTOR /AÑO	HUMEDAD	OBSERVACIONES
Rao et al (1977)	65% - 72%	Con materiales vegetales
Harris, M. R (1974)	50% - 70%	
López Garrido et al (1975)	22% 29%	Invierno Verano
Chen (1977)	30% - 48%	
Mabry (1977)	18% - 187%	
York et al (1977)	70% - 400%	
Cartier & Baldit (1983)	20% - 35%	Constante con la profundidad
Oliden (1987)	49% - 56%	

Fuente: adaptada Ollala, C. (1993) - CEDEX

### II.3.3. Granulometría

El tamaño y distribución de los componentes del RSU es un dato importante en la recuperación de materiales, especialmente con medios mecánicos como los tamices y separadores magnéticos. Debido a la dificultad para realizar este ensayo es que en la práctica común, se separen los distintos componentes de los residuos y medir su tamaño.

Los datos típicos sobre la distribución del tamaño de los componentes individuales en los RSU pueden verse en la Figura II.1.



**Figura II.1** Distribución típica del tamaño de los componentes encontrados en los RSU domésticos. Tchobanoglous et al (1994)

### **II.3.4. Permeabilidad**

La permeabilidad ó conductividad hidráulica de los residuos compactados es una propiedad física importante que gobierna en gran parte el movimiento de los líquidos y gases dentro del relleno sanitario. La permeabilidad varía con el grado de compactación y la edad de los residuos.

Los ensayos comúnmente usados para medir permeabilidad in situ son: lisímetros, ensayos de pérdida de agua en pozos, permeámetros de carga variable y sondeos SPT.

Manasero et al (1997) sugiere como primera aproximación un valor de permeabilidad  $k = 10^{-5}$  m/seg. Knochenmus et al (1998) observan que el coeficiente de permeabilidad de los RSU está entre  $10^{-5}$  m/seg a  $10^{-6}$  m/seg, similar a arenas con contenido de finos. Estos autores establecen que la permeabilidad depende de la forma de deposición, grado de compactación inicial, la presión de sobrecarga y la edad de los residuos.

### **II.3.5. Temperatura**

La medición de la temperatura dentro del relleno sanitario es importante para la evolución de los procesos de degradación de los RSU y especialmente la generación de metano. El valor de la temperatura a lo largo de la profundidad, puede ser medido con termómetros digitales a partir de tubos estratégicamente dispuestos en el relleno sanitario.

Rees (1980) registró valores de temperatura en profundidad en el relleno de Aveley, California – EEUU, este autor considera que la temperatura es influenciada principalmente por el grado y tipo de actividad microbiana y la temperatura ambiente, pero en profundidad no tiene influencia la temperatura ambiente. El mayor registro de temperatura fue de 43°C.

En el vertedero de Muribeca, Recife – Brasil, se han medido valores de temperatura en profundidad, encontrando en la celda 4 en la capa más superficial una temperatura de 35°C, 63°C en la mitad de la profundidad y 50°C en la profundidad de 30m. Ya en la celda 2 la temperatura aumentaba con la profundidad, alcanzando los 55°C en la capa más profunda a

los 20m. Según los autores, los valores de temperatura elevados indicaban que los residuos se encontraban en fase de descomposición acelerada, justificable según los autores, por el hecho que las celdas 2 y 4 estarían constituidas de residuos frescos, Juca et al (1999).

## **II.4. COMPRESIBILIDAD**

### **II.4.1. Generalidades**

En los últimos años la Geotecnia Ambiental ha tenido una importante participación en los proyectos de diseño, operación y rehabilitación de los rellenos sanitarios y en la construcción sobre ellos para aprovechar áreas ocupadas por estos.

Ya en la década del 40, Watts & Charles (1990) en la *Building Research Establishment*, estos autores expresaban su preocupación por la dificultad de encontrar terrenos disponibles para nuevas construcciones y la necesidad de construir en terrenos artificiales ó rellenos. Pero también se alertaba sobre el peligro de construir en áreas de rellenos debido a la presencia de materiales degradables y en descomposición.

Construir sobre rellenos sanitarios puede traer variados problemas, como asientos diferenciales, ataque químico a las cimentaciones y estructuras, riesgos de explosión en el interior del relleno, peligro de contaminación de los suelos, etc.; como también debe estudiarse la estabilidad de los taludes, y en caso que la estructura apoye en pilotes que atraviesan el relleno y terreno natural, se puede producir rozamiento negativo causado por el asiento del relleno. Pero los mayores problemas geotécnicos están asociados al asiento a largo plazo del relleno.

Los asientos diferenciales pueden producir fracturas en los sistemas de drenaje de los lixiviados, lo cual pone en peligro a la construcción y puede ocasionar saturación de la masa de residuos; producir variaciones en la superficie del terreno, áreas de depresión que causarían acumulación permanente de aguas transformándose en una carga adicional para los residuos y aumentar así los asientos diferenciales.

Por lo tanto la compresión de los rellenos sanitarios toma importancia, porque cualquier proyecto de uso futuro necesitará cuantificar cual será el asiento a largo plazo. Y más importante aún, el estudio de los asientos en un relleno sirve para poder predecir el incremento de la capacidad de los vertederos en recibir RSU. *Referencia: Ghislane (2000).*

#### **II.4.1.1. Mecanismos de Compresión**

Los primeros estudios sobre compresibilidad de vertederos son de la década del 40 en Estados Unidos, aunque las primeras publicaciones fueron presentadas por Sowers en 1973.

Según este autor los mecanismos de asentamiento que se desarrollan en los residuos son:

- Mecánico: que se produce por medio de un colapso estructural de las partículas y consolidación similar a los suelos.
- Ravelling: Es la migración de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos entre partículas mayores.
- Cambio físico-químico: Por medio de corrosión, oxidación y combustión.
- Descomposición bioquímica: A través de los procesos de fermentación y descomposición, tanto aeróbicos como anaeróbicos.
- Interacción: ocurre por la interacción de los dos últimos procesos citados.

#### **II.4.2. Mecánico**

De los cinco mecanismos planteados por Sowers, el mecanismo de compresión física es el único que se puede analizar en términos de tensiones. El asiento físico puede dividirse en asiento inicial ó instantáneo, asiento primario ó a corto plazo y asiento secundario ó a largo plazo.

El **Asiento Inicial** ocurre inmediatamente después de la aplicación de las cargas. Este tipo de asiento es análogo a la compresión elástica de los suelos y es virtualmente instantáneo, Wall & Zeiss (1995).

El **Asiento Primario** ocurre debido a la disipación de la presión intersticial y gas de los vacíos de la masa de residuos, este proceso es muy similar a la consolidación de los suelos. Al igual que la compresión inicial, la consolidación primaria depende del incremento de tensiones y este proceso ocurre con variación volumétrica. Este asiento ocurre en un tiempo relativamente mayor que el asiento inmediato y del orden de 30 días después de la aplicación de la carga, Sowers (1973), Morris & Woods (1990) y Edil et al (1990). Aunque las compresiones primaria y secundaria ocurren simultáneamente, la magnitud de la compresión primaria es mayor y enmascara el efecto de la compresión secundaria en este periodo inicial de tiempo. Después de 30 días, la compresión secundaria progresa y alcanza el mismo orden de magnitud que la compresión primaria.

Según Wall & Zeiss (1995), existen indicios significativos de que el mecanismo de compresión primaria en residuos sólidos no puede explicarse basándose en la hipótesis de Terzaghi, porque los rellenos rara vez están saturados y además la permeabilidad de los residuos es del mismo orden de magnitud que las arenas y gravas, de manera que las presiones intersticiales no se desarrollan en este proceso ya que el líquido puede escapar rápidamente de la masa de residuos.

El **Asiento Secundario** ó a largo plazo en los RSU es debido a procesos de fluencia (creep) y a la descomposición biológica según Sowers. Los asientos debidos a procesos de “creep”, ocurren como consecuencia de la acomodación gradual de partículas en el interior de la masa de residuos. La compresión secundaria no depende del proceso de carga por que la variable dependiente es el tiempo. Estos asientos se prolongan por un largo periodo de tiempo, pero la velocidad es menor que en los asientos anteriores.

Según Sowers, desde un punto de vista teórico, el asiento global que ocurre en los RSU no cesará nunca, aunque la mayor parte de él ocurrirá en los dos primeros años de vida del

relleno. Y según Kamon (1997) observó que para que un relleno se convierta en estable necesita un periodo superior a los 20 años.

La magnitud de los asientos en los rellenos debido a su peso propio dependerá, de la composición de los residuos y del grado de compactación alcanzado durante la deposición de los residuos en el relleno sanitario. El conocimiento de estos factores, como densidad y composición de los residuos es fundamental para estimar los asientos que se generen en el relleno. El asiento físico a largo plazo determina la resistencia y las propiedades geotécnicas de los residuos.

#### **II.4.2.1. Ravelling**

El asentamiento causado por “ravelling” es consecuencia del desplazamiento de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos. Este proceso se produce durante la compresión mecánica y la compresión por degradación de la materia orgánica. El mecanismo de ravelling puede ser causado por percolación a través del relleno, por vibraciones ó por cambios inducidos por la descomposición química y biológica.

Los asientos por ravelling ocurren esporádicamente, dependiendo de fenómenos como intensas lluvias, fluctuaciones repentinas del nivel de agua ó grandes choques provocados por explosiones ó sismos.

#### **II.4.2.2. Bioquímicos**

La causa más importante de reducción de volumen en RSU es debido a la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto desde el punto de vista de la ingeniería del relleno, este tipo de asiento merece mayor atención que los asientos inmediatos y por consolidación primaria.

El asiento a largo plazo debido a procesos químicos y biológicos depende principalmente de factores ambientales como la temperatura, la humedad, pH y la presencia de bacterias aeróbicas y anaeróbicas. Estos asientos son menos previsibles que los asientos por



compresión mecánica, por la existencia de organismos vivos en los procesos de descomposición y degradación.

El proceso de descomposición es la transformación de la materia orgánica en gases y lixiviados por la acción de bacterias y microorganismos, en presencia de humedad y temperatura adecuadas. Y esta transformación se refleja en pérdida de masa y está directamente relacionada con la magnitud y velocidad del asiento.

### **II.4.3. Factores que afectan los mecanismos de asentamiento**

Existen distintos factores que influyen en la magnitud y en la velocidad de asentamiento de los RSU, y que condicionan el comportamiento mecánico de un relleno sanitario.

De acuerdo con Edil et al (1990), los principales factores son:

- Grado de Compactación
- Cantidad de materia orgánica
- Altura del relleno
- Sobrecarga adicional
- Nivel y fluctuación de lixiviados
- Factores ambientales como humedad, temperatura y producción de biogás
- Edad del relleno sanitario

Yen & Scalon (1975), investigaron los asientos producidos en tres rellenos cuyas profundidades variaban de 6 a 40m aproximadamente. Ellos observaron que la velocidad de asentamiento aumentaba con la profundidad del relleno en general; sin embargo, existía un límite que es los 30m, para la cual no había aumento significativo de la velocidad de asentamiento. La explicación es que en profundidad se simula un medio anaeróbico con procesos más lentos de descomposición, que en profundidades cercanas a la superficie donde hay mayores niveles de oxígeno.

Respecto a la sobrecarga adicional para acelerar la velocidad de asiento, Palma en su Tesis Doctoral (1995), resalta que la sobrecarga adicional tiene influencia solamente en los asientos inmediatos y en los asientos por consolidación; los asientos secundarios ó a largo plazo son consecuencia de los procesos de degradación de la materia orgánica.

Grisolia y Napoleoni (1996) expresaban que la presencia de fluidos modifica las propiedades de los materiales sólidos originando diferencias en el comportamiento general. Algunos componentes de los residuos, ricos en microporos como papel, madera, telas, etc. pueden absorber gran cantidad de líquido que bajo cargas o por el efecto del tiempo, pueden causar variaciones en su estado físico y en las propiedades mecánicas. Powrie et al (1998) expresaban que el aumento del contenido de humedad en una masa de residuos contribuye en el aumento de la velocidad de degradación, sin embargo aumentando la velocidad del flujo sin variar el contenido de humedad, aumenta la generación de metano entre un 25% y un 50%. También afirman que la velocidad de degradación de los residuos depende de la velocidad en que el agua circula por los mismos.

En los vertederos estudiados por Yen & Scalon (1975) durante nueve años, concluyeron que la velocidad de asentamiento decrece linealmente con el logaritmo de la edad media del relleno. Palma (1995) en coincidencia con otros autores, afirman que la velocidad de asentamiento decrece con el tiempo y aumenta con la profundidad.

# CAPÍTULO III



## MODELOS TEÓRICOS DE COMPRESIBILIDAD

### **III. MODELOS TEÓRICOS DE COMPRESIBILIDAD**

---

#### **III.1. INTRODUCCIÓN**

Los rellenos sanitarios sufren asentamientos por compresión durante su construcción y después de su clausura. Este proceso puede extenderse en el tiempo y depende de un gran número de variables. Cuantificar la compresibilidad del relleno a través de relaciones matemáticas es actualmente un gran desafío para los proyectistas de este tipo de obras.

La obtención de estimaciones confiables de este complejo proceso les permitiría a los ingenieros diseñar rellenos con mayores inclinaciones de taludes asegurando su estabilidad, tener un mayor control sobre el sellado del relleno, sobre los sistemas de drenaje y aumentar la vida útil de estos reservorios, que generalmente tienen su capacidad subestimada.

Una forma de abordar el análisis de la compresibilidad en los rellenos sanitarios es la utilización de la experiencia en el comportamiento de materiales blandos que brinda la Geotecnia, siendo varios los autores que utilizan teorías similares a las propuestas por la Mecánica de Suelos, a través de modelos matemáticos: *Referencia: Ghislane (2000)*.

Estos modelos matemáticos, planteados en la bibliografía internacional, se basan en los conceptos formulados por la Mecánica de Suelos para estimar los asientos y tiempos asociados en procesos de consolidación de estratos arcillosos. Pero es cuestionada la validez de utilizar estos modelos, ya que el residuo presenta un comportamiento complejo controlado por la degradación química y la descomposición biológica de la materia orgánica, fenómenos que dependen de factores ambientales y sociales, característicos de cada lugar. Se considera que estos resultados dados por ecuaciones empíricas pueden ser una importante estimación del valor de los asientos en un relleno, siempre y cuando estén acompañados de resultados experimentales.

En este capítulo se presentarán los modelos más utilizados para el análisis de la compresibilidad de los RSU, como son los modelos de Sowers (1973), Yen & Scalon (1975), Gandola et al (1994) y Meruelo (1995).

### III.2. MODELO DE SOWERS (1973)

Sowers (1973) fue el primero en plantear un modelo de compresibilidad para los RSU. Este modelo se basa en la clásica Teoría de la Consolidación propuesta por Terzaghi (1943). Según el autor, la compresibilidad de los residuos sólidos puede dividirse en una compresibilidad inicial y primaria, más una compresibilidad secundaria, según

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log \frac{\sigma_{v0'} + \Delta \sigma_{v0'}}{\sigma_{v0'}} \quad (\text{III.1})$$

Donde:

$S_p$  = asiento al final de la consolidación primaria

$H_0$  = altura inicial del relleno

$C_c$  = coeficiente de compresibilidad

$\sigma_{v0'}$  = presión efectiva en el relleno

$\Delta \sigma_{v0'}$  = sobrecarga efectiva

$e_0$  = relación de vacíos

La compresión inicial y primaria se produce rápidamente, en un periodo aproximado de un mes, sin que se generen grandes incrementos de presión intersticial. La presión intersticial ó presión de poros “u” es la presión actuante en el agua contenida en los vacíos de la masa de RSU. Según la *Ley de Terzaghi* ( $\sigma = \sigma' + u$ ) la tensión total  $\sigma$  actuante sobre la masa de residuos, se puede descomponer en una tensión efectiva  $\sigma'$  sobre la fracción sólida de los mismos y  $u$  la presión intersticial actuante en los poros que contiene agua.

Terminada esta primera fase se inician los asientos producto de cambios físico-químicos, degradación biológica y compresión mecánica secundaria. Estos asientos tienen un

comportamiento más o menos lineal con el logaritmo del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos, y se determinan mediante la siguiente expresión:

$$S_s = \frac{C \alpha}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{III.2})$$

Donde:

$S_s$  = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo  $t_2$

$H$  = altura de la celda al tiempo  $t_1$

$C\alpha$  = índice de compresión secundaria

$t_2$  = tiempo de estimación de asientos

$t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

$e_0$  = relación de vacíos

La obtención del coeficiente de compresibilidad “ $C_c$ ” y del índice de compresión secundaria “ $C\alpha$ ” se realiza a partir de la relación de vacíos “ $e_0$ ” en los gráficos propuestos por Sowers (1973) en la Figura III.1.

Como podemos ver en los gráficos de Sowers, para la determinación del coeficiente de compresibilidad “ $C_c$ ” existe una gran dispersión en función de la composición de los residuos.

$C_c = 0,15.e_0$  para bajo contenido de materia orgánica.

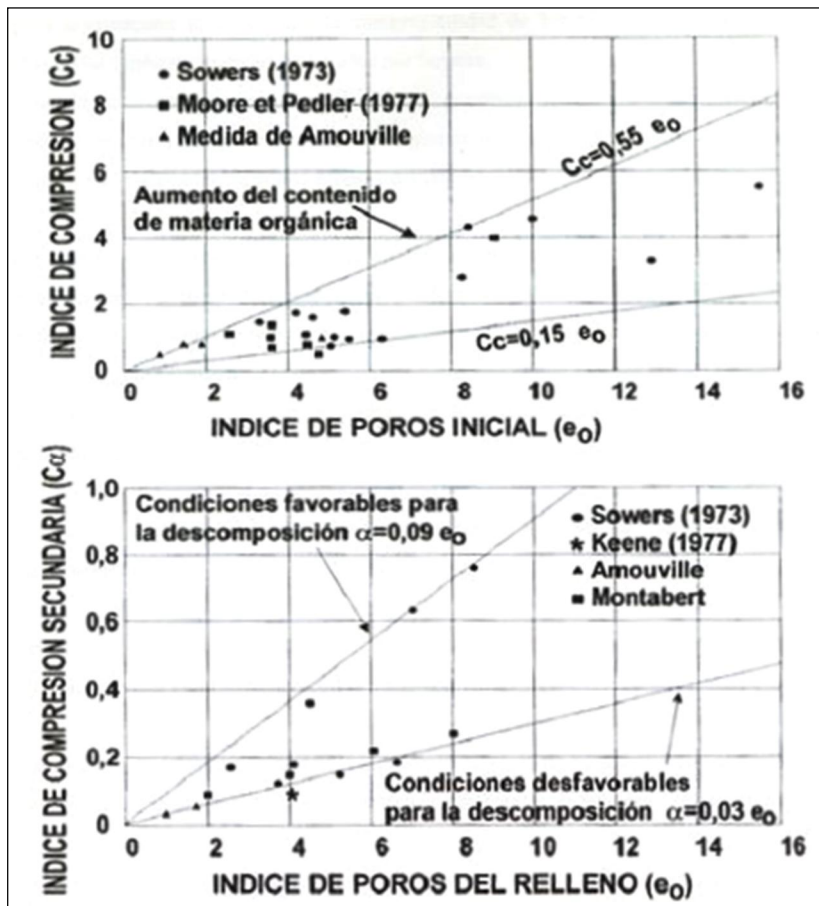
$C_c = 0,55.e_0$  para alto contenido de materia orgánica.

El coeficiente de compresión secundaria “ $C\alpha$ ” varía mucho según las condiciones de descomposición sean favorables ó no. Así su valor es mayor en climas cálidos y húmedos y cuando el nivel freático sufre variaciones que aportan aire fresco al relleno sanitario.

$C\alpha = 0,03.e_0$  desfavorables para la descomposición.

$C\alpha = 0,09.e_0$  favorables para la descomposición.

Estos parámetros han sido contrastados por diversas experiencias controladas, dando una adecuada correlación cuando se trata de residuos con alto contenido de materia orgánica. Este criterio ha sido el más empleado a nivel internacional para predecir los asientos en un relleno sanitario.



**Figura III.1** Parámetros de compresibilidad para rellenos sanitarios (Sowers, 1973)

Una conclusión interesante que se ha podido observar es que la compresión primaria es dominante en la producción de asientos en la fase de operación del vertedero y la compresión secundaria es la más evidente una vez que ha concluido la operación del relleno. *Referencia: Ghislane (2000).*

Según Wall & Zeiss (1995) existen indicios significativos de que el mecanismo de compresión primaria en residuos sólidos no puede explicarse basándose en la hipótesis de Terzaghi, porque los rellenos rara vez están saturados y además la permeabilidad de los residuos es del mismo orden de magnitud que las arenas y gravas, de manera que las presiones intersticiales no se desarrollan en este proceso ya que el líquido puede escapar rápidamente de la masa de residuos.

Por ello cabe destacar que la propuesta de Sowers tiene una limitación de partida en la utilización de la Teoría de la Consolidación de Terzaghi-Frolich, que implica la aceptación de hipótesis tales como la saturación completa del relleno, lo que es de dudoso cumplimiento para un relleno sanitario. En la práctica, el principal problema lo constituyen la dificultad para obtener muestras representativas de los materiales para estudio, y la falta de métodos de ensayos y equipos de laboratorio para realizar mediciones confiables.

El modelo de Sowers predice para los asientos a largo plazo un proceso indefinido donde el asiento final tiende a infinito, por lo que el modelo debe utilizarse para la predicción de asientos para tiempos determinados. Otros tipos de asientos como los producidos por colapsos, combustión o la interacción de otros fenómenos no pueden ser estimados por este modelo.

Las mayores dificultades, pues, radican en el ajuste de los parámetros  $C_c$  y  $C_\alpha$ , como también en la estimación de la relación de vacíos de los residuos. Una solución que se puede plantear para salvar esta dificultad es tomar como parámetros las siguientes expresiones:

$$C_c' = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (III.3)$$

$$C_\alpha' = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \quad (III.4)$$

Por lo que la ecuación para el cálculo de la magnitud de la *Consolidación Primaria* es:



$$S_p = C_c' \cdot H_0 \cdot \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta \sigma_{v0}'}{\sigma_{v0}'} \quad (\text{III.5})$$

La expresión para conocer  $C_c$  es la siguiente:

$$C_c' = \frac{\Delta s}{H_0 \cdot \log \left( \frac{\sigma_{v0}' + \Delta \sigma_{v0}'}{\sigma_{v0}'} \right)} \quad (\text{III.6})$$

La *Consolidación Secundaria* ó a largo plazo se expresa por la siguiente relación:

$$S_s = C_\alpha' \cdot H_0 \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{III.7})$$

La compresión secundaria está asociada a los procesos de “creep” (fluencia lenta bajo carga constante) y de biodegradación de la materia orgánica, y es dependiente del tiempo. Puede ser expresada en términos del Índice de Compresión Secundaria por la siguiente expresión:

$$C_\alpha' = \frac{\Delta s}{H_0 \cdot \log \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (\text{III.8})$$

Muchas incertidumbres están envueltas en la evaluación de la compresibilidad de los RSU y se cuestiona la validez de resultados calculados utilizando la clásica teoría unidimensional de consolidación de suelos. Según Manassero et al (1997), la utilización de la teoría de la consolidación está limitada por las siguientes razones:

- a) El uso de las relaciones de compresión y recompresión son dependientes del valor inicial de la relación de vacíos y la altura inicial del relleno, y estas propiedades normalmente no son conocidas.

- b) Las relaciones  $(e-\log \sigma)$  ó  $(e-\log t)$  frecuentemente no son lineales y por lo tanto los coeficientes de compresión  $C_c$  y  $C_\alpha$  varían considerablemente con la tensión inicial dentro del relleno y estas tensiones varían con el tiempo.
- c) La cantidad de asiento primario depende de la tensión efectiva, que a su vez es función del peso unitario de los residuos y del nivel de lixiviados, los cuales pueden ser muy poco conocidos y variables con el tiempo.

A pesar de esto, pueden emplearse valores conservadores de parámetros de compresibilidad para una estimación del orden de magnitud general de los asientos que debería esperarse durante las distintas fases y periodos post clausura y vida activa del relleno.

Existen observaciones que muestran que los parámetros involucrados en los modelos teóricos son muy sensibles a las condiciones particulares de cada relleno sanitario. De igual forma las experiencias realizadas han demostrado la necesidad de profundizar las investigaciones en rellenos sanitarios que responden a diferentes contextos, con el propósito de obtener modelos de comportamiento propios a cada uno de ellos.

### III.3. MODELO DE YEN & SCALON (1975)

Los autores realizaron un estudio basado en observaciones de campo a lo largo de nueve años en tres vertederos cuya profundidad estaba comprendida entre 6 y 38m, y sugirieron que los asientos en vertederos sanitarios sean calculados en términos de velocidad.

Fue propuesto que la velocidad de asiento sigue una ley de disminución lineal con el logaritmo del tiempo, como expresa la siguiente ecuación:

$$V = (V_1 - b * \log t) \quad \text{(III.9)}$$

Donde:

V = velocidad de asientos (mm/mes)

$V_1$  = velocidad de asiento en  $t = 1$  mes (mm/mes)

$b$  = pendiente de la recta

$t$  = tiempo de estimación de la velocidad (meses)

La velocidad de asiento que sugieren los autores proporciona una velocidad inicial infinita; no obstante la velocidad decrece con el tiempo, llegando a cero cuando ha pasado un periodo de 200 ó 300 meses. Ellos observaron que en general los asientos son mayores en vertederos con más profundidad, sin embargo sugieren un límite de profundidad a partir del cual el asiento no aumenta significativamente, relacionado al paso de un ambiente aeróbico, en el que la descomposición biológica es muy activa, a otro anaeróbico, en que los procesos de descomposición son más lentos.

Con la idea de analizar la tendencia de la velocidad de los asientos, los autores hicieron un estudio comparativo entre sus propios datos y los obtenidos por Sowers. Y como conclusión, sugieren un procedimiento para obtener la velocidad de asentamiento partiendo de la ecuación (III.5) dada por Sowers, dividiendo ambos miembros por el tiempo de duración del fenómeno. Así llegan a la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta H}{t_2 - t_1} = \frac{C\alpha}{1 + e} \cdot \frac{H}{t_2 - t_1} \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{III.10})$$

Donde:

$\Delta H$  = asientos totales (mm)

$C\alpha$  = índice de compresión secundaria

$H$  = altura inicial del relleno (mm)

$e$  = relación de vacíos

$t_2$  = tiempo final (meses)

$t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria (meses)

La velocidad de asiento en (mm/mes) viene expresada por:

$$m = \frac{\Delta H}{t_2 - t_1} \quad (\text{III.11})$$

Por consiguiente la ecuación se transforma en:

$$m = \frac{C\alpha}{1+e} \cdot \frac{H}{t_2-1} \cdot \log t \quad (\text{III.12})$$

Donde:

$t_1 = 1$  mes

$t = t_2$  tiempo para el cual se calcula la velocidad de asiento “m” en meses

La ecuación (III.12) puede ser utilizada para calcular la velocidad de asientos para un relleno sanitario dado, usando los valores de  $C\alpha$  sugeridos por Sowers.

Yen & Scalon (1975) encontraron que las velocidades de asientos eran mayores en rellenos en los que las condiciones fuesen favorables a la descomposición, por otro lado Landva et al (1984) mostraron que no hay ninguna diferencia entre velocidades de compresión secundaria entre rellenos antiguos y rellenos jóvenes. Rao et al (1977) a través de ensayos señalan que los efectos de la descomposición biológica no afectan de forma significativa a la velocidad de compresión secundaria. *Referencia: Ghislane (2000).*

#### **III.4. MODELO DE GANDOLA (1994)**

Gandola et al (1994), basándose en resultados experimentales efectuados con lisímetros, formularon un modelo exponencial para previsión de asientos no provocados por variación de cargas. Los autores hicieron una interpolación analítica de las mediciones efectuadas para establecer una función matemática que pudiera expresar las variaciones de asiento en

función del tiempo, considerando como condición inicial asientos nulos y como condición final asientos tendientes a un valor asintótico.

Los autores proponen una ecuación de ajuste entre los valores medidos y los teóricos que permite calcular los parámetros “a” y “k” mediante ajuste por mínimos cuadrados. La expresión tiene la forma siguiente:

$$S_s = a \cdot H \cdot (1 - e^{-kt}) \quad \text{(III.13)}$$

Donde:

S = asientos

H = espesor inicial del relleno

a = constante

k = constante

t = tiempo de estimación de asientos

Los valores de los parámetros “a” y “k” recogidos de la literatura técnica los podemos ver en la Tabla III.1.

**Tabla III.1**

Valores de “a” y “k” recogidos de la literatura técnica.

AUTORES	PALMA (1995)	MARIANO (1999)	Observaciones
<b>PARÁMETROS</b>			
<b>a</b>	0,031 a 0,23	0,02 a 0,61	Ensayos de campo
<b>k</b>	0,0001 a 0,0003	0,0002 a 0,0004	Ensayos de campo

Según Palma (1995), el asiento unitario final del relleno corresponde al valor del parámetro “a”, en tanto un parámetro “k” rige el ritmo de degradación decreciente con el tiempo, a semejanza de las leyes que rigen procesos de reacción química, y como también ocurre en el comportamiento de los suelos.

### **III.5. MODELO MERUELO (1995)**

Este modelo fue desarrollado por el Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, España, con colaboración de investigadores del Grupo de Geotecnia de la Universidad Católica de Valparaíso. *Referencia: Palma (1995), Espinace et al (1999).*

El modelo pretende predecir los asientos que ocurren en un relleno sanitario a partir de una formulación que incorpora y relaciona los parámetros fundamentales que determinan los procesos de degradación, como el tiempo, el contenido de materia orgánica y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación.

En el planteamiento de este modelo se consideran solamente los asientos que son dependientes del tiempo, es decir los que se deben a la descomposición de la materia orgánica biodegradable. También se consideraron los aportes de masa que se producen durante la etapa de explotación de un vertedero.

Este modelo implica que para un periodo de tiempo prolongado la materia orgánica biodegradable debería desaparecer en su totalidad. Sin embargo, se debe considerar que una parte de los RSU no son orgánicos y por lo tanto no sufren degradación, y por otra parte no toda la materia orgánica se degrada. Para aplicar los procesos de degradación solo al material susceptible de sufrir degradación, se puede optar por determinar la cuantía del material degradado con relación al total de los residuos sólidos.

Si se hace la diferencia entre el total del material aportado y el material remanente en cualquier momento (t), se puede determinar el material degradado en ese momento. En todo caso, esto supone solo una estimación de la masa de material degradado, expresada como

una proporción del total. Habrá en consecuencia que establecer una relación de la degradación con los asientos producidos en el relleno sanitario.

El proceso de pérdida de masa y volumen se puede descomponer en dos sumandos: uno a volumen constante, que se manifiesta como pérdida de densidad; y otro a densidad constante, que da lugar a un cambio de volumen y en consecuencia, a asientos.

Sobre la relación entre el total de pérdida de masa y de pérdida de volumen, parece razonable considerarla como una constante para todos los residuos, que sea independiente del tiempo y del estado tensional.

Por lo tanto, los asientos se expresan para todo el periodo posterior a la etapa de explotación de un relleno como función de los siguientes parámetros en la forma:

$$S_s = \alpha \cdot H \cdot COD \cdot \left[ 1 - \frac{1}{Kh \cdot T_c} \cdot \left( e^{-Kh \cdot (t - T_c)} - e^{-Kh \cdot t} \right) \right] \quad (\text{III.14})$$

Donde:

$S_s$  = asientos (mm)

$\alpha$  = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos

$H$  = espesor del relleno sanitario (mm)

$COD$  = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (%)

$T_c$  = tiempo de construcción del relleno (días)

$Kh$  = coeficiente de hidrólisis (días<sup>-1</sup>)

$t$  = tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)

En esta expresión se reproducen las formulaciones para la degradación de residuos orgánicos, modificadas para tener en cuenta la masa de residuos que experimentan en forma continua la degradación y que ha sido aportada durante un tiempo determinado con un ritmo constante. Además, el material degradado (y con el remanente) se expresa como una fracción del total del material del relleno.

En cuanto a la relación entre el volumen de asiento producido y el correspondiente a la masa perdida por degradación, el coeficiente “ $\alpha$ ” se considera constante y característico del tipo de relleno y de los residuos depositados.

La expresión permite plantear en consecuencia la predicción de asientos a largo plazo en un relleno de residuos compactados. De todos modos, la dificultad, ya planteada inicialmente, para determinar la cota de superficie al inicio del proceso de degradación, hace adecuado expresar los asientos en términos de descenso con respecto a un momento determinado, considerado como inicial.

Hay que señalar que las condiciones reales en un relleno sanitario se obtienen con respecto a una primera nivelación llevada a cabo en un momento  $t_0 > T_c$ . Introduciendo esto se llega a la expresión que refleja la producción de asientos:

$$\Delta S = \frac{\alpha \cdot H \cdot COD}{Kh \cdot T_c} \cdot (1 - e^{-Kh \cdot T_c}) \cdot (e^{-Kh \cdot t} - e^{-Kh \cdot t_0}) \quad (III.15)$$

Donde:

$\Delta S$  = asientos medidos (mm)

$t_0$  = edad del relleno al inicio de las mediciones (días)

A partir de esta ecuación se pueden predecir los asientos a lo largo del tiempo. También se puede estimar el coeficiente de pérdida de masa “ $\alpha$ ”, y ajustar otros valores como el coeficiente de hidrólisis “ $Kh$ ”. Los autores que proponen este modelo observan que la velocidad de asiento no es lineal con el logaritmo del tiempo, cuando se consideran periodos de tiempo muy prolongados ( $\Delta t > 5-10$  años).



# CAPÍTULO IV



## ANÁLISIS COMPARATIVOS DE MODELOS DE COMPRESIBILIDAD

## IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE COMPRESIBILIDAD

---

### IV.1. INTRODUCCIÓN

Para este análisis comparativo se evalúan los modelos de Sowers, Meruelo y Gandola. Inicialmente se realiza un análisis paramétrico para cada modelo separadamente, estudiando la sensibilidad de cada formulación a la variación de los distintos parámetros. Son revisadas las hipótesis asumidas, el sentido físico de cada parámetro, y su forma de ajuste. Para concluir, se hace un análisis comparativo a fin de resaltar potencialidades y limitaciones de cada modelo.

### IV.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

#### IV.2.1. Modelo de Sowers

a) Consolidación Primaria (1 mes):

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log \frac{\sigma_{v0'} + \Delta \sigma_{v0'}}{\sigma_{v0'}} \quad (\text{IV.1})$$

Donde:

$S_p$  = asiento al final de la consolidación primaria

$H_0$  = altura inicial del relleno

$C_c$  = coeficiente de compresibilidad

$\sigma_{v0'}$  = presión efectiva en el relleno

$\Delta \sigma_{v0'}$  = sobrecarga efectiva

$e_0$  = relación de vacíos

**b) Consolidación Secundaria (A partir de 1 mes):**

$$S_s = \frac{C}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{IV.2})$$

Donde:

$S_s$  = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo  $t_2$

$H$  = altura de la celda al tiempo  $t_1$

$C\alpha$  = índice de compresión secundaria

$t_2$  = tiempo de estimación de asientos

$t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

$e_0$  = relación de vacíos

**c) Hipótesis: Crecimiento logarítmico de los asientos**

- Magnitud de los asientos primarios controlada por:
  - a) Compresibilidad  $C_c$
  - b) Nivel de sobrecarga
- Magnitud de los asientos secundarios controlada por:
  - a) Compresibilidad  $C\alpha$
  - b) Tiempo
- Para las variaciones del Coeficiente de Compresibilidad  $C_c$  y del Índice de Compresión Secundaria  $C\alpha$ :

$C_c = 0,15.e_0$  para bajo contenido de materia orgánica

$C_c = 0,55.e_0$  para alto contenido de materia orgánica

$C\alpha = 0,03.e_0$  en condiciones desfavorables para la descomposición

$C\alpha = 0,09.e_0$  en condiciones favorables para la descomposición

### IV.2.1.1. Análisis de la Consolidación Primaria

- Variaciones: 1 -  $C_c/(1+e_0)$   
 2 -  $\sigma_{vo}$   
 3 -  $\Delta\sigma_{vo}$

**Tabla IV.1**  
 Variación de  $C_c$

	$e_0$	$C_c$	H	$\sigma_{vo}$	$\Delta\sigma_{vo}$	Sp (%)
<b><math>C_c = 0,15.e_0</math></b>		<b>0,15</b>				
	2	0,3	1	1	1	0,0301
	4	0,6	1	1	1	0,0361
	6	0,9	1	1	1	0,0387
	8	1,2	1	1	1	0,0401
<b><math>C_c = 0,35.e_0</math></b>		<b>0,35</b>				
	2	0,7	1	1	1	0,0702
	4	1,4	1	1	1	0,0843
	6	2,1	1	1	1	0,0903
	8	2,8	1	1	1	0,0937
<b><math>C_c = 0,55.e_0</math></b>		<b>0,55</b>				
	2	1,1	1	1	1	0,1104
	4	2,2	1	1	1	0,1325
	6	3,3	1	1	1	0,1419
	8	4,4	1	1	1	0,1472

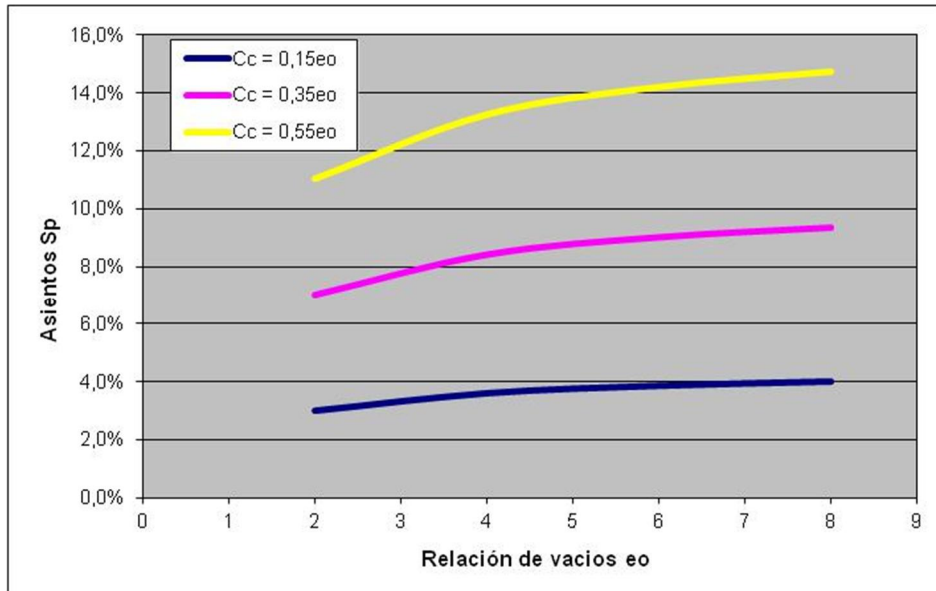


Figura IV.1 Valores de asientos para variaciones de Cc

Tabla IV.2

Variación de  $\sigma_{vo}$

	eo	Cc	H	$\sigma_{vo}$	$\Delta\sigma_{vo}$	Sp (%)
<b><math>\sigma_{vo} = 0,5</math></b>		<b>0,35</b>		<b>0,5</b>		
	2	0,7	1	0,5	1	0,1113
	4	1,4	1	0,5	1	0,1336
	6	2,1	1	0,5	1	0,1431
	8	2,8	1	0,5	1	0,1484
<b><math>\sigma_{vo} = 1</math></b>		<b>0,35</b>		<b>1</b>		
	2	0,7	1	1	1	0,0702
	4	1,4	1	1	1	0,0843
	6	2,1	1	1	1	0,0903
	8	2,8	1	1	1	0,0937

$\sigma_{vo} = 1,5$		0,35		1,5		
	2	0,7	1	1,5	1	0,0518
	4	1,4	1	1,5	1	0,0621
	6	2,1	1	1,5	1	0,0666
	8	2,8	1	1,5	1	0,0690

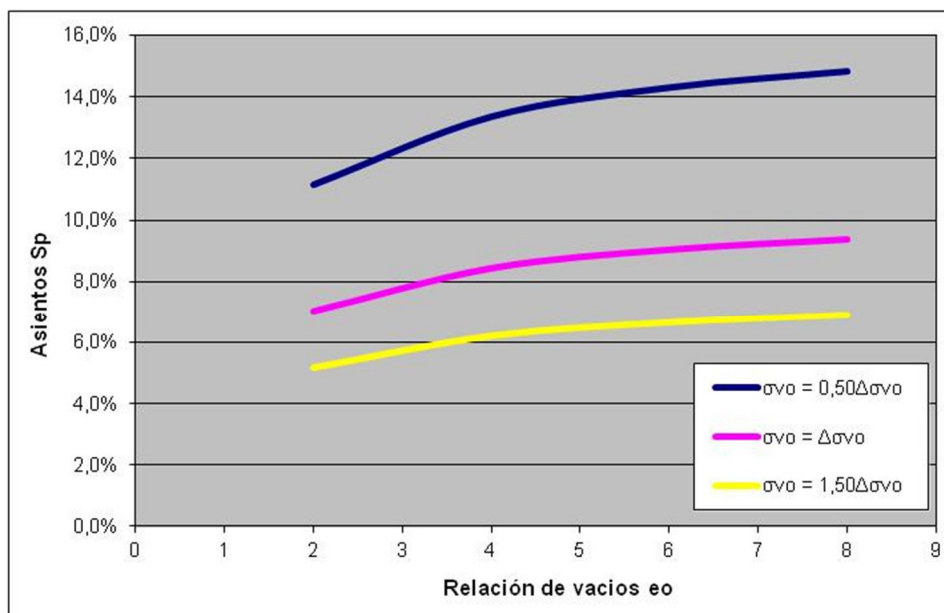
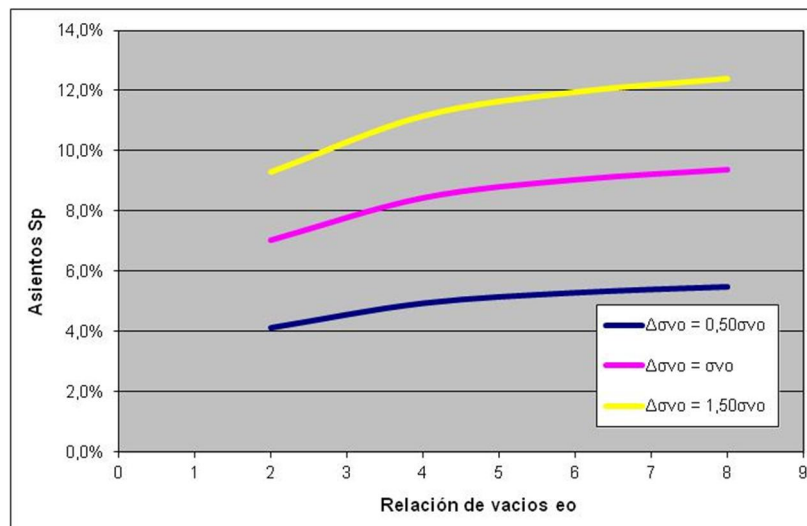


Figura IV.2 Valores de asientos para variaciones de  $\sigma_{vo}$

**Tabla IV.3**  
 Variación de  $\Delta\sigma_{vo}$

	eo	Cc	H	$\sigma_{vo}$	$\Delta\sigma_{vo}$	Sp (%)
<b><math>\Delta\sigma_{vo} = 0,5</math></b>		<b>0,35</b>		<b>1</b>	<b>0,5</b>	
	2	0,7	1	1	0,5	0,0411
	4	1,4	1	1	0,5	0,0493
	6	2,1	1	1	0,5	0,0528
	8	2,8	1	1	0,5	0,0548
<b><math>\Delta\sigma_{vo} = 1</math></b>		<b>0,35</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	
	2	0,7	1	1	1	0,0702
	4	1,4	1	1	1	0,0843
	6	2,1	1	1	1	0,0903
	8	2,8	1	1	1	0,0937
<b><math>\Delta\sigma_{vo} = 1,5</math></b>		<b>0,35</b>		<b>1</b>	<b>1,5</b>	
	2	0,7	1	1	1,5	0,0929
	4	1,4	1	1	1,5	0,1114
	6	2,1	1	1	1,5	0,1194
	8	2,8	1	1	1,5	0,1238



**Figura IV.3** Valores de asientos para variaciones de  $\Delta\sigma_{vo}$

**Tabla IV.4**

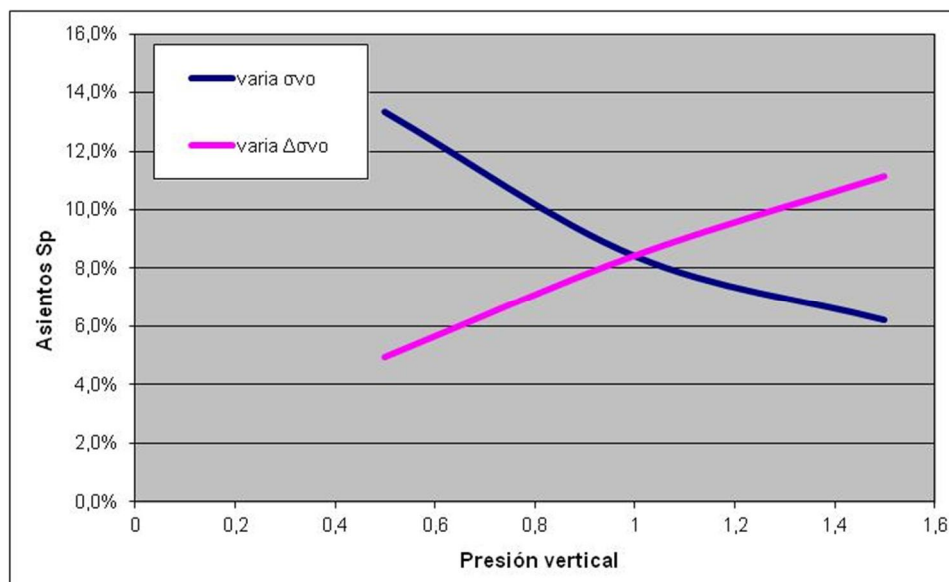
Evolución de los asentamientos en función de  $\sigma_{vo}$

eo	Cc	H	$\sigma_{vo}$	$\Delta\sigma_{vo}$	Sp (%)
4	1,4	1	0,5	1	0,13359
4	1,4	1	1	1	0,08429
4	1,4	1	1,5	1	0,06212

**Tabla IV.5**

Evolución de los asentamientos en función de  $\Delta\sigma_{vo}$

eo	Cc	H	$\sigma_{vo}$	$\Delta\sigma_{vo}$	Sp (%)
4	1,4	1	1	0,5	0,04931
4	1,4	1	1	1	0,08429
4	1,4	1	1	1,5	0,11142



**Figura IV.4** Valores de Asientos – Presión Vertical para variaciones de  $\sigma_{vo}$  y  $\Delta\sigma_{vo}$



**Análisis de los resultados:**

**a) Figura IV.1**

El gráfico expresa que, a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el relleno sanitario, aumenta  $C_c$ , lo que implica un aumento del asiento.

**b) Figura IV.2**

Para un crecimiento de  $\sigma_{vo}$ , se reduce el asiento, porque para una misma altura del relleno sanitario, el RSU es más denso, por lo tanto el asiento es menor.

**c) Figura IV.3**

Podemos asimilarlo a tres rellenos sanitarios con igual presión efectiva  $\sigma_{vo}$ , lo que indicaría igual densidad en los tres rellenos. Si en esta condición incrementamos la  $\Delta\sigma_{vo}$ , esto lógicamente daría lugar a un aumento del asiento.

**d) Figura IV.4**

Tomando un valor medio de la relación de vacíos, podemos ver la evolución de los asientos decrecientes para variaciones de  $\sigma_{vo}$  (capas del relleno más densas) y asientos crecientes para variaciones de  $\Delta\sigma_{vo}$  (espesor de las nuevas capas).

**IV.2.1.2. Análisis de la Consolidación Secundaria**

**Variación:**  $C\alpha/(1+e_0)$

**Tabla IV.6**

Variaciones de  $e_0$

	<b><math>e_0</math></b>	<b><math>C\alpha</math></b>	<b>H</b>	<b><math>t_1</math></b>	<b><math>t_2</math></b>	<b>Ss (%)</b>
<b><math>C\alpha = 0,03.e_0</math></b>	<b>2</b>					
		0,06	1	30	30	0,0000
		0,06	1	30	100	0,0105
		0,06	1	30	200	0,0165
		0,06	1	30	400	0,0225
		0,06	1	30	800	0,0285
		0,06	1	30	1500	0,0340
		0,06	1	30	3000	0,0400

<b>C<math>\alpha</math> = 0,03.eo</b>		0,06	1	30	5000	0,0444
	<b>4</b>					
		0,12	1	30	30	0,0000
		0,12	1	30	100	0,0209
		0,12	1	30	200	0,0330
		0,12	1	30	400	0,0450
		0,12	1	30	800	0,0570
		0,12	1	30	1500	0,0680
		0,12	1	30	3000	0,0800
<b>C<math>\alpha</math> = 0,03.eo</b>	<b>6</b>					
		0,18	1	30	30	0,0000
		0,18	1	30	100	0,0314
		0,18	1	30	200	0,0494
		0,18	1	30	400	0,0675
		0,18	1	30	800	0,0856
		0,18	1	30	1500	0,1019
		0,18	1	30	3000	0,1200
		0,18	1	30	5000	0,1333

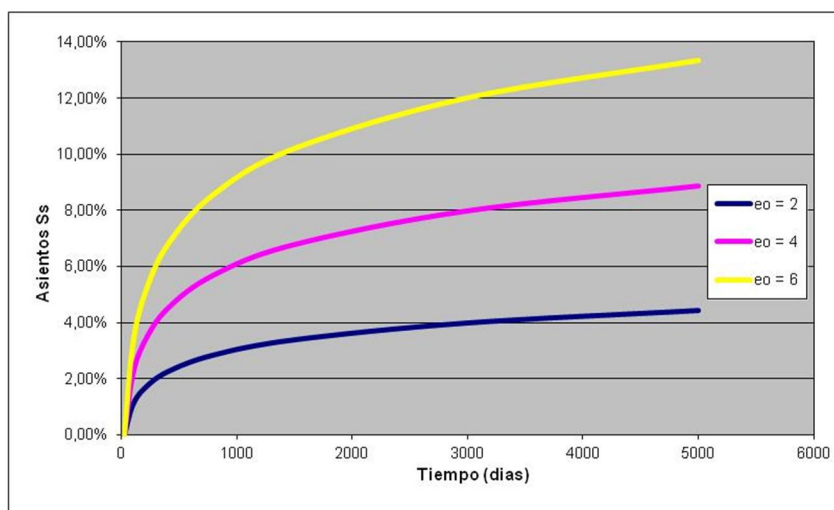
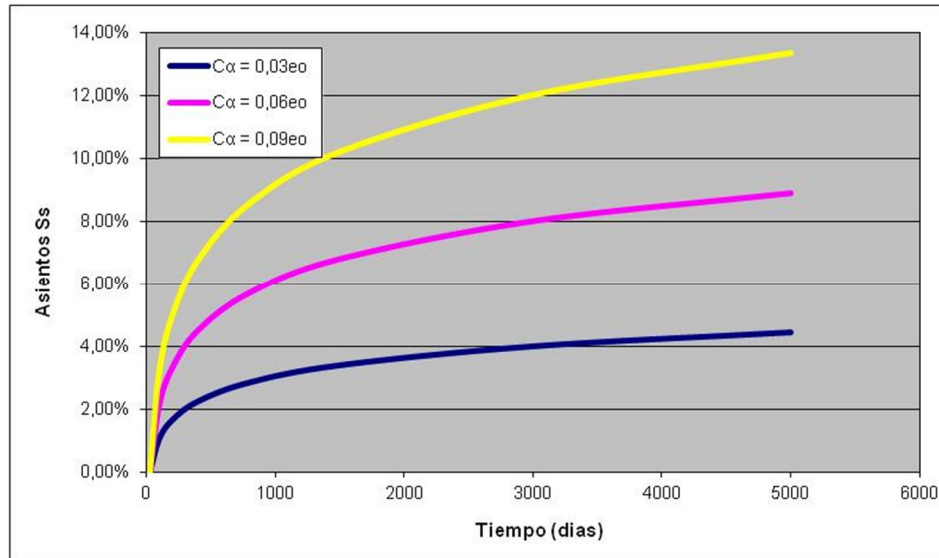


Figura IV.5 Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de eo

**Tabla IV.7**  
 Variaciones de  $C\alpha$

	eo	$C\alpha$	H	$t_1$	$t_2$	Ss (%)
<b><math>C\alpha = 0,03.eo</math></b>	<b>2</b>					
		0,06	1	30	30	0,0000
		0,06	1	30	100	0,0105
		0,06	1	30	200	0,0165
		0,06	1	30	400	0,0225
		0,06	1	30	800	0,0285
		0,06	1	30	1500	0,0340
		0,06	1	30	3000	0,0400
	0,06	1	30	5000	0,0444	
<b><math>C\alpha = 0,06.eo</math></b>	<b>2</b>					
		0,12	1	30	30	0,0000
		0,12	1	30	100	0,0209
		0,12	1	30	200	0,0330
		0,12	1	30	400	0,0450
		0,12	1	30	800	0,0570
		0,12	1	30	1500	0,0680
		0,12	1	30	3000	0,0800
	0,12	1	30	5000	0,0889	
<b><math>C\alpha = 0,09.eo</math></b>	<b>2</b>					
		0,18	1	30	30	0,0000
		0,18	1	30	100	0,0314
		0,18	1	30	200	0,0494
		0,18	1	30	400	0,0675
		0,18	1	30	800	0,0856
		0,18	1	30	1500	0,1019
		0,18	1	30	3000	0,1200
	0,18	1	30	5000	0,1333	



**Figura IV.6** Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de  $C\alpha$

#### **Análisis de los resultados:**

##### **a) Figura IV.5**

A medida que aumenta la relación de vacíos  $e_o$ , indica aumento del asiento. El crecimiento de los asientos es con tasas decrecientes, habiendo un rápido crecimiento de los asientos los primeros meses, y un lento crecimiento de los mismos para tiempos mayores.

##### **b) Figura IV.6**

En la condición más desfavorable para la descomposición  $C\alpha = 0,03.e_o$  el asiento es menor y en la condición favorable  $C\alpha = 0,09.e_o$  el asiento es mayor. Lógicamente, un relleno sanitario con una condición favorable para la descomposición da lugar a mayores asientos, por tener mayor contenido de materia orgánica y escenarios climáticos que permiten la degradación, como climas húmedos que benefician la degradación biológica.

### IV.2.2. Modelo Meruelo

$$S_s = \alpha \cdot H \cdot COD \cdot \left[ 1 - \frac{1}{Kh \cdot T_c} \cdot \left( e^{-Kh \cdot (t-T_c)} - e^{-Kh \cdot t} \right) \right] \quad (IV.3)$$

Donde:

$S_s$  = asientos (mm)

$\alpha$  = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos

$H$  = espesor del relleno sanitario (mm)

$COD$  = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (%)

$T_c$  = tiempo de construcción del relleno (días)

$Kh$  = coeficiente de hidrólisis (días<sup>-1</sup>)

$t$  = tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)

#### Hipótesis: crecimiento del tipo exponencial con límite asintótico de los asientos.

- La expresión:  $\alpha \cdot COD$  = controla la magnitud final de los asientos
- $Kh$  = tasa de crecimiento de los asientos que son no lineales.
  - $Kh$  muy chico  $\Rightarrow$  tasa casi lineal
  - $Kh$  grande  $\Rightarrow$  tasa altamente no lineal

**Tabla IV.8**

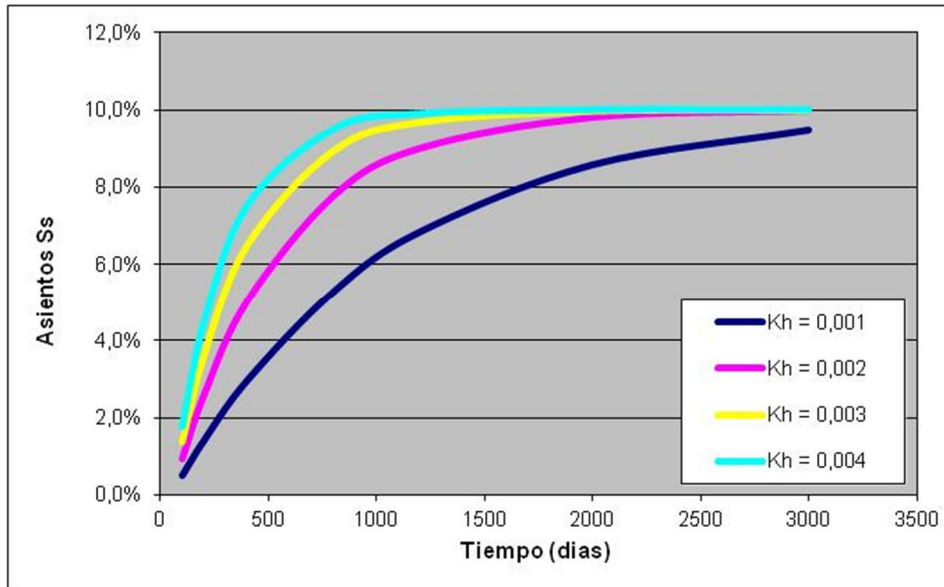
Variaciones de  $Kh$

H	$\alpha \cdot COD$	Kh	Tc	t	$e^{Kh \cdot t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
		<b>0,001</b>						
1	0,1		100	100	0,90	1,00	0,05	0,00
1	0,1		100	200	0,82	0,90	0,14	0,01
1	0,1		100	400	0,67	0,74	0,30	0,03
1	0,1		100	800	0,45	0,50	0,53	0,05
1	0,1		100	1200	0,30	0,33	0,68	0,07
1	0,1		100	2000	0,14	0,15	0,86	0,09
1	0,1		100	3000	0,05	0,06	0,95	0,09

H	$\alpha$ .COD	Kh	Tc	t	$e^{Kh.t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
		<b>0,002</b>						
1	0,1		100	100	0,82	1,00	0,09	0,01
1	0,1		100	200	0,67	0,82	0,26	0,03
1	0,1		100	400	0,45	0,55	0,50	0,05
1	0,1		100	800	0,20	0,25	0,78	0,08
1	0,1		100	1200	0,09	0,11	0,90	0,09
1	0,1		100	2000	0,02	0,02	0,98	0,10
1	0,1		100	3000	0,00	0,00	1,00	0,10

H	$\alpha$ .COD	Kh	Tc	t	$e^{Kh.t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
		<b>0,003</b>						
1	0,1		100	100	0,74	1,00	0,14	0,01
1	0,1		100	200	0,55	0,74	0,36	0,04
1	0,1		100	400	0,30	0,41	0,65	0,06
1	0,1		100	800	0,09	0,12	0,89	0,09
1	0,1		100	1200	0,03	0,04	0,97	0,10
1	0,1		100	2000	0,00	0,00	1,00	0,10
1	0,1		100	3000	0,00	0,00	1,00	0,10

H	$\alpha$ .COD	kh	Tc	T	$e^{Kh.t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
		<b>0,004</b>						
1	0,1		100	100	0,67	1,00	0,18	0,02
1	0,1		100	200	0,45	0,67	0,45	0,04
1	0,1		100	400	0,20	0,30	0,75	0,08
1	0,1		100	800	0,04	0,06	0,95	0,09
1	0,1		100	1200	0,01	0,01	0,99	0,10
1	0,1		100	2000	0,00	0,00	1,00	0,10
1	0,1		100	3000	0,00	0,00	1,00	0,10



**Figura IV.7** Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de Kh

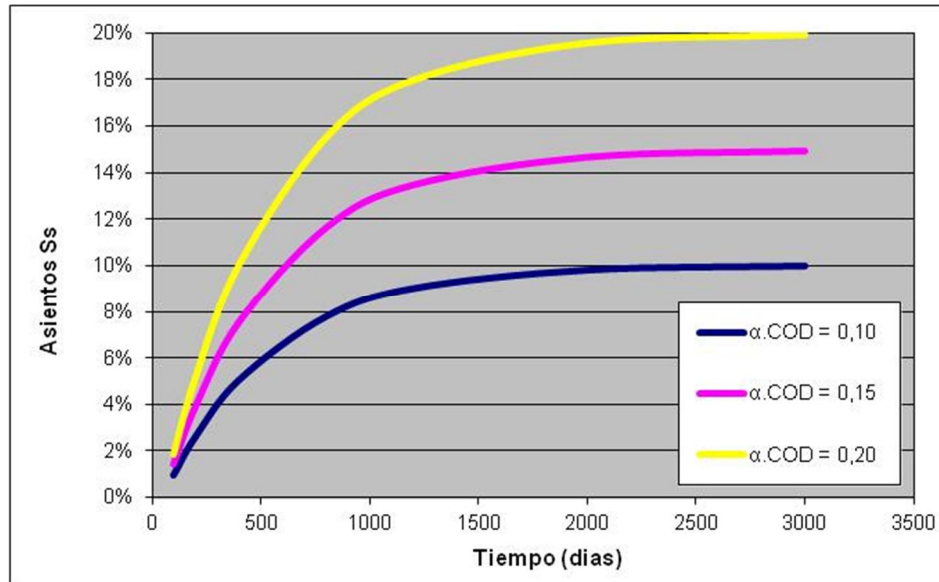
**Tabla IV.9**  
 Variaciones de “ $\alpha \cdot \text{COD}$ ”

H	$\alpha \cdot \text{COD}$	Kh	Tc	t	$e^{Kh \cdot t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
	<b>0,10</b>	<b>0,002</b>						
1			100	100	0,82	1,00	0,09	0,01
1			100	200	0,67	0,82	0,26	0,03
1			100	400	0,45	0,55	0,50	0,05
1			100	800	0,20	0,25	0,78	0,08
1			100	1200	0,09	0,11	0,90	0,09
1			100	2000	0,02	0,02	0,98	0,10
1			100	3000	0,00	0,00	1,00	0,10

H	$\alpha$ .COD	kh	Tc	t	$e^{Kh.t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
	<b>0,15</b>	<b>0,002</b>						
1			100	100	0,82	1,00	0,09	0,01
1			100	200	0,67	0,82	0,26	0,04
1			100	400	0,45	0,55	0,50	0,08
1			100	800	0,20	0,25	0,78	0,12
1			100	1200	0,09	0,11	0,90	0,13
1			100	2000	0,02	0,02	0,98	0,15
1			100	3000	0,00	0,00	1,00	0,15

H	$\alpha$ .COD	Kh	Tc	t	$e^{Kh.t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	Ss (%)
	<b>0,20</b>	<b>0,002</b>						
1			100	100	0,82	1,00	0,09	0,02
1			100	200	0,67	0,82	0,26	0,05
1			100	400	0,45	0,55	0,50	0,10
1			100	800	0,20	0,25	0,78	0,16
1			100	1200	0,09	0,11	0,90	0,18
1			100	2000	0,02	0,02	0,98	0,20
1			100	3000	0,00	0,00	1,00	0,20





**Figura IV.8** Gráficas Asientos – Tiempo para variaciones de  $\alpha.COD$

#### Análisis de los resultados:

##### a) Figura IV.7

Para valores de  $K_h = 0,001$ , es decir bajos valores de hidrólisis, da lugar a asientos bajos y tendiendo a curvas lineales.

Para  $K_h = 0,004$  indican asientos altos y curvas altamente no lineales.

Ambos tienden a un valor asintótico a partir de un determinado tiempo (aproximadamente 2000 días), no aumentan sus asientos aunque cambie el  $K_h$  ( $K_h$  aumenta).

##### b) Figura IV.8

Para un  $K_h = 0,002$  (valor medio) y variando  $\alpha.COD$ , hay un aumento importante en los valores de asiento porque hay mayor pérdida de masa que se convierte en asiento y mayor cantidad de materia orgánica biodegradable.

### IV.2.3. Modelo Gandola

$$S_s = a \cdot H \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (IV.4)$$

Donde:

S = asientos

H = espesor inicial del relleno

a = constante

k = constante

t = tiempo de estimación de asientos

“a”: representa el valor del asiento a largo plazo, como una fracción de la altura H del relleno.

“k”: tasa de deformación que controla el ritmo de crecimiento no lineal de los asientos.

Los valores de los parámetros “a” y “k” recogidos de la literatura técnica los podemos ver en la Tabla 10.

**Hipótesis: crecimiento del tipo exponencial con límite asintótico de los asientos.**

**Tabla IV.10**  
 Variaciones de “a” y “k”

Autores	Palma (1995)	Mariano (1999)	Observaciones
<b>Parámetros</b>			
<b>a</b>	0,031 a 0,23	0,02 a 0,61	Ensayos de campo
<b>k</b>	0,0001 a 0,0003	0,0002 a 0,0004	Ensayos de campo

Para valores de “a”, “k” y H, el cálculo de los asientos está expresado en la Tabla IV.11.

- a = 0,10
- k = - 0,0010 1/día
- H = 1,00m

**Tabla IV.11**  
 Valores de asientos Ss

Tiempo (años)	Tiempo (días)	Ss (m)	Ss/a.H
0,00	0	0,00	0,00
0,55	200	0,02	0,18
1,10	400	0,03	0,33
1,64	600	0,05	0,45
2,19	800	0,06	0,55
2,74	1000	0,06	0,63
3,29	1200	0,07	0,70
3,84	1400	0,08	0,75
4,38	1600	0,08	0,80
4,93	1800	0,08	0,83
5,48	2000	0,09	0,86
6,03	2200	0,09	0,89
6,58	2400	0,09	0,91
7,12	2600	0,09	0,93
7,67	2800	0,09	0,94
8,22	3000	0,10	0,95
8,77	3200	0,10	0,96
9,32	3400	0,10	0,97
9,86	3600	0,10	0,97
10,41	3800	0,10	0,98
10,96	4000	0,10	0,98
11,51	4200	0,10	0,99

12,05	4400	0,10	0,99
12,60	4600	0,10	0,99
13,15	4800	0,10	0,99
13,70	5000	0,10	0,99
14,25	5200	0,10	0,99
14,79	5400	0,10	1,00
15,34	5600	0,10	1,00
15,89	5800	0,10	1,00
16,44	6000	0,10	1,00

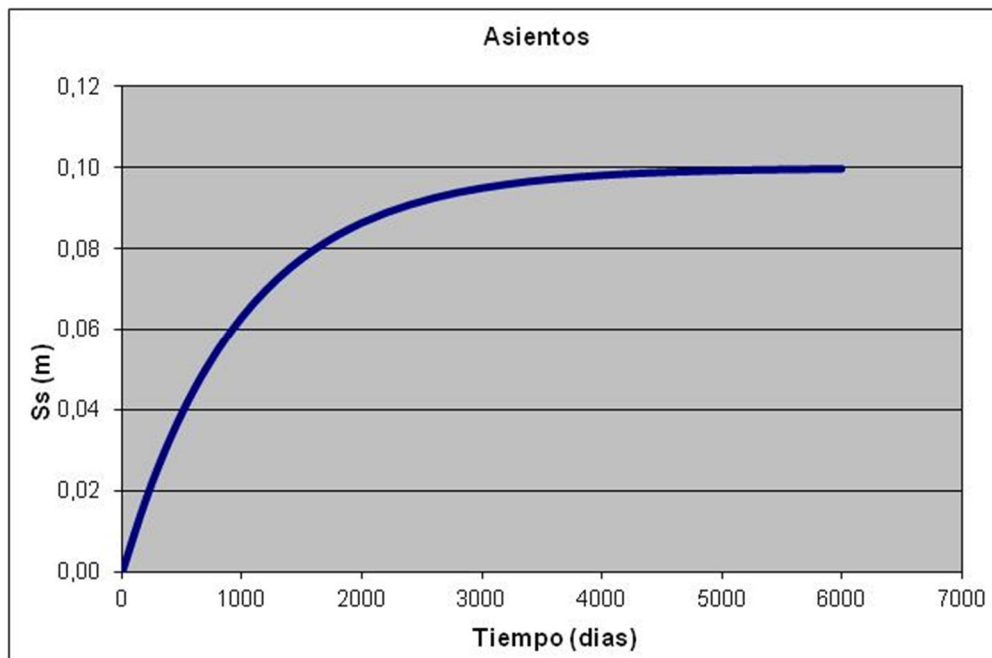


Figura IV.9 Gráficas Asientos – Tiempo

**Tabla IV.12**  
 Valores de asientos normalizados

Tiempo (años)	Tiempo (días)	Ss/a.H	Ss/a.H	Ss/a.H	Ss/a.H
		k (1/día)			
		-0,0005	-0,0008	-0,0015	-0,0030
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,55	200	0,10	0,15	0,26	0,45
1,10	400	0,18	0,27	0,45	0,70
1,64	600	0,26	0,38	0,59	0,83
2,19	800	0,33	0,47	0,70	0,91
2,74	1000	0,39	0,55	0,78	0,95
3,29	1200	0,45	0,62	0,83	0,97
3,84	1400	0,50	0,67	0,88	0,99
4,38	1600	0,55	0,72	0,91	0,99
4,93	1800	0,59	0,76	0,93	1,00
5,48	2000	0,63	0,80	0,95	1,00
6,03	2200	0,67	0,83	0,96	1,00
6,58	2400	0,70	0,85	0,97	1,00
7,12	2600	0,73	0,88	0,98	1,00
7,67	2800	0,75	0,89	0,99	1,00
8,22	3000	0,78	0,91	0,99	1,00
8,77	3200	0,80	0,92	0,99	1,00
9,32	3400	0,82	0,93	0,99	1,00
9,86	3600	0,83	0,94	1,00	1,00
10,41	3800	0,85	0,95	1,00	1,00
10,96	4000	0,86	0,96	1,00	1,00
11,51	4200	0,88	0,97	1,00	1,00
12,05	4400	0,89	0,97	1,00	1,00
12,60	4600	0,90	0,97	1,00	1,00

13,15	4800	0,91	0,98	1,00	1,00
13,70	5000	0,92	0,98	1,00	1,00
14,25	5200	0,93	0,98	1,00	1,00
14,79	5400	0,93	0,99	1,00	1,00
15,34	5600	0,94	0,99	1,00	1,00
15,89	5800	0,94	0,99	1,00	1,00
16,44	6000	0,95	0,99	1,00	1,00

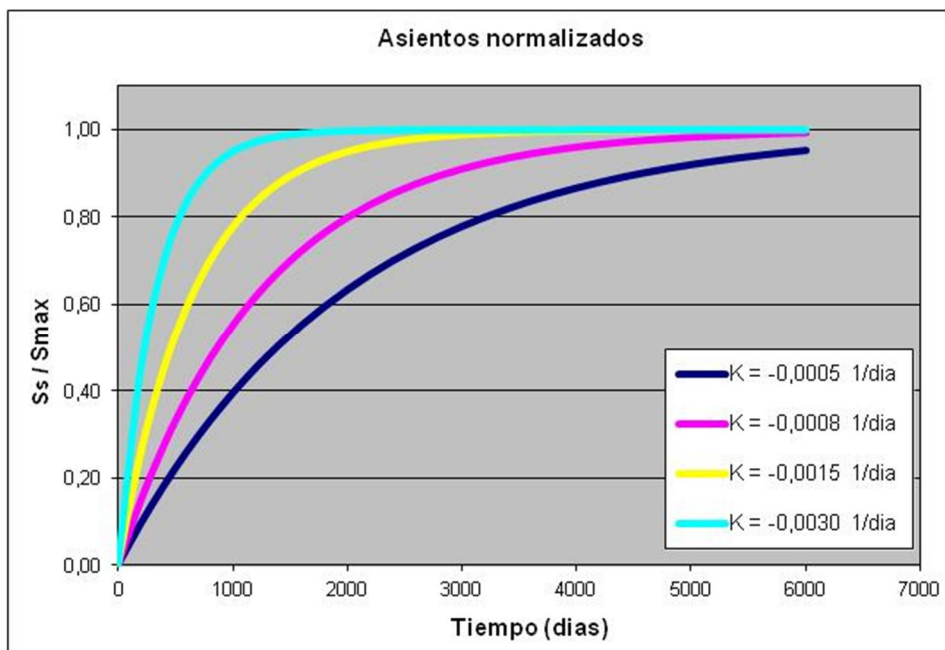


Figura IV.10 Gráficas Asientos Normalizados – Tiempo

**Análisis de los resultados:**

**a) Figura IV.9**

Para un  $K_h = 0,001$ , que indicaría un valor medio del coeficiente de hidrólisis, se observa el crecimiento exponencial con límite asintótico de los asentamientos.

**b) Figura IV.10**

Para valores de  $K_h = (0,0001 \text{ a } 0,0004)$ , que son los valores experimentales dados por Mariano y Palma, es decir bajos valores de hidrólisis, da lugar a asientos bajos y curvas lineales.

A partir de valores de  $K_h = 0,0005$  y hasta  $0,003$ , podemos decir que los asientos comienzan a aumentar, asientos altos y curvas no lineales. Lo que indicaría que ambos tienden a un valor asintótico a partir de un determinado tiempo (aproximadamente 2000 días), no aumentan sus asientos aunque cambie el  $K_h$  ( $K_h$  aumenta).

**IV.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS**

A continuación las características de los modelos son resumidas y los principales tópicos son comparados mediante una tabla general.

ITEM	SOWERS	MERUELO	GANDOLA
<b>FENÓMENO MODELADO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidación primaria (disipación de presiones intersticiales y compresibilidad bajo carga)</li> <li>• Consolidación secundaria (creep y biodegradación)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidación secundaria (creep y biodegradación)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El fenómeno de consolidación, sin distinguir entre consolidación primaria y secundaria</li> </ul>
<b>HIPÓTESIS</b>	Crecimiento logarítmico de los asientos	Crecimiento exponencial de los asientos con valor máximo asintótico	Crecimiento exponencial de los asientos con valor máximo asintótico

<p><b>NÚMERO DE PARÁMETROS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 para consolidación primaria</li> <li>• 3 para consolidación secundaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 para consolidación secundaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 parámetros</li> </ul>
<p><b>SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidación primaria: parámetros con sentido físico, relacionados a la porosidad y la compresibilidad de los rellenos.</li> <li>• Secundaria: parámetros con sentido físico, relacionados a la porosidad y biodegradación del relleno, y al tiempo asociado a la consolidación primaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<math>\alpha</math>” estima la pérdida de masa transformada en asientos</li> <li>• “COD” es el contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos</li> <li>• “<math>T_c</math>” es el tiempo de construcción del relleno</li> <li>• “<math>K_h</math>” es el coeficiente de hidrólisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a: valor del asiento final (asintótico), como fracción de la altura inicial del relleno. Sentido físico claro.</li> <li>• k: tasa de crecimiento inicial de los asientos en el tiempo. Asociado, a la compresibilidad y a la biodegradación del relleno. Sentido físico general, no específico.</li> </ul>
<p><b>AJUSTE DE LOS PARÁMETROS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_c</math> y <math>C_\alpha</math>: Se pueden estimar a partir de la “e”, mediante uso de los ábacos de Sowers. Difíciles de medir.</li> <li>• “e”: Se puede estimar de bibliografía. Difícil de medir de forma representativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<math>\alpha</math>” se debe estimar u obtener de mediciones previas</li> <li>• COD se estima por región, ó se mide directamente</li> <li>• <math>T_c</math> es un dato real ó estimado del relleno</li> <li>• <math>K_h</math> se estima a partir de datos disponibles en la literatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El modelo está pensado para ajustar curvas de asientos previamente medidas en campo ó laboratorio.</li> <li>• Ajuste utilizando valores disponibles en la literatura.</li> </ul>



<p><b>SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETROS</b></p>	<p>Todos los parámetros afectan proporcionalmente en el valor de los asientos calculados. Pero no afectan la tasa de incremento de los asientos, que dependen de los valores iniciales de tensión (consolidación primaria) y tiempo (consolidación secundaria)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los parámetros “COD” y “<math>\alpha</math>” afecta directamente el valor asintótico de la ecuación.</li> <li>• El parámetro “Tc” ajusta el valor inicial del asiento, que se puede relacionar con los asientos inmediatos ó de consolidación primaria.</li> <li>• El parámetro “Kh” ajusta la pendiente inicial de la curva de asientos, o sea el ritmo de crecimiento de los asientos para los tiempos iniciales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El parámetro “a” afecta directamente el valor asintótico de la ecuación.</li> <li>• El parámetro “k” ajusta la pendiente inicial de la curva de asientos, o sea el ritmo de crecimiento de los asientos para los tiempos iniciales</li> </ul>
<p><b>VENTAJAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semejanza con los modelos de asientos para suelos</li> <li>• Pocos parámetros con sentido físico</li> <li>• Parámetros estimables a partir de valores disponibles en la literatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros con sentido físico</li> <li>• Parámetros estimables a partir de valores disponibles en la literatura</li> <li>• Mayor fundamentación en procesos de biodegradación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pocos parámetros con sentido físico</li> <li>• Fácil de usar para ajustar curvas de asientos medidas</li> </ul>
<p><b>DESVENTAJAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros difíciles de medir de forma representativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor número de parámetros</li> <li>• No modela consolidación primaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros difíciles de medir de forma representativa</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros difíciles de medir de forma representativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetro “k” no tiene conexión clara con el fenómenos que gobiernan los asientos</li> </ul>
--	--	---	---

Según Sagaseta, las leyes de asiento-tiempo propuestas deben presentar ciertas características para que sean conceptuadas como buenas: Ser dimensionalmente correctas, estar definidas por un pequeño número de parámetros con sentido físico y dar previsiones realistas y precisas.

Del análisis comparativo de los modelos expuestos, podemos observar que el Modelo de Sowers, basado en los principios de la Mecánica de Suelos, modeliza cualitativamente los procesos responsables de los asientos, utilizando parámetros que tienen sentido físico y están relacionados con propiedades conocidas y similares a los suelos, brindando una mejor interpretación de la compresibilidad de los asientos.

Por otra parte, el Modelo Meruelo ofrece una mejor fundamentación de la consolidación de los residuos sólidos debido al proceso de biodegradación de los residuos, pero no tiene en cuenta otros factores involucrados en la compresibilidad de los residuos.

De esta forma podemos decir que ambos modelos son adecuados y con características específicas que los hacen herramientas complementarias para la predicción de asientos de rellenos de RSU.

Con respecto al Modelo de Gandola, este es un modelo de ajuste exponencial de las curvas de asientos, y sus parámetros son de naturaleza matemática (valores asintóticos inicial y final), no teniendo conexión clara con los fenómenos que gobiernan los asientos.

# CAPÍTULO V



## AJUSTE Y PROYECCIÓN DE ASENTAMIENTOS

## V. AJUSTE Y PROYECCIÓN DE ASENTAMIENTOS

---

### V.1. INTRODUCCIÓN

Las primeras publicaciones sobre estudios de la compresibilidad de los rellenos sanitarios es de los años 70, donde Sowers fue el primer investigador que planteó un modelo para predecir estos asientos.

Por otro lado, la Universidad de Cantabria en España ha desarrollado un modelo llamado Meruelo que es un programa de simulación dinámica de vertederos de RSU que viene trabajando el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria conjuntamente con investigadores de la Universidad Católica de Valparaíso. Sanchez et al (1991); Arias (1994); Palma (1995).

### V.2. ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO DE SOWERS

Para hacer este análisis vamos a plantear un ejemplo que nos permitirá validar el Modelo de Sowers basado en la bibliografía internacional. Los valores de asientos y el tiempo en que se desarrollaron, fueron tomados de un trabajo desarrollado en el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas. Madrid, España), con un equipo de investigación; en el Relleno Sanitario de la Comunidad de Madrid. *Referencia: Compresibilidad de los RSU. Ghislane (2000).*

Para este trabajo vamos a plantear las tareas de campaña que son necesarias en el relleno sanitario para evaluar los asientos:

- La realización de un terraplén experimental de suelo en un área del vertedero elegida según la mayor profundidad de residuo. Este terraplén representa la sobrecarga en el relleno sanitario.
- La colocación de una Línea Continua de Asientos (LCA) en el terraplén; esto nos permitirá medir el asiento en un número determinado de puntos.

Para realizar el cálculo de los Coeficientes de Compresión de la LCA se utilizarán los valores de asientos experimentales para 25 puntos dados en la Tabla V.1.

**Tabla V.1**  
 Línea Continua de Asientos

Distancia de los Puntos (m)	Asientos (mm)		
	Construcción del Terraplén 1º Fecha	Final de la Consolidación Primaria 92 días	Final de las mediciones 583 días
1	0	452,4	1413,3
2	0	464,4	1525,3
3	0	580,4	1552,8
4	0	645,4	1659,3
5	0	708,4	1886,3
6	0	834,4	1906,3
7	0	828,4	2009,3
8	0	872,4	1973,3
9	0	933,4	2026,3
10	0	897,4	2102,3
11	0	942,4	2062,3
12	0	941,4	2088,3
13	0	906,4	2100,3

14	0	968,4	2140,3
15	0	932,4	2107,3
16	0	888,4	2113,3
17	0	884,4	2059,3
18	0	854,4	1996,3
19	0	771,4	1893,3
20	0	754,4	1894,3
21	0	715,4	1831,3
22	0	625,4	1780,3
23	0	525,4	1556,3
24	0	505,4	1560,3
25	0	425,4	1480,3

Datos:

- Densidad del residuo  $\gamma_{RSU} = 0,50t/m^3$ , valor medio considerando que se trata de un relleno sanitario con residuo sin compactación
- Peso específico del terraplén  $\gamma_T = 1,60t/m^3$
- Altura del terraplén  $h_T = 4m$
- Altura inicial de la masa de residuos del relleno  $H = 33m$
- Incremento de presión por la construcción del terraplén  $\Delta\sigma = 6,40t/m^2$
- Periodo total de observación: 19meses
- Final de la consolidación primaria: 92 días

En la Tabla V.2 y usando la ecuación expresada a continuación se presentan los valores de los coeficientes de compresibilidad  $C_c$  calculados.

$$Cc' = \frac{\Delta s}{H_0 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_{v0}'}{\sigma_{v0}'}\right)} \quad (V.1)$$

**Tabla V.2**  
 Coeficientes de Compresibilidad Cc

Puntos Nº	ΔS (m)	H (m)	γ <sub>RSU</sub> (t/m <sup>3</sup> )	σ <sub>0</sub> (t/m <sup>2</sup> )	Δσ (t/m <sup>2</sup> )	Cc
1	0,452	33	0,5	8,25	6,4	0,06
2	0,464	33	0,5	8,25	6,4	0,06
3	0,580	33	0,5	8,25	6,4	0,07
4	0,645	33	0,5	8,25	6,4	0,08
5	0,708	33	0,5	8,25	6,4	0,09
6	0,834	33	0,5	8,25	6,4	0,10
7	0,828	33	0,5	8,25	6,4	0,10
8	0,872	33	0,5	8,25	6,4	0,10
9	0,933	33	0,5	8,25	6,4	0,11
10	0,897	33	0,5	8,25	6,4	0,11
11	0,942	33	0,5	8,25	6,4	0,12
12	0,941	33	0,5	8,25	6,4	0,11
13	0,906	33	0,5	8,25	6,4	0,11
14	0,968	33	0,5	8,25	6,4	0,12
15	0,932	33	0,5	8,25	6,4	0,11
16	0,888	33	0,5	8,25	6,4	0,11
17	0,884	33	0,5	8,25	6,4	0,11
18	0,854	33	0,5	8,25	6,4	0,10
19	0,771	33	0,5	8,25	6,4	0,09
20	0,754	33	0,5	8,25	6,4	0,09
21	0,715	33	0,5	8,25	6,4	0,09
22	0,625	33	0,5	8,25	6,4	0,08
23	0,525	33	0,5	8,25	6,4	0,06
24	0,505	33	0,5	8,25	6,4	0,06
25	0,425	33	0,5	8,25	6,4	0,05

En la Tabla V.3, se han calculado los asientos diferenciales de la consolidación secundaria, es decir la diferencia entre los asientos al final de las mediciones a los 583 días (consolidación secundaria) y el final de la consolidación primaria a los 92 días, de la Tabla V.1.

**Tabla V.3**

Cálculo del Asiento Secundario  $\Delta S$

Puntos Nº	$\Delta S$ (mm)
1	960,9
2	1060,9
3	972,4
4	1013,9
5	1177,9
6	1071,9
7	1180,9
8	1100,9
9	1092,9
10	1204,9
11	1119,9
12	1146,9
13	1193,9
14	1171,9
15	1174,9
16	1224,9
17	1174,9
18	1141,9
19	1121,9
20	1139,9
21	1115,9
22	1154,9
23	1030,9
24	1054,9
25	1054,9



Los valores del índice de compresión secundaria  $C\alpha$  expresados en la Tabla V.4, fueron calculados con la siguiente expresión.

$$C\alpha' = \frac{\Delta s}{H_o \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (V.2)$$

**Tabla V.4**  
 Índice de Compresión Secundaria  $C\alpha$

Puntos Nº	$\Delta S$ (mm)	H (mm)	$t_1$ (días)	$t_2$ (días)	$C\alpha$
1	960,9	33000	92	583	0,0363
2	1060,9	33000	92	583	0,0400
3	972,4	33000	92	583	0,0368
4	1013,9	33000	92	583	0,0383
5	1177,9	33000	92	583	0,0445
6	1071,9	33000	92	583	0,0405
7	1180,9	33000	92	583	0,0446
8	1100,9	33000	92	583	0,0416
9	1092,9	33000	92	583	0,0413
10	1204,9	33000	92	583	0,0455
11	1119,9	33000	92	583	0,0423
12	1146,9	33000	92	583	0,0433
13	1193,9	33000	92	583	0,0451
14	1171,9	33000	92	583	0,0443
15	1174,9	33000	92	583	0,0444
16	1224,9	33000	92	583	0,0463
17	1174,9	33000	92	583	0,0444
18	1141,9	33000	92	583	0,0432
19	1121,9	33000	92	583	0,0424
20	1139,9	33000	92	583	0,0431

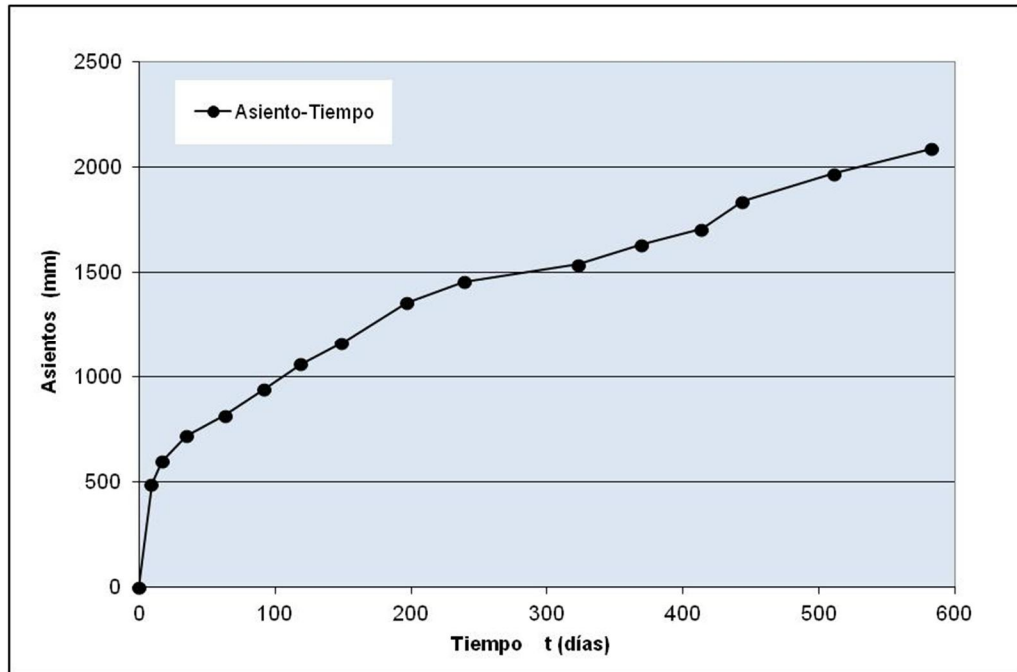
21	1115,9	33000	92	583	0,0422
22	1154,9	33000	92	583	0,0436
23	1030,9	33000	92	583	0,0390
24	1054,9	33000	92	583	0,0399
25	1054,9	33000	92	583	0,0399

Los valores de asientos medidos a lo largo del tiempo para el Punto 12, que representa el punto central de la Línea Continua de Asientos, LCA, son los que se muestran en la Tabla V.5 y están representados en la Figura V.1.

**Tabla V.5**

Medidas de Asientos para el Punto 12

<b>S (mm)</b>	<b>t<sub>2</sub> (días)</b>
0,0	0
492,0	9
601,0	17
722,9	35
818,0	63
941,4	92
1063,4	119
1161,4	149
1355,7	197
1458,3	239
1538,6	323
1633,2	370
1707,2	414
1839,1	444
1970,2	511
2088,3	583



**Figura V.1** Valores medidos de asiento para el Punto 12

Con el valor del índice de compresión secundaria  $C\alpha$  obtenido a través de la Teoría de Sowers, se pueden estimar los asientos “S” que sufrirá la masa de residuos en 5 años y medio (2010 días), para una profundidad determinada, por ejemplo 33m.

Estos valores están referidos al Punto 12 que representa el punto central de la LCA, que le corresponde un valor de  $C\alpha = 0,0433$  como vemos en la Tabla V. 4.

Esto queda expresado en la Tabla V.6, donde tenemos el asiento total de la consolidación primaria y la secundaria para el Punto 12 de la Línea Continua de Asientos, LCA, hasta la fecha de finalización de las mediciones (583 días) que es el tramo de coincidencia.

**Tabla V.6**

Predicción de los asientos hasta el tramo de coincidencia

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Asiento Sowers Primario</b>	<b>Asiento Sowers Secundario</b>	<b>Asiento Sowers Total</b>
0	0,0	0,0	0,0
9	492,0	0,0	492,0
17	601,0	0,0	601,0
35	722,9	0,0	722,9
63	818,0	0,0	818,0
92	905,3	0,0	905,3
119	905,3	159,8	1065,1
149	905,3	299,5	1204,8
197	905,3	473,0	1378,2
239	905,3	593,0	1498,3
323	905,3	780,1	1685,3
370	905,3	864,5	1769,7
414	905,3	934,3	1839,5
444	905,3	977,7	1883,0
511	905,3	1065,0	1970,3
583	905,3	1146,9	2052,2

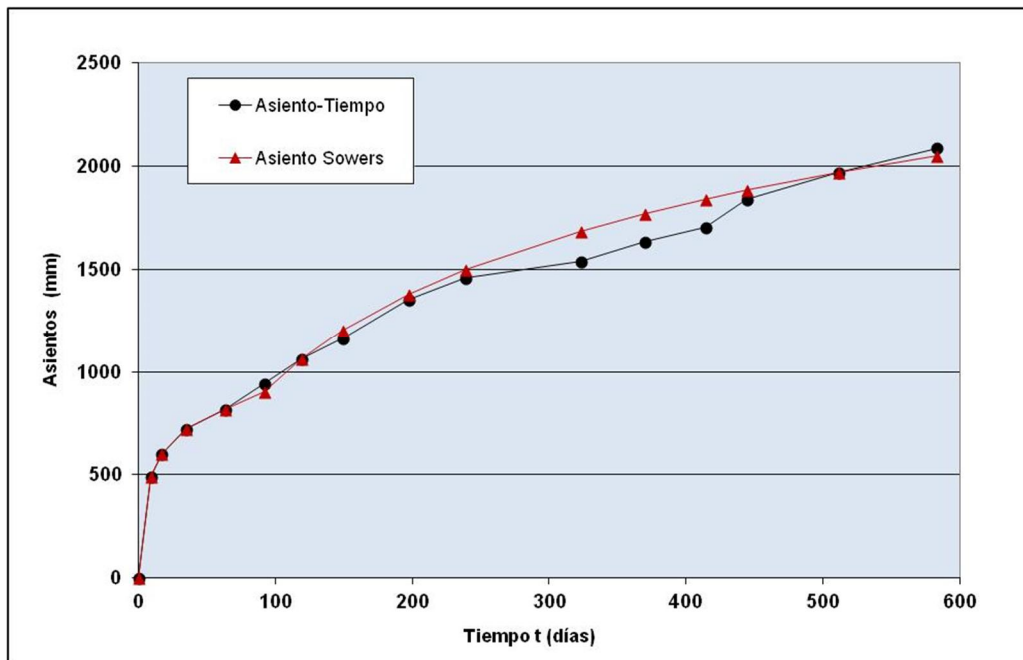
La Tabla V.7, representa la predicción de los asientos para la proyección a 5 años y medio (2012 días) a través del Modelo de Sowers.

**Tabla V.7**

Predicción de los asientos para la proyección

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Asiento Sowers Primario</b>	<b>Asiento Sowers Secundario</b>	<b>Asiento Sowers Total</b>
0	0,0	0,0	0,0
9	492,0	0,0	492,0
17	601,0	0,0	601,0
35	722,9	0,0	722,9
63	818,0	0,0	818,0
92	905,3	0,0	905,3
119	905,3	159,8	1065,1
149	905,3	299,5	1204,8
197	905,3	473,0	1378,2
239	905,3	593,0	1498,3
323	905,3	780,1	1685,3
370	905,3	864,5	1769,7
414	905,3	934,3	1839,5
444	905,3	977,7	1883,0
511	905,3	1065,0	1970,3
583	905,3	1146,9	2052,2
650	905,3	1214,5	2119,7
730	905,3	1286,6	2191,8
810	905,3	1351,2	2256,4
890	905,3	1409,7	2314,9
970	905,3	1463,1	2368,4
1050	905,3	1512,4	2417,6
1130	905,3	1558,0	2463,2
1210	905,3	1600,5	2505,7
1290	905,3	1640,2	2545,5
1370	905,3	1677,6	2582,9

1450	905,3	1712,9	2618,1
1530	905,3	1746,2	2651,5
1610	905,3	1777,9	2683,1
1690	905,3	1808,0	2713,3
1770	905,3	1836,7	2742,0
1850	905,3	1864,2	2769,4
1930	905,3	1890,5	2795,7
2010	905,3	1915,7	2821,0

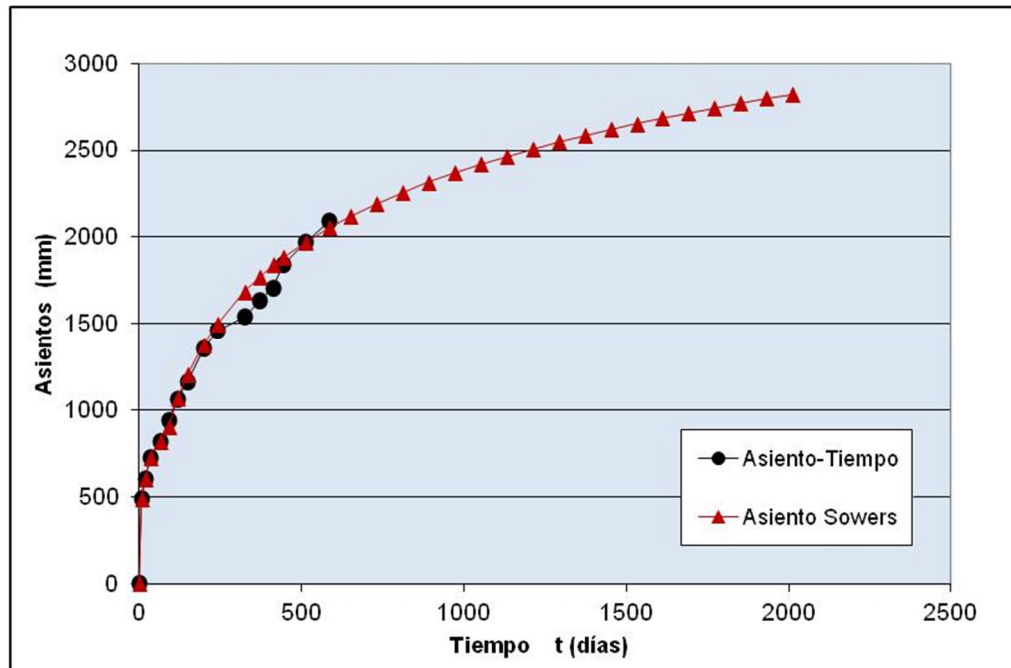


**Figura V.2** Valores medidos y estimados. Tramo de coincidencia

En las Figura V.2 y V.3, se pueden observar las curvas para los valores de asentamientos medidos, y los valores de asentamientos estimados a través del Modelo de Sowers, para 5 años y medio (2010 días).

En la Figura V.2 vemos solo el tramo de coincidencia de los valores de asentamientos medidos y los calculados por el Modelo de Sowers.

En la Figura V.3 se representan los valores de asientos medidos y la proyección de los asientos calculados por el Modelo de Sowers.



**Figura V.3** Valores medidos y estimados. Tramo de Proyección

La Tabla V.8 representa un resumen de los resultados obtenidos de la predicción de los asientos con el Modelo de Sowers.

**Tabla V.8**

Predicción de los asientos para una LCA

H (mm)	t <sub>2</sub> (días)	S (mm)	S (%)	C <sub>α</sub>
33000	2010	492,0	1,49	0,0433
33000	2010	601,0	1,82	0,0433
33000	2010	722,9	2,19	0,0433

33000	2010	818,0	2,48	0,0433
33000	2010	905,3	2,74	0,0433
33000	2010	1065,1	3,23	0,0433
33000	2010	1204,8	3,65	0,0433
33000	2010	1378,2	4,18	0,0433
33000	2010	1498,3	4,54	0,0433
33000	2010	1685,3	5,11	0,0433
33000	2010	1769,7	5,36	0,0433
33000	2010	1839,5	5,57	0,0433
33000	2010	1883,0	5,71	0,0433
33000	2010	1970,3	5,97	0,0433
33000	2010	2052,2	6,22	0,0433
33000	2010	2119,7	6,42	0,0433
33000	2010	2191,8	6,64	0,0433
33000	2010	2256,4	6,84	0,0433
33000	2010	2314,9	7,02	0,0433
33000	2010	2368,4	7,18	0,0433
33000	2010	2417,6	7,32	0,0433
33000	2010	2463,2	7,46	0,0433
33000	2010	2505,7	7,59	0,0433
33000	2010	2545,5	7,71	0,0433
33000	2010	2582,9	7,83	0,0433
33000	2010	2618,1	7,93	0,0433
33000	2010	2651,5	8,04	0,0433
33000	2010	2683,1	8,13	0,0433
33000	2010	2713,3	8,22	0,0433
33000	2010	2742,0	8,31	0,0433
33000	2010	2769,4	8,39	0,0433
33000	2010	2795,7	8,47	0,0433
33000	2010	2821,0	8,55	0,0433



### V.3. ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO MERUELO

Se validará el Modelo Meruelo a través de la siguiente ecuación, con el mismo ejemplo planteado en el Modelo de Sowers.

$$\Delta S = \frac{\alpha \cdot H \cdot COD}{Kh \cdot Tc} \cdot \left(1 - e^{-KhTc}\right) \cdot \left(e^{-Kht} - e^{-Khto}\right) \quad (V.3)$$

Para realizar el cálculo de los Coeficientes de Compresión de la LCA se utilizarán los valores de asientos experimentales.

- El parámetro Contenido de Materia Orgánica Biodegradable COD = 0,25, este valor fue encontrado por Palma (1995) para los RSU de Cantabria, España.
- El tiempo de construcción del relleno sanitario Tc se consideró de 1 año (365 días).
- El Coeficiente de Hidrólisis Kh = 0,0028, se estimó como variable de ajuste del modelo.
- El Coeficiente de Pérdida de Masa “α” se estimó como variable de ajuste del modelo α = 0,3.

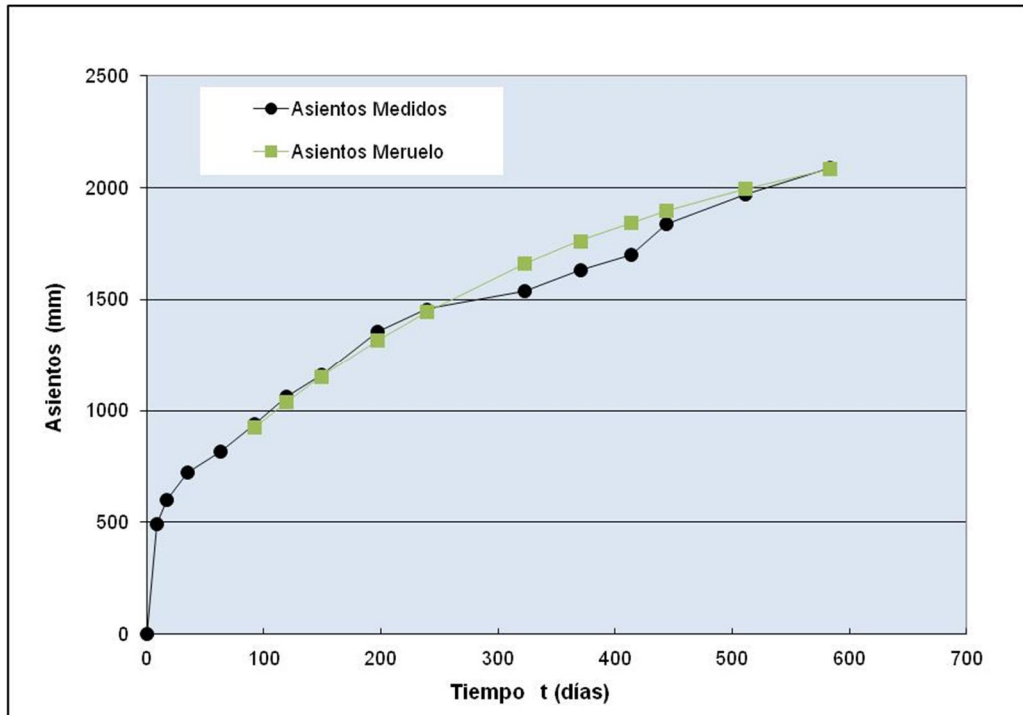
En la Tabla V.9 está el cálculo realizado con el modelo teórico en el tramo de coincidencias de las curvas, como también los valores de asientos medidos.

La FiguraV.4 muestra la gráfica de los asientos medidos y los asientos calculados por el Modelo Meruelo en el tramo de coincidencia.

Como podemos ver en el Modelo Meruelo, solo se considera consolidación secundaria, lo cual está simulado a partir de los 92 días que termina la consolidación primaria de Sowers que tiene en cuenta la sobrecarga.

**Tabla V.9**  
 Asientos Medidos y Asientos por Meruelo

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Asientos Medidos (mm)</b>	<b>Asientos Meruelo (mm)</b>
0	0,0	0,0
9	492,0	--
17	601,0	--
35	722,9	--
63	818,0	--
92	941,4	924,8
119	1063,4	1037,7
149	1161,4	1153,5
197	1355,7	1319,7
239	1458,3	1447,9
323	1538,6	1663,1
370	1633,2	1763,2
414	1701,2	1845,7
444	1839,1	1896,4
511	1970,2	1995,4
583	2088,3	2083,0



**Figura V.4** Valores de asentamientos medidos y calculados. Tramo de coincidencia

En la Tabla V.10 tenemos la predicción de los asentamientos para 5 años y medio que sufrirá la masa de residuos, lo cual podemos observar en la Figura V.5.

**Tabla V.10**  
 Predicción de los asentos

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Asientos Medidos S (mm)</b>	<b>Asientos Meruelo Ss (mm)</b>
0	0,0	0,0
9	492,0	--
17	601,0	--
35	722,9	--
63	818,0	--
92	941,4	924,8
119	1063,4	1037,7
149	1161,4	1153,5
197	1355,7	1319,7
239	1458,3	1447,9
323	1538,6	1663,1
370	1633,2	1763,2
414	1701,2	1845,7
444	1839,1	1896,4
511	1970,2	1995,4
583	2088,3	2083,0
750	--	2229,4
1000	--	2353,0
1500	--	2444,9
2000	--	2467,6

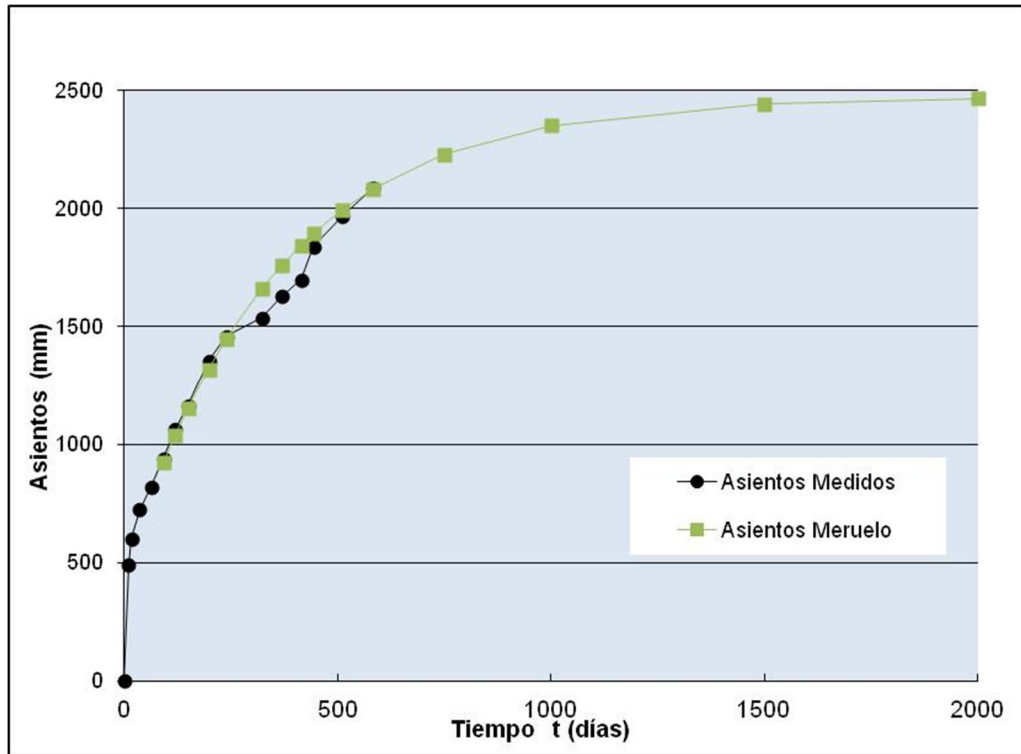


Figura V.5 Valores medidos y estimados. Tramo de Proyección

La Tabla V.11 representa un resumen de los resultados obtenidos de la predicción de los asentamientos para una LCA con el Modelo Meruelo.

**Tabla V.11**  
 Predicción de los asentamientos en la LCA

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Asientos Meruelo Ss (mm)</b>	<b>Asientos Meruelo Ss (%)</b>
0	0,0	--
9	--	--
17	--	--
35	--	--
63	--	--
92	924,8	2,80
119	1037,7	3,15
149	1153,5	3,50
197	1319,7	4,00
239	1447,9	4,39
323	1663,1	5,04
370	1763,2	5,34
414	1845,7	5,59
444	1896,4	5,75
511	1995,4	6,05
583	2083,0	6,31
750	2229,4	6,76
1000	2353,0	7,13
1500	2444,9	7,41
2000	2467,6	7,48

## V.4. ANÁLISIS MEDIANTE EL MODELO GANDOLA

En el Modelo Gandola se propone un ajuste entre los valores medidos y los valores teóricos a través de los parámetros “a” y “k”. Ver Figura V.6.

$$S_s = a \cdot H \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (V.4)$$

a: valor de asiento a largo plazo como fracción de la altura H del relleno

k: tasa de deformación que controla el ritmo de crecimiento no lineal de los asientos

Donde:

a = 0,07

k = -0,0040 1/día

H = 33m

**Tabla V.12**

Proyección de los asientos por Gandola

Tiempo (días)	Asientos Medidos S <sub>s</sub> (mm)	Asientos Gandola S <sub>s</sub> (mm)
0	0,0	0,00
9	492,0	81,68
17	601,0	151,86
35	722,9	301,78
63	818,0	514,56
92	941,4	711,21
119	1063,4	874,88

149	1161,4	1037,16
197	1355,7	1259,52
239	1458,3	1421,97
323	1538,6	1675,39
370	1633,2	1784,16
414	1701,2	1869,02
444	1839,1	1918,88
511	1970,2	2010,83
583	2088,3	2085,70

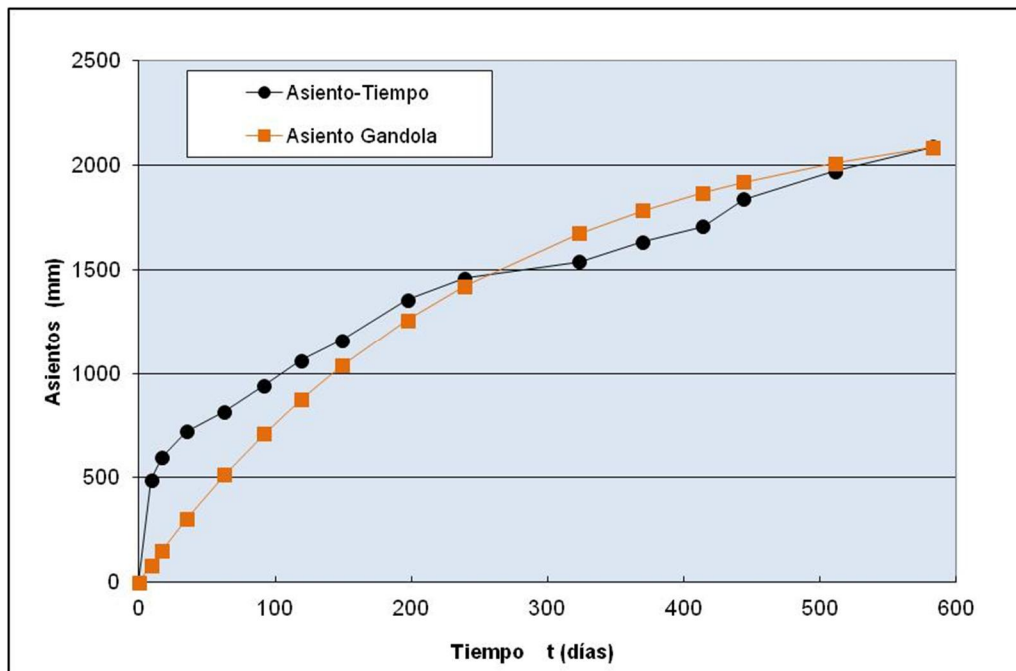
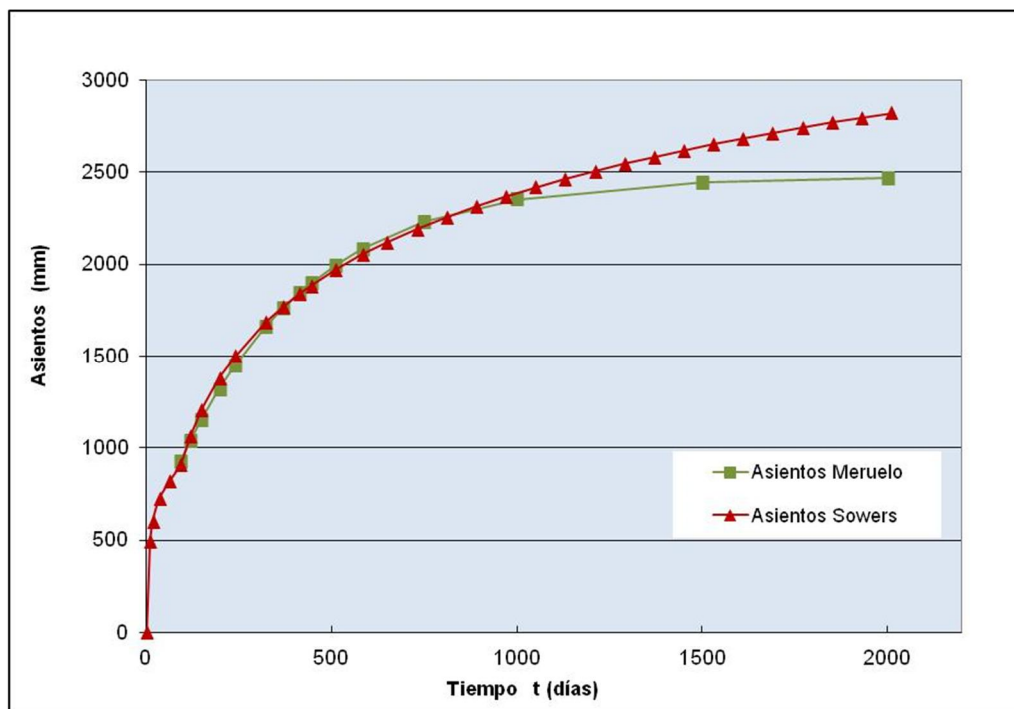


Figura V.6 Valores medidos y teóricos



## V.5. COMPARACIÓN DE LOS MODELO DE SOWERS Y MERUELO

En la Figura V.7 se observa la comparación de los valores de asientos para ambos modelos de Sowers y Meruelo.



**Figura V.7** Asientos obtenidos a través de los modelos de Sowers y Meruelo

Como análisis de los modelos, podemos ver que con el Modelo de Sowers los valores de asientos previstos para 5 años y medio y para una profundidad de 33m, son de  $S = 8,55\%$ , (ver Tabla V.8), y los valores de asientos con el Modelo Meruelo para el mismo tiempo y profundidad del relleno sanitario es de  $S = 7,48\%$  (Ver Tabla V.11).

Ambos valores estarían dentro de los rangos establecidos por la bibliografía internacional. Según algunos autores como Mariano (1999) que auscultó el relleno de Muribeca en Recife, Brasil, los asientos previstos para 6 años a través del Modelo de Sowers en una celda fueron de 0,45% a 1,85% y en otra de las celdas fueron de 1,78% a 13,23%. Y según la autora los

valores bajos de la primera celda se justifican porque se trataba de residuos viejos y se encontraban ya estabilizados, en cambio en la segunda celda los valores eran razonables por la heterogeneidad del residuo y contener basura fresca.

En el relleno sanitario de Meruelo, Santander, España. Palma en su Tesis Doctoral encontró mucha dispersión en los valores, que varían entre el 4% y el 19%. El autor plantea que los variados espesores y la edad de la basura tienen la responsabilidad en la dispersión encontrada.

Con esto podemos concluir que es importante conocer las características del residuo ya que es muy difícil extrapolar datos de un relleno sanitario a otro.

En segundo lugar, según podemos observar en la Figura V.3 y de acuerdo con Sowers, que establece que un relleno para ser estable necesita que transcurra un periodo superior a 20 años, es que podemos dejar planteada la proyección del asiento como una curva que crecerá según se ve en la Figura V.3, para luego ser asintótica cuando el tiempo tiende a infinito.

En general este modelo basado en los principios de la Mecánica de Suelos, ha sido muy cuestionado, pero es importante destacar que el modelo hace un análisis cualitativo de los procesos que se consideran responsables de la generación de asientos en los rellenos sanitarios y a través de él estos procesos quedan más claros.

Del análisis comparativo de las previsiones de Sowers y Meruelo, basadas en los valores de asientos medidos, podemos destacar que ambos modelos ajustan dichos valores experimentales de forma satisfactoria. Por otro lado, presentan diferencias en la proyección de asientos a largo plazo; el modelo Meruelo proyecta una marcada estabilización de los asientos por una rápida caída de la tasa de deformación (tipo asintótica) mientras que el modelo de Sowers proyecta una estabilización menos pronunciada de los asientos, con mayores tasas de deformación (tipo logarítmica).

# CAPÍTULO VI



## ESTIMACIÓN DE ASENTAMIENTOS DEL RELLENO SANITARIO DE RIVADAVIA. SAN JUAN

## **VI. ESTIMACIÓN DE ASENTAMIENTOS DEL RELLENO SANITARIO DE RIVADAVIA. SAN JUAN**

---

### **VI.1. INTRODUCCIÓN**

Tomando como base el diseño del Relleno Sanitario de Rivadavia, San Juan, se propone un modelo geométrico temporal de disposición final de RSU compuesto de tres celdas, con el objetivo de analizar su comportamiento geotécnico.

Para este análisis, se realizará la calibración de los modelos matemáticos mediante la estimación de los valores de los parámetros geotécnicos, con el fin de calcular la proyección de los asientos en el tiempo.

### **VI.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS**

La validez y calidad de los análisis de estabilidad global de un relleno sanitario, depende de la información obtenida relativa a las deformaciones, parámetros resistentes, presión intersticial, densidad, humedad, tipo de residuos, método de disposición, sistemas de drenaje de biogás y lixiviados, geometría del relleno, entre otros datos de interés. *Referencia: Turcumán, M.; Fiore, J. (2008).*

En general y particularmente en nuestro país, los datos y parámetros geotécnicos necesarios para el diseño de rellenos sanitarios, se han obtenido en base a estimaciones de trabajos de investigación realizadas en el extranjero.

Ya que no es factible acceder a esta información, tomaremos valores en rangos de mínima y máxima y su valor promedio de la bibliografía internacional.

En la estimación de la densidad de los RSU, Fasset et al (1994), resumieron la información de la densidad según la energía de compactación suministrada en el relleno sanitario, contenido de humedad, edad y profundidad del relleno.

La energía de compactación se separó en tres grupos: mala compactación (vinculada a poca ó ningún tipo de compactación), compactación moderada (vinculada a rellenos antiguos) y buena compactación (representa las prácticas actuales). *Referencia: Palma, J. H.; Espinace, R. et al (2005).*

También en función del grado de compactación, Tchobanoglous et al (1994) establecieron los valores del contenidos de humedad “w” para un relleno sanitario. Tabla VI.2.

En el relleno de Rivadavia, el valor de la humedad es solo estimativo, ya que no existen mediciones al respecto. Cambia según la época del año, en verano ingresan fábricas como Frutos de Cuyo con el aporte del tomate y barros que cambian totalmente la humedad, aunque en la planta de tratamiento no se mezcla este contenido con el resto del residuo.

En base a la información suministrada por el personal del Relleno Sanitario de Rivadavia se podría considerar el valor de Humedad en alrededor del  $w = 15\%$ .

**Tabla VI.1**

Densidad en función del grado de compactación. Fasset et al (1994).

	Mala Compactación	Compactación Moderada	Buena Compactación
<b>Rango de densidad (t/m3)</b>	0,30 a 0,94	0,52 a 0,78	0,89 a 1,07
<b>Promedio de densidad (t/m3)</b>	0,54	0,70	0,97
<b>Rango de densidad seca (t/m3)</b>	0,19 a 0,35	0,35 a 0,54	
<b>Promedio de densidad seca (t/m3)</b>	0,27	0,46	

**Tabla VI.2**

Contenidos de Humedad para RSU en relleno sanitario. Tchobanoglous et al (1994).

RSU	Contenido de Humedad $w$ (%)	
	Rango	Típico
<b>Medianamente compactados</b>	15 a 40	25
<b>Bien compactados</b>	15 a 40	25

Para el caso de estudio referido al Relleno Sanitario de Rivadavia y ya que no es factible tener la información, tomaremos los valores asignados anteriormente, y como podemos ver en las Tabla VI.1 y Tabla VI.2, se adecuan perfectamente a los valores de la bibliografía internacional, para las condiciones regionales.

### VI.3. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

Para el diseño de un relleno sanitario se deben tener en cuenta una serie de parámetros básicos como son:

- La cantidad de residuos a disponer diariamente en el relleno
- La cantidad de material de cobertura
- Vida útil del relleno
- Sellado final
- Uso futuro del área rellenada

La caracterización de los residuos a disponer, permitirá conocer si será posible recuperar en forma directa ó indirecta, componentes con valor, mediante el proceso de reciclado.

No se cuenta con valores estadísticos de producción de residuos ni estudios sobre su composición. Solo se ha realizado un proceso de separación in situ de los RSU, sobre una muestra de 100kg, y a partir de este proceso se obtuvieron los siguientes valores en porcentajes de su composición.

**Tabla VI.3**

Composición de los residuos para 100Kg

Tipo de Residuo	(%)
<b>Vidrio</b>	7,5
<b>Papel</b>	7,5
<b>Plástico</b>	8,4
<b>Cartón</b>	8,0
<b>Telas y trapos</b>	8,5
<b>Gomapluma</b>	4,0
<b>Zapatos</b>	7,0 a 8,0
<b>Pañales</b>	7,5
<b>Latas</b>	7,6
<b>Nylon</b>	3,0
<b>Otros</b>	23,0 a 40,0
<b>Orgánicos</b>	185,0 a 200

Como antecedente, en la Argentina con las condiciones de mercado y las características de las actuales instalaciones de recuperación, el material que debe ser dispuesto en el relleno

sanitario alcanza aproximadamente a un tercio del total de los residuos que ingresan a la planta de tratamiento de RSU. *Referencia: Abaca, M; Turcumán, M.; Gómez, J. et al (2011).*

### VI.3.1. Relleno Sanitario de Rivadavia. Análisis de los parámetros

De acuerdo al PEGIRSU – Programa Estratégico de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos que lleva adelante la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan, en el Relleno Sanitario de Rivadavia se vierten casi el 80% de los residuos de la Provincia, se depositan los RSU de ocho departamentos que corresponden a la Región 1, que incluyen los Departamentos del Gran San Juan: Capital, Santa Lucía, Rivadavia, Chimbab, Rawson más los Departamentos de Pocito, Ullum y Zonda.

Para el diseño del relleno sanitario se necesita el relevamiento demográfico de la Provincia de San Juan y la población afectada. En la tabla siguiente, se indica para la Provincia de San Juan, viviendas, población por sexo e índice de masculinidad, por departamento del año 2010.

Departamento	Total de Viviendas	Total de Población	Varones	Mujeres	Índice de Masculinidad
<b>TOTAL</b>	<b>194.188</b>	<b>680.427</b>	<b>334.494</b>	<b>345.933</b>	<b>96,7</b>
<b>Albardón</b>	6.424	23.863	11.875	11.988	99,1
<b>Angaco</b>	2.686	8.178	4.128	4.050	101,9
<b>Calingasta</b>	2.975	8.453	4.507	3.946	114,2
<b>Capital</b>	39.908	108.720	50.501	58.219	86,7
<b>Caucete</b>	9.534	38.513	18.985	19.528	97,2
<b>Chimbab</b>	21.006	87.739	43.515	44.224	98,4
<b>Iglesia</b>	2.725	9.141	5.766	3.375	170,8
<b>Jáchal</b>	6.425	21.812	11.072	10.740	103,1
<b>9 de Julio</b>	2.436	9.314	4.655	4.659	99,9



<b>Pocito</b>	13.894	51.480	25.471	26.009	97,9
<b>Rawson</b>	30.925	114.946	56.122	58.824	95,4
<b>Rivadavia</b>	23.378	82.985	40.057	42.928	93,3
<b>San Martín</b>	2.860	10.969	5.546	5.423	102,3
<b>Santa Lucía</b>	13.482	48.137	23.451	24.686	95,0
<b>Sarmiento</b>	5.705	22.176	11.434	10.742	106,4
<b>Ullum</b>	1.507	4.982	2.550	2.432	104,9
<b>Valle Fértil</b>	2.516	7.201	3.704	3.497	105,9
<b>25 de Mayo</b>	4.265	17.053	8.751	8.302	105,4
<b>Zonda</b>	1.537	4.765	2.404	2.361	101,8

**Nota:** El índice de masculinidad indica la cantidad de varones por cada 100 mujeres

**Fuente:** INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010.

**Tabla VI.4**

Departamentos afectados al relleno de Rivadavia en el año 2010

<b>TOTAL</b>	<b>503.754 hab</b>
<b>Capital</b>	108.720 hab
<b>Rivadavia</b>	82.985 hab
<b>Rawson</b>	114.946 hab
<b>Pocito</b>	51.480 hab
<b>Chimbas</b>	87.739 hab
<b>Santa Lucia</b>	48.137 hab
<b>Ullum</b>	4.982 hab
<b>Zonda</b>	4.765 hab

Fuente: INDEC

La Tabla VI.4 indica la población por departamento según el Censo 2010, que afecta al relleno sanitario de Rivadavia.

a) **Vida útil del relleno**

El Parque de Tecnologías Ambientales PTA, donde funciona el Relleno Sanitario de Rivadavia, se inauguró el 27 de abril de 2011 y se proyectó para una vida útil de 15 años.

A marzo del 2013 se encuentra en la etapa de llenado del Piso 1, que según expresado por el Director del PTA Sr. Sergio Espinoza, esta etapa terminaría a mediados de este año. Luego continuaría el Piso 2 y Piso 3 con el que se cierra el relleno y estiman que esto sucedería en el año 2018, por lo tanto la vida útil del relleno sería de 7 años en lugar de 15 años del proyecto.

Po lo que el Plan de llenado del relleno podría estimarse de acuerdo a lo expresado por el Director del PTA de la siguiente manera:

Piso 1 en aproximadamente 2 años y medio, abril de 2011 a mediados de 2013

Piso 2: También de 2 años y medio, 2013 a 2016

Piso 3: De 2 años, 2016 a 2018.

El cálculo de la proyección de la población es mediante una tasa de crecimiento asumida, que se toma según datos del INDEC del 1,3% anual.

Po: Población inicial

r: tasa de crecimiento anual

n: número de años entre el año base y el año “t”

Según la fórmula de proyección para 8 años, tenemos:

Po = 503.754 habitantes (Año 2010)

r = 1,3% anual

n = 8 años

$$Pt = Po (1 + r)^n$$

**Tabla VI.5**

Proyección de la población afectada al relleno en el año 2018

<b>TOTAL</b>	<b>558.592 hab</b>
Capital	120.555 hab
Rivadavia	92.019 hab
Rawson	127.459 hab
Pocito	57.084 hab
Chimbas	97.290 hab
Santa Lucia	53.377 hab
Ullum	5.524 hab
Zonda	5.284 hab

**Pt = 558.592 habitantes para el año 2018**

**b) Cantidad de residuos a disponer diariamente en el relleno**

La cantidad promedio de residuos generados que se tomarán como base para determinar las cantidades, se puede estimar en función de la población de los departamentos, estableciendo un promedio de 1,15 Kg/hab/día para los departamentos del Gran San Juan y 0,85 Kg/hab/día para el resto de los departamentos. *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*

De acuerdo a esta consideración la cantidad de RSU a disponer por día, teniendo en cuenta los Departamentos del Gran San Juan: Capital, Rivadavia, Rawson, Santa Lucía y Chimbas con una tasa de generación de RSU de 1,15Kg/hab/día y para el resto de los departamentos involucrados la tasa considerada es de 0,85Kg/hab/día, según se indica en la Tabla VI.6, esto es sin tener en cuenta el recupero.

**Tabla VI.6**

Cantidad de RSU por departamento en el año 2010

TOTAL	560 t/día	100%
Capital	125 t/día	22,28 %
Rivadavia	95 t/día	16,99 %
Rawson	132 t/día	23,57 %
Pocito	44 t/día	7,85 %
Chimbas	101 t/día	18,04 %
Santa Lucia	55 t/día	9,82 %
Ullum	4,2 t/día	0,74 %
Zonda	4,1 t/día	0,71 %

**Valor de Generación de residuos año 2010: RSU: 560 t/día**

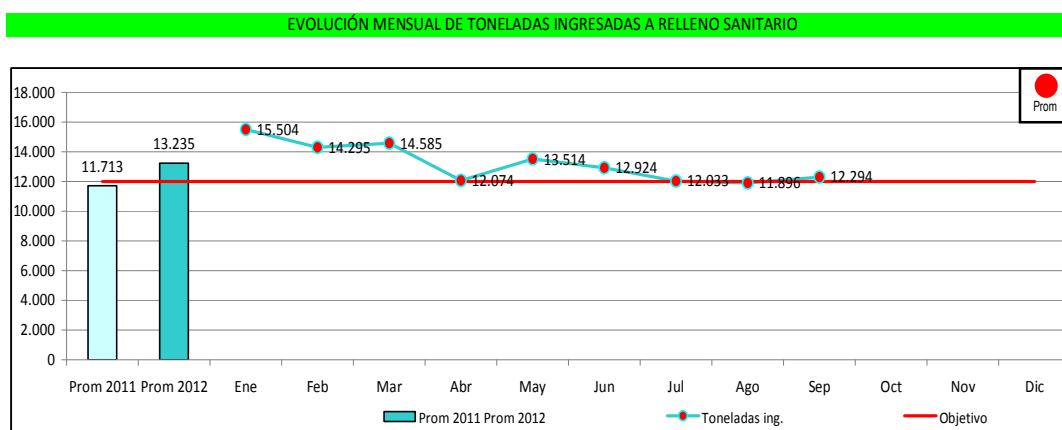
**Tabla VI.7**

Cantidad de RSU por departamento en el año 2018

TOTAL	623 t/día	100%
Capital	139 t/día	22,30 %
Rivadavia	106 t/día	17,00 %
Rawson	147 t/día	23,58 %
Pocito	49 t/día	7,89 %
Chimbas	112 t/día	18,00 %
Santa Lucia	61 t/día	9,78 %
Ullum	4,7 t/día	0,74 %
Zonda	4,5 t/día	0,71 %

**Valor de Generación de residuos año 2018: RSU: 630 t/día**

Según los datos suministrados por la Secretaría de Ambiente de la Provincia de San Juan, la evolución mensual de RSU ingresados al relleno sanitario son los indicados en la gráfica siguiente.



**Fuente:** Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.

Esto nos indica que el total ingresado entre enero y septiembre de 2012 es de 119.119t en 273 días, por lo que el promedio de residuo ingresado al relleno es de:

**Valor de RSU ingresados por día al relleno sanitario en el año 2012: RSU= 450t/día**

En el relleno sanitario de Rivadavia ingresan además del RSU, los residuos asimilables a urbanos provenientes de la industria, que representan de un 15 a un 20%, lo que nos da un total aproximado de 100t/día de residuos industriales.

**Total de RSU que ingresan por día al relleno sanitario en el año 2012: RSU= 550 t/día**

De acuerdo a la Tabla VI.7, el Valor de Generación de RSU para el año 2018, será de 630t/día, y teniendo en cuenta los residuos asimilables a urbanos ese valor se transforma en 760t/día.

**Total de RSU que ingresarán al relleno sanitario en el año 2018: RSU= 760t/día**

### **Volumen del relleno sanitario**

El relleno está conformado por un total 115 celdas según se observa en las Figuras VI.1, dispuestas de la siguiente forma: *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

- Piso 1: 49 celdas, corresponden a las Etapas 1 a la 4.
- Piso 2: 49 celdas, Etapas 5 a la 8.
- Piso 3: 17 celdas, Etapa 9 que corresponde al coronamiento.

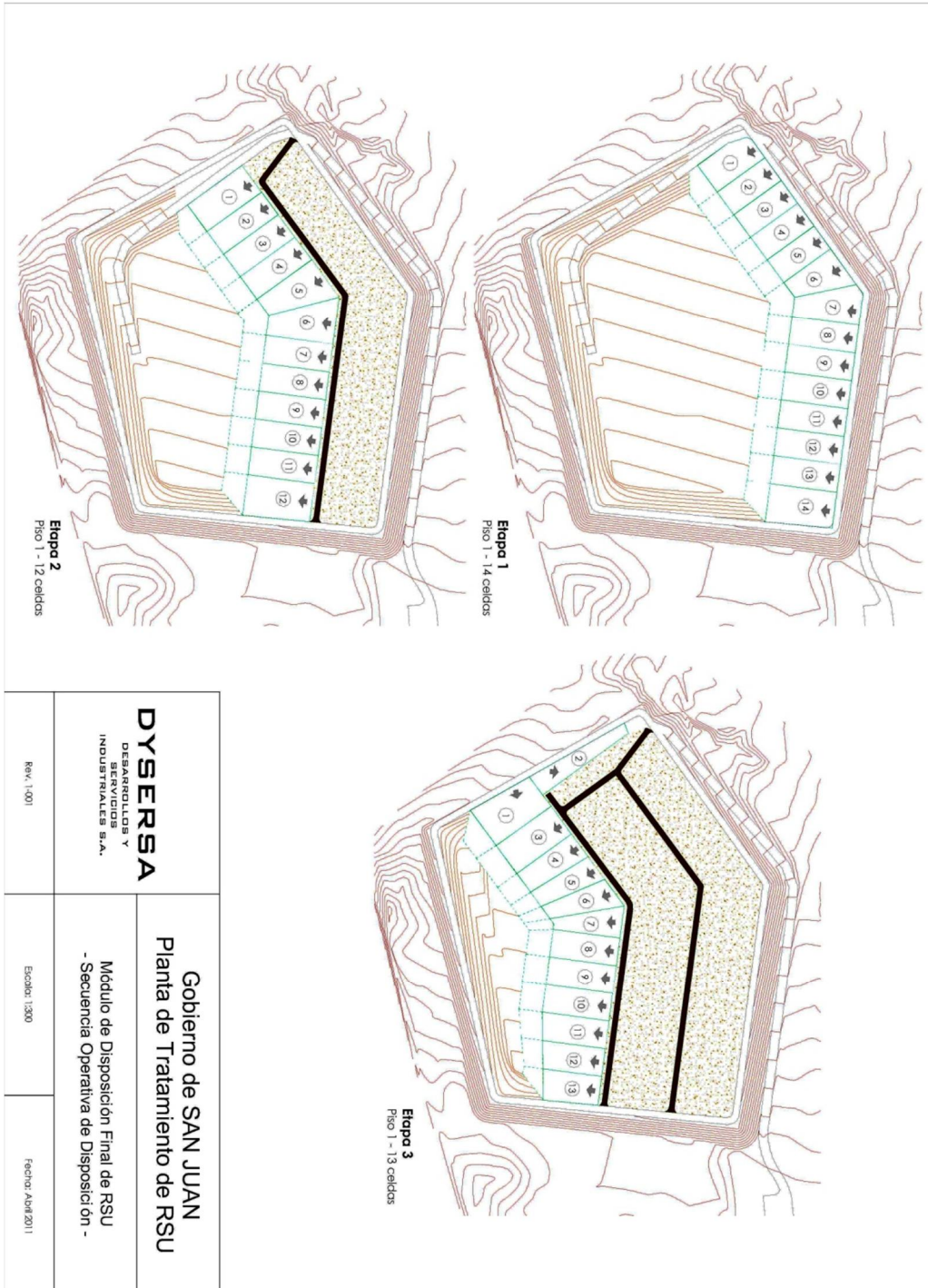
Según el diseño planteado en el proyecto las celdas tienen una altura de 7m, con un ancho de 25m y largo de 50m, solo las celdas de esquina forman un talud de 30°.

En la Tabla VI.8 se expresa el cálculo de las áreas de las celdas que forman el módulo del relleno sanitario. *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*

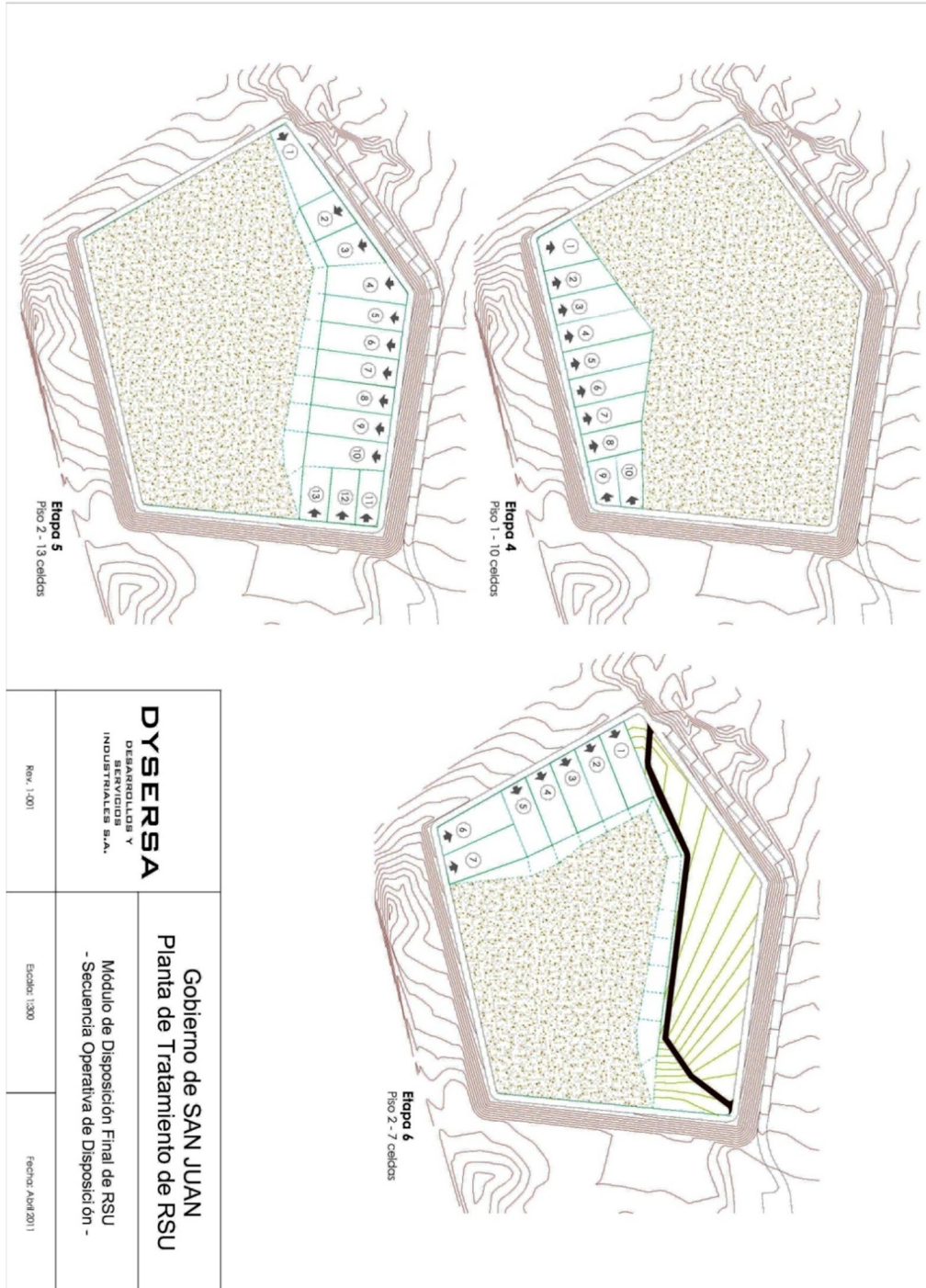
**Tabla VI.8**  
 Área de las celdas del módulo

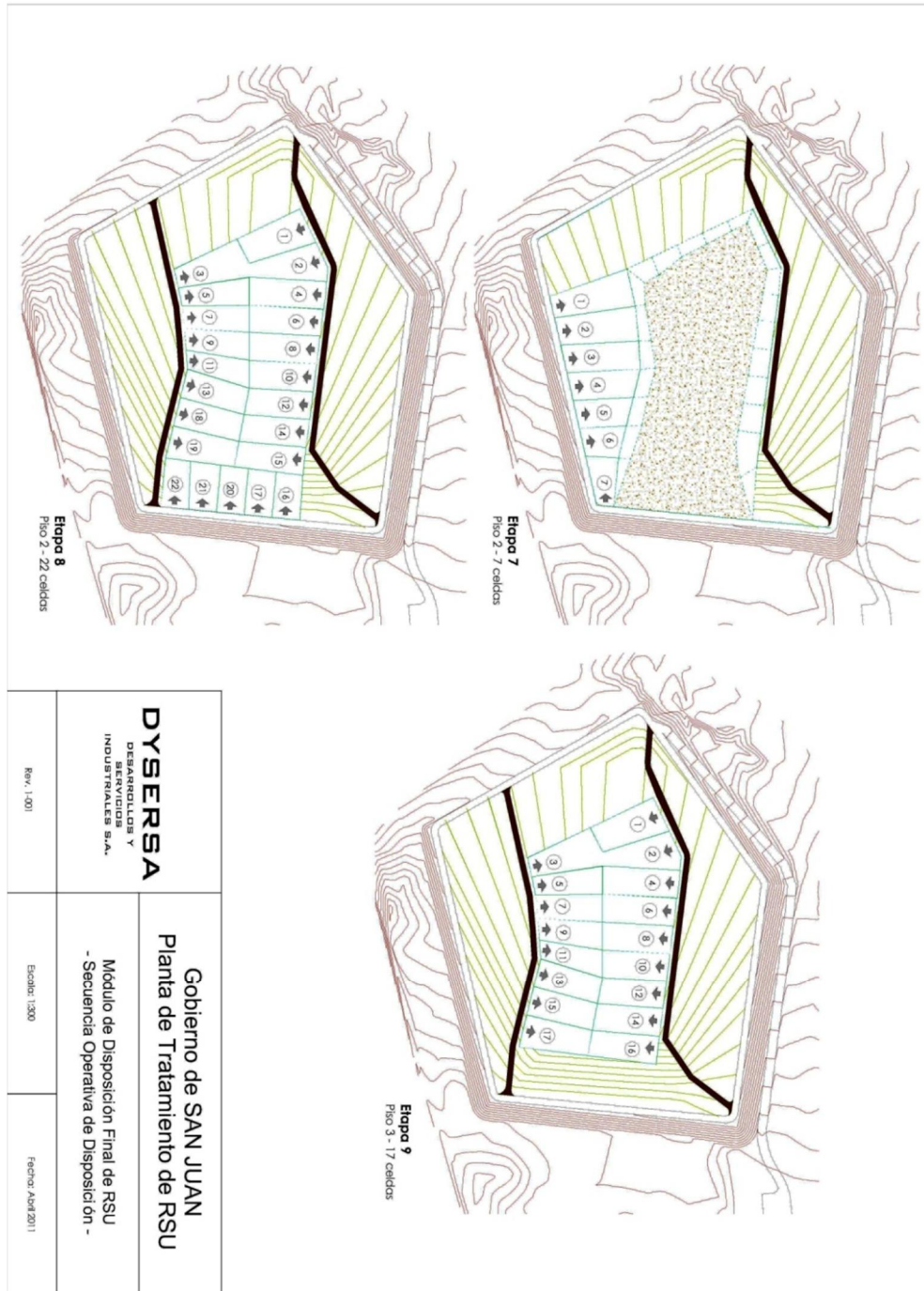
Piso	Etapa	Área (m <sup>2</sup> )
1	1	20.766
	2	19.510
	3	17.757
	4	15.139
2	5	21.292
	6	12.458
	7	10.355
	8	30.702
3	9	25.499
<b>TOTAL</b>		<b>173.478</b>

**Volumen total del módulo: 1.214.346 m<sup>3</sup>**





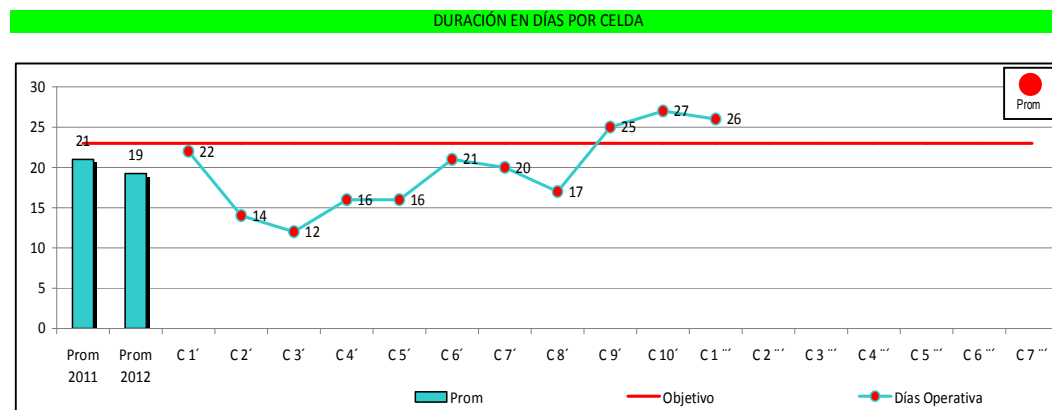
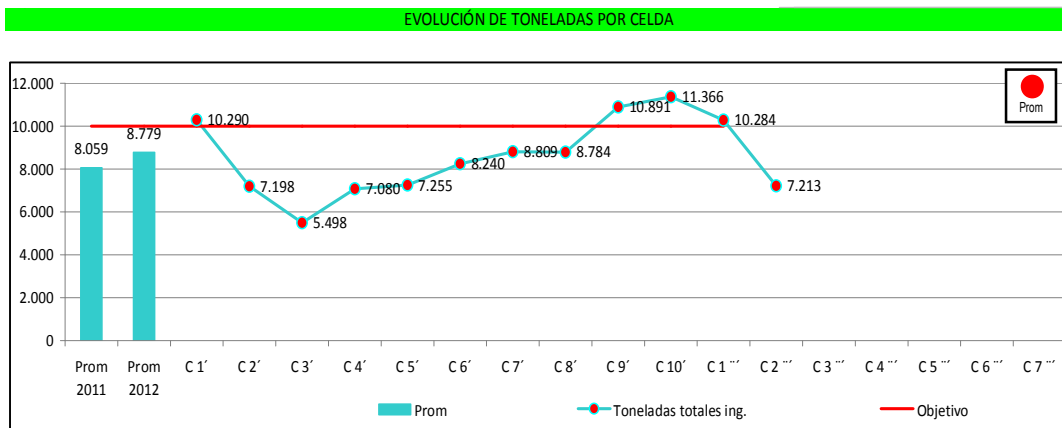




**Figura VI.1** Secuencias constructivas de las celdas en las diferentes etapas en el módulo del relleno sanitario. Imagen PEGIRSU

De acuerdo a lo observado en el Relleno de Rivadavia, la construcción del Piso 1 se ha realizado respetando las áreas pero no las alturas, por lo que las celdas que se han completado no poseen en la práctica una altura de 7m como establece el proyecto, sino que la altura se podría estimar en unos 14m.

La evolución de RSU en toneladas por celdas y la duración de días para el llenado de las celdas se puede observar en las gráficas siguientes. *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*



**Fuente:** Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.

La Tabla VI.9, resume la gráfica anterior.

**Tabla VI.9**  
 Cantidad de residuos y días para el llenado de las celdas

Celdas	RSU (t)	Días
C1´	10.290	22
C2´	7.198	14
C3´	5.498	12
C4´	7.080	16
C5´	7.255	16
C6´	8.240	21
C7´	8.809	20
C8´	8.784	17
C9´	10.891	25
C10´	11.366	27
C1´´	10.284	26

Para calcular las áreas de las celdas, se trabajó con el modelo del proyecto del Módulo de Disposición Final de RSU del Relleno de Rivadavia (Autocad). *Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*

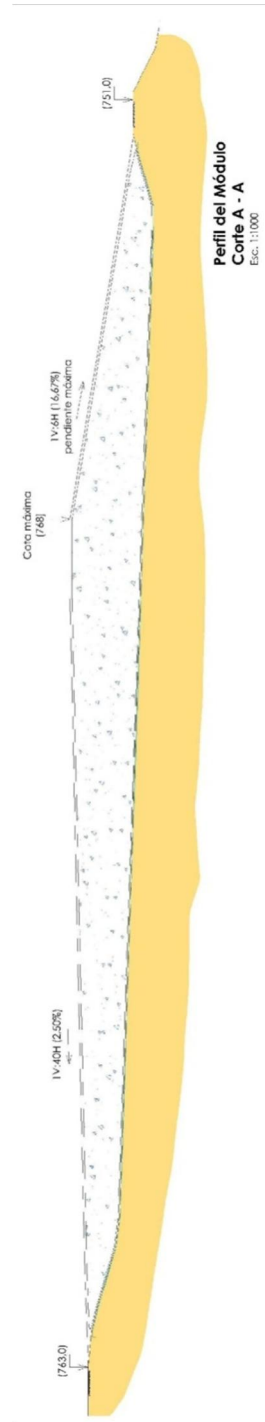
Se calculó el volumen de las mismas, tomando una altura de 14m por celda y con esto se procedió a calcular el peso volumétrico compactado  $\gamma_{RSU}$  de RSU por celda, en la Tabla VI.10.

**Tabla VI.10**  
 Volumen de las celdas y Densidad de los RSU por celda

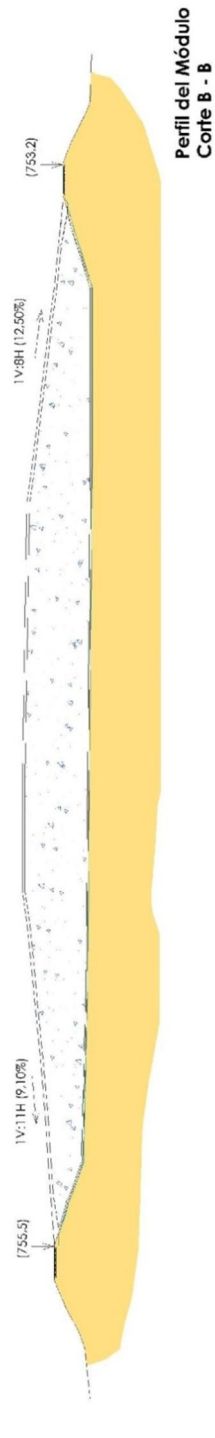
Celdas	Áreas (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	RSU (t)	Densidad $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )
C1'	1501	21.014	10.290	0,49
C2'	1310	18.340	7.198	0,39
C3'	1303	18.242	5.498	0,30
C4'	1296	18.144	7.080	0,39
C5'	1288	18.032	7.255	0,40
C6'	1433	20.062	8.240	0,41
C7'	1649	23.086	8.809	0,38
C8'	1500	21.000	8.784	0,42
C9'	1500	21.000	10.891	0,52
C10'	1500	21.000	11.366	0,54
C1''	1500	21.000	10.284	0,49

**El promedio del peso volumétrico compactado de RSU es de:  $\gamma_{RSU} = 0,43t/m^3$ .**

El relleno sanitario de Rivadavia corresponde a una cuña de RSU como se muestra en las Figura VI.2 y Figura VI.3, siendo la Capacidad total del módulo: 613.690t de RSU.  
*Referencia: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.*



**Figura VI.2** Perfil del Relleno Sanitario – Corte A-A. Imagen PEGIRSU



**Figura VI.3** Perfil del Relleno Sanitario – Corte B-B. Imagen PEGIRSU

En base a los datos obtenidos de la generación actual de residuos que ingresan al relleno sanitario y las estimaciones realizadas tenemos que:

Peso volumétrico compactados de RSU en el relleno  $\gamma_{RSU} = 0,43 \text{ t/m}^3$

RSU que ingresan al relleno sanitario son: 550 t/día

Volumen de RSU/día =  $550 \text{ t/día} \cdot 1/0,43 \text{ t/m}^3 = 1.279 \text{ m}^3/\text{día}$

Volumen de RSU/año = 466.860 m<sup>3</sup>/año

Para el año 2018:

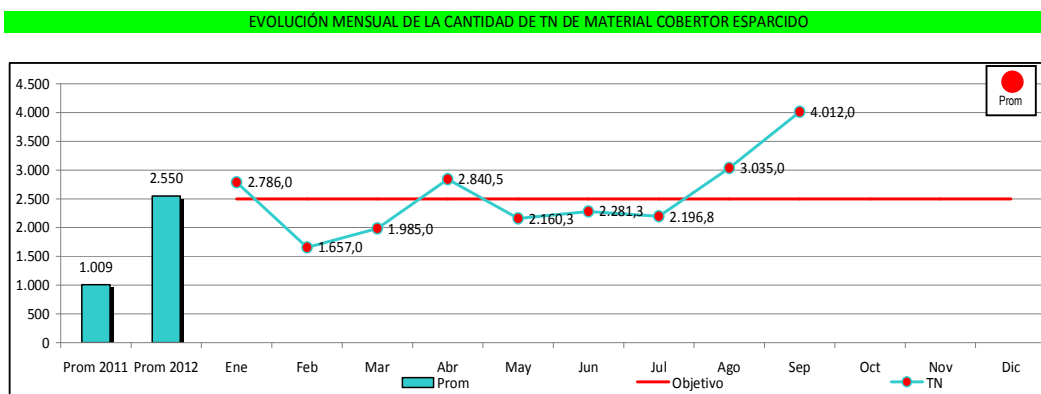
RSU que ingresará al relleno sanitario en el año 2018: 760 t/día

Volumen de RSU/día =  $760 \text{ t/día} \cdot 1/0,87 \text{ t/m}^3 = 874 \text{ m}^3/\text{día}$

Volumen de RSU/año = 319.010 m<sup>3</sup>/año

### c) Cantidad de material de cobertura

Según los datos de los indicadores medidos en el relleno sanitario. La cantidad de material de cobertura esparcido se indica a continuación.



**Fuente:** Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan.



## VI.4. MODELIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO

Para hacer una modelización matemática de los asientos en el relleno sanitario de Rivadavia, se basó en los datos obtenidos en el propio relleno y las estimaciones de los parámetros en función del crecimiento de la población y tomando el conjunto de tres celdas superpuestas.

Considerando la *Celda 8, C8' del Piso 1 Etapa 3*, de la cual se conocen los datos, se superpusieron las celdas sucesivas, *C8'' del Piso 2 Etapa 8* y *C8''' Piso 3 Etapa 9*, en las cuales se harán estimaciones.

Calculando de este modo los asientos para cada una de las celdas, considerando la influencia de las otras.

### VI.4.1. Modelo de Sowers

El cálculo del asiento total para la primera celda *C8'* del Piso 1, se basará en conocer primero el asiento secundario más los asientos primarios de esta celda producidos por la sobrecarga de las celdas *C8''* y *C8'''* de los Pisos 2 y 3 sucesivamente. Y así se continuará con las restantes celdas.

Las Hipótesis para el cálculo estarán de acuerdo con el clima de la región y las condiciones de los residuos sólidos. El RSU del Gran San Juan responde a bajo contenido de materia orgánica y el residuo no tiene prácticamente humedad (estimación  $w = 15\%$ ), por lo tanto los coeficiente de consolidación de Sowers se estimarán para estas condiciones como se indica a continuación.

#### a) Datos e hipótesis del modelo:

$C_c = 0,15.eo$  para bajo contenido de materia orgánica

$C_\alpha = 0,03.eo$  desfavorable para la descomposición

Para conocer los asientos en las Celdas C8'' del Piso 2 y C8''' del Piso 3, debemos hacer una proyección en función del crecimiento de la población y así determinar la cantidad de RSU que llenarían estas celdas, a fin de garantizar la vida útil del relleno hasta el año 2018.

En el año 2012 la cantidad de RSU que lleno la celda C8' fue de 8.784t con un área de 1.500m<sup>2</sup> y una altura estimada de 14m, lo que indica un volumen de 21.000m<sup>3</sup>.

Según la fórmula de proyección tenemos:

Cantidad de RSU Celda C8' = 8.784t (Año 2012)

r = 1,3% anual

n = hasta el año 2018.

$$P_t = P_o (1 + r)^n$$

**Tabla VI.11**

Proyección de la cantidad de RSU para la Celdas C8'' y C8'''

AÑO	RSU (t)
2012	8.784
2013	8.898
2014	9.014
2015	9.131
2016	9.250
2017	9.370
2018	9.492

Las Celdas C8'' y C8''' tendrían un área de 1.500m<sup>2</sup> y 7m de altura según el Proyecto, dando de esta forma un volumen para dichas celdas de 10.500m<sup>3</sup>, por lo tanto el peso volumétrico

del residuo  $\gamma_{RSU}$  deberá ser mayor para la cantidad de residuos que ingresará a las respectivas celdas, con lo cual habrá que mejorar la técnica de compactación llevada adelante en el relleno sanitario. De acuerdo con esta hipótesis, será necesario mejorar la técnica de compactación implementada en el relleno sanitario.

Tomando como valor promedio los pesos de RSU del año 2013 a 2018, la densidad de cálculo será de  $\gamma_{RSU} = 0,87t/m^3$ ; como podemos ver en la Tabla VI.1 este valor es indicativo de un buen grado de compactación.

**b) Hipótesis del desarrollo del llenado de las Celdas C8 en las sucesivas etapas:**

Podemos plantear que según datos suministrados por la Secretaría de Ambiente:

- En el año 2012 se completó la Celda C8' en 22 días que corresponde al Piso 1:  
*Secundaria C8'*
- En el año 2013 sigue llenándose el Piso 1. Hasta aquí solo intervendría la compresibilidad secundaria de la Celda C8'.  
*Secundaria C8'*
- En el año 2014 podríamos estimar que comenzaría el llenado del Piso 2. Aquí continuaríamos con la compresibilidad secundaria de la Celda C8'.  
*Secundaria C8'*
- En el año 2015 se llenaría la Celda C8''. Aquí tendríamos la compresibilidad secundaria de la Celda C8' más la compresibilidad secundaria de la Celda C8'' más la compresibilidad primaria de la Celda C8' debido a la sobrecarga de C8''.  
*Secundaria C8' + Secundaria C8'' + Primaria C8' por C8''*

- En el año 2016 se terminaría de llenar el Piso 2. Aquí continuaríamos con la compresibilidad secundaria de la Celda C8' y C8'' más la compresibilidad primaria de la Celda C8' debido a la sobrecarga de C8''.

*Secundaria C8' + Secundaria C8'' + Primaria C8' por C8''*

- En el año 2017 se comenzaría con el llenado del Piso 3 y se llenaría la Celda C8''' y se completaría en el año 2018. Aquí tendríamos la Compresibilidad Secundaria de las Celdas C8' y C8'' más la Compresibilidad Primaria de la Celda C8' debido a la sobrecarga de la Celda C8'' más la Compresibilidad Primaria de la Celda C8'' debido a la sobrecarga de la Celda C8'''.

*Secundaria C8' + Secundaria C8'' + Secundaria C8''' + Primaria C8' por C8'' +  
Primaria C8'' por C8'''*

#### Modelo de Sowers

Consolidación Primaria:

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log \frac{\sigma_{v0'} + \Delta\sigma_{v0'}}{\sigma_{v0'}} \quad (\text{VI.1})$$

Consolidación Secundaria:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{VI.2})$$

#### **c) Proyección Celda C8':**

- Altura inicial del relleno  $H_0 = 14\text{m}$
- Altura de la celda C8'  $H = 14\text{m}$

- Relación de vacíos  $e_0 = 2$  (estimación)
- Densidad del residuo Celda C8'  $\gamma_{RSU} = 0,43t/m^3$
- Densidad del residuos de las Celdas C8'' y C8'''  $\gamma_{RSU} = 0,87t/m^3$
- Altura de las celdas C8'' y C8''' = 7m (estimación de Proyecto)
- Incremento de la presión por las otras celdas  $\Delta\sigma_{v_0}' = 6,09t/m^2$
- Presión efectiva  $\sigma_{v_0}' = 6,02t/m^2$
- Tiempo de inicio de la consolidación secundaria  $t_1 = 30$  días
- Tiempo de estimación del asiento  $t_2$

La Tabla VI.12 nos da los valores de la Consolidación Secundaria (a partir de 1mes) de la Celda C8'.

**Tabla VI.12**  
 Valores de Asiento Secundario Celda C8'

$C\alpha$	H (m)	$t_1$ (año)	$t_2$ (año)	$S_s$ (m)	Año
0,06	14	-	0,00	-	
0,06	14	0,082	0,08	<b>0,000</b>	2011
0,06	14	0,082	0,25	<b>0,135</b>	
0,06	14	0,082	0,50	<b>0,220</b>	
0,06	14	0,082	1,00	<b>0,304</b>	2012
0,06	14	0,082	1,50	<b>0,353</b>	
0,06	14	0,082	2,00	<b>0,388</b>	2013
0,06	14	0,082	2,50	<b>0,415</b>	
0,06	14	0,082	3,00	<b>0,437</b>	2014
0,06	14	0,082	3,50	<b>0,456</b>	
0,06	14	0,082	4,00	<b>0,472</b>	2015
0,06	14	0,082	4,50	<b>0,487</b>	
0,06	14	0,082	5,00	<b>0,500</b>	2016

0,06	14	0,082	5,50	<b>0,511</b>	
0,06	14	0,082	6,00	<b>0,522</b>	2017
0,06	14	0,082	6,50	<b>0,531</b>	
0,06	14	0,082	7,00	<b>0,540</b>	2018
0,06	14	0,082	7,50	<b>0,549</b>	
0,06	14	0,082	8,00	<b>0,557</b>	2019
0,06	14	0,082	8,50	<b>0,564</b>	
0,06	14	0,082	9,00	<b>0,571</b>	2020
0,06	14	0,082	9,50	<b>0,578</b>	
0,06	14	0,082	10,00	<b>0,584</b>	2021

La Tabla VI.13 y Tabla VI.14, nos dan los valores de la Consolidación Primaria (1mes) de la Celda C8' debido al peso de la Celda C8'' y a la C8'''.

**Tabla VI.13**

Valores de Asiento Primario Celda C8' debido a C8''

eo	Cc	Ho (m)	$\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	Sp (m)
2	0,3	14	6,02	6,09	<b>0,4250</b>

**Tabla VI.14**

Valores de Asiento Primario Celda C8' debido a C8'''

eo	Cc	Ho (m)	$\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	Sp (m)
2	0,3	14	6,02	6,09	<b>0,4250</b>

En la Tabla VI.15 están reflejados los valores del Asiento Total de la Celda C8'

**Tabla VI.15**  
 Valores de Asiento Total Celda C8'

<b>t (año)</b>	<b>S Total (m)</b>	<b>Año</b>
0,00	<b>0,00</b>	
0,08	<b>0,00</b>	2011
0,25	<b>0,14</b>	
0,50	<b>0,22</b>	
1,00	<b>0,30</b>	2012
1,50	<b>0,35</b>	
2,00	<b>0,39</b>	2013
2,50	<b>0,42</b>	
3,00	<b>0,44</b>	2014
3,50	<b>0,46</b>	
4,00	<b>0,90</b>	2015
4,50	<b>0,91</b>	
5,00	<b>0,92</b>	2016
5,50	<b>0,94</b>	
6,00	<b>1,37</b>	2017
6,50	<b>1,38</b>	
7,00	<b>1,39</b>	2018
7,50	<b>1,40</b>	
8,00	<b>1,41</b>	2019
8,50	<b>1,41</b>	
9,00	<b>1,42</b>	2020
9,50	<b>1,43</b>	
10,00	<b>1,43</b>	2021

**d) Proyección Celda C8'':**

- Altura inicial del relleno  $H_0 = 21\text{m}$
- Altura de la celda C8''  $H = 7\text{m}$  (estimación de Proyecto)
- Relación de vacíos  $e_0 = 1,5$  (estimación)
- Densidad promedio del residuo de las Celdas C8'' y C8'''  $\gamma_{RSU} = 0,87\text{t/m}^3$
- Altura de la celda C8'''  $H = 7\text{m}$  (estimación de Proyecto)
- Incremento de la presión por las otras celdas  $\Delta\sigma_{v_0}' = 6,09\text{t/m}^2$
- Presión efectiva  $\sigma_{v_0}' = 12,11\text{t/m}^2$
- Tiempo de inicio de la consolidación secundaria  $t_1 = 30$  días
- Tiempo de estimación del asiento  $t_2$

La Tabla VI.16 indica los valores de la Consolidación Secundaria (a partir de 1mes) de la Celda C8''.

**Tabla VI.16**  
 Valores de Asiento Secundario Celda C8''

$C\alpha$	H (m)	$t_1$ (año)	$t_2$ (año)	Ss (m)	Año
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2011
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2012
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2013
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2014
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	



0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2015
0,045	7	0,082	0,50	<b>0,082</b>	
0,045	7	0,082	1,00	<b>0,114</b>	2016
0,045	7	0,082	1,50	<b>0,132</b>	
0,045	7	0,082	2,00	<b>0,146</b>	2017
0,045	7	0,082	2,50	<b>0,156</b>	
0,045	7	0,082	3,00	<b>0,164</b>	2018
0,045	7	0,082	3,50	<b>0,171</b>	
0,045	7	0,082	4,00	<b>0,177</b>	2019
0,045	7	0,082	4,50	<b>0,183</b>	
0,045	7	0,082	5,00	<b>0,187</b>	2020
0,045	7	0,082	5,50	<b>0,192</b>	
0,045	7	0,082	6,00	<b>0,196</b>	2021

La Tabla VI.17 nos da los valores de la Consolidación Primaria (1mes) de la Celda C8'' debido al peso de la Celda C8'''.

**Tabla VI.17**

Valores de Asiento Primario Celda C8'' debido a C8'''

eo	Cc	Ho (m)	$\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )	Sp (m)
<b>1,5</b>	0,225	21	12,11	6,09	<b>0,3344</b>

En la Tabla VI.18 están reflejados los valores del Asiento Total de la Celda C8''

**Tabla VI.18**  
 Valores de Asiento Total Celda C8''

<b>t (año)</b>	<b>S Total (m)</b>	<b>Año</b>
0,00	<b>0,00</b>	
0,08	<b>0,00</b>	2011
0,25	<b>0,00</b>	
0,50	<b>0,00</b>	
1,00	<b>0,00</b>	2012
1,50	<b>0,00</b>	
2,00	<b>0,00</b>	2013
2,50	<b>0,00</b>	
3,00	<b>0,00</b>	2014
3,50	<b>0,00</b>	
4,00	<b>0,00</b>	2015
4,50	<b>0,08</b>	
5,00	<b>0,11</b>	2016
5,50	<b>0,13</b>	
6,00	<b>0,48</b>	2017
6,50	<b>0,49</b>	
7,00	<b>0,50</b>	2018
7,50	<b>0,51</b>	
8,00	<b>0,51</b>	2019
8,50	<b>0,52</b>	
9,00	<b>0,52</b>	2020
9,50	<b>0,53</b>	
10,00	<b>0,53</b>	2021

**e) Proyección Celda C8''':**

- Altura inicial del relleno  $H_0 = 28\text{m}$
- Altura de la celda C8'''  $H = 7\text{m}$  (estimación de Proyecto)
- Relación de vacíos  $e_0 = 1,5$  (estimación)
- Densidad del residuo de las celdas C8'' y C8'''  $\gamma_{RSU} = 0,87\text{t/m}^3$
- Incremento de la presión por las otras celdas  $\Delta\sigma_{v_0}' = 6,09\text{t/m}^2$
- Presión efectiva  $\sigma_{v_0}' = 18,2\text{t/m}^2$
- Tiempo de inicio de la consolidación secundaria  $t_1 = 30$  días
- Tiempo de estimación del asiento  $t_2$

La Tabla VI.19 nos dan los valores de la Consolidación Secundaria (a partir de 1mes) de la Celda C8'''.

**Tabla VI.19**  
 Valores de Asiento Secundario Celda C8'''

$C\alpha$	H (m)	$t_1$ (año)	$t_2$ (año)	$S_s$ (m)	Año
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2011
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2012
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2013
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2014
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2015

0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2016
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	
0,045	7	0,082	0,00	<b>0,000</b>	2017
0,045	7	0,082	0,50	<b>0,082</b>	
0,045	7	0,082	1,00	<b>0,114</b>	2018
0,045	7	0,082	1,50	<b>0,132</b>	
0,045	7	0,082	2,00	<b>0,146</b>	2019
0,045	7	0,082	2,50	<b>0,156</b>	
0,045	7	0,082	3,00	<b>0,164</b>	2020
0,045	7	0,082	3,50	<b>0,171</b>	
0,045	7	0,082	4,00	<b>0,177</b>	2021

En la Tabla VI.20 están reflejados los valores del Asiento Total de la Celda C8'''

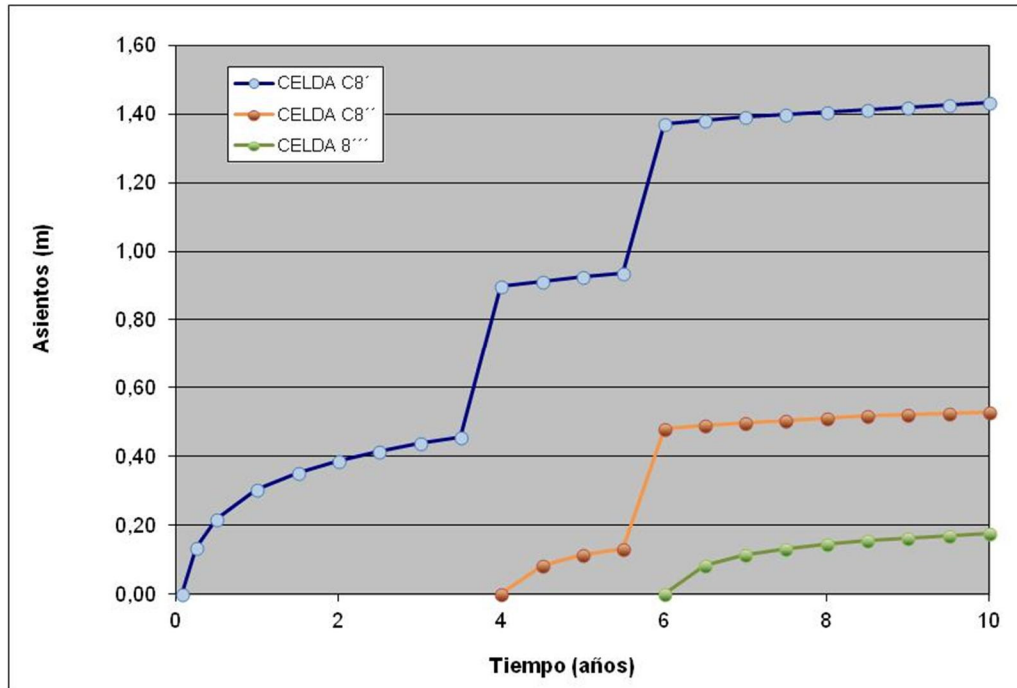
**Tabla VI.20**

Valores de Asiento Total Celda C8'''

t (año)	S Total (m)	Año
0,00	<b>0,00</b>	
0,08	<b>0,00</b>	2011
0,25	<b>0,00</b>	
0,50	<b>0,00</b>	
1,00	<b>0,00</b>	2012
1,50	<b>0,00</b>	
2,00	<b>0,00</b>	2013
2,50	<b>0,00</b>	
3,00	<b>0,00</b>	2014

3,50	<b>0,00</b>	
4,00	<b>0,00</b>	2015
4,50	<b>0,00</b>	
5,00	<b>0,00</b>	2016
5,50	<b>0,00</b>	
6,00	<b>0,00</b>	2017
6,50	<b>0,08</b>	
7,00	<b>0,11</b>	2018
7,50	<b>0,13</b>	
8,00	<b>0,15</b>	2019
8,50	<b>0,16</b>	
9,00	<b>0,16</b>	2020
9,50	<b>0,17</b>	
10,00	<b>0,18</b>	2021

La Figura VI.4 nos da los valores de asientos para cada celda C8', C8'' y C8''' correspondiente a cada piso.



**Figura VI.4** Gráfica Asientos - Tiempo de cada celda C8 en los 3 pisos

#### f) Proyección del Asiento Total

El Asiento Total según el Modelo de Sowers producido en el coronamiento del relleno sanitario, considerando los tres pisos y en coincidencia con las celdas C8', C8'' y C8''', sería la suma de los asientos primarios y secundarios en todas las celdas como queda expresado en la Tabla VI.21.

**Tabla VI.21**

Asiento Total Sowers de las tres celdas C8

<b>Año</b>	<b>t (año)</b>	<b>S Total (m)</b>
<b>2011</b>	0,00	<b>0,00</b>
	0,25	<b>0,14</b>
	0,50	<b>0,22</b>
<b>2012</b>	1,00	<b>0,30</b>
	1,50	<b>0,35</b>
<b>2013</b>	2,00	<b>0,39</b>
	2,50	<b>0,42</b>
<b>2014</b>	3,00	<b>0,44</b>
	3,50	<b>0,46</b>
<b>2015</b>	4,00	<b>0,90</b>
	4,50	<b>0,99</b>
<b>2016</b>	5,00	<b>1,04</b>
	5,50	<b>1,07</b>
<b>2017</b>	6,00	<b>1,85</b>
	6,50	<b>1,95</b>
<b>2018</b>	7,00	<b>2,00</b>
	7,50	<b>2,04</b>
<b>2019</b>	8,00	<b>2,06</b>
	8,50	<b>2,09</b>
<b>2020</b>	9,00	<b>2,11</b>
	9,50	<b>2,12</b>
<b>2021</b>	10,00	<b>2,14</b>

En la Figura VI.5 se observan las curvas de compresibilidad de cada celda C8 y la curva del Asiento Total para la superposición de las tres celdas.

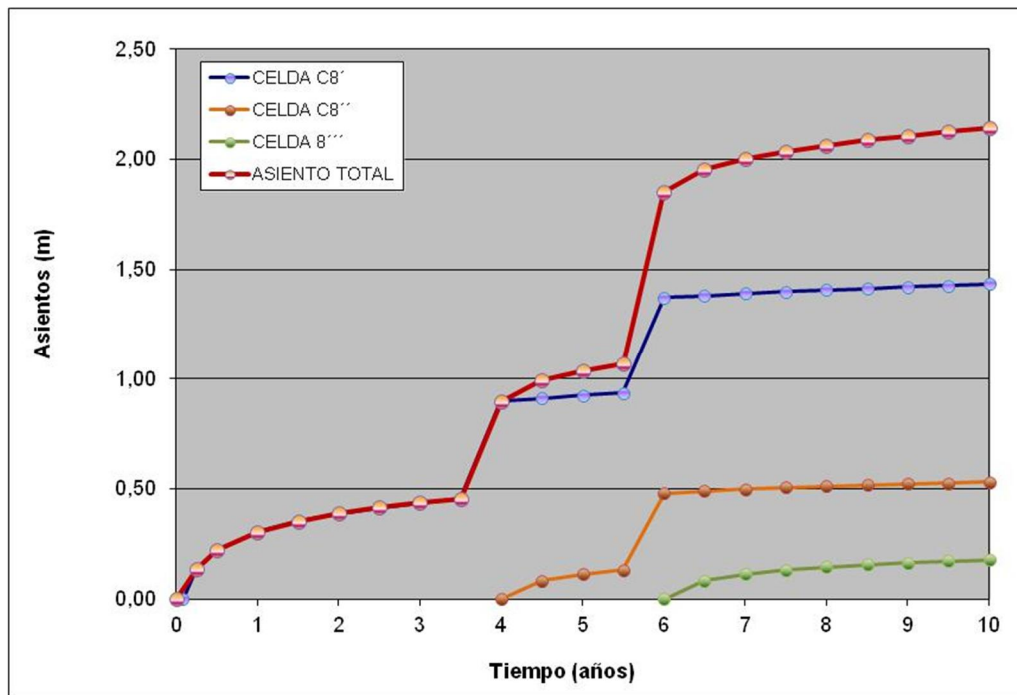


Figura VI.5 Gráfica Asientos - Tiempo Total para las celdas C8

### VI.4.2. Modelo Meruelo

Para el cálculo del asiento por el Modelo Meruelo en las tres celdas C8 se considerarán las tres superpuestas y con este modelo se analiza solamente la consolidación secundaria.

$$\Delta S = \frac{\alpha \cdot H \cdot COD}{Kh \cdot Tc} \cdot (1 - e^{-KhTc}) \cdot (e^{-Kht} - e^{-Kh(t-Tc)}) \quad (VI.3)$$

Datos:

- El parámetro Contenido de Materia Orgánica Biodegradable COD = 0,25, este valor fue encontrado por Palma (1995) para los RSU de Cantabria, España.



- El Coeficiente de Hidrólisis  $K_h = 0,0028$  (1/días) se estimó como variable de ajuste del modelo.
- El Coeficiente de Pérdida de Masa “ $\alpha$ ” se estimó como variable de ajuste del modelo  $\alpha = 0,3$ .
- Tiempo de construcción del relleno se consideró  $T_c$  (días)
- Tiempo al cual se quiere predecir los asientos  $t$
- Altura de la Celda C8'  $H = 14m$
- Altura de las Celdas C8'' y C8'''  $H = 7m$

En la Tabla VI.22 podemos ver la consolidación de la Celda C8' para una altura  $H = 14m$  y se produciría en el año 2011.

**Tabla VI.22**  
 Valores de Asiento de la Celda C8'

$\alpha$ .COD	$K_h$	$T_c$ (días)	$t$ (días)	$e^{K_h.t}$	$e^{K_h(t-T_c)}$	Exp.	$t$ (años)	$S_s$ (m)
<b>0,075</b>	0,0028	100	3,65				0,1	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	100	0,76	1,00	0,13	0,27	<b>0,13</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	182,5	0,60	0,79	0,31	0,50	<b>0,32</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	365	0,36	0,48	0,58	1,00	<b>0,61</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	547,5	0,22	0,29	0,75	1,50	<b>0,79</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	730	0,13	0,17	0,85	2,00	<b>0,89</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	912,5	0,08	0,10	0,91	2,50	<b>0,96</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1095	0,05	0,06	0,95	3,00	<b>0,99</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1460	0,02	0,02	0,98	4,00	<b>1,03</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1825	0,01	0,01	0,99	5,00	<b>1,04</b>

<b>0,075</b>	0,0028	100	2190	0,00	0,00	1,00	6,00	<b>1,05</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	2555	0,00	0,00	1,00	7,00	<b>1,05</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	2920	0,00	0,00	1,00	8,00	<b>1,05</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	3285	0,00	0,00	1,00	9,00	<b>1,05</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	3650	0,00	0,00	1,00	10,0	<b>1,05</b>

En la Tabla VI.23 podemos ver la consolidación de la Celda C8" para una altura H = 7m y se produciría en el año 2015.

**Tabla VI.23**  
 Valores de Asiento de la Celda C8"

$\alpha$ .COD	Kh	Tc	t	$e^{Kh \cdot t}$	$e^{Kh(t-Tc)}$	Exp.	t	Ss
		(días)	(días)				(años)	(m)
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	0,27	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	0,50	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	1,00	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	1,50	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	2,00	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	2,50	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	3,00	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	365	0,36	0,48	0,58	4,00	<b>0,00</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	730	0,13	0,17	0,85	5,00	<b>0,31</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1095	0,05	0,06	0,95	6,00	<b>0,45</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1460	0,02	0,02	0,98	7,00	<b>0,50</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	1825	0,01	0,01	0,99	8,00	<b>0,51</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	2190	0,00	0,00	1,00	9,00	<b>0,52</b>
<b>0,075</b>	0,0028	100	2555	0,00	0,00	1,00	10,0	<b>0,52</b>

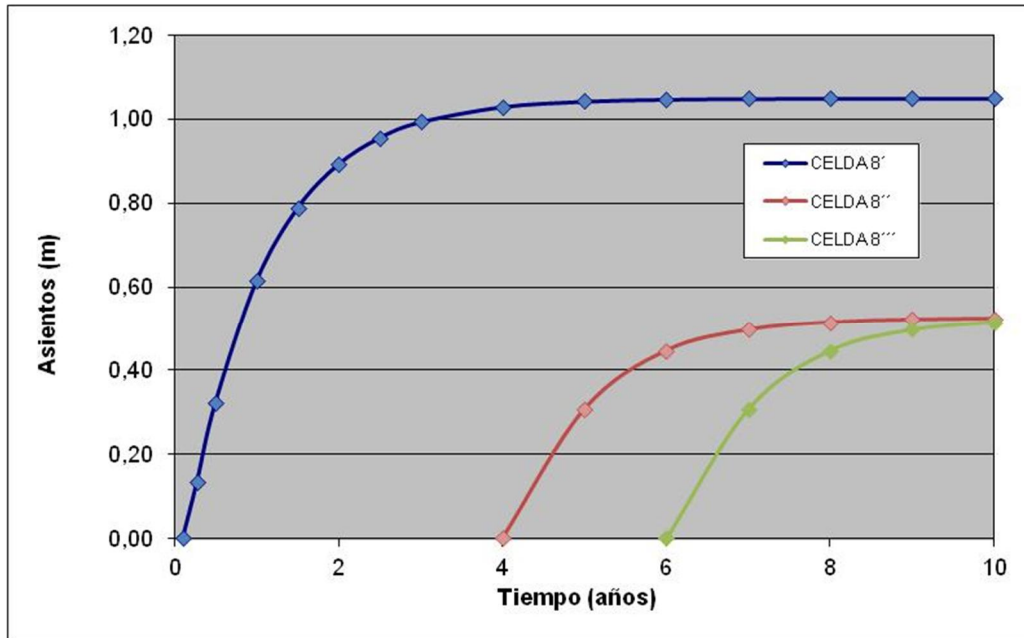
En la Tabla VI.24 podemos ver la consolidación de la Celda C8''' para una altura  $H = 7m$  y se produciría en el año 2017.

**Tabla VI.24**

Valores de Asiento de la Celda C8'''

$\alpha.COD$	$K_h$	$T_c$ (días)	$t$ (días)	$e^{K_h.t}$	$e^{K_h(t-T_c)}$	Exp.	$t$ (años)	$S_s$ (m)
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	0,27	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	0,50	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	1,00	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	1,50	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	2,00	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	2,50	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	3,00	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	4,00	0,00
0,075	0,0028	100	0	1,00	1,32	-0,15	5,00	0,00
0,075	0,0028	100	365	0,36	0,48	0,58	6,00	0,00
0,075	0,0028	100	730	0,13	0,17	0,85	7,00	0,31
0,075	0,0028	100	1095	0,05	0,06	0,95	8,00	0,45
0,075	0,0028	100	1460	0,02	0,02	0,98	9,00	0,50
0,075	0,0028	100	1825	0,01	0,01	0,99	10,0	0,51

En la Figura VI.6 se muestran las gráficas de las curvas de consolidación para cada Celda C8.



**Figura VI.6** Gráfica Asientos - Tiempo de cada celda C8

**Proyección del Asiento Total**

El Asiento Total es la superposición de los asentamientos de las tres celdas C8', C8'' y C8''' en forma consecutiva como queda reflejado en la Tabla VI.25.

**Tabla VI.25**

Asiento Total Meruelo de las tres celdas C8

Año	t (año)	S Total (m)
2011	0,27	0,13
	0,50	0,32
2012	1,00	0,61
	1,50	0,79

<b>2013</b>	2,00	<b>0,89</b>
	2,50	<b>0,96</b>
<b>2014</b>	3,00	<b>0,99</b>
<b>2015</b>	4,00	<b>1,03</b>
<b>2016</b>	5,00	<b>1,35</b>
<b>2017</b>	6,00	<b>1,49</b>
<b>2018</b>	7,00	<b>1,85</b>
<b>2019</b>	8,00	<b>2,01</b>
<b>2020</b>	9,00	<b>2,07</b>
<b>2021</b>	10,00	<b>2,09</b>

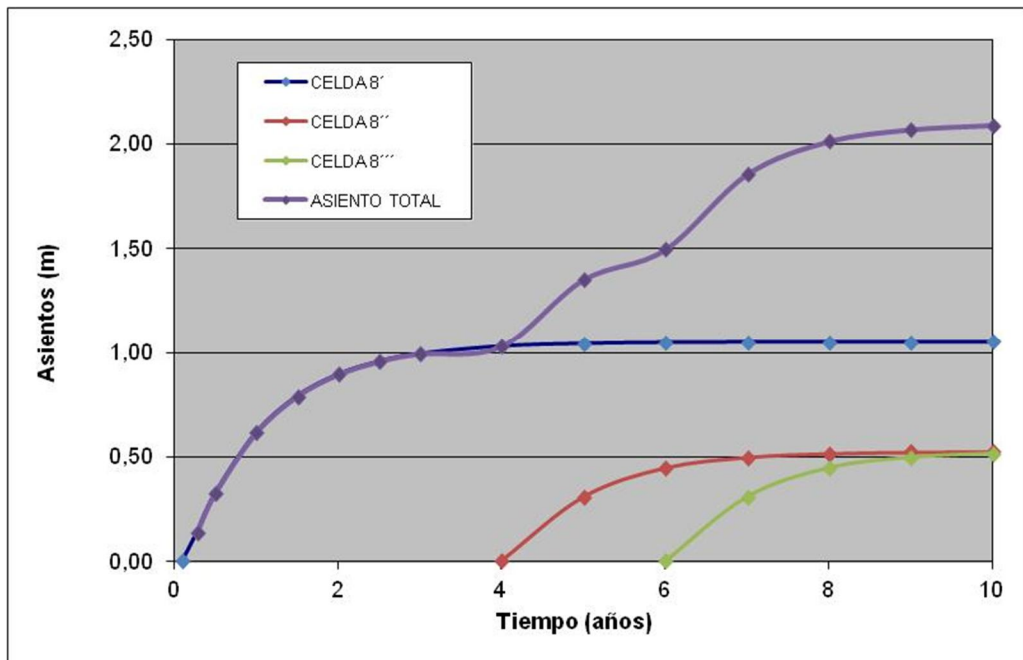
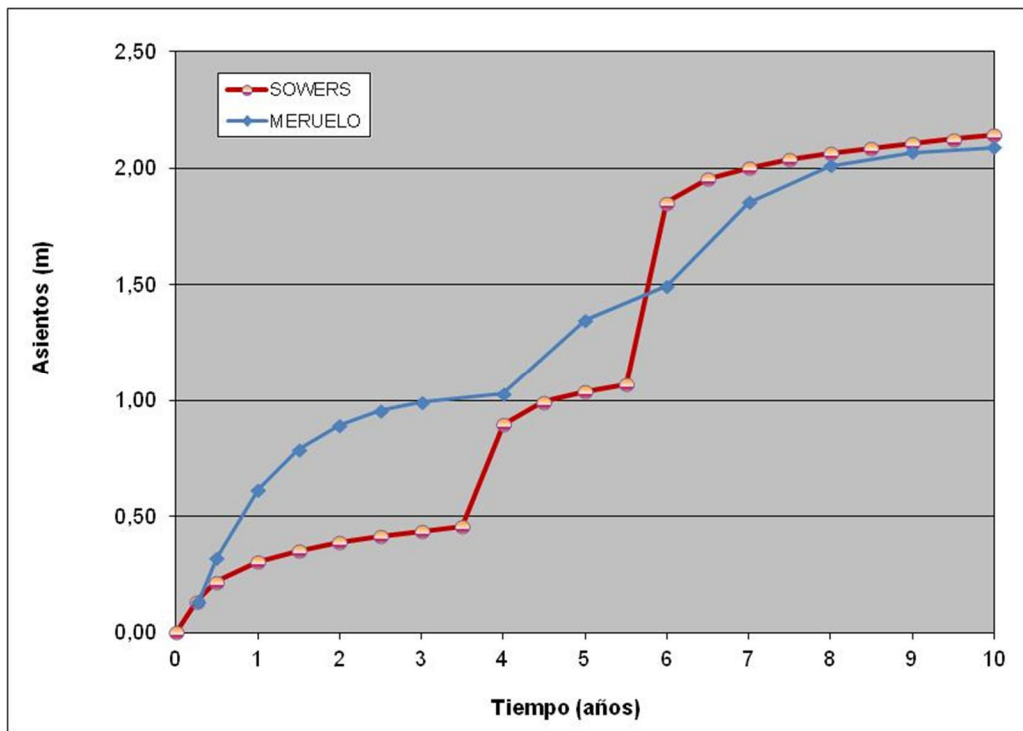


Figura VI.7 Gráfica Asientos - Tiempo Total para las celdas C8

### VI.4.3. Comparación de los modelos

Como análisis comparativo entre ambos modelos para la superposición de las tres celdas C8, en la Figura VI.8 podemos observar los valores de asiento tiempo calculados con el Modelo de Sowers y Meruelo.



**Figura VI.8** Gráfica Asientos - Tiempo para las celdas C8. Sowers y Meruelo

Como podemos observar los dos modelos tiene una línea de asientos similar, en el comienzo del llenado del relleno y la finalización de su vida útil coinciden en sus valores.

Los valores del asiento final son:

Modelo de Sowers: 2,14m

Modelo Meruelo: 2,09m

Con lo cual existe una apreciable coincidencia, la diferencia se plantea en la forma de producirse este asiento a lo largo del tiempo ya que en Sowers la consolidación primaria hace que se evidencie el asentamiento en los periodos de llenado correspondiente a cada Piso (escalonada), que en Meruelo ocurre en forma progresiva (continua) y se pone de manifiesto en el coronamiento al final de la compresibilidad.

El modelo de Sowers al ser más escalonado, presenta saltos de asientos (consolidación primaria) y periodos de poca deformación secundaria. Por otro lado el modelo Meruelo es más continuo en su deformación.

Constructivamente sería beneficioso aprovechar esos escalones rápidos planteados en el modelo de Sowers, porque después de ellos se podría rellenar nuevamente.

# CAPÍTULO VII



## CONCLUSIONES



## VII. CONCLUSIONES

---

En el presente trabajo se ha realizado en primer lugar un análisis de los antecedentes sobre los estudios de compresibilidad en los rellenos sanitarios a través de modelos matemáticos, para predecir los asentamientos originados por los residuos sólidos urbanos, haciendo referencia a los investigadores y las Universidades que han trabajado en esta temática.

Por otro lado, se ha presentado el contexto regional del tratamiento de los RSU para las Provincias de Cuyo, en especial San Juan y Mendoza, las cuales acompañan la Política Nacional sobre el tratamiento final de RSU, participando del Proyecto Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (PNGIRSU).

Se analizó con detalle el caso de la Provincia de San Juan, que a través de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia, ha implementado el “PEGIRSU”, Plan Estratégico de Gestión Integral de los RSU. Cabe resaltar que hasta el año 2011, se contaba apenas con un vertedero incontrolado donde se llevaban los residuos del Gran San Juan y departamentos aledaños. El 27 de abril de 2011 se inaugura el primer relleno sanitario de la Provincia en el Departamento Rivadavia y se instala la Planta de Tecnologías Ambientales. Todo esto en el mismo predio del viejo vertedero, que fue remediado, y donde el actual es gestionado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Luego se trabajó en la caracterización de los RSU en la Región de Cuyo. Para esto, se ha tomado de la bibliografía la clasificación de los residuos sólidos de acuerdo al uso del suelo y su localización y la clasificación geotécnica de los mismos, como también sus propiedades físicas, siendo estos parámetros de mucha importancia ya que afectan la estabilidad y el comportamiento a largo plazo de los rellenos sanitarios. A partir de datos medidos por la

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, y estimaciones a partir de datos publicados, se realizó una caracterización de los RSU de San Juan.

El análisis de la compresibilidad en los rellenos sanitarios se basó en la experiencia en el comportamiento de materiales blandos que brinda la Geotecnia, mediante algunos modelos matemáticos propuestos. Estos modelos matemáticos, planteados en la bibliografía internacional, se basan en los conceptos formulados por la Mecánica de Suelos para estimar los asentamientos y tiempos asociados en procesos de consolidación de estratos arcillosos. Los RSU, sin embargo, presentan un comportamiento más complejo controlado por la degradación química y la descomposición biológica de la materia orgánica, fenómenos que dependen de factores ambientales y sociales, característicos de cada lugar.

En este trabajo se presentaron los modelos más utilizados para el análisis de la compresibilidad de los RSU, como son los modelos de Sowers (1973), Yen & Scalon (1975), Gandola et al (1994) y Meruelo (1995). Luego se realizó un análisis comparativo donde se evaluaron los modelos de Sowers, Meruelo y Gandola. Se realizó un análisis paramétrico para cada modelo separadamente, y fueron revisadas las hipótesis asumidas, el sentido físico de cada parámetro, y su forma de ajuste. Para concluir, se resaltaron potencialidades y limitaciones de cada modelo.

Del análisis comparativo de los modelos expuestos, hemos observado que el Modelo de Sowers, basado en los principios de la Mecánica de Suelos, modeliza cualitativamente los procesos responsables de los asentamientos, utilizando parámetros que tienen sentido físico y están relacionados con propiedades conocidas y similares a los suelos, brindando una mejor interpretación de la compresibilidad de los asentamientos. Por otra parte, el Modelo Meruelo ofrece una mejor fundamentación de la consolidación de los residuos sólidos debido al proceso de biodegradación de los mismos, pero no tiene en cuenta otros factores involucrados en la compresibilidad de los residuos.

De esta forma podemos decir que ambos modelos son adecuados y con características específicas que los hacen herramientas complementarias para la predicción de asentamientos de

rellenos de RSU. Con respecto al Modelo de Gandola, este es un modelo de ajuste exponencial de las curvas de asientos, y sus parámetros son de naturaleza matemática (valores asintóticos inicial y final), no teniendo conexión clara con los fenómenos que gobiernan los asientos.

Para el ajuste y proyección de los asentamientos, se tomaron valores experimentales de estudios realizados en el vertedero de Madrid por el CEDEX, donde se plantea un terraplén experimental de suelo que representa la sobrecarga adicional, la construcción de una línea continua de asientos "LCA" en el terraplén que permite medir el asiento en diversos puntos y así contrastar los modelos de Sowers, Meruelo y Gandola para una proyección a 5 años y medio. Resultando que en los modelos de Sowers y Meruelo nos dan valores muy próximos y están dentro de los rangos planteados en la bibliografía internacional.

Del análisis comparativo de las previsiones de Sowers y Meruelo, basadas en los valores de asientos medidos, podemos destacar que ambos modelos ajustan dichos valores experimentales de forma satisfactoria. Por otro lado, presentan diferencias en la proyección de asientos a largo plazo; el modelo Meruelo proyecta una marcada estabilización de los asientos por una rápida caída de la tasa de deformación (tipo asintótica) mientras que el modelo de Sowers proyecta una estabilización menos pronunciada de los asientos, con mayores tasas de deformación (tipo logarítmica).

Finalmente, tomando como base el diseño del Relleno Sanitario de Rivadavia, San Juan, se asumió un modelo geométrico temporal de disposición final de RSU compuesto de tres celdas, con el objetivo de analizar su comportamiento geotécnico para 10 años. Para este análisis, se realizó la calibración de los modelos matemáticos mediante la estimación de los valores de los parámetros geotécnicos, con el fin de calcular la proyección de los asientos en el tiempo. Se tomó el conjunto de tres celdas superpuestas. La Celda C8' del Piso 1 Etapa 3, de la cual se conocen los datos, y se superpusieron las celdas sucesivas, C8'' del Piso 2 Etapa 8 y C8''' Piso 3 Etapa 9, en las cuales se hicieron estimaciones. Calculando de este modo los asientos para cada una de las celdas, considerando la influencia de las otras.

En los dos modelos se observó una evolución de asientos similar, en el comienzo del llenado del relleno y en la finalización de su vida útil coinciden en sus valores. Con lo cual existe una apreciable coincidencia; la diferencia se plantea en la forma de producirse este asiento a lo largo del tiempo, ya que en Sowers la consolidación primaria hace que se evidencie el asentamiento en los periodos de llenado correspondiente a cada Piso (escalonada), que en Meruelo ocurre en forma progresiva (continua) y se pone de manifiesto en el coronamiento al final de la compresibilidad. El modelo de Sowers al ser más escalonado, presenta saltos de asientos (consolidación primaria) y periodos de poca deformación secundaria. Por otro lado el modelo Meruelo es más continuo en su deformación.

#### **Líneas de Investigación Futuras:**

Se podrían plantear varias direcciones que originen futuras investigaciones y continuaciones de este trabajo, las que se indicarían como nuevas propuestas que se detallan a continuación:

- I. Realizar una investigación experimental de campaña y laboratorio para conocer el comportamiento de los RSU y así determinar y cuantificar las propiedades geotécnicas de los rellenos sanitarios en la Región de Cuyo.
- II. Estudiar los métodos para la mejora de los procesos de tratamiento de los RSU, los distintos métodos de compactación y evaluar sus resultados como también otros tratamientos que aceleren el proceso de biodegradación de los residuos orgánicos para mejorar las propiedades mecánicas a corto plazo.
- III. Realizar mayores investigaciones en los rellenos sanitarios de la Región de Cuyo, a fin de poder establecer valores de referencia en relación al clima, composición de residuos, generación de lixiviados y biogás, y de esta forma realizar correlaciones y aplicarlas en las futuras obras.

# CAPÍTULO VIII



# BIBLIOGRAFÍA

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

---

ABACA, M., TURCUMÁN, M., GÓMEZ, J., GUARNIERI, M., ESPINOZA, S., ORTIZ, M. & MORALES, C. (2011). “Sistema de gestión integral de los residuos sólidos urbanos para un departamento rural de la Provincia de San Juan”. 1° Edición de 500 ejemplares. Consejo Federal de Inversiones. ISBN 978-987-510-097-8. Impreso en Sacerdoti S.A. Buenos Aires, Abril de 2011. Presentado en la Feria del Libro de Buenos Aires el 27 de abril de 2011.

ARIAS, A. (1994). “Modelo de asentamiento de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos”. Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental D.C.T.A. y M. A. Universidad de Cantabria, España.

CARTIER, G. & BALDIT, R. (1983). “Comportement geotechnique des décharges de résidus urbains”. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Pont et Chaussées, N°128. Paris, Francia.

ESPINACE, R. et al (1983). “Compresibilidad de vertederos sanitarios”. V Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente. Temuco, Chile.

ESPINACE, R. et al (1983). “El vertedero sanitario y su empleo como suelo de fundación”. V Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente. Temuco, Chile.

ESPINACE, R. et al (1989). “Recuperación de vertederos sanitarios. Caso vertedero experimental de Limache. Chile”. 1° Congreso de Ingeniería Ambiental. Bilbao, España.

- ESPINACE, R., PALMA, J. (1990). “Problemas geotécnicos de los rellenos sanitarios”. Ingeniería Civil, Revista CEDEX N°77, diciembre, p.77-83. Madrid, España.
- ESPINACE, R., DIAZ, I., PALMA, J. (1991). “Propiedades mecánicas del relleno sanitario de Limache”. IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Viña del Mar, Chile
- ESPINACE, R., CAFFARENA, J., PALMA, J. (1999). “Patologías en construcciones sobre arenas impactadas por el vertido de residuos sólidos”. V Congreso Iberoamericano de Patologías de las Construcciones. Montevideo, Uruguay.
- ESPINACE, R., PALMA, J. SZANTO, N. et al (1997). “Asentamientos en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados”. 4° Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Chile.
- ESPINACE, R., PALMA, J. SZANTO, N. et al (1997). “Curso sobre la geotecnia ambiental aplicada a los vertederos sanitarios”. Escuela de Ingeniería en Construcciones de la Universidad Católica de Valparaiso. Valparaiso, Chile.
- ESPINACE, R., PALMA, SANCHEZ ALCITURRI, J. (1999). “Experiencias de aplicación de modelos para la determinación de los asentamientos de rellenos sanitarios”. XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Foz Iguazú, Brasil.
- FAJARDO, M. (1989), “Edificación en rellenos artificiales formados por basuras”. VIII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. La Serena, Chile.
- FASSET, J. B., LEONARDS, G. A. & REPETTO, P. C. (1994). “Geotechnical properties of municipal solid wasted and their use in landfill design”. Proc., Waste Technical Conference, Charleston, SC, USA.

- FIGLIORE, J., TURCUMÁN, M., VÁZQUEZ, G. (2008). “Estudio y caracterización de residuos sólidos. Aplicación a vertederos del Gran San Juan”. Proyecto de Investigación 21/I567 Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina.
- GRAB, M. A. & VALERO, S. N. (1995). “Geotechnical properties of municipal solid waste”. *Geotechnical Testing Journal*, 18 (2).
- GANDOLLA, M., DUGNANI, L., BRESSI, G. & ACAIA, C. (1992). “The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites”. *Proc. Int. Solid Waste Association Conference*, pp. 1-17. Madrid, España.
- GHISLANE HENRIQUES PEREIRA ANA (2000). “Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos”. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, España.
- GIBSON, R. E. & LO, K. Y. (1961). “A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression”. *ACTA Poytechnic Scandianavica*, Ci 10, 296.
- GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q. (1996). “Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters”. *Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics*. Osaka, Japón. Ed. Kamon, Balkema, Vol. II.
- JUAREZ BADILLO E., RICO RODRIGUEZ A. “Mecánica de suelos: Teoría y Aplicación de la Mecánica de suelos”, 1a ed., México: LIMUSA s.a., 1973 (2a edición 1979).
- JUCA, J., MARIANO, M. & MELO, V. (1999). “Recalques e decomposicao de materia orgánica em aterros de residuos sólidos na regioao metropolitana do Recife”. 20° Congreso Brasileiro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Río de Janeiro, Brasil.
- JUCA, J., MONTEIRO, V., OLIVEIRA, F. & MACIEL, F. (1999). “Monitoramento ambiental de aterros de residuos sólidos da Muribeca”. 4° Congreso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99. Sao José dos Campos.



MARIANO, M. (1999). “Recalques no aterro de residuos sólidos da Muribeca – PE”. Tesis de Mestrando, Universidad Federal de Pernambuco. Recife, Brasil.

MIRANDA SILVEIRA A., “Estudo de peso específico de residuos solidos urbanos”. Tesis de Maestria. UFRJ. Brasil

OLALLA, C. (1991). “Curso Comportamiento geotécnico de rellenos artificiales”. CEDEX. Madrid, España.

OLALLA, C. (1993). “Vertederos de basuras y escombros, problemas y tratamiento”. Curso sobre Obras de Materiales Suelos no Convencionales. CEDEX. Madrid, España.

PALMA, J. (1995). “Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos”. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander, España.

PALMA, J., ESPINACE, R. VALENZUELA, T., AGUILERA, A. & GALEAS, C. (2005). “Evaluación de la estabilidad mecánica de rellenos sanitarios en Chile”. XVI Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS-Chile y II Simposio Latinoamericano de Lodos y Biosólidos. Viña del Mar, Chile.

Plan Autónomo de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad de Madrid. Madrid, España. (1997-2005).

Plan Estratégico de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos “PEGIRSU”. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan. San Juan, Argentina. (2009).

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M. (1982). “Construcciones sobre rellenos”. Curso de estructuras de Tierra. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

SAGASETA, C. (1993). “Rellenos sanitarios: construcción y capacidad portante a largo plazo”. Curso sobre Geotecnia Ambiental. CEDEX. Madrid, España.

- SAGASETA, C. (1995). "General Report". Waste Disposal by Lanfill – Gree 93. Ed. Sarsby, Balkema, Rotterdam 1995, ISBN 90.
- SÁNCHEZ ALCITURRI J. M., PALMA J. H., SAGASETA C., CAÑIZAL J. (1993). "Geotecnia en vertederos sanitarios controlados". Residuos: Revista Técnica de Geotecnología Ambiental. Año III, N°02, marzo-abril 1993.
- SÁNCHEZ ALCITURRI J. M., PALMA, J. H., SAGASETA, C., CAÑIZAL, J. (1993). "Three years of deformation monitoring al Meruelo landfill". Proc. Green 93. Waste Disposal by Landfill. Bolton, U. K., 28 june – 1 july, 1993.
- SIMOES, G. F., CAMPOS, T. (1998). "Modelos de previsao de recalques em aterros sanitarios". XI Congresso Brasileiro de Mecánica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol. 3. Brasilia, Brasil.
- SOWERS G. F. (1968). "Foundation problems in sanitary lahd fills". Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE, Vol. 94, N° SA1, February.
- SOWERS G. F. (1973). "Settlemente of waste disposal fill". Proc 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, Rusia. Vol 2/2.
- TCHOBANOGLIOUS G., THEISEN H. & VIGIL S. (1994). "Gestión Integral de Residuos Sólidos", 1° edición. España: Mc Graw-Hill/Interamericana de España S.A., 1996 (1° edición en español 1994).
- TERZAGHI, K. (1943). "Theoretical soil mechanics". Jhon Wiley and Sons, New York 1943.
- TURCUMÁN, M., FIORE, J., VÁZQUEZ, G. (2009). "Estudio de un vertedero controlado. Análisis de su estabilidad a través de la estimación de la compresibilidad". II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos REDISA. Barranquilla, Colombia.

ZIMMERMAN, E., CHEN, W. H. & FRANKLIN A. G. (1977). “ Mathematical model for solid waste settlement”. Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material. ASCE, Univ. of Michigan, p. 210-226.